

เทคโนโลยีการแปลงสภาพ

ชีวมวล

ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม



พิมพ์ครั้งที่ 2

นภร ทัญยาวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล
ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม
พิมพ์ครั้งที่ 2

นคร ทิพย์าวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม

ISBN: 978-616-398-026-7
บรรณาธิการ: ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
ผู้แต่ง: นคร ทิพยวงศ์
เจ้าของและผู้จัดพิมพ์: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศูนย์บริหารงานวิจัย สำนักงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่
โทรศัพท์: 0 5394 3603-4
โทรสาร: 0 5394 3600
<http://cmupress.cmu.ac.th>
E-mail: cmupress.th@gmail.com
พิมพ์ครั้งที่ 1: มกราคม 2553
พิมพ์ครั้งที่ 2: ตุลาคม 2558
ราคา: 700 บาท

ข้อมูลทางบรรณานุกรม

นคร ทิพยวงศ์.

เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล.-- พิมพ์ครั้งที่ 2.-- เชียงใหม่ :
สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2558.

646 หน้า.

1. ชีวมวล. 2. พลังงานชีวมวล. I. ชื่อเรื่อง.

662.88

ISBN 978-616-398-026-7

ออกแบบและพิมพ์: เอส ที ทู ดี โซน

©สงวนลิขสิทธิ์ พ.ศ. 2537 ห้ามลอกเลียนแบบ ทำซ้ำ ดัดแปลง ส่วนหนึ่งส่วนใดของตำราเล่มนี้
รวมทั้งการจัดเก็บถ่ายทอไม่ว่ารูปแบบหรือวิธีการใดๆ ด้วยกระบวนการทางอิเล็กทรอนิกส์ การถ่ายภาพ
การบันทึกหรือวิธีการอื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาต

กรณีต้องการสั่งซื้อเป็นจำนวนมาก กรุณาติดต่อ สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

โทรศัพท์: 0 5394 3605 โทรสาร: 0 5394 3600

<http://cmupress.cmu.ac.th>, E-mail: cmupress.th@gmail.com

คำนิยม

ความต้องการพลังงานสะอาด และพลังงานชีวมวลก็เป็นหัวข้อหนึ่งที่อยู่ในความสนใจ สอดคล้องกับบริบทของประเทศ ที่เป็นสังคมที่มีความผูกพันเกี่ยวกับเกษตรกรรม ทำให้มีวัตถุดิบ และของเหลือทิ้งในแต่ละปีอยู่เป็นจำนวนมาก การพัฒนาและการใช้ประโยชน์จากชีวมวลเหล่านี้ จึงมีความสำคัญและจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาประเทศ อันจะนำไปสู่การพึ่งพาตนเอง ด้านพลังงาน รวมถึงสังคมที่ใช้พลังงานสะอาด

เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล เป็นหนังสือเล่มหนึ่ง ซึ่งทรงคุณค่าทางวิชาการ โดย ผู้เขียน มีความพากเพียร พยายามที่จะถ่ายทอดองค์ความรู้ และประสบการณ์ โดยมีรายละเอียด ในแต่ละขั้นตอน นับแต่ แหล่งชีวมวล องค์ประกอบและสมบัติต่างๆ ของชีวมวล การพัฒนา เชื้อเพลิงอัดแท่ง หลักการและกระบวนการในการแปลงสภาพชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงในรูปแบบ ต่างๆ รวมถึงการผลิตวัสดุภัณฑ์จากชีวมวล ซึ่งในแต่ละขั้นตอนผู้เขียนได้สอดแทรกตัวอย่าง การคำนวณ และขยายความในเชิงลึก ช่วยให้ผู้อ่านสามารถติดตามเนื้อหา และเข้าใจเทคโนโลยี ที่เกี่ยวข้อง ได้อย่างชัดเจน นอกจากนี้ผู้เขียนยังได้เสนอทิศทางการวิจัยในอนาคต

หนังสือเล่มนี้มีการเขียนที่เชื่อมโยงกันในแต่ละบท ทำให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจหลักการ เฉพาะในแต่ละเรื่อง และการนำเทคนิคต่างๆ มาประยุกต์ใช้ร่วมกัน อันจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง แก่ผู้ที่ศึกษา นักวิจัย และผู้ที่สนใจงานทางด้านเทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล

ศาสตราจารย์ ดร. ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์
บรรณาธิการ

ตุลาคม 2558

คำนำ

ในการตีพิมพ์ครั้งที่ 1

การเพิ่มขึ้นของประชากรโลกอย่างต่อเนื่อง กระตุ้นความต้องการอย่างเร่งด่วนในการจัดหาพลังงาน และวัตถุดิบ สำหรับการสนองความต้องการพื้นฐานของมนุษยชาติ ในการพัฒนาอย่างยั่งยืนไปในอนาคต ปริมาณอันมีอยู่อย่างจำกัดของแหล่งทรัพยากรพื้นฐาน กำลังถูกบริโภคให้ลดน้อยลง การค้นคว้าหาแหล่งพลังงาน และวัตถุดิบทางเลือกใหม่ และการใช้แหล่งทรัพยากรหมุนเวียนในปริมาณมหาศาลมาทดแทน จึงมีความสำคัญยิ่งในการดำรงการพัฒนาเศรษฐกิจสังคมในปัจจุบัน

ชีวมวลเป็นหนึ่งในแหล่งวัตถุดิบและพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญที่สุด มีศักยภาพสามารถใช้ทดแทนแหล่งปิโตรเลียมได้ทั้งหมด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แหล่งชีวมวลมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปในโลก และมีความหลากหลายตามลักษณะภูมิศาสตร์

การแปลงสภาพชีวมวล (biomass conversion) เป็นศาสตร์และเทคโนโลยีที่สำคัญสำหรับวิศวกร นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษาระดับอุดมศึกษา และผู้สนใจทั่วไป ในสาขาพลังงานหมุนเวียนที่สามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการสร้างความเข้าใจ การประกอบอาชีพวิศวกรในภาคอุตสาหกรรม นักวิทยาศาสตร์ หรือการเป็นนักวิจัยในสายเทคโนโลยีพลังงานได้

เนื้อหาของเทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวลมีความหลากหลายและพัฒนาอยู่ตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากการทำวิจัยอย่างกว้างขวาง และอย่างต่อเนื่อง หนังสือหรือตำราอ้างอิงที่มีอยู่น้อยส่วนใหญ่เป็นภาษาต่างประเทศ และหนังสือหรือตำราอ้างอิงที่ใช้ประกอบการเรียนการสอนค่อนข้างจะอ่านเข้าใจได้ยาก ดังนั้น เพื่อช่วยให้นักศึกษาปรับพื้นฐานและติดตามเนื้อหาได้ดี ตำราเล่มนี้จึงถูกจัดทำขึ้น ซึ่งอยู่ในลักษณะของการบรรยายสรุปเนื้อหา รวมทั้งมีตาราง และภาพประกอบที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก เพื่อให้เข้าใจได้ลึกซึ้งยิ่งขึ้น โดยได้ใช้สอนในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และได้ปรับปรุงเพิ่มเติมมาตลอด อย่างไรก็ตาม ผู้จัดทำยินดีรับคำเสนอแนะ และคำวิจารณ์ต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปปรับปรุงและแก้ไขในโอกาสต่อไป

นคร ทิพย์วงศ์
มกราคม 2553

คำนำ

ในการตีพิมพ์ครั้งที่ 2

กระแสความสนใจของสังคมในประเด็น พลังงาน ยังคงเข้มแข็งและไหลวนอย่างมีพลวัตต่อเนื่อง ทั้งในระดับท้องถิ่น ระดับชาติ และระดับโลก และคงต้องสะท้อนกันต่อไป กับผลกระทบจากการแกว่งของราคาน้ำมัน ไฟฟ้า ก๊าซเชื้อเพลิง และพลังงานอื่นๆ ต่อชีวิตความเป็นอยู่ประจำวันของทุกๆ คน ที่หนีไปไม่พ้น เพราะพลังงานเกี่ยวข้องกับโดยตรง กับการพัฒนาเศรษฐกิจและความศิวิไลซ์ของมนุษยชาติ คำคุ้นเคย เช่น พลังงานหมุนเวียน พลังงานทางเลือก เชื้อเพลิงสะอาด ประสิทธิภาพพลังงาน การพัฒนาที่ยั่งยืน สังคมคาร์บอนต่ำ กลับมามีชีวิตชีวาอีกครั้ง และหวังว่าจะมีโอกาสหยั่งรากฝังลึกลงไปในชีวิตประจำวันของสังคมโดยรวมได้ในที่สุด เราคงต้องเตรียมพร้อมในการรับมือกับสถานการณ์วิกฤตพลังงาน และการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศโลกอันใกล้นี้ ด้วยสติปัญญาและกำลังความสามารถที่สั่งสมมาตามแนวปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง และสอดคล้องกับคำสอนของพระพุทธองค์ให้อยู่รอดปลอดภัยไปได้ แบบมีภูมิคุ้มกัน

ชีวมวลและพลังงานชีวภาพ เป็นส่วนหนึ่งของคำตอบที่ช่วยในการแก้ปัญหาและรับมือกับมรสุมของโลกใหม่นี้ได้ การแปลงสภาพชีวมวลเพื่อประโยชน์ทางพลังงานและวัสดุภัณฑ์ เป็นองค์ความรู้ที่สำคัญในหัวข้อย่อยของพลังงานหมุนเวียน หนังสือเล่มนี้ ถูกแต่งและเรียบเรียงขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอน การวิจัย เป็นพื้นฐานความรู้ ในการอ้างอิงและการนำไปปฏิบัติได้จริง

เนื้อหาของหนังสือเล่มนี้ ยังคงโครงสร้างสอดคล้องกับเล่มเดิมในการพิมพ์ครั้งแรก แต่มีการปรับปรุงเพิ่มเติมเนื้อหาจากการตีพิมพ์ครั้งแรกมากขึ้น โดยมีการปรับเพิ่มบทใหม่ ที่เน้นสมบัติของชีวมวลโดยเฉพาะ และที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมีพลาสมา รวมถึง การเพิ่มแบบฝึกหัดท้ายเล่ม นอกจากนี้ ในแต่ละบท มีการเพิ่มเนื้อหาพื้นฐาน และเนื้อหาในเชิงลึก มีการขยายความมากขึ้นเพิ่มเติมตัวอย่างแสดงการคำนวณ และนำเสนอกรณีศึกษาจากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมาของผู้เขียน รวมถึงแนะนำแนวทางการศึกษาค้นคว้าและการวิจัยเพิ่มเติมในอนาคตด้วย

ขอขอบคุณในความสนใจ ความกรุณา คำชี้แนะ แนะนำ และคำวิจารณ์ต่างๆ มา ณ ที่นี้ด้วยครับ

นคร ทิพย์วงศ์
สิงหาคม 2558

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน อุทยานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย รวมถึง มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำหรับการสนับสนุนวิจัย การทำงานวิจัย และการส่งเสริมทางวิชาการ อย่างเข้มแข็งต่อเนื่อง

ขอขอบคุณ สำนักพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น) ที่อนุญาตให้พิมพ์หนังสือฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม นี้ได้

ขอขอบคุณ ศูนย์บริหารงานวิจัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และทีมงานสำนักพิมพ์ทุกท่านที่มีส่วนช่วยในการเตรียม และจัดพิมพ์หนังสือเล่มนี้

ขอขอบคุณ คณาจารย์และผู้ร่วมงานในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้การสนับสนุน และร่วมกันสร้างบรรยากาศสิ่งแวดล้อมการทำงานที่น่าชื่นใจ

ขอขอบคุณ อาจารย์อาวุธโส อาจารย์พีเลี้ยง ผู้ร่วมงานวิจัย และนักศึกษาผู้ช่วยวิจัย ทั้งในอดีตและปัจจุบัน ทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณแม่ฉลุย ทิพย์าวงศ์ รวมถึงขอบคุณ คุณภรรยา ดร. กรกฏ ไยบัวเทศ ทิพย์าวงศ์ คุณลูก ด.ช. นโม ทิพย์าวงศ์ และ ด.ญ. ณิชมน ทิพย์าวงศ์ และญาติผู้ใหญ่ที่เคารพ และ พี่ๆ น้องๆ ในครอบครัวทุกท่าน สำหรับ ความสุขของชีวิต ที่ทำให้มีคุณค่าในการดำเนินไปอย่างสร้างสรรค์

กุศลจากงานนี้ ขออุทิศแด่ คุณพ่อนัด ทิพย์าวงศ์ ผู้ล่วงลับไปแล้ว

ด้วยสำนึกในพระคุณสูงสุดของบิดามารดา
ผู้ให้ชีวิต อบรมเลี้ยงดู

พระคุณของครูอาจารย์ ผู้ประสากวิชา สอน
คุณของคู่ชีวิต ครอบครัว และกัลยาณมิตร ผู้ให้กำลังใจ
รวมถึง น้ำใจของนักศึกษา ผู้มีโอกาสเรียนรู้
สร้างสรรคงานร่วมกัน

පරිච්ඡේදය

สารบัญ

	หน้า
คำนิยม	I
คำนำ	II
กิตติกรรมประกาศ	IV
สารบัญ	VII
สารบัญรูป	XI
สารบัญตาราง	XIX
บทที่ 1 พลังงานชีวภาพ	
1.1 พลังงานเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน	2
1.2 พลังงานหมุนเวียน	3
1.3 พลังงานชีวมวล	4
1.4 แรงขับเคลื่อนและสิ่งกระตุ้นในการพัฒนาแหล่งชีวมวล	5
1.5 เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล	7
1.6 พื้นฐานเคมีและสสารสัมพันธ์	18
1.7 แนวทางการวิจัยในอนาคต	30
บรรณานุกรม	31
บทที่ 2 ชีวมวล	
2.1 แหล่งชีวมวล	34
2.2 ศักยภาพชีวมวลและการใช้ประโยชน์เชิงพลังงาน	36
2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบชีวมวล	40
2.4 คุณสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล	64
2.5 การจัดกลุ่มและระดับของเชื้อเพลิง	69
2.6 กรณีศึกษา: การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของไมยราบยักษ์	73
2.7 แนวทางการวิจัยในอนาคต	82
บรรณานุกรม	83
บทที่ 3 การอัดเพิ่มความหนาแน่น	
3.1 บทนำ	88
3.2 หลักการอัดให้เป็นก้อน	88
3.3 การอัดร้อนที่ความดันสูง	96

	หน้า
3.4 การอัดเยื่อที่ความดันต่ำ	110
3.5 การทดสอบคุณสมบัติของเชื้อเพลิงอัดแท่ง	113
3.6 กรณีศึกษา: ชีวมวลอัดเม็ดจากเศษข้าวโพด	115
3.7 กรณีศึกษา: ศักยภาพเชื้อเพลิงอัดแท่งจากขยะ	119
3.8 แนวทางการวิจัยในอนาคต	124
บรรณานุกรม	125
บทที่ 4 การเผาไหม้	
4.1 บทนำการเผาไหม้	132
4.2 การวิเคราะห์การเผาไหม้	132
4.3 กลไกการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	140
4.4 การใช้ประโยชน์การเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	159
4.5 ระบบการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	162
4.6 กรณีศึกษา: การเผาไหม้ชีวมวลทดแทนก๊าซหุงต้มในการอบแห้งลำไย	181
4.7 กรณีศึกษา: การดักจับอนุภาคมลสารจากการเผาไหม้ชีวมวล	188
4.8 แนวทางการวิจัยในอนาคต	192
บรรณานุกรม	193
บทที่ 5 แกสซิฟิเคชัน	
5.1 กระบวนการแกสซิฟิเคชัน	198
5.2 เคมีจลน์ของกระบวนการแกสซิฟิเคชัน	203
5.3 การจำลองแบบกระบวนการแกสซิฟิเคชัน	209
5.4 ชนิดของเตาแกสซิฟายเออร์	216
5.5 การออกแบบและประเมินระบบกระบวนการ	225
5.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	235
5.7 การกำจัดน้ำมันดิน	238
5.8 ตัวอย่างระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	242
5.9 การผลิตเมทานอล	250
5.10 การผลิตเชื้อเพลิงเหลวสังเคราะห์	252
5.11 กรณีศึกษา: ก๊าซเชื้อเพลิงจากเศษวัสดุเหลือใช้	254
5.12 กรณีศึกษา: ก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลสำหรับอุตสาหกรรมอาหาร	258
5.13 แนวทางการวิจัยในอนาคต	260
บรรณานุกรม	262
บทที่ 6 ไพโรไลซิส	
6.1 กระบวนการไพโรไลซิส	268

	หน้า
6.2 ประเภทของปฏิกิริยาไพโรไลซิส	269
6.3 กลไกการไพโรไลซิสสององค์ประกอบชีวมวล	271
6.4 การจำลองแบบกระบวนการไพโรไลซิส	273
6.5 ชนิดของเตาปฏิกรณ์	278
6.6 การผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ	279
6.7 การผลิตถ่านชาร์	298
6.8 การผลิตถ่านไฮโดรชาร์ด้วยน้ำร้อนความดันสูง	308
6.9 กรณีศึกษา: การผลิตถ่านชาร์ด้วยเตาแบบไอลอยธรรมชาติ	311
6.10 กรณีศึกษา: การผลิตถ่านไฮโดรชาร์จากกากตะกอนน้ำเสีย	314
6.11 แนวทางการวิจัยในอนาคต	317
บรรณานุกรม	318
บทที่ 7 ปฏิกิริยาเคมีพลาสมา	
7.1 บทนำ	322
7.2 พื้นฐานทฤษฎีพลาสมา	326
7.3 การจำลองแบบของระบบเคมีพลาสมา	336
7.4 การสร้างพลาสมา	338
7.5 ตัวอย่างเทคโนโลยีพลาสมา	339
7.6 แนวทางการประยุกต์ใช้	345
7.7 กรณีศึกษา: การใช้พลาสมาช่วยเผาทำลายขยะอิเล็กทรอนิกส์	347
7.8 กรณีศึกษา: การใช้พลาสมาช่วยไพโรไลซิสขยะเชื้อเพลิง	350
7.9 กรณีศึกษา: การใช้พลาสมาช่วยรีฟอร์มก๊าซชีวภาพ	353
7.10 แนวทางการวิจัยในอนาคต	357
บรรณานุกรม	359
บทที่ 8 การผลิตเอทานอล	
8.1 เอทานอล	362
8.2 กระบวนการผลิตเอทานอล	363
8.3 ชนิดของวัตถุดิบตั้งต้น	365
8.4 การเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการ	372
8.5 การหมัก	378
8.6 การกลั่น	385
8.7 กรณีศึกษา: การผลิตน้ำตาลจากไม้ไผ่	392
8.8 แนวทางการวิจัยในอนาคต	397
บรรณานุกรม	399

บทที่ 9 การผลิตก๊าซชีวภาพและไฮโดรเจน	
9.1 บทนำ	402
9.2 กระบวนการหมักย่อยไร้อากาศ	405
9.3 อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์	408
9.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ตามทฤษฎี	409
9.5 ปัจจัยสำคัญในกระบวนการ	410
9.6 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	417
9.7 ชนิดของถังปฏิกรณ์	418
9.8 แหล่งวัตถุดิบตั้งต้น	425
9.9 การปรับปรุงคุณภาพก๊าซชีวภาพ	441
9.10 การผลิตไฮโดรเจนชีวภาพ	454
9.11 กรณีศึกษา: การเพิ่มปริมาณมีเทนด้วยคอลัมน์อัดตัว	459
9.12 กรณีศึกษา: การประยุกต์ใช้ไบโอมีเทนกับเตาหุงต้มในครัวเรือน	462
9.13 แนวทางการวิจัยในอนาคต	468
บรรณานุกรม	470
บทที่ 10 น้ำมันชีวภาพ	
10.1 น้ำมันพืชและไขมันสัตว์	474
10.2 กระบวนการปรับปรุงคุณภาพ	482
10.3 ผลิตภัณฑ์จากการผลิตไบโอดีเซล	496
10.4 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล	498
10.5 กรณีศึกษา: การผลิตไบโอดีเซลต่อเนื่องด้วยความร้อนจากไมโครเวฟ	499
10.6 แนวทางการวิจัยในอนาคต	504
บรรณานุกรม	506
บทที่ 11 วัสดุภัณฑ์ชีวภาพ	
11.1 บทนำ	510
11.2 เทคโนโลยีวัสดุฐานชีวมวล	511
11.3 โมเลกุลสำคัญสำหรับสารเคมีตั้งต้น	512
11.4 ตัวอย่างโพลีเมอร์และพลาสติกชีวภาพ	515
บรรณานุกรม	519
แบบฝึกหัด	520
อภิธานศัพท์	528
ดัชนี	533
ภาคผนวก: ข้อมูลเทอร์โมเคมีของสารเคมี	535

สารบัญรูป

รูปที่	คำอธิบาย	หน้า
1.1	แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล	4
1.2	กระบวนการแปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้	9
1.3	ตัวอย่างโรงไฟฟ้าจากเศษไม้	11
1.4	ระบบวัฏจักรร่วมการแกสซิไฟชีวมวล	14
1.5	ระบบการผลิตน้ำมันสังเคราะห์ฟิสเซอร์โทรฟ	17
1.6	การเกิดปฏิกิริยาของก๊าซสัมบูรณ์และเปลี่ยนไปยังสภาวะสุดท้ายของปฏิกิริยา	24
2.1	โครงสร้างไฟเบอร์ของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน	41
2.2	โครงสร้างของเซลลูโลส	42
2.3	โครงสร้างของลิกนิน	43
2.4	โครงสร้างของตัวอย่างสารสกัดได้จากชีวมวล	43
2.5	รูปร่างของเศษไม้ที่เกี่ยวกับอุณหภูมิการหลอมตัว	61
2.6	ค่าความสามารถในการนำความร้อนของไม้ตามแนวและขวางแนวเส้นใยชีวมวล	65
2.7	การเปรียบเทียบพื้นฐานการนำเสนอสวนประกอบของเชื้อเพลิง	66
2.8	แผนภูมิแวนครีเวน แสดงตำแหน่งของเชื้อเพลิงต่างๆ เทียบกัน	70
2.9	ลักษณะชีวมวลตามอัตราส่วนของส่วนประกอบลิกนินเซลลูโลส	71
2.10	แผนภูมิสามเหลี่ยมสารประกอบ C-H-O ของชีวมวล	72
2.11	ค่าการแปลงน้ำหนักของไมยราบยักษ์ตามอุณหภูมิภายใต้ไนโตรเจน	77
2.12	อัตราการสลายของไมยราบยักษ์ทางความร้อนตามอุณหภูมิภายใต้ไนโตรเจน	77
2.13	อัตราการสลายของไมยราบยักษ์กับอุณหภูมิที่ค่าแปลงน้ำหนักต่างๆ	79
2.14	ค่าการแปลงน้ำหนักของไมยราบยักษ์ตามอุณหภูมิภายใต้สภาวะตัวกลางเป็นอากาศ	80
2.15	อัตราการสลายของไมยราบยักษ์ตามอุณหภูมิภายใต้สภาวะตัวกลางเป็นอากาศ	80
2.16	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการสลายของไมยราบยักษ์ในอากาศกับอุณหภูมิ ที่ค่าการแปลงน้ำหนักต่างๆ	81

	หน้า	
3.1	ลักษณะการผสมกัน	89
3.2	สภาวะการรวมตัวกันของอนุภาค	91
3.3	กลไกการเปลี่ยนรูปของอนุภาคผงภายใต้การบีบอัด	92
3.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นที่ต้องการและพลังงานจำเพาะในการอัด	101
3.5	ผลของการอุ่นให้ความร้อนต่อความดันที่ใช้ในการอัดแท่ง	101
3.6	ผลของอุณหภูมิต่อความแข็งแรงในการรับแรงกดที่ความดันต่างๆ	102
3.7	ผลของความดันต่อความหนาแน่นของแกลบอัดแท่ง	103
3.8	เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบกระบอกสูบ	106
3.9	เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบสกรู	107
3.10	เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบให้ความร้อนด้านนอก	107
3.11	เครื่องอัดแท่งเชื้อเพลิงแบบกลิ้ง	108
3.12	เครื่องอัดเม็ดเชื้อเพลิง	108
3.13	การบีบอัดชีวมวลโดยใช้ตัวประสาน	110
3.14	ชุดอัดเม็ดชีวมวล	116
3.15	การขยายตัวของชีวมวลอัดเม็ดที่สภาวะอัดต่างๆ	117
3.16	ความหนาแน่นอัดของชีวมวลอัดเม็ด	117
3.17	ความหนาแน่นพ่อนของชีวมวลอัดเม็ดสำหรับซัง ลำต้น และเปลือกข้าวโพด	118
3.18	ความคงทนของชีวมวลอัดเม็ด	119
3.19	กระบวนการผลิตขยะให้เป็นเชื้อเพลิง RDF	122
3.20	เครื่องอัดไฮดรอลิกอย่างง่าย	123
3.21	ตัวอย่างเชื้อเพลิงอัดแท่ง	123
4.1	ปัจจัยที่จำเป็นในการเกิดการเผาไหม้	132
4.2	สารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์จากกระบวนการเผาไหม้	133
4.3	กลไกกระบวนการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงแข็ง	140
4.4	กลไกการเกิดเถ้าระหว่างการเผาไหม้ชีวมวล	156
4.5	กลไกการปล่อยโลหะหนักจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงแข็ง	158
4.6	การเก็บและเตรียมชีวมวลก่อนป้อนเข้าเตา	159
4.7	ตัวอย่างเตาในครัวเรือนสำหรับหุงหาอาหาร	163
4.8	ตัวอย่างเตาไม้ฟืนให้ความอบอุ่น	163
4.9	ตัวอย่างเตาดัทช์	164
4.10	ตัวอย่างเตาสโตเกอร์แบบตะกรับเลื่อน	166
4.11	ตัวอย่างเตาสโตเกอร์แบบตะกรับเอียง	166
4.12	ตัวอย่างเตาแบบไหลลง	168
4.13	ตัวอย่างเตาเผาแบบหมุน	168

	หน้า	
4.14	ตัวอย่างการกระจายขนาดอนุภาค	170
4.15	ตัวอย่างการกระจายขนาดอนุภาคผ่านตะแกรงร่อน	170
4.16	ตัวอย่างระบบเตาเผาไหม้แบบแขวนลอย	173
4.17	ตัวอย่างเตาเผาแบบไซโคลน	174
4.18	การไหลของก๊าซผ่านชั้นกลุ่มเม็ดของแข็ง	175
4.19	สัมประสิทธิ์แรงต้านของทรงกลม	178
4.20	เตาแบบชั้นของไหล	180
4.21	เตาได้หวั่นและกระบวนการอบแห้งลำไยแบบดั้งเดิม	182
4.22	ห้องลมร้อนของเครื่องอบลำไย	183
4.23	ลักษณะการติดตั้งอุปกรณ์และกระบวนการของเครื่องอบแห้งลำไยต้นแบบ	186
4.24	แผนภูมิการสมดุลพลังงานในการอบแห้งลำไย	187
4.25	โครงสร้างของเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิตแบบเส้นลวดและแผ่นบางซ้อนกัน	189
4.26	ประสิทธิภาพการตกตะกอน	191
4.27	การแจกแจงขนาดของอนุภาคที่เข้าและออกเครื่องตกตะกอน	191
5.1	การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงและการนำไปใช้ประโยชน์	199
5.2	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบก๊าซไหลขึ้น	218
5.3	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบก๊าซไหลลง	219
5.4	ลักษณะคอคอดและการจ่ายลมของเตาแบบก๊าซไหลลง	220
5.5	โซนาการเกิดปฏิกิริยากับอากาศ	221
5.6	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบก๊าซไหลขวาง	222
5.7	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์แบบชั้นของไหล	223
5.8	ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์แบบชั้นของไหลหมุนวน	224
5.9	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบ Lurgi	242
5.10	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบ Imbert	243
5.11	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบปรับปรุงจาก Imbert	243
5.12	ตัวอย่างระบบ IGCC	244
5.13	ตัวอย่างระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงในประเทศจีน	245
5.14	หลักการทำงานของระบบชั้นของไหลแบบหมุนเวียนภายในอย่างรวดเร็ว	246
5.15	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบ stratified	247
5.16	กระบวนการผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบหลายขั้นตอน	247
5.17	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบหลายขั้นตอน	248
5.18	ลักษณะของเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงแบบลูกผสม	249
5.19	ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิง	249
5.20	ตัวอย่างเตาปฏิกรณ์ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากแก๊ส	250
5.21	ขั้นตอนการสังเคราะห์น้ำมันจากก๊าซธรรมชาติ	252

	หน้า	
5.22	ชุดระบบทดสอบแกสซิพีเคชั่นชีวมวล	255
5.23	ผลของก๊าซตัวกลางต่อส่วนประกอบก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่างๆ	256
5.24	ผลของก๊าซตัวกลางต่อค่าความร้อน ประสิทธิภาพคาร์บอน และปริมาณก๊าซที่ได้	256
5.25	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อส่วนประกอบก๊าซเชื้อเพลิงที่อุณหภูมิต่างๆ	257
5.26	ผลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อค่าความร้อน ประสิทธิภาพคาร์บอน และปริมาณก๊าซที่ได้	257
5.27	เตาแกสซิฟายเออร์และหัวเผาที่ใช้	259
6.1	กระบวนการแตกตัวทางความร้อนของชีวมวล	268
6.2	ปริมาณผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสไม้แบบเร็ว	270
6.3	การสูญเสียมวลขององค์ประกอบชีวมวลแต่ละชนิดในการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิต่างๆ	273
6.4	การนำน้ำมันไพโรไลซิสจากชีวมวลไปใช้ประโยชน์	279
6.5	ลักษณะการไพโรไลซิสแบบ Ablative	281
6.6	เตาไพโรไลเซอร์แบบ Ablative	285
6.7	เตาไพโรไลเซอร์แบบ Ablative vortex	286
6.8	เตาไพโรไลเซอร์แบบ Rotating cone	287
6.9	เตาไพโรไลเซอร์แบบ Fluid bed	287
6.10	เตาไพโรไลเซอร์แบบ Circulating fluid bed	288
6.11	เตาไพโรไลเซอร์แบบ Entrained flow	289
6.12	เตาไพโรไลเซอร์แบบ Vacuum moving bed	289
6.13	กระบวนการไพโรไลซิสและการใช้งานผลผลิตจากกระบวนการ	291
6.14	การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันดิบชีวภาพจากกระบวนการไพโรไลซิส	291
6.15	ตัวอย่างปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันดิบชีวภาพ	294
6.16	ผลของอุณหภูมิต่อคุณสมบัติของถ่านชาร์	300
6.17	ผลของความดันและการไหลของก๊าซต่อการเกิดถ่านชาร์	300
6.18	เตาเผาถ่านดินเหนียวแบบดั้งเดิม	302
6.19	เตาเผาถ่านแบบ Interlock	303
6.20	เตาเผาถ่านแบบ Herreshoff	303
6.21	เตาเผาถ่านแบบ Pillard	304
6.22	เตาเผาถ่านแบบ Fluidized bed	304
6.23	เตาเผาถ่านแบบ Thomson	305
6.24	เตาเผาถ่านแบบ Cornell	305
6.25	เตาเผาถ่านแบบ Keil-Pfaulder	306
6.26	เตาเผาถ่านแบบ Carbo-gas	306

	หน้า	
6.27	เตาเผาถ่านแบบไหลยธรรมชาติ	307
6.28	การทำงานของเตาเผาถ่านแบบไหลยธรรมชาติ	307
6.29	แผนภูมิสถานะของน้ำ	309
6.30	การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและความร้อนจำเพาะของน้ำ รอบสภาวะวิกฤต	310
6.31	การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิภายในเตาแบบไหลยธรรมชาติ	313
6.32	แบบเตาปฏิกรณ์น้ำร้อนความดันสูง	315
6.33	แผนภูมิแวนครีเวนของกากตะกอนและถ่านไฮโดรคาร์ที่ได้ เทียบกับ ถ่านหินและเซลลูโลส	316
7.1	โครงสร้างของสสารในสถานะหลักต่างๆ	322
7.2	ปรากฏการณ์พลาสมา	323
7.3	การแบ่งประเภทพลาสมาตามช่วงความหนาแน่นและอุณหภูมิอิเล็กตรอน	325
7.4	ระดับพลังงานอิเล็กตรอนในอะตอม	326
7.5	ลักษณะของดิสชาร์จเรืองแสง	340
7.6	ลักษณะของชุดปฏิกรณ์พลาสมาแบบอาร์ค	341
7.7	ลักษณะของชุดปฏิกรณ์พลาสมาแบบไกลดิงอาร์ค	343
7.8	ลักษณะของชุดปฏิกรณ์พลาสมาแบบโคโรนาดีสชาร์จ	343
7.9	ลักษณะของชุดปฏิกรณ์พลาสมาแบบดิสชาร์จข้ามฉนวน	344
7.10	ลักษณะของชุดปฏิกรณ์พลาสมาแบบไมโครเวฟ	345
7.11	ส่วนประกอบสำคัญของหัวเผาพลาสมาต้นแบบ	348
7.12	การกระจายอุณหภูมิก๊าซร้อนในแนวแกนของเปลวพลาสมา	349
7.13	การกระจายอุณหภูมิก๊าซร้อนในแนวรัศมีของเปลวพลาสมา	349
7.14	การเปลี่ยนแปลงของขยะอิเล็กทริกจากการเผาด้วยพลาสมา	350
7.15	ชุดทดสอบไมโครเวฟพลาสมาสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสขยะ	351
7.16	ผลการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลต่อผลิตภัณฑ์ก๊าซ H_2	353
7.17	ผลการปรับเปลี่ยนอัตราการไหลต่อผลิตภัณฑ์ก๊าซ CO	353
7.18	ลักษณะชุดการทดลอง	355
7.19	ลักษณะเตาปฏิกรณ์พลาสมาแบบไกลดิงอาร์ค	355
7.20	การเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เทียบกับสัดส่วน ของ CH_4/O_2	356
7.21	การเกิดก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์เทียบกับสัดส่วน ของ CH_4/O_2	357
8.1	ตัวอย่างแผนภูมิโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง	364
8.2	กระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย	366

	หน้า	
8.3	สูตรโมเลกุลเหมือนกันแต่สูตรโครงสร้างแตกต่างกัน	367
8.4	ลักษณะเซลล์โลสที่ได้จากพืช	370
8.5	ลักษณะการจัดเรียงตัวของโมเลกุลกลูโคสในเซลล์โลส	370
8.6	ลักษณะสูตรโครงสร้างของเฮมิเซลล์โลส	370
8.7	สูตรโครงสร้างของลิกนิน	371
8.8	ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในถังหมัก	378
8.9	กระบวนการหมักกลูโคสเปลี่ยน glucose ไปเป็น pyruvate	379
8.10	การหมักเปลี่ยนกลูโคส 1 โมล ไปเป็นเอทานอล 2 โมล	379
8.11	วิธีการสังเคราะห์ทางชีวภาพสำหรับการหมักเอทานอลจากก๊าซสังเคราะห์	382
8.12	การกลั่นแยกของผสม	385
8.13	อุปกรณ์พื้นฐานสำหรับการกลั่นแยกของผสม	386
8.14	การกลั่นลำดับส่วน	387
8.15	หอกลิ้นแบบสถานะเดียว	389
8.16	หอกลิ้นแบบหลายสถานะตรง	389
8.17	หอกลิ้นแบบหลายสถานะอ้อม	390
8.18	การดูดซับน้ำจากสารละลายเอทานอลในสถานะไอ โดยใช้หอดูดซับแบบสลับความดัน	391
9.1	การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบอับอากาศไร้ออกซิเจนและผลผลิตที่ได้	402
9.2	การแปลงอินทรีย์สารให้กลายเป็น CH ₄ และ CO ₂ ทางชีวภาพ	405
9.3	การลดขนาดโมเลกุลด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส	406
9.4	การเปลี่ยนสารอินทรีย์ขนาดเล็กให้เป็นกรดอินทรีย์	406
9.5	การผลิตมีเทนด้วยกระบวนการ methanogenesis	407
9.6	ลักษณะการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย	409
9.7	ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อการสร้างก๊าซชีวภาพจากชีวมวล	411
9.8	ตัวอย่างรูปแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	417
9.9	ตัวอย่างแบบถังหมักย่อยก๊าซชีวภาพ	418
9.10	กระบวนการผลิตมีเทนของบ่อไร้อากาศแบบคลุมบ่อ	419
9.11	ถังกวนต่อเนื่อง	419
9.12	ถังปฏิกรณ์แบบแอนาโรบิคคอนแทค	420
9.13	ถังกรองไร้อากาศ	421
9.14	ลักษณะของตัวกลางที่ใช้	421
9.15	ถังปฏิกรณ์แบบปลั๊กโฟว	422
9.16	การทำงานของถังปฏิกรณ์แบบขึ้นกากไหลขึ้นไร้อากาศ	423
9.17	การทำงานของถังปฏิกรณ์แบบขึ้นกากกรวดขยาย	424
9.18	กากกรวด	424

	หน้า	
9.19	ระบบกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำที่ไม่มีการวนน้ำกลับ	446
9.20	ระบบกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยน้ำที่มีการวนน้ำกลับ	446
9.21	ความสามารถในการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สภาวะต่างๆ	448
9.22	การดูดซึมคาร์บอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการเปลี่ยนแปลงความดัน	448
9.23	การแพร่กระจายของก๊าซผ่านเมมเบรน	450
9.24	การดักจับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เมมเบรนร่วมกับสารละลาย	450
9.25	กระบวนการไปโอโพโตไลซิสโดยตรง	456
9.26	กระบวนการไปโอโพโตไลซิสโดยอ้อม	456
9.27	กระบวนการหมักแสง	457
9.28	กระบวนการหมักมืด	458
9.29	ชุดปฏิกรณ์แบบคอลัมน์อัดตัว	460
9.30	พลาสติกบอลลในการเพิ่มพื้นที่สัมผัส	461
9.31	ความเข้มข้นของ CO ₂ ในก๊าซทางออกจากชุดปฏิกรณ์	461
9.32	ปริมาณ CO ₂ ที่รับได้ในแต่ละสารละลายที่เลือกใช้	462
9.33	ความเข้มข้นของ CH ₄ ในก๊าซทางออกจากชุดปฏิกรณ์	462
9.34	การไหลของก๊าซเชื้อเพลิงและอากาศในหัวเตาหุงต้ม	464
9.35	ชุดทดสอบเตาหุงต้ม	464
9.36	แผนการดำเนินงาน	465
9.37	ตัวอย่างผลการทดสอบเลือกขนาดมทพและความดันในการทำงานของเตา RB	466
10.1	ตัวอย่างพืชน้ำมันที่เพาะปลูกในประเทศไทย	474
10.2	ลักษณะการจับตัวของสารเติมพิเศษเพื่อทำให้เป็นสารแขวนลอย	484
10.3	กลไกการสลายตัวด้วยความร้อนของไตรกลีเซอไรด์	485
10.4	สมการเคมีปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันของกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์	487
10.5	ขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาผ่าน ไตร- ได- และโมโนกลีเซอไรด์	487
10.6	ลักษณะการแยกชั้นของเอสเตอ์กับกลีเซอริน	488
10.7	แผนภาพขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิงดีเซลชีวภาพของ Caro diesel	489
10.8	กลไกการเกิดปฏิกิริยาทรานเอสเตอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์โดยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นต่าง	490
10.9	ตัวอย่างถังปฏิกรณ์ทรานเอสเตอริฟิเคชันแบบ batch	493
10.10	ตัวอย่างถังปฏิกรณ์ทรานเอสเตอริฟิเคชันแบบต่อเนื่อง	494
10.11	ตัวอย่างกระบวนการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง	495
10.12	โครงสร้างทางเคมีของเอสเตอ์	496
10.13	ชุดผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่อง	501
10.14	ผลของอัตราส่วนเชิงโมลของน้ำมันต่อเมทานอลต่อการผลิตไบโอดีเซล	503
10.15	ผลของเวลาในการทำปฏิกิริยาต่อการผลิตไบโอดีเซล	503
10.16	ผลของความเข้มข้นตัวเร่งปฏิกิริยาต่อการผลิตไบโอดีเซล	504

	หน้า	
11.1	วิธีการแปลงวัตถุดิบชีวมวลเป็นโมโนเมอร์ เคมีภัณฑ์ และวัสดุชีวภาพ	511
11.2	สารตั้งต้นและเคมีภัณฑ์จากเอทานอล	512
11.3	เคมีภัณฑ์และวัสดุหลักจากแป้ง	514
11.4	สารตั้งต้นและเคมีภัณฑ์จากซูโครส	515
11.5	การทำให้เกิดกรดโพลีแลคติก	516
11.6	การทำให้เกิดกลุ่มไฮดรอกซิลในน้ำมันพืช	517

CTD ออชญา

สารบัญตาราง

ตารางที่	คำอธิบาย	หน้า
1.1	การเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปลงสภาพชีวมวล	8
1.2	การเปรียบเทียบลักษณะของการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อนหลัก	9
1.3	ข้อมูลสมรรถนะและการสาธิตกระบวนการแปลงสภาพชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงาน	10
1.4	คุณสมบัติสำคัญของเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการขนส่ง	16
1.5	ค่าความร้อนของการก่อเกิด ที่ 298 K	22
2.1	ศักยภาพพลังงานจากเศษวัสดุการเกษตรของประเทศไทย ปี 2552	38
2.2	ส่วนประกอบหลักของชีวมวล	41
2.3	กลุ่มโมเลกุลใหญ่ที่สร้างขึ้นเป็นชีวมวล	42
2.4	องค์ประกอบลิกโนเซลลูโลสของชีวมวลเปรียบเทียบ	44
2.5	องค์ประกอบแบบแยกธาตุของชีวมวลเปรียบเทียบ	48
2.6	องค์ประกอบแบบประมาณของชีวมวลเปรียบเทียบ	52
2.7	องค์ประกอบอนินทรีย์ของเศษชีวมวล	57
2.8	อุณหภูมิการหลอมตัวของเศษชีวมวลและโอกาสเกิดเถ้าหลอม	61
2.9	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติไมยราบยักษ์	76
2.10	การเปรียบเทียบผลการสลายตัวทางความร้อนในไนโตรเจนของชีวมวลชนิดต่างๆ	78
2.11	การเปรียบเทียบผลการสลายตัวทางความร้อนในอากาศของชีวมวลชนิดต่างๆ	81
3.1	องค์ประกอบของชีวมวลตัวอย่าง	104
3.2	พลังงานที่ใช้ (kWh/ton) ในการอัดแท่งชีวมวล	109
3.3	ประเภทของเชื้อเพลิงจากขยะ RDF ตามมาตรฐาน ASTM	121
3.4	ส่วนประกอบของขยะที่รวบรวมได้	122
3.5	ส่วนประกอบและสมบัติของเชื้อเพลิงแท่งผสม	124
4.1	ปริมาณผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้ตามทฤษฎี	134
4.2	ตัวอย่างการคำนวณหาปริมาณผลิตภัณฑ์จากการเผาไหม้	134

		หน้า
4.3	ส่วนประกอบของอากาศ	135
4.4	สัมประสิทธิ์ในการหาเอนทัลปีของก๊าซ	136
4.5	ค่าคงที่ของกระบวนการไฟโรไลซิสเชื้อเพลิง	144
4.6	อุณหภูมิจุดติดไฟของเชื้อเพลิง	146
4.7	ตัวอย่างสภาวะระบบหม้อไอน้ำสโตกเกอร์อุตสาหกรรม	167
4.8	สมรรถนะของเครื่องอบลำไยต้นแบบ	187
4.9	ผลการทดสอบประสิทธิภาพเครื่องตากตะกอนไฟฟ้าสถิต	192
5.1	ตัวอย่างส่วนประกอบก๊าซเชื้อเพลิงชีวมวล	198
5.2	ตัวอย่างค่าตัวแปรเคมีจลน์ปฏิกิริยาบูดบูดสำหรับถ่านชาร์	205
5.3	ตัวอย่างค่าตัวแปรเคมีจลน์ปฏิกิริยาน้ำแปลงก๊าซสำหรับถ่านชาร์	205
5.4	การเปรียบเทียบลักษณะพื้นฐานและการทำงานของเตาปฏิกรณ์	224
5.5	การเปรียบเทียบเตาแบบชั้นนิ่งกับเตาแบบชั้นของไหล	225
5.6	ภาวะเตาสำหรับเตาชั้นเชื้อเพลิงนิ่งแบบก๊าซไหลลง	231
5.7	วิธีการกำจัดน้ำมันดิน	238
5.8	ประสิทธิภาพการดักฝุ่นละอองและน้ำมันดิน	240
5.9	ข้อมูลทางเทคนิคของการทำงานของเตา	260
6.1	ลักษณะของกระบวนการที่สำคัญของไฟโรไลซิส	271
6.2	ตัวอย่างปัจจัยเคมีจลน์ของการไฟโรไลซิสส่วนประกอบชีวมวล	276
6.3	ส่วนประกอบของน้ำมันดิบชีวภาพ	280
6.4	คุณสมบัติทั่วไปของน้ำมันดิบชีวภาพจากไม้	281
6.5	การถ่ายเทความร้อนและประเด็นที่น่าสนใจของเตาแต่ละแบบ	282
6.6	การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างน้ำมันดิบและน้ำมันดิบชีวภาพ	292
6.7	สมบัติอันไม่พึงประสงค์ของน้ำมันดิบชีวภาพ	292
6.8	การเปรียบเทียบกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันดิบชีวภาพ	295
6.9	สมบัติของน้ำมันดิบชีวภาพก่อนและหลังการปรับปรุงคุณภาพ	297
6.10	สมบัติของน้ำ	310
6.11	ปริมาณและส่วนประกอบของถ่านชาร์ที่ได้	313
6.12	ผลการเปรียบเทียบกับเตาเผาถ่านดั้งเดิม	314
6.13	สมบัติของกากตะกอนและถ่านไฮโดรชาร์ที่ได้	316
7.1	การเปรียบเทียบพลาสติกความร้อนกับพลาสติกไม่ร้อน	325
7.2	พลังงานการอัดประจุของอะตอมและโมเลกุลต่างๆ	327
7.3	ค่าสัมพรรคภาพอิเล็กทรอนิกส์ของสารต่างๆ	328
7.4	เวิร์คฟังก์ชันของโลหะวัสดุแคโทดต่างๆ	332

		หน้า
7.5	สภาวะพลาสมาแบบอาร์คเจตร้อน	341
7.6	ตัวอย่างการแปลงสภาพเชื้อเพลิงและผลิตไฮโดรเจน	347
7.7	ผลของพลาสมาช่วยในปฏิกิริยาการแปลงสภาพเชื้อเพลิง	347
7.8	ปริมาณผลิตภัณฑ์ที่ได้	352
8.1	คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอล	362
8.2	ผลผลิตเอทานอลจากชีวมวล	365
8.3	ตัวอย่างโมโนแซคคาไรด์	367
8.4	โพลีแซคคาไรด์ที่สำคัญ	368
8.5	ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของหน่อไม้และไม้ไผ่	395
8.6	ปริมาณน้ำตาลที่ได้กับวัตถุดิบกลีโคเซลลูโลสชนิดอื่นที่สภาวะต่างกัน	397
9.1	ข้อดีและข้อเสียของการใช้การย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน	403
9.2	ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร เปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงอื่น	403
9.3	แบคทีเรียกลุ่มไม่สร้างก๊าซมีเทน	407
9.4	แบคทีเรียสร้างก๊าซมีเทน	408
9.5	ความสามารถในการย่อยสลายแบบไร้อากาศ	412
9.6	ตัวยับยั้งกระบวนการสร้างมีเทน	415
9.7	วัตถุดิบชีวมวล	425
9.8	ส่วนประกอบและธาตุสำคัญของวัตถุดิบชีวมวล	425
9.9	ของเสียจากฟาร์มสัตว์	426
9.10	ขยะชุมชนที่ช่วงอุณหภูมิเมโซฟิลิก	430
9.11	ขยะชุมชนที่ช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิก	432
9.12	ผัก ผลไม้ และใบไม้	433
9.13	หญ้า	435
9.14	ไม้	438
9.15	พีชน้ำจืด	439
9.16	พีชน้ำทะเล	440
9.17	ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ยอมรับได้ในการใช้ประโยชน์	442
9.18	การเปรียบเทียบเทคโนโลยีการกำจัดไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ	442
9.19	ค่าความเข้มข้นสูงสุดของไบโอมีเทนที่ยอมรับได้	443
9.20	ปริมาณน้ำที่ใช้ในระบบดูดซึมด้วยน้ำแบบไม่วนกลับ	447
9.21	การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของเทคโนโลยีดักจับ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	453
9.22	คุณสมบัติของเอนไซม์สร้างไฮโดรเจน	455

		หน้า
10.1	องค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันชนิดต่างๆ	475
10.2	องค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันพืช	475
10.3	ปริมาณการผลิตพืชน้ำมันของประเทศไทย	477
10.4	ปริมาณการผลิตน้ำมันปาล์มของประเทศต่างๆ ในช่วงปี พ.ศ. 2538-2544	478
10.5	การผลิตน้ำมันพืชและไขมันเพื่อไบโอดีเซลในสหรัฐอเมริกา ปี พ.ศ. 2536-2538	478
10.6	คุณสมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	482
10.7	ขั้นตอนการเตรียมน้ำมันให้บริสุทธิ์	482
10.8	สาเหตุและวิธีแก้ไขปัญหที่เกิดขึ้นจากการใช้เชื้อเพลิงผสม ในเครื่องยนต์ดีเซล	484
10.9	คุณสมบัติของ Shipp Non-Ionic	485
10.10	ส่วนประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงสังเคราะห์	486
10.11	คุณสมบัติของเชื้อเพลิงที่ได้จากการสลายตัวด้วยความร้อน ของน้ำมันถั่วเหลือง	486
10.12	ตัวอย่างของการแตกโมเลกุลของน้ำมันเมธิลดีเรพ	486
10.13	สภาวะวิกฤตของแอลกอฮอล์และตัวอย่างผลผลิตเอสเทอร์ที่ได้	492
11.1	ค่าเลขไฮดรอกซิลของโพลีออลจากน้ำมันพืชต่างๆ	518



บทที่ 1

พลังงานชีวภาพ

1.1 พลังงานเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืน

พลังงานนับว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการพัฒนาประเทศในทุกๆ ด้าน ไม่ว่าจะเป็นการผลิตในงานอุตสาหกรรมต่างๆ การขนส่ง การผลิตไฟฟ้า และงานบริการอื่นๆ อีกหลายประเภท แหล่งที่มาของพลังงานของโลกในปัจจุบัน ส่วนใหญ่มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยคิดเป็น 80% โดยประมาณ ในขณะที่อีกประมาณ 10% มาจากชีวมวล (Strezov and Evans, 2015) ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญที่สุดในขณะนี้ โดยประมาณ 3 ใน 4 ของพลังงานชีวมวลที่ใช้ในโลก พบในประเทศกำลังพัฒนา อีก 1 ใน 4 ใช้ในประเทศพัฒนาแล้ว (Parrikka, 2004) เมื่อเทียบเป็นสัดส่วนการใช้พลังงาน โดยเฉลี่ยแล้วประเทศอุตสาหกรรมทั้งหลายจะใช้พลังงานจากชีวมวลคิดเป็น 9-13% ของพลังงานโดยรวมทั้งหมด แต่ในประเทศกำลังพัฒนา สัดส่วนการใช้ชีวมวลจะเป็นประมาณ 20-35% ของพลังงานรวมทั้งหมดที่ใช้ในประเทศ ในบางประเทศ โดยเฉพาะทางเอเชียใต้ มีสัดส่วนการใช้พลังงานชีวมวลสูงถึง 50-90% (Koopsman, 2005) แต่การใช้ส่วนใหญ่ ใช้ไปกับกิจกรรมที่ไม่ใช่เชิงพาณิชย์ แต่เป็นการปรุงอาหาร และการให้ความอบอุ่น โดยเฉพาะกับกลุ่มประชากรที่ค่อนข้างยากจน

ในประเทศไทยมีความต้องการน้ำมันเชื้อเพลิงมาใช้ในการคมนาคม และการขนส่งมากที่สุดของการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทั้งหมด ปัจจุบันแหล่งพลังงานในประเทศไทยนั้นไม่เพียงพอต่อการตอบสนองการใช้ได้ทั้งหมด ต้องนำเข้าแหล่งพลังงานมาจากต่างประเทศ เช่น ผลิตถ่านหิน น้ำมันปิโตรเลียม ทำให้ประเทศต้องสูญเสียเงินตราให้แก่ต่างประเทศเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ถ้าสามารถประหยัดหรือใช้จากแหล่งพลังงานอื่นที่มีในประเทศ ก็จะสามารถประหยัดค่าใช้จ่าย และลดการนำเข้าได้ เหนือสิ่งอื่นใด พลังงานเป็นหัวข้อหลักและมีบทบาทสำคัญสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน แนวคิดของการพัฒนาอย่างยั่งยืน อิงถึงการพัฒนาที่สามารถตอบสนองความต้องการของปัจจุบันสมัยโดยมีต้องบันทอนศักยภาพและโอกาสของอนาคตข้างหน้า (Johansson and Goldemberg, 2002) ซึ่งมีมิติทางสังคม เศรษฐกิจ และสิ่งแวดล้อมที่จำเป็นต้องพิจารณา ถึงแม้ว่าในปัจจุบัน จะดูประหนึ่งว่าแหล่งอุปสงค์ของพลังงานโลก ยังไม่ถึงขีดจำกัดในอนาคตอันใกล้ แต่ระบบพลังงานและการใช้ประโยชน์ที่เป็นอยู่ไม่ใช่เป็นแบบยั่งยืน เนื่องมาจากประเด็นปัญหาสิ่งแวดล้อม สังคม และภูมิรัฐศาสตร์ อันจะเห็นได้จากเชื้อเพลิงสมัยใหม่และไฟฟ้ายังไม่มีกระจายทั่วถึงในอีกหลายพื้นที่ที่กั้นคางห่างไกล ระบบและการบริการพลังงานที่มีราคาสูงหรือมีความขาดแคลนจะส่งผลกระทบต่อผลิตผลและการเติบโตทางเศรษฐกิจ กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงและพลังงานมีด้านที่เป็นผลลบต่อสุขภาพชีวิตความเป็นอยู่และสิ่งแวดล้อม ในระดับท้องถิ่นและระดับโลก ทั้งในปัจจุบันและอนาคต พลังงานเพื่อการพัฒนาที่ยั่งยืนจึงเป็นเป้าหมายที่ท้าทายมากของเราในฐานะประชากรโลก สิ่งที่เราทำได้เพื่อไปสู่เป้าหมายดังกล่าวข้างต้น นอกเหนือจากการปรับปรุงและเพิ่มประสิทธิภาพพลังงาน และการเร่งพัฒนาและใช้เทคโนโลยีพลังงานสมัยใหม่แล้ว การเพิ่มการใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานหมุนเวียนก็เป็นวิธีทางสำคัญวิธีหนึ่ง ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากชีวมวล พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากพื้นพิภพ และพลังงานน้ำ

1.2 พลังงานหมุนเวียน

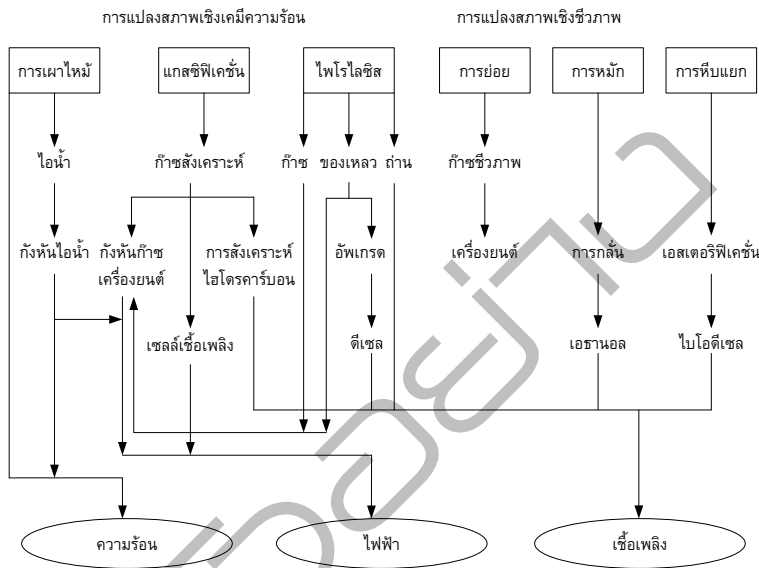
พลังงานหมุนเวียน สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภทหลักๆ ดังนี้

- พลังงานหมุนเวียนที่มาจากแสงอาทิตย์โดยตรง คือ พลังงานแสงอาทิตย์
- พลังงานหมุนเวียนที่มาจากแสงอาทิตย์โดยอ้อม เช่น พลังงานลม คลื่น หรือ ชีวมวล และพลังงานชีวภาพ
- พลังงานหมุนเวียนที่ไม่เกี่ยวข้องกับแสงอาทิตย์ เช่น พลังงานใต้พิภพ น้ำขึ้นน้ำลง

พลังงานทั้งสามประเภท ต่างมีศักยภาพที่แตกต่างกันออกไป ตามลักษณะภูมิประเทศ และภูมิอากาศ สำหรับประเทศไทย การพัฒนาพลังงานขึ้นมาใช้ประโยชน์ให้เพียงพอกับความต้องการของประเทศ นอกจากการพัฒนาพลังงานจากประเภทที่ใช้แล้วหมดไป เช่น น้ำมันดิบ ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติแล้ว ยังมีการพัฒนาพลังงานในรูปแบบของพลังงานหมุนเวียนนำมาใช้ประโยชน์ด้วย เช่น ชีวมวล แสงแดด ลม น้ำ ถึงแม้จะยังเป็นสัดส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับการใช้น้ำมันและก๊าซธรรมชาติ แต่ได้มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ มาใช้ประโยชน์มากขึ้น (Graziani and Fornasiero, 2001) การใช้พลังงานหมุนเวียนส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ได้มาจาก ไม้ ฟืน แกลบ และถ่าน ซึ่งเป็นการใช้ในครัวเรือน เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม จึงสามารถเสริมสร้างแหล่งพลังงานจากชีวมวลได้อีกมาก นอกจากนี้ ยังมีการนำมูลสัตว์ที่ได้จาก ฟาร์มเลี้ยงสัตว์มาผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ในครัวเรือนด้วย ซึ่งในช่วงแรกเป็นการกำจัดมูลสัตว์ให้ ถูกสุขลักษณะและมีพลังงานเป็นผลพลอยได้ ต่อมาเมื่อความต้องการใช้พลังงานของประเทศเพิ่มสูงขึ้น ก่อให้เกิดวิกฤติการณ์ราคาน้ำมันดิบมีราคาสูงขึ้นหลายครั้ง การอนุรักษ์พลังงาน และการส่งเสริมการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนเพื่อมาใช้ประโยชน์มากขึ้น จึงเป็นเรื่องสำคัญของรัฐในการเร่งดำเนินการ ดังเห็นได้จากแผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2525 - 2529) เป็นต้นมา ซึ่งได้มีการกำหนดเป้าหมายให้มีการใช้พลังงานหมุนเวียนเพิ่มขึ้น เพื่อทดแทนน้ำมัน เช่น พลังงานจากแอลกอฮอล์ ขยะ ไม้โตเร็ว พลังน้ำขนาดเล็ก ก๊าซชีวภาพ ความร้อนใต้พิภพ แสงอาทิตย์ และลม โดยส่งเสริมให้มีการวิจัยพัฒนา และผลิตพลังงานหมุนเวียน ที่คุ้มค่าในเชิงพาณิชย์ขึ้นมาใช้ประโยชน์ การส่งเสริมการพัฒนาพลังงานหมุนเวียนของรัฐ มีความชัดเจนขึ้นเมื่อมีการประกาศใช้พระราชบัญญัติการส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน พ.ศ. 2535 ซึ่งมีผลบังคับใช้ตั้งแต่ เมษายน 2535 เป็นต้นมา พระราชบัญญัติดังกล่าวกำหนดให้มีการจัดตั้ง กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงานขึ้น เพื่อใช้เป็นเงินอุดหนุนหรือเงินช่วยเหลือแก่หน่วยงาน ทั้งภาครัฐและเอกชน ตลอดจนสถาบันการศึกษาสำหรับการดำเนินการอนุรักษ์พลังงาน การศึกษา วิจัย และสารถเกี่ยวกับโครงการพลังงานหมุนเวียน รวมทั้ง เงินช่วยเหลือเพื่อเพิ่มการใช้พลังงาน หมุนเวียนที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย ซึ่งมีการให้การสนับสนุนอย่างต่อเนื่องตลอดมา

1.3 พลังงานชีวมวล

เชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นแหล่งให้ความร้อนและแสงสว่างสำคัญแรกสุดที่มนุษยชาติได้ใช้ ปัจจุบันก็เป็นแหล่งพลังงานสำคัญในลำดับต้นๆ ของประเทศเกษตรกรรมและประเทศกำลังพัฒนาทั้งหลาย รูปที่ 1.1 แสดงถึงวิธีการใช้ประโยชน์จากชีวมวล ตั้งแต่การใช้พื้นฐานในการเผาไหม้ จนถึงการยกระดับการใช้ ด้วยการแปลงสภาพเป็นเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีขึ้น



รูปที่ 1.1 แนวทางการใช้พลังงานชีวมวล

ชีวมวลเป็นพลังงานที่มาจากแหล่งที่ไม่มีวันหมดไป เพราะวงจรการผลิตชีวมวล คือ วงจรของพืชที่มีระยะเวลาสั้น ต่างจากน้ำมันหรือถ่านหินที่ต้องอาศัยการทับถมกันเป็นเวลาหลายล้านปี นอกจากนี้ ชีวมวลสามารถผลิตได้ภายในประเทศ เกษตรกรจะมีรายได้เพิ่มขึ้นจากการจำหน่ายชีวมวลสู่ผู้ใช้ และยังช่วยลดการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศได้อีกด้วย ข้อดีที่สำคัญทางสิ่งแวดล้อม คือ การใช้ชีวมวลในการผลิตความร้อนหรือไฟฟ้า จะไม่เพิ่มปริมาณสุทธิของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในชั้นบรรยากาศโลกในกรณีที่เรามีการผลิตชีวมวลขึ้นมาเพื่อทดแทนชีวมวลที่ได้ใช้ไป เพราะจะทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ถูกหมุนเวียนมาใช้ในชีวมวลที่ผลิตใหม่เท่ากับปริมาณก๊าซที่ถูกผลิตจากการเผาไหม้ชีวมวลนั้นๆ เนื่องจากพืชต้องหายใจเพื่อเอาก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เข้าไปใช้ในการเจริญเติบโต อีกทั้ง ชีวมวลยังมีปริมาณกำมะถันต่ำกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิลมาก นั่นหมายถึง การใช้ชีวมวลจะลดโอกาสในการเกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก (greenhouse effect) และการเกิดฝนกรด ซึ่งตรงข้ามกับการใช้น้ำมันในภาคขนส่ง หรือถ่านหิน

ในโรงไฟฟ้า อย่างไรก็ตาม ชีวมวลมีการเก็บรักษาและการขนส่งที่ยาก และมีความเสี่ยงสูงในการจัดหาหรือรวบรวมปริมาณชีวมวลที่ต้องการใช้ ให้คงที่ตลอดปี เพราะชีวมวลบางประเภท เช่น กากอ้อย มีจำกัดเพียงบางเดือน อีกทั้งชีวมวลทุกประเภทต่างต้องการพื้นที่ในการเก็บรักษาขนาดใหญ่กว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น หากต้องการปริมาณความร้อนที่เท่ากัน จะต้องใช้แกลบในปริมาณที่มากกว่าน้ำมันเตา เป็นต้น ดังนั้นการพัฒนาระบบวิธีการจัดเก็บและขนส่งจึงสำคัญและจำเป็นมาก

1.4 แรงขับเคลื่อนและสิ่งกระตุ้นในการพัฒนาแหล่งชีวมวล

ผลการตอบแทนการลงทุนในโครงการเกี่ยวกับพลังงานชีวภาพและผลิตภัณฑ์ฐานชีวมวลในปัจจุบันยังไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์จากปิโตรเลียม อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์จากแหล่งชีวมวลก็มีการขยายตัวและได้รับการส่งเสริมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากปัจจัย แรงขับเคลื่อน หรือสิ่งกระตุ้นต่างๆ ได้แก่ ความต้องการปรับปรุงคุณภาพชีวิตและสิ่งแวดล้อม (environmental quality) ความกังวลเกี่ยวกับความอยู่รอดปลอดภัยของชาติ (national security) เนื่องจากการอาศัยแหล่งพลังงานฟอสซิลจากต่างชาติ ปัญหาผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาด (excess agricultural production) รวมถึงความสำคัญและความเร่งด่วนในการพัฒนาและยกระดับความเป็นอยู่ในชนบท (rural development) เพื่อช่วยเศรษฐกิจโดยรวมของประเทศ (Brown, 2003)

1.4.1 คุณภาพสิ่งแวดล้อม

การผลิตและการใช้ประโยชน์จากพลังงานฟอสซิลทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่สำคัญ ไม่ว่าจะเป็นการทำเหมืองถ่านหิน และการขุดเจาะน้ำมันดิบและก๊าซธรรมชาติ การนำเชื้อเพลิงฟอสซิลเหล่านี้ไปผ่านกระบวนการและนำไปใช้ประโยชน์มีผลกระทบที่เกิดขึ้นทั้งในระดับท้องถิ่น ระดับภูมิภาค และระดับโลก

ระดับท้องถิ่น เช่น การทำเหมืองถ่านหินมีกองดินเปิดเกิดขึ้นทั่วพื้นที่กว้าง อาจมีปัญหาการชะล้างเกิดเป็นกรด ปัญหาโคลน หรือของเหลวแขวนลอยสีดำ การขุดเจาะน้ำมันหรือก๊าซธรรมชาติอาจมีการรั่วไหลของน้ำมันทำให้เกิดการปนเปื้อนรอบๆ บริเวณ รวมถึงปัญหาเศษขี้เถ้าจากการใช้งานและผลิตภัณฑ์ตกค้างจากการกลั่นที่ต่องหาทางกำจัด การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีการปล่อยไอเสียที่มีคาร์บอนมอนอกไซด์ และฝุ่นควันออกมา ระดับภูมิภาค เช่น การเกิดฝนกรดจากออกไซด์ของกำมะถัน และไนโตรเจน ซึ่งอาจจะกระทบต่อส่วนอื่นของทวีปก็เป็นได้ ในระดับโลกผลกระทบเกี่ยวกับการทำลายโอโซนในชั้นบรรยากาศ และการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศของโลกอันเนื่องมาจากกลุ่มก๊าซเรือนกระจกที่นำโดยคาร์บอนไดออกไซด์

พลังงานจากชีวมวลไม่ใช่ต้นเหตุหลักของปัญหาเหล่านี้ ผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมจากการใช้พลังงานชีวมวลมีน้อยมากเมื่อเทียบกับการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากเป็นผลผลิตทางชีวภาพ ย่อยสลายได้ในธรรมชาติ ผลการนำไปใช้มีความสะอาดกว่า และมีวงจรการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่บรรยากาศเป็นศูนย์

1.4.2 ความอยู่รอดปลอดภัยของชาติ

ประเทศไทยมีสัดส่วนการใช้พลังงานนำเข้าประมาณ 60% ของการบริโภคภายในประเทศทั้งหมด พลังงานที่นำเข้าส่วนใหญ่เป็นผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม และไฟฟ้าจากประเทศเพื่อนบ้าน วิกฤตพลังงานที่เกิดขึ้นในช่วงปี 1974 และ 2008 ที่ราคาน้ำมันดิบขยับจากไม่กี่สิบลบาทเป็นกว่าหนึ่งร้อยสิบลบาทส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจและชีวิตความเป็นอยู่ของคนในประเทศ ผู้เชี่ยวชาญต่างทำนายว่าวิกฤตพลังงานจะมีต่อไป เนื่องจากการลดลงของปริมาณน้ำมันสำรองในโลกสวนทางกับความต้องการใช้ในตลาดโลก อีกทั้งการขาดเสถียรภาพในกลุ่มประเทศผู้ผลิตและส่งออกน้ำมันขนาดใหญ่ หากไม่มีการเตรียมตัวรองรับที่ดีอาจจะส่งผลให้เศรษฐกิจซบเซาอย่างหนัก ปัญหาวิกฤตพลังงานถือเป็นภัยคุกคามความอยู่รอดปลอดภัยของชาติที่ควรรับดำเนินการหาทางรับมือแก้ไข มีความพยายามทางนโยบายในการลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ แต่จากแนวโน้มที่เกิดขึ้น ก็ดูเหมือนว่าเรายังไม่สำนึกในบทเรียน เนื่องจากความต้องการน้ำมันและการนำเข้าพลังงานยังคงเติบโตสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง การพัฒนาพลังงานชีวมวลและพลังงานหมุนเวียนอื่นๆ สามารถดำเนินการได้จากแหล่งพลังงานในประเทศ ซึ่งสามารถทดแทนการบริโภคภายในประเทศได้ในสัดส่วนที่สูง อีกทั้งยังจะช่วยลดภาระการพึ่งพาการนำเข้าและลดความเสี่ยงต่อวิกฤตพลังงานในอนาคตได้บ้าง

1.4.3 ผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาด

ในการนำชีวมวลมาใช้เชิงพลังงานและวัสดุมักมีความกังวลเกี่ยวกับผลกระทบต่อการผลิตอาหารตามมาด้วย มีหลายฝ่ายที่ไม่เห็นด้วยกับการใช้พื้นที่เกษตรกรรมบางส่วนไปใช้ในการผลิตชีวมวลพลังงานเพราะเกรงว่าผลผลิตทางการเกษตรจะขาดแคลนและมีราคาแพง แต่ในความเป็นจริง ประเทศไทยและประเทศอื่นๆ ส่วนใหญ่สามารถผลิตพืชอาหารได้มากกว่าความต้องการภายในประเทศ และส่งออกผลผลิตทางเกษตรเหล่านี้ได้ ซึ่งเป็นผลมาจากการพัฒนาสายพันธุ์ ปุ๋ย สารกำจัดศัตรูพืช และเทคนิคการเพิ่มผลผลิตอื่นๆ ในบางช่วงเกิดการมีผลผลิตทางการเกษตรล้นตลาดด้วยซ้ำ ฉะนั้นหากมีการพัฒนาพืชชีวมวลอย่างจริงจัง จะสามารถช่วยปัญหาการล้นตลาดและปัญหาราคาตกต่ำของพืชหลายๆ ชนิดได้ และสามารถจัดสรรที่ดินบางส่วนมาใช้ในการผลิตพืชชีวมวลพลังงานได้ โดยไม่กระทบต่อพืชอาหาร

1.4.4 การพัฒนาชนบท

ผลกระทบจากอุตสาหกรรมสมัยใหม่ ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายแรงงานจากชนบทสู่ในเมือง นำไปสู่การลดลงของแรงงานในภาคการเกษตรและในชุมชนชนบท การเปิดตลาดเสรีทำให้เกิดการแข่งขันสูงขึ้นกับการผลิตจากต่างประเทศ การจำหน่ายผลผลิตทางเกษตรของเกษตรกรอยู่ได้ดีด้วยเงินอุดหนุนช่วยเหลือจากรัฐ หากมีโอกาสหรือทางเลือกใหม่ เกษตรกรผู้ผลิตและชุมชนจะสามารถสร้างรายได้และพัฒนาเศรษฐกิจชนบทให้เจริญกว่าที่เป็นอยู่ได้ การพัฒนาชีวมวลสำหรับตลาดใหม่โดยเฉพาะพืชผลที่สามารถแปลงสภาพเพื่อเพิ่มมูลค่าได้ภายในท้องถิ่นจักสร้างโอกาสอันใหญ่หลวงให้กับการพัฒนาชุมชนชนบท เกิดการจ้างงานและการลงทุนเพิ่ม มีทางเลือกให้แรงงานอยู่ในท้องถิ่น ลดการย้ายเข้าทำงานในเมือง และสร้างโอกาสให้คนในชนบทได้

1.5 เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล

มีเพียงชีวมวลไม่กี่ชนิดเท่านั้น ตัวอย่างเช่น ไม้พิน ที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้โดยตรงตามลักษณะสภาพเดิมๆ ในการเผาไหม้ เพื่อได้พลังงานออกมาใช้ประโยชน์ ส่วนใหญ่อาจจำเป็นต้องแปลงสภาพก่อนนำไปใช้งาน (Wayman and Parekh, 1990; Wereko-Brobby and Hagen, 1996; Klass, 1998; Faaij, 2006; Drapch et al., 2008; Capareda, 2014) อย่างไรก็ตาม ชีวมวลสดจะมีลักษณะที่ด้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล ดังนี้

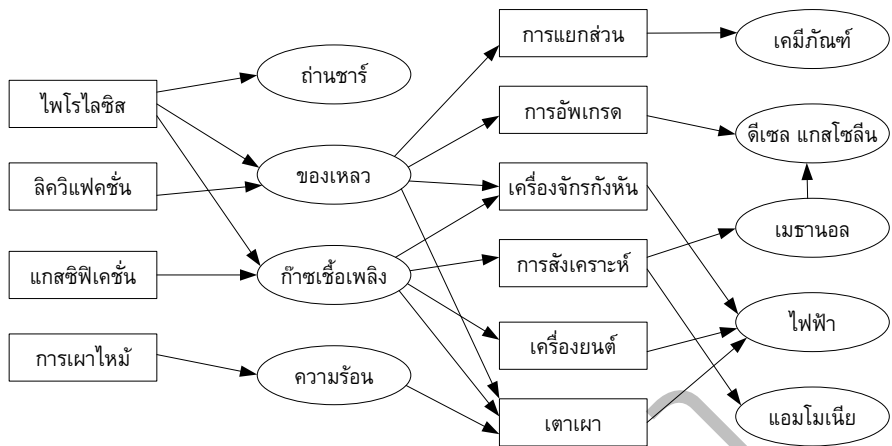
- ชีวมวลมีค่าความร้อนน้อยกว่า
- ชีวมวลมีปริมาณความชื้นสูง เป็นอุปสรรคในการกักเก็บ ส่งผลให้เป็นอุปสรรคในการเผาไหม้ เกิดการสูญเสียความร้อนและเกิดมลพิษสูง
- ชีวมวลมีค่าความหนาแน่นต่ำ มีความจำเป็นต้องใช้ในปริมาณมาก และต้องใช้อุปกรณ์ในการจัดการ การกักเก็บ การขนส่ง และการเผาไหม้ที่มีขนาดใหญ่
- รูปแบบกายภาพไม่สม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียว ไม่สะดวกต่อการขนถ่าย ตรวจวัด กักเก็บ หรือ บ้อนเข้า

ฉะนั้น วัตถุประสงค์หลักของการแปลงสภาพชีวมวล ก็เพื่อลดปริมาณความชื้นซึ่งจะส่งผลให้เพิ่มค่าความร้อนและสะดวกต่อการเก็บรักษา และปรับปรุงคุณลักษณะของวัสดุให้สะดวกต่อการใช้และการจัดการ เช่น แปลงสภาพให้เป็นของเหลว หรือก๊าซ เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน เพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมนั้น สามารถจำแนกได้ 3 เทคโนโลยีหลักๆ ทางกายภาพ ชีวเคมี และเคมีความร้อน ทั้งนี้ลักษณะความแตกต่างของแต่ละกระบวนการนั้นขึ้นอยู่กับสภาวะที่ใช้ และวัตถุประสงค์หรือผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการ ดังแสดงในตารางที่ 1.1 คือ

- (i) กระบวนการแปลงสภาพเชิงกายภาพ ได้แก่ การอัดแท่ง (densification) การคัดแยกเฉพาะส่วน และการหีบคั้นน้ำมัน (oil extraction)
- (ii) กระบวนการแปลงสภาพเชิงชีวเคมี (biochemical conversion) ที่ใช้กิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์เป็นตัวดำเนินการ ได้แก่ กระบวนการหมักย่อยอัดอากาศเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ และกระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อผลิตเอทานอล
- (iii) กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อน (thermochemical conversion) โดยที่กระบวนการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อนนี้ ยังสามารถจำแนกออกเป็นกระบวนการย่อยๆ ได้อีก คือ การเผาไหม้ ไพโรไลซิส แกสซิฟิเคชัน และลิกวิแฟคชัน (รูปที่ 1.2) โดย 3 เทคโนโลยีแรก มีลักษณะแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.1 การเปรียบเทียบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการแปลงสภาพชีวมวล

	ชีวะเคมี	เคมีความร้อน	กายภาพ
เชื้อเพลิง	เชื้อเพลิงอัดแท่ง		•
	สารแต่งเติม	•	•
	แอลกอฮอล์	•	•
	ถ่านชาร์		•
	ดีเซล		•
	กระแสไฟฟ้า		•
	น้ำมันเตา		•
	ก๊าซ	•	•
	เบนซิน		•
	ไฮโดรเจน	•	•
สารเคมี	อะซิโตน	•	
	บิวทานอล	•	
	เอทานอล	•	•
	สารปรับปรุงดิน	•	•
	สารแต่งเติมอาหาร	•	•
	ไฮโดรเจน	•	•
	มีเทน	•	•
	เมทานอล		•
	เรซิน		•
	สารอื่นๆ	•	•
ที่มีลักษณะเฉพาะ			



รูปที่ 1.2 กระบวนการแปลงสภาพชีวมวลเชิงเคมีความร้อนและผลิตภัณฑ์ที่ได้

ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบลักษณะของการแปลงสภาพเชิงเคมีความร้อนหลัก

	การเผาไหม้	แกสซิฟิเคชั่น	ไพโรไลซิส
อุณหภูมิ (°C)	800-1450	500-1800	250-900
ความดัน (bar)	1	1-45	1
บรรยากาศ	air, O ₂	air, O ₂ , H ₂ O	inert
อัตราส่วนสมมูล	≥ 1	< 1	0
ผลิตภัณฑ์:			
ก๊าซ	CO ₂ , H ₂ O, O ₂ , N ₂	H ₂ , CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ O, N ₂	H ₂ , CO, H ₂ O, N ₂ , hydrocarbons
ของแข็ง	เศษถ่าน	เศษถ่าน	ถ่านชาร์
ของเหลว	-	-	bio-oil, water

1.5.1 เทคโนโลยีสำหรับการผลิตไฟฟ้าและความร้อน

การผลิตความร้อน หรือไฟฟ้า หรือการผลิตทั้งสองอย่างร่วมกันเป็นรูปแบบที่น่าสนใจซึ่งมาได้จากหลายรูปแบบของเทคโนโลยี และมีการนำไปประยุกต์ใช้ เช่นในตารางที่ 1.3 ซึ่งกล่าวถึงเทคโนโลยีต่อไปนี้

ตารางที่ 1.3 ข้อมูลสมรรถนะและการคาดการณ์การแปลงสภาพชีวมวลเพื่อการผลิตพลังงาน

กระบวนการ		ช่วงขนาด	ประสิทธิภาพ	การลงทุน (ยูโร/kW)	สถานภาพการนำไปใช้	
การเผาไหม้	ความร้อน	คั่วเวียน	จากต่ำมาก	100-200	ใช้ในการให้ความอบอุ่นและความร้อนในอุตสาหกรรม ระบบใหม่ที่ดีกว่าเริ่มใช้กัน อย่างแพร่หลายมากขึ้น เทคโนโลยีที่มั่นคง ใช้กันอย่างแพร่หลาย มีการพัฒนาใหม่ ๆ มาเรื่อยเช่น เทคโนโลยีชั้นของไหลความดันสูง ใช้กันมากในแถบสแกนดิเนเวีย โดยทั่วไป ขนาดที่ใหญ่ขึ้น จะมีประสิทธิภาพสูงขึ้น	
		5-50 kW _{th}	จนถึง 70-90%	300-700		
	ไฟฟ้า	อุตสาหกรรม	ขึ้นกับการออกแบบ	ไฟฟ้า		1,600-2,500
		1-5 MW _{th}	20-40%			
กำลังงานและความร้อนร่วม	1-10 MW _e	60-90%	รวม	250 เพิ่มจากโรงไฟฟ้าเดิม		
	20-500 MW _e				80-100%	
การเผาไหม้ร่วม		5-20 MW _e	30-40%		นิยมกันมากจากการแปลงโรงไฟฟ้าเก่า เริ่มสนใจสัดส่วนการใช้ชีวมวลเพิ่มขึ้น	
การหมัก อับอากาศ	ก๊าซชีวภาพ	< 5 MW _e	10-15%	ไฟฟ้า	เทคโนโลยีที่มั่นคง ใช้มากกับของเสียอินทรีย์และน้ำเสีย ใช้กันมาก เป็นส่วนหนึ่งของนโยบายการจัดการขยะ นำสนใจสำหรับการกำจัดก๊าซเรือนกระจก	
	ก๊าซจากการ ฝังกลบขยะ	< 500 kW _e	ขึ้นกับเครื่องยนต์			
แกสซิฟิเคชัน	ความร้อน	< 500 kW _{th}	80-90% รวม	300-500	พอหาได้ แต่ยังไม่ใช้กันไม่มาก มีหลายระบบในตลาด แต่มีการใช้น้อยเนื่องจากราคาสูง อยู่ระหว่างการสาธิตเทคโนโลยี มีการพัฒนาเร็ว ราคาสูงอยู่	
	กำลังงานและความร้อนร่วม	0.1-1 MW _e	15-30%	1,000-3,000		
		วัฏจักรร่วมการ แกสซิฟิเคชัน	30-100 MW _e	40-50%		ไฟฟ้า
ไพโรไลซิส	น้ำมันชีวภาพ	< 500 kW _{th}	60-70% พลังงานน้ำมัน ต่อวัตถุดิบป้อน		ยังไม่มีเชิงพาณิชย์ ส่วนใหญ่ถือเป็นทางเลือกหนึ่ง	

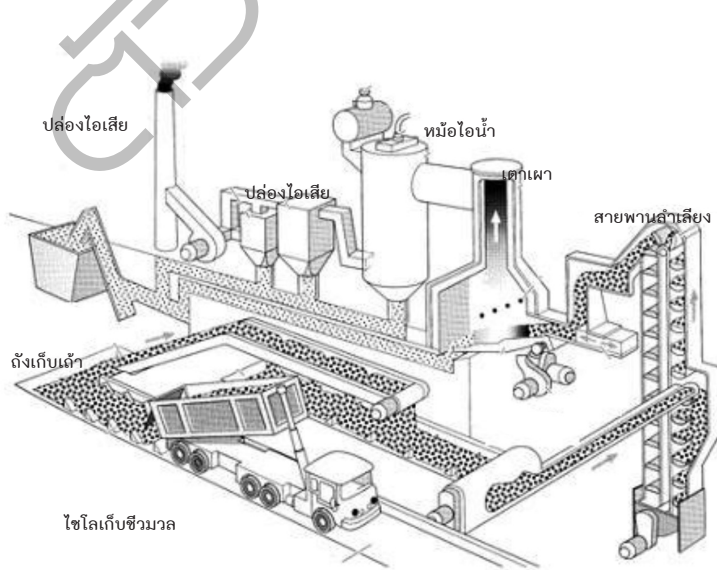
การเผาไหม้

- การให้ความร้อนในครัวเรือน

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้การเผาไหม้ชีวมวล คือการให้ความร้อนในครัวเรือน ซึ่งเป็นตลาดสำคัญของชีวมวลในประเทศเมืองหนาว เช่น ออสเตรเลีย ฝรั่งเศส เยอรมนี และสวีเดน การเผาไม้ฟืนในเตาผิงในบ้านมีกันมาก การเผาไหม้แบบเก่านี้มีประสิทธิภาพพลังงานต่ำราวๆ 10% และมีการปล่อยมลพิษออกมามาก การปรับปรุงระบบเพื่อลดปัญหาดังกล่าว นำไปสู่การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำสะอาดไอเสีย มีการใช้เชื้อเพลิงอัดแท่ง และการใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติ ทำให้ประสิทธิภาพรวมเพิ่มขึ้นเป็น 70-90% และมีมลพิษน้อยมาก ระบบดังกล่าวมีการใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

- การผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่

การเผาไหม้ชีวมวลเพื่อผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่มีทำเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลายในโลกและมีมานานแล้ว มีทั้งแบบกองเผา เผาบนตะแกรง เผาไหม้แขวนลอย และเผาในชั้นเชื้อเพลิงไหล อุตสาหกรรมสำคัญที่มีใช้ ได้แก่ อุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ที่ใช้สำหรับการผลิตไฟฟ้าและไอน้ำใช้ในกระบวนการ การเผาไหม้ขยะก็เป็นอีกตัวอย่างที่มีกันมาก ขนาดปกติของโรงไฟฟ้าที่เผาไหม้ชีวมวล (รูปที่ 1.3) มีขนาดประมาณ 20-50 MW ประสิทธิภาพอยู่ที่ประมาณ 25-30% ซึ่งจะคุ้มค่าต่อการลงทุนหากมีการนำภาษีคาร์บอนหรือการอุดหนุนพลังงานหมุนเวียนมาช่วยคิด ในปัจจุบัน มีการพัฒนาเทคโนโลยีการเผาไหม้ชีวมวลไปไกล มีการใช้ในระบบชั้นเชื้อเพลิงไหลแบบฟองอากาศและแบบไหลวน มีการทำความสะอาดก๊าซที่อุณหภูมิสูง ตัวอย่างที่ประเทศฟินแลนด์ มีการสร้างโรงไฟฟ้าขนาด 500 MW สำหรับชีวมวลร่วมกับเชื้อเพลิงฟอสซิล



รูปที่ 1.3 ตัวอย่างโรงไฟฟ้าจากเศษไม้

ตัวอย่างที่ 1.1:

โรงไฟฟ้าพลังงานชีวมวลใช้ไอน้ำในการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยน้ำป้อนเข้าหม้อไอน้ำที่ 320,000 kg/h ที่ความดัน 12.5 MPa อุณหภูมิ 200°C ไอน้ำออกจากหม้อไอน้ำที่ความดัน 9 MPa อุณหภูมิ 500°C ไฟฟ้าที่ได้จากการปั่นกังหันไอน้ำเป็น 60 MW โดยมีอัตราการป้อนชีวมวลที่ 55 ton/h ค่าความร้อนของชีวมวลเป็น 20 MJ/kg จงหาประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ และประสิทธิภาพพลังงานรวมของโรงไฟฟ้า

วิธีทำ จากตาราง steam table

เอนทัลปีของน้ำ ที่ 12.5 MPa และ 200°C = 857.1 kJ/kg

เอนทัลปีของไอน้ำ ที่ 9 MPa และ 500°C = 3,386.1 kJ/kg

ความร้อนถ่ายเทไปที่ไอน้ำ = 320,000 x (3,386.1 - 0.8571) = 809,280 MJ/h

พลังงานจากเชื้อเพลิง = 55,000 x 20 = 1,100,000 MJ/h

ฉะนั้น ประสิทธิภาพของหม้อไอน้ำ = ความร้อนถ่ายเทไปที่ไอน้ำ / พลังงานจากเชื้อเพลิง

$$= 809,280 / 1,100,000 = 73.6 \%$$

ประสิทธิภาพโรงไฟฟ้า = พลังงานไฟฟ้าที่ได้ / พลังงานจากเชื้อเพลิง

$$= 60,000 \times 3.6 / 1,100,000$$

$$= 19.6 \%$$

- การเผาไหม้ร่วม

ในปัจจุบัน การเผาไหม้ร่วมกันระหว่างชีวมวลและถ่านหิน (co-firing) เป็นแนวทางที่ใช้กันมากในยุโรป โดยเฉพาะ ประเทศสเปน เยอรมนี และเนเธอร์แลนด์ ข้อได้เปรียบสำหรับเทคโนโลยีดังกล่าว คือ สามารถประยุกต์ใช้ได้เลยที่สัดส่วนต่ำ ประสิทธิภาพโดยรวมสูงประมาณ 40% การลงทุนค่อนข้างต่ำเพราะแปลงมาจากโรงไฟฟ้าเดิมที่มีอยู่แล้ว มลพิษน้อยเนื่องจากทดแทนถ่านหินบางส่วนด้วยชีวมวล จึงไม่จำเป็นในการสร้างชุดบำบัดไอเสียใหม่ขึ้นมาอีก หากต้องการใช้สัดส่วนของชีวมวลสูงเกินกว่า 40% จำเป็นต้องปรับปรุงระบบมาก และมีผลกระทบต่อสมรรถนะของหม้อไอน้ำ

แกสซิฟิเคชัน

- การผลิตก๊าซขนาดเล็ก

ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขนาดเล็กมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย เตาปฏิกรณ์ขนาดเล็กจะเป็นแบบชั้นเชื้อเพลิงนิ่ง อากาศไหลขึ้นหรือลง ขนาดประมาณ 10 kW ถึง 1 MW ใช้ในการให้ความร้อนหรือการผลิตไฟฟ้ากับเครื่องยนต์ เช่นการผลิตไฟฟ้าในชุมชน (Tippayawong et al., 2009) สำหรับการให้ความร้อน มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวาง อย่างเช่น ในประเทศฟินแลนด์ จีน และอินเดีย ส่วนการนำมาผลิตไฟฟ้ายังไม่ประสบความสำเร็จมากนัก ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขนาดเล็กต่อเข้ากับเครื่องยนต์และโคเนาโมบิ้นไฟฟ้าที่ขนาดประมาณ 100 kW มีประสิทธิภาพราวๆ 15-25% การนำระบบมาใช้ยังมีน้อย เนื่องจากต้องมีการเตรียมเชื้อเพลิง การทำความสะอาดก๊าซ และราคาการลงทุนสูง

- การผลิตก๊าซขนาดใหญ่

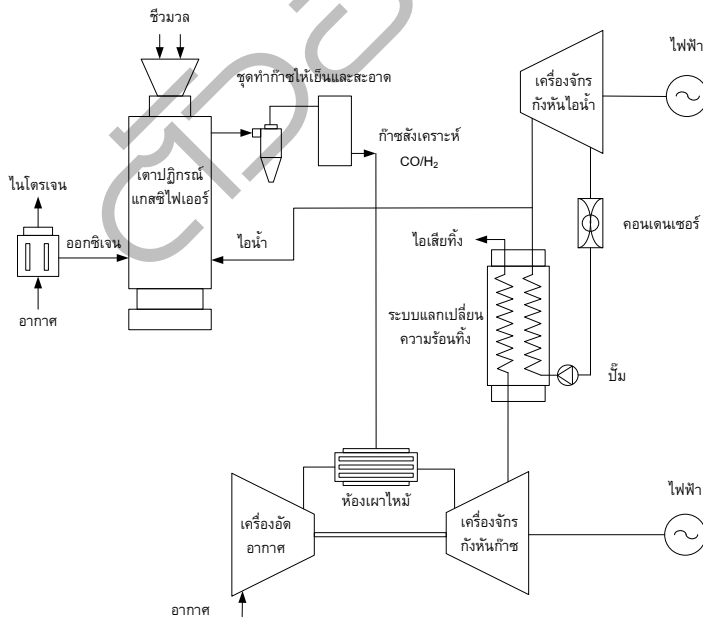
ระบบผลิตก๊าซเชื้อเพลิงขนาดใหญ่ ขนาดตั้งแต่ 10 MW ขึ้นไป ปกติจะใช้กับเตาปฏิกรณ์แบบชั้นเชื้อเพลิงไหลวน (circulating fluidized bed) ซึ่งสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายแบบหลายชนิด ระบบวัฏจักรร่วมการแกสซิฟิเคชันชีวมวล (biomass integrated gasification combined cycle, BIG-CC) ดังรูปที่ 1.4 เป็นระบบที่ใช้กับเชื้อเพลิงได้หลายชนิดและมีประสิทธิภาพสูงประมาณ 40% สำหรับขนาด 30 MW ระบบ BIG-CC เป็นสิ่งที่ทางยุโรปและโลกให้ความสนใจอย่างมาก มีโครงการระดับชาติที่สนับสนุนโดยรัฐเกิดขึ้นหลายโครงการ นอกจากนี้มีประสิทธิภาพพลังงานสูงแล้ว ยังมีการลงทุนไม่มาก และปล่อยมลพิษออกมาน้อย เพราะต้องมีการทำความสะอาดก๊าซให้ดีกว่าเผาไหม้ในเครื่องจักรกังหันก๊าซ ตัวอย่างโครงการที่เกิดขึ้นได้แก่ ในสวีเดน สหรัฐอเมริกา และในบราซิล อย่างไรก็ตาม การนำมาใช้เชิงพาณิชย์ยังคงค่อนข้างยาก ราคาการลงทุนยังสูงมากในรุ่นแรกๆ ที่ประมาณ 3,500 - 5,000 ยูโร/kW และยังมีหัวข้อวิจัยบางเรื่องที่ต้องทำเพิ่มเติม เช่นการเตรียมก๊าซ และการแยกน้ำมันดิน จากการศึกษา เทคโนโลยีนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับโรงไฟฟ้าขนาดใหญ่ที่มีอยู่แล้วและต้องการปรับปรุงจะทำให้มีราคาการลงทุนลดลงแทนที่จะสร้างใหม่ทั้งหมด

- การผลิตก๊าซเพื่อใช้ในการเผาไหม้ร่วม

การผลิตก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลเป็นอีกแนวทางหนึ่งในการเผาไหม้ร่วมของโรงไฟฟ้าที่มีอยู่แล้ว เช่น การเผาไหม้ถ่านหินและก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งสามารถควบคุมการเผาไหม้ได้ดีขึ้น ดังตัวอย่างการพัฒนาโครงการในประเทศฟินแลนด์ และเนเธอร์แลนด์ ก๊าซเชื้อเพลิงจากชีวมวลยังสามารถนำไปเผาไหม้ร่วมกับโรงไฟฟ้าก๊าซธรรมชาติที่มีอยู่ ทำให้มีราคาต้นทุนน้อย และได้ประสิทธิภาพพลังงานสูง โดยที่มีความยืดหยุ่นในการเลือกใช้สัดส่วนระหว่างก๊าซเชื้อเพลิงกับก๊าซธรรมชาติได้ จนถึงปัจจุบัน ยังไม่มีโครงการสาธิตดังกล่าว แต่มีความพยายามในการวิจัยที่จะทำเทคโนโลยีนี้ออกมาให้ได้

ไพโรไลซิสและลิกวิแฟคชัน

กระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส สามารถแปลงสภาพวัสดุชีวมวล ให้กลายเป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพ (bio-oil) ก๊าซ และถ่านชาร์ได้ ที่สภาวะไร้ออกซิเจน สัดส่วนที่เป็นของเหลวสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้ด้วยเทคนิคไพโรไลซิสอย่างรวดเร็ว (fast pyrolysis) ซึ่งอาจได้ถึง 70% ของชีวมวลที่ใส่เข้าไป ของเหลวหรือน้ำมันชีวภาพจากไพโรไลซิสนี้มีออกซิเจนเป็นส่วนประกอบประมาณ 40% โดยน้ำหนัก และมีความเป็นกรด และความสามารถในการ กัดกร่อนสูง หากมีการปรับปรุงคุณภาพ น้ำมันชีวภาพนี้สามารถใช้ได้กับเครื่องยนต์ได้ การปรับปรุงคุณภาพอาจทำได้โดยการทำปฏิกิริยาเพิ่มเติมกับไฮโดรเจน (hydrogenation) เพื่อลด สัดส่วนออกซิเจนในของเหลว ซึ่งยังมีความซับซ้อน และข้อด้อยด้านพลังงานและราคาที่เกี่ยวข้อง ตัวอย่างงานสาธิตที่ทำกัน เช่น บริษัท Shell พัฒนาระบวนการผลิตของเหลวที่ความดันสูง (liquefaction) และการปรับปรุงคุณภาพของเหลวโดยกระบวนการ hydro thermal upgrading ซึ่งได้แปลงสภาพชีวมวลในน้ำความดันสูงและอุณหภูมิปานกลางให้ได้เป็นน้ำมันดิบสังเคราะห์ออกมา จนถึงปัจจุบัน ไพโรไลซิสยังเป็นการพัฒนาที่ใช้น้อยเมื่อเทียบกับแกสซิฟิเคชัน แม้ว่าจะมีการศึกษาวิจัยอย่างต่อเนื่อง แต่ก็มีโครงการสาธิตเทคโนโลยีอยู่น้อย ที่ประสบความสำเร็จเชิงพาณิชย์ เช่น บริษัท Fortum ของประเทศฟินแลนด์ หรือ บริษัท Dynamotive ของประเทศแคนาดา



รูปที่ 1.4 ระบบวิจักร่วมการแกสซิไฟชีวมวล

การหมักย่อยอับอากาศ

- ก๊าซชีวภาพ

การหมักย่อยอับอากาศของชีวมวลเป็นวิธีการที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และได้มีการนำไปใช้อย่างแพร่หลายทั้งขนาดเล็กและขนาดใหญ่ โดยใช้กับวัตถุดิบหลากหลายชนิด เช่น ของเสียจากครัวเรือน อินทรีย์สารจากอุตสาหกรรม มูลสัตว์ และกากตะกอน ได้ก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นส่วนประกอบหลัก วิธีการนี้เหมาะกับวัสดุชีวมวลที่เปียก ซึ่งสามารถแปลงชีวมวลเป็นก๊าซชีวภาพได้สูงถึง 35% ของวัตถุดิบตั้งต้นขึ้นอยู่กับชนิด การหมักร่วมกันระหว่างมูลสัตว์และกากชีวมวลก็ใช้ได้ดี

- ก๊าซจากการฝังกลบ

ก๊าซชีวภาพอาจได้มาจากแหล่งที่ฝังกลบขยะ ซึ่งเป็นแหล่งปล่อยก๊าซมีเทนออกสู่บรรยากาศที่สำคัญ การนำก๊าซจากการฝังกลบมาใช้จำเป็นต้องมีโครงข่ายท่อในการเก็บรวบรวมก๊าซลงในพื้นดิน ซึ่งการผลิตพลังงานจากที่ฝังกลบขยะก็เป็นประโยชน์ทั้งเชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม มีโครงการเกิดขึ้นมากมายในส่วนต่างๆ ของโลก

1.5.2 เทคโนโลยีสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงสำหรับการขนส่ง

เชื้อเพลิงหลักสำหรับการขนส่งที่ได้จากชีวมวล ได้แก่ เมทานอล น้ำมันสังเคราะห์ฟิสเซอร์โทรฟ (Fischer-Tropsch synthesis) ไดมethylอีเทอร์ และไฮโดรเจน จากกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซที่ผลิตจากแก๊สซิฟิเคชัน และ เอทานอล จากกระบวนการหมักแป้งหรือน้ำตาล หรือกระบวนการไฮโดรไลซิสวัสดุลิกโนเซลลูโลส และน้ำมันชีวภาพที่สกัดออกมาจากเมล็ดพืชน้ำมันเพื่อแปลงสภาพเป็นไบโอดีเซล ลักษณะของเชื้อเพลิงเหล่านี้มีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1.4 จะเห็นได้ว่า ไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่เบามาก จึงต้องการโครงสร้างพื้นฐานที่ซับซ้อนในการนำไปใช้ประโยชน์เชื้อเพลิงอื่นๆ ส่วนใหญ่เป็นของเหลว จึงสามารถกักเก็บและขนถ่ายได้สะดวก กับโครงสร้างพื้นฐานที่มีในปัจจุบัน ที่ใช้กับผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม เช่น น้ำมันดีเซลและน้ำมันเบนซิน ข้อพิจารณาอื่นๆ เช่น ความหนาแน่นเชิงพลังงาน หากมีค่าน้อยกว่าของน้ำมันจากปิโตรเลียมยานพาหนะอาจจะต้องมีถังบรรจุที่ใหญ่ขึ้น ความเป็นพิษของเชื้อเพลิงและผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการรั่วไหลออกสู่ภายนอก ซึ่งต้องเพิ่มความระมัดระวัง และระบบการจัดการที่ปลอดภัยขึ้นตามไปด้วย เทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงเหล่านี้ ได้แก่

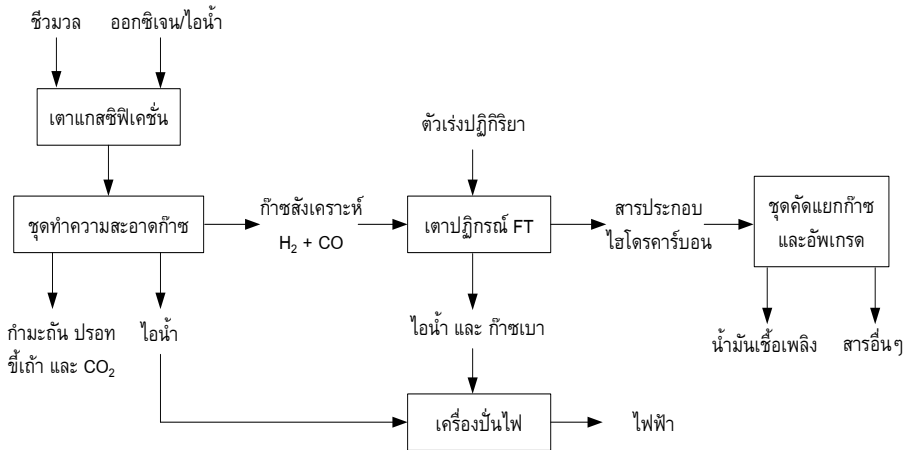
การผลิตเมทานอล ไฮโดรเจน หรือน้ำมันดีเซลสังเคราะห์

เมทานอล ไฮโดรเจน และน้ำมันฟิสเซอร์โทรฟ สามารถผลิตได้จากชีวมวลผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันซึ่งจำเป็นในการเตรียมก๊าซสังเคราะห์ (Dry, 2002) ก๊าซสังเคราะห์ประกอบด้วยคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และสารประกอบอื่นๆ อีกเล็กน้อย แล้วตามด้วยกระบวนการทางเคมีอื่นๆ แล้วแต่ว่าต้องการจะเน้นผลิตอะไร ดังรูปที่ 1.5 ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้กันอยู่แล้วในอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับก๊าซธรรมชาติ การผลิตผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในเชิงพาณิชย์ยังไม่ให้เห็น แต่มีการวิจัยพัฒนาและทดสอบระบบอย่างต่อเนื่อง เช่น บริษัทในประเทศฝรั่งเศส สวีเดน และ

เยอรมนี ที่มีการติดตั้งระบบผลิตเมทานอลจากก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากขยะ และระบบผลิตน้ำมันดีเซลสังเคราะห์ฟิสเซอร์โทรพจากแก๊สชีวภาพ ซึ่งการทำความสะอาดก๊าซ และการแยกก๊าซเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก ในการลดต้นทุนและนำเทคโนโลยีไปใช้เชิงพาณิชย์ ประสิทธิภาพพลังงานโดยรวมของระบบประมาณ 60% สำหรับขนาดที่ใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพก็มีแนวโน้มที่สูงขึ้นด้วย ในภาพรวมแล้ว เทคโนโลยีนี้มีอนาคตที่ดีในแง่ของพลังงานและเศรษฐศาสตร์ที่จะนำมาใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 1.4 คุณสมบัติสำคัญของเชื้อเพลิงชีวภาพสำหรับการขนส่ง

เชื้อเพลิง	ความหนาแน่น (kg/liter)	ค่าความร้อน (MJ/kg)	หมายเหตุ
ไฮโดรเจน	0.07	142.0	เบากว่าอากาศ ติดไฟได้ที่ผสมบาง ขอบเขตการติดไฟกว้าง
เมทานอล	0.80	23.0	เป็นพิษหากสัมผัสโดยตรง เลขออกเทนสูง (88.6)
เอทานอล	0.79	30.0	เลขออกเทนสูง (89.7)
ไดเมธิลอีเธอร์	0.66	28.2	ที่ 20°C ความดันไอ 5.1 bar
น้ำมันเบนซินสังเคราะห์	0.75	46.0 – 48.0	จากกระบวนการฟิสเซอร์-โทรพส์ ไม่มีกำมะถันและกลุ่มอะโรมาติก
น้ำมันดีเซลสังเคราะห์	0.85	47.0	หลังกำจัดออกซิเจนออกหมดแล้ว
ไบโอดีเซล	0.88	42.0	เลขซีเทนสูง (58.0)
น้ำมันเบนซิน อ่างอิง	0.75	46.0	ขึ้นอยู่กับกระบวนการกลั่น มีกำมะถันและกลุ่มอะโรมาติก เลขออกเทน = 85.0
น้ำมันดีเซล อ่างอิง	0.85	46.0	ขึ้นอยู่กับกระบวนการกลั่น มีกำมะถันและกลุ่มอะโรมาติก เลขซีเทน = 47.5



รูปที่ 1.5 ระบบการผลิตน้ำมันสังเคราะห์ฟิสเซอร์โทรฟ

การหมักเพื่อผลิตเอทานอล

- เอทานอลจากแป้งและน้ำตาล

การผลิตเอทานอลด้วยการหมักแป้งและน้ำตาลเป็นวิธีการพื้นฐานซึ่งถูกนำมาใช้กับอ้อย ข้าวโพด และธัญพืชต่างๆ ในระดับการผลิตขนาดใหญ่ อย่างเช่น ในประเทศบราซิล สหรัฐอเมริกา และฝรั่งเศส โดยทั่วไป เอทานอลจะนำมาใช้ผสมกับน้ำมันเบนซิน หากใช้ผสมในสัดส่วนน้อยก็ไม่จำเป็นต้องปรับแต่งเครื่องยนต์ เอทานอลที่ผลิตจากข้าวโพดและธัญพืช ยังมีต้นทุนการผลิตที่สูงอยู่ จึงยังไม่สามารถแข่งขันกับน้ำมันปิโตรเลียมโดยไม่มีการอุดหนุนจากรัฐได้ ในขณะที่เอทานอลที่ได้จากอ้อยมีประสบการณ์ในการผลิตมานาน โดยเฉพาะในบราซิล ซึ่งได้ปรับปรุงจนถึงจุดที่มีต้นทุนในการผลิตต่ำ และสามารถแข่งขันได้กับน้ำมันปิโตรเลียม การปรับปรุงเพิ่มเติม ไม่ว่าจะเป็น การขยายขนาด การใช้ชานอ้อยและเศษต้นอ้อยมาช่วยในการผลิต การปรับปรุงกระบวนการหมักและผลผลิตจากการเพาะปลูก จะสามารถลดราคาต้นทุนลงได้อีก แต่ปัจจัยที่จำกัดการผลิตอ้อยคือสภาพดินฟ้าอากาศ

- เอทานอลจากวัสดุลิกโนเซลลูโลส

กระบวนการไฮโดรไลซิสของเซลลูโลสหรือลิกโนเซลลูโลสจากชีวมวล เช่น ฟางข้าว หลู้ ไม้ต่างๆ เปิดโอกาสให้มีการผลิตเอทานอลได้จากชีวมวลเหล่านี้ กระบวนการแปลงสภาพจะยุ่งยากขึ้นกว่าการหมักแป้งและน้ำตาล เพราะจะต้องเปลี่ยนเซลลูโลสหรือลิกโนเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลก่อน โดยวัสดุชีวมวลต้องผ่านการเตรียมให้สะอาด ลดขนาดลง และทำลายโครงสร้างเซลล์ด้วยวิธีทางกล เพื่อให้การทำปฏิกิริยาต่อดังวิธีทางเคมีหรือชีวภาพเข้าถึงได้มากขึ้น ส่วนที่เป็นลิกนินจะถูกแยกออก ส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสจะถูกทำให้เป็นน้ำตาล จากนั้นก็สามารถหมักน้ำตาลเหล่านี้ให้เป็นเอทานอลได้ สำหรับภาคการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร เทคโนโลยีนี้เป็นที่น่าสนใจ เพราะสามารถเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของอุตสาหกรรมจากมูลค่าเพิ่มในการใช้พืชผลและเศษวัสดุเหลือใช้ได้

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืช

เมล็ดพืชน้ำมัน เช่น ปาล์ม ถั่วเหลือง สบู่ดำ ละหุ่ง หรือ เมล็ดเรพ สามารถนำมาหีบคั้นเพื่อสกัดเอาน้ำมันพืชมาแปลงเป็นไบโอดีเซลใช้แทนน้ำมันดีเซลได้ การปลูกและผลิตเมล็ดเรพแล้วนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลใช้งานเป็นเทคโนโลยีที่ทางยุโรปมีใช้มานาน โดยเฉพาะในประเทศเยอรมนี ฝรั่งเศส ออสเตรีย และอิตาลี ในประเทศไทยมีการปลูกปาล์มน้ำมันมากซึ่งสามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลได้ ดังเช่น ในประเทศมาเลเซีย อย่างไรก็ตาม อุตสาหกรรมไบโอดีเซลอาจต้องการการอุดหนุนจากรัฐเพื่อให้มั่นคงและแข่งขันได้กับน้ำมันปิโตรเลียม อาจจะเป็นในรูปแบบของการช่วยเหลือด้านการเกษตร และการยกเว้นภาษี

ในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมานั้นได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าจากชีวมวลขึ้นมากมาย รวมไปถึงมีการส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานจากชีวมวลเพิ่มขึ้นด้วย โดยเฉพาะประเทศในแถบทวีปยุโรป ออสเตรเลีย และสหรัฐอเมริกา สำหรับประเทศไทยนั้นนับได้ว่าเป็นประเทศหนึ่งที่มีทรัพยากรชีวมวลจำนวนมาก แต่มีการนำมาใช้ประโยชน์เป็นส่วนน้อย การนำชีวมวลมาแปรรูปเพื่อให้มีคุณค่าเพิ่มมากขึ้น หรือการใช้พลังงานจากชีวมวลเพิ่มขึ้นจะช่วยผลักดันการพัฒนาประเทศได้ดียิ่ง

1.6 พื้นฐานเคมีและสสารสัมพันธ์

1.6.1 สมการเคมี

ในการเขียนปฏิกิริยาเคมี ปกติจะเสนอในรูปของสมการเคมี ด้านหนึ่งจะเป็นสารตั้งต้น ลูกศรแสดงถึงการเกิดปฏิกิริยา ทิศทางลูกศรแสดงถึงทิศทางของปฏิกิริยา อีกด้านหนึ่งจะเป็นสารผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยา ในการเขียนจะต้องมีการดุลสมการให้จำนวนโมเลกุลของแต่ละธาตุทั้งสองด้านต้องเท่ากัน พิจารณาการเผาไหม้ของคาร์บอน อนุมานว่าคาร์บอนทั้งหมดจะออกซิไดซ์เป็น CO ก่อนที่จะกลายเป็น CO₂



หากมีออกซิเจนเพียงพอแล้ว CO จะออกซิไดซ์อีกครั้งกลายเป็น CO₂

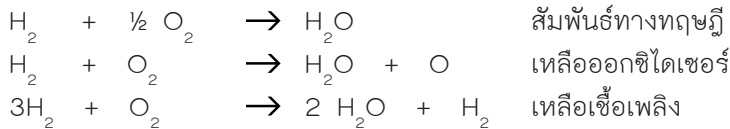


เมื่อรวมสองสมการเข้าด้วยกันจะได้



ดังนั้นจะเห็นได้ว่า คาร์บอน 1 โมลทำปฏิกิริยากับออกซิเจน 1 โมลทำให้เกิด CO₂ 1 โมล

ส่วนผสมปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) หมายถึง สัดส่วนผสมของสารตั้งต้นในปฏิกิริยาที่ทำปฏิกิริยาพอดีกันเป็นไปตามทฤษฎีแล้วได้ออกมาเป็นสารผลิตภัณฑ์โดยไม่มีส่วนที่เหลือตกค้างอยู่ของสารตั้งต้นเลยแม้แต่หนึ่ง โดยไม่มีการแตกตัวเชิงโมเลกุล หากแสดงในรูปสมการเคมีก็จะเป็นแบบที่มีการสมดุลโมลของเคมีแล้ว ยกตัวอย่างเช่น



มีเชื้อเพลิงเหลือ เรียกว่า ผสมหนา มีออกซิไดเซอร์เหลือ เรียกว่า ผสมบาง ให้ f เป็นอัตราส่วนเชิงมวลของเชื้อเพลิงและออกซิไดเซอร์หรืออากาศ ในปฏิกิริยาหนึ่งๆ อัตราส่วนสมมูลหาได้จาก

$$\varphi \equiv \frac{f}{f_s} \quad (1.4)$$

โดย f_s เป็นอัตราส่วนปริมาณสารสัมพันธ์เชิงมวลซึ่งที่ส่วนผสมเป็นปริมาณสารสัมพันธ์ อัตราส่วนสมมูลจะมีค่าเป็นหนึ่งใน

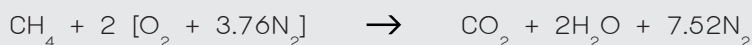
สำหรับการเผาไหม้เชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนกับอากาศ ในอากาศมีอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนประมาณ 21 % ไนโตรเจน 78 % และ อาร์กอน 1 % ไนโตรเจนกับอาร์กอนจะไม่ทำปฏิกิริยาระหว่างการเผาไหม้ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ เราจะทำเสมือนว่าในอากาศมีไนโตรเจน 79 % ออกซิเจน 21 % โดยโมล จะได้

$$\frac{\text{mol } N_2}{\text{mol } O_2} = \frac{79}{21} = 3.76 \frac{\text{mol } N_2}{\text{mol } O_2} \quad (1.5)$$

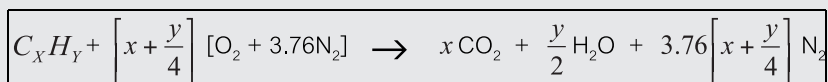
ดังนั้น 1 โมลอากาศ จะประกอบด้วย $O_2 + 3.76 N_2$

ตัวอย่างที่ 1.2:

การเผาไหม้มีเทนกับอากาศ



ปฏิกิริยาการเผาไหม้ทั่วไปของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอนกับอากาศเขียนในรูปสัมประสิทธิ์ดุลสมการเคมีของการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



ดังนั้น จำนวนโมลของอากาศต่อโมลของเชื้อเพลิง

$$n_{air} = (n_{O_2} + n_{N_2}) \left[x + \frac{y}{4}\right] = [1 + 3.76] \left[x + \frac{y}{4}\right] = 4.76 \left[x + \frac{y}{4}\right]$$

1.6.2 พื้นฐานเคมี

แหล่งเชื้อเพลิงส่วนใหญ่เป็นสารอินทรีย์ ปกติเราจะพบกับธาตุกลุ่มนี้ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) ธาตุทั้งสี่มีมวลอะตอมเท่ากับ 12, 1, 16 และ 14 ตามลำดับ มวลโมเลกุลของสารประกอบใดๆ ที่เกิดจากธาตุเหล่านี้ สามารถหาได้ โดยการบวกมวลอะตอมขององค์ประกอบ เช่น น้ำ (H_2O) มวลโมเลกุลเป็น $H(1) + H(1) + O(16) = 18$ และ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็น 44

การพิจารณาโมลของสาร เป็นพื้นฐานที่สำคัญ จำนวนสาร 1 โมล หมายถึงมวลของสารนั้นๆ ในหน่วยกรัมที่มีค่าเท่ากับมวลโมเลกุลของตัวเอง เช่น ธาตุคาร์บอนหนัก 12 กรัม คิดเป็น 1 โมลของคาร์บอน หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ 44 กรัมคือ 1 โมลของสารประกอบ จะเห็นได้ว่าจำนวนโมลและมวลของธาตุหรือสารประกอบมีความสัมพันธ์กัน ในรูปของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลที่คงที่ค่าหนึ่ง นั่นคือ เลขอวอกาโดร (Avogadro's number) มีสัญลักษณ์เป็น N_0 และมีค่าเท่ากับ 6.023×10^{23} อนุภาคต่อโมล

สำหรับก๊าซผสม มวลรวมของก๊าซผสมจะเท่ากับผลรวมของมวลของก๊าซผสมแต่ละตัวมารวมกัน จะได้ดังนี้

$$m_{tot} = \sum_i m_i = m_A + m_B + m_C + \dots \quad (1.6)$$

โมลรวมของก๊าซผสมจะเท่ากับผลรวมของโมลของก๊าซผสมแต่ละตัวมารวมกัน จะได้ดังนี้

$$n_{tot} = \sum_i n_i = n_A + n_B + n_C + \dots \quad (1.7)$$

อัตราส่วนโดยมวล (mass fraction)

$$X_i = \frac{m_i}{m_{tot}} \quad \text{และ} \quad \boxed{\sum_{i=1}^n X_i = 1} \quad \text{หรือ} \quad X_A + X_B + X_C + \dots = 1 \quad (1.8)$$

$$\frac{m_A}{m_{tot}} + \frac{m_B}{m_{tot}} + \frac{m_C}{m_{tot}} + \dots = 1 \quad (1.9)$$

อัตราส่วนโดยโมล (mole fraction)

$$Y_i = \frac{n_i}{n_{tot}} \quad \text{และ} \quad \boxed{\sum_{i=1}^n Y_i = 1} \quad \text{หรือ} \quad Y_A + Y_B + Y_C + \dots = 1 \quad (1.10)$$

$$\frac{n_A}{n_{tot}} + \frac{n_B}{n_{tot}} + \frac{n_C}{n_{tot}} + \dots = 1 \quad (1.11)$$

จำนวนโมลของก๊าซองค์ประกอบแต่ละตัว เท่ากับ มวลของก๊าซนั้นหารด้วยมวลโมเลกุลของก๊าซนั้น มวลโมเลกุลของก๊าซผสม หาได้ดังนี้

$$MW_{\text{mix}} = \frac{m_{\text{tot}}}{n_{\text{tot}}} = \frac{\sum_i m_i}{n_{\text{tot}}} = \frac{\sum_i n_i m_i}{n_{\text{tot}}} \quad \text{หรือ} \quad MW_{\text{mix}} = \sum_i Y_i M_i \quad (1.12)$$

1.6.3 กฎของก๊าซ

พิจารณา สสารทั้งสามสถานะ ของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ในกรณีของของแข็ง และของเหลว คุณสมบัติทางอุณหพลศาสตร์เป็นเพียงค่าที่วัดได้จริง ในกรณีของก๊าซ เราจะประมาณค่าโดยตั้งสมมติฐานให้ก๊าซมีคุณสมบัติเป็นก๊าซสมบูรณ์ (perfect gas) ซึ่งจะเป็นไปตามกฎของสถานะ (equation of state) คือ

$$PV = nRT \quad (1.13)$$

โดยที่ P คือความดัน V เป็นปริมาตรของระบบ T เป็นอุณหภูมิสัมบูรณ์ R คือค่าคงที่สากลของก๊าซ เท่ากับ 8.314 J/mol K และ n เป็นจำนวนโมลของระบบ

$$n = \sum_{i=1}^M n_i \quad (1.14)$$

หากทราบสมการด้านบนด้วย V เราจะได้

$$P = cRT = \rho \frac{R}{MW} T \quad (1.15)$$

โดย c เป็นความเข้มข้นเชิงโมล $= n/V$ และ MW คือ มวลโมเลกุลของก๊าซ

ก๊าซสมบูรณ์มีคุณสมบัติว่า หากมีก๊าซอื่นนำเข้ามารวมใส่ในที่บรรจุเดียวกัน ความดันของก๊าซที่อยู่ในตอนแรกที่ทำหน้าที่บรรจุจะไม่เปลี่ยนค่า ในส่วนผสมของก๊าซหลายๆ ชนิด ความดันของก๊าซแต่ละชนิด i มีค่าเป็น P_i ค่าความดันย่อยแต่ละค่าเหล่านี้ หาได้จาก

$$P_i = c_i RT \quad (1.16)$$

โดยความดันย่อยแต่ละตัวจะไม่ขึ้นต่อกัน ซึ่งจะได้ว่าความดันรวมของระบบจะเท่ากับผลรวมของความดันย่อยแต่ละชนิด

$$P = \sum P_i \quad (1.17)$$

นี่คือ กฎความดันย่อยของดาลตัน (Dalton law) ในส่วนผสมของสสารแต่ละชนิดไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ในที่นี้เราจะกำหนดให้ไม่มีการปฏิสัมพันธ์ระหว่างสสาร ดังนั้นพลังงานและคุณสมบัติของสสารแต่ละชนิดมีค่าเท่าเดิมเหมือนตอนที่มียูเดี่ยวเพียงชนิดเดียว

1.6.4 เคมีอุณหศาสตร์

เคมีอุณหศาสตร์ (thermochemistry) เป็นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการประยุกต์อุณหพลศาสตร์เข้ามาใช้กับปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น

ความร้อนของปฏิกิริยาและการก่อเกิด

ความร้อนมาตรฐานของปฏิกิริยา (standard enthalpy of reaction) มีนิยามว่าเป็นปริมาณความร้อนที่เปลี่ยนแปลงสุทธิจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารตั้งต้นทั้งหมดแล้วเกิดออกมาเป็นผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยานั้น ซึ่งอาจจะเป็นการคายความร้อน (exothermic) หรือดูดความร้อน (endothermic) ความร้อนของการเกิดปฏิกิริยา อาจหาได้จากผลต่างของความร้อนของการก่อเกิดของสารผลิตภัณฑ์และของสารตั้งต้น

$$\Delta H_{T_0} = \sum_{\text{prod}} n_i (\Delta H_f^0)_{T_{0,i}} - \sum_{\text{reactant}} n_j (\Delta H_f^0)_{T_{0,j}} = -Q_p \quad (1.18)$$

ซึ่ง ความร้อนของการก่อเกิดมาตรฐาน ΔH_f° เป็นความร้อนที่ได้ เมื่อสารประกอบก่อตัวขึ้นจากสารประกอบย่อยอื่นๆ ที่สถานะมาตรฐาน (standard state) ปกติ คือ 298 เคลวิน และ 1 บรรยากาศ สถานะมาตรฐานหมายความว่า สำหรับแต่ละสถานะจะมีสถานะอ้างอิงอยู่เสมอ สำหรับสถานะก๊าซ สถานะอ้างอิงมาตรฐาน คือสถานะที่ก๊าซมีพฤติกรรมแบบอุดมคติที่อุณหภูมิ นั้นๆ นั่นคือ สถานะที่โมเลกุลไม่มีปฏิสัมพันธ์ต่อกัน และเป็นไปตามกฎของสถานะก๊าซในอุดมคติ ส่วนสถานะอ้างอิงมาตรฐาน สำหรับสถานะของเหลว และของแข็ง ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ คือ สถานะจริงของสสารที่ความดันหนึ่งบรรยากาศ สัญลักษณ์ที่ใช้แทนสมบัติของสสารที่สถานะต่างๆ มี ตัวอย่าง คือ H_T° โดยเครื่องหมาย $^\circ$ ด้วยก หมายถึงสถานะมาตรฐาน ส่วนตัวห้อย T คือ อุณหภูมิที่กำหนดความร้อนของการก่อเกิดของธาตุที่สถานะมาตรฐานเป็นศูนย์ ค่าตัวอย่างในตารางที่ 1.5 ซึ่งเรียงตามลำดับความร้อนมากที่สุดที่ให้ออกมา

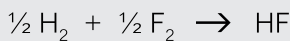
ตารางที่ 1.5 ค่าความร้อนของการก่อเกิด ที่ 298 K (Strahle, 1996)

สารเคมี	ชื่อ	สถานะ	ΔH_f° (kJ/mol)	Δh_f° (kJ/g)
C	คาร์บอน	ไอ	716.67	59.72
N	ไนโตรเจนอะตอม	ก๊าซ	472.68	33.76
O	ออกซิเจนอะตอม	ก๊าซ	249.17	15.57
C ₂ H ₂	อะเซททีลีน	ก๊าซ	227.06	8.79
H	ไฮโดรเจนอะตอม	ก๊าซ	218.00	218.00
O ₃	โอโซน	ก๊าซ	142.67	2.97

สารเคมี	ชื่อ	สถานะ	ΔH_f° (kJ/mol)	Δh_f° (kJ/g)
NO	ไนตริกออกไซด์	ก๊าซ	90.29	3.01
C ₆ H ₆	เบนซีน	ก๊าซ	82.96	1.06
C ₆ H ₆	เบนซีน	ของเหลว	49.06	0.63
C ₂ H ₄	อีthin	ก๊าซ	52.38	1.87
N ₂ H ₄	ไฮดราซีน	ของเหลว	50.63	1.58
OH	สารอนุมูลไฮดรอกซิล	ก๊าซ	38.99	2.29
O ₂	ออกซิเจน	ก๊าซ	0	0
N ₂	ไนโตรเจน	ก๊าซ	0	0
H ₂	ไฮโดรเจน	ก๊าซ	0	0
C	คาร์บอน	ของแข็ง	0	0
NH ₃	แอมโมเนีย	ก๊าซ	-45.90	-2.70
C ₂ H ₄ O	เอธิลีนออกไซด์	ก๊าซ	-51.08	-0.86
CH ₄	มีเทน	ก๊าซ	-74.87	-4.68
C ₂ H ₆	อีเทน	ก๊าซ	-84.81	-2.83
CO	คาร์บอนมอนอกไซด์	ก๊าซ	-110.53	-3.95
C ₄ H ₁₀	บิวเทน	ก๊าซ	-124.90	-2.15
CH ₃ OH	เมทานอล	ก๊าซ	-201.54	-6.30
CH ₃ OH	เมทานอล	ของเหลว	-239.00	-7.47
H ₂ O	น้ำ	ก๊าซ	-241.83	-13.44
C ₈ H ₁₈	ออกเทน	ก๊าซ	-250.31	-0.46
H ₂ O	น้ำ	ของเหลว	-285.10	-15.84
SO ₂	ซัลเฟอร์ไดออกไซด์	ก๊าซ	-296.84	-4.64
C ₁₂ H ₁₆	โดเดคเคน	ของเหลว	-347.77	-2.17
CO ₂	คาร์บอนไดออกไซด์	ก๊าซ	-393.52	-8.94
SO ₃	ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์	ก๊าซ	-395.77	-4.95

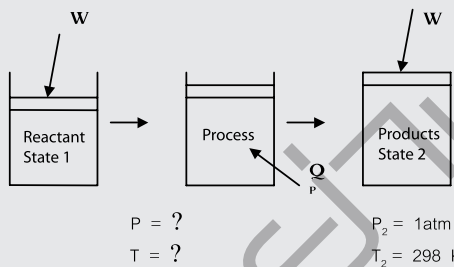
ตัวอย่างที่ 1.3:

จงหาความร้อนของการก่อเกิด สำหรับการทำปฏิกิริยาของสารเคมีตัวอย่าง ไฮโดรเจนและฟลูออรีน



วิธีทำ

สำหรับกระบวนการที่มีความดันและอุณหภูมิ 1 bar, 298 K คงที่ ดังรูป ค่าเอนทัลปีของการก่อเกิดมาตรฐานเป็นค่าเอนทัลปีของปฏิกิริยาการเกิดตัวของสารจากสภาพธาตุบริสุทธิ์ในสถานะที่เสถียรที่สุด ณ $T = 298 \text{ K}$, $P = 1 \text{ bar}$ และค่า $(\Delta H_f^\circ)_{298}$ สามารถหาค่าได้จากตาราง ก11, ก27 และ ก28 ท้ายเล่ม เราจะได้

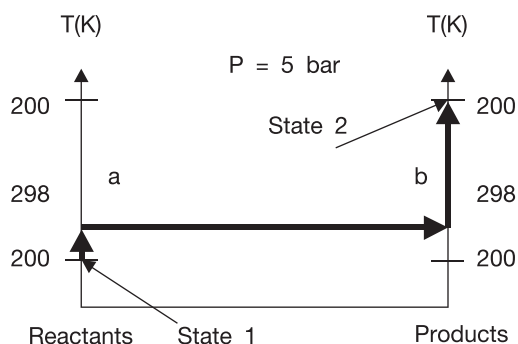


$$Q_p = \Delta H = H_p - H_R = (H_{298})_{\text{HF}} - \frac{1}{2} (H_{298})_{\text{H}_2} - \frac{1}{2} (H_{298})_{\text{F}_2}$$

$$Q_p = -272.546 - \frac{1}{2} (0) - \frac{1}{2} (0) = -272.546 \text{ kJ}$$

$$(\Delta H_f^\circ)_{298, \text{HF}} = -272.546 \text{ kJ/mol}$$

สำหรับ กระบวนการที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เช่น กระบวนการที่ปฏิกิริยาการเกิดตัวที่ไม่เสถียร เป็นการเกิดตัวที่ความดันและอุณหภูมิอื่น ไม่เป็น 1 bar และ 298 K เช่น การทำปฏิกิริยาของ H_2 และ F_2 ที่ 5 bar และ 200 K ถามว่าจะเกิดอะไรขึ้น ถ้าทำให้ความดันคงที่จนเกิด HF และ จบที่ 2000 K เส้นทางการเกิดปฏิกิริยาจะเป็นดังรูปที่ 1.6



รูปที่ 1.6 การเกิดปฏิกิริยาของก๊าซสัมพันธ์และเปลี่ยนไปยังสถานะสุดท้ายของปฏิกิริยา

- 1 → a ความร้อน ที่ความดันคงที่ 298 K
 a → b ปฏิกิริยาที่ 298 K และ 5 bar
 b → 2 ความร้อนของสารผลิตภัณฑ์เพิ่มไปจนถึง 2000 K ความดันคงที่

การเปลี่ยนแปลงของเอนทัลปีทั้งหมด เป็นผลรวมของการเปลี่ยนแปลงเอนทัลปีสำหรับกระบวนการ อย่างไรก็ตาม ในการคลายตัวหรือการอัดในกระบวนการ มีความต้องการการถ่ายเทความร้อนและงานมากระทำโดยการไหล จากกราฟจะได้สมการดังนี้

$$H_{T,i} = H_i^\circ - H_{298,i}^\circ + (\Delta H_f^\circ)_{298,i}$$

ข้อมูลจากตาราง จะได้

$$H_{200, H_2} = -2.77 + 0$$

$$H_{2000, H_2} = 52.95 + 0$$

$$H_{200, F_2} = -2.99 + 0$$

$$H_{2000, F_2} = 62.75 + 0$$

$$(\Delta H_f^\circ)_{2000, HF} = -277.57$$

$$Q_{P,a} = \frac{1}{2} (H_{2000, H_2} - H_{200, H_2} + H_{2000, F_2} - H_{200, F_2})$$

$$= \frac{1}{2} (52.95 - 2.77 + 62.75 - 2.99) = 60.75 \text{ kJ}$$

$$Q_{P,b} = (\Delta H_f^\circ)_{2000, HF} = -277.57 \text{ kJ}$$

เพราะฉะนั้น

$$Q_P = \Delta H_{1-2} = 60.75 - 277.57 = -216.83 \text{ kJ}$$

ตัวอย่างที่ 1.4:

จงหาความร้อนของการก่อเกิด ของชีวมวลตัวอย่าง หากสูตรเคมีอย่างง่ายเป็น $CH_{1.35}O_{0.617}$ และให้ความร้อนของปฏิกิริยา เป็น 476 kJ/mol

วิธีทำ สมการ $CH_{1.35}O_{0.617} + a O_2 \rightarrow b CO_2 + c H_2O$

ดุลสมการ

ได้ $a = 1.029, b = 1$ และ $c = 0.675$

เป็น $CH_{1.35}O_{0.617} + 1.029 O_2 \rightarrow CO_2 + 0.675 H_2O$

$$Q_P = \Delta H = H_P - H_R = (H_{298, CO_2}) + 0.675 (H_{298, H_2O}) - (H_{298, biomass}) - 1.029 (H_{298, O_2})$$

สำหรับกระบวนการ ที่มีความดันและอุณหภูมิ 1 bar, 298 K คงที่ ค่า $(\Delta H_f^\circ)_{298}$ สามารถหาได้จากตาราง g5, g12 และ g21 ท้ายเล่ม เราจะได้

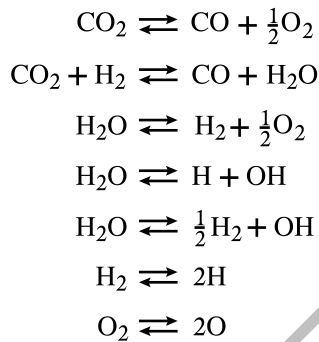
$$- 476 = - 393.5 + (0.675)(-241.8) - (H_{298, biomass}) - (1.029)(0)$$

$$= - 556.5 - (H_{298, biomass})$$

$$(H_{298, biomass}) = - 556.5 + 476 = - 80.5 \text{ kJ/mol}$$

สภาวะสมดุลทางเคมีและพลังงานอิสระ

ในปฏิกิริยาทางเคมีและการเผาไหม้ต่างๆ ไป ตามปกติจะมีการก่อเกิดของสารประกอบย่อยๆ ที่ไม่เสถียรอื่นๆ ด้วย จากปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุล (dissociation) ซึ่งทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์เต็มที่ ยกตัวอย่าง การแตกตัวของกลุ่มสารประกอบ C - H - O อาจเป็นไปตามปฏิกิริยาด้านล่าง ดังนี้



ปริมาณสารประกอบย่อยๆ เหล่านี้ที่เป็นผลมาจากปฏิกิริยาการแตกตัว มีปริมาณที่น้อยมากๆ เมื่อเทียบกับสารประกอบที่เสถียรอื่นๆ แต่ก็มีผลต่อปฏิกิริยาทั้งหมด ซึ่งโดยรวมก็ต้องเป็นไปตามภาวะที่สมดุลเคมีของมวล (chemical equilibrium) และต้องเป็นปฏิกิริยาสมดุล ผลของปฏิกิริยาการแตกตัวของโมเลกุลจะลดค่าอุณหภูมิเปลวไฟที่ได้เสมอเนื่องจากสารย่อยๆ ที่ไม่เสถียรนี้มีค่าความร้อนของการก่อเกิดตัวสูงกว่าผลิตภัณฑ์หลักของปฏิกิริยา เพราะฉะนั้นในการคำนวณอุณหภูมิเปลวไฟและปริมาณสารผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะต้องพิจารณาถึงสภาวะสมดุลทางเคมีนี้ซึ่งมีความสัมพันธ์ต่อสิ่งที่ต้องการหาด้วย

สภาวะสมดุลทางเคมี คือสภาวะที่สารต่างๆ อยู่กันอย่างสมดุล ไม่มีแนวโน้มที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทันทีทันใด (spontaneous change) อีกต่อไป หาได้จากการประยุกต์ใช้กฎข้อที่หนึ่งและข้อที่สองของอุณหพลศาสตร์และแนวคิดเรื่องพลังงานอิสระของกิบส์ (Gibbs' free energy) โดยให้

$$G \equiv H - TS \quad (1.19)$$

สภาวะสมดุลทางเคมีของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาที่อุณหภูมิและความดันคงที่ใดๆ จะเกิดขึ้นได้ ก็ต่อเมื่อพลังงานอิสระมีค่าที่จุดต่ำสุด หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าพลังงานอิสระ

$$(dG)_{T,P} = 0 \quad (1.20)$$

พิจารณาปฏิกิริยาของก๊าซในอุดมคติ $aA + bB \leftrightarrow cC + dD$

จากการที่ผลิตภัณฑ์เกิดมาจากสารตั้งต้นซึ่งที่สภาวะสมดุลทางเคมี ความเข้มข้นของสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์จะมีค่าคงที่เนื่องมาจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไปข้างหน้าและย้อนกลับมีค่าเท่ากัน เราจะสามารถหาค่าคงที่สมดุล (equilibrium constant) ของปฏิกิริยาได้ ในรูปของความดันย่อยคือ

$$K_p = \frac{P_C^c P_D^d}{P_A^a P_B^b} \quad (1.21)$$

โดยมีมิติขึ้นอยู่กับผลรวมของสัมประสิทธิ์ในปฏิกิริยา ($c + d - a - b$) เขียน K_p ให้อยู่ในรูปของจำนวนโมลและความดันรวม P จะได้

$$K_p = \frac{n_C^c n_D^d}{n_A^a n_B^b} \left(\frac{P}{\sum n_i} \right)^{c+d-a-b} \quad (1.22)$$

ถ้า ($c + d - a - b$) ไม่เป็นศูนย์ จะมีผลของความดันต่อปฏิกิริยาต่อสภาวะสมดุลมีค่าต่างข้างต้น และ K_p เกี่ยวโยงกับการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระ ΔG^0 เมื่อสารตั้งต้นและสารผลิตภัณฑ์ทุกตัวอยู่ที่สถานะมาตรฐาน ดังนี้

$$-\Delta G^0 = RT \ln K_p \quad (1.23)$$

$$K_p = \exp(-\Delta G^0 / RT) \quad (1.24)$$

โดยปกติ K_p ไม่ได้ขึ้นอยู่กับความดันรวม แต่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิเพียงอย่างเดียว พิจารณาการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระเมื่อเทียบกับอุณหภูมิซึ่งจะได้ว่า ที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าเป็น

$$\left[\frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{\Delta G^0}{T} \right) \right]_P = \frac{-\Delta H^0}{T^2} \quad (1.25)$$

การเปลี่ยนแปลงของ K_p เทียบกับอุณหภูมิเป็น

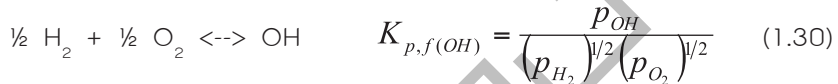
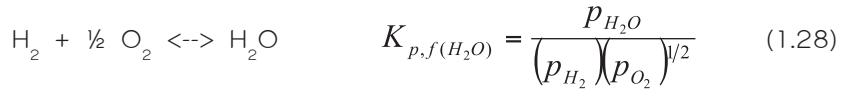
$$\frac{d}{dT} (\ln K_p) = \frac{\Delta H^0}{RT^2} \quad (1.26)$$

ถ้าให้ ΔH^0 มีอัตราการเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิต่างๆ จะได้

$$\ln \frac{K_{p2}}{K_{p1}} = -\frac{\Delta H^0}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) \quad (1.27)$$

สำหรับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิใหม่ๆ จะได้ $K_{p_2} > K_{p_1}$ เมื่อ $T_2 > T_1$

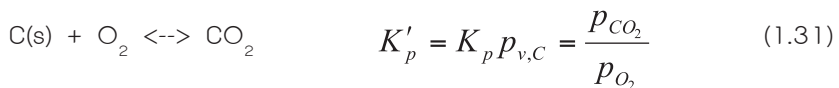
ในภาคผนวกท้ายเล่ม ได้รวบรวมค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการเผาไหม้ไว้ในรูปของลอกกาสิทธิ์ฐานสิบ ค่าคงที่สมดุลของการก่อเกิด $K_{p,f}$ มีพื้นฐานมาจากสมการสมดุลของการก่อเกิดสารจากธาตุที่สภาวะปกติ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอื่นๆได้ และแน่นอนว่าค่าคงที่สมดุลของการก่อเกิดธาตุย่อมเป็นหนึ่งใน เช่น



พิจารณา ตัวอย่างสมการเคมี $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow 2\text{H} + \text{O}$ จะได้ว่า

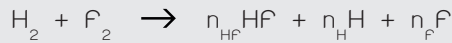
$$\begin{aligned} K_{p,f} &= \frac{P_{\text{H}}^2 P_{\text{O}}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} = \left(\frac{P_{\text{H}}}{P_{\text{H}_2}^{1/2}} \right)^2 \left(\frac{P_{\text{O}}}{P_{\text{O}_2}^{1/2}} \right) \left(\frac{P_{\text{H}_2} P_{\text{O}_2}^{1/2}}{P_{\text{H}_2\text{O}}} \right) \\ &= \frac{(K_{p,f(\text{H})})^2 (K_{p,f(\text{O})})}{(K_{p,f(\text{H}_2\text{O})})} \end{aligned}$$

สำหรับปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับสถานะของแข็งและของเหลว ความดันย่อยที่เกี่ยวข้องจะเป็นความดันไอ ซึ่งในตารางจะมีค่าคงที่สมดุลโดยรวมไว้อยู่แล้ว เช่น



ตัวอย่างที่ 1.5:

สมมติให้ปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรเจนกับฟลูออรีนออกมาเป็นดังผลต่อไปนี้ ที่ความดันท้ายสุดเป็น 1 bar อุณหภูมิ 3500 K จงหาปริมาณผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น



วิธีทำ

จากสมดุลสมการเคมี $2 = n_{\text{HF}} + n_{\text{H}}$ และ $2 = n_{\text{HF}} + n_{\text{F}}$

ฉะนั้นจะได้ $n_{\text{H}} = n_{\text{F}}$ และ $n_{\text{HF}} = 2 - n_{\text{H}}$

ปฏิกิริยาและค่าคงที่สมดุล ที่อุณหภูมินี้

$$\frac{1}{2} \text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{F}_2 \leftrightarrow \text{HF} \quad K_{p,f(\text{HF})} = \frac{P_{\text{HF}}}{(P_{\text{H}_2})^{1/2} (P_{\text{F}_2})^{1/2}} = 10^{4.221}$$

$$\frac{1}{2} \text{H}_2 \leftrightarrow \text{H} \quad K_{p,f(\text{H})} = \frac{P_{\text{H}}}{(P_{\text{H}_2})^{1/2}} = 10^{-0.228}$$

$$\frac{1}{2} \text{F}_2 \leftrightarrow \text{F} \quad K_{p,f(\text{F})} = \frac{P_{\text{F}}}{(P_{\text{F}_2})^{1/2}} = 10^{2.121}$$

จำนวนโมลรวมของผลิตภัณฑ์

$$n = n_{\text{HF}} + n_{\text{H}} + n_{\text{F}} = 2 + n_{\text{H}}$$

สำหรับปฏิกิริยา



เขียนค่าคงที่สมดุลในเทอมของจำนวนโมลของสารและความดันรวม จะได้

$$K_p = \frac{P_{\text{HF}}}{P_{\text{H}} P_{\text{F}}} = \frac{(K_{p,f(\text{HF})})}{(K_{p,f(\text{H})})(K_{p,f(\text{F})})} = \left(\frac{n}{p}\right) \frac{n_{\text{HF}}}{n_{\text{H}} n_{\text{F}}}$$

แทนค่า

$$10^{4.221-2.121+0.228} = \frac{(2+n_{\text{H}})(2-n_{\text{H}})}{(1) n_{\text{H}} n_{\text{H}}}$$

$$214 = \frac{4-n_{\text{H}}^2}{n_{\text{H}}^2}$$

$$n_{\text{H}} = n_{\text{F}} = 0.0187 \quad \text{และ} \quad n_{\text{HF}} = 1.9813$$

1.7 แนวทางงานวิจัยในอนาคต

จากงานวิจัยและพัฒนาที่ผ่านมา เกี่ยวกับพลังงานชีวมวลและเทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวลโดยรวม ในส่วนของการวิเคราะห์ทางทฤษฎี การทดสอบในห้องปฏิบัติการ การพัฒนาต้นแบบสาธิต การพัฒนานวัตกรรมไปสู่เชิงพาณิชย์ และการศึกษาเชิงนโยบาย พบประเด็นความท้าทายที่น่าสนใจ ในการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม ดังตัวอย่าง

- การวางแผนพลังงานชีวมวล ในระดับภูมิภาค ระดับชาติ และระดับท้องถิ่น จากอัตราการใช้ในปัจจุบัน และแนวโน้มในอนาคต ภายใต้เงื่อนไขและกรณีศึกษาต่างๆ ที่อาจเป็นไปได้ ตามแนวนโยบายของรัฐที่สนับสนุนส่งเสริมให้มีการใช้พลังงานชีวมวลอย่างแพร่หลาย การวางแผนการผลิต การกำหนดราคา การกำหนดอัตราอุดหนุน รวมถึงการศึกษารูปแบบตลาดพลังงานชีวมวลและแนวทางการปฏิรูปในอนาคต
- โครงสร้างพื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับพลังงานชีวมวล การส่งกระจายไปยังผู้ใช้ และการใช้ประโยชน์ทั้งทางความร้อน ไฟฟ้า หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสังเคราะห์สำหรับการขนส่ง
- การจัดการโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ (การเก็บเกี่ยว การรวบรวม การกักเก็บ การแปลงสภาพเบื้องต้น การขนส่ง การกระจายของ) ของชีวมวลจากการเกษตร เศรษฐศาสตร์เชื้อเพลิงใช้ทางการเกษตร ชีวมวลจากอุตสาหกรรม และชีวมวลจากแหล่งใหม่ๆ เพื่อการผลิตพลังงาน
- การวิเคราะห์เชิงเทคนิคและเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตที่มีการรวมหลายๆ เทคโนโลยีเข้าด้วยกัน เพื่อใช้ในการประเมินการปฏิบัติงาน ความเสี่ยง ความคุ้มค่าในการลงทุน
- การพัฒนาและประเมินผล เทคโนโลยีโรงกลั่นชีวภาพบูรณาการ (integrated biorefinery technology) ทั้งกับโครงสร้างที่มีอยู่ และที่ต้องพัฒนาขึ้นใหม่ และแนวทางการขยายขนาดไปสู่อุตสาหกรรม
- ความยั่งยืนของการใช้พลังงานชีวมวล จากการประเมินวัฏจักรชีวิต การประเมินผลกระทบ การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ และการประเมินความคุ้มค่าทางพลังงาน

บรรณานุกรม

- Brown, R. C. (2003) *Biorenewable Resources: Engineering New Products from Agriculture*, Blackwell Publishing, Ames.
- Capareda, S. C. (2014) *Introduction to Biomass Energy Conversions*, CRC Press, Boca Raton.
- Drapcho, C. M., Nhuan, N. P., Walker, T. H. (2008) *Biofuels Engineering Process Technology*, McGraw-Hill, New York.
- Dry, M. E. (2002) The Fisher-Tropsch process: 1950-2000. *Catalysis Today* 71: 227-241.
- Faaij, A. (2006) Modern biomass conversion technologies. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 11: 343-375.
- Graziani, M., Fornasiero, P. (2007) *Renewable Resources and Renewable Energy, a Global Challenge*, CRC Press, Boca Raton.
- Johansson, T.B., Goldemberg, J. (2002) *Energy for Sustainable Development: a Policy Agenda*. United Nations Development Programme, New York.
- Klass, D. L. (1998) *Biomass for Renewable Energy, Fuels, and Chemicals*, Academic Press, San Diego.
- Koopmans, A. (2005) Biomass energy demand and supply for South and Southeast Asia - assessing the resource base. *Biomass and Bioenergy* 28: 133-150.
- Parikka, M. (2004) Global biomass fuel resources. *Biomass and Bioenergy* 27: 613-620.
- Strahle, W. C. (1996) *Introduction to Combustion*, Gordon and Breach, New York.
- Strezov, V., Evans, T. J. (2015) *Biomass Processing Technologies*, CRC Press, Boca Raton.
- Tippayawong, N., Chaichana, C., Swe, M. L. (2009) Distributed electricity generation from biomass gasification as a sustainable energy option for rural Myanmar. *International Journal of Distributed Energy Resources* 5: 71-82.
- Wayman, M., Parekh, S. (1990) *Biotechnology of Biomass Conversion: Fuels and Chemicals from Renewable Resources*, Open University Press, Philadelphia.
- Wereko-Brobby, C., Hagen, E. B. (1996) *Biomass Conversion and Technology*, John Wiley & Sons, Chichester.

ศรีอยุธยา



บทที่ 2

ชีวมวล

2.1 แหล่งชีวมวล

ชีวมวล เป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียน กักเก็บพลังงานจากดวงอาทิตย์ ซึ่งมาจากการสังเคราะห์แสง และเกิดขึ้นหมุนเวียนซ้ำแล้วซ้ำอีกได้ ในธรรมชาติสิ่งแวดล้อม สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงาน เพื่อใช้ทดแทนพลังงานที่ได้จากแหล่งพลังงานฟอสซิล ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัด และอาจหมดลงได้ ชีวมวล เป็นสารอินทรีย์ที่ได้จากสิ่งมีชีวิต พืช และสัตว์ หรือกระบวนการที่เกี่ยวข้องทางชีวภาพ เกิดขึ้นตามธรรมชาติ มีความหลากหลายของรูปแบบ ลักษณะเฉพาะแหล่ง ตามความหลากหลายและซับซ้อนทางชีววิทยาและสภาพสิ่งแวดล้อม

ชีวมวล ประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้ง มีปริมาณของไนโตรเจน และธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ในรูปแบบของคาร์โบไฮเดรต หรือ ลิกโนเซลลูโลส ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมาย ทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักในรูปแบบอื่นๆ โดยทั่วไป ชีวมวลอาจจะจำแนกออกตาม ลักษณะทางชีวภาพและแหล่งที่มา เป็น 6 ประเภทหลักๆ (Vassilev et al., 2010) ดังนี้

(1) ไม้และพืชชีวมวล (wood and woody biomass)

ได้แก่ ชีวมวลจำพวก ไม้ยืนต้น ไม้ผลัดใบ ไม้ดอก หรือพืชเมล็ดเปลือย (Gymnospermous) ไม้เนื้ออ่อนหรือแข็ง กิ่ง ก้าน ใบ ไม้พุ่ม เศษไม้ ท่อนไม้ ชี้เลื่อย และอื่นๆ

(2) ชีวมวลเกษตร (herbaceous and agricultural biomass)

ได้แก่ ชีวมวลจำพวก ไม้ล้มลุก พืชการเกษตร และการแปรรูปชีวมวลหลากหลายชนิด เช่น

- หญ้า และไม้ดอก (อัลฟาฟ่า อ้อ พุทธรักษา กก ไม้ไผ่ และอื่นๆ)
- พวง (ข้าว ถั่วลิสง ข้าวโพด ทานตะวัน ข้าวสาลี และอื่นๆ)
- ลำต้น (ถั่ว ข้าวโพด ปอ ฟ้าย ทานตะวัน ต้นยาสูบ และอื่นๆ)
- เยื่อใย (มะพร้าว ข้าวโพด ปาล์ม และอื่นๆ)
- เปลือก (อัลมอนต์ กะลามะพร้าว เม็ดฝ้าย เมล็ดกาแฟ ฮาเซลนัท เม็ดมะกอก ข้าวเปลือกเมล็ดทานตะวัน เปลือกวอลนัท และอื่นๆ)
- เม็ดใน (แอฟพริคอต เซอร์รี่ มะกอก ฟิท พลัม และอื่นๆ)
- อื่นๆ (ผลไม้ เมล็ด มะพร้าว ชานอ้อย เศษอาหาร เค้ก และประเภทอื่นๆ)

(3) ชีวมวลแหล่งน้ำ (aquatic biomass)

ได้แก่ ชีวมวลจากแหล่งน้ำทะเล หรือ น้ำจืด สาหร่ายต่างๆ (สีน้ำเงิน น้ำตาล เขียว และแดง) จอกเหวน สาหร่ายทะเลสีน้ำตาลขนาดยักษ์ สาหร่ายทะเล และพืชน้ำอื่นๆ

(4) ของเสียจากสัตว์ (aminal and human wastes)

ได้แก่ เนื้อ กระดูก มูลเสีย ฟองน้ำ และมูลอื่นๆ

(5) เศษชีวมวลอุตสาหกรรม (municipal and industrial wastes)

ได้แก่ ของเสียจากเทศบาล กากตะกอนน้ำเสีย การกำจัดเศษไม้ กากตะกอนเยื่อกระดาษ เศษขยะชุมชน ไม้อัด ใยไม้อัด พาเลทไม้ กล่อง หมอนรถไฟ ของเสียจากโรงฟอกหนัง และอื่นๆ

(6) ชีวมวลผสม (mixture of biomass)

ได้แก่ การผสมชีวมวลหลากหลายชนิดเข้าด้วยกัน

แหล่งพลังงานชีวมวลปฐมภูมิที่ชัดเจน ได้แก่ ไม้พืน ซึ่งสะดวกในการหามาใช้ และมีการใช้กันมากอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในชนบท ในเขตเมืองก็มีการใช้ไม้พืนในอุตสาหกรรมและโรงงานขนาดเล็ก แหล่งที่มาของไม้พืนเหล่านี้ หาได้ตามป่าไม้ พื้นที่ป่ากร้าง ป่าปลูก และต้นไม้ตามหัวไร่ปลายนา หรือในสวน ซึ่งจะเป็นส่วนลำต้น กิ่ง ก้าน ใบ บางทีอาจรวมถึง โคน และรากด้วย ในพื้นที่ที่ค่อนข้างอุดมสมบูรณ์ แหล่งไม้พืนหาได้จากการเก็บ ตัดพืน ไม้แห้งที่ตายแล้ว ในบางพื้นที่ที่มีจำกัด อาจจะได้จากการตัดโค่นไม้สดมาเลย

แหล่งพลังงานชีวมวลทุติยภูมิ ได้จาก ชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และเศษกากจากกระบวนการในโรงงาน ชีวมวลจากสัตว์เลี้ยง หรือจากชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแปลงสภาพมาแล้ว เศษกากวัสดุที่ผลิตภายในประเทศ จะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ซึ่งแต่ละชนิดมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันออกไป บางชนิดไม่เหมาะที่จะนำมาเผาไหม้โดยตรงเพื่อผลิตไฟฟ้า เช่น กากมันสำปะหลัง และส่าเหล้า เพราะมีความชื้นสูงถึง 80-90% บางชนิดต้องนำมาย่อย ก่อนนำไปเผาไหม้ เช่น เศษไม้ยางพารา เป็นต้น

แหล่งผลิตชีวมวลที่สำคัญของประเทศไทย มีดังนี้

- แกลบจากโรงสีข้าว
- กากอ้อยจากโรงงานน้ำตาล
- กากปาล์มจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ
- เศษไม้จากโรงเลื่อยไม้ยางพารา สวนยางพารา และโรงงานผลิตไม้อัด
- ชังข้าวโพดการแยกเมล็ดข้าวโพดออกซึ่งกระจายอยู่ตามไร่ข้าวโพด
- กาบมะพร้าวจากสวนมะพร้าว ร้านขายส่งลูกมะพร้าว และโรงงานแปรรูปเนื้อมะพร้าว
- ส่าเหล้าจากโรงงานผลิตเอทิลแอลกอฮอล์
- กากมันสำปะหลังจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง

ข้อจำกัดในการใช้เศษกากชีวมวลเหล่านี้มาเป็นเชื้อเพลิง คือ

- (i) ความหนาแน่นต่ำ ปริมาตรมาก และยากต่อการขนย้าย ซึ่งไม่เหมาะสมต่อการขนส่งไปไกลๆ จากสถานที่ผลิต
- (ii) การนำเอาเศษวัสดุทางการเกษตรออกไปจากพื้นที่การเกษตรจำนวนมาก อาจจะมีผลต่อการลดลงของสารอาหารในดินอันควรได้จากเศษวัสดุเหล่านี้ ซึ่งจะมีผลกระทบต่อผลผลิตทางการเกษตรบนพื้นที่นี้ ต่อไปในอนาคต
- (iii) เศษวัสดุการเกษตรเหล่านี้จะมีให้ใช้ได้เฉพาะฤดูกาลที่มีการผลิต ในช่วงเวลาอื่นของปี จะไม่มีให้ใช้ หากต้องการใช้ตลอดปีจำเป็นต้องมีสถานที่กักเก็บรักษาขนาดใหญ่ ซึ่งมีราคาแพงและเป็นปัญหาในการจัดการได้

ชีวมวลจากสัตว์ที่สำคัญได้จากของเสียหรือมูลสัตว์ ซึ่งถ้าทำให้แห้งแล้วจะมีค่าความร้อนใกล้เคียงกับไม้พืนได้ พลังงานนี้อาจได้จากการเผาไหม้โดยตรง หรือนำไปหมักให้เกิดก๊าซชีวภาพตามปกติแล้ว มูลสัตว์ไม่ใช่ทางเลือกแรกๆ หรือเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญเท่าไรนัก ผู้คนจะหันมาสนใจใช้มูลสัตว์ ก็ต่อเมื่อไม้พืนหรือแหล่งชีวมวลอื่นๆ หาได้ยาก เช่น ในประเทศอินเดีย การใช้ประโยชน์จากชีวมวลที่เป็นที่สนใจอีกอย่าง ก็คือ เชื้อเพลิงชีวมวลที่ผ่านกระบวนการแปลงสภาพแล้ว เช่น ถ่านไม้ ก๊าซเชื้อเพลิง และเชื้อเพลิงเหลว

ถ่านไม้ผลิตจากการเผาไม้พืนที่สภาวะจำกัดอากาศ ถ่านไม้เป็นเชื้อเพลิงที่สำคัญในครัวเรือนของประเทศที่กำลังพัฒนา และได้ใช้บ้างในอุตสาหกรรมการหลอมเหล็กหรือโลหะ ถ่านไม้ นับว่าเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลที่แปลงสภาพแล้ว ที่เป็นที่ยอมรับหลายที่สุด ก๊าซเชื้อเพลิงที่ผลิตจากชีวมวลที่สำคัญ คือ ก๊าซชีวภาพซึ่งมีส่วนผสมของก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการหมักอับอากาศของชีวมวลและน้ำ และย่อยด้วยจุลินทรีย์ ข้อได้เปรียบที่สำคัญของกระบวนการนี้คือได้ปุ๋ยที่สามารถปรับปรุงคุณภาพดินได้ดีเป็นผลิตภัณฑ์ร่วมด้วย ก๊าซเชื้อเพลิงสามารถผลิตได้จากชีวมวล โดยการย่อยสลายทางความร้อน ซึ่งมีส่วนประกอบของคาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และไฮโดรเจน ซึ่งยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลายนัก สำหรับเชื้อเพลิงเหลวชีวมวลสามารถแปลงเป็นเชื้อเพลิงเหลวได้มากมายหลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุด คือการผลิตเป็นเอทานอลและไบโอดีเซล ในหลายๆ ประเทศมีโครงการผลิตออกมาเพื่อใช้กับรถยนต์โดยตรง หรือผสมกับน้ำมันปิโตรเลียม วัตถุดิบที่สำคัญสำหรับการผลิตเอทานอล ได้แก่ น้ำตาล โมลาส และแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งชีวมวลอื่นๆ ที่เป็นกลุ่มลิกโนเซลลูโลสก็สามารถใช้ผลิตได้ วัตถุดิบที่สำคัญสำหรับการผลิตไบโอดีเซล เช่น น้ำมันจากพืชต่างๆ

2.2 ศักยภาพชีวมวลและการใช้ประโยชน์เชิงพลังงาน

พลังงานจากชีวมวลมีศักยภาพสูงมาก ประเมินกันว่า ประชากรกว่า 40% ของประชากรโลก อาศัยชีวมวลในการหุงต้มและให้ความอบอุ่น และหากพิจารณาเฉพาะปริมาณการใช้ในประเทศกำลังพัฒนาทั่วโลกนั้น การใช้พลังงานชีวมวลจะมีสัดส่วนที่ประมาณ 35-40% ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดยมีจีนและอินเดียเป็นประเทศผู้ใช้หลัก (Bhattacharya et al., 2003) ในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีโครงการพลังงานชีวมวลเกิดขึ้นมาก จากการให้ความสำคัญมากขึ้นและตามการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ สำหรับพลังงานชีวมวลสมัยใหม่ ไม่ว่าจะเป็น การใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรม การผลิตกระแสไฟฟ้า หรือการผลิตเชื้อเพลิงสำหรับภาคการขนส่งพบว่า มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราสูง มีการประมาณการว่า สิ้นศตวรรษที่ 20 มีการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานชีวมวลทั่วโลกราวๆ 40,000 MW และความร้อนที่ 200,000 MW มีการผลิตเชื้อเพลิงเหลวประมาณ 18,000 ล้านลิตรต่อปี พลังงานชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญมากในอนาคต จากการศึกษาศักยภาพชีวมวล บ่งชี้ว่า การเพาะปลูกพืชพลังงานในพื้นที่การเกษตรปัจจุบันสามารถให้พลังงานได้ถึงกว่า 800 EJ (800×10^{12} MJ) โดยไม่มีการกระทบต่อผลผลิตทางอาหารของโลก เศษวัสดุเหลือใช้ ขยะของเสียต่างๆสามารถให้ได้อีกประมาณ 40-170 EJ โดยรวมแล้วศักยภาพพลังงานชีวมวลของโลกสูงถึง 1000 EJ ต่อปี ซึ่งสูงกว่าปริมาณการใช้พลังงาน

รวมหมดของทั้งโลกในปัจจุบันที่ 400 EJ (Faaij, 2006) ประเทศแถบลาตินอเมริกา แอฟริกา ยุโรปตะวันออก และเอเชียมีศักยภาพสูงในการเป็นพื้นที่ผลิตชีวมวล ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี การเกษตรยิ่งจะส่งผลให้มีผลผลิตที่เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย

สำหรับข้อมูลในประเทศไทย กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน รายงานสัดส่วนการใช้พลังงานขั้นสุดท้ายเชิงพาณิชย์ต่อพลังงานชีวมวลอยู่ที่ประมาณ 83:17 ซึ่งลดลงจาก 10 ปีก่อนที่มีสัดส่วนอยู่ที่ประมาณ 70:30 ซึ่งหมายความว่า เรามีการใช้พลังงานชีวมวลในสัดส่วนที่น้อยลง แต่กลับไปใช้พลังงานเชิงพาณิชย์ซึ่งส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศในสัดส่วนที่มากขึ้น เป็นสาเหตุให้มูลค่าการนำเข้าพลังงานของประเทศสูงขึ้นทุกปี โดยในปี 2545 คิดเป็นมูลค่ากว่า 336,000 ล้านบาท โดย 85% ใช้ไปกับการซื้อน้ำมันดิบ ในส่วนการผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล ประเทศไทยมีอัตราการผลิตที่ 55 kWh ต่อหัว ในปี 2554 (Strezov and Evans, 2015)

จากการสำรวจศักยภาพของวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรของพืช 8 ชนิดหลักของประเทศ ซึ่งได้พิจารณาถึงความเป็นไปได้ ในการเก็บหรือนำวัสดุเหล่านั้นกลับมาใช้ตามสภาพความเป็นจริง พบว่า ในปี 2552 ประเทศไทยมีปริมาณวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร รวมมากกว่า 500 PJ (500×10^9 MJ) และมีการนำไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงและอื่นๆ ในสัดส่วนน้อย ส่วนที่ยังไม่ได้ถูกนำมาใช้และมีศักยภาพในการให้พลังงานนั้นมีมากกว่า 40 ล้านตัน (Prasertsan and Sujjakulnukit, 2006) และหากนับรวมถึงก๊าซชีวภาพที่ได้จากมูลสัตว์ ขยะ และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม มาประกอบการประเมิน และได้คิดเผื่อถึงความเป็นไปได้ทุกอย่างในการนำพลังงานกลับมาใช้จริงแล้ว พบว่า ในปี 2543 เพียงปีเดียว ประเทศไทยมีศักยภาพของพลังงานชีวมวลถึง 650 PJ หรือเทียบเท่ากับพลังงานความร้อนที่ได้จากน้ำมันดีเซลหมุนเร็วปริมาณ 17,850 ล้านลิตร

โดยส่วนเหลือจากอ้อย เช่น ชานอ้อย หรือยอดและใบอ้อย แกลบและฟางข้าว และส่วนเหลือของปาล์มน้ำมัน เช่น กะลา ทะลาย หรือเส้นใยปาล์ม การประเมินศักยภาพของการผลิตชีวมวลในประเทศไทยจะประเมินจากศักยภาพปริมาณผลผลิตทางการเกษตรที่ก่อให้เกิดชีวมวลนั้นๆ เชิงพื้นที่ และเชิงปริมาณ ตัวอย่างผลแสดงดังในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ศักยภาพพลังงานจากเศษวัสดุการเกษตรของประเทศไทยปี 2552
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2558)

พืช	ชีวมวล	ศักยภาพพลังงาน	
		(TJ)	(ktoe)
ข้าว	แกลบ	50,096.25	1,185.87
	ฟาง	262,620.62	6,216.73
อ้อย	ชานอ้อย	60,347.44	1,428.54
	ยอด/ใบ	233,716.86	5,532.52
มันสำปะหลัง	เหง้ามันสำปะหลัง	33,790.88	799.89
	ลำต้น	44,930.73	1,063.60
ข้าวโพด	ชังข้าวโพด	10,545.09	249.62
	ลำต้น	49,768.34	1,178.11
ปาล์ม	เส้นใยปาล์ม	2,871.53	67.97
	ทะลายปาล์มเปล่า	18,304.15	433.29
	กะลาปาล์ม	719.18	17.02
	ก้าน	21,824.24	516.62
ถั่วเหลือง	เปลือก/ต้น/ใบ	3,312.35	78.41
	เปลือกมะพร้าว	7,534.79	178.36
มะพร้าว	กะลามะพร้าว	2,311.83	54.73
	ทวงมะพร้าว	9,686.46	229.30
	เศษไม้/กิ่งก้าน	4,675.53	110.68
ไม้ยางพารา	รวม	504,339.40	11,938.66

โดยทั่วไปแล้ว การนำชีวมวลไปใช้มี 2 ประเภทคือ

- นำไปใช้เพื่อให้ได้พลังงานความร้อน เช่น การนำฟืนไปใช้ในเตาอั้งโล่ของชาวบ้าน หรือ การนำเศษไม้ที่เหลือจากการผลิตของโรงงานทำไม้ไปใช้ในหม้อไอน้ำเพื่อให้ได้ไอน้ำไปใช้ในการอบไม้

และ

- นำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น โรงน้ำตาลใช้กากอ้อยที่ได้จากการหีบอ้อยเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้า หรือ โรงสีขนาดใหญ่ที่ใช้แกลบเป็นเชื้อเพลิงหลักในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

ในประเภทแรกนั้น ประเทศไทยได้นำชีวมวลไปใช้เพื่อพลังงานความร้อนมาเป็นระยะเวลา นานแล้ว ในระดับครัวเรือน โดยไม้ฟืน และถ่าน จัดเป็นชีวมวลสองชนิดที่มีปริมาณการใช้สูงสุดในภาคครัวเรือนของไทย ส่วนในภาคอุตสาหกรรมนั้น กากหรือขานอ้อย และแกลบ จัดเป็นชีวมวล ที่มีปริมาณการใช้สูงสุดในการผลิตพลังงานความร้อน ทั้งนี้ ศักยภาพการใช้พลังงานในระดับครัวเรือน ยังมีอีกสูงมาก เพียงแต่ชาวบ้านยังขาดความเข้าใจในวิธีการใช้และเก็บรักษาที่ถูกต้อง ชีวมวล บางประเภทเช่น ฟืนหรือถ่าน จะมีคุณสมบัติด้านความร้อนที่ต่ำลงมากหากขาดการเก็บรักษาที่ เหมาะสม นอกจากนี้ ชาวบ้านยังไม่ทราบถึงวิธีการนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การนำฟืน หรือถ่านไปใช้ในเตาอั้งโล่แบบเก่าซึ่งมีการสูญเสียความร้อนสูงมากทำให้สิ้นเปลืองเชื้อเพลิงชีวมวล มากเกินความจำเป็น ซึ่งรัฐบาลสามารถแก้ปัญหานี้ได้ โดยการประชาสัมพันธ์ หรือนำการนำ ชีวมวลไปใช้อย่างถูกต้องแก่ชุมชน เช่น ในการเพิ่มมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร (Tippayawong et al., 2006; 2008) ไม่ว่าจะเป็นการฝึกอบรมผ่านองค์การบริหารส่วนตำบล หรือ การโฆษณา ทางสื่อต่างๆ มีการรณรงค์จำหน่ายอุปกรณ์ชีวมวลประสิทธิภาพสูงให้แก่ชาวบ้านในราคาที่ดี เป็นต้น

ในประเภทที่สอง การนำชีวมวลไปผลิตกระแสไฟฟ้ายังจำกัดเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม ประเภทที่ใช้กากอ้อยและแกลบเป็นเชื้อเพลิงหลัก ทั้งที่ประเทศไทยยังมีศักยภาพในการผลิตไฟฟ้า จากชีวมวลอีกมาก หากมีการนำชีวมวลที่เหลือใช้กลับมาเป็นพลังงานอย่างมีประสิทธิภาพได้นั้น คาดว่าประเทศไทย จะมีกำลังผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 36,200 ล้านกิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี (36,200 ล้านหน่วย) หรือเปรียบได้กับมีโรงไฟฟ้าขนาด 4,100 MW เพิ่มขึ้นอีกหนึ่งแห่ง (Limmeechokchai and Suksuntornsiri, 2007) ด้วยขนาดกำลังการผลิตเท่านี้ หมายถึงประเทศ สามารถรองรับการขยายตัวของการใช้ไฟฟ้าของประเทศได้อีกถึงสองปี (เชื่อนภูมิพลมีกำลังการผลิตที่ 740 MW และโรงไฟฟ้าแม่เมาะมีกำลังผลิตรวมประมาณ 2,600 MW) การนำชีวมวล ที่เหลือจากการเกษตรมาผลิตไฟฟ้าเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ โดยเฉพาะในระหว่างที่ประเทศ มีแนวโน้มที่จะขาดแคลนไฟฟ้าในอนาคต เพราะการสร้างโรงไฟฟ้าใหม่ที่ใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลทำได้ ลำบาก ขณะที่โรงไฟฟ้าชีวมวลมีศักยภาพสูงที่จะผลิตและใช้ได้ในพื้นที่ และยังสามารถสร้างกระจาย ตามพื้นที่ต่างๆ ได้ทั่วประเทศ ตามแหล่งผลิตเชื้อเพลิงชีวมวลนั้นๆ

ชีวมวลเหล่านี้ บางส่วนได้ถูกนำไปใช้เพื่อการผลิตอยู่แล้ว เช่น แกลบจะถูกนำมาเผาเพื่อ ผลิตไอน้ำ นำไปหมunkงกันใช้งานในโรงสีข้าว กากอ้อยและกากปาล์มจะถูกนำมาเผาเพื่อผลิต ไอน้ำ ไฟฟ้า และใช้ขับเคลื่อนเครื่องจักรในกระบวนการผลิต และเศษไม้ยางพาราจะถูกนำมาเผาเพื่อ ผลิตลมร้อนใช้ในการอบไม้ยางพารา เป็นต้น และยังมีชีวมวลส่วนเหลือที่มีศักยภาพสามารถนำ มาผลิตไฟฟ้าได้ เช่น

- o แกลบ เป็นชีวมวลที่ได้จากโรงสีข้าว เมื่อนำข้าวเปลือก 1 ตัน ผ่านกระบวนการแปรรูป ต่างๆ แล้ว จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 30-60 kWh เพื่อให้ได้ข้าวประมาณ 650-700 กิโลกรัม และจะมีวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือ แกลบ ประมาณ 220 กิโลกรัม หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 90-125 kWh

- กากอ้อย เป็นชีวมวลที่ได้จากโรงงานน้ำตาล เมื่อนำอ้อย 1 ตัน ผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ แล้ว จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 25-30 kWh และใช้ไอน้ำอีก 0.4 ตัน เพื่อให้ได้น้ำตาลทรายประมาณ 100-121 กิโลกรัม และจะมีวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือ กากก้อยประมาณ 290 กิโลกรัม หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 100 kWh
- เปลือกปาล์ม กะลาปาล์ม และทลายปาล์ม เป็นชีวมวลที่ได้จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม เมื่อนำปาล์ม 1 ตัน ผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ แล้ว จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 20-25 kWh และใช้ไอน้ำอีก 0.73 ตัน เพื่อให้ได้น้ำมันปาล์มประมาณ 140-200 กิโลกรัม และจะมีวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือ เปลือกปาล์ม กะลาปาล์ม ประมาณ 190 กิโลกรัม และได้เป็นทลายปาล์ม 230 กิโลกรัม หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 120 kWh และมีน้ำเสียจากโรงงานคิดเทียบเท่าก๊าซชีวภาพได้ 20 ลูกบาศก์เมตร
- เศษไม้ เป็นชีวมวลที่ได้จากโรงเลื่อยไม้ เมื่อนำไม้ 1 ลูกบาศก์เมตร ผ่านกระบวนการแปรรูปต่างๆ แล้ว จะใช้พลังงานทั้งสิ้น 35-45 kWh เพื่อให้ได้ไม้แปรรูปประมาณ 0.5 ลูกบาศก์เมตร และจะมีวัสดุที่เหลือจากกระบวนการผลิตหรือ เศษไม้ ประมาณ 0.5 ลูกบาศก์เมตร หรือเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้าได้ 80 kWh

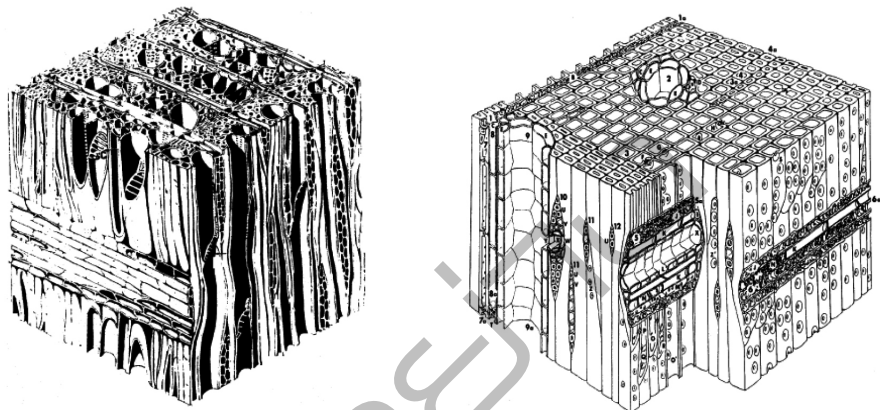
2.3 โครงสร้างและส่วนประกอบชีวมวล

คุณสมบัติที่เกี่ยวข้อง กับการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวล มีความโดดเด่นในตัวเอง ซึ่งเป็นผลโดยตรงจากการเป็นผลิตผลจากสิ่งมีชีวิต ไม่ว่าจะเป็นพืชหรือสัตว์ คุณสมบัติที่สำคัญเหล่านี้ ได้แก่คุณสมบัติทางเคมี ทางกายภาพ และทางอุณหภูมิศาสตร์ โดยชีวมวลประเภทไม้ (woody biomass) เป็นกลุ่มที่หลากหลายที่สุด การวิเคราะห์คุณสมบัติของชีวมวลทั่วไป จึงมีพื้นฐานมาจากชีวมวลกลุ่มนี้ ส่วนชีวมวลประเภทไม่ใช่ไม้ เช่น เศษวัสดุการเกษตร หญ้า แกลบ ฟางข้าว เศษฝ้าย ชานอ้อย ผักเป็ลือก เม็ดในผลไม้ เศษเนื้อผลไม้ ก็จัดทำการศึกษาวิเคราะห์หาคุณสมบัติแบบเดียวกัน

โดยทางชีววิทยา ไม้ต้น แบ่งได้เป็น ไม้เนื้ออ่อน (softwood) และไม้เนื้อแข็ง (hardwood) ซึ่งเป็นแบบอนิโซทรอปิก (anisotropic) ที่มีคุณสมบัติขึ้นกับทิศทางของเนื้อไม้ และแบบไฮโกรสโกปิก (hygroscopic) ที่รับและสูญเสียความชื้นได้ เนื้อไม้ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นวง วงใหม่หรือชั้นเนื้อไม้เติบโตจะมีเพิ่มขึ้นทุกปี ซึ่งโครงสร้างของไม้จะเป็นแบบมีความพรุน (porous) เนื้อวัสดุเป็นกลุ่มเส้นใยกลวง มีส่วนประกอบหลักๆ คือ เส้นใยทราชีดส์ (fiber tracheids) ลำไม้ (wood ray) พาเรนชิวมา (parenchyma) ช่องเรซิน (resin canal) และส่วนเปลือกด้านนอก (bark) โดยมวลรวม ต้นไม้จะประกอบด้วยระบบโค่นราก (12-14%) เนื้อไม้ (62-68%) กิ่งก้าน (7-12%) ยอดใบ (3-6%) และเปลือก (8-10%) หลังจากการตัด มีเพียงเนื้อไม้และเปลือกที่ติดไปเท่านั้นที่ส่งเข้าโรงเลื่อย โรงทำเยื่อกระดาษ หรือเข้าสู่กระบวนการอื่นๆ ในทางเคมี ตัวอย่างโครงสร้างไฟเบอร์ของไม้ แสดงดังรูปที่ 2.1

2.3.1 ส่วนประกอบองค์รวมของเซลล์ชีวมวล

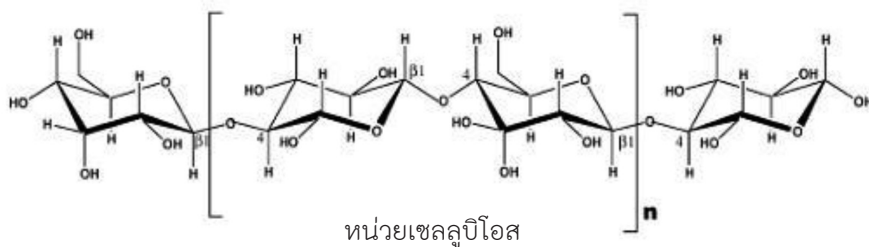
ชีวมวล ประกอบไปด้วย เซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicelluloses) ลิกนิน (lignin) และสารสกัดบางจำพวก (extractives) รายละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 2.2 ซึ่งมาจากการสร้างของกลุ่มโมเลกุลขนาดใหญ่ ดังแสดงในตารางที่ 2.3 เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมกลุ่มด้วยกัน จะเรียกว่าเป็นโฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของผนังเซลล์ของเส้นใยไม้ เซลลูโลสเกิดจากหน่วยของเซลลูบิโอสหลายหน่วยต่อกันเข้าไปมา ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 โครงสร้างไฟเบอร์ของไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน (Thunman and Leckner, 2002)

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของชีวมวล

เซลลูโลส	
เฮมิเซลลูโลส	กาแลคโตกลูโคมันนิน (galactoglucomannans) อาราบิโนกลูคูโรนออกซิแลน (arabinoglucuronoxylan) อาราบิโนกาแลคแทน (arabinogalactan) กลูคูโรนออกซิแลน (glucuronoxylan) กลูโคมันนิน (glucomannan)
ลิกนิน	
สารสกัด	สารประกอบอาริฟาติก พวกไซและแวกซ์ (aliphatic compounds) เทอร์ปีนส์ และเทอร์ปีนอยด์ (terpenes, terpenoids) สารประกอบฟีนอลิก (phenolic compounds)



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส

ตารางที่ 2.3 กลุ่มโมเลกุลใหญ่ที่สร้างขึ้นเป็นชีวมวล

ส่วนประกอบ	กลุ่มโมเลกุลใหญ่	สูตรเคมีอย่างง่าย
เซลลูโลส	เซลลูบิโอส (cellulose)	$C_{12}H_{20}O_{10}$
เฮมิเซลลูโลส	กลูโคส (glucose)	$C_6H_{10}O_6$
	แมนโนส (mannose)	$C_6H_{10}O_6$
	ไซโลส (xylose)	$C_5H_{10}O_5$
	กาแลคโตส (galactose)	$C_6H_{10}O_6$
	อาราบินโนส (arabinose)	$C_5H_{10}O_5$
	รามโนส (rhamnose)	$C_6H_{12}O_5$
	กรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid)	$C_6H_{10}O_7$
ลิกนิน	โคนิเฟอร์ิลแอลกอฮอล์ (coniferyl alcohol)	$C_{10}H_{12}O_3$
	ซินาพิลแอลกอฮอล์ (sinapyl alcohol)	$C_{11}H_{14}O_4$
	พิกูมาริลแอลกอฮอล์ (p-coumaryl alcohol)	$C_9H_{10}O_2$

ขณะที่ เฮมิเซลลูโลส เกิดจากการผสมผสานกันของหน่วยต่างๆ ของเฮกโซส และเพนโตส ซึ่งมีระดับโพลีเมอร์ไรเซชัน อยู่ระหว่าง 15-14000 ส่วนลิกนินนั้น เกิดจากการต่อข้ามเชื่อมกันของกลุ่มโพลีเมอร์สามมิติ ซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.3

โดยปกติ ไม้เนื้ออ่อนมีเซลลูโลสอยู่ประมาณ 45-50% เฮมิเซลลูโลส 25-35% และ ลิกนิน 25-35% ขณะที่ไม้เนื้อแข็งมีเซลลูโลส 40-55% เฮมิเซลลูโลส 24-40% และ ลิกนิน 18-25% โดยอาจจะมีสารสกัดอื่นๆ อยู่อีกประมาณ 1-5% ซึ่งเป็นสารประกอบธรรมชาติที่พบในไม้คล้ายกับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ดังตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นที่น่าสนใจว่า สารประกอบไฮโลเซลลูโลสที่เป็นกลุ่มอะลิฟาติกมีอะตอมออกซิเจนร่วม จะเป็นส่วนใหญ่ในมวลเนื้อไม้และไม่พบสารประกอบอะโรมาติกเลย ไฮโลเซลลูโลสเหล่านี้มีกลุ่มฟังก์ชันนอลสำคัญ คือ ไฮดรอกซิล

ชีวมวลและพลังงานชีวภาพ

เป็นแหล่งวัตถุดิบและพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญ เป็นหนึ่ง
คำตอบที่ช่วยแก้ปัญหาโลกร้อนและรับมือกับมรสุมวิกฤต
พลังงาน และการเปลี่ยนแปลงสภาวะอากาศโลก มีศักยภาพ
ทดแทนแหล่งปิโตรเลียมได้ เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

การแปลงสภาพชีวมวล

การแปลงสภาพชีวมวลเพื่อประโยชน์ทางพลังงานและวัสดุภัณฑ์
เป็นศาสตร์และเทคโนโลยีที่สำคัญในสาขาพลังงานหมุนเวียน
เหมาะสำหรับวิศวกร นักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษาระดับ
อุดมศึกษา และผู้สนใจทั่วไป ใช้ในการเรียนการสอน การวิจัย
เป็นพื้นฐานความรู้ ในการอ้างอิง และการนำไปปฏิบัติได้จริง

เนื้อหา ประกอบด้วย

- พลังงานชีวภาพ
- แหล่งชีวมวล
- การอัดเพิ่มความหนาแน่น
- การเผาไหม้
- แกสซิฟิเคชัน
- ไพโรไลซิส
- ปฏิกริยาเคมีพลาสมา
- การผลิตเอทานอล
- การผลิตก๊าซชีวภาพและไฮโดรเจน
- น้ำมันชีวภาพ
- วัสดุภัณฑ์ชีวภาพ



CHIANG MAI
UNIVERSITY PRESS

ISBN: 978-616-398-026-7



ราคา 700 บาท