



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การไพโรไลซิสร่วมชีวมวลและมูลวัวเพื่อผลิตน้ำมันชีวมวลและปุ๋ยคาร์บอน

Copyrolysis of Biomass and Cattle Manure to Produce Bio-oil and Carbon Fertilizer

นามผู้วิจัย นายณัฐ ช่อลือชา

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถศักดิ์ จารีย์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การไพโรไลซิสร่วมชีวมวลและมูลวัวเพื่อผลิตน้ำมันชีวมวลและปุ๋ยคาร์บอน

Copyrolysis of Biomass and Cattle Manure to Produce Bio-oil and Carbon Fertilizer

โดย

นายณัฐ ชี้อลิษา

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ณัฐ ชื่อลือชา 2555: การไพโรไลซิสร่วมชีวมวลและมูลวัวเพื่อผลิตน้ำมันชีวมวลและปุ๋ย
คาร์บอน ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์
อภิญา ดวงจันทร์, Ph.D. 128 หน้า

มูลวัวได้ถูกนำมาใช้ในปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวลจากซังข้าวโพดโดยการ
ไพโรไลซิสร่วมซังข้าวโพดและมูลวัว ไพโรไลซิสในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งที่อุณหภูมิ 350-450
องศาเซลเซียส พบว่าซังข้าวโพดให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวมวลมากที่สุดที่อุณหภูมิ 400 องศา-
เซลเซียส ในส่วนของมูลวัวให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวมวลมากที่สุดที่อุณหภูมิ 450 องศาเซล-
เซียส การไพโรไลซิสของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วน 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ
400 องศาเซลเซียส ให้น้ำมันชีวมวลมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ แต่ให้ผลเสริมของปฏิกิริยา (syner-
gistic effect) การเกิดน้ำมันชีวมวลน้อยที่สุด ในขณะที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก ซึ่งให้น้ำมันชี-
วมวลน้อยที่สุดแต่กลับให้ผลเสริมของปฏิกิริยาการเกิดน้ำมันชีวมวลมากที่สุด ผลของค่า pH ของ
น้ำมันชีวมวลพบว่า น้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัวให้ค่า pH มากกว่า น้ำมันชีวมวลจาก
การไพโรไลซิสซังข้าวโพด และการผสมมูลวัวร่วมกับซังข้าวโพดทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้น โดย
เพิ่มขึ้นตามอัตราส่วนของมูลวัวที่เพิ่มสูงขึ้น ผลของการวิเคราะห์น้ำมันชีวมวลด้วยเทคนิค fourier
transform infrared spectrophotometry พบว่า น้ำมันชีวมวลมีลักษณะของหมู่ฟังก์ชันที่คล้ายคลึง
กัน แตกต่างกันเพียงปริมาณที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของซังข้าวโพดและมูลวัว องค์ประ-
กอบของน้ำมันชีวมวลจากของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว วิเคราะห์โดยใช้เทคนิค แก๊สโครมาโท-
กราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี พบว่าสารประกอบฟีนอล แอลดีไฮด์ และไนโตรเจนลดลง ในขณะที่
สารประกอบอื่นๆ เพิ่มขึ้น สำหรับถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิส ได้นำมาศึกษาผลของถ่านชาร์
ต่อคุณภาพของดิน พบว่า การผสมถ่านชาร์กับดินทำให้พืชเจริญเติบโตได้ดีกว่าการไม่ใส่ถ่านชาร์
ยกเว้นถ่านชาร์ที่อัตราส่วนซังข้าวโพด:มูลวัวเท่ากับ 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการเจริญเติบโต
ที่ช้ากว่าดินที่ไม่มีการผสมถ่านชาร์ และผลการวิเคราะห์สารอาหารในถ่านชาร์โดยเทคนิค
inductively coupled plasma พบว่าถ่านชาร์มีสารอนินทรีย์ที่พืชต้องการอยู่เป็นจำนวนมาก

Nut Chueluecha 2012: Copyrolysis of Biomass and Cattle Manure to Produce Bio-oil and Carbon Fertilizer. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Apinya Duangchan, Ph.D. 128 pages.

Cattle manure was used to upgrade bio-oil from corncob by using co-pyrolysis of corncob and cattle manure. The corncob and cattle manure were pyrolyzed in a fixed bed reactor in the temperature range between 350 and 450°C. The results showed that the maximum bio-oil yields of pyrolysis of corncob and pyrolysis of cattle manure were obtained at pyrolysis temperatures of 400 and 450°C, respectively. The pyrolysis of corncob/cattle manure mixture ratio of 3:1 w/w at the temperature of 400°C showed more bio-oil yield than others but gave the lowest synergistic effect of bio-oil. While the corncob/cattle manure mixture ratio of 1:3 w/w showed the lowest bio-oil yield but gave the best synergistic effect of bio-oil. In addition bio-oil from pyrolysis of cattle manure has pH value more than that of corn cob and it was found that pH value of the bio-oil increases while increasing the ratio of cattle manure to corn cob. Moreover, the analytical results of bio-oil products using fourier transform infrared spectrophotometer showed that most of the peaks observed were common to all the bio-oils but differed in the intensity depending on the amount of corncob and cattle manure in the mixture. The liquid products from mixture analyzed by gas chromatography-mass spectrometry shows a decrease in phenol aldehyde and nitrogen compound and increase in the other compounds. Biochars, produced from pyrolysis, were added into soil to determine the effect of biochar on soil fertility. The results showed that biochar increased the growth rate of crop plant more than plain soil except the mixtures at the ratios of 1:3 and 0:4 w/w. In addition, an inductively coupled plasma was used to determine the inorganic element and showed that all the biochars are rich in nutrients content.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร. อภิญญา ดวงจันทร์ ประธานกรรมการที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์และผศ.ดร. อรรถศักดิ์ จารีย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ
และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบพระคุณ ดร.ปวีณา ประไพไพนัยนา
ประธานการสอบและดร.พิพัฒน์ พิเชษฐพงษ์ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก ที่กรุณาใช้เวลาในการตรวจ
แก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
คุณชนาธิป อุทัย คุณสุพัตรา ศรีจิว คุณปริญญ์ บุญทัน คุณวิเชียร กลิ่นอบ และคุณยงยุทธ อินนุรักษ์
ที่กรุณาอบรมการใช้เครื่องมือและซ่อมแซมอุปกรณ์การทำวิจัย

ขอบคุณพี่ภูษิต แซ่เจียและพี่ชัยวิทย์ วงศ์หิรัญวัฒน์ ที่คอยช่วยเหลือและสอนการใช้อุปกรณ์
ต่างๆ

ขอขอบคุณทุนวิจัยจาก โครงการพัฒนานักศึกษาด้านการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ภายใต้ศูนย์ความเป็นเลิศแห่งชาติด้านปิโตรเลียม
ปิโตรเคมีและวัสดุขั้นสูง (PPAM)

ท้ายสุดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้ความรักและความห่วงใยตลอดมา จน
สามารถทำในสิ่งที่หวังได้สำเร็จ

ณัฐ ชื้อลือชา

กันยายน 2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	35
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
สรุป	94
ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	96
ภาคผนวก	105
ภาคผนวก ก การคำนวณร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล	106
ภาคผนวก ข การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสชีวมวล และร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน	113
ภาคผนวก ค ข้อมูลการวิเคราะห์ GC-MS ของน้ำมันชีวมวล	119
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	128

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ร้อยละปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรกที่พบในซังข้าวโพด	16
2	องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดและแบบประมาณของซังข้าวโพด แกลบ และกากถั่วเหลือง	17
3	องค์ประกอบทางเคมีของมูลวัว มูลไก่ และมูลหมู	19
4	องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดและแบบประมาณของมูลวัว มูลไก่ และมูลหมู	19
5	ผลวิเคราะห์ทางเคมีแบบละเอียดของชีวมวลซังข้าวโพดและมูลวัว	36
6	หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดจำแนกตามความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด	62
7	หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัวจำแนกตามความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด	64
8	หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก จำแนกตามความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด	66
9	ปริมาณหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก จำแนกตามช่วงความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เมื่อ C หมายถึง ซังข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว และ CM หมายถึงอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	70
10	องค์ประกอบสารที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก โดยเครื่อง GC-MS	71
11	ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอลที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	79
12	สารประกอบของแอลดีไฮด์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
13	สารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิกที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของข้าวโพด มูลวัว และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	82
14	สารประกอบของคีโตนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของข้าวโพด มูลวัว และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	83
15	สารประกอบของแอลกอฮอล์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของข้าวโพด มูลวัว และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	84
16	สารประกอบของเอสเทอร์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของข้าวโพด มูลวัว และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	85
17	สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของข้าวโพด มูลวัว และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	86
18	สารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของข้าวโพด มูลวัว และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	87
19	สารประกอบของไนโตรเจนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของข้าวโพด มูลวัว และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	88
20	สารประกอบของฟิวแรนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสของข้าวโพด มูลวัว และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	90
21	ปริมาณธาตุอาหารที่พบในถ่านชาร์	93

ตารางผนวกที่

ก1	การสลายตัวทางความร้อนของซึ่งข้าวโพด มูลวัว จากการทดลอง และของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัว จากการคำนวณ	110
----	--	-----

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า	
ข1	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสของซังข้าวโพดและมูลวัว จากการทดลอง และของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	117
ข2	ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส ของการไพโรไลซิสของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	118
ค1	ผลของโครมาโทแกรมภาพผนวกที่ ค1 ประกอบด้วย ชื่อสารประกอบ สูตรโมเลกุล และร้อยละพื้นที่ทั้งหมด	120
ค2	ผลของโครมาโทแกรมภาพผนวกที่ ค2 ประกอบด้วย ชื่อสารประกอบ สูตรโมเลกุล และร้อยละพื้นที่ทั้งหมด	122
ค3	ผลของโครมาโทแกรมภาพผนวกที่ ค3 ประกอบด้วย ชื่อสารประกอบ สูตรโมเลกุล และร้อยละพื้นที่ทั้งหมด	125

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างของเซลลูโลส	6
2	ลักษณะการจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลส และการเชื่อมต่อดัวยพันธะไฮโดรเจนของกลูโคส	7
3	หน่วยย่อยของน้ำตาลต่างๆ ที่พบในเฮมิเซลลูโลส	8
4	เฮมิเซลลูโลส (4-O-methyl-D-glucurono-D-xylan)	9
5	หน่วยย่อยของลิกนิน ก) para-coumaryl alcohol ข) coniferly alcohol ค) sinapyl alcohol	9
6	โครงสร้างของลิกนิน (courtesy of espere).	10
7	โครงสร้างของ ก) อะไมโลส และ ข) อะไมโลเพกติน	11
8	สารแทรกชนิดต่างๆ ที่พบในชีวมวล	12
9	แผนภาพปฏิกรณ์ในกระบวนการไพโรไลซิส	27
10	อัตราส่วนโดยโมลของ H/C และ O/C ของชีวมวลและของถ่านหิน	36
11	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซังข้าวโพด ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน	37
12	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมูลวัว ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน	39
13	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมของซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน	41
14	ผลของการสลายตัวทางความร้อนของของผสมระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ	42
15	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมของซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน	43
16	ผลของการสลายตัวทางความร้อนของของผสมระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ	45

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
17	การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมของซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน	46
18	ผลของการสลายตัวทางความร้อนของของผสมระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ	48
19	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของซังข้าวโพดจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส	49
20	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของมูลวัวจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส	50
21	ผลของอัตราส่วนต่อร้อยละผลได้ของของผสมซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	51
22	ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของอัตราส่วนระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส	53
23	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณ โดย E = การทดลอง และ C = การคำนวณ	54
24	ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อนำไปใช้ในการไพโรไลซิสรวม	55
25	ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อุณหภูมิ 350, 400, และ 450 องศาเซลเซียส	57
26	ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดผสมมูลวัวที่อัตราส่วน 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
27	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับค่าความกัดกร่อนของโลหะชนิดต่างๆ ก) acid-soluble metal (Ni, Cu, Mn, Mg, Co, Cr and Cd) ข) amphoteric metal (Al, Zn and Sn) ค) steel or iron	58
28	ค่าความร้อนของน้ำมันชีวมวลที่อัตราส่วนขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส	59
29	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสขี้ข้าวโพด	61
30	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัว	63
31	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสของผสมขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	66
32	อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสขี้ข้าวโพด มูลวัว และของผสมขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	68
33	กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆจากการไพโรไลซิสลิกนิน	73
34	กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆจากเซลลูโลส	74
35	กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทุติยภูมิของเลวอกูโคซาน	74
36	กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ของเฮมิเซลลูโลส	75
37	ปฏิกิริยาการเกิดสารผลิตภัณฑ์ของไตรกลีเซอไรด์ (R = หมู่แอลคิล)	76
38	ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จากฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล	76
39	ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จากสารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน	77
40	ปฏิกิริยาของการเกิดสารประกอบของฟีนอลชนิดต่างๆ	81
41	กลไกการเกิด 2-furanmethanol จากเลวอกูโคซาน	85
42	ความสัมพันธ์ของความสูงและอายุของต้นกระเพราเมื่อใช้ถ่านชาร์ที่ผลิตจากอัตราส่วนระหว่างขี้ข้าวโพดและมูลวัวเป็นปุ๋ย	91

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่		หน้า
ค1	โครมาโทแกรมองค์ประกอบสารในน้ำมันชีวมวลส่วนวิทยาศาสตร์อินทรีย์ที่ได้จาก การไพโรไลซิสซังข้าวโพด	120
ค2	โครมาโทแกรมองค์ประกอบสารในน้ำมันชีวมวลส่วนวิทยาศาสตร์อินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัว	122
ค3	โครมาโทแกรมองค์ประกอบสารในน้ำมันชีวมวลส่วนวิทยาศาสตร์อินทรีย์ที่ได้จาก การไพโรไลซิสซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก	124

การไพโรไลซิสร่วมชีวมวลและมูลวัวเพื่อผลิตน้ำมันชีวมวลและปุ๋ยคาร์บอน

Copyrolysis of Biomass and Cattle Manure to Produce Bio-oil and Carbon Fertilizer

คำนำ

ในปัจจุบันหลายประเทศได้มีการวิจัยการใช้ประโยชน์จากชีวมวลที่มีอยู่ในประเทศให้เกิดผลผลิตที่คุ้มค่าที่สุดที่สุด โดยไม่ให้เกิดของเสียทางด้านขยะและมลพิษ และเป็นการรักษาสีเขียวสิ่งแวดล้อม วิธีการเพิ่มคุณค่าชีวมวล มีกระบวนการหนึ่งที่มีการใช้แพร่หลายคือ กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) หรือการแยกสลายด้วยความร้อนในที่อับออกซิเจน ซึ่งชีวมวลที่สลายตัวในสภาพไร้ออกซิเจนหรือในที่ที่มีออกซิเจนจำกัดที่อุณหภูมิสูง ได้แก๊สผสมไฮโดรคาร์บอน คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน ของเหลวคล้ายน้ำมัน กรดอะซิติก อะซิโตน เมทานอล และของแข็งคาร์บอน ของแข็งคาร์บอนที่ได้คือ ถ่านชาร์ ซึ่งให้ความร้อนสูงกว่าชีวมวลเริ่มต้นและไม่มีควัน สามารถเปลี่ยนไปเป็นถ่านกัมมันต์ โดยการกระตุ้น (activation) การกระตุ้นมีผลทำให้ปริมาณน้ำมันดิน (tar) และสารระเหยง่ายที่หลงเหลืออยู่สลายออกไป ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณคาร์บอนสูงขึ้น

น้ำมันชีวมวล (bio-oil) ที่ได้ยังไม่เหมาะแก่การใช้งานสำหรับยานพาหนะ เนื่องจากมีค่าความร้อนต่ำและมีความเป็นกรดสูง ทำให้เกิดการกัดกร่อนของโลหะ ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพซึ่งทำได้โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาต่างๆ เช่น HZSM-5 MCM-41 โลหะบนตัวรองรับต่างๆ และอื่นๆ (Ninchawee and Duangchan, 2009; Moonsrikaew and Duangchan, 2008) น้ำมันชีวมวลนอกจากได้จากพืชแล้ว มูลสัตว์เองก็สามารถนำมาผลิตเป็นน้ำมันชีวมวลเช่นกัน (Shinogi and Kanri, 2003) ข้อดีของมูลสัตว์ คือ เมื่อสลายตัวให้แอมโมเนียซึ่งเป็นเบส การไพโรไลซิสร่วมอาจช่วยลดความเป็นกรดของน้ำมันชีวมวลที่ได้ แอมโมเนียที่เหลือและคาร์บอนไดออกไซด์จากผลิตภัณฑ์แก๊สนำมาปรับปรุงคุณภาพของถ่านชาร์ที่ได้แบบ in situ ให้เป็นปุ๋ย NH_4HCO_3 -char นำไปใช้ประโยชน์ในทางเกษตรกรรมต่อไป

โครงการวิจัยนี้มุ่งเน้นในการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวล ที่ได้จากการไพโรไลซิสชีวมวล คือ ชังข้าวโพด โดยอาศัยกระบวนการไพโรไลซิสร่วมระหว่างชังข้าวโพดและมูลวัว

ผลิตภัณฑ์ รวมถึงศึกษาผลของการเสริมฤทธิ์กัน (synergistic effect) ของการผสมกันของซังข้าว-
โพดและมูลวัว และศึกษาประสิทธิภาพของถ่านชาร์สำหรับการนำไปใช้เป็นปุ๋ย



วัตถุประสงค์

1. ผลิตน้ำมันชีวมวลจากชังข้าวโพดและมูลวัวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสร่วม
2. หาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการไพโรไลซิสร่วมชีวมวลและมูลวัวเพื่อให้ได้คุณภาพของน้ำมันดีที่สุด
3. ผลิตปุ๋ยคาร์บอนจากกระบวนการไพโรไลซิสร่วม

ขอบเขตการวิจัย

1. ทำการไพโรไลซิสร่วมแบบกึ่งกะ โดยใช้ปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed-bed reactor) และแบบท่อ (tubular reactor)
2. ไพโรไลซิสชีวมวล 2 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพดและมูลวัว
3. ศึกษาผลของอัตราส่วนของชังข้าวโพดและมูลวัว ว่ามีผลต่อคุณภาพของน้ำมันชีวมวลอย่างไร โดยศึกษาในช่วงอัตราส่วนระหว่างชังข้าวโพดและมูลวัว ที่อัตราส่วนระหว่างชังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก
4. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวมวล และคุณภาพของน้ำมันชีวมวลในช่วงอุณหภูมิ 350-450 องศาเซลเซียส
5. หาสภาวะอัตราส่วนของชังข้าวโพดและมูลวัวที่ดีที่สุดในการผลิตน้ำมันชีวมวลให้ได้คุณภาพดีที่สุดในด้านของค่าความเป็นกรดและให้ผลของการเสริมฤทธิ์กันดีที่สุด
6. ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านชาร์ตต่อการใช้เป็นปุ๋ยโดยเปรียบเทียบกับปุ๋ยเคมีในแง่ของพืชในช่วงระยะเวลา 30-50 วัน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้น้ำมันชีวมวลที่มีสมบัติดีขึ้น คือ มีความเป็นกรดน้อยลง
2. ได้สภาวะที่เหมาะสมในการไพโรไลซิสชีวมวลเพื่อให้ได้คุณภาพของน้ำมันดีที่สุด
3. ได้ปุ๋ยคาร์บอนที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของพืช
4. ทราบถึงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนซึ่งเข้าโพลต่อมูลวัว และผลของการเสริมฤทธิ์กันต่อร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวมวลและคุณภาพของน้ำมันชีวมวล

การตรวจเอกสาร

1. ชีวมวล

ชีวมวล (biomass) คือ สารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ สารอินทรีย์เหล่านี้ได้มาจากพืชและสัตว์ต่างๆ เช่น เศษไม้ ขยะ และวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การใช้งานชีวมวลเพื่อให้ได้พลังงานอาจทำได้โดย นำมาเผาไหม้เพื่อนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าทดแทน พลังงานจากฟอสซิล (เช่น น้ำมัน) ซึ่งมีอยู่อย่างจำกัดและอาจหมดลงได้ ชีวมวลเหล่านี้มีแหล่งที่มาต่างๆ กัน อาทิ พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (agricultural residues) ไม้และเศษไม้ (wood and wood residues) หรือของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน ตัวอย่างเช่น แกลบได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย และลำเล้าได้จากการผลิตแอลกอฮอล์ เป็นต้น

ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตของพืชนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาเป็นเชื้อเพลิงก็ได้พลังงานออกมา (นฤมล, 2550)

ชีวมวลเป็นแหล่งกำเนิดที่มีการหมุนเวียนไม่มีวันหมด ดังนั้นพลังงานที่ได้จากชีวมวลจึงเป็นพลังงานทดแทนที่ไม่มีวันหมด อย่างไรก็ตาม ชีวมวลมีสมบัติแตกต่างกันทั้งทางเคมี กายภาพ และสมบัติอื่นๆ ที่แตกต่างกัน ซึ่งทำให้การเปลี่ยนสารชีวมวลไปเป็นพลังงานนั้น ต้องใช้กรรมวิธีที่แตกต่างกัน จึงต้องมีการพัฒนาเทคโนโลยีและวิจัย เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานชีวมวลมากที่สุด

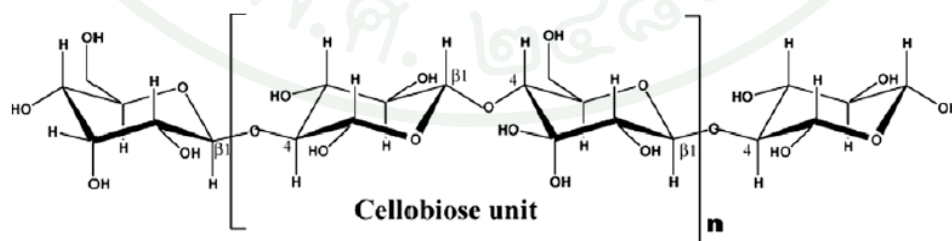
1.1 องค์ประกอบของชีวมวล

ชีวมวลมีหลากหลายชนิดซึ่งมีองค์ประกอบต่างกัน องค์ประกอบขั้นต้น ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง โปรตีน และอาจมีสารอื่นๆ อยู่บ้าง เช่น สารแทรก (extractive) และเถ้า (ash) (Velden *et al.*, 2010) ปริมาณของสารประกอบที่พบขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลต่างๆ เช่น ชีวมวลที่เป็นต้นไม้และพืชผลทางการเกษตร มีองค์ประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิ-

เซลลูโลส และลิกนิน โดยสามารถแบ่งองค์ประกอบของสารที่พบได้เป็นสองกลุ่ม คือ กลุ่มของไม้เนื้อแข็งและกลุ่มของไม้เนื้ออ่อน ในส่วนของไม้เนื้อแข็งพบเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นส่วนใหญ่ ในขณะที่ไม้เนื้ออ่อนพบลิกนินเป็นส่วนใหญ่ ในส่วนของไม้เนื้อแข็งประกอบไปด้วยเซลลูโลสร้อยละ 43-47 โดยน้ำหนัก ลิกนินร้อยละ 16-24 โดยน้ำหนัก เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25-35 โดยน้ำหนัก และสารแทรกร้อยละ 2-8 โดยน้ำหนัก และในส่วนของไม้เนื้ออ่อนประกอบไปด้วยเซลลูโลสร้อยละ 40-44 โดยน้ำหนัก ลิกนินร้อยละ 25-31 โดยน้ำหนัก เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 25-29 โดยน้ำหนัก และสารแทรกร้อยละ 1-5 โดยน้ำหนัก (Mustafa *et al.*, 2009) อย่างไรก็ตาม องค์ประกอบของชีวมวลที่ได้จากของเสียจากปศุสัตว์นั้นประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และโปรตีน เป็นหลัก

เซลลูโลส $((C_6H_{10}O_5)_x)$ เมื่อ x เป็นจำนวนหน่วยของดี-กลูโคส (d-glucose) เป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharides) เชิงเส้นตรงที่ประกอบด้วยหน่วยซ้ำๆ กันของดี-กลูโคส ในรูปแบบดี-กลูโคไพราโนส (β -d-glucopyranose) หลายโมเลกุลเรียงต่อกันเป็นโครงสร้างคล้ายลูกโซ่

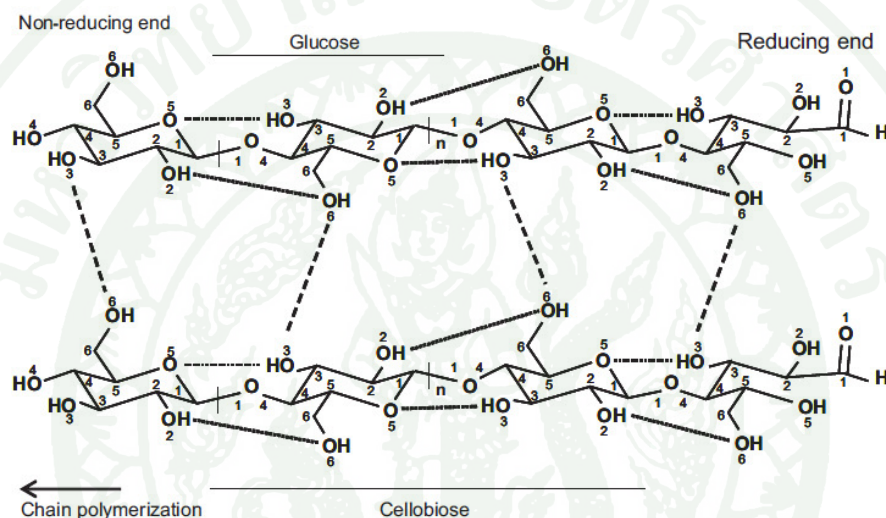
เซลลูโลสเมื่อถูกย่อยแตกตัวออกให้น้ำตาลกลูโคสจำนวนมาก เป็นคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของเซลล์ (structural carbohydrate) ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ โมเลกุลของกลูโคส (glucose subunits) 1,000-10,000 โมเลกุล มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular weight) 200,000-2,000,000 หน่วยย่อยพื้นฐาน (basic subunit) คือ เซลโลไบโอส (cellobiose) ซึ่งประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุล ต่อกันด้วยพันธะเบต้า-1, 4-ไกลโคซิดิก (β -1, 4-glycosidic bond) โดยที่ไม่มีการแตกแขนงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: Mustafa *et al.* (2009)

รูปแบบ (conformation) ของการจัดเรียงตัวของหน่วยดี-กลูโคสในลักษณะเป็นรูปเก้าอี้ (chair form) แต่ละโมเลกุลในสายเซลลูโลสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group, -OH) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 กับออกซิเจนที่อยู่ในวงแหวนของโมเลกุลถัดไป และเชื่อมต่อกันระหว่างสายเซลลูโลสที่ขนานกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างคาร์บอนตำแหน่งที่ 6 กับออกซิเจนที่เชื่อมระหว่างโมเลกุลดี-กลูโคสอีกสายหนึ่ง (นฤมล, 2550; Reginaldo *et al.*, 2007) ดังภาพที่ 2

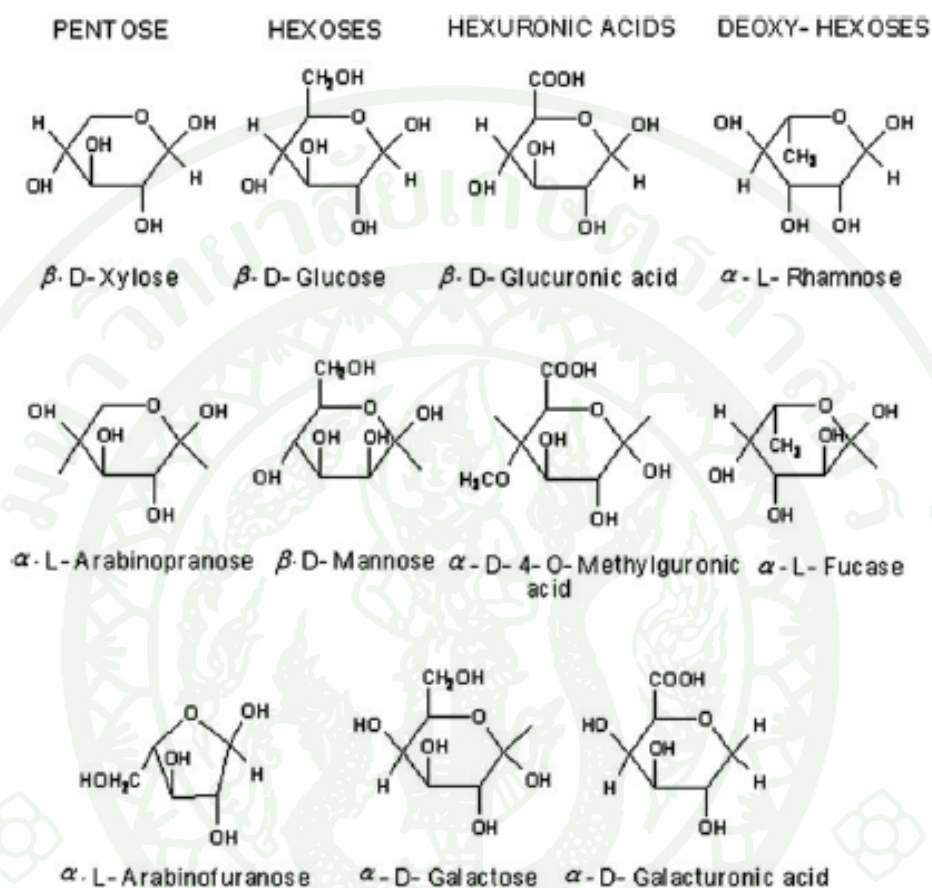


ภาพที่ 2 ลักษณะการจัดเรียงตัวของกลูโคสในเซลลูโลส และการเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนของกลูโคส

ที่มา: Reginaldo *et al.* (2007)

เฮมิเซลลูโลส ($(C_5H_8O_4)_m$ เมื่อ m เป็นจำนวนหน่วยย่อย) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดหนึ่งซึ่งคล้ายเซลลูโลส แต่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิด เช่น กลูโคส กาแลกโตส แมนโนส ไซโลส และอะราบินอส รวมทั้งกรดกลูโคนิกและกาแลกทูโรนิก มีน้ำหนักโมเลกุลไม่เกิน 30,000 สำหรับโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสแตกต่างจากโครงสร้างของเซลลูโลสตรงที่เฮมิเซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นสายโซ่กิ่ง ในขณะที่เซลลูโลสมีโครงสร้างเป็นสายโซ่ตรง นอกจากนี้องค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสประกอบไปด้วย ไซโลสและน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 5 อะตอม เป็นหลัก น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่พบในเฮมิเซลลูโลสแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ เพนโทแซนส์ (pentosans) และเฮกโซแซนส์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non cellulose hexosans) น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่พบมากในเฮมิเซลลูโลส คือ ดี-ไซแลนส์ (d-xylans) และดี-กลูโค-ดีแมนแนนส์ (d-glucod-mannans) และมี

สายโซ่ข้างเคียง (side chains) เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวชนิดอื่นๆ เช่น แอล-อะราบินโนส (l-arabinoses) (ภาพที่ 3)



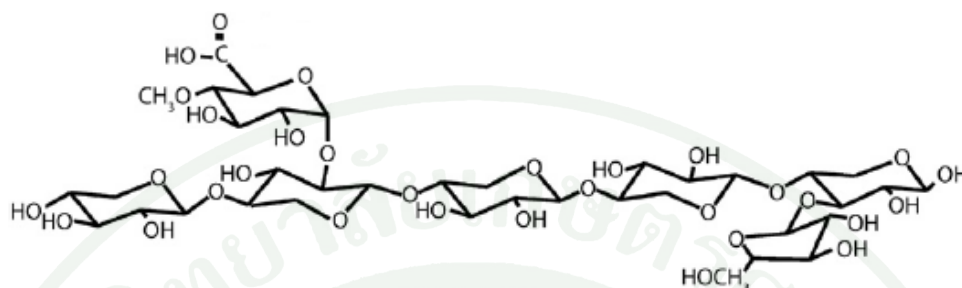
ภาพที่ 3 หน่วยย่อยของน้ำตาลต่างๆ ที่พบในเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Mustafa *et al.* (2009)

ลักษณะการจัดเรียงตัวของโครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส เป็นแบบเฮเทอโรจีนัส (heterogenous) ประกอบไปด้วยพอลิแซ็กคาไรด์หลายชนิดปนกัน ดังภาพที่ 4

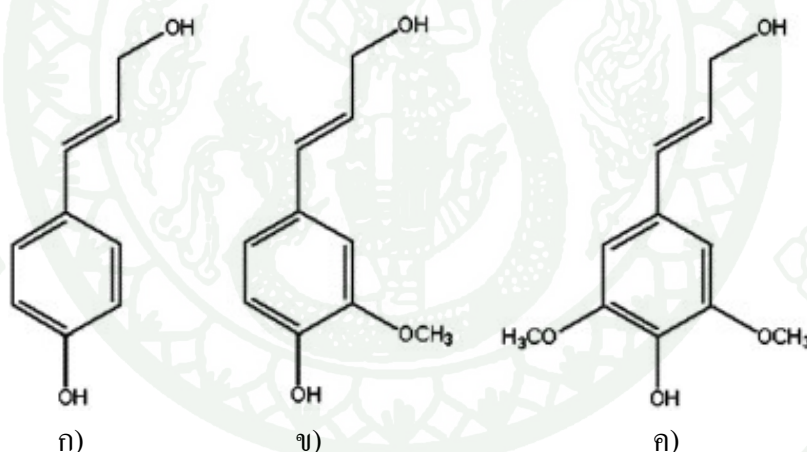
ลิกนิน $[C_9H_{10}O_3 (OCH_3)_{0.9-1.7}]_n$ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง มักพบอยู่ร่วมกับเซลลูโลส ลิกนินเป็นสารที่ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ไม่มีรูปผลึก เกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างเส้นใย (middle lamella) ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกัน และมีบางส่วนผสม

อยู่ในเส้นใยด้วย โครงสร้างพื้นฐานของลิกนินคือ phenylpropane ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ para-coumaryl alcohol coniferly alcohol และ sinapyl alcohol ซึ่งแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 4 เฮมิเซลลูโลส (4-O-methyl-d-glucurono-d-xylan)

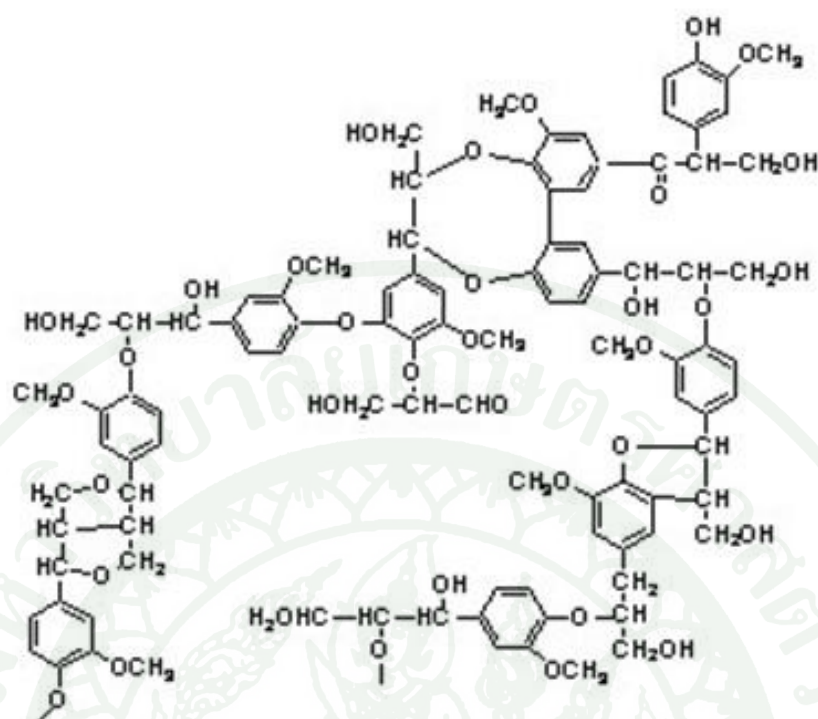
ที่มา: Wright (2008)



ภาพที่ 5 หน่วยย่อยของลิกนิน ก) para-coumaryl alcohol ข) coniferly alcohol ค) sinapyl alcohol

ที่มา: Suhas *et al.* (2007)

ลักษณะโครงสร้างของลิกนินประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นอะโรมาติก (aromatic structure) ที่ประกอบด้วยหมู่เมทอกซี (methoxy group, $-\text{OCH}_3$) หมู่ไฮดรอกซี (hydroxyl group, $-\text{OH}$) และหมู่ฟีนอลิก (phenolic group) ในขณะที่การจัดเรียงตัวยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัด เนื่องจากลิกนินไม่อยู่ในลักษณะโครงสร้างแบบเดียวกัน แต่เกาะเป็นสายยาวซึ่งมีอยู่หลายแบบด้วยกัน ตัวอย่างโครงสร้างของลิกนินแสดงดังภาพที่ 6



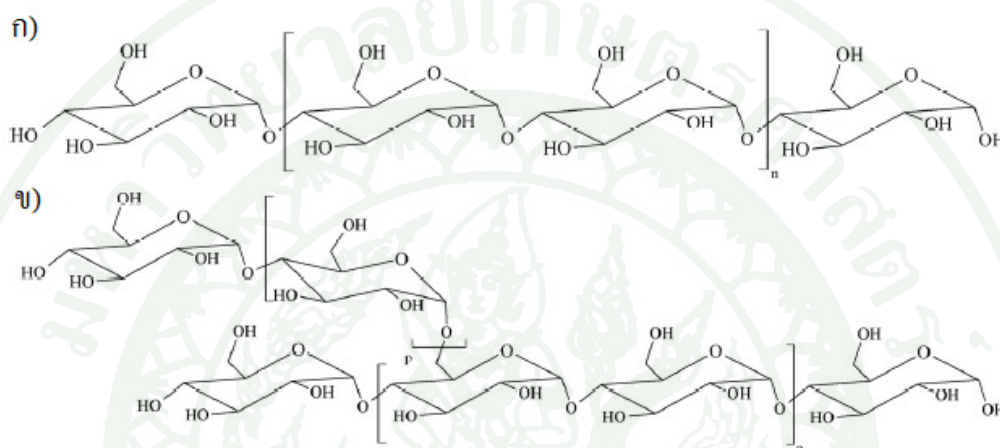
ภาพที่ 6 โครงสร้างของลิคินิน (courtesy of espere)

ที่มา: Audubon sugar institute (2011)

แป้งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดจาก ดี-กลูโคส หลายๆ หน่วยมาจับต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 4 ไกลโคซิดิก (α -1, 4 glycosidic bond) แป้งประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนหนึ่งประมาณร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ละลายได้ในน้ำร้อน เรียกว่า อะไมโลส (amylose) อีกส่วนหนึ่งประมาณร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ไม่ละลายในน้ำร้อน เรียกว่า อะไมโลเพกติน (amylopectin) ซึ่ง อะไมโลสประกอบด้วย แอลฟา-ดี-กลูโคส หลายๆ หน่วยมาจับต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-ไกลโคซิดิกทั้งหมด ดังนั้นโครงสร้างจึงเป็นเส้นตรง ในขณะที่ อะไมโลเพกติน ประกอบด้วยแอลฟา-ดี-กลูโคสหลายๆ หน่วยมาจับต่อกันด้วยพันธะ แอลฟา-1, 4-ไกลโคซิดิกบางส่วน แต่มีบางส่วนจับต่อกันด้วยพันธะแอลฟา-1, 6-ไกลโคซิดิก โดยมีอัตราส่วนระหว่างพันธะทั้งสองชนิดเป็น 15:1 ตามลำดับ ดังนั้นโครงสร้างของอะไมโลเพกตินจึงเป็นกิ่งก้านสาขา ซึ่งแสดงดังภาพที่ 7

โปรตีนเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ เกิดจากกรดอะมิโนหลายตัวถูกพอลิเมอไรเซชันเข้าด้วยกัน มีสมบัติแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโน อัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโน และลำดับของพอลิเมอไรเซชัน โปรตีนมีหน่วยย่อยคือ กรดอะมิโน เรียงต่อกัน

ด้วยพันธะเปปไทด์ และรูปร่างต่างๆ กันของโปรตีนแต่ละชนิดถูกกำหนดโดยลำดับของกรดอะมิโนในโปรตีนนั้นๆ โดยที่โปรตีนถูกสร้างขึ้นมาจากกรดอะมิโนจำนวน 20 ชนิด ได้เป็นโปรตีนผลผลิตที่หลากหลาย ซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างของโปรตีนออกได้เป็น 4 ระดับ คือ โครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) โครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) โครงสร้างตติยภูมิ (tertiary structure) และโครงสร้างจตุรภูมิ (quaternary structure)

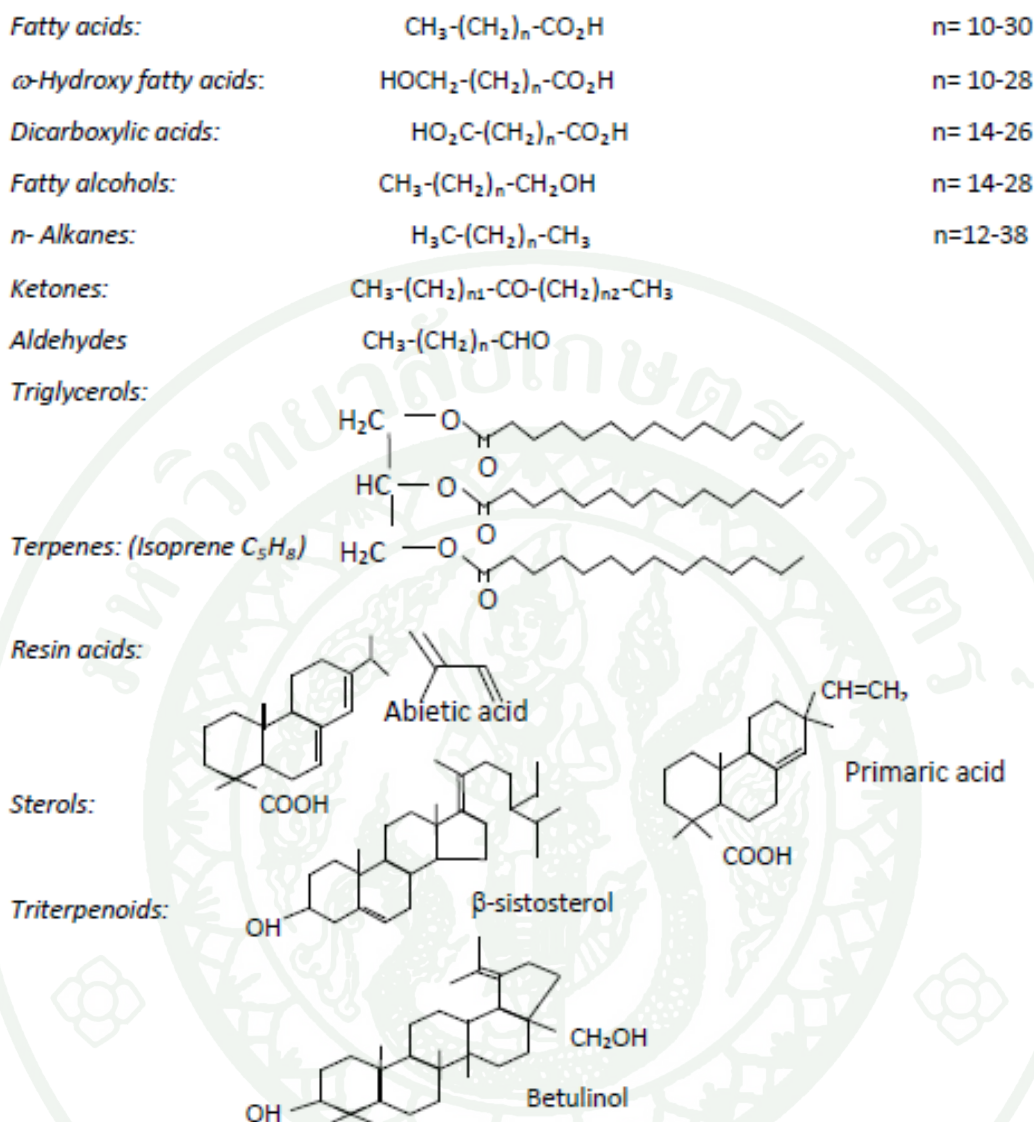


ภาพที่ 7 โครงสร้างของ ก) อะไมโลส และ ข) อะไมโลเพกติน

ที่มา: Collinson and Thielemans (2010)

สารแทรก (extractive) คือ สารที่ไม่ใช่องค์ประกอบของโครงสร้างของผนังเซลล์ อาจเป็นกรดหรือเป็นกลางก็ได้ มีตั้งแต่ สารไอโซพรีน เทอร์ปีน สเตอโรไอคลิก กรดเรซิน สารพอลิฟีนอลต่างๆ และอัลคาลอยด์ เป็นต้น แสดงดังภาพที่ 8 และเป็นสารประกอบที่เป็นองค์ประกอบของพันธุ์ไม้แต่ละชนิด สารประกอบเหล่านี้ ทำให้พืชแต่ละชนิดมีสี กลิ่น รส และความแข็งที่แตกต่างกันออกไป สารพวกนี้มีประมาณร้อยละ 5-30 โดยน้ำหนัก

ถ้า ประกอบไปด้วย สารประกอบคาร์บอนเนต ซัลเฟต ฟอสเฟต และซิลิกา เป็นต้น รวมถึง โลหะต่างๆ เช่น แคลเซียม โซเดียม แมกนีเซียม และโพแทสเซียม เป็นต้น สารพวกนี้มีประมาณร้อยละ 0.1-3 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 8 สารแทรกชนิดต่างๆ ที่พบในชีวมวล

ที่มา: Perez (2008)

1.2 การใช้ประโยชน์และการเปลี่ยนแปลงชีวมวล

สำหรับการใช้ชีวมวล วัตถุดิบชีวมวลถูกเลือกจากจุดประสงค์การใช้งาน ความต้องการ และการหาได้ง่าย หลังจากนั้นวัตถุดิบดังกล่าวถูกเปลี่ยนเป็นสารชนิดใหม่หรือพลังงาน สารชีวมวลส่วนใหญ่มาจากพืชและซากพืช ตลอดจนสัตว์ และสารอินทรีย์ของจุลชีพ พืชหลายชนิดถูกใช้เป็นชีวมวล ชีวมวลที่มาจากพื้นดินส่วนใหญ่ประกอบด้วยพืชผลทางการเกษตรและไม้จากป่า

ส่วนชีวมวลที่มาจากพื้นน้ำประกอบไปด้วยสาหร่ายหลายๆ ชนิด ตลอดจนของเสียทางชีวภาพ เช่น ชานอ้อย เป็นต้น ในปัจจุบันมีเทคโนโลยีมากมายในการเปลี่ยนสมบัติของชีวมวลเพื่อรองรับกับจุดประสงค์การใช้งานทั้งกายภาพ เคมี และชีวภาพ

การเปลี่ยนทางกายภาพ ได้แก่ การบดสีและการใช้ไอน้ำเพื่อสลายโครงสร้างของชีวมวล ทำให้มีพื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น เพื่อเร่งกระบวนการทางเคมี ความร้อน และชีวภาพ ตลอดจนการแยกสกัดและการกลั่น เป็นต้น เพื่อสกัดส่วนประกอบที่สำคัญตลอดจนการเพิ่มความหนาแน่น การอบแห้ง และการควบคุมความชื้น เพื่อเพิ่มความสะดวกในการขนย้ายและการจัดเก็บ

การเปลี่ยนทางเคมี หมายถึง การไฮโดรไลซิส การออกซิเดชันบางส่วน การเผาไหม้ คาร์บอไนเซชัน ไพโรไลซิส และปฏิกิริยาไฮโดรเทอร์มัลเพื่อสลายชีวมวล รวมถึงการสังเคราะห์พอลิเมอร์เชชันและไฮโดรจีเนชัน เพื่อสร้างโมเลกุลใหม่หรือปรับปรุงชีวมวล

การเปลี่ยนทางชีวภาพ ส่วนใหญ่หมายถึงกระบวนการหมัก เช่น เอทานอล มีเทน และไฮโดรเจน เป็นต้น

การประเมินผลของกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลสามารถทำได้โดยเงื่อนไขของสมบัติของผลิตภัณฑ์ ประสิทธิภาพของพลังงาน ผลผลิต และความคุ้มค่าในการลงทุนของระบบ

2. กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส หมายถึง กระบวนการที่สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายทางเคมีด้วยความร้อน (thermochemical process) ในที่อุณหภูมิสูงๆ ในที่ที่อับอากาศและปราศจากออกซิเจน หรือในที่ที่มีการจำกัดและควบคุมออกซิเจนให้เหลือน้อยที่สุด ทำให้เกิดการสลายของโมเลกุล จนกระทั่งเป็นองค์ประกอบของสารชนิดต่างๆ หรือทำให้มีองค์ประกอบที่มีขนาดเล็กลงกว่าเดิมทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของแข็ง คือ ชาร์ แก๊สและของเหลวที่ควบแน่นได้ คือ ทาร์

กระบวนการแตกตัวด้วยความร้อนหรือไพโรไลซิสของชีวมวลเป็นกระบวนการแตกโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ควบคู่ไปกับการแตกสลายหมู่ฟังก์ชันของชีวมวลเนื่องจากความร้อนที่ใช้ในกระบวนการทำให้เป็นแก๊ส (gasification) การทำให้เป็นของเหลว (liquefaction) และกระบวนการผลิตถ่านโค้ก (coke-making process) เป็นต้น แก๊สและของเหลวที่เป็นผลิตภัณฑ์ของกระบวนการ

การไพโรไลซิสสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเคมีได้ ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้ประกอบด้วยส่วนของของแข็งที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเรียกว่า ถ่านชาร์ ส่วนผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้แก่ ของเหลวและแก๊ส ปริมาณของผลิตภัณฑ์ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ มากมาย ตัวอย่างเช่น อุณหภูมิ อัตราการให้ความร้อน ขนาดของอนุภาคชีวมวล เวลาที่ใช้ และชนิดของปฏิกิริยา เป็นต้น

2.1 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิส

เมื่อชีวมวลผ่านกระบวนการไพโรไลซิส ชีวมวลเกิดการแตกสลายตัวกลายเป็นองค์ประกอบต่างๆ และอาจเกิดปฏิกิริยากลายเป็นสารตัวใหม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของชีวมวลนั้นๆ โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ

2.1.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง ส่วนใหญ่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก หรือที่เรียกว่า ถ่านชาร์ (charcoal) ซึ่งมีสมบัติใกล้เคียงกับถ่านคาร์บอน สามารถนำไปผลิตเป็นวัตถุดิบต่างๆ เช่น ตัวดูดซับน้ำมัน วัสดุก่อสร้าง ฉนวน ฝ้าย ตัวกรอง หรือถ่านกัมมันต์ เป็นต้น

2.1.2 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือเรียกว่าน้ำมันชีวมวล (bio-oil) แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ (aqueous phase) และส่วนที่เป็นน้ำมัน (tar) โดยทั่วไปแล้วน้ำมันชีวมวลมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวสีดำ น้ำตาลเข้ม หรืออาจเป็นสีน้ำตาลแดงเข้ม ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและวิธีการให้ความร้อน สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่ได้อาจใช้เป็นเชื้อเพลิงของเหลวหรือสกัดเป็นสารเคมี

2.1.3 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ประกอบด้วยแก๊สที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยแก๊สอินทรีย์ได้แก่ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และแอมโมเนีย ส่วนแก๊สอินทรีย์ได้แก่ มีเทน อีเทน เอทิลีน หรือสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สนี้

เกิดขึ้นจากแก๊สที่ไม่ผ่านการควบแน่น สำหรับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่ได้อาจใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิง เช่น นำไปใช้ในการผลิตกระแสไฟฟ้า เป็นต้น

3. น้ำมันชีวมวล

น้ำมันชีวมวลเป็นน้ำมันที่ได้จากกระบวนการ ไพโรไลซิสของชีวมวล โดยการทำให้เกิดความร้อนอย่างรวดเร็วโดยไม่ใช้ออกซิเจน ชีวมวลเกิดการแตกตัวออกมาเป็น ถ่าน แก๊ส และสารแขวนลอย และเมื่ออุณหภูมิลดลงสารที่ระเหยง่ายควบแน่นเป็นของเหลว โดยของเหลวนี้เรียกว่า น้ำมันชีวมวล

3.1 องค์ประกอบของน้ำมันชีวมวล

น้ำมันชีวมวลประกอบด้วยสารประกอบหลากหลายชนิด ที่มีขนาดโมเลกุลแตกต่างกัน ที่ได้จากการสลายตัวโดยกระบวนการ แตกสลายของพอลิเมอร์ (depolymerization) และการแตกออกเป็นส่วนๆ (fragmentation) ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยองค์ประกอบของน้ำมันชีวมวลแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ว่าเป็นชนิดไหนได้มาจากแหล่งใด อย่างไรก็ตาม สารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลส่วนใหญ่ร้อยละ 99.7 โดยน้ำหนัก ประกอบไปด้วย สารประกอบที่มีส่วนประกอบจำพวก คาร์บอน ไฮโดเจน ออกซิเจน และสารที่มีสภาพเป็นกรด แอลกอฮอล์ แอลดีไฮด์ คีโตน ฟีนอล ฟิวแรน และลิกนิน เป็นต้น

โดยสรุปแล้ว สารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลส่วนใหญ่เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีส่วนประกอบของโมเลกุลออกซิเจนขนาดใหญ่เป็นจำนวนมาก

4. การปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวล

สาเหตุที่ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวล เนื่องจากโดยปกติแล้วน้ำมันชีวมวลที่ได้จากชีวมวล มีความหนืดสูง มีความไม่เสถียรทางอุณหภูมิ มีความเป็นกรดสูง และมักมีคุณภาพไม่สูงนักเมื่อเทียบกับน้ำมันที่ได้จากฟอสซิล ดังนั้นจึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมัน คือ เพื่อให้คุณภาพของน้ำมันสูงขึ้นและเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ โดยวิธีที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพนั้นก็มีอยู่ด้วยกันหลากหลายวิธี เช่น กระบวนการไฮโดรดีออกซิจีเนชัน (hydrodeoxygen-

generation process) กระบวนการทำให้แตกตัวด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic cracking) และอิมัลซิฟิเคชัน (emulsification) เป็นต้น

5. ข้าวโพดและซังข้าวโพด

ข้าวโพด มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ซีเมตส์ (*Zea mays*) เป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้ามีลำต้นสูง โดยเฉลี่ย 2.2 เมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของลำต้น 0.5-2.0 นิ้ว เมล็ดจากฝักใช้เป็นอาหารคนและสัตว์

แม้ว่าข้าวโพดไม่ได้เป็นพืชเศรษฐกิจหลักของประเทศไทย แต่มีปริมาณการใช้ซังข้าวโพดในการผลิตกระแสไฟฟ้ามากขึ้น รวมถึงนำไปเป็นวัตถุดิบผลิตแอลกอฮอล์ เป็นเชื้อเพลิง ผสมกับโมลาสเพื่อเลี้ยงสัตว์ ซึ่งจุดเด่นของซังข้าวโพด คือ มีค่าความร้อนสูง เมื่อเทียบกับชีวมวลอื่นๆ และจุดด้อยของซังข้าวโพดมีการนำไปใช้ประโยชน์หลายอย่าง ดังนั้นต้องพิจารณาถึงแหล่งที่มีการนำไปใช้งานน้อยที่สุด เพื่อไม่ให้มีการแย่งแย่งกันซื้อ

5.1 องค์ประกอบของซังข้าวโพด

องค์ประกอบทางเคมีของซังข้าวโพด ขึ้นอยู่กับชนิดของซังข้าวโพด ลักษณะสภาพแวดล้อมในการปลูก ลักษณะดิน รวมถึงสารอาหารต่างๆ ซึ่งองค์ประกอบของซังข้าวโพดประกอบไปด้วย เซลลูโลสร้อยละ 32.2-45.6 โดยน้ำหนัก เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 30.0-59.8 โดยน้ำหนัก และลิกนินร้อยละ 6.7-16.9 โดยน้ำหนัก (Zych, 2008) ตัวอย่างของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ร้อยละปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรกที่พบในซังข้าวโพด

ร้อยละโดยน้ำหนัก (% dry matter basis)			
เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	สารแทรก
31	50.5	15.0	3.5

ที่มา: Demirbas *et al.* (2004)

การวิเคราะห์ทางเคมีแบบประมาณและแบบละเอียดของชีวมวล (Ultimate and proximate analysis) ของซังข้าวโพด แสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ซังข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 45.5-49.5 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนร้อยละ 4.8-6.1 โดยน้ำหนัก ไนโตรเจนร้อยละ 0.2-0.6 โดยน้ำหนัก และออกซิเจนร้อยละ 44.0-48.0 โดยน้ำหนัก ในส่วนของปริมาณเถ้าของซังข้าวโพดมีปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับชีวมวลอื่นๆ เช่น กากถั่วเหลือง rapeseed และแกลบมีปริมาณเถ้าร้อยละ 6.5, 5.8 และ 12.5 โดยน้ำหนักตามลำดับ (Wan Isahak *et al.*, 2012) ในส่วนของค่าความร้อนพบว่าซังข้าวโพดมีค่าความร้อนประมาณ 16.0-19.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดและแบบประมาณของซังข้าวโพด แกลบ และกากถั่วเหลือง

องค์ประกอบ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (% dry matter basis)				
	ซังข้าวโพด			แกลบ	กากถั่วเหลือง
	Lin <i>et al.</i> (1995)	Demiral <i>et al.</i> (2012)	อภิชาติ (2012)	Wan Isahak <i>et al.</i> (2012)	
คาร์บอน	46.94	49.32	45.52	48.36	52.46
ไฮโดรเจน	4.83	5.53	6.10	5.13	6.17
ไนโตรเจน	0.38	0.63	0.28	0.72	8.72
ออกซิเจน (ผลต่าง)	44.13	44.7	47.92	32.79	26.51
ความชื้น	-	7.36	-	6.80	9.15
สารระเหย	80	79.58	-	-	-
เถ้า	1.5	1.49	-	12.5	6.15
คาร์บอนคงตัว	18.5	11.57	-	-	-
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	18.30	16.66	16.84	16.79	23.23

6. มูลวัว

Manure แต่เดิมหมายถึง ปุ๋ยทั่วไป ต่อมามีความหมายเฉพาะปุ๋ยอินทรีย์ เช่น ปุ๋ยคอก (farmyard manure) อันหมายถึง มูลของสัตว์เลี้ยง เช่น วัว ควาย สัตว์ปีก แพะ แกะ และอื่นๆ ปุ๋ยคอกเป็นปุ๋ยที่ได้จากมูลสัตว์ต่างๆ ส่วนใหญ่เป็นสัตว์เลี้ยง เช่น มูลโค ซึ่งจัดเป็นของเสียจากพื้นที่

เกษตรกรรม ปัญหาจากมูลสัตว์ที่พบมาก คือ จีดจำกัดในการรองรับการปนเปื้อนของพื้นดิน ผิวน้ำ และปัญหาในการใช้พื้นที่จัดเก็บแยกจากอาหารสัตว์ ซึ่งมีจำกัดทำให้พื้นที่ใช้สอยลดลง ดังนั้นการนำมูลสัตว์มาใช้ประโยชน์เป็นปุ๋ยจึงเป็นการลดปริมาณของเสีย ตัดปัญหาการจัดเก็บ และได้ประโยชน์ต่อพืชด้วย ปุ๋ยคอกให้ผลดีกับพืชแทบทุกชนิด ทั้งพืชไร่ นา สวน ไม้ล้มลุก ตลอดจนกระถางไม้ยืนต้น และสามารถนำมาใช้ประโยชน์โดยใช้ทดแทนปุ๋ยขาวในการแก้ความเป็นกรดของดินกรด

สำหรับสถานการณ์มูลสัตว์ในประเทศไทยพบว่า จากข้อมูลของกรมปศุสัตว์ (2554) พบว่า ในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีปริมาณการเลี้ยงโค กระบือ สุกร เป็ด ไก่ และช้าง รวมกันมากกว่า 367 ล้านตัว มูลของสัตว์ทั้ง 6 ชนิด เป็นประเภทที่มีศักยภาพเพียงพอที่สามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานชีวมวล โดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ประเมินศักยภาพของพลังงานที่ได้จากมูลสัตว์ดังกล่าว โดยได้พิจารณาถึงความเป็นไปได้ในการเก็บหรือนำมูลสัตว์เหล่านั้นกลับมาใช้ตามสภาพความเป็นจริง เช่น โคเนื้อ กระบือ เป็ด และช้าง ซึ่งเป็นสัตว์ที่เลี้ยงในพื้นที่เปิด มีอัตราส่วนของมูลที่น่าเก็บได้ไม่เกินร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ในขณะที่โคนม สุกร และไก่ ซึ่งมีลักษณะการเลี้ยงที่มิดชิดในฟาร์มหรือโรงเลี้ยงที่เป็นระบบมากกว่า อาจสามารถเก็บมูลมาใช้ได้มากถึงร้อยละ 80 โดยน้ำหนัก ของมูลที่ถ่ายออกมาทั้งหมด อีกทั้งฟาร์มเลี้ยงสัตว์เป็นสาเหตุของน้ำเสียจำนวนมาก ซึ่งหากมีการออกแบบระบบที่เหมาะสม สามารถผลิตพลังงานชีวมวลได้จากทั้งมูลสัตว์และน้ำเสียได้เป็นจำนวนมาก และอัตราส่วนของมูลที่สามารถเก็บได้นี้มีความสำคัญมาก เพราะหากกลีกรหรือเกษตรกร สามารถจัดทำระบบโรงเลี้ยงที่เอื้ออำนวยต่อการไหลและถ่ายเทของมูลสัตว์ที่ถูกขับถ่ายออกมา ทำให้พลังงานชีวมวลที่ได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว

6.1 องค์ประกอบทางเคมีของมูลวัว

องค์ประกอบทางเคมีของมูลวัวและมูลสัตว์ชนิดอื่นๆ แสดงดังตารางที่ 3 และ 4 ตารางที่ 3 แสดงปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และโปรตีนที่พบในมูลสัตว์ชนิดต่างๆ ซึ่งเห็นได้ว่ามูลสัตว์แต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน เนื่องมาจากอาหารที่สัตว์แต่ละชนิดรับประทานเข้าไปแตกต่างกัน รวมถึงประสิทธิภาพในการย่อยสารแต่ละชนิด ซึ่งสาเหตุเหล่านี้เองที่ทำให้ปริมาณองค์ประกอบของสารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4 แสดงองค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดและแบบประมาณของมูลวัว มูลไก่ และมูลหมู พบว่า ปริมาณของคาร์บอนอยู่ในช่วงร้อยละ 45-52 โดยน้ำหนัก ไฮโดรเจนอยู่

ระหว่างร้อยละ 6-6.5 โดยน้ำหนัก ในส่วนของไนโตรเจนมีปริมาณอยู่ในช่วงร้อยละ 3-5 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณเถ้าของมูลสัตว์พบว่า มีปริมาณของเถ้ามากอยู่ที่ร้อยละ 11-38 โดยน้ำหนัก ซึ่งมากกว่าชีวมวลประเภทพืชและเศษเหลือจากเกษตรกรรม

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของมูลวัว มูลไก่ และมูลหมู

ชีวมวล	ร้อยละ โดยน้ำหนัก (% dry matter basis)			
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	โปรตีน
มูลวัว	27.5	12.2	13	18.11
มูลไก่	12	20.2	4.9	31.6
มูลหมู	13.9	20.5	6.4	22.7

ที่มา: Chen *et al.* (2003)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียดและแบบประมาณของมูลวัว มูลไก่ และมูลหมู

องค์ประกอบทางเคมีแบบละเอียด และแบบประมาณ	ร้อยละ โดยน้ำหนักแห้ง (% dry matter basis)		
	มูลวัว	มูลไก่	มูลหมู
คาร์บอน	49.38	37.15	51.20
ไฮโดรเจน	6.46	5.33	6.49
ไนโตรเจน	3.33	3.13	4.91
ออกซิเจน (ผลต่าง)	39.37	34.67	37.4
สารระเหย	-	-	82.73
เถ้า	37.3	22.80	11.44
คาร์บอนคงตัว	-	-	5.83
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม)	13.3	18.74	-

ที่มา: Kim *et al.* (2009); Wang *et al.* (2011); Zhang *et al.* (2011)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตน้ำมันชีวมวล

Putun *et al.* (2002) ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสจากถั่วเหลืองจากกากที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันจากถั่วเหลือง โดยต้องการศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิ ขนาดของชีวมวล และอัตราเร็วของแก๊สตัวพา เพื่อให้ได้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวมวลมากที่สุด ปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งขนาด 350 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยการทดลองเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมินั้น ศึกษาที่อุณหภูมิ 400, 500, 550 และ 700 องศาเซลเซียส ชีวมวลที่ใช้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 0.425-1.25 มิลลิเมตร อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการไพโรไลซิส คือ 10 กรัม ซึ่งพบว่า ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมากที่สุดคือร้อยละ 33.78 โดยน้ำหนัก และเมื่ออุณหภูมิสูงกว่านี้ร้อยละผลได้ลดลง ในขณะที่ศึกษาผลของขนาดชีวมวล ศึกษาขนาดของชีวมวล สามช่วงด้วยกัน คือ ที่ช่วงของเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 0.225-0.425, 0.425-0.850, 0.850-1.250, 1.250-1.800 และมากกว่า 1.800 มิลลิเมตร อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่าที่ขนาด 0.850-1.250 มิลลิเมตร ให้ร้อยละผลได้ที่เป็นน้ำมันมากที่สุดอยู่ที่ 30.23 โดยน้ำหนัก ส่วนการศึกษาอัตราเร็วของแก๊สตัวพา ศึกษาที่อัตราเร็ว 50, 100, 200 และ 400 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ขนาดอนุภาค 0.850-1.250 มิลลิเมตร ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 5 องศาเซลเซียสต่อนาที พบว่า ที่อัตราการไหลแก๊สในโตรเจน 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ให้ร้อยละผลได้ที่เป็นน้ำมันมากที่สุดอยู่ที่ 33.78 โดยน้ำหนัก

Cao *et al.* (2004) ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของซังข้าวโพดเพื่อผลิตน้ำมันชีวมวล โดยศึกษาการไพโรไลซิสในช่วงของอุณหภูมิ 350-600 องศาเซลเซียส ทำการไพโรไลซิสในเตาปฏิกรณ์ที่ทำจากสแตนเลสสตีลขนาด 200 มิลลิลิตร อัตราการให้ความร้อน 30 องศาเซลเซียสต่อนาที มีแก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สตัวพาซึ่งมีอัตราการไหล 80 มิลลิลิตรต่อนาที ซึ่งจากการทดลองพบว่า เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสสูงขึ้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งและของเหลวลดลง ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สสูงขึ้น โดยร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวที่มากที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้อยู่ที่ร้อยละ 41 โดยน้ำหนัก โดยที่องค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย

สารประกอบของออกซิเจน เช่น ฟีนอล (phenol) ฟิวแรน (furan) และฟิวแรนเมทานอล (furan-methanol)

Uzun *et al.* (2006) ได้ทำการศึกษาปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการไพโรไลซิสของกากถั่วเหลือง (soybean cake) โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสในช่วง 400-700 องศาเซลเซียส ศึกษาผลของอัตราเร็วของแก๊สดั่วพา (แก๊สไนโตรเจน) ที่อัตราเร็ว 50-400 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที ศึกษาขนาดของกากถั่วเหลืองที่ใช้ช่วง $0.425 < D_p < 1.25$ มิลลิเมตร และศึกษาผลของอัตราการให้ความร้อนที่ 5, 100 และ 700 องศาเซลเซียสต่อนาที ซึ่งจากการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสที่ 550 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากที่สุด คือ 42.83 โดยน้ำหนัก เมื่อใช้แก๊สดั่วพาที่ 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที อัตราการให้ความร้อนอยู่ที่ 700 องศาเซลเซียสต่อนาที และกากถั่วเหลืองมีขนาด $0.425 < D_p < 0.85$ มิลลิเมตร ซึ่งคุณภาพของน้ำมันชีวมวลที่ได้พบว่า อัตราส่วนโดยโมลระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของน้ำมันที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดิบคือมีค่าอยู่ที่ 1.6 ในขณะที่น้ำมันดิบมีค่า 1.9 และสารประกอบส่วนใหญ่ของน้ำมันประกอบไปด้วย สารประกอบอะโรมาติก

Yanik *et al.* (2007) ได้ทำการไพโรไลซิสชีวมวลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 3 ชนิด ได้แก่ ชังข้าวโพด ฟางข้าว และก้านใบจากต้นออริแกนัม (oreganum stalks) ทำการไพโรไลซิสโดยใช้ปฏิกิริยาแบบฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed reactor) เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 มิลลิเมตร สูง 300 มิลลิเมตร ใช้ไนโตรเจนไหล 2 สาย สายแรกไหลไปที่ปฏิกิริยา สายที่สองไหลไปที่ส่วนของชีวมวล ใช้อัตราการไหล 0.25-0.3 เมตรต่อวินาที ระยะเวลาที่ไนโตรเจนอยู่ในปฏิกิริยาประมาณ 1-2 วินาที ก่อนที่ป้อนชีวมวลเข้าเครื่อง การป้อนชีวมวลทำโดยผ่านกรวยที่มีสกรูสำหรับหมุนเปิด-ปิด ปฏิกิริยาทำที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ใช้ชีวมวล 100 กรัม ขนาดอนุภาคไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ คือ ส่วนของของเหลวซึ่งได้จากการกลั่นตัวโดยใช้ที่รองรับที่มีอุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ส่วนของของเหลวแบ่งได้เป็น ส่วนของสารละลาย (aqueous phase) และส่วนของน้ำมัน (oil phase) ซึ่งส่วนของน้ำมันยังแบ่งได้เป็น ส่วนที่ละลายน้ำ (water soluble) ซึ่งส่วนนี้ประกอบไปด้วย น้ำ กรดที่ระเหยได้ง่าย (volatile acid) แอลกอฮอล์ น้ำตาล และส่วนที่ไม่ละลายน้ำ (water insoluble) ประกอบไปด้วย อนุพันธ์ของลิกลิน จากผลการทดลองพบว่า ชังข้าวโพดเป็นชีวมวลที่ให้น้ำมันชีวภาพมากที่สุด รองลงมา คือ ก้านใบจากต้นออริแกนัม และสุดท้ายคือ ฟางข้าว

Ates and Isikdag (2009) ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิและตัวเร่งปฏิกิริยาของกระบวนการไพโรไลซิสชังข้าวโพด โดยศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 300-800 องศาเซลเซียส และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ คือ

อลูมิเนียม (III) ออกไซด์ (Al_2O_3) ปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor) อัตราการให้ความร้อน 7 องศาเซลเซียสต่อนาที ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการไพโรไลซิสคือ 10 กรัม ผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ส่งผลต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งต่ำลง ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สสูงขึ้น ในส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว นั้นทางผู้วิจัยได้แยกผลิตภัณฑ์เป็นสองส่วนคือ ส่วนที่เป็นน้ำมันและส่วนที่เป็นน้ำ ซึ่งที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันมากที่สุดอยู่ที่ 22.2 โดยน้ำหนัก ในขณะที่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันสูงขึ้นเมื่อเทียบกับไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาจาก 22.2 เป็น 24.1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 800 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำมันต่ำกว่าเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับองค์ประกอบของน้ำมันชีวมวลนั้นพบว่าเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาออกซิเจนมีสัดส่วนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่สัดส่วนของคาร์บอนและไฮโดรเจนมากขึ้น โดยร้อยละของน้ำหนักของคาร์บอนเพิ่มขึ้นจาก 65.8 เป็น 72 โดยน้ำหนัก ส่วนร้อยละของน้ำหนักของออกซิเจนลดลงจาก 26.5 เป็น 19.7 โดยน้ำหนัก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 300 เป็น 800 องศาเซลเซียส เนื่องจากออกซิเจนถูกเปลี่ยนไปเป็น คาร์บอนมอนอกไซด์ น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าองค์ประกอบของน้ำมันชีวมวล ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส มีองค์ประกอบใกล้เคียงกับน้ำมันชีวมวลเมื่อไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส

Ioannidou *et al.* (2009) ได้ทำการศึกษากระบวนการไพโรไลซิสของซังข้าวโพดและลำต้นของข้าวโพด (corn stalk) ทำการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์ชนิด captive sample reactor และปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง โดยอุณหภูมิที่ทำการไพโรไลซิสแบ่งออกเป็นสามช่วงด้วยกันคือที่ อุณหภูมิต่ำ (360-380 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิปานกลาง (500-600 องศาเซลเซียส) และที่อุณหภูมิสูง (600-800 องศาเซลเซียส) ทั้งแบบที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Al-MCM-41) และไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา รวมถึงศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนของชีวมวลด้วย ซึ่งจากการทดลองพบว่าทั้ง ซังข้าวโพดและลำต้นของข้าวโพดมีการสลายตัวอยู่สามช่วงด้วยกัน คือ ช่วงที่อุณหภูมิมากกว่า 110 องศาเซลเซียส ขึ้นไปเกิดการระเหยของน้ำ ช่วงที่สองอยู่ระหว่างอุณหภูมิ 210-390 องศาเซลเซียส และช่วงสุดท้ายอยู่ที่ 390-900 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของชีวมวล ในส่วนของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์เมื่อทำการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์ชนิด captive sample reactor พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากที่สุด คือ ร้อยละ 30 โดยน้ำหนัก สำหรับซังข้าวโพด และร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก สำหรับลำต้นข้าวโพด และเมื่อทำการไพโรไลซิสในปฏิกรณ์แบบเบดนิ่งพบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสำหรับซังข้าวโพดและลำต้นข้าวโพดมีปริมาณใกล้เคียงกันอยู่ที่ร้อยละ

42.22 และ 40.22 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สารประกอบส่วนใหญ่ที่พบในน้ำมันชีวมวลประกอบไปด้วย สารประกอบไฮโดรคาร์บอน ฟีนอล คาร์บอนิล และน้ำ โดยพบว่า ชั่งข้าวโพดให้ปริมาณไฮโดรคาร์บอนและฟีนอลน้อยกว่าลำต้นของข้าวโพด อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาพบว่าปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวมวลมีปริมาณมากขึ้น และเพิ่มคุณภาพของน้ำมันชีวมวล คือ มีปริมาณของไฮโดรคาร์บอนและฟีนอลมากขึ้น

Mante and Agblevor (2010) ได้สนใจการไพโรไลซิสของวัสดุรองรังสัตว์ปีก (poultry litter) ซึ่งประกอบไปด้วยวัสดุต่างๆ เช่น เศษไม้จากการไสไม้ มูลสัตว์ และเศษขนสัตว์ต่างๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสวัสดุรองรังสัตว์ปีก ขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุแต่ละชนิดที่มีอยู่ โดยที่วัสดุส่วนใหญ่ประกอบด้วยมูลสัตว์และเศษไม้จากการไสไม้ที่ใช้รองรัง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ศึกษาถึงอิทธิพลของเศษไม้จากการไสไม้ที่ใช้รองรังหรือขี้กบของไม้สน (pine wood shavings) กับมูลของไก่ (broilers and turkeys) โดยศึกษาที่อัตราส่วนระหว่างเศษไม้ต่อมูลไก่ที่อัตราส่วน 100:0, 75:25, 25:25, 25:75 และ 0:100 โดยน้ำหนัก ปฏิกรณ์ที่ใช้เป็นปฏิกรณ์แบบ fluidized bed ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จากการทดลองพบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวจากการไพโรไลซิสไม้มีปริมาณมากที่สุดอยู่ที่ 62.0 โดยน้ำหนัก และเมื่อปริมาณของไม้ลดลง (ปริมาณของมูลไก่มากขึ้น) ทำให้ร้อยละผลได้ของน้ำมันชีวมวลน้อยลง โดยที่ร้อยละผลได้จากการไพโรไลซิสมูลไก่อยู่ที่ 43.3 โดยน้ำหนัก และเมื่อพิจารณาที่สมบัติของน้ำมันชีวมวลพบว่าน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสไม้มีค่าความร้อนอยู่ที่ 25.64 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และเมื่อปริมาณของมูลไก่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้นไปด้วย โดยที่อัตราส่วนมูลไก่ต่อไม้ที่ 75:25 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อนอยู่ที่ 28.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในส่วนของค่า pH พบว่าเมื่อปริมาณมูลไก่สูงขึ้นทำให้ค่า pH ของน้ำมันสูงขึ้นตามไปด้วย องค์ประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลไก่ประกอบไปด้วย อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbons) สารประกอบของเอไมด์ (amide groups) และสารประกอบของไนโตรเจน ในขณะที่เมื่อปริมาณของไม้เพิ่มขึ้นสารประกอบของออกซิเจนเพิ่มขึ้น เช่น สารประกอบฟีนอล คาร์บอนิล และอะโรมาติกอีเทอร์ เป็นต้น

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตถ่านชาร์

Ro *et al.* (2010) ได้ทำการไพโรไลซิสชีวมวล 3 ชนิด คือ มูลไก่ มูลสุกร และมูลสุกรผสมกับหญ้า (rye grass) โดยทำการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 620 องศาเซลเซียส เพื่อผลิตแก๊สและถ่านชาร์ รวมถึงศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลทั้งสามชนิด ซึ่งพบว่า มูลไก่มีของแข็งที่เหลืออยู่มากที่สุด รองลงมาคือมูลสุกร ในขณะที่หญ้ามีของแข็งที่เหลืออยู่น้อยที่สุด และเมื่อผสมหญ้ากับ

มูลสุกรพบว่าของแข็งที่เหลืออยู่มีปริมาณลดลง และเมื่อทำการไพโรไลซิสชีวมวล พบว่า มูลสุกรให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่มีค่าความร้อนอยู่สูงมากที่สุด รองลงมาเป็นมูลสุกรผสมหญ้า และแก๊สที่มีค่าความร้อนต่ำที่สุด คือ มูลไก่ อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สซัลเฟอร์ที่พบในผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สทั้ง 3 ชีวมวล มีค่าสูงขึ้น และผลิตภัณฑ์ที่เป็นถ่านชาร์อยู่ในช่วงร้อยละ 43-49 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ค่าความร้อนของถ่านชาร์ที่ได้จากมูลไก่มีค่าต่ำกว่า ค่าความร้อนของถ่านหินเกรดต่ำ (low rank coal) สำหรับมูลสุกรและมูลสุกรผสมหญ้าให้ค่าความร้อนอยู่ระหว่างค่าความร้อนของถ่านหินเกรดต่ำ และถ่านหินเกรดสูง (high rank coal) นอกจากนี้พบว่า ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสยังมีองค์ประกอบของธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืช (โพแทสเซียมและฟอสฟอรัส) มากกว่าธาตุอาหารที่มีดั้งเดิมของชีวมวล จึงเหมาะสมที่นำเอาถ่านชาร์มาทำเป็นปุ๋ยเพื่อปรับปรุงคุณภาพของดินให้สูงขึ้น

Hossain *et al.* (2011) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิส กากตะกอนน้ำเสีย (wastewater sludge) ต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ และสมบัติของถ่านชาร์ต่อการนำไปใช้ในทางเกษตรโดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 300-700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที มีแก๊สในโตรเจนเป็นแก๊สตัวพาซึ่งมีอัตราการไหล 50 ลิตรต่อนาที ปริมาณตัวอย่างที่ใช้ในการไพโรไลซิส คือ 264-273 กรัม จากผลการทดลองพบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีค่าต่ำลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสสูงขึ้นจากที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ได้ถ่านชาร์ร้อยละ 72.3 โดยน้ำหนัก และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นได้ถ่านชาร์ร้อยละ 57.9 และ 52.4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 500 และ 700 องศาเซลเซียส ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาองค์ประกอบของถ่านชาร์พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำ (300 องศาเซลเซียส) ถ่านมีสภาพเป็นกรด (pH 4.42) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ถ่านมีสภาพเป็นเบสมากขึ้นโดยที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส มีค่า pH 12 ในส่วนของปริมาณคาร์บอนของถ่านชาร์ค่อนข้างคงที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณของไนโตรเจนและออกซิเจนลดต่ำลง เนื่องมาจากการกลายเป็นไอในช่วงของการไพโรไลซิส สำหรับธาตุอาหารที่พืชต้องการนั้นพบว่าปริมาณธาตุไนโตรเจนลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ปริมาณของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูงขึ้น และปริมาณทางอาหารรอง (micronutrients) ก็สูงขึ้นตามไปด้วย เช่น แมกนีเซียม เหล็ก และแคลเซียม เป็นต้น ซึ่งเห็นได้ว่าถ่านชาร์อาจเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในการเกษตร

Song and Gu (2012) ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการไพโรไลซิสที่ส่งผลต่อคุณภาพของถ่านชาร์ (bio-char) ที่ได้จากการไพโรไลซิสวัสดุรองรังไก่ (poultry litter) อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสอยู่ที่ 300-600 องศาเซลเซียส โดยพิจารณาในด้านของ ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total N content) ปริมาณคาร์บอนของสารอินทรีย์ (organic

carbon) ปริมาณการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน (cation exchange capacity) pH ปริมาณเถ้า (ash content) และพื้นที่ผิว (surface area) ซึ่งวัสดุรองรับไก่อที่นำมาใช้ทดลองผ่านกระบวนการให้ความร้อน (pasteurization) ที่อุณหภูมิ 80-110 องศาเซลเซียส นำมาบดและอัดเม็ดให้มีขนาดน้อยกว่า 4 มิลลิเมตร ก่อนทำการไพโรไลซิส และจากการทดลองพบว่า ร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณคาร์บอนของสารอินทรีย์ และปริมาณการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ค่า pH ปริมาณเถ้า และพื้นที่ผิวมีค่าสูงขึ้น โดยค่าของร้อยละผลได้ของถ่านชาร์อยู่ที่ 45.7-60.1 โดยน้ำหนัก ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วง 1.18-41.71 กรัมต่อกิโลกรัมถ่านชาร์ ค่า pH 9.5-11.5 พื้นที่ผิว 2.0-3.2 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาณการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดินอยู่ระหว่าง 21.6-36.3 เซนติโมลต่อกิโลกรัมถ่านชาร์ ปริมาณคาร์บอนของสารอินทรีย์อยู่ที่ 325-380 กรัมต่อกิโลกรัมถ่านชาร์ และพบว่าที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส ให้ค่าร้อยละผลได้ของถ่านชาร์ ปริมาณการแลกเปลี่ยนประจุบวกในดิน และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงสุด ในขณะที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ให้ค่าปริมาณคาร์บอนของสารอินทรีย์สูงสุด

อุปกรณ์และวิธีการ

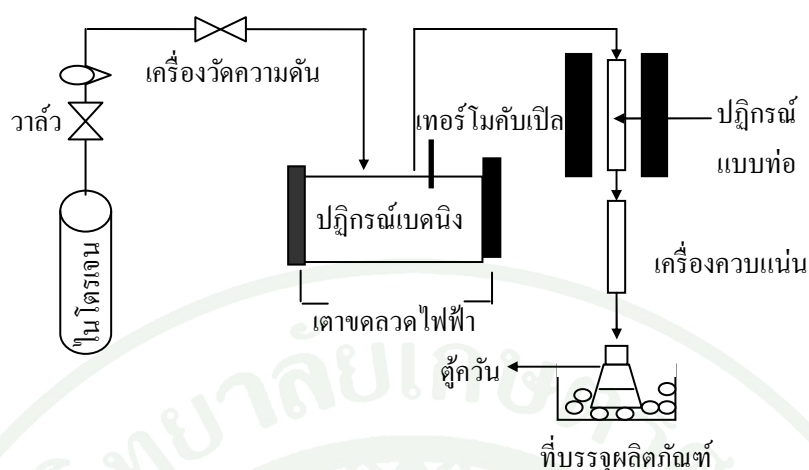
อุปกรณ์

1. สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

- 1.1 ปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง (fixed bed reactor)
- 1.2 เครื่องควบคุมอุณหภูมิ (temperature controller)
- 1.3 ปฏิกรณ์แบบท่อ (tube reactor)
- 1.4 เทอร์โมคัปเปิลชนิด เค (thermocouple type K) และขดลวดไฟฟ้า
- 1.5 เครื่องวัดความดัน (pressure gauge)
- 1.6 เครื่องควบแน่น (condensor)
- 1.7 ตู้อบ (oven)
- 1.8 เครื่องชั่งน้ำหนักสาร (analytical balance 2 digit)
- 1.9 ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask)
- 1.10 แก๊สไนโตรเจน (nitrogen gas)

2. ปฏิกรณ์

ปฏิกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส ประกอบด้วยสแตนเลสสตีล 316 รูปทรงกระบอก มีปริมาตร 700 มิลลิเมตร มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร ความสูง 14 เซนติเมตร มีเตาเผา ขดลวดไฟฟ้าให้ความร้อนควบคุมอุณหภูมิแบบ พีไอดี (proportional-integral-derivative controller, PID) วัดอุณหภูมิโดยเทอร์โมคัปเปิลชนิด เค ด้านบนของปฏิกรณ์มีข้อต่อเพื่อนำแก๊สดำพาเข้าและออกจากปฏิกรณ์ ผ่านเข้าปฏิกรณ์แบบท่อ (tube reactor) ทำด้วยท่อสแตนเลสสตีล 316 ขนาด 3/8 นิ้ว อยู่ในเตาเผาซึ่งควบคุมอุณหภูมิแบบ เปิด/ปิด (on/off) วัดอุณหภูมิในเตาเผาโดยเทอร์โมคัปเปิล ชนิด เค บริเวณทางปลายท่อขาออกของปฏิกรณ์แบบท่อเชื่อมต่อกับหน่วยควบแน่น (condensing unit) ดังภาพที่ 9 ผลิตภัณฑ์ที่ได้ ทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่อุณหภูมิ 14 องศาเซลเซียส และควบแน่นกลายเป็นของเหลวไหลลงขวดรูปชมพู่ ซึ่งแช่ในอ่างน้ำแข็งผสมเกลือ ส่วนไอที่ไม่สามารถควบแน่นได้นั้นไหลผ่านออกทางท่อขาออกเข้าไปในเครื่องดูดควัน (hood)



ภาพที่ 9 แผนภาพปฏิกรณ์ในกระบวนการไพโรไลซิส

วิธีการ

1. การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้คือ ชังข้าวโพดและมูลวัว

สำหรับชังข้าวโพด นำชังข้าวโพดมาตากแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้น เมื่อแห้งแล้วนำมาตัดโดยใช้เครื่องตัดไม้ และย่อยให้มีขนาดเล็กลงด้วยเครื่องย่อยไม้จนได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 0.2-1.8 มิลลิเมตร หรือตามความเหมาะสมเพื่อใช้ในการไพโรไลซิส

ในส่วนของมูลวัวนั้นนำแยกสิ่งปนเปื้อนออกก่อน (ถ้ามี) หลังจากนั้นนำมาตากแห้งเพื่อลดปริมาณความชื้น บดให้มีขนาดเท่าๆ กัน

หลังจากชีวมวลแห้งแล้วนำมาอบที่เตา (oven) เพื่อไล่ความชื้นออกอีกครั้ง โดยอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ก่อนที่นำชีวมวลไปใช้

2. วิธีการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสชีวมวลแบ่งออกเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ การไพโรไลซิสเชิงเดี่ยวและการไพโรไลซิสร่วม ในส่วนของการไพโรไลซิสเชิงเดี่ยว หมายถึง การใช้ชีวมวลเพียงชนิดเดียวในการไพโรไลซิส สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้ ชังข้าวโพดและมูลวัว สำหรับการไพโรไลซิสเชิงเดี่ยว และสำหรับการไพโรไลซิสร่วมเป็นการไพโรไลซิสร่วมระหว่างชังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนชังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก

2.1 การไพโรไลซิสเชิงเดี่ยว

การไพโรไลซิสเชิงเดี่ยวเป็นการไพโรไลซิสชีวมวลเพียงชนิดเดียว ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ชังข้าวโพดและมูลวัว เป็นวัตถุดิบ โดยเริ่มต้นนำชีวมวลที่ผ่านการย่อยให้มีขนาดที่เหมาะสมประมาณ 400 กรัมสำหรับชังข้าวโพด และ 180 กรัม สำหรับมูลวัว มาบรรจุในปฏิกรณ์ ตรวจสอบสภาพปะเก็นที่ทำจากแกรไฟต์ก่อนประกอบถึงปฏิกรณ์ให้สนิทจากนั้นนำถึงปฏิกรณ์ใส่ลงในเตาเคลวดไฟฟ้าต่อท่อแก๊สในโตรเจนเข้าและต่อท่อออกจากปฏิกรณ์พร้อมกับเช็ครอบรั่วระหว่างรอยต่อของเครื่องปฏิกรณ์ ใส่เทอร์โมคัปเปิลกับถึงปฏิกรณ์เปิดวาล์วควบคุมอัตราการไหลเริ่มต้นของแก๊สในโตรเจนที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.9 มีความเร็วสเปซหรือความเร็วของแก๊ส (space velocity) 17.1 ต่อชั่วโมง (อัตราการไหล 200 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อนาที) ทำการให้ความร้อนที่เครื่องปฏิกรณ์โดยตั้งค่าอุณหภูมิตามสภาวะที่ต้องการศึกษา (350-450 องศาเซลเซียส) ในบรรยากาศของแก๊สในโตรเจน โดยตั้งอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 50 องศาเซลเซียส แล้วรอจนอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่ตั้งค่าไว้เป็นเวลาประมาณ 10 นาที แล้วปรับเพิ่มค่าอุณหภูมิทีละ 25 องศาเซลเซียส ทุก 10 นาที จนกระทั่งถึงอุณหภูมิที่ศึกษา และคงอุณหภูมิไว้ที่อุณหภูมิไพโรไลซิสนานเป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้น ลดอุณหภูมิปฏิกรณ์ทั้งสองลงมาที่อุณหภูมิห้อง แก๊สและสารระเหยที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสถูกลดอุณหภูมิ และควบแน่นในหน่วยควบแน่น แก๊สที่ไม่ควบแน่นไหลออกไปในตู้ดูดควัน ผลิตภัณฑ์ของเหลวและถ่านที่ได้ นำมาชั่งหาน้ำหนักและวิเคราะห์สมบัติต่อไป

ตัวแปรที่ทำการศึกษา ในกระบวนการไพโรไลซิสเชิงเดี่ยว คือ อุณหภูมิ โดยสนใจศึกษาที่ช่วงอุณหภูมิ 350-450 องศาเซลเซียส

2.2 การไฟโรไลซิสร่วม

การไฟโรไลซิสร่วมเป็นการไฟโรไลซิสของชีวมวลมากกว่าหนึ่งชนิด โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้ซังข้าวโพดผสมกับมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ซึ่งวิธีการไฟโรไลซิสร่วม คือ นำซังข้าวโพดและมูลวัวมาผสมกันตามอัตราส่วนต่างๆ ตามที่ศึกษาโดยให้มีปริมาณของชีวมวลทั้งหมด 200 กรัม หลังจากนั้น นำชีวมวลไปทำการไฟโรไลซิสด้วยวิธีการเช่นเดียวกับการไฟโรไลซิสเชิงเดี่ยว โดยควบคุมอุณหภูมิในการไฟโรไลซิสอยู่ที่ 400 องศาเซลเซียส

ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อัตราส่วนระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก

3. การวิเคราะห์ข้อมูล

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาว่าการไฟโรไลซิสร่วมระหว่างซังข้าวโพดและมูลวัว ช่วยทำให้สมบัติของน้ำมันชีวมวลดีขึ้นหรือไม่ โดยเฉพาะค่าความเป็นกรดของน้ำมัน รวมถึงศึกษาผลของอุณหภูมิ และผลของอัตราส่วนของซังข้าวโพดและมูลวัวต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังพิจารณาถึงผลของการเสริมฤทธิ์กัน (synergistic effect) ของการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อนำไปใช้ในการไฟโรไลซิสร่วม

การผลิตปุ๋ยคาร์บอน ดูว่าถ่านชาร์ที่ผลิตได้นั้นมีสมบัติเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ได้หรือไม่ โดยพิจารณาที่ปริมาณธาตุอาหารที่พืชต้องการว่ามีปริมาณเป็นอย่างไร และอาจนำไปทดลองใช้เป็นปุ๋ยเพื่อพิจารณาลักษณะการเจริญเติบโตของพืช

3.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของชีวมวล

การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของชีวมวล ทำการวิเคราะห์ทางเคมีแบบละเอียด (ultimate analysis) โดยมีรายละเอียดการวิเคราะห์ดังนี้ การวิเคราะห์ทางเคมีแบบละเอียดประกอบด้วย การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ซึ่งได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ออกซิเจน และไฮโดรเจน

3.2 การวิเคราะห์การสลายตัวของชีวมวลด้วยความร้อน

ศึกษาการสลายตัวด้วยความร้อนด้วยเครื่อง thermogravimetric analyzer (TGA) รุ่น SDT 2960 PN 925605.001 ผลิตโดยบริษัท Perkin Elmer ประเทศสหรัฐอเมริกาโดยให้ความร้อนในบรรยากาศไนโตรเจน อัตราการให้ความร้อน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที

3.2.1 การคำนวณร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

ก. ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$CM_{11} = (C + M) / 2 \quad (1)$$

เมื่อ CM_{11} หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิที่ศึกษา ที่ได้จากการคำนวณ C หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา และ M หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา

ข. ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$CM_{31} = ((3 / 4) \times C + (1 / 4) \times M) \quad (2)$$

เมื่อ CM_{31} หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิที่ศึกษา ที่ได้จากการคำนวณ C หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา และ M หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา

ค. ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$CM_{13} = ((1/4) \times C + (3/4) \times M) \quad (3)$$

เมื่อ CM_{13} หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิที่ศึกษา ที่ได้จากการคำนวณ C หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา และ M หมายถึง ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา

3.3 การคำนวณหาร้อยละผลได้ (percentage yield)

3.3.1 การคำนวณหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง

$$Y_{char} = (100 \times W_{char}) / W_{biomass} \quad (4)$$

เมื่อ Y_{char} หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง W_{char} หมายถึง น้ำหนักของของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากกระบวนการไพโรไลซิส, กรัม และ $W_{biomass}$ หมายถึง น้ำหนักของชีวมวลเริ่มต้นก่อนกระบวนการไพโรไลซิส, กรัม

3.3.2 การคำนวณหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

$$Y_{oil} = (100 \times W_{oil}) / W_{biomass} \quad (5)$$

เมื่อ Y_{oil} หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว W_{oil} หมายถึง น้ำหนักของของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส, กรัม และ $W_{biomass}$ หมายถึง น้ำหนักของชีวมวลเริ่มต้นก่อนกระบวนการไพโรไลซิส, กรัม

3.3.3 การคำนวณหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแก๊ส

$$Y_{gas} = 100 \times (W_{biomass} - W_{char} - W_{oil}) / W_{biomass} \quad (6)$$

เมื่อ Y_{gas} หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส W_{oil} หมายถึง น้ำหนักของของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส, กรัม W_{char} หมายถึง น้ำหนักของของแข็งที่เหลืออยู่

หลังจากกระบวนการไพโรไลซิส, กรัม และ W_{biomass} หมายถึง น้ำหนักของชีวมวลเริ่มต้นก่อนกระบวนการไพโรไลซิส, กรัม

3.4 การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสชีวมวลที่ได้จากการคำนวณ

3.4.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$Y_{11} = (Y_C + Y_M) / 2 \quad (7)$$

เมื่อ Y_{11} หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ Y_C หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของซึ่งข้าวโพดที่ได้จากการทดลอง และ Y_M หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของมูลวัวที่ได้จากการทดลอง

3.4.2 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$Y_{31} = ((3 / 4) \times Y_C + (1 / 4) \times Y_M) \quad (8)$$

เมื่อ Y_{31} หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ Y_C หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของซึ่งข้าวโพดที่ได้จากการทดลอง และ Y_M หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของมูลวัวที่ได้จากการทดลอง

3.4.3 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$Y_{13} = ((1 / 4) \times Y_C + (3 / 4) \times Y_M) \quad (9)$$

เมื่อ Y_{13} หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของของผสมซึ่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ Y_c หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของซึ่งข้าวโพดที่ได้จากการทดลอง และ Y_M หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของมูลวัวที่ได้จากการทดลอง

3.5 การคำนวณร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

$$\%Y = (100 \times (Y_{\text{exp}} - Y_{\text{cal}})) / Y_{\text{cal}} \quad (10)$$

เมื่อ %Y หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน Y_{exp} หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง และ Y_{cal} หมายถึง ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณ

3.6 การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

การวิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวมวลประกอบไปด้วยการวิเคราะห์หาค่า pH ด้วย pH มิเตอร์ รุ่น eutech model cyber scan pC510 การวิเคราะห์ค่าความร้อน (calorific value) ด้วยเครื่อง bomb calorimeter

3.7 การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส

3.7.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว

การวิเคราะห์หลักยณะขององค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ของเหลวใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (gas chromatography-mass spectrometry: GC/MS) ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบที่พบในผลิตภัณฑ์

3.7.2 ผลิตภัณฑ์ในส่วนของการ์บอนที่ใช้ในการผลิตปุ๋ยคาร์บอน

ในส่วนของการ์บอนที่เอาไปทำปุ๋ยคาร์บอน วิเคราะห์หาปริมาณธาตุอาหารของพืช โดยอาศัยเครื่อง inductively coupled plasma (ICP) ในการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุต่างๆ

3.8 การวิเคราะห์ถ่านชาร์

การวิเคราะห์ถ่านชาร์วิเคราะห์โดยการนำถ่านชาร์ไปปลูกต้นไม้เพื่อทดสอบว่าถ่านชาร์ชนิดใดมีคุณภาพและเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปใช้เป็นปุ๋ย โดยผลิตภัณฑ์ที่นำไปทดสอบมีอยู่ 6 ชนิด คือ ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3, 0:4 และ 0:0 (ไม่ใช่ถ่านชาร์) โดยน้ำหนัก ซึ่งมีการควบคุมตัวแปรอื่นๆ ให้คงที่เช่น การให้น้ำและปริมาณดิน

ถ่านชาร์เตรียมจากผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่ 400 องศาเซลเซียส ถูกใช้เป็นตัวทดสอบโดยนำ 100 กรัม ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมาผสมกับดิน 7000 กรัม และนำไปปลูกต้นไม้ ซึ่งต้นไม้ที่ปลูกคือ ต้นกระเพราแดง (ชื่อวิทยาศาสตร์: *Ocimum Sanctum L.*) โดยวิธีการปลูกใช้วิธีเพาะจากเมล็ด และภาชนะที่ใช้ปลูกเป็นกระถางพลาสติก

การวิเคราะห์คุณภาพของถ่านชาร์นั้นเปรียบเทียบกับความสูงของต้นกระเพรา ซึ่งถ้าต้นกระเพรามีความสูงมาก แสดงว่าถ่านชาร์ชนิดนั้นเหมาะสมที่นำไปใช้ทำเป็นปุ๋ยหรือมีคุณภาพของการนำไปใช้เป็นปุ๋ยมาก

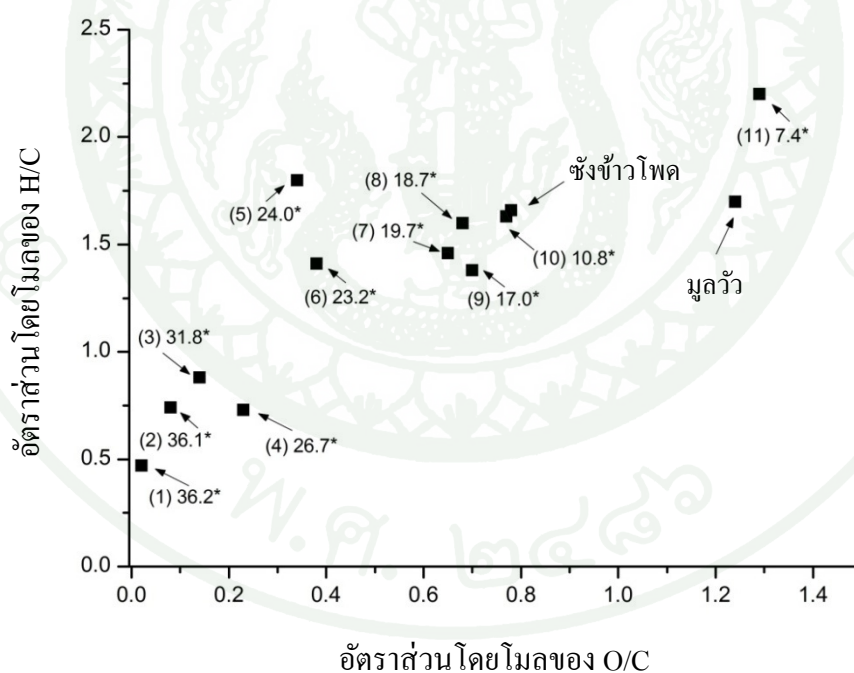
ผลและวิจารณ์

1. การวิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของชีวมวล

ตารางที่ 5 แสดงค่าร้อยละองค์ประกอบของธาตุของชีวมวลซังข้าวโพดและมูลวัว ซึ่งประกอบด้วย ธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ไนโตรเจน (N) และออกซิเจน (O) พบว่าซังข้าวโพดมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 45.8 โดยน้ำหนัก ปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 6.3 โดยน้ำหนัก ปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.2 โดยน้ำหนัก และปริมาณออกซิเจนร้อยละ 47.7 โดยน้ำหนัก ในขณะที่มูลวัวมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 35.4 โดยน้ำหนัก ปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 5.0 โดยน้ำหนัก ปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก และปริมาณออกซิเจนร้อยละ 58.4 โดยน้ำหนัก เห็นได้ว่าซังข้าวโพดและมูลวัวมีปริมาณออกซิเจนอยู่ในปริมาณที่สูง และมีปริมาณไฮโดรเจนในปริมาณที่ต่ำ และเมื่อพิจารณาค่า อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน (H/C molar ratio) และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอน (O/C molar ratio) ของซังข้าวโพดและมูลวัว พบว่าซังข้าวโพดมีค่า อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 1.7 และ 0.8 ตามลำดับ ในขณะที่มูลวัวมีค่าอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนเท่ากับ 1.7 และ 1.2 ตามลำดับ ซึ่งจากค่าอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนของซังข้าวโพดและมูลวัว เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับไดอะแกรมของ Van Krevelen (1950) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอน ดังภาพที่ 10 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์นี้ เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความร้อนลดลง (เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนใกล้เคียงกัน) และเมื่ออัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความร้อนสูงขึ้น (เมื่ออัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนใกล้เคียงกัน) ซึ่งจากความสัมพันธ์นี้ แสดงให้เห็นว่า ค่าความร้อนของซังข้าวโพดสูงกว่าค่าความร้อนของมูลวัว เนื่องจาก อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนของซังข้าวโพดต่ำกว่าอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอนของมูลวัว ในขณะที่ค่าอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอนของซังข้าวโพดและมูลวัวมีค่าเท่ากันคือ 1.7 และเมื่อพิจารณาค่าความร้อนจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง bomb calorimeter พบว่า ซังข้าวโพดมีค่าความร้อน 16.9 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และมูลวัวมีค่าความร้อน 13.5 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เห็นได้ว่าซังข้าวโพดมีค่าความร้อนสูงกว่ามูลวัวซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์จากอัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน และอัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอน

ตารางที่ 5 ผลวิเคราะห์ทางเคมีแบบละเอียดของชีวมวลซังข้าวโพดและมูลวัว

ธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก	
	ซังข้าวโพด	มูลวัว
คาร์บอน	45.8	35.4
ไฮโดรเจน	6.3	5.0
ไนโตรเจน	0.2	1.2
ออกซิเจน (ผลต่าง)	48.0	58.4
อัตราส่วนโดยโมลของไฮโดรเจนต่อคาร์บอน	1.7	1.7
อัตราส่วนโดยโมลของออกซิเจนต่อคาร์บอน	0.8	1.2
ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัมชีวมวล)	16.9	13.5
สูตรเอมพิริคัล	$\text{CH}_{1.7}\text{O}_{0.8}\text{N}_{0.004}$	$\text{CH}_{1.7}\text{O}_{1.2}\text{N}_{0.04}$



ภาพที่ 10 อัตราส่วนโดยโมลของ H/C และ O/C ของชีวมวลและของถ่านหิน

หมายเหตุ * หมายถึง ค่าความร้อน (เมกะจูลต่อกิโลกรัม) และตัวเลขในวงเล็บ คือ ชนิดของชีวมวลและของถ่านหิน (1) แอนทราไซต์ (2) บิทูมินัส (3) ซับบิทูมินัส (4) ลิกไนต์ (5) ดอกคำฝอย (6) กากถั่วเหลือง (7) ต้นปอปลาร์ (8) มูลไก่ (9) ต้นเบ็ช (10) ฟางข้าว (11) มูลหมู

ที่มา: Xiu *et al.* (2010); Kim *et al.* (2009); Neves *et al.* (2011)

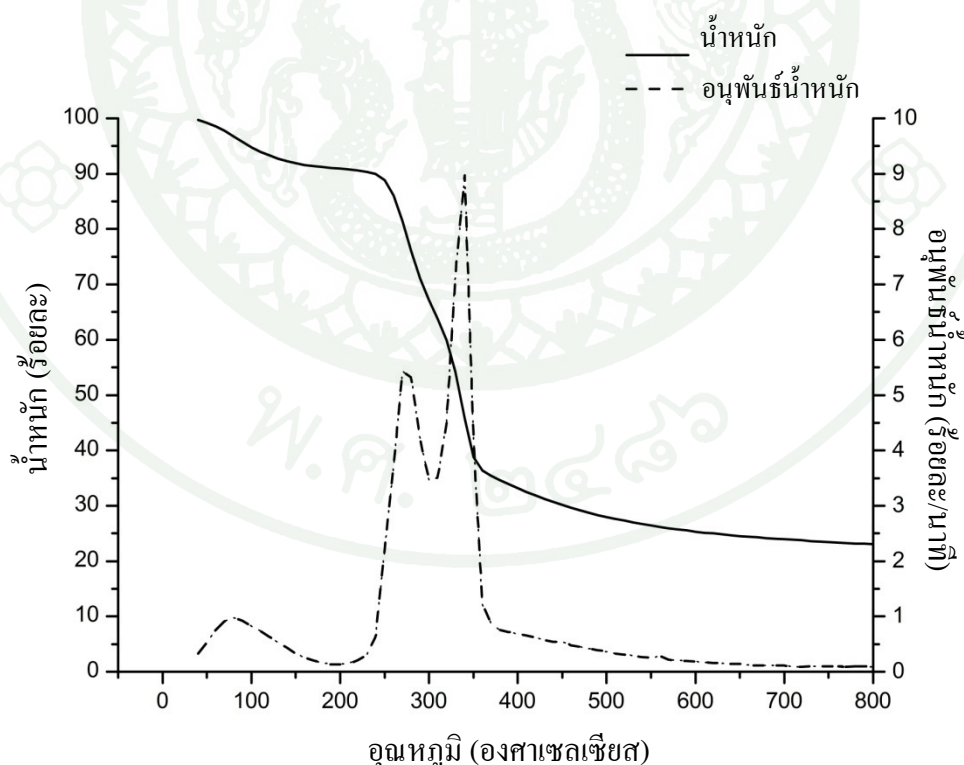
2. การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

ก่อนทำการไพโรไลซิสจำเป็นต้องศึกษาการสลายตัวของสารด้วยความร้อนโดยอาศัยเครื่องวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (thermogravimetric analysis: TGA) ในการวิเคราะห์หาช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวสูงสุดของชีวมวลทำให้ทราบอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการไพโรไลซิส

2.1 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพด

โดยทั่วไปแล้วการสูญเสียน้ำหนักของสารมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดอยู่สามช่วง (Kumar *et al.*, 2008; Ioannidou *et al.*, 2008) โดยในช่วงแรกนั้นเกิดขึ้นในช่วงที่อุณหภูมิไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส เป็นช่วงของการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นจาก การระเหยของน้ำ สำหรับ ซังข้าวโพดมีการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการระเหยของน้ำในช่วงนี้อยู่ที่ร้อยละ 5.6 โดยน้ำหนัก ดังภาพที่

11



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของซังข้าวโพด ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate)

10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

สำหรับช่วงที่สองนั้น ชั่งข้าวโพดเริ่มเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณากราฟอนุพันธ์น้ำหนัก (derivative thermogravimetric: DTG) ในช่วงอุณหภูมิ 210-360 องศาเซลเซียส พบว่ากราฟการสลายตัวของชั่งข้าวโพดมีอยู่ด้วยกัน 2 พีก (peak) คือ ช่วงอุณหภูมิ 210-300 องศาเซลเซียส และช่วง 300-360 องศาเซลเซียส โดยในพีกแรกมีการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส และเกิดการสลายตัวร้อยละ 18.5 โดยน้ำหนัก ส่วนพีกที่สองมีการสลายตัวสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส และเกิดการสลายตัวร้อยละ 54.2 โดยน้ำหนัก Biagini *et al.* (2006) และ Liu *et al.* (2011) รายงานว่า การสลายตัวของชั่งข้าวโพด เกิดจากการสลายตัวของ เฮมิเซลลูโลส ซึ่งเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 210-360 องศาเซลเซียส ในขณะที่เซลลูโลสเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิ 240-390 องศาเซลเซียส และลิกนินเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิกว้าง 210-900 องศาเซลเซียส ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีแต่ละชนิดมีการสลายตัวที่อุณหภูมิไม่เท่ากัน เนื่องจากความแตกต่างทางโครงสร้างของสารแต่ละชนิด โดยที่เฮมิเซลลูโลสมีการสลายตัวทางความร้อนง่ายที่สุด เนื่องจากองค์ประกอบของเฮมิเซลลูโลสประกอบไปด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหลายชนิดมารวมกัน มีโครงสร้างแบบบอสันฐาน จัดเรียงตัวแบบสุ่ม (random) ทำให้พันธะมีความแข็งแรงน้อย ทำให้ง่ายต่อการสลายตัวทางความร้อน ในขณะที่เซลลูโลส ประกอบไปด้วยกลูโคสที่เรียงตัวต่อกันเป็นพอลิเมอร์สายยาว ไม่มีกิ่ง มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบ ทำให้มีความเป็นผลึก (crystalline) ทำให้พันธะมีความแข็งแรง จึงเกิดการสลายตัวได้ช้ากว่าเฮมิเซลลูโลส ในส่วนของลิกนิน โครงสร้างของลิกนินมีการจัดเรียงตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบไปด้วย วงอะโรมาติก (วงเบนซีน) โฟเพน และองค์ประกอบหนักทางเคมี ทำให้พันธะมีความแข็งแรงมาก จึงเกิดการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง (Yang *et al.*, 2007)

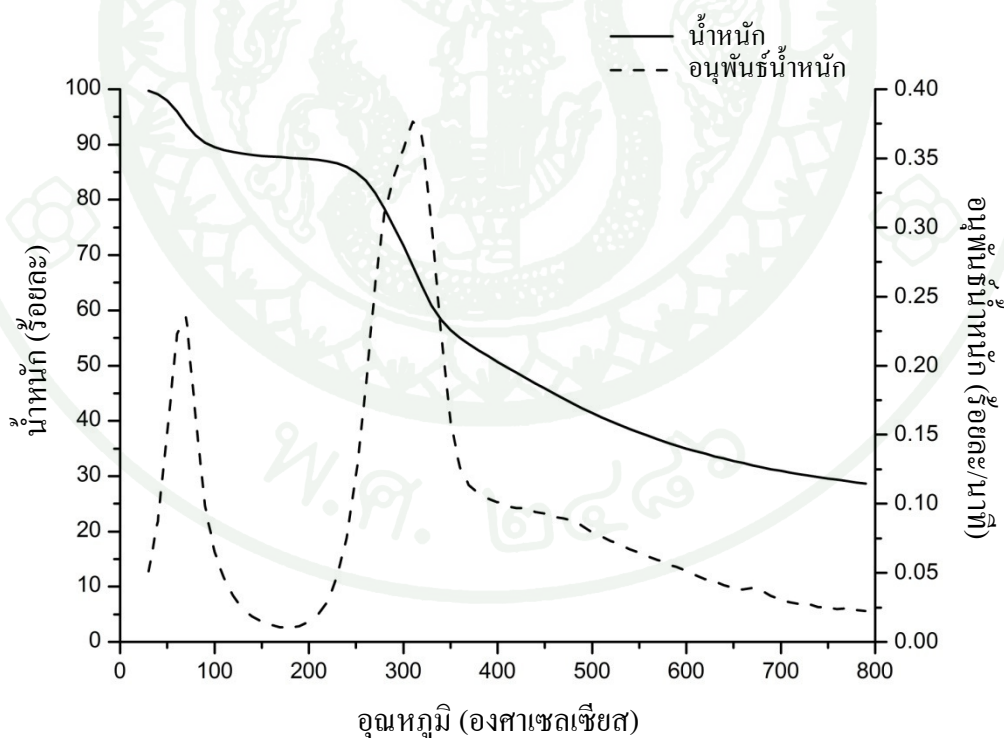
ช่วงที่สามนั้น อุณหภูมิตั้งแต่ 360-800 องศาเซลเซียส การสลายตัวของชั่งข้าวโพดเริ่มลดลงอย่างช้าๆ โดยการสูญเสียน้ำหนักในช่วงนี้เกิดจากการสลายตัวของสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็ก และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีกากของแข็งเหลืออยู่ร้อยละ 23.1 โดยน้ำหนัก

2.2 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของมูลวัว

ภาพที่ 12 เป็นภาพการสลายตัวของมูลวัว โดยลักษณะการสลายตัวยังคงแบ่งออกเป็นสามช่วงเช่นเดียวกับชั่งข้าวโพด โดยในช่วงแรก อุณหภูมิไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส เป็นช่วงของการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดขึ้นจาก การระเหยของน้ำ โดยมูลวัวมีการสูญเสียน้ำหนักที่เกิดจากการระเหยของน้ำในช่วงนี้อยู่ที่ร้อยละ 10.7 โดยน้ำหนัก

สำหรับช่วงที่สองนั้น มูลวัวเริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส และเกิดการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมินี้เกิดการสลายตัวไปร้อยละ 32 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณากราฟอนุพันธ์น้ำหนัก พบว่าการสลายตัวของมูลวัวมีเพียงพีคเดียว ซึ่งแตกต่างจากขี้ข้าวโพดที่มีการสลายตัว 2 พีค โดยเกิดการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 210-360 องศาเซลเซียส ซึ่งการสูญเสียน้ำหนักของมูลวัวในช่วงนี้เกิดจากการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส โปรตีน และลิกนิน ซึ่งมีช่วงการสลายตัวดังนี้ เฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 210-360 องศาเซลเซียส ในขณะที่เซลลูโลสเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 240-390 องศาเซลเซียส โปรตีนเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 300-600 องศาเซลเซียส (Bernhart and Fasina, 2009) และลิกนินเกิดการสลายตัวในช่วงอุณหภูมิกว้าง 210-900 องศาเซลเซียส

ช่วงที่สาม อุณหภูมิตั้งแต่ 360-800 องศาเซลเซียส เกิดการสลายตัวของสารโมเลกุลขนาดใหญ่ของสารอินทรีย์ที่ยังคงเหลืออยู่ โดยมีกากของแข็งเหลืออยู่ร้อยละ 28.6 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 12 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของมูลวัว ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate)

10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

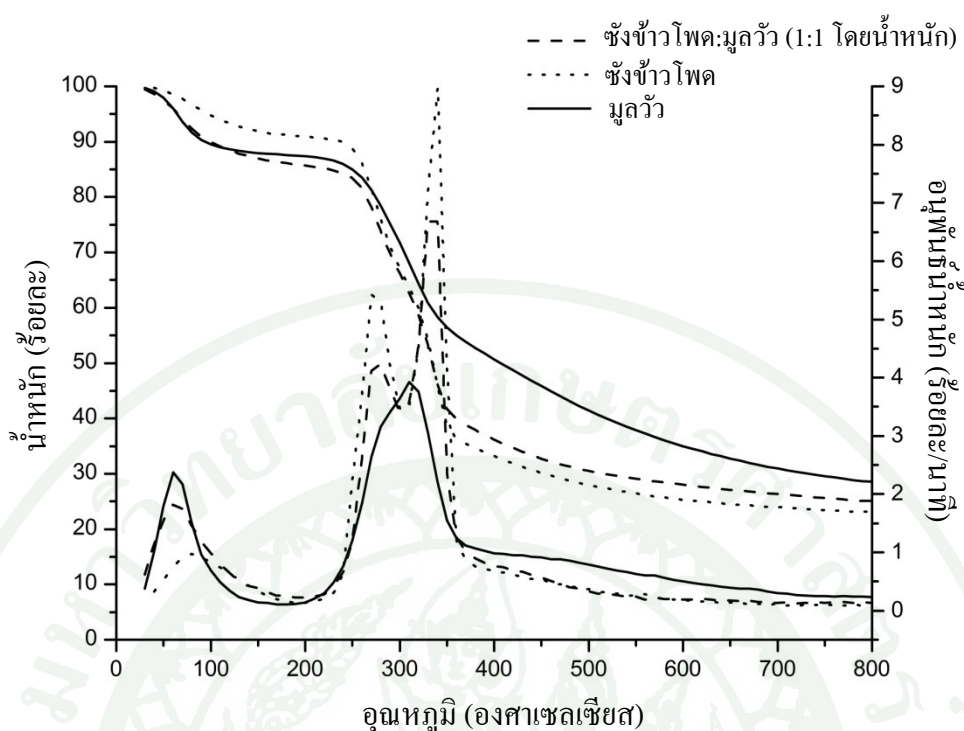
เมื่อพิจารณาการสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพดและมูลวัว สามารถสรุปได้ว่าการสลายตัวสูงสุดของซังข้าวโพดอยู่ที่อุณหภูมิ 270 และ 340 องศาเซลเซียส ในขณะที่มูลวัวอยู่ที่ 310 องศาเซลเซียส ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวควรมากกว่า 350 องศาเซลเซียส

2.3 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของของผสมซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก

การสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมของซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 13 ซึ่งพบว่าในช่วงแรกนั้นการสูญเสียน้ำหนักของของผสมระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก เกิดขึ้นจาก การระเหยของน้ำ โดยพบว่าการระเหยของน้ำของซังข้าวโพดมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ ของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัว และปริมาณน้อยที่สุด คือ มูลวัว

ในช่วงที่สองนั้น พบว่า ของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัว เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิเดียวกับของซังข้าวโพดและของมูลวัว) และเมื่อพิจารณากราฟอนุพันธ์น้ำหนักพบว่า ลักษณะของกราฟอนุพันธ์น้ำหนัก แบ่งออกเป็น 2 พีค เช่นเดียวกับกราฟอนุพันธ์น้ำหนักของซังข้าวโพด (ในขณะที่กราฟอนุพันธ์น้ำหนักของมูลวัวมีเพียงพีคเดียว) โดยที่พีคแรกมีการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 210-300 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส (สูงกว่าของซังข้าวโพด 10 องศาเซลเซียส) ในส่วนพีคที่สองมีการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 300-360 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิเดียวกับของซังข้าวโพด ในขณะที่มูลวัวเกิดการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 310 องศาเซลเซียส) ที่อุณหภูมิ 280 และ 340 องศาเซลเซียส ของผสมเกิดการสูญเสียน้ำหนักไป ร้อยละ 26.2 และ 54.0 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

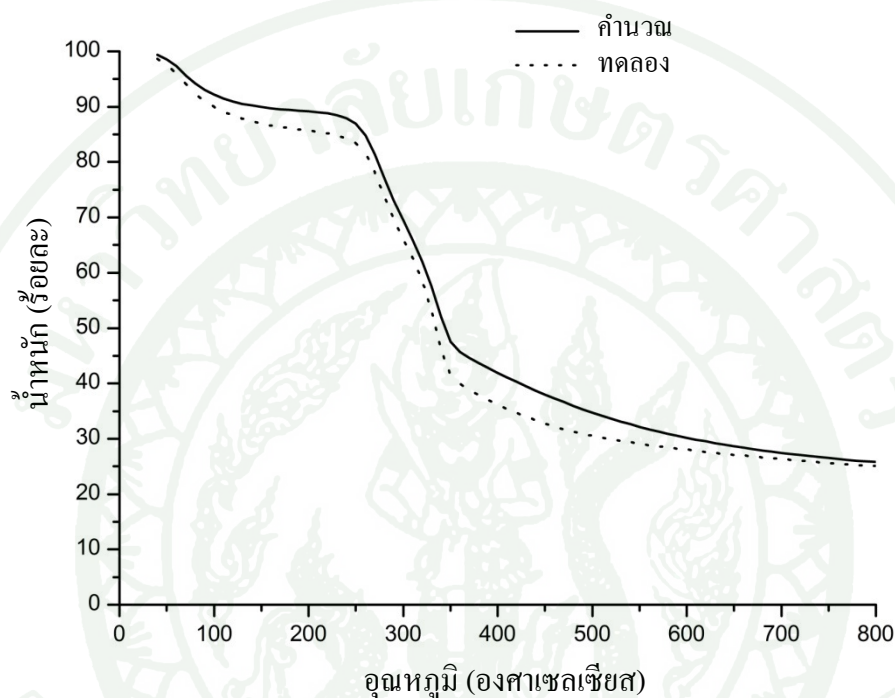
ช่วงที่สาม อุณหภูมิ 360-800 องศาเซลเซียส ช่วงนี้ของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวเกิดการสลายตัวช้าลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเหลืออยู่ร้อยละ 25.1 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชังข้าวโพด มุลวู้ และของผสมของชังข้าวโพดต่อมุลวู้ เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

เมื่อพิจารณาการสลายตัวทางความร้อนของของผสมชังข้าวโพดต่อมุลวู้เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองพบว่า การสลายตัวของของผสมที่ได้จากการทดลองเกิดการสลายตัวได้มากกว่าการสลายตัวที่ได้จากการคำนวณ ดังภาพที่ 14 ซึ่งการคำนวณการสลายตัวของของผสมที่ได้จากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก จากภาพแสดงให้เห็นว่าเมื่อผสมชังข้าวโพดและมุลวู้เข้าด้วยกันทำให้เกิดการสลายตัวได้ดีขึ้น ทุกช่วงอุณหภูมิที่ศึกษา เช่นที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวของของผสมที่ได้จากการคำนวณอยู่ที่ร้อยละ 58.1 โดยน้ำหนัก ในขณะที่การสลายตัวของของผสมที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 63.8 โดยน้ำหนัก ซึ่งการผสมกันของชังข้าวโพดและมุลวู้ทำให้เกิดการสลายตัวได้ดีขึ้น อาจเกิดขึ้นจากผสมกันของชังข้าวโพดและมุลวู้ ทำให้เกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคของแข็งและของแข็ง และ (หรือ) ในวัฏภาคของแข็งและของเหลว และ (หรือ) ในวัฏภาคของแข็งและแก๊ส เช่น การผสมกันของชังข้าวโพดและมุลวู้ อาจทำให้เกิดการสลายตัวได้เร็วขึ้น เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไฮโดรเจนซันระหว่างแก๊สไฮโดรเจนกับสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้ทำให้สารประกอบมีความไม่เสถียรทางความร้อนมากขึ้น ทำให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนได้มากขึ้นทำให้ได้ของแข็งน้อยลง เช่น การ

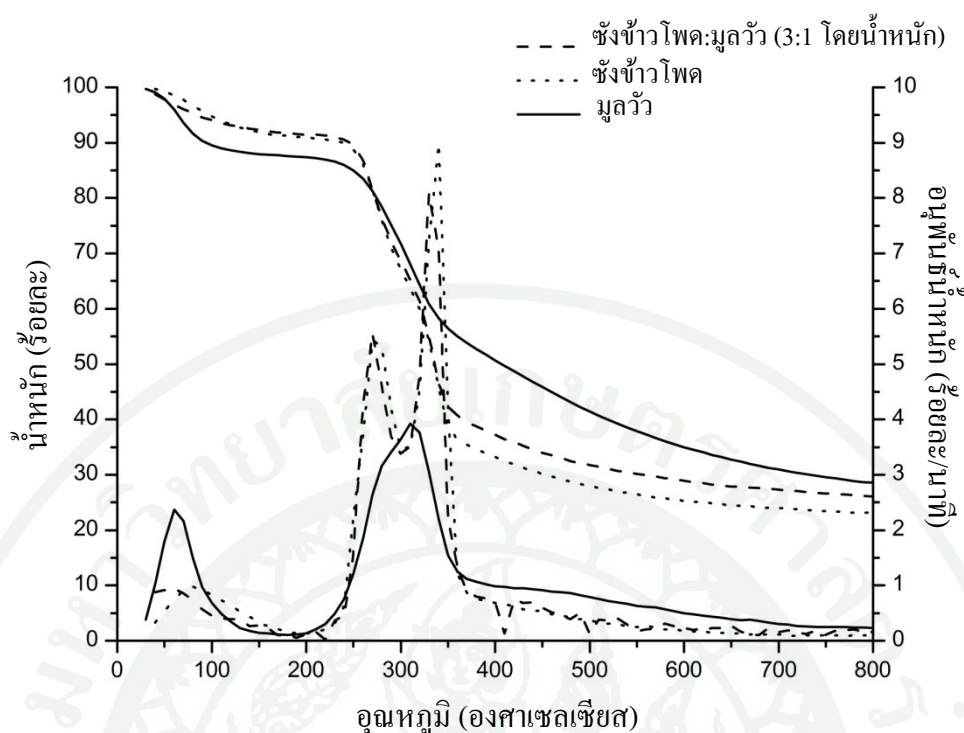
เกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของ ไซโลส (xylose) เป็นไซลิตอล (xylitol) และสลายตัวด้วยความร้อน กลายเป็นสารประกอบแอลเคนและสารประกอบแอลกอฮอล์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามสามารถสรุปได้ว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวเกิดการส่งเสริมซึ่งกันและกัน (synergy) ทำให้ของผสมเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น ทำให้ได้ของแข็งลดลง



ภาพที่ 14 ผลของการสลายตัวทางความร้อนของของผสมระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

2.4 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของของผสมซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก

การสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมของซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 15 ซึ่งพบว่าในช่วงแรกอุณหภูมิ ไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียน้ำหนักของสารตัวอย่าง ซึ่งเกิดขึ้นจากการระเหยของน้ำ โดยที่ของผสมระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก มีการระเหยของน้ำอยู่ที่ร้อยละ 6.2 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ซังข้าวโพดและมูลวัวมีการระเหยของน้ำที่ร้อยละ 5.6 และ 10.7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

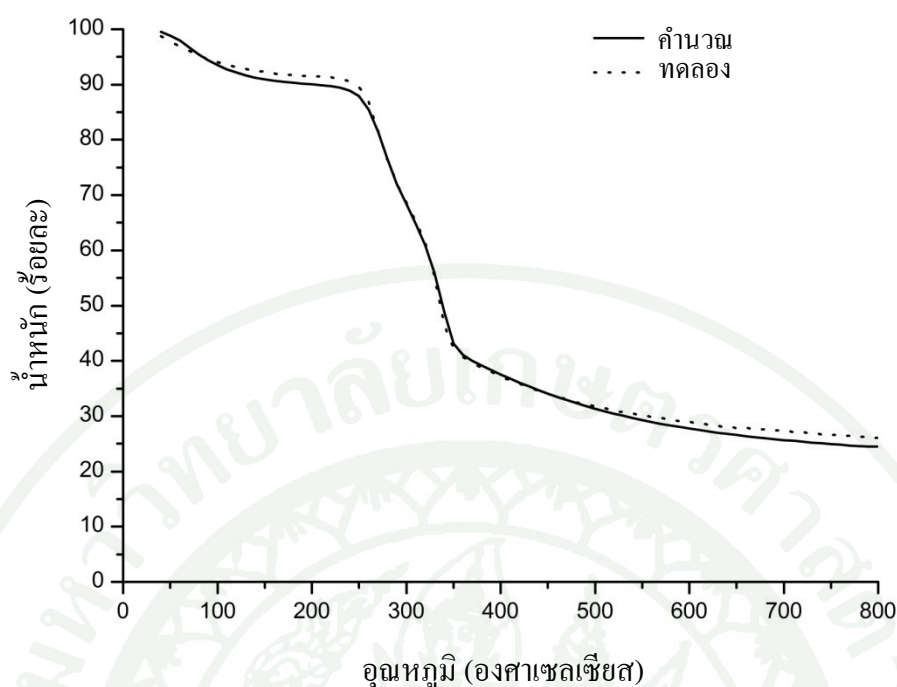


ภาพที่ 15 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของชังข้าวโพด มูลวัว และของผสมของชังข้าวโพดต่อมูลวัว
เท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที
ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

ในช่วงที่สองนั้น พบว่า ของผสมของชังข้าวโพดและมูลวัว เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส และเมื่อพิจารณากราฟอนุพันธ์น้ำหนักพบว่า ลักษณะของกราฟอนุพันธ์น้ำหนัก แบ่งออกเป็น 2 พีก เช่นเดียวกับกราฟอนุพันธ์น้ำหนักของของผสมของชังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก โดยพีกแรกมีการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 210-300 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 270 องศาเซลเซียส ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิของการสลายตัวของชังข้าวโพด และต่ำกว่าอุณหภูมิของการสลายตัวของชังข้าวโพดต่อมูลวัวที่อัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก 10 องศาเซลเซียส ในส่วนพีกที่สองมีการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 310-360 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 330 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าอุณหภูมิของการสลายตัวของชังข้าวโพดและของผสมชังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก 10 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 270 และ 330 องศาเซลเซียส ของผสมเกิดการสูญเสียน้ำหนักร้อยละ 18.4 และ 44.8 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ช่วงที่สาม อุณหภูมิ 370-800 องศาเซลเซียส ช่วงนี้ของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัว เกิดการสลายตัวช้าลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสมีของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเหลืออยู่ร้อยละ 26.1 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาการสลายตัวทางความร้อนของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองพบว่า การสลายตัวของของผสมที่ได้จากการทดลองเกิดการสลายตัวได้ใกล้เคียงกับการสลายตัวที่ได้จากการคำนวณ ดังภาพที่ 16 ซึ่งการคำนวณการสลายตัวของของผสมที่ได้จากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก จากภาพแสดงให้เห็นว่าการสลายตัวที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าการสลายตัวที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย ในช่วงของอุณหภูมิ 330-460 องศาเซลเซียส นอกเหนือจากช่วงอุณหภูมินี้การสลายตัวที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าการสลายตัวที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวของของผสมที่ได้จากการคำนวณอยู่ที่ร้อยละ 62.4 โดยน้ำหนัก ในขณะที่การสลายตัวของของผสมที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 62.8 โดยน้ำหนัก ซึ่งเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคของแข็งและแก๊ส และ (หรือ) วัฏภาคของแข็งและของแข็ง และ (หรือ) วัฏภาคของแข็งและของเหลวเช่นเดียวกับของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวของของผสมที่ได้จากการคำนวณอยู่ที่ ร้อยละ 68.7 โดยน้ำหนัก ในขณะที่การสลายตัวของของผสมที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 68.3 โดยน้ำหนัก ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย ซึ่งการที่ของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวมีการสลายตัวทางความร้อนที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าการคำนวณ อาจเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน (polymerization) ของมอนอเมอร์ที่เกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ตัวอย่างเช่น สารประกอบของเฟอร์ฟูรัล (furfural compound) ที่เกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลส เช่น 5-hydroxymethylfurfural เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันประเภทอัลดอลคอนเดนเซชัน (aldol condensation) กลายเป็นสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น (Sevilla and Fuertes, 2009) อย่างไรก็ตามแสดงให้เห็นว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก เกิดการส่งเสริมซึ่งกันและกัน (synergy) น้อยมาก เนื่องจากมีการสลายตัวทางความร้อนใกล้เคียงกัน ทั้งจากการสลายตัวทางความร้อนที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ



ภาพที่ 16 ผลของการสลายตัวทางความร้อนของของผสมระหว่างขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

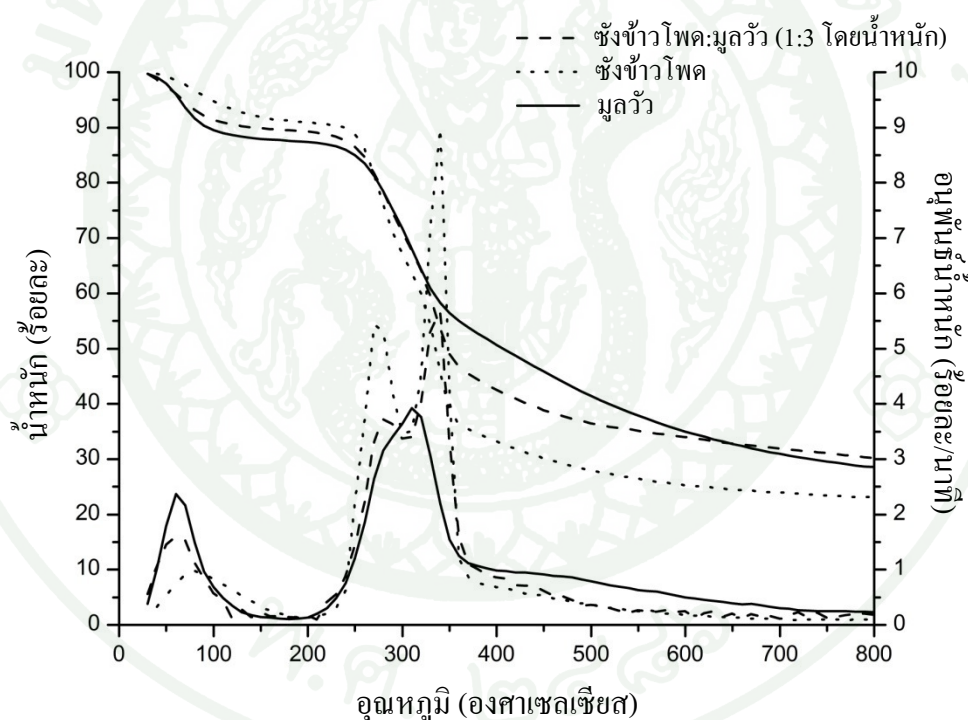
2.5 การวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

การสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพด มูลวัว และของผสมของขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงในภาพที่ 17 ซึ่งพบว่าในช่วงแรกอุณหภูมิ ไม่เกิน 105 องศาเซลเซียส เกิดการสูญเสียน้ำหนักของสารตัวอย่าง ซึ่งเกิดขึ้นจากการระเหยของน้ำ โดยที่ของผสมระหว่างขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก มีการระเหยของน้ำอยู่ที่ร้อยละ 8.8 โดยน้ำหนัก

ช่วงที่สองนั้น พบว่า ของผสมของขี้ข้าวโพดและมูลวัว เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส เช่นเดียวกับที่อัตราส่วนอื่นๆ และเมื่อพิจารณากกราฟอนุพันธ์ น้ำหนักพบว่า ลักษณะของกราฟอนุพันธ์น้ำหนัก แบ่งออกเป็น 2 พีค เช่นเดียวกับกราฟอนุพันธ์น้ำหนักของของผสมของขี้ข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก โดยพีคแรกมีการสลายตัวอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 210-300 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 280 องศาเซลเซียส เท่ากับการสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก

และสูงกว่าการสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก 10 องศาเซลเซียส ในส่วนฟีดที่สองมีการสลายตัวที่อุณหภูมิ 310-360 องศาเซลเซียส และมีการสลายตัวสูงสุดที่อุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส เท่ากับสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และสูงกว่าการสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก 10 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 280 และ 340 องศาเซลเซียส ของผสมเกิดการสูญเสียน้ำหนักไปร้อยละ 21.7 และ 46.4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ

ช่วงที่สาม อุณหภูมิ 370-800 องศาเซลเซียส ช่วงนี้ของผสมของขี้ข้าวโพดและมูลวัว เกิดการสลายตัวช้าลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มีของผสมขี้ข้าวโพด และมูลวัวเหลืออยู่ร้อยละ 30.3 โดยน้ำหนัก



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของขี้ข้าวโพด มูลวัว และของผสมของขี้ข้าวโพดต่อมูลวัว เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อัตราการให้ความร้อน (heating rate) 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจน

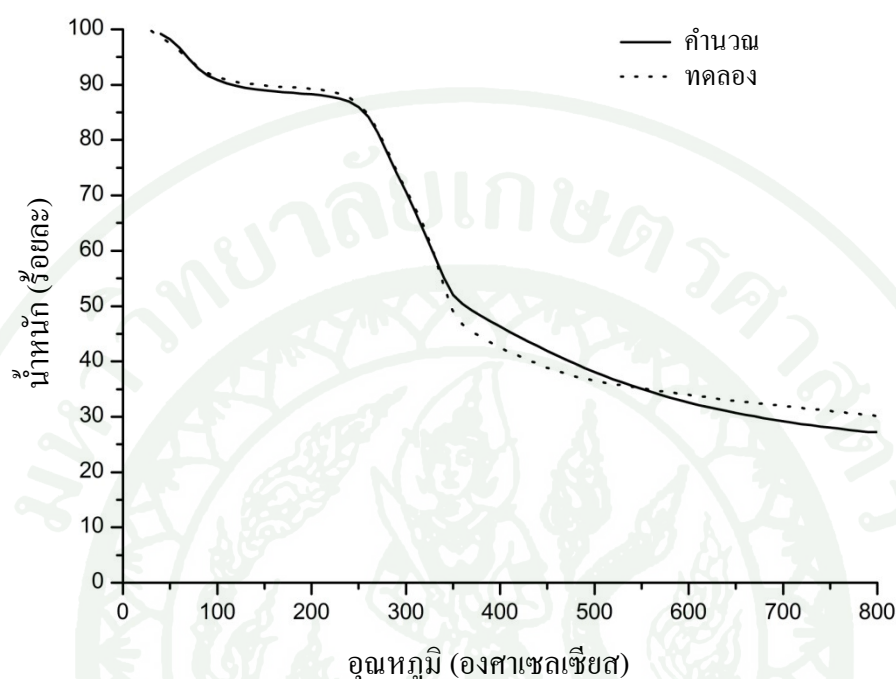
เมื่อพิจารณาการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพด และมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองพบว่า การสลายตัวของของผสมที่ได้จากการทดลองเกิดการสลายตัวได้แตกต่างจากการสลายตัวที่ได้จากการคำนวณ ดังภาพที่ 18 ซึ่ง

การคำนวณการสลายตัวของของผสมที่ได้จากการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก จากภาพแสดงให้เห็นว่าการสลายตัวที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าการสลายตัวที่ได้จากการคำนวณในช่วงของอุณหภูมิ 350-520 องศาเซลเซียส อาจเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาในวัฏภาคของแข็งและแก๊ส และ (หรือ) วัฏภาคของแข็งและของแข็ง และ (หรือ) วัฏภาคของแข็งและของเหลวเช่นเดียวกับที่อัตราส่วน 1:1 และ 3:1 โดยน้ำหนัก นอกเหนือจากช่วงอุณหภูมินี้การสลายตัวที่ได้จากการทดลองมีค่าน้อยกว่าการสลายตัวที่ได้จากการคำนวณ โดยที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีการสลายตัวของของผสมที่ได้จากการคำนวณอยู่ที่ร้อยละ 54.6 โดยน้ำหนัก ในขณะที่การสลายตัวของของผสมที่ได้จากการทดลองอยู่ที่ร้อยละ 57.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งเห็นได้ว่าน้ำหนักของแข็งที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าน้ำหนักของแข็งที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งอาจเกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของโอลิโกเมอร์หรือมอนอเมอร์ ของสารประกอบที่เกิดจากการสลายตัวของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน กลายเป็นสารโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้น เช่น การเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนินโดยเกิดการรวมตัวของสารประกอบอะโรมาติกที่มีวงอะโรมาติก 1 วง (single aromatic ring) รวมตัวเป็นสารประกอบอะโรมาติกที่มีวงอะโรมาติกมากกว่า 1 วง (multiple aromatic ring) ซึ่งเกิดขึ้นในวัฏภาคของแข็ง กลายเป็นสารประกอบพอลิไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (polycyclic aromatic hydrocarbons; PAHs) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของการเกิดถ่านชาร์ขึ้น ซึ่งปฏิกิริยาก็เกิดที่อุณหภูมิ ตั้งแต่ 400 องศาเซลเซียสขึ้นไป (Nakamura *et al.*, 2008) เป็นต้น ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ทำให้น้ำหนักของแข็งที่ได้จากการทดลองมีค่ามากกว่าน้ำหนักของแข็งที่ได้จากการคำนวณ อย่างไรก็ตาม แสดงให้เห็นว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก เกิดการส่งเสริมซึ่งกันและกัน (synergy) ทั้งในแง่ผลบวกและผลลบ ทำให้ของผสมเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น ที่อุณหภูมิ 350-520 องศาเซลเซียส และสลายตัวลดลงในช่วงอุณหภูมิ 521-800 องศาเซลเซียส

3. ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส

การไพโรไลซิสชีวมวลเป็นที่ทราบกันคืออยู่แล้วว่า อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุดสำหรับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ โดยในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้แบ่งได้เป็นสามส่วนด้วยกันได้แก่ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งหรือถ่านชาร์ ของเหลวหรือน้ำมันชีวมวล และแก๊ส โดยที่ ของแข็ง หมายถึง ของแข็งที่เหลือหลังจากการไพโรไลซิสชีวมวล ในส่วนของเหลว หมายถึง ของเหลวที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ส่วนคือ ส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้ (aqueous phase) และส่วนที่เป็นน้ำมัน ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส หมายถึง ไอของกระบวนการไพโรไล-

ซิส (pyrolysis vapors) ที่ไม่สามารถควบแน่นได้ สำหรับช่วงของอุณหภูมิที่ศึกษาอยู่ในช่วง 350-450 องศาเซลเซียส



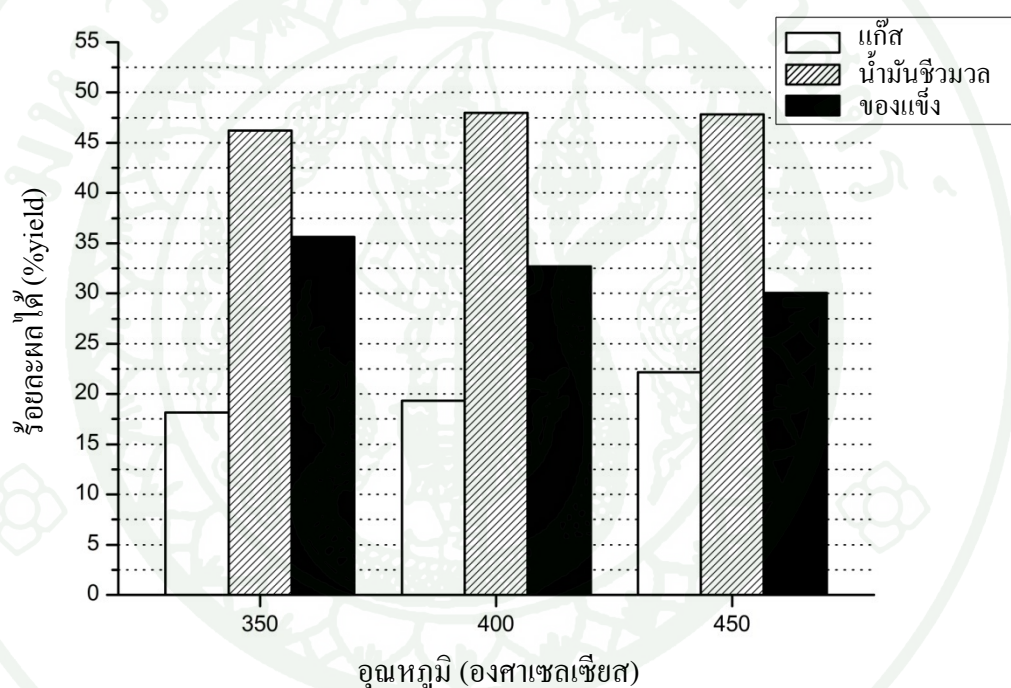
ภาพที่ 18 ผลของการสลายตัวทางความร้อนของของผสมระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการทดลองและการคำนวณ

3.1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

การไพโรไลซิสซังข้าวโพดที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในภาพที่ 19 ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละผลได้ของแก๊สมากขึ้น ร้อยละผลได้ของของแข็งน้อยลง ในขณะที่ร้อยละผลได้ของของเหลวมากขึ้นจนถึง 400 องศาเซลเซียส และน้อยลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 450 องศาเซลเซียส โดยร้อยละผลได้ของของแข็ง ของเหลว และแก๊สอยู่ในช่วง 18.1-22.1, 46.2-48.0 และ 30.0-35.6 ตามลำดับ โดยที่ร้อยละผลได้ของของเหลวสูงสุดอยู่ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีร้อยละผลได้ 48.0 โดยน้ำหนัก

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันอาจอธิบายได้เป็นสองส่วนด้วยกันโดยในส่วนแรกนั้น อุณหภูมิ 350-400 องศาเซลเซียส สาเหตุที่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นร้อยละผลได้ของแก๊สมากขึ้น เนื่องมาจากการที่ซังข้าวโพดเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น (เกิดการสลายตัวอย่างรวดเร็วใน

ช่วงนี้) ทำให้ได้ไอน้ำที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสมากขึ้น (pyrolysis vapors) และเกิดปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary reaction) ได้มากขึ้นด้วย ซึ่งไอน้ำส่วนใหญ่เป็นไอน้ำที่สามารถควบแน่นได้ง่าย (condensable pyrolysis vapors) เป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์ของแก๊สและของเหลวมากขึ้น และทำให้ของแข็งที่เหลืออยู่ (solid residue) มีปริมาณน้อยลง สำหรับในส่วนช่วงที่สองนั้น อุณหภูมิ 400-450 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นปริมาณของของเหลวที่ได้ลดลงทั้งนี้เกิดขึ้นมาจากการเกิด ปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary reaction) ของไอน้ำที่สามารถควบแน่นได้กับสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (Heo *et al.*, 2010) ทำให้ร้อยละผลได้ของของเหลวและของแข็งลดลง ในขณะที่แก๊สมีปริมาณมากขึ้น

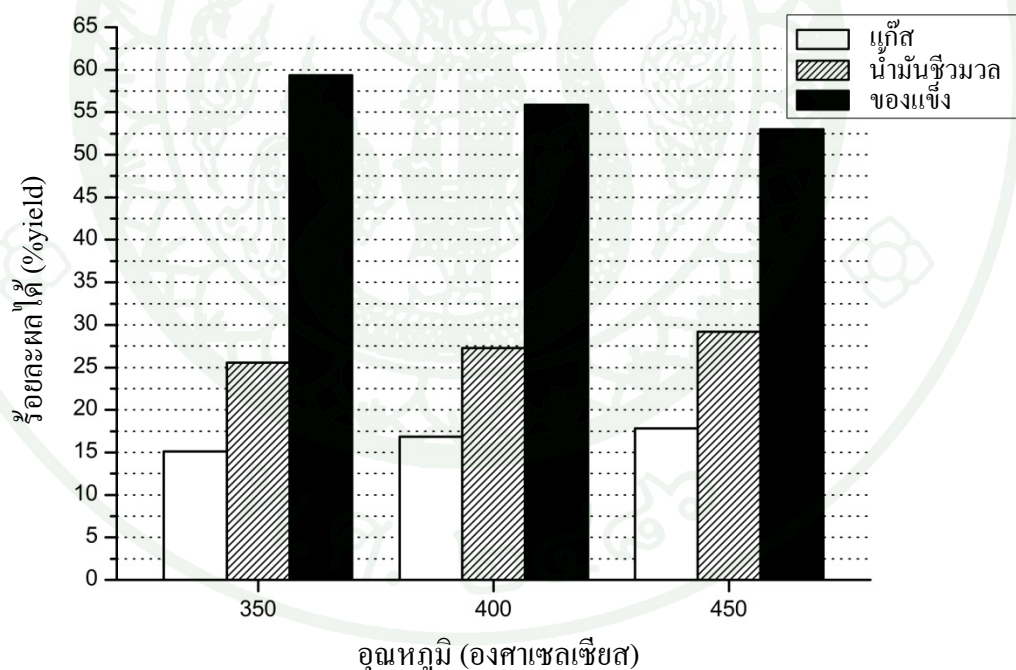


ภาพที่ 19 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของซังข้าวโพดจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส

แนวโน้มของร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ทดลองได้นั้นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ioannidou *et al.* (2009) และ Demiral *et al.* (2012) โดย Demiral *et al.* (2012) ได้ทำการไพโรไลซิสซังข้าวโพด (พันธุ์ *Zea mays L.*) และศึกษาผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจาก 400 เป็น 500 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลวเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดต่ำลง และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิจาก 500 เป็น 550 องศาเซลเซียส ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและของแข็งลดลง ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สสูงขึ้น

3.2 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสมูลวัว

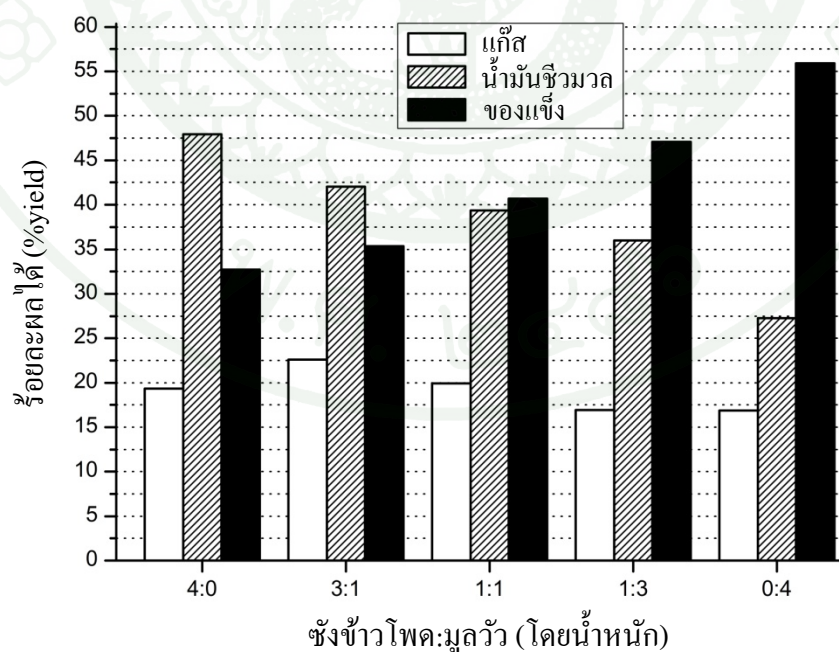
ภาพที่ 20 แสดงการไพโรไลซิสมูลวัวที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลวสูงขึ้น ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดลง โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 350 เป็น 450 องศาเซลเซียส ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวสูงขึ้นจาก 25.5 เป็น 29.2 โดยน้ำหนัก เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ดีขึ้น รวมถึงทำให้ชีวมวลเกิดการสลายตัวได้มากขึ้น ของแข็งที่เหลือจึงมีปริมาณลดลง นอกจากนี้หากเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นกว่านี้ ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากยิ่งขึ้น เนื่องมาจากการเกิดกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส (gasification) และการเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary reaction) ของไอที่ได้จากการไพโรไลซิส (Dominguez *et al.*, 2003, 2006) แนวโน้มร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสมูลวัวที่อุณหภูมิต่างๆ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการไพโรไลซิสมูลหมู (Xiu *et al.*, 2010) และการไพโรไลซิสมูลไก่ (Kim *et al.*, 2009)



ภาพที่ 20 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของมูลวัวจากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส

3.3. ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสร่วมมูลวัวและขี้ข้าวโพด

การไพโรไลซิสร่วมระหว่างมูลวัวและขี้ข้าวโพดที่อัตราส่วนของขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 21) พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของมูลวัวมากขึ้นทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (bio-oil) และแก๊ส น้อยลง ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง (char) มากขึ้น โดยที่อัตราส่วนของขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวอยู่ที่ 39.4 โดยน้ำหนัก แต่หากเพิ่มอัตราส่วนของมูลวัวมากขึ้นเป็น 1:3 โดยน้ำหนัก พบว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวน้อยลง (ร้อยละ 36.0 โดยน้ำหนัก) ในทางกลับกันหากเพิ่มปริมาณอัตราส่วนของขี้ข้าวโพดมากขึ้นเป็น 3:1 โดยน้ำหนัก พบว่าร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากขึ้น (ร้อยละ 42.0 โดยน้ำหนัก) โดยที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากที่สุดอยู่ที่ 42.0 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ดังแสดงในภาพที่ 21 การไพโรไลซิสขี้ข้าวโพดผสมมูลวัวให้ผลที่สอดคล้องเช่นเดียวกับการไพโรไลซิส ระหว่างต้นสนกับมูลไก่ (Mante and Agblevor, 2010) คือ เมื่ออัตราส่วนของต้นสนต่อมูลไก่ มากขึ้นจาก 1:3 เป็น 3:1 โดยน้ำหนัก ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มขึ้น ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดลง

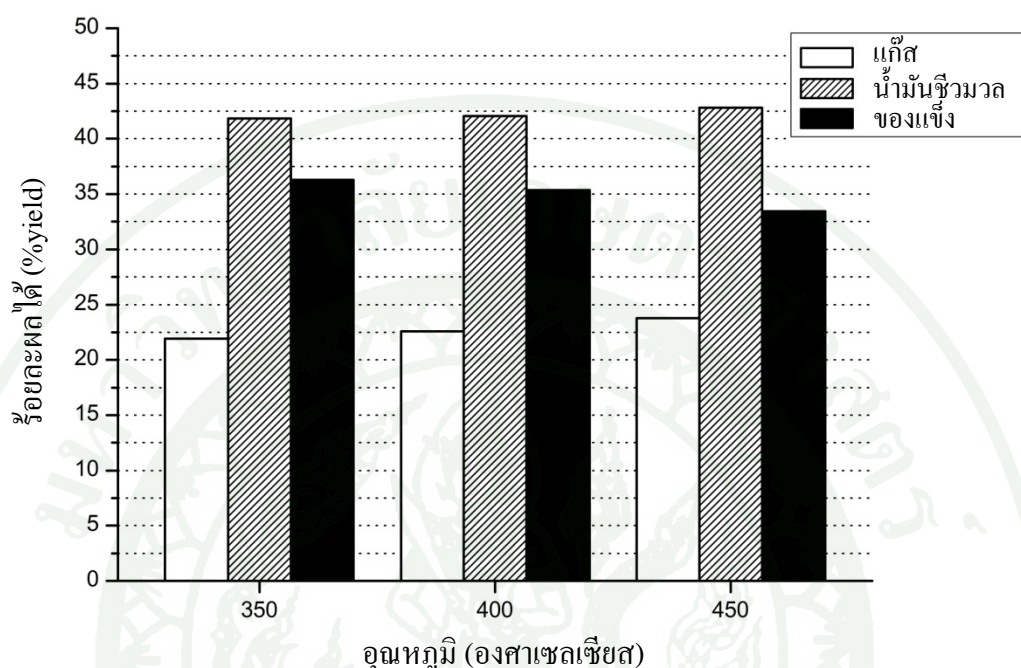


ภาพที่ 21 ผลของอัตราส่วนต่อร้อยละผลได้ของของผสมขี้ข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ภาพที่ 22 แสดงผลของอุณหภูมิของการไฟโรไลซิสระหว่างช่วงช่วงข้าวโพดต่อมูลวัว ที่อัตราส่วนช่วงข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก (เนื่องจากที่อัตราส่วนนี้ให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากที่สุด) โดยพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว (น้ำมันชีวมวล) มีปริมาณมากขึ้น จากร้อยละ 41.8 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นร้อยละ 42.0 โดยน้ำหนัก เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 400 องศาเซลเซียส และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 450 องศาเซลเซียส ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 42.8 โดยน้ำหนัก เห็นได้ว่าการเพิ่มขึ้นของผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นนั้น เป็นการเพิ่มในปริมาณที่น้อย (ไม่เกินร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) ในขณะที่ต้องใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 50 องศาเซลเซียส ดังนั้นการไฟโรไลซิสระหว่างช่วงข้าวโพดและมูลวัว ไม่ควรไฟโรไลซิสที่อุณหภูมิสูงมากกว่า 400 องศาเซลเซียส เนื่องจากไม่คุ้มกับค่าใช้จ่ายในการเพิ่มอุณหภูมิถึง 50 องศาเซลเซียส แต่ได้ผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มขึ้นไม่ถึงร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ในส่วนของผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สนั้นพบว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สสูงขึ้น ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งน้อยลง เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิทำให้ของแข็งเกิดการสลายตัวมากขึ้นรวมถึงเกิดปฏิกิริยาของไอน้ำที่ได้จากการไฟโรไลซิสมากขึ้น ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลวมากขึ้น ในขณะที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งน้อยลง และเมื่อพิจารณารูปการสลายตัวทางความร้อนของช่วงข้าวโพด มูลวัว และของผสมของช่วงข้าวโพดและมูลวัว พบว่าการสลายตัวสูงสุดเกิดขึ้นที่ประมาณอุณหภูมิ 340 องศาเซลเซียส และควรเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นกว่า 350 องศาเซลเซียส เนื่องจากยังอยู่ในช่วงของการสลายตัวอย่างรวดเร็วอยู่ (ช่วงที่ 2) ดังนั้นการไฟโรไลซิสควรเลือกใช้ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของการไฟโรไลซิสของของผสมมูลวัวและช่วงข้าวโพดที่ได้จากการทดลอง แล้วพบว่า มีความแตกต่างจากร้อยละผลได้ที่ได้จากการคำนวณ ดังภาพที่ 23 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่ได้จากการคำนวณที่อัตราส่วนช่วงข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก มีค่า 38.5, 44.3 และ 50.1 ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งที่ได้จากการทดลองมีค่า 35.6, 40.7 และ 47.1 ตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สที่ได้จากการทดลองที่อัตราส่วนช่วงข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก มีค่า 42.0, 39.4 และ 36.0 ตามลำดับ สำหรับของเหลว และ 22.6, 20.0 และ 17.0 ตามลำดับ สำหรับแก๊ส แต่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สที่ได้จากการคำนวณมีค่า 42.8, 37.6 และ 32.4 ตามลำดับ สำหรับกรณีของเหลว และ 18.7, 18.1 และ 17.5 ตามลำดับ สำหรับกรณีแก๊ส แสดงให้เห็นว่า การผสมมูลวัวกับช่วงข้าวโพดเข้าด้วยกัน ส่งผลต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไฟโรไลซิสรวม

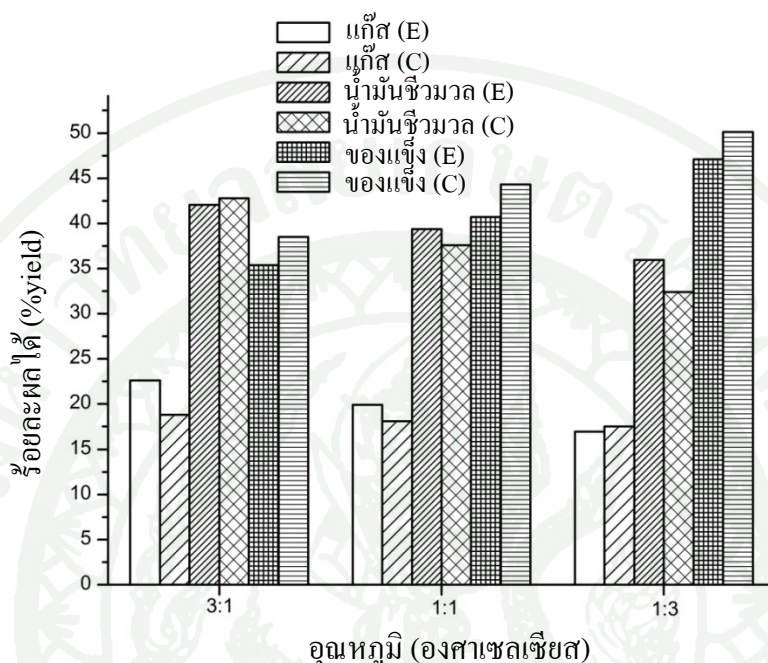
โดยทำให้ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งลดลง ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและแก๊สขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของผสม



ภาพที่ 22 ผลของอุณหภูมิต่อร้อยละผลได้ของอัตราส่วนระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก จากการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส

ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน (% of synergistic effect) ที่คำนวณได้จากภาคผนวก ข แสดงดังภาพที่ 24 ซึ่งเห็นได้ว่าการไพโรไลซิสร่วมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน มีผลเป็นบวก (positive effect) สำหรับกรณีผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งและของเหลว (น้ำมันชีวมวล) มีผลเป็นลบ (negative effect) หมายความว่า การใส่มูลวัวผสมเข้ากับซังข้าวโพด ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สมากขึ้น ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและของแข็งน้อยลง เมื่อเทียบกับการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่ไม่มีการผสมกัน สำหรับกรณีการไพโรไลซิสซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สและของเหลว ให้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันที่เป็นบวก ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งให้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันที่เป็นลบ และกรณีอัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก พบว่าผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวให้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันที่เป็นบวก ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งและแก๊สให้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันที่เป็นลบ จากร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันทั้ง 3 อัตราส่วนพบว่า ที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันดีที่สุด เนื่องจากสามารถให้ร้อยละของผล

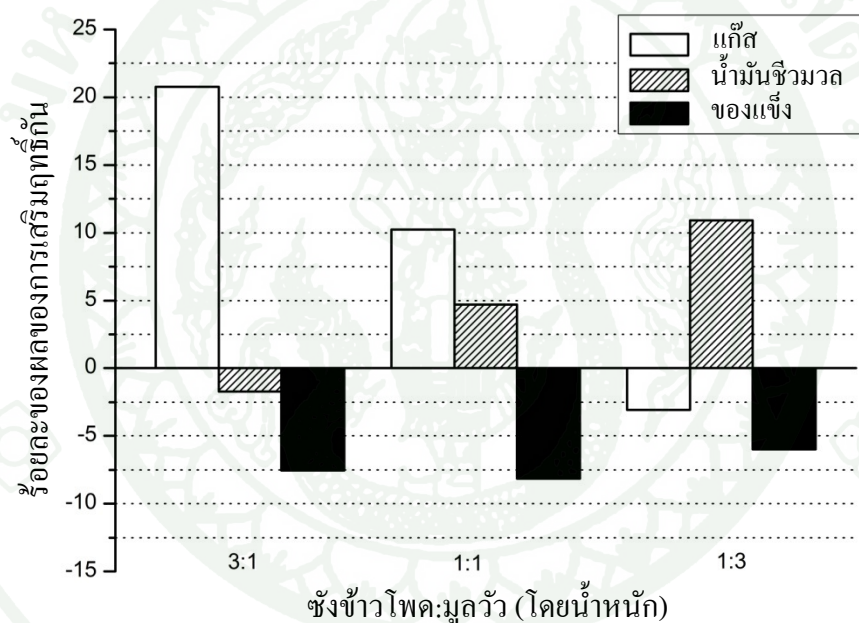
ของการเสริมฤทธิ์กันที่เป็นบวก ในกรณีของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และให้ผลที่เป็นลบในกรณีของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งและแก๊ส เพราะว่าผลิตภัณฑ์ที่ต้องการมากที่สุด คือ ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวหรือน้ำมันชีวมวล



ภาพที่ 23 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลองเปรียบเทียบกับร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณ โดย E = การทดลอง และ C = การคำนวณ

ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สเป็นบวกน้อยลงเมื่ออัตราส่วนของมูลวูเพิ่มมากขึ้น อาจเกิดขึ้นได้จาก ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สน้อยลงในปฏิกิริยาปฐมภูมิ (primary reaction) หรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาปฐมภูมิ เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิ (secondary reaction) ในวัฏภาคแก๊สและของเหลว และ (หรือ) วัฏภาคแก๊สและของแข็ง กลายเป็นของเหลว และ (หรือ) ของแข็ง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สน้อยลง เช่น อาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชันของแก๊สไฮโดรเจนกับสารประกอบอินทรีย์ไม่อิ่มตัว (unsaturated organic compound) เป็นสารประกอบอินทรีย์อิ่มตัว (saturated organic compound) เช่น ปฏิกิริยาของสารประกอบแอลดีไฮด์กับแก๊สไฮโดรเจน เป็นสารประกอบแอลกอฮอล์ หรือปฏิกิริยาไฮโดรฟอร์มมิลเลชัน (hydroformylation) เช่น การเกิดกรดอะคริลิก (acrylic acid) จากการทำปฏิกิริยาของคาร์บอนมอนอกไซด์ น้ำ และอะเซทิลีน (acetylene) เป็นต้น ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ทำให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สลดลง ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการที่ได้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มมากขึ้น (เป็นบวกมากขึ้น) ในขณะที่ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์

กันของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีค่าเป็นลบ โดยที่อัตราส่วนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก มีการลดลงของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมากที่สุด ตามมาด้วย อัตราส่วนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเทคนิค TGA ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ซึ่งที่อัตราส่วนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก มีการสลายตัวทางความร้อนมากที่สุด รองลงมา คือ อัตราส่วนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 3 อัตราส่วนนี้มีการสลายตัวทางความร้อนมากกว่าการสลายตัวทางความร้อนที่ได้จากการคำนวณ ทำให้ของแข็งที่เหลืออยู่มีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการคำนวณ ทำให้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งมีค่าเป็นลบ



ภาพที่ 24 ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของการผสมกันของขี้ข้าวโพดและมูลวัวต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อนำไปใช้ในการไพโรไลซิสรวม

5. วิเคราะห์สมบัติของน้ำมันชีวมวล

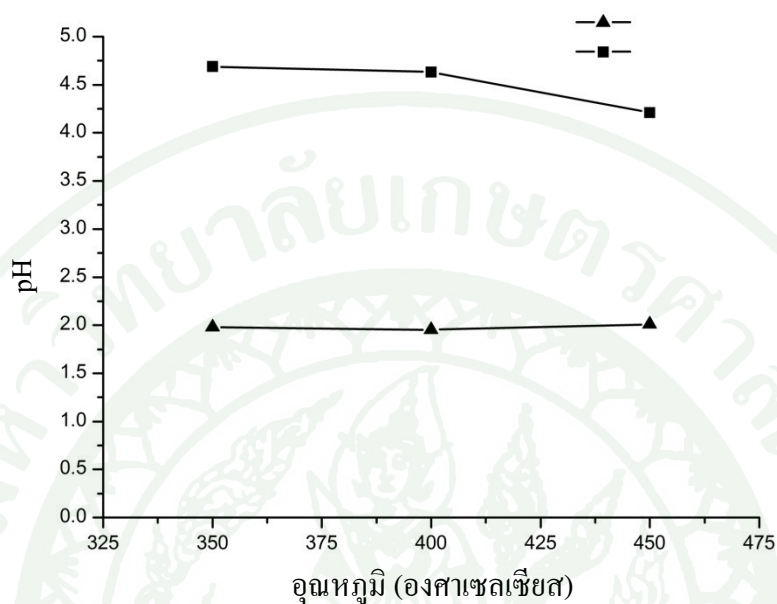
5.1 ค่า pH

ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสขี้ข้าวโพดและมูลวัวที่อุณหภูมิต่างๆ แสดงในภาพที่ 25 พบว่าค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสขี้ข้าวโพดที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีค่า pH ใกล้เคียงกันโดยที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

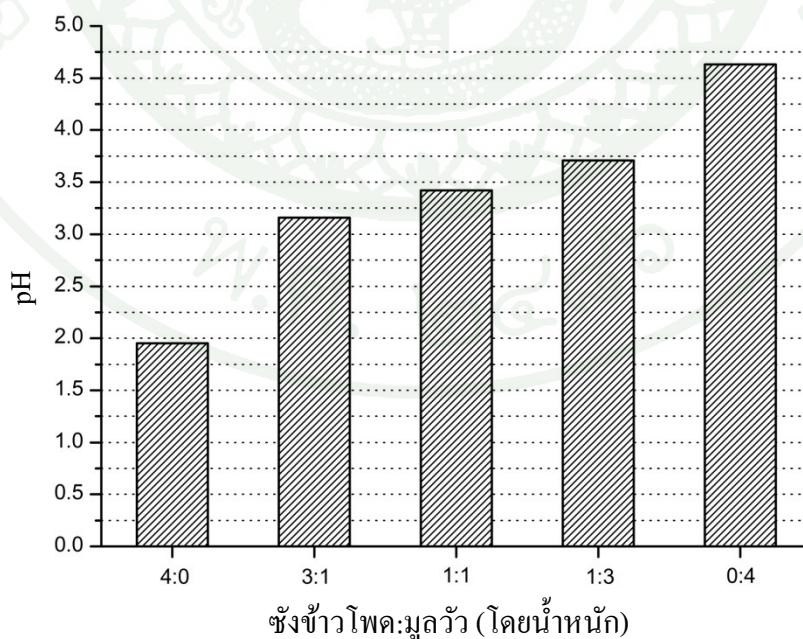
มีค่า pH 1.98 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่า pH 1.95 และที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส มีค่า pH 2.01 ซึ่งอาจเกิดขึ้นจาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิของสารต่างๆ เกิดขึ้น ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดมากขึ้น เช่น การเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิของเซลลูโลส ได้สารประกอบที่เป็นสารประกอบแอลดีไฮด์ คีโตน และฟิวแรนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสารเหล่านี้ทำให้น้ำมันชีวมวลมีค่า pH ต่ำลง อย่างไรก็ตามพบว่าน้ำมันชีวมวลของซังข้าวโพด มีค่า pH เปลี่ยนแปลงไม่มากนักเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งอาจเกิดจาก การที่น้ำมันชีวมวลของซังข้าวโพดมีค่า pH ต่ำมากอยู่แล้ว ซึ่งการลด pH ของน้ำมันให้ต่ำลงมากกว่านี้ ต้องใช้ปริมาณของกรดในปริมาณที่มาก ทำให้น้ำมันชีวมวลมีค่า pH เปลี่ยนแปลงไม่มากนัก ในขณะที่ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัวที่อุณหภูมิ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส มีค่า pH ลดลง (มีค่าความเป็นกรดมากขึ้น) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส มีค่า pH 4.69 และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่า pH มีค่าลดลง โดยที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส มีค่า pH 4.63 และ 4.21 ตามลำดับ ซึ่งการที่อุณหภูมิสูงขึ้นทำให้ได้ค่า pH ต่ำลง อาจเกิดจากปฏิกิริยาทุติยภูมิของเซลลูโลส ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดมากขึ้น ซึ่งน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัวมีค่า pH สูงอยู่แล้ว การที่ได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นกรดเพิ่มขึ้นก็ทำให้ pH มีค่าต่ำลงได้ง่าย ซึ่งเป็นสาเหตุให้น้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัวมีค่า pH ต่ำลง เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกเหนือจากนี้เห็นได้ว่าน้ำมันชีวมวลจากซังข้าวโพดมีค่าความเป็นกรดสูงมาก เมื่อเทียบกับน้ำมันชีวมวลจากมูลวัว

ในขณะที่ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดผสมมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 26 พบว่า เมื่ออัตราส่วนของมูลวัวเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลมีค่าสูงขึ้น (มีค่าความเป็นกรดต่ำลง) โดยที่อัตราส่วนซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก มีค่า pH 3.16 และเมื่ออัตราส่วนซังข้าวโพดและมูลวัวเป็น 1:3 โดยน้ำหนัก ค่า pH มีค่าสูงขึ้นเป็น 3.71 การที่สัดส่วนของมูลวัวมากขึ้นทำให้ค่า pH มีค่าสูงขึ้นนั้นเกิดจาก ในมูลวัวมีองค์ประกอบของธาตุไนโตรเจนมาก (ดังตารางที่ 5) ซึ่งเมื่อเกิดการไพโรไลซิสมูลวัวทำให้เกิดสารประกอบของไนโตรเจนขึ้น (nitrogenous compounds) ซึ่งสารประกอบไนโตรเจนเหล่านี้มีความเป็นเบส ทำให้ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้มีค่าสูงขึ้น ในขณะที่ซังข้าวโพดมีองค์ประกอบของไนโตรเจนน้อย ทำให้ไม่มีสารประกอบของไนโตรเจนเกิดขึ้นหรืออาจเกิดขึ้นน้อย ทำให้ค่า pH มีค่าต่ำกว่าของมูลวัว ดังนั้นเห็นได้ว่าการเพิ่มมูลวัวเข้าไปเป็นส่วนผสมของชีวมวลนั้นทำให้ค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวมวลลดลง (เป็นเบสมากขึ้น) ซึ่งทำให้คุณภาพของน้ำมันชีวมวลที่ได้มีคุณภาพดีขึ้น และหากนำไปใช้งาน น้ำมันที่ได้ช่วยทำให้เครื่องยนต์หรืออุปกรณ์ต่างๆ มีอายุการใช้งานนานขึ้น ดังภาพที่ 27 ซึ่งแสดงความสัม-

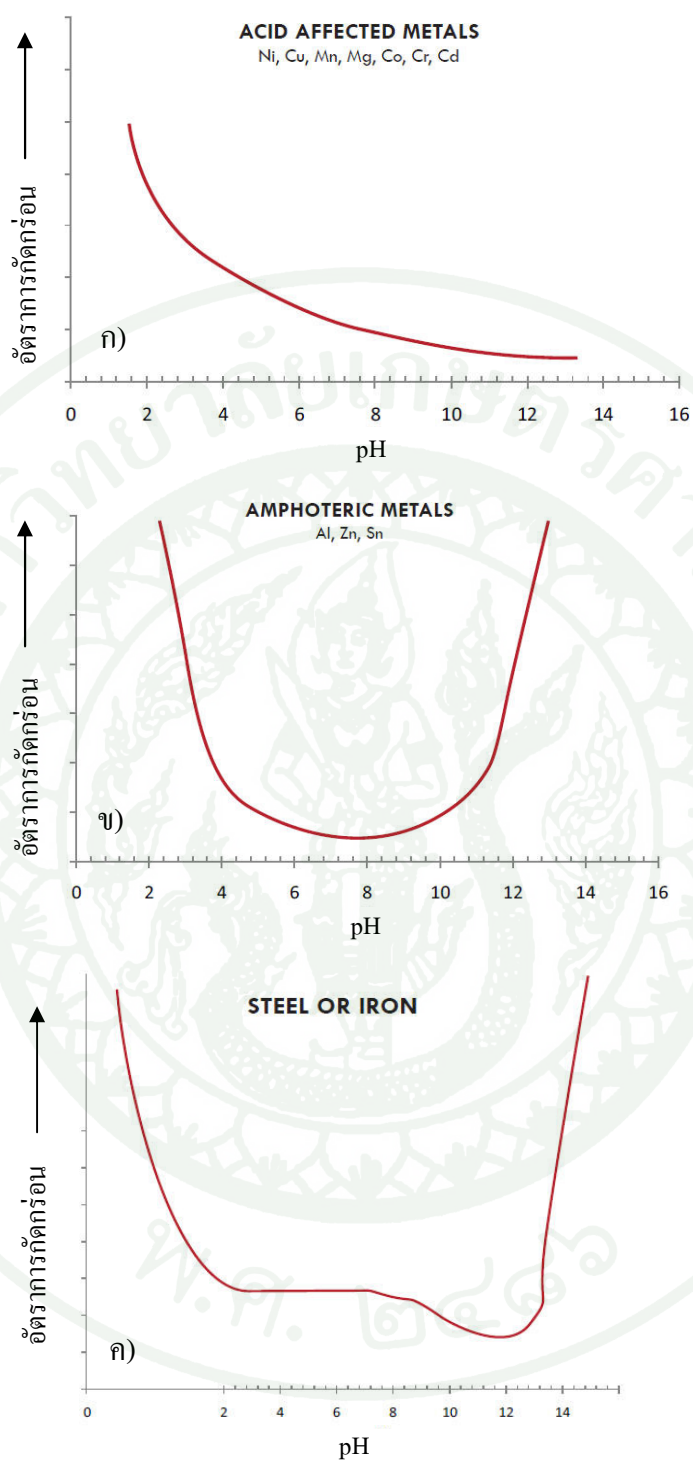
พันธ์ระหว่างค่า pH กับ อัตราการกัดกร่อน (corrosion rate) ของโลหะแต่ละชนิด พบว่า ค่า pH มากขึ้น ทำให้อัตราการกัดกร่อนต่ำลง ซึ่งช่วยให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ต่างๆ มากขึ้น



ภาพที่ 25 ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อุณหภูมิ 350, 400, และ 450 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 26 ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดผสมมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



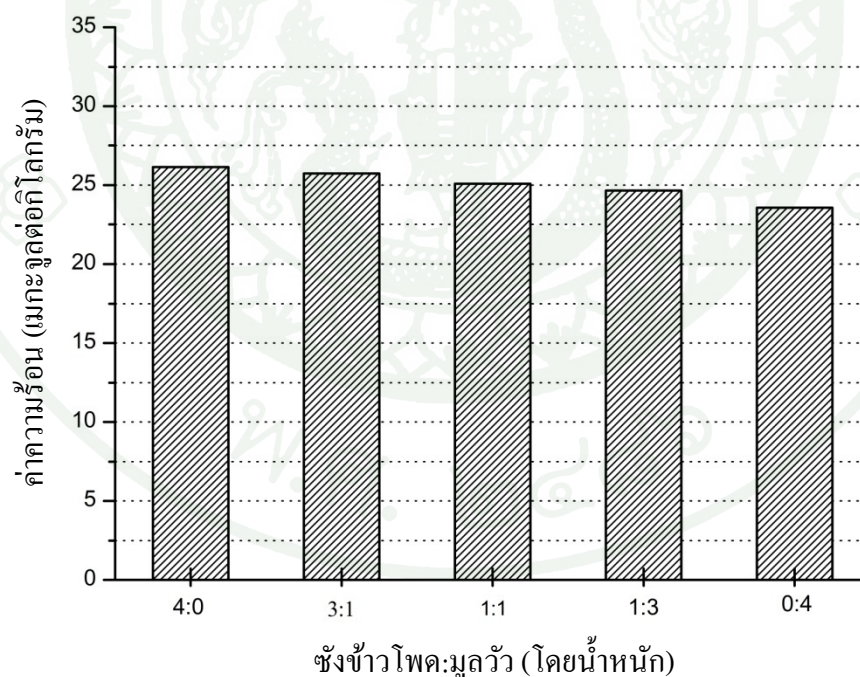
ภาพที่ 27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH กับค่าความกัดกร่อนของโลหะชนิดต่างๆ ก) acid-soluble metal (Ni, Cu, Mn, Mg, Co, Cr and Cd) ข) amphoteric metal (Al, Zn and Sn) ค) steel or iron

ที่มา: Noblecompany (n.d.)

5.2 ค่าความร้อน (calorific value)

ภาพที่ 28 แสดงค่าความร้อนของน้ำมันชีวมวลของชังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก เห็นได้ว่าความร้อนของชังข้าวโพดมีค่า 26.2 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ในขณะที่มูลวัวมีค่าความร้อน 24.0 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งน้อยกว่าค่าความร้อนของชังข้าวโพด เนื่องจากมูลวัวมีปริมาณออกซิเจนอยู่ในปริมาณมาก (ตารางที่ 5) ซึ่งการที่มีปริมาณของออกซิเจนมากเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ได้ค่าความร้อนที่ต่ำลง (Qiang *et al.*, 2009)

อย่างไรก็ตามเมื่อผสมมูลวัวเข้ากับชังข้าวโพด น้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสมีค่าความร้อนลดลงเมื่อเทียบกับน้ำมันชีวมวลจากชังข้าวโพด โดยที่อัตราส่วนชังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อน 25.8, 25.1 และ 24.7 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลของการเพิ่มมูลวัวเป็นวัตถุดิบร่วมกับชังข้าวโพด ทำให้ได้ค่าความร้อนลดลง



ภาพที่ 28 ค่าความร้อนของน้ำมันชีวมวลที่อัตราส่วนชังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0, 3:1, 1:1, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

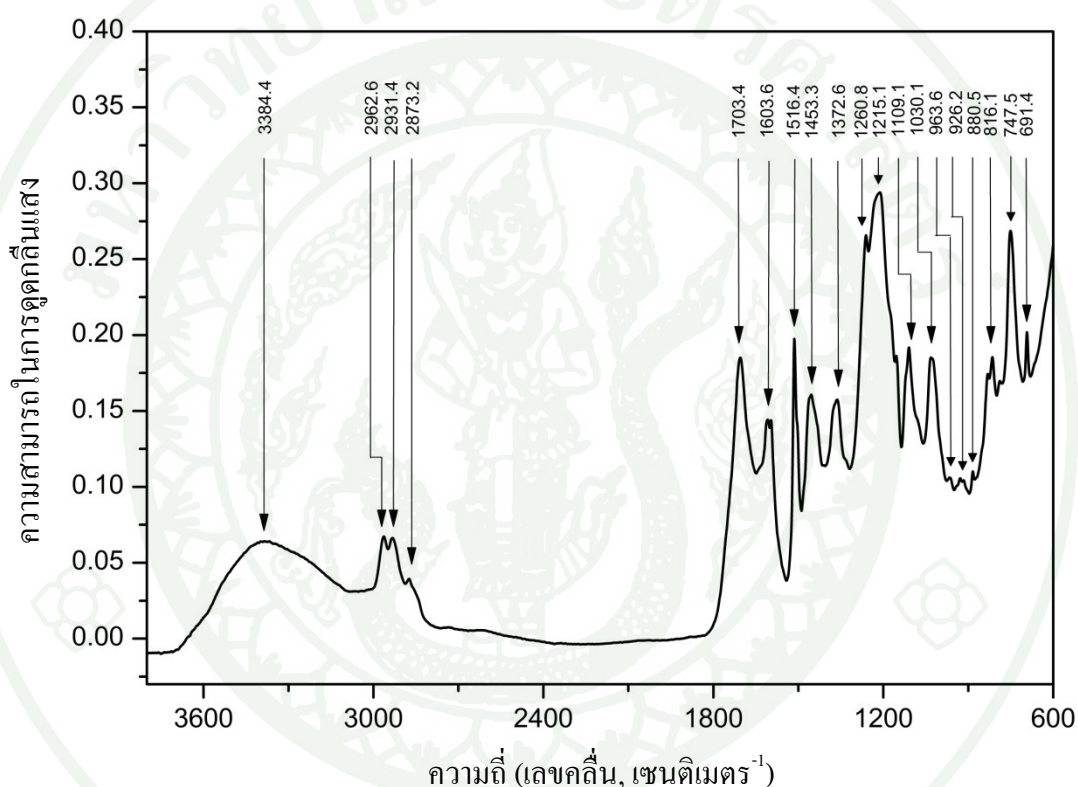
6. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวล

นำน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด น้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัว และน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มาวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (functional groups) ด้วยเครื่อง fourier transform infrared spectrophotometer (FT-IR) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้

6.1 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

ภาพที่ 29 แสดงอินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด พบว่าที่ย่านความถี่ 1703.4 เซนติเมตร⁻¹ เป็นพีคที่มีความเข้มข้นสูง ซึ่งตรงกับค่าของการสั่นของพันธะ C=O แบบยืด (C=O stretching) ซึ่งเป็นพีคที่ความถี่สูงเกิดในย่านความถี่ในช่วง 1680-1780 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทกรดคาร์บอกซิลิก คีโตน และแอลดีไฮด์ (Demiral *et al.*, 2012) และเมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 3384.4 เซนติเมตร⁻¹ มีลักษณะเป็นพีคกว้างที่มีความเข้มข้นปานกลาง ซึ่งตรงกับค่าของการสั่นของพันธะ O-H แบบยืด (O-H stretching) ที่ย่านความถี่ 3200-3600 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลกอฮอล์ และฟีนอล การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำมันที่ย่านความถี่ 2800-3000 เซนติเมตร⁻¹ ตรงกับค่าของการสั่นของพันธะ C-H แบบยืด (C-H stretching) และพบการสั่นของพันธะ C-H แบบงอ (C-H bending) ที่ย่านความถี่ 1375 และ 1450 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภท แอลเคน (alkane) สำหรับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำมันที่ย่านความถี่ 1500-1630 เซนติเมตร⁻¹ ตรงกับค่าของการสั่นของพันธะ C=C แบบยืด (C=C stretching) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภท แอลคีน (alkene) และอะโรมาติก (aromatic) โดยเฉพาะวงเบนซีน (benzene ring) นอกเหนือจากนี้ที่ย่านความถี่ 600-900 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-H แบบงอออกนอกระนาบ (C-H out of plane bending) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีนและอะโรมาติก (วงเบนซีน) โดยที่สามารถจำแนกรายละเอียดที่ย่านความถี่ 600-990 เซนติเมตร⁻¹ ได้ดังนี้ ความถี่ 691.4 เซนติเมตร⁻¹ แสดงแอลคีนที่มีหมู่แทนที่ 2 หมู่ (cis) ความถี่ 747.5 เซนติเมตร⁻¹ แสดงวงเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ 1 หรือ 2 หมู่ (ออโท) ความถี่ 816.1 เซนติเมตร⁻¹ แสดงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีนที่มีหมู่แทนที่ 3 หมู่ ($R_2C=CHR$) ความถี่ 880.5 เซนติเมตร⁻¹ แสดงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีนที่มีหมู่แทนที่ 2 หมู่ ($R_2C=CH_2$) ความถี่ 926.2 เซนติเมตร⁻¹ แสดงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีนที่มีหมู่แทนที่ 1 หมู่ ($RCH=CH_2$) ความถี่ 963.6 เซนติเมตร⁻¹ แสดงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีน (trans) อย่างไรก็ตามที่ย่านความถี่ 800-850 เซนติเมตร⁻¹ ยังแสดงหมู่ฟังก์ชันประเภทอะโรมาติก (วงเบนซีน) ที่มีหมู่แทนที่

แบบพารา ที่ย่านความถี่ 690, 780 และ 880 cm^{-1} ยังแสดงหมู่ฟังก์ชันประเภทอะโรมาติก (วงเบนซีน) ที่มีหมู่แทนที่ 2 หมู่ แบบเมตา และเมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 1000-1300 cm^{-1} พบว่ามีลักษณะการสั่นของพันธะ C-O แบบยืด (C-O stretching) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทอีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และแอลกอฮอล์ประเภท แอลกอฮอล์ปฐมภูมิ (primary alcohol) แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ (secondary alcohol) และแอลกอฮอล์ตติยภูมิ (tertiary alcohol) (Demiral *et al.*, 2012) ซึ่งสามารถสรุปหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดได้ดังตารางที่ 6



ภาพที่ 29 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

เมื่อพิจารณากราฟอินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด พบว่า น้ำมันชีวมวลประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลกอฮอล์ ฟีนอล แอลคีน แอลเคน คีโตน แอลดีไฮด์ กรดคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์ อีเทอร์ และอะโรมาติก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Cao *et al.* (2004) และ Demiral *et al.* (2012) ที่ทำการหาหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด ซึ่งได้หมู่ฟังก์ชันสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

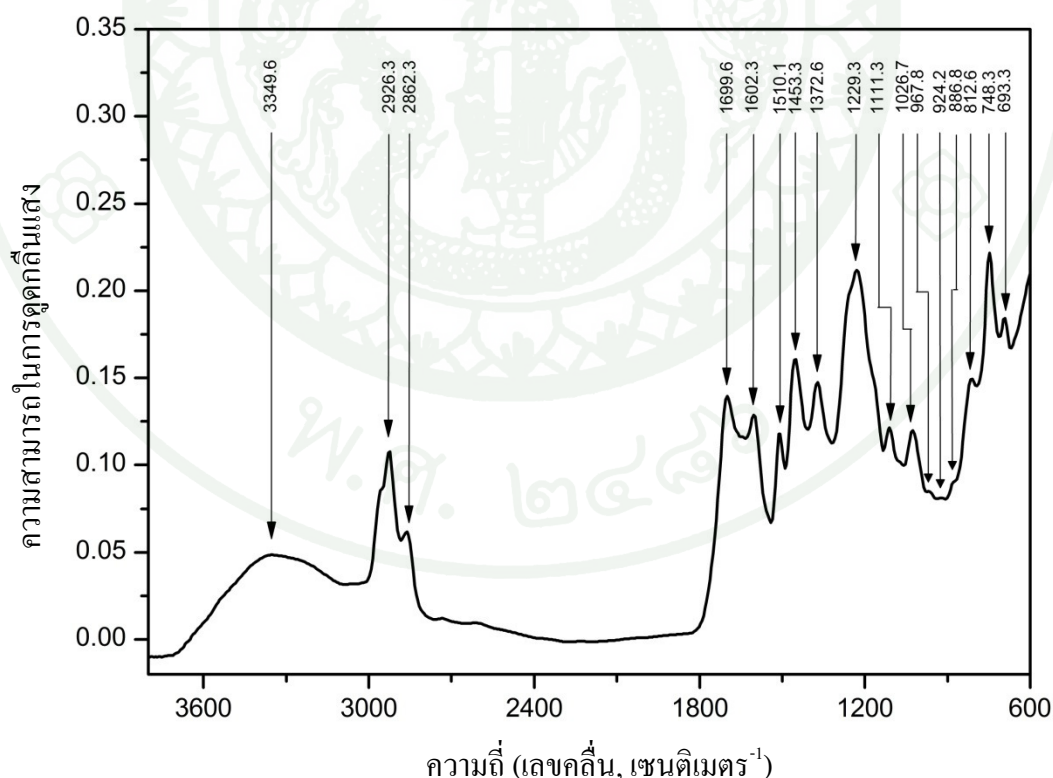
ตารางที่ 6 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซึ่งจำแนกตามความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

ความถี่ (เซนติเมตร ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบที่เป็นไปได้
3384.4	-OH	แอลกอฮอล์และฟีนอล
2962.6, 2931.4 และ 2873.2	-CH, -CH ₂ และ -CH ₃	แอลเคน
1703.4	-C=O	กรดคาร์บอกซิลิก คีโตน และแอลดีไฮด์
1603.6 และ 1516.4	-C=C	แอลคีนและอะโรมาติก
1453.3 และ 1372.6	-CH	แอลเคน
1260.8, 1215.1, 1109.1 และ 1030.1	C-O	อีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และแอลกอฮอล์ประเภทแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ และแอลกอฮอล์ตติยภูมิ
963.6	trans	แอลคีน
926.2	RCH=CH ₂	แอลคีน
880.5	R ₂ C=CH ₂ และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน
816.1	R ₂ C=CHR และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน
747.5	benzene ring	วงเบนซีน
691.4	cis และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน

6.2 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัว

อินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัว แสดงในภาพที่ 30 พบว่าที่ย่านความถี่ 3349.6 เซนติเมตร⁻¹ มีลักษณะเป็นพีคกว้างที่มีความเข้มข้นปานกลาง ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ O-H แบบยืด (O-H stretching) ที่ย่านความถี่ 3200-3600 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลกอฮอล์และฟีนอล นอกเหนือจากนี้ที่ย่านความถี่ 3200-3400 เซนติเมตร⁻¹ ยังตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ N-H แบบยืด (N-H stretching) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทเอไมด์ (amide) สำหรับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำมันที่ย่านความถี่ 2800-3000 เซนติเมตร⁻¹ ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ C-H แบบยืด (C-H stretching) และการสั่น

ของพันธะ C-H แบบงอ (C-H bending) ที่ย่านความถี่ 1375 และ 1450 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลเคนและเอไมด์ ในขณะที่ย่านความถี่ 1699.6 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ C=O แบบยืด (C=O stretching) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภท กรดคาร์บอกซิลิก คีโตน แอลดีไฮด์ และเอไมด์ สำหรับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำมันที่ย่านความถี่ 1500-1630 เซนติเมตร⁻¹ ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ C=C แบบยืด (C=C stretching) รวมถึงความถี่ของการสั่นของพันธะ N-H แบบงอ (N-H bending) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีน อะโรมาติก เอไมด์ และเอมีน (amine) (Xiu *et al.*, 2011) และเมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 1000-1300 เซนติเมตร⁻¹ พบว่ามีลักษณะการสั่นของพันธะ C-O แบบยืด (C-O stretching) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทอีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และแอลกอฮอล์ประเภท แอลกอฮอล์ปฐมภูมิ แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ และแอลกอฮอล์ตติยภูมิ นอกเหนือจากนี้ที่ย่านความถี่ 600-900 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-H แบบงอออกนอกระนาบ (C-H out of plane bending) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีนและอะโรมาติก (วงเบนซีน) อย่างไรก็ตามสามารถสรุปหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันจากการไพโรไลซิสมูลวัวได้ดังตารางที่ 7



ภาพที่ 30 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัว

เมื่อพิจารณากราฟอินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัว พบว่า น้ำมันชีวมวลประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภท แอลกอฮอล์ ฟีนอล แอลคีน แอลเคน คีโตน แอลดีไฮด์ กรดคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์ อีเทอร์ อะโรมาติก (วงเบนซีน) เอมีน และเอไมด์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Xiu *et al.* (2011) ที่ทำการหาหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลหมู ซึ่งได้หมู่ฟังก์ชันสอดคล้องกับงานวิจัยนี้

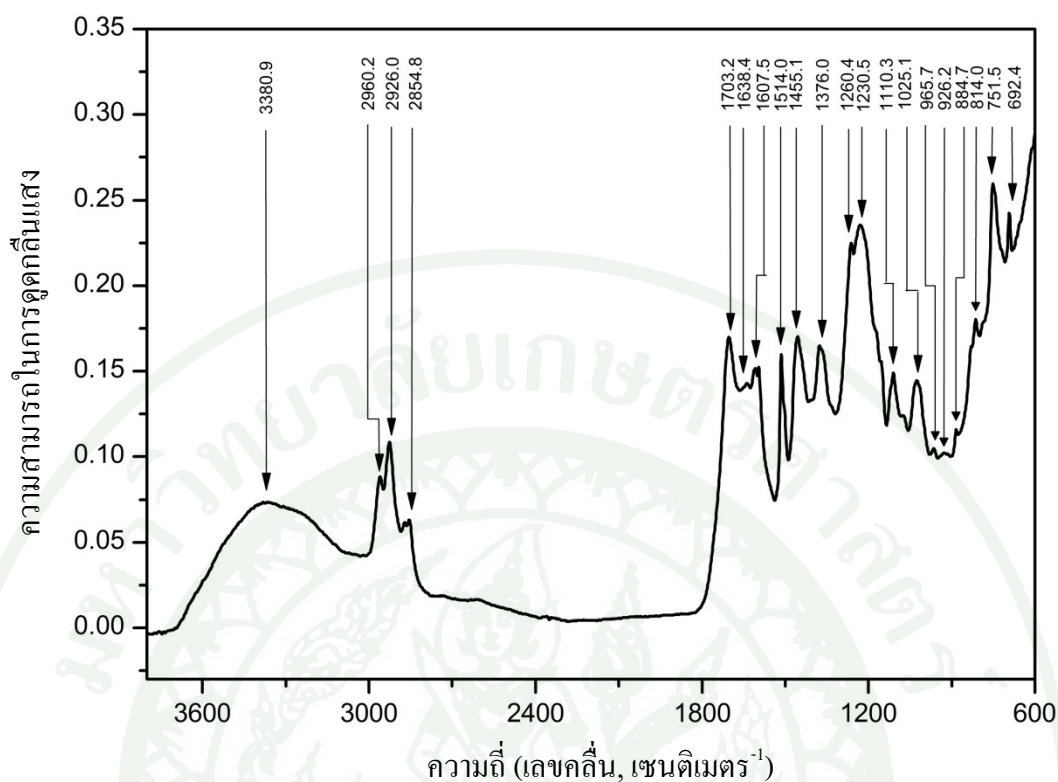
ตารางที่ 7 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัวจำแนกตามความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

ความถี่ (เซนติเมตร ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบที่เป็นไปได้
3349.6	-OH และ N-H	แอลกอฮอล์ ฟีนอล และเอไมด์
2926.3 และ 2862.3	-CH, -CH ₂ และ -CH ₃	แอลเคน
1699.6	-C=O	กรดคาร์บอกซิลิก คีโตน และแอลดีไฮด์
1602.3 และ 1510.1	-C=C และ N-H	แอลคีน อะโรมาติก เอไมด์ และเอมีน
1453.3 และ 1372.6	-CH	แอลเคน
1229.3, 1111.3 และ 1026.7	C-O	อีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และแอลกอฮอล์ประเภทแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ และแอลกอฮอล์ตติยภูมิ
967.8	trans	แอลคีน
924.2	RCH=CH ₂	แอลคีน
886.8	R ₂ C=CH ₂ และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน
812.6	R ₂ C=CHR และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน
748.3	benzene ring	วงเบนซีน
693.3	cis และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน

6.3 การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดต่อ มูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

อินฟราเรดสเปกตรัม ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดต่อมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังภาพที่ 31 เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ต่างๆ พบว่าที่ย่านความถี่ 3380.9 เซนติเมตร⁻¹ มีลักษณะเป็นพีกกว้างที่มีความเข้มข้นปานกลาง ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ O-H แบบยืด (O-H stretching) ที่ย่านความถี่ 3200-3600 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลกอฮอล์และฟีนอล นอกเหนือจากนี้ที่ย่านความถี่ 3200-3400 เซนติเมตร⁻¹ ยังตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ N-H แบบยืด (N-H stretching) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทเอไมด์ สำหรับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำมันที่ย่านความถี่ 2800-3000 เซนติเมตร⁻¹ ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ C-H แบบยืด (C-H stretching) และการสั่นของพันธะ C-H แบบงอ (C-H bending) ที่ย่านความถี่ 1375 และ 1450 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลเคนและเอไมด์ ในขณะที่ย่านความถี่ 1703.2 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ C=O แบบยืด (C=O stretching) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภท กรดคาร์บอกซิลิก คีโตน แอลดีไฮด์ และเอไมด์ สำหรับการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของน้ำมันที่ย่านความถี่ 1500-1630 เซนติเมตร⁻¹ ตรงกับความถี่ของการสั่นของพันธะ C=C แบบยืด (C=C stretching) รวมถึงความถี่ของการสั่นของพันธะ N-H แบบงอ (N-H bending) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีน อะโรมาติก เอไมด์ และเอมีน และเมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 1000-1300 เซนติเมตร⁻¹ พบว่ามีลักษณะการสั่นของพันธะ C-O แบบยืด (C-O stretching) แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทอีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และแอลกอฮอล์ประเภทแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ และแอลกอฮอล์ตติยภูมิ นอกเหนือจากนี้ที่ย่านความถี่ 600-900 เซนติเมตร⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-H แบบงอออกนอกระนาบ (C-H out of plane bending) ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีนและอะโรมาติก (วงเบนซีน) อย่างไรก็ตามสามารถสรุปหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันจากซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ได้ดังตารางที่ 8

เมื่อพิจารณากราฟอินฟราเรดสเปกตรัมของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัว พบว่า น้ำมันชีวมวลประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลกอฮอล์ ฟีนอล แอลคีน แอลเคน คีโตน แอลดีไฮด์ กรดคาร์บอกซิลิก เอสเทอร์ อีเทอร์ อะโรมาติก (วงเบนซีน) เอมีน และเอไมด์



ภาพที่ 31 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวพลจากไพโรไลซิสของผสมขังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 8 หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวพลจากไพโรไลซิสขังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก จำแนกตามความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

ความถี่ (เซนติเมตร ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบที่เป็นไปได้
3380.9	-OH และ N-H	แอลกอฮอล์ ฟีนอล และเอไมด์
2960.2, 2926.0 และ 2854.8	-CH, -CH ₂ และ -CH ₃	แอลเคน
1703.2	-C=O	กรดคาร์บอกซิลิก คีโตน และแอลดีไฮด์
1638.4, 1607.5 และ 1514.0	-C=C และ N-H	แอลคีน อะโรมาติก เอไมด์ และเอมีน
1455.1 และ 1376.0	-CH	แอลเคน

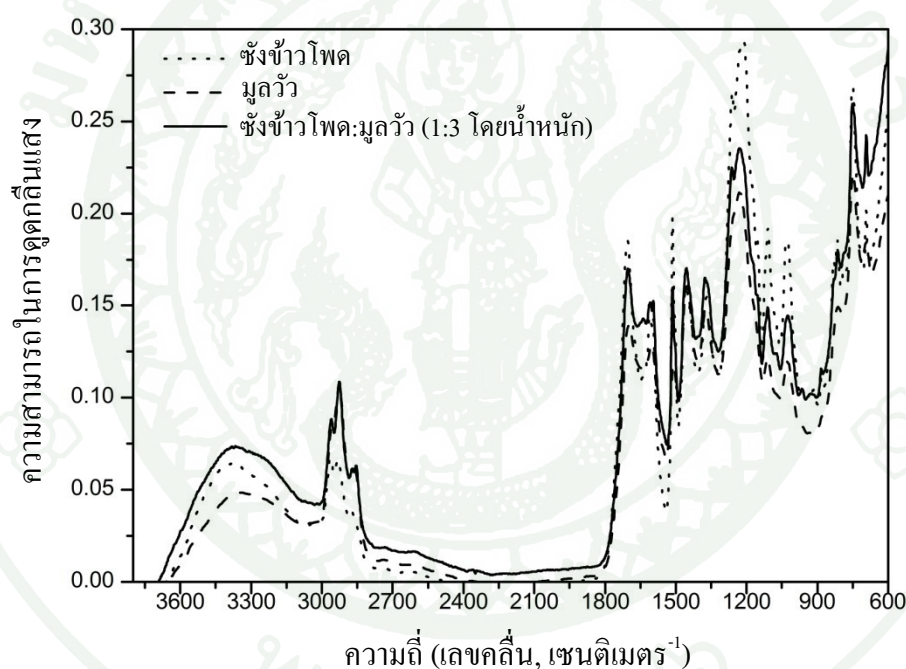
ตารางที่ 8 (ต่อ)

ความถี่ (เซนติเมตร ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบที่เป็นไปได้
1260.4, 1230.5, 1110.3 และ 1025.1	C-O	อีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และ แอลกอฮอล์ประเภทแอลกอฮอล์ปฐมภูมิ แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ และแอลกอฮอล์ตติยภูมิ
965.7	trans	แอลคีน
926.2	RCH=CH ₂	แอลคีน
884.7	R ₂ C=CH ₂ และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน
814.0	R ₂ C=CHR และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน
751.5	benzene ring	วงเบนซีน
692.4	cis และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน

6.4 เปรียบเทียบหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และอัตราส่วนซังข้าวโพดและมูลวัว

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัวและของผสมของซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับพบว่า ลักษณะของกราฟอินฟราเรดสเปกตรัมส่วนใหญ่มีลักษณะเหมือนกัน หากแต่แตกต่างกันตรงปริมาณของการดูดกลืนแสงอินฟราเรด ซึ่งแสดงให้เห็นว่า มีปริมาณของสารประกอบแต่ละตัวไม่เท่ากัน ซึ่งแสดงดังภาพที่ 32 จากภาพแสดงให้เห็นว่าที่ย่านความถี่ประมาณ 3300 เซนติเมตร⁻¹ ปริมาณการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 ให้ปริมาณมากที่สุดตามมาด้วย ปริมาณการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด และน้อยสุดคือ ปริมาณการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสมูลวัว และเนื่องจากที่ย่านความถี่นี้บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของแอลกอฮอล์ ฟีนอล และเอไมด์ แสดงว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ทำให้มีปริมาณของ หมู่ฟังก์ชันประเภทแอลกอฮอล์ ฟีนอล และเอไมด์มากขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 1000-1300 เซนติเมตร⁻¹ ประกอบเพิ่มเติมพบว่าที่ย่านความถี่นี้ ปริมาณการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก มีปริมาณลดลง เมื่อเทียบกับน้ำมันจากการไพโรไลซิสซัง-

ข้าวโพด ซึ่งที่ความถี่นี้แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทอีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และแอลกอฮอล์ แสดงให้เห็นว่า การผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวทำให้ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันประเภทอีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และแอลกอฮอล์มีปริมาณลดลง ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ย่านความถี่ ประมาณ 3300 เซนติเมตร⁻¹ เนื่องจากปริมาณของหมู่ฟังก์ชันของเอไมด์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ประมาณ 1600 เซนติเมตร⁻¹ พบว่า ปริมาณการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวเพิ่มสูงขึ้น โดยที่ย่านนี้บ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันของเอไมด์ (Mante and Agblevor, 2010) ทำให้สรุปได้ว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวช่วยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันของเอไมด์ให้สูงขึ้น



ภาพที่ 32 อินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR spectrum) ของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

เมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 2800-3000 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งแสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลเคน พบว่า ปริมาณในการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก มีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือ ปริมาณในการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด และปริมาณในการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสมูลวัวน้อยที่สุด หมายความว่า การผสมกันของมูลวัวและซังข้าวโพดช่วยเพิ่มปริมาณของ

แอลเคน และเมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 1300-1400 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งบ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลเคน ยังคงพบว่า ปริมาณในการดูดกลืนแสงของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก มีปริมาณมากที่สุด

เมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ ประมาณ 1700 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันประเภทกรดคาร์บอกซิลิก คีโตน และแอลดีไฮด์ พบว่าการผสมมูลวัวกับซังข้าวโพดทำให้ปริมาณของกรดคาร์บอกซิลิก คีโตน และแอลดีไฮด์ลดลง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้น้ำมันชีวมวลที่ได้จากการผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวมี pH สูงขึ้น (เป็นเบสมากขึ้น)

เมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่ 600-900 เซนติเมตร⁻¹ พบว่าความถี่นี้แสดงถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทแอลคีนและวงเบนซีน ปริมาณในการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก มีทั้งปริมาณที่มากกว่าและน้อยกว่าปริมาณในการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด ในขณะที่ปริมาณในการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสมูลวัวน้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวส่งผลต่อปริมาณของแอลคีนและวงเบนซีนที่เกิดขึ้น นอกเหนือจากนี้ที่ย่านความถี่ 750 เซนติเมตร⁻¹ ซึ่งบ่งบอกถึงหมู่ฟังก์ชันประเภทอะโรมาติก พบว่าปริมาณในการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วน 1:3 โดยน้ำหนัก มีค่าน้อยกว่าปริมาณในการดูดกลืนแสงของน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด ซึ่งหมายถึง การผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวทำให้ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันประเภทวงเบนซีนที่มีหมู่แทนที่ 1 หรือ 2 หมู่ (อ-โท) ลดลง ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 9

7. การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบที่พบในผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์หาลักษณะขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว ใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี เพื่อหาปริมาณสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวล แสดงในตารางภาคผนวก ค ประกอบด้วยสารประกอบหลักที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก รวมถึงสูตรโครงสร้างของสารประกอบและร้อยละพื้นที่ทั้งหมด (% area of total) ซึ่งร้อยละพื้นที่ทั้งหมด แสดงถึงร้อยละของสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวล เนื่องจากร้อยละพื้นที่ทั้งหมดไม่ได้หมายถึงปริมาณที่แท้จริงของสารประกอบที่พบ อย่างไรก็ตามปริมาณที่แท้จริงของสารประกอบมีความสัมพันธ์เชิง-

เส้นกับร้อยละพื้นที่ทั้งหมด หมายความว่า ถ้าสารประกอบนั้นมีปริมาณของร้อยละพื้นที่ทั้งหมดมาก แสดงว่าปริมาณที่แท้จริงของสารประกอบนั้นมีปริมาณมากเช่นกัน (Bhattacharya *et al.*, 2009)

ตารางที่ 9 ปริมาณหมู่ฟังก์ชันของน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก จำแนกตามช่วงความถี่ของการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด เมื่อ C หมายถึง ซังข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว และ CM หมายถึงอัตราส่วนซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

ความถี่ (เซนติเมตร ⁻¹)	หมู่ฟังก์ชัน	ประเภทของสารประกอบที่เป็นไปได้	ปริมาณ
3300-3400	-OH และ N-H	แอลกอฮอล์ ฟีนอล และเอไมด์	CM > C > M
1000-1300	C-O	อีเทอร์ เอสเทอร์ ฟีนอล และ แอลกอฮอล์ประเภท แอลกอฮอล์ปฐมภูมิ แอลกอฮอล์ทุติยภูมิ และ แอลกอฮอล์ตติยภูมิ	C > CM > M
2800-3000	-CH, -CH ₂ , และ -CH ₃	แอลเคน	CM > C > M
1300-1400	-CH	แอลเคน	CM > C > M
1700	-C=O	กรดคาร์บอกซิลิก คีโตน และแอลดีไฮด์	C > CM > M
1550-1650	-C=C และ N-H	แอลคีน อะโรมาติก เอไมด์ และเอมีน	CM > C > M
1500	-C=C	แอลคีนและอะโรมาติก	C > CM > M
960-970	trans	แอลคีน	CM > C > M
910-930	RCH=CH ₂	แอลคีน	C > CM > M
870-890	R ₂ C=CH ₂ และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน	CM > C > M
800-820	R ₂ C=CHR และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน	C > CM > M
690-700	cis และ benzene ring	แอลคีนและวงเบนซีน	CM > C > M
750	benzene ring	วงเบนซีน	C > CM > M

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลออกเป็น 10 กลุ่มด้วยกัน คือ สารประกอบของฟีนอล สารประกอบของเอสเทอร์ สารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิก สารประกอบของแอลดีไฮด์ สารประกอบของคีโตน สารประกอบของแอลกอฮอล์ สารประกอบของไนโตรเจน สารประกอบของฟิวแรน สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 องค์ประกอบสารที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก โดยเครื่อง GC-MS

สารประกอบ	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน
	ซังข้าวโพด	มูลวัว	ซังข้าวโพด:มูลวัว (1:3 โดยน้ำหนัก)	
ฟีนอล	74.4	50.8	52.4	-7.5
เอสเทอร์	0.9	1.9	3.1	85.8
แอลดีไฮด์	3	1.6	1.2	-38.5
คีโตน	7.9	5.0	6.5	13.5
กรดคาร์บอกซิลิก	1	4	3.9	20
แอลกอฮอล์	2.1	5.8	6.6	35.4
ไนโตรเจน	-	6.7	4.1	-18.4
ฟิวแรน	1.6	0.4	0.8	34.0
อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	2.1	13.6	11.6	8.2
อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน	3.7	2.9	3.5	18.2

7.1 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด

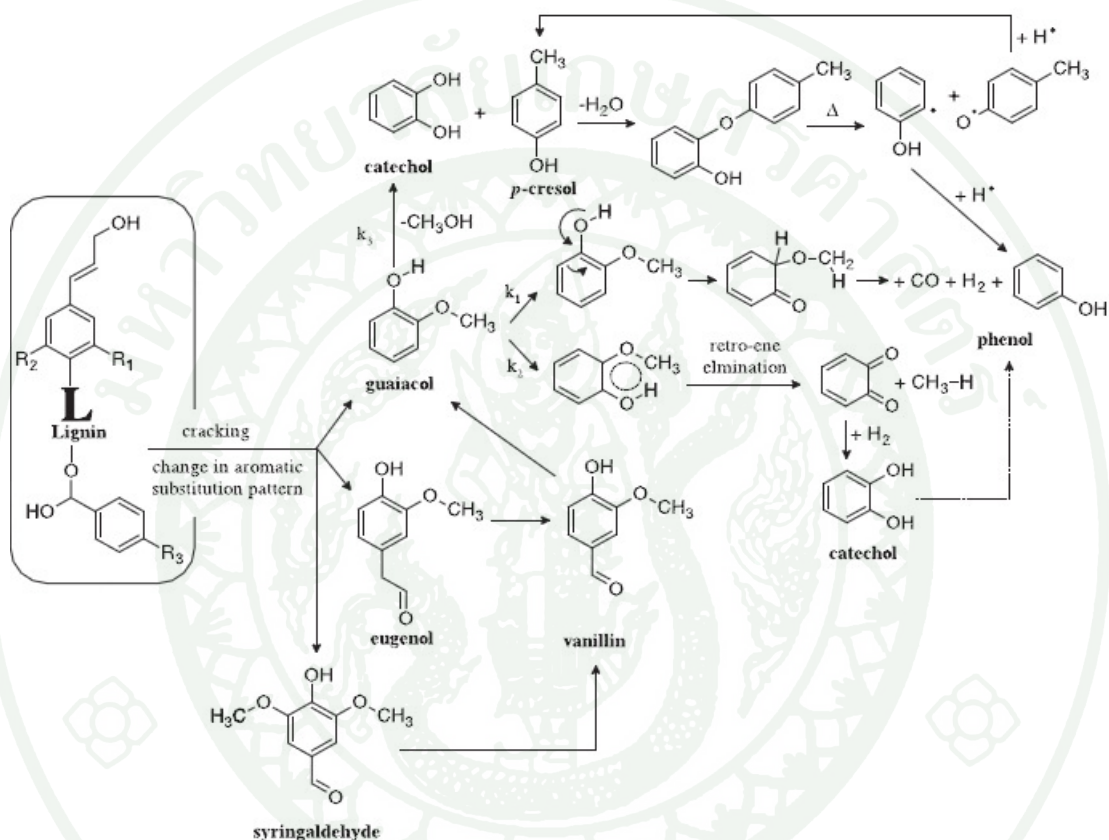
สารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศไนโตรเจน แสดงในตารางภาคผนวก ค อย่างไรก็ตามเมื่อแบ่งสารประกอบออกเป็นกลุ่มๆ ดังตารางที่ 12 แล้วพบว่า สารประกอบหลักที่พบในน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดส่วนใหญ่เป็นสารประกอบจำพวกฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล ซึ่งมีร้อยละ

พื้นที่ทั้งหมดมากที่สุดถึงร้อยละ 74.4 โดยน้ำหนัก รองลงมาคือสารประกอบของคีโตน สารประกอบของแอลดีไฮด์ และสารประกอบของแอลกอฮอล์ ซึ่งมีร้อยละพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับร้อยละ 7.9, 4.0 และ 2.1 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ จากที่สังเกตพบว่าสารประกอบที่พบมากในน้ำมันชีวมวล คือ สารประกอบของฟีนอล สารประกอบของคีโตน และสารประกอบของแอลดีไฮด์ ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนมีค่า pH ต่ำ แสดงให้เห็นว่าที่ค่า pH ของน้ำมันมีค่าต่ำ (acid) เนื่องมาจากมีปริมาณของสารเหล่านี้อยู่มาก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Cao *et al.* (2004) ซึ่งทำการทดลองไพโรไลซิสซังข้าวโพดที่อุณหภูมิ 350-600 องศาเซลเซียส พบว่าองค์ประกอบหลักของน้ำมันชีวมวล คือ ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล

ฟีนอลและสารประกอบฟีนอลหลักๆ ที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดคือ 4-ethyl phenol 2, 4-bis(1,1-dimethylethyl) phenol 4-ethyl-2-methoxy phenol 4-methyl phenol และ phenol ซึ่งฟีนอลและสารประกอบของฟีนอลเกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสของลิกนิน โดยลิกนินเกิดจากการพอลิเมอร์ไรเซชันของมอนอเมอร์อยู่ 3 ชนิดหลักๆ ด้วยกันคือ *p*-coumaryl alcohol (*p*-hydroxyphenyl) coniferyl alcohol (guaiacyl) และ sinapyl alcohol (syringyl) (Huang *et al.*, 2012) ซึ่งเมื่อลิกนินถูกไพโรไลซิสทำให้เกิดการแตกสลายของพันธะขึ้นโดยที่อุณหภูมิต่ำเกิดการสลายของพันธะที่มีความแข็งแรงน้อย (weaker bond) และที่อุณหภูมิสูงเกิดการสลายตัวของพันธะที่มีความแข็งแรงมาก (stronger bond) โดยที่อุณหภูมิไม่เกิน 300 องศาเซลเซียส เกิดการสลายของพันธะ β หรือ γ carbon ที่ตำแหน่ง aliphatic side chain และเกิดการสลายของพันธะ β - γ carbon ที่ตำแหน่ง alkyl side chain เมื่ออุณหภูมิมากกว่า 300 องศาเซลเซียส เกิดการสลายของพันธะ aryl ether linkages (β - หรือ γ -O-4-bonds) เกิดเป็นโอลิโกเมอร์หรือมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ และเกิดปฏิกิริยาขึ้นกลายเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น เช่น ดีพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และดีเมทิลเลชัน (demethylation) เป็นต้น โดยกลไกการเกิดผลิตภัณฑ์บางชนิดแสดงในภาพที่ 33

ผลิตภัณฑ์ประเภทสารประกอบของคีโตน สารประกอบของแอลดีไฮด์ และสารประกอบของฟิวแรนที่พบในน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดหลักๆ เช่น 2-hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one 3-methyl-2-cyclopenten-1-one และ 2-tert-butyl-4-(hydroxymethyl)-5-formyl-furan เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสเซลลูโลสเป็นหลักและเฮมิเซลลูโลสบางส่วน ซึ่งกลไกการเกิดสารผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวของเซลลูโลสแสดงดังภาพที่ 34 โดยเริ่มจากการสลายตัวของกลูโคสด้วยปฏิกิริยาดิพอลิเมอร์ไรเซชัน (depolymerization) ได้ anhydrosugar โดยสลายตัวที่พันธะ 1, 4-glycosidic bond ผลิตภัณฑ์หลักๆ ที่ได้ คือ เลโวกลูโคซาน (levoglucosan) อย่างไรก็ตาม เลโวกลูโคซาน

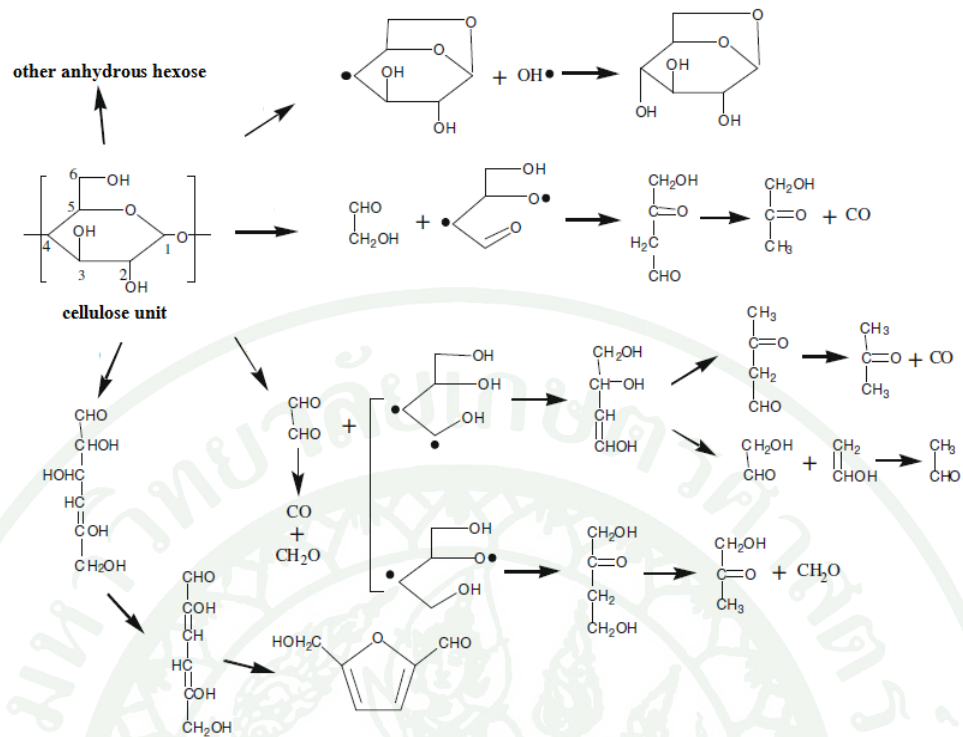
มักเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิกลายเป็นสารประกอบแอลดีไฮด์ สารประกอบคีโตน และสารประกอบฟิวเรน เป็นต้น ซึ่งเห็นได้ว่าผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัว ไม่พบ เลโวกลูโคซาน แสดงให้เห็นว่า เลโวกลูโคซานเกิดปฏิกิริยาทุติยภูมิกลายเป็นสารประกอบของแอลดีไฮด์ สารประกอบของคีโตน และสารประกอบของฟิวเรน ดังภาพที่ 35



ภาพที่ 33 กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากการไพโรไลซิสลิกนิน

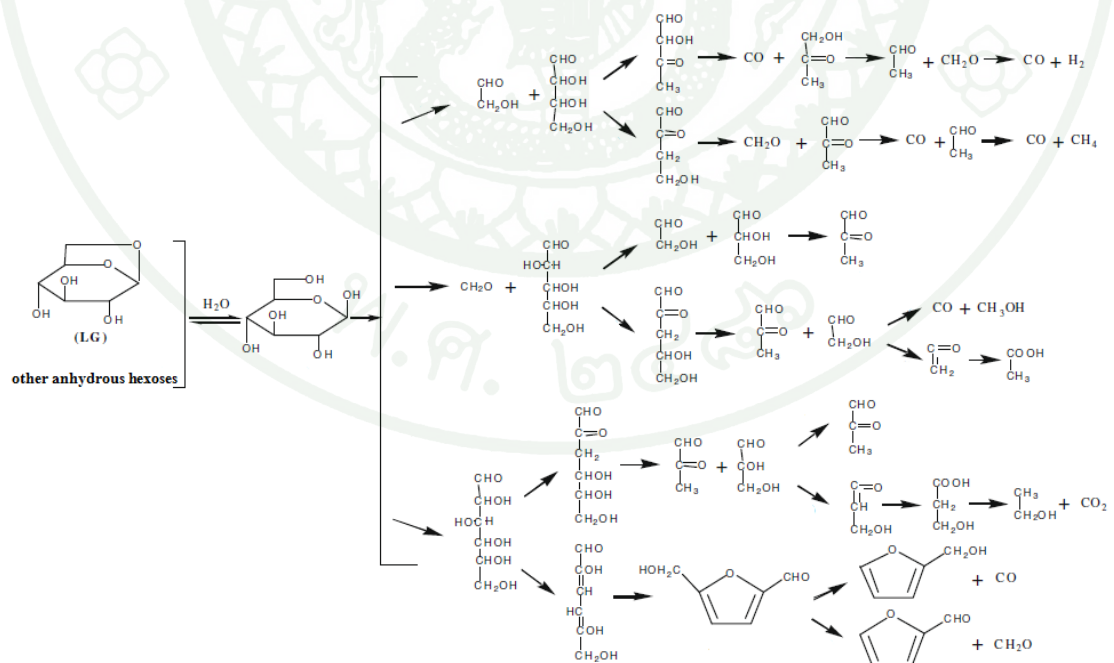
ที่มา: Greenhalf *et al.* (2012)

การไพโรไลซิสเฮมิเซลลูโลสให้ผลิตภัณฑ์คล้ายๆ กับการไพโรไลซิสเซลลูโลส โดยกลไกการเกิดสารผลิตภัณฑ์ของเฮมิเซลลูโลสขึ้นอยู่กับมอนอเมอร์ ซึ่งมอนอเมอร์หลักๆ ของเฮมิเซลลูโลส คือ xylose (pentose) และ mannose (hexose) ซึ่งกลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ แสดงดังภาพที่ 36



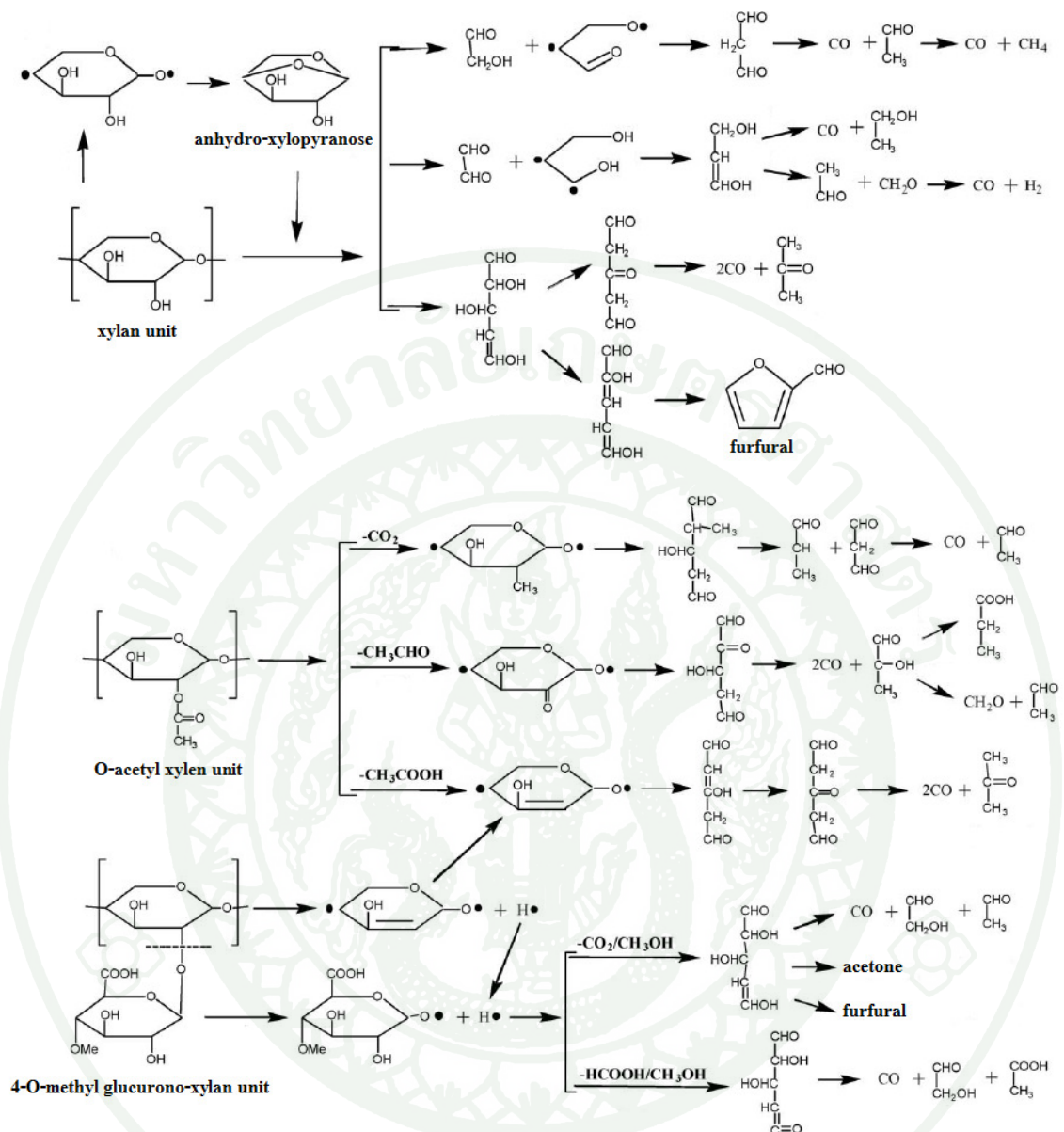
ภาพที่ 34 กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ จากเซลล์โลส

ที่มา: Shen *et al.* (2009)



ภาพที่ 35 กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาทุติยภูมิของเลโวกลูโคซาน

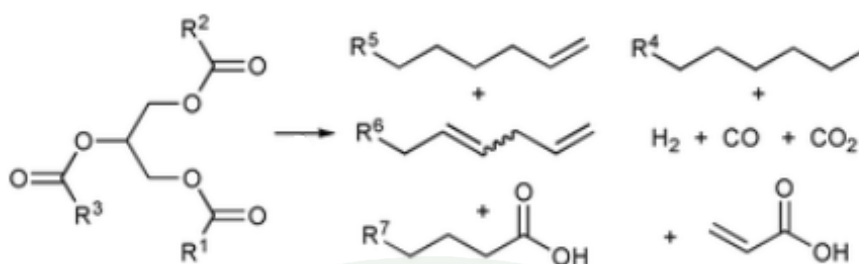
ที่มา: Shen *et al.* (2009)



ภาพที่ 36 กลไกการเกิดผลิตภัณฑ์ของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Shen *et al.* (2010)

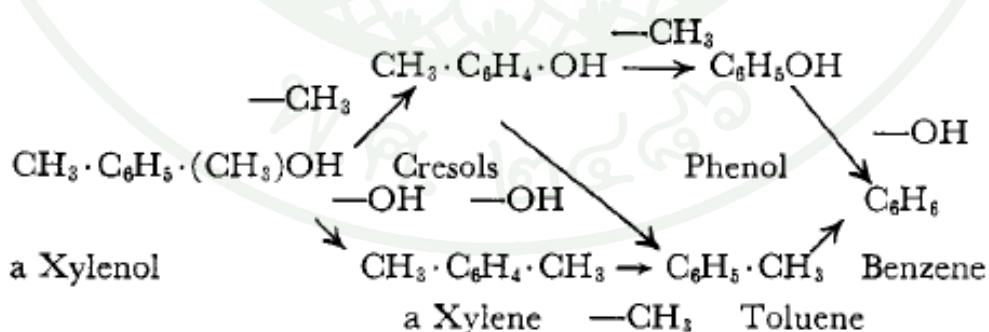
ผลิตภัณฑ์ประเภทสารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิกที่มีสายโซ่คาร์บอนยาว เช่น hexadecanoic acid เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสของสารแทรก (extractive) ที่มีอยู่ในชีวมวล เช่น lipophilic extractives ซึ่งประกอบด้วย กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) สเตอรอลเอสเทอร์ (sterol ester) และไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) (Sun and Sun, 2001; Wang *et al.*, 2011) โดยที่ตัวอย่างกลไกการเกิดสารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิกที่มีสายโซ่ยาวจากไตรกลีเซอไรด์แสดงดังภาพที่ 37



ภาพที่ 37 ปฏิกริยาการเกิดสารผลิตภัณฑ์ของไตรกลีเซอไรด์ (R = หมู่แอลคิล)

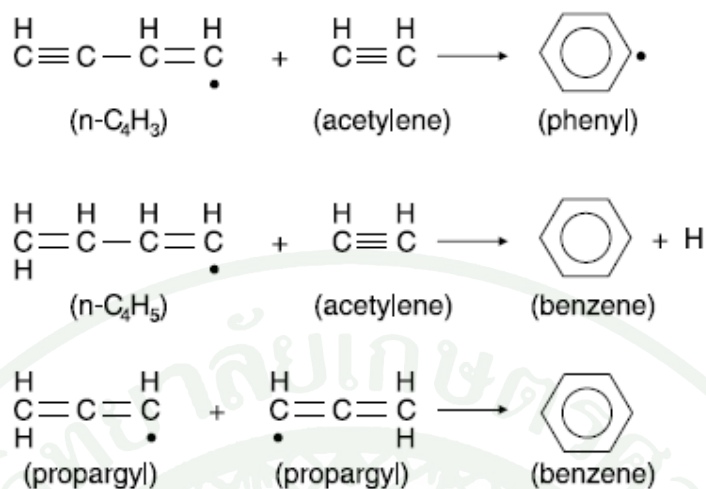
ที่มา: Dupont *et al.* (2009)

ผลิตภัณฑ์ของสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันจากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด ได้แก่ p-xylene และ 1, 2, 3-trimethoxy benzene เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสลิกนินเป็นหลัก และบางส่วนอาจเกิดจากการไพโรไลซิสโฮโลเซลลูโลส (holocellulose) ซึ่งการเกิดสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเกิดจากการสลายของพันธะของ phenolic hydroxyl group อย่างไรก็ตาม เป็นที่รู้กันว่า การสลายพันธะนี้ใช้พลังงาน 463.6 กิโลจูลต่อโมล ทำให้ผลิตภัณฑ์ของสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เกิดขึ้นน้อย และมักเกิดผลิตภัณฑ์ได้มากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น (Dong *et al.*, 2012) ซึ่งตัวอย่างกลไกการเกิดสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจากฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล และจากสารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน แสดงดังภาพที่ 38 และภาพที่ 39



ภาพที่ 38 ปฏิกริยาการเกิดสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จากฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล

ที่มา: Wells *et al.* (1962)



ภาพที่ 39 ปฏิกิริยาการเกิดสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน จากสารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน

ที่มา: Mcenally *et al.* (2006)

1.2 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัว

สารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสมูลวัว แสดงดังตารางภาคผนวก ค อย่างไรก็ตามเมื่อแบ่งสารประกอบออกเป็นกลุ่มๆ ดังตารางที่ 12 แล้วพบว่าสารประกอบส่วนใหญ่ยังคงเป็นสารประเภท ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล ซึ่งมี ร้อยละพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 50.8 ในขณะที่ สารประกอบของแอลดีไฮด์ สารประกอบของแอลกอฮอล์ สารประกอบของคีโตน และสารประกอบของฟิวแรน มีร้อยละพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 1.6, 5.8, 5.0 และ 0.4 ตามลำดับ ในส่วนของสารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบของไนโตรเจน มีร้อยละพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 13.6, 2.9 และ 6.7 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ามีสารประกอบของฟีนอล สารประกอบของแอลดีไฮด์ สารประกอบของคีโตน สารประกอบของแอลกอฮอล์ และสารประกอบของฟิวแรนในปริมาณที่มากทำให้น้ำมันที่ได้ควรมีค่า pH ที่ต่ำ อย่างไรก็ตามแท้จริงแล้วค่า pH ที่ได้จากน้ำมันจากการไพโรไลซิสมูลวัว กลับมีค่า pH ที่สูง คือ มีค่า pH 4.63 เนื่องมาจากปริมาณสารประกอบของไนโตรเจนที่พบในน้ำมัน ทำให้ช่วยเพิ่มค่า pH ของน้ำมันให้สูงขึ้น เพราะว่าสารประกอบของไนโตรเจนมีความเป็นเบสสูง จึงช่วยทำให้ค่า pH ของน้ำมันดีขึ้น

1.3 การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบที่พบในน้ำมันชีวมวลจากการไพโรไลซิสขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางภาคผนวก ค อย่างไรก็ตามเมื่อแบ่งสารประกอบออกเป็นกลุ่มๆ ดังตารางที่ 12 แล้วพบว่าสารประกอบส่วนใหญ่ยังคงเป็นสารประเภทฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล ซึ่งมีร้อยละพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 52.4 ในขณะที่ สารประกอบของแอลกอฮอล์ สารประกอบของคีโตน สารประกอบของแอลดีไฮด์ สารประกอบของเอสเทอร์ และสารประกอบฟิวแรนมีร้อยละพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 6.6, 6.5, 1.2, 3.1 และ 0.8 ตามลำดับ ในขณะที่สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบของไนโตรเจนมีร้อยละพื้นที่ทั้งหมดเท่ากับ 11.6, 3.5 และ 4.1 ตามลำดับ ซึ่งเห็นได้ว่าการผสมกันของขี้ข้าวโพดและมูลวัวทำให้อัตราของผลของการเสริมฤทธิ์กันของสารประกอบของฟีนอล สารประกอบของแอลดีไฮด์ และสารประกอบของไนโตรเจนลดลง ในขณะที่ทำให้ ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของสารประกอบของคีโตน สารประกอบของเอสเทอร์ สารประกอบของแอลกอฮอล์ สารประกอบของฟิวแรน สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น

2. ผลของการผสมกันของขี้ข้าวโพดและมูลวัวต่อผลิตภัณฑ์ที่ได้

2.1 ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอล

ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอลที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสขี้ข้าวโพดมูลวัว และของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 11 พบว่า การผสมกันของขี้ข้าวโพดและมูลวัวให้สารประกอบชนิดเดิมทั้งที่พบในขี้ข้าวโพดและมูลวัว เพียงแต่มีปริมาณแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามการผสมกันของขี้ข้าวโพดและมูลวัว ทำให้เกิดสารประกอบชนิดใหม่ขึ้น 10 ชนิดด้วยกัน เช่น 4-methoxy-3-methyl phenol และ 4-vinylphenol เป็นต้น สาเหตุที่ปริมาณของฟีนอลและสารประกอบของฟีนอลแตกต่างกัน และมีสารใหม่เกิดขึ้นนั้น เป็นไปได้หลายสาเหตุ เช่น ฟีนอลทำปฏิกิริยากับฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) เกิดเป็น hydroxyl methyl derivatives ขึ้น หรืออาจเกิดปฏิกิริยาของสารประกอบฟีนอลชนิดหนึ่งกลายเป็นสารประกอบฟีนอลอีกชนิดหนึ่ง เช่น ปฏิกิริยาดิเมทิลเลชัน (demethylation) หรือปฏิกิริยาแอลคิลเลชัน (alkylation) ดังภาพที่ 40 ซึ่งการวิเคราะห์ว่ากลไกใดเป็นกลไกที่ถูกต้อง เป็นไปได้ยาก เนื่องจาก

สารประกอบมีความซับซ้อนและมีสารประกอบหลายชนิด ดังนั้นจึงอาจสรุปได้เพียงว่า การผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวทำให้สารประกอบของฟีนอล มีหลากหลายประเภทมากขึ้น โดยเฉพาะเกิดสารชนิดใหม่ที่มีมวลโมเลกุลสูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณสารประกอบฟีนอลทั้งหมดมีปริมาณลดลง

2.2 สารประกอบของแอลดีไฮด์

สารประกอบของแอลดีไฮด์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 12 พบว่า ไม่พบสารประกอบที่เหมือนกันทั้งในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว กล่าวคือ การไพโรไลซิสซังข้าวโพดหรือมูลวัว เกิดสาร 4-methyl benzaldehyde ในขณะที่การไพโรไลซิสของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว กลับเกิดสาร furfural แทน ซึ่งการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวทำให้เกิดสารประกอบโมเลกุลเล็กลง

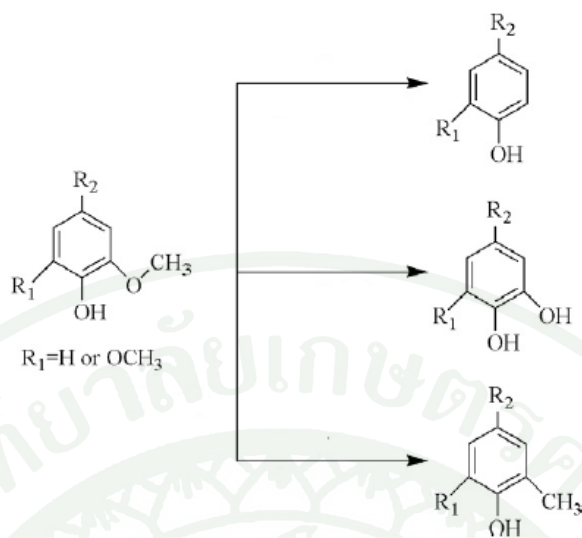
ตารางที่ 11 ฟีนอลและสารประกอบของฟีนอลที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
2-furan methanol	$C_5H_6O_2$	-	7.4	-	-
phenol	C_6H_6O	7.2	7.7	7.4	-2.0
2, 4 diaminophenol	C_6H_7NO	-	-	0.8	-
2-methyl phenol	C_7H_8O	4.2	2.1	2.5	-3.1
4-methyl phenol	C_7H_8O	7.3	4.6	4.4	-15.8
2-methoxy phenol	$C_7H_8O_2$	5.3	4.3	5.3	16.9
4-vinylphenol	C_8H_8O	-	-	2.1	-
2, 6-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	0.8	1.2	1.2	5.0
2, 3-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	2.9	-	-	-
3, 5-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	-	1.6	1.5	28.2
4-ethyl phenol	$C_8H_{10}O$	19.3	6.3	7.7	-20.2

ตารางที่ 11 (ต่อ)

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
2-ethyl phenol	$C_8H_{10}O$	0.9	0.8	0.9	12.1
2-methoxy-4-methyl phenol,	$C_8H_{10}O_2$	3.6	2.5	1.5	-46.2
2-methoxy-6-methylphenol	$C_8H_{10}O_2$	-	-	0.6	-
4-methoxy-3-methyl phenol	$C_8H_{10}O_2$	-	-	0.9	-
2, 6-dimethoxy phenol	$C_8H_{10}O_3$	2.8	2.0	2.1	-6.5
3-ethyl-5-methyl phenol	$C_9H_{12}O$	1.0	2.5	0.9	-1.2
2-methoxy-4-vinylphenol	$C_9H_{10}O_2$	-	2.6	-	-
2-(1-methylethyl) phenol	$C_9H_{12}O$	1.8	-	-	-
3-ethyl-5-methyl phenol	$C_9H_{12}O$	-	-	0.9	-
4-ethyl-3-methyl phenol	$C_9H_{12}O$	-	-	1.4	-
2, 4, 6-trimethyl phenol	$C_9H_{12}O$	-	1.2	-	-
4-ethyl-2-methoxy phenol	$C_9H_{12}O_2$	7.4	-	3.0	62.8
4-ethenyl-2-methoxy phenol	$C_9H_{12}O_2$	3.3	-	-	-
2-methoxy-4-(1-propenyl) phenol	$C_{10}H_{12}O_2$	-	-	2.3	-
2-methoxy-4-(2-propenyl) phenol	$C_{10}H_{12}O_2$	-	-	0.4	-
2-methoxy-5-(1-propenyl) phenol	$C_{10}H_{12}O_2$	-	2.4	-	-
2-methoxy-4-propyl phenol	$C_{10}H_{14}O_2$	-	0.6	3.4	736.4
2-ethyl -5-n-propylphenol	$C_{11}H_{14}O$	-	0.6	0.4	-7.5
2, 6-dimethoxy-4-(2-propenyl) phenol	$C_{11}H_{14}O_3$	0.6	0.4	0.8	67.0
2, 4-bis(1,1-dimethylethyl) phenol	$C_{14}H_{22}O$	8.7	-	-	-

หมายเหตุ C หมายถึง ช้างข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมช้างข้าวโพดและมูลวัว
เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน



ภาพที่ 40 ปฏิกริยาของการเกิดสารประกอบของฟีนอลชนิดต่างๆ

ที่มา: Munoz *et al.* (2008)

ตารางที่ 12 สารประกอบของแอลดีไฮด์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
2-furancarboxaldehyde (furfural)	$\text{C}_5\text{H}_4\text{O}_2$	-	-	1.2	-
4-methyl benzaldehyde	$\text{C}_8\text{H}_8\text{O}$	3.0	1.6	-	-

หมายเหตุ C หมายถึง ซังข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

2.3 สารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิก

สารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิกที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 13 พบว่า สารประกอบที่พบทั้งน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพด และ

มูลวัว คือ n-hexadecanoic acid ในขณะที่เกิดสารใหม่ขึ้น 1 ชนิด คือ 2-methyl propanoic anhydride จากที่กล่าวไปข้างต้นแล้วว่า สารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิกที่มีสายโซ่คาร์บอนยาวๆ นั้นเกิดจาก สารแทรก ที่พบในชีวมวล อย่างไรก็ตามการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัว ทำให้เกิดสารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิกที่มีสายโซ่คาร์บอนยาวขึ้น ซึ่งสังเกตได้จาก ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของสารประกอบ octadecanoic acid มีค่าเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 38 โดยน้ำหนัก

ตารางที่ 13 สารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิกที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
2-methyl-propanoic acid	$C_4H_8O_2$	-	1.5	-	-
butanoic acid	$C_4H_8O_2$	-	0.2	-	-
2-methyl propanoic anhydride	$C_8H_{14}O_3$	-	-	2.2	-
tetradecanoic acid	$C_{14}H_{28}O_2$	-	0.5	-	-
n-hexadecanoic acid	$C_{16}H_{32}O_2$	1.0	1.3	1.2	-2.0
octadecanoic acid	$C_{18}H_{36}O_2$	-	0.5	0.5	38.8

หมายเหตุ C หมายถึง ซังข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

2.4 สารประกอบของคีโตน

สารประกอบของคีโตนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 14 พบว่า สารประกอบที่พบทั้งน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว คือ 2-methyl-2-cyclopenten-1-one 2, 3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one และ 2-hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one ในขณะที่เกิดสารใหม่ขึ้น 2 ชนิด คือ 2(3h)-furanone dihydro และ 3-ethylcyclopent-2-en-1-one สังเกตได้ว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัว ให้สารประกอบคีโตนที่มีคาร์บอน 6-7 อะตอมเป็นผลิตภัณฑ์หลัก

ตารางที่ 14 สารประกอบของคีโตนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
2(3h)-furanone dihydro	$C_4H_6O_2$	-	-	1.0	-
cyclopentanone	C_5H_8O	-	0.5	0.4	6.6
2-furyl methyl ketone	$C_6H_6O_2$	0.6	-	-	-
1-(2-furanyl)-ethanone	$C_6H_6O_2$	-	0.5	-	-
3-methyl-2-cyclopenten-1-one	C_6H_8O	1.4	-	-	-
2-methyl-2-cyclopenten-1-one	C_6H_8O	1.0	0.8	0.7	-17.6
2-hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one	$C_6H_8O_2$	1.5	0.7	1.2	33.3
4-hydroxy-4-methyl-2-pentanone	$C_6H_{12}O_6$	-	1.7	1.4	9.8
2, 3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O$	1.1	0.7	0.8	0
3-ethylcyclopent-2-en-1-one	$C_7H_{10}O$	-	-	0.3	-
3-ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O_2$	0.8	-	0.7	250.0
7, 9-di-tert-butyl-1-oxaspiro(4, 5)deca-6, 9-diene-2, 8-dione	$C_{17}H_{26}O_3$	1.5	-	-	-

หมายเหตุ C หมายถึง ซังข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

2.5 สารประกอบของแอลกอฮอล์

สารประกอบของแอลกอฮอล์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 15 พบว่า สารประกอบที่พบทั้งน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว คือ 2-furanmethanol ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Mullen *et al.* (2010) และ Ates and Isikdag

(2011) ที่พบ 2-furanmethanol และ cis-isoeugenol ในการไพโรไลซิสซังข้าวโพด ในขณะที่เกิดสารใหม่ขึ้น 2 ชนิด คือ 2, 3-dihydro-1H-inden-1-ol และ tetrahydro-2-furanmethanol โดยที่กลไกการเกิดของ 2-furanmethanol แสดงดังภาพที่ 41 อย่างไรก็ตามพบว่า การผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัว เกิด tetrahydro-2-furanmethanol ขึ้น อาจเกิดขึ้นได้จากปฏิกิริยาของไฮโดรจิเนชัน (hydrogenation) ของ 2-furanmethanol

ตารางที่ 15 สารประกอบของแอลกอฮอล์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

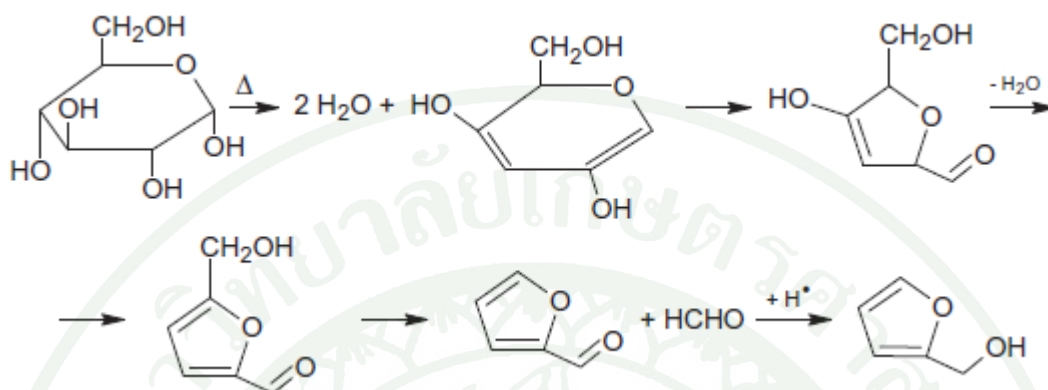
สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
2-furanmethanol	C ₅ H ₆ O ₂	0.8	1.0	1.3	36.8
tetrahydro-2-furanmethanol	C ₅ H ₁₀ O ₂	-	-	0.3	-
2-methoxy benzeneethanol	C ₉ H ₁₂ O ₂	-	3.4	4.4	72.5
2, 3-dihydro-1H-inden-5-ol	C ₉ H ₁₀ O	-	0.6	-	-
2, 3-dihydro-1H-inden-1-ol	C ₉ H ₁₀ O	-	-	0.6	-
cis-isoeugenol	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1.2	-	-	-
1-(5-pentyl-2-furyl)ethan-1-ol	C ₁₁ H ₁₉ O ₂	-	0.8	-	-

หมายเหตุ C หมายถึง ซังข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

2.6 สารประกอบของเอสเทอร์

สารประกอบของเอสเทอร์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 16 พบว่า สารประกอบที่พบทั้งน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว คือ hexadecanoic acid methyl ester ในขณะที่เกิดสารใหม่ขึ้น 3 ชนิด คือ 10-octadecanoic acid methyl ester octadecanoic acid methyl ester และ benzeneacetic acid methyl ester เห็นได้ว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวทำให้เอสเทอร์เพิ่มขึ้นโดยการเปลี่ยนเอสเทอร์ที่มีสายโซ่ที่ยาวให้เป็น

เอสเทอร์ที่มีสายโซ่ที่ยาวขึ้นกว่าเดิม (เกิดสารประกอบ hexadecanoic acid methyl ester น้อยลง และเกิดสารประกอบ octadecanoic acid methyl ester มากขึ้น)



ภาพที่ 41 กลไกการเกิด 2-furanmethanol จากเลวอกูโคซาน

ที่มา: Greenhalf *et al.* (2012)

ตารางที่ 16 สารประกอบของเอสเทอร์ที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวลโมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
benzoic acid methyl ester	C ₈ H ₈ O ₂	-	0.8	0.8	33.3
benzeneacetic acid methyl ester	C ₉ H ₁₀ O ₂	-	-	1	-
hexadecanoic acid methyl ester	C ₁₇ H ₃₂ O ₂	0.9	0.7	0.7	-6.7
9-octadecanoic acid methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	-	0.4	-	-
10-octadecanoic acid methyl ester	C ₁₉ H ₃₆ O ₂	-	-	0.4	-
octadecanoic acid methyl ester	C ₁₉ H ₃₄ O ₂	-	-	0.2	-

หมายเหตุ C หมายถึง ซังข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

2.7 สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิส ซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 17 พบว่า การผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัว ทำให้ได้สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมากขึ้น ซึ่งสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่เพิ่มขึ้น อาจเกิดจากสารประกอบฟีนอลเกิดปฏิกิริยา กลายเป็นสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งทำให้ปริมาณของสารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณของสารประกอบฟีนอลลดลง ดังภาพที่ 37 อย่างไรก็ตาม สารประกอบอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ที่เพิ่มขึ้นอาจเกิดจากปฏิกิริยาของสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน ดังภาพที่ 38

2.8 สารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน

สารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิส ซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 18 พบว่าสารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบเป็นสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน ที่มีสายโซ่คาร์บอนยาว มีคาร์บอน 15-20 อะตอม อย่างไรก็ตาม ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนมีค่าติดลบ แสดงให้เห็นว่า การผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวลดปริมาณการเกิดสารประกอบอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ลง ซึ่งปริมาณสารที่ลดลงอาจเกิดจากการทำปฏิกิริยากลายเป็นสารตัวอื่นๆ แทน

ตารางที่ 17 สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิส ซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
toluene	C ₇ H ₈	-	4	3.4	13.3
styrene	C ₈ H ₈	-	1.5	1.1	-2.2
p-xylene	C ₈ H ₁₀	0.7	1.6	1.7	23.6
ethyl benzene	C ₈ H ₁₀	-	1.5	1.0	-11.1
1-ethyl-4-methyl benzene	C ₉ H ₁₂	-	-	1.2	-

ตารางที่ 17 (ต่อ)

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
1, 2, 3-trimethoxy benzene	$C_9H_{12}O_3$	1.4	0.5	0.6	-17.2
1-ethyl-2-methyl benzene	C_9H_{12}	-	0.9	-	-
1-methoxy-4-methyl-benzene	C_9H_{12}	-	0.6	0.7	55.5
naphthalene	$C_{10}H_8$	-	0.8	-	-
(2-methyl-2-propenyl)-benzene	$C_{10}H_{12}$	-	0.6	-	-
1, 3-dimethyl naphthalene	$C_{12}H_{12}$	-	0.7	-	-
(2-methyl-1-propenyl) benzene	$C_{12}H_{12}$	-	-	0.5	-
2, 6 dimethyl naphthalene	$C_{12}H_{12}$	-	-	0.6	-
1, 4, 6 trimethyl naphthalene	$C_{13}H_{14}$	-	-	0.8	-
3-(2-methyl-propenyl)-1H-indene	$C_{13}H_{14}$	-	0.9	-	-

หมายเหตุ C หมายถึง ชั่งข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมชั่งข้าวโพดและมูลวัว
เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

ตารางที่ 18 สารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิส
ชั่งข้าวโพด มูลวัว และของผสมชั่งข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
3-octyne	C_8H_{14}	-	-	0.7	-
1, 4-dimethylcyclohexene	C_8H_{14}	-	-	0.4	-
2, 5-dimethyl-2, 4-hexadiene	C_8H_{14}	0.6	-	-	-
1-methyl-4-(1-methyletenyl)- cyclohexene	$C_{10}H_{16}$	-	1.1	-	-
n-tetradecane	$C_{14}H_{30}$	0.6	-	-	-
1-pentadecene	$C_{15}H_{30}$	-	-	0.4	-
pentadecane	$C_{15}H_{30}$	-	0.8	-	-

ตารางที่ 18 (ต่อ)

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
nonadecane	C ₁₉ H ₄₀	-	0.4	0.2	-33.3
eicosane	C ₂₀ H ₄₂	-	0.5	0.3	-20.0
heptacosane	C ₂₇ H ₅₆	0.8	-	-	-
3-methylidene-anti-tricyclo	-	1.7	-	-	-

หมายเหตุ C หมายถึง ช้างข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมช้างข้าวโพดและมูลวัว
เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

2.9 สารประกอบของไนโตรเจน

สารประกอบของไนโตรเจนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสช้างข้าวโพด มูลวัว และของผสมช้างข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 19 พบว่า การผสมกันของช้างข้าวโพดและมูลวัวทำให้เกิดสารชนิดใหม่ขึ้น 6 ชนิด และมีสารที่มีเหมือนกันอยู่ 1 ชนิด คือ dodecanamide ซึ่งการผสมกันของช้างข้าวโพดและมูลวัว ทำให้ปริมาณผลิตภัณฑ์ทั้งหมดของสารประกอบของไนโตรเจนลดลง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาสารประกอบของไนโตรเจนแต่ละชนิดพบว่า การผสมกันทำให้เกิดสารชนิดใหม่ขึ้นมาก ซึ่งเห็นได้จากสารประกอบที่พบในของผสมช้างข้าวโพดและมูลวัวกลับไม่พบในมูลวัว โดยสารที่เกิดขึ้นใหม่มีทั้งสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กและสารที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่

ตารางที่ 19 สารประกอบของไนโตรเจนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสช้างข้าวโพด มูลวัว และของผสมช้างข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1: 3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
1H-imidazole	C ₃ H ₄ N ₂	-	-	0.37	-
pyridine	C ₅ H ₅ N	-	0.33	-	-
2-methyl pyrazine	C ₅ H ₆ N ₂	-	0.32	-	-

ตารางที่ 19 (ต่อ)

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
2-methyl pyrimidine	C ₅ H ₆ N ₂	-	-	0.35	-
3-methoxy pyridine	C ₆ H ₇ NO	-	0.58	-	-
2-ethyl-pyrazine	C ₆ H ₈ N ₂	-	0.75	-	-
2-methoxy-6-methyl pyrazine	C ₆ H ₈ N ₂ O	-	0.84	-	-
2-ethyl-4-methyl 1H-imidole	C ₇ H ₁₁ N	-	0.51	-	-
benzenepropanenitrile	C ₉ H ₉ N	-	-	0.34	-
2-methyl-1H-indole	C ₉ H ₉ N	-	-	0.44	-
3-methyl-1H-indole	C ₉ H ₉ N	-	1.3	-	-
1-(1-cyclopenten-1-yl)pyrrolidene	C ₉ H ₁₆ N ₂	-	-	1.05	-
2, 4, 6-trimethyl benzonitrile	C ₁₀ H ₁₁ N	-	0.44	-	-
dodecanamide	C ₁₂ H ₂₅ NO	-	1.2	0.92	2.2
hexadecanenitrile	C ₁₆ H ₃₁ N	-	0.43	-	-
heptadecanenitrile	C ₁₇ H ₃₃ N	-	-	0.64	-

หมายเหตุ C หมายถึง ช้างข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมช้างข้าวโพดและมูลวัว
เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

2.10 สารประกอบของฟิวแรน

สารประกอบของฟิวแรนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสช้างข้าวโพด มูลวัว และของผสมช้างข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 20 จากที่กล่าวไปข้างต้นว่าสารประกอบฟิวแรน เกิดขึ้นจากการไพโรไลซิสเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งการผสมกันของช้างข้าวโพดและมูลวัว เกิดสารประกอบฟิวแรนเพิ่มขึ้น สังเกตได้จากร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันมีค่าเป็นบวก และเกิดสาร 2-methoxytetrahydrofuran ที่เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้น

ตารางที่ 20 สารประกอบของฟิวเรนที่พบในน้ำมันที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

สารประกอบ	มวล โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด			%Synergy
		C	M	CM	
2-methoxytetrahydrofuran	$C_6H_{12}O_2$	-	-	0.32	-
2-tert-butyl-4-(hydroxymethyl)-5-formylfuran	$C_9H_{13}O_2$	0.77	-	-	-
2, 3-dimethyl benzofuran	$C_{10}H_{10}O$	-	0.39	0.49	67.5
4, 7-dimethyl benzofuran	$C_{10}H_{10}O$	0.8	-	-	-

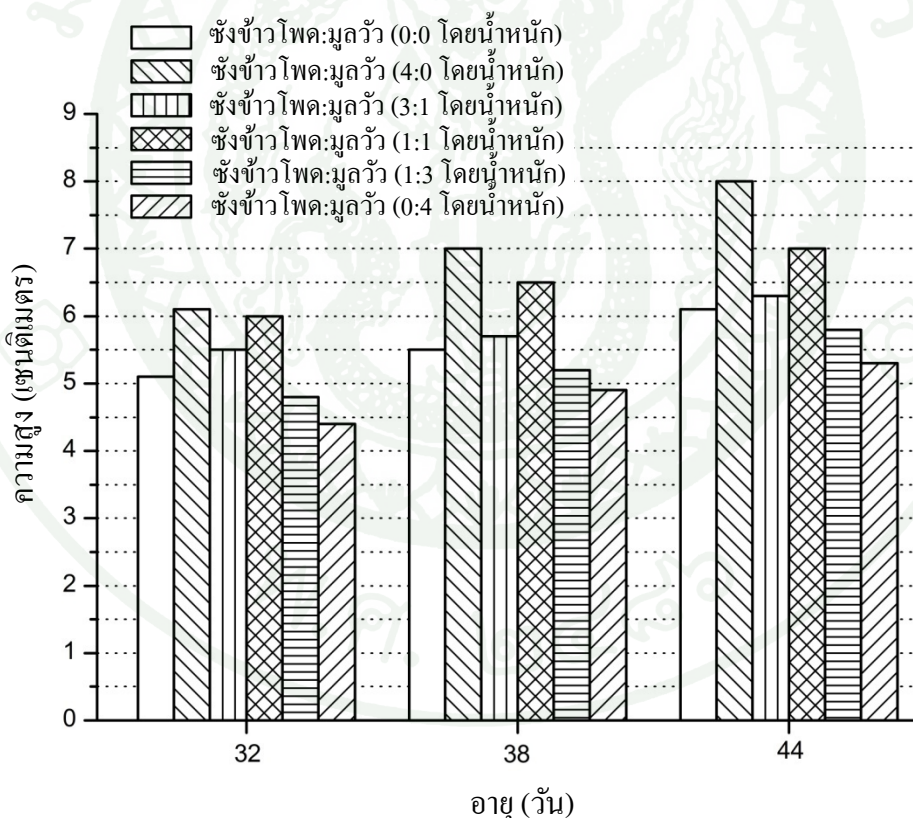
หมายเหตุ C หมายถึง ซังข้าวโพด M หมายถึง มูลวัว CM หมายถึง ของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก และ %Synergy หมายถึง ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

8. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง (ถ่านชาร์)

8.1 การวิเคราะห์ความเป็นปฏิกิริยาของถ่านชาร์

ของแข็งที่เหลืออยู่หลังจากกระบวนการไพโรไลซิสหรือถ่านชาร์ นำมาวิเคราะห์ว่าถ่านชาร์มีความเหมาะสมสำหรับการใช้ปรับปรุงคุณภาพของดินโดยการนำมาใช้ผสมกับดิน และนำมาปลูกต้นกระเพรา พบว่าที่ต้นกระเพราเมื่ออายุ 32 วัน ถ่านชาร์ที่ได้จากอัตราส่วนระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0 โดยน้ำหนัก ให้ความสูงของต้นกระเพราสูงที่สุด รองลงมาคืออัตราส่วนระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:1, 3:1, 0:0, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ดังภาพที่ 42 และเมื่อต้นกระเพรามีอายุมากขึ้น แนวโน้มความสูงของต้นกระเพราเมื่ออายุของต้นกระเพรามากขึ้น (38 และ 44 วัน) มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน คือ อัตราส่วนระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0 โดยน้ำหนัก มีความสูงของต้นกระเพราสูงสุด ตามมาด้วยที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:1, 3:1, 0:0, 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้อาจเกิดจากว่า ลักษณะทางกายภาพของถ่านชาร์มีความพรุนสูง ซึ่งความที่มีความพรุนสูงขณะที่เกิดการไพโรไลซิสนั้น สารอาหารอินทรีย์ต่างๆ ในโตรเจน ฟอสฟอรัส ถูกดูดซับเข้ามาในรูพรุน ทำให้ถ่านชาร์มีสารอาหารที่เหมาะสมต่อพืชอยู่เป็นจำนวนมาก อีกทั้งถ่านชาร์ยังมีสมบัติเสถียร ไม่ทำปฏิกิริยากับสารใดๆ และสามารถอยู่ในสภาพเดิมได้เป็นเวลายาวนานนับ 1000 ปี (Verheijen *et al.*, 2010; Jeffery *et al.*, 2011) กล่าวคือ

สามารถทนทานต่อการย่อยสลายตามธรรมชาติ ดังนั้นถ่านชาร์จึงสามารถเก็บความชุ่มชื้นเอาไว้ในดินได้นาน รวมถึงสารอาหารที่สามารถเก็บไว้ได้นานด้วย นอกเหนือจากนี้ยังเป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์สำหรับทำกิจกรรมเพื่อสร้างอาหารให้ดินด้วย (Sohi *et al.*, 2009) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านชาร์ช่วยให้ดินไม่เจริญเติบโตได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในการทดลองนี้พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างขังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก ให้ความสูงของดินไม่ต่ำกว่ากรณีไม่ได้ใส่ถ่านชาร์ (อัตราส่วนเท่ากับ 0:0 โดยน้ำหนัก) ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นนั้นยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจนว่าเกิดจากสาเหตุอะไร เนื่องจากว่า องค์ประกอบของชีวมวลที่นำมาใช้ในการไพโรไลซิส รวมถึงสถานะที่ใช้ในกระบวนการผลิต ตลอดจนลักษณะทางกายภาพ ของถ่านชาร์ ไม่ว่าจะเป็นขนาดของถ่านชาร์ที่ได้ pH ความเป็น polar หรือ non-polar surface site และปริมาณอินทรีย์วัตถุ ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพของถ่านชาร์ (Sohi *et al.*, 2009; Jeffery *et al.*, 2011; Koide *et al.*, 2011; Verheijen *et al.*, 2011)



ภาพที่ 42 ความสัมพันธ์ของความสูงและอายุของต้นกระเพรา เมื่อใช้ถ่านชาร์ที่ผลิตจากอัตราส่วนต่างๆ ระหว่างขังข้าวโพดและมูลวัวเป็นปุ๋ย

8.2 การวิเคราะห์ธาตุอาหารในถ่านชาร์

ถ่านชาร์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพด และมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก นำมาวิเคราะห์ธาตุอาหารโดยใช้เทคนิค inductively coupled plasma (ICP) พบว่าธาตุอาหารในถ่านชาร์ประกอบไปด้วย โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) โซเดียม (Na) อะลูมิเนียม (Al) และลิเทียม (Li) ดังตารางที่ 21 จากการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาหารพบว่า ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัวให้ปริมาณธาตุ โพแทสเซียม อะลูมิเนียม แคลเซียม เหล็ก แมกนีเซียม โซเดียม และทองแดงมากที่สุด อย่างไรก็ตามถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัวที่ผสมซังข้าวโพดในปริมาณที่มากขึ้น ทำให้ได้ปริมาณของธาตุอาหารเหล่านี้ลดลง (ยกเว้นธาตุ โพแทสเซียม) นอกเหนือจากนี้ปริมาณธาตุ แมงกานีส ลิเทียม และสังกะสี ของถ่านชาร์มีปริมาณแตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณของซังข้าวโพดและมูลวัว แสดงให้เห็นว่าปริมาณของซังข้าวโพดและมูลวัวส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหารในถ่านชาร์

ปริมาณของโลหะบางชนิด เช่น ทองแดง แมงกานีส เหล็ก และสังกะสี เป็นโลหะที่มีความจำเป็นต่อพืช พืชต้องการโลหะเหล่านี้ในปริมาณความเข้มข้นระดับหนึ่ง แต่หากมีความเข้มข้นมากเกินไปก็เป็นพิษต่อพืชได้ (Papafilippaki *et al.*, 2007) อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในถ่านชาร์ (Zn, Cu) พบว่ามีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับค่ามาตรฐานของธาตุโลหะหนักในดิน ดังนั้นการนำถ่านชาร์ผสมกับดินจึงไม่จำเป็นต้องกังวลปริมาณโลหะที่อาจเกินค่ามาตรฐาน

สารอาหารที่พบในถ่านชาร์มีหลายประเภท ซึ่งเหมาะสำหรับนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อเพิ่มธาตุอาหารให้กับพืช อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ถ่านชาร์โดยการนำไปผสมกับดินเพื่อปลูกต้นกระเพรา กลับพบว่าที่อัตราส่วนเท่ากับ 1:3 และ 0:4 โดยน้ำหนัก กลับให้การเจริญเติบโตของต้นกระเพราไม่ดี ทั้งๆ ที่มีสารอาหารของพืชมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ในทางกลับกัน ถ่านชาร์ที่เท่ากับ 4:0 โดยน้ำหนัก กลับมีการเจริญเติบโตของพืชดีกว่า ทั้งๆ ที่มีปริมาณของสารอาหารน้อยกว่า สาเหตุที่เกิดแบบนี้ อาจเป็นได้หลายสาเหตุ ทั้งสมบัติของถ่านชาร์เอง ดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น และรวมถึงปริมาณถ่านชาร์ที่ใช้อาจมากเกินไปจนเป็นผลเสียต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งสาเหตุที่เกิดขึ้นยังคงต้องค้นคว้าวิจัยต่อไป

ตารางที่ 21 ปริมาณธาตุอาหารที่พบในถ่านชาร์

ถ่านชาร์ ซังข้าวโพด:มูลวัว (โดยน้ำหนัก)	หน่วย: ppm									
	โพแทสเซียม	อลูมิเนียม	แคลเซียม	เหล็ก	แมกนีเซียม	แมงกานีส	โซเดียม	ทองแดง	ลิเทียม	สังกะสี
4:0	45.29	0.90	6.56	0.57	5.61	-	12.52	0.00	0.32	0.84
3:1	44.50	11.56	97.20	9.90	28.24	2.93	20.98	0.04	0.13	0.99
1:1	38.21	14.39	135.10	11.39	37.57	11.39	22.06	0.09	0.32	1.15
1:3	51.35	23.30	207.90	17.96	56.94	5.14	30.25	0.14	0.21	1.72
0:4	66.35	27.15	220.90	23.23	64.75	5.28	32.29	0.18	0.14	1.00

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพด โดยใช้มูลวัวเป็นวัตถุดิบที่ผสมเพิ่มลงไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวลที่ได้ซึ่งสามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ศึกษาการสลายตัวของสารด้วยความร้อนด้วยเทคนิควิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยสมบัติการสลายตัวทางความร้อน (TGA) พบว่าซังข้าวโพด มูลวัว และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนต่างๆ เริ่มเกิดการสลายตัวทางความร้อนที่อุณหภูมิ 210 องศาเซลเซียส และพบว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัว เกิดผลของการเสริมฤทธิ์กันทั้งทางบวกและทางลบ ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราส่วนของซังข้าวโพดและมูลวัว
2. ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัว อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองคือ 350, 400 และ 450 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของของเหลวสูงสุดเท่ากับ 48 โดยน้ำหนัก เมื่อวัตถุดิบเป็นซังข้าวโพด และที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส ให้ร้อยละผลได้ของของเหลวสูงสุดเท่ากับ 29.2 โดยน้ำหนัก เมื่อวัตถุดิบเป็นมูลวัว
3. การผสมซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ให้ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันดีที่สุด คือ เพิ่มผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลว และลดผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็งและแก๊ส
4. ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของน้ำมันชีวมวลโดยพบว่า เมื่อมูลวัวมีปริมาณมากขึ้นทำให้ค่า pH ของน้ำมันชีวมวลที่ได้จากการไพโรไลซิสของผสมระหว่างซังข้าวโพดและมูลวัวมีค่าสูงขึ้น (ความเป็นเบสมากขึ้น) ซึ่งช่วยปรับปรุงคุณภาพของน้ำมันชีวมวลให้มีคุณภาพมากขึ้น ลดค่าความเป็นกรดของน้ำมันชีวมวลลง

5. ศึกษาปริมาณสารประกอบที่มีอยู่ในน้ำมันชีวมวลโดยใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมทรี (GC-MS) พบว่าการผสมกันของซังข้าวโพดและมูลวัวทำให้สารประกอบของฟีนอล สารประกอบของแอลดีไฮด์ และสารประกอบของไนโตรเจนลดลง ในขณะที่ทำให้ปริมาณของสารประกอบของคีโตน สารประกอบของเอสเทอร์ สารประกอบของแอลกอฮอล์ สารประกอบของฟิวเรน สารประกอบของกรดคาร์บอกซิลิก สารประกอบของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบของอะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนเพิ่มขึ้น

6. ถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนระหว่างซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 4:0 โดยน้ำหนัก ให้ความสูงของต้นกระเปาะมากที่สุด และมากกว่าการที่ไม่ได้ใส่อะไรลงไปแสดงให้เห็นว่าถ่านชาร์ที่ได้มีความเหมาะสมสำหรับนำไปใช้เป็นปุ๋ยเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของพืช

7. ศึกษาปริมาณธาตุอาหารของถ่านชาร์พบว่า ธาตุอาหารของถ่านชาร์ประกอบไปด้วย โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) แมงกานีส (Mn) เหล็ก (Fe) ทองแดง (Cu) สังกะสี (Zn) โซเดียม (Na) อะลูมิเนียม (Al) และลิเทียม (Li) ซึ่งธาตุเหล่านี้เป็นทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่จำเป็นสำหรับพืช แสดงให้เห็นว่าถ่านชาร์ที่ได้จากการไพโรไลซิสช่วยเพิ่มธาตุอาหารในดินให้สูงขึ้น

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาสมบัติของถ่านชาร์เพิ่มเติม เช่น ความเป็นรูพรุน ปริมาณอินทรีย์วัตถุ ปริมาณคาร์บอนคงตัว เพื่อทราบอิทธิพลของสมบัติของถ่านชาร์ต่อปริมาณการเจริญเติบโตของพืช

2. ศึกษาปริมาณของการผสมกันของถ่านชาร์กับดินเพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำถ่านชาร์ไปใช้

3. ศึกษาการผสมกันของชีวมวลมากกว่า 2 ชนิดเพื่อเพิ่มสมบัติของน้ำมันชีวมวลให้ดีขึ้น โดยหาชีวมวลที่มีปริมาณธาตุไนโตรเจนที่มากขึ้น เช่น กากถั่วเหลือง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมปศุสัตว์. 2554. เกษตรกร/ปศุสัตว์ในประเทศไทย @ปี 2554. แหล่งที่มา:

http://www.dld.go.th/ict/th/index.php?option=com_content&view=section&id=45&Itemid=123, 10 สิงหาคม 2555.

นฤมล ชูบัวทอง. 2550. ผลขององค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลต่อไพโรไลซิสและการเผาไหม้. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อภิชาติ จินดารัตน์. 2555. การปรับปรุงคุณภาพน้ำมันชีวภาพจากขังข้าวโพดด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในภาวะเหนือวิกฤตของเอทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา MgO-ZnO. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Ates, F. and M.A. Isikdag. 2009. Influence of temperature and alumina catalyst on pyrolysis of corncob. **Fuel** 88: 1991-1997.

Audubon sugar institute. 2011. **Potential Market for Biorefinery Lignin**. Available Source: http://www.lsuagcenter.com/en/our_offices/departments/Audubon_Sugar_Institute/News/Potential+Market+for+Biorefinery+Lignin.htm, August 17, 2011.

Bernhart, M. E. and O. Fasina. 2009. Physical properties and pyrolysis behavior of fractionated poultry litter. **Trans. ASABE** 52: 531-538.

Bhattacharya, P., P.H. Steele, E.B.M. Hassan, B. Mitchell, L. Ingram and C.U. Pittman, Jr. 2009. Wood/plastic copyrolysis in an auger reactor: Chemical and physical analysis of the products. **Fuel** 88: 1251-1260.

Biagini, E., F. Barontini and L. Tognotti. 2006. Devolatilization of Biomass Fuels and Biomass Components Studied by TG/FTIR Technique. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 45: 4486-4493.

Cao, Q., K.C. Xie, W.R. Bao and S.G. Shen. 2004. Pyrolytic behavior of waste corn cob.

Bioresource Technology 94: 83–89.

Chen, S., J.H. Harrison, W. Liao, D.C. Elliott, C. Liu, M. D. Brown, Z. Wen, A. E. Solana, R.

L. Kincaid and D. J. Stevens. 2003. Value-Added Chemicals from Animal Manure.

Northwest Bioproducts Research Institute: 1-135.

Collinson, S.R. and W. Thielemans. 2010. The catalytic oxidation of biomass to new

materials focusing on starch, cellulose and lignin. **Coordination Chemistry Reviews**

254: 1854-1870.

Demiral, I., A. Eryazici and S. Sensoz. 2012. Bio-oil production from pyrolysis of corncob (*Zea*

mays L.). **Biomass and Bioenergy** 36: 43-49.

Demirbas, A. 2004. Effect of temperature and particle size on bio-char yield from pyrolysis of

agricultural residues. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**. 72: 243-248.

Dominguez, A., J.A. Menendez, M. Inguanzo, P.L. Bernad and J.J. Pis. 2003. Gas

chromatographic–mass spectrometric study of the oil fractions produced by microwave-

assisted pyrolysis of different sewage sludges. **Journal of Chromatography A** 1012:

193-206.

Dominguez, A., J.A. Menendez, M. Inguanzo and J.J. Pis. 2006. Production of bio-fuels by high

temperature pyrolysis of sewage sludge using conventional and microwave heating.

Bioresource Technology 97: 1185-1193.

Dong, C.Q., Z.F. Zhang, Q. Lu and Y.P. Yang. 2012. Characteristics and mechanism study of

analytical fast pyrolysis of poplar wood. **Energy Conversion and Management** 57: 49-

59.

Dupont, J., P.A. Suarez, M. R. Meneghetti and S.M.P. Meneghetti. 2009. Catalytic production of biodiesel and diesel-like hydrocarbons from triglycerides. **Energy Environ. Sci.** 2: 1258-1265.

Greenhalf, C.E., D.J. Nowakowski, A.B. Harms, J.O. Titiloye and A.V. Bridgwater. 2012. Sequential pyrolysis of willow SRC at low and high heating rates-Implications for selective pyrolysis. **Fuel** 93: 692-702.

Heo, H.S., H.J. Park, Y.K. Park, C. Ryu, D.J. Suh, Y.W. Suh, J.H. Yim and S.S. Kim. 2010. Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed. **Bioresource Technology** 101: 91-96.

Hossain, M.K., V. Strezov, K.Y. Chan, A. Ziolkowski and P.F. Nelson. 2011. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. **Journal of Environmental Management** 92: 223-228.

Huang, Y., Z. Weia, Z. Qiu, X. Yina and C. Wua. 2012. Study on structure and pyrolysis behavior of lignin derived from corncob acid hydrolysis residue. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 93: 153-159.

Ioannidou, O., A. Zabaniotou, E.V. Antonakou, K.M. Papazisi, A.A. Lappas and C. Athanassiou. 2009. Investigating the potential for energy fuel materials and chemicals production from corn residues (cobs and stalks) by non-catalytic and catalytic pyrolysis in two reactor configurations. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 13: 750-762.

Jeffery, S., F.G.A. Verheijen, M. van der Velde and A.C. Bastosc. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 144: 175-187.

- Kim, S., F.A. Agblevor and J. Lim. 2009. Fast pyrolysis of chicken litter and turkey litter in a fluidized bed reactor. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry** 15: 247-252.
- Koide, R.T., K. Petprakob and M. Peoples. 2011. Quantitative analysis of biochar in field soil, **Soil biology & Biochemistry** 43: 1563-1568.
- Kumar, A., W. Lijun, Y.A. Dzenis, D.D. Jones and M.A. Hanna. 2008. Thermogravimetric characterization of corn stover as gasification and pyrolysis feedstock. **Biomass and Bioenergy** 32: 460-467.
- Lin, J.L. and H.M. Keener. 1995. Pyrolysis and Combustion of Corncocks in a Fluidized Bed: Measurement and Analysis of Behavior. **Combustion and Flame** 100: 271-282.
- Liu, Q., Z. Zhong, S. Wang. and Z. Luo. 2011. Interactions of biomass components during pyrolysis: A TG-FTIR study, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 90: 213-218.
- Mante, Q.D. and F.A. Agblevor. 2010. Influence of pine wood shavings on the pyrolysis of poultry litter. **Waste Management** 30: 2537-2547.
- Mcenally, C.S., L.D. Pfefferle, B. Atakan and K.K.H. inghaus. 2006. Studies of aromatic hydrocarbon formation mechanisms in flames: Progress towards closing the fuel gap. **Progress in Energy and Combustion Science** 32: 247-294.
- Moonsrikaew, W. and A. Duangchan. 2008. Upgrading of bio-oils from slow pyrolysis of corn cob using Ni/activated carbon produced from the char product. In **Proceedings of the International Conference of Sustainable Development to Save the Earth: Technologies and Strategies Vision 2050: (SDSE 2008)**. 11-13 December 2008, Bangkok, Thailand.

- Mullen, C.A., A.A. Boateng, N.M. Goldberg, I.M. Lima, D.A. Laird, K.B. Hicks. 2010. Bio-oil and bio-char production from corn cobs and stover by fast pyrolysis. **Biomass and Bioenergy** 34: 67-74.
- Munoz, J.C., H. Kua, F. Cardona and D. Rogers. 2008. Effects of catalysts and post-curing conditions in the polymer network of epoxy and phenolic resins: Preliminary results. **Journal of Materials Processing Technology** 202: 486-492.
- Mustafa, B., B. Mehmet, K. Elif and B. Havva. 2009. Main routes for the thermo-conversion of biomass into fuels and chemicals. part 1: pyrolysis systems. **Energy Conversion and Management** 50: 3147-3157.
- Nakamura, T., H. Kawamoto and S. Saka. 2008. Pyrolysis behaviour of Japanese cedar wood lignin studied with various model dimmers. **J. Anal. Appl. Pyrolysis** 81: 173-182.
- Neves, D., H. Thunman, A. Matos, L. Tarelho and A.G. Barea. 2011. Characterization and prediction of biomass pyrolysis products. **Progress in Energy and Combustion Science** 37: 611-630.
- Ninchawee, N. and A. Duangchan. 2009. Upgrading of bio-oil from pyrolysis of soybean cake by MCM-41. In **Proceedings of the 3rd International Conference on Fermentation Technology for Value Added Agricultural Products**. 26-28 August 2009, Khon Kaen, Thailand.
- Noblecompany. n.d. **The effect of pH on the corrosion rates of various metals**. Available Source: www.noblecompany.com, August 20, 2012.
- Papafilippaki, A., D. Gasparatos, C. Haidouti and G. Stavroulakis. 2007. Total and Bioavailable forms of Cu, Zn, Pb And Cr in Agricultural Soils: A Study from the Hydrological Basin of Keritis, Chania, Greece. **Global NEST Journal** 9: 201-206.

- Perez, M.G. 2008. **The Formation of Polyaromatic Hydrocarbons and Dioxins During Pyrolysis: A Review of the Literature with Descriptions of Biomass Composition, Fast Pyrolysis Technologies and Thermochemical Reactions.** Washington State University Biological Systems Engineering Department, Washington State University Extension Energy Program.
- Putun, A.E., E. Apaydin and E. Putun. 2002. Bio-oil production from pyrolysis and steam pyrolysis of soybean-cake: product yields and composition. **Energy** 27: 703-713.
- Qiang, L., L.W. Zni and Z.X. Feng. 2009. Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils. **Energy Conversion and Management** 50: 1376-1383.
- Reginaldo, A., F. Buselli, W.C. Otoni and C.P. Joshi. 2007. Structure, organization, and functions of cellulose synthase complexes in higher plants, **Braz. J. Plant Physiol** 19: 1-13.
- Ro, K.S., K.B. Cantrell and P.G. Hunt. 2010. High-temperature pyrolysis of blended animal manures for producing renewable energy and value-added biochar. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 49: 10125-10131.
- Sevilla, M. and A.B. Fuertes. 2009. The production of carbon materials by hydrothermal carbonization of cellulose. **Carbon** 47: 2281-2289.
- Shen, D.K., S. Gua and A.V. Bridgwater. 2010. Study on the pyrolytic behaviour of xylan-based hemicellulose using TG-FTIR and Py-GC-FTIR. **J. Anal. Appl. Pyrolysis** 87: 199-206.
- Shinogi, Y. and Y. Kanri. 2003. Pyrolysis of plant, animal and human waste: physical and chemical characterization of the pyrolytic products. **Bioresource Technology** 90: 241-247.

- Sohi, S., E.L. Capel, E. Krull and R. Bol. 2009. Biochar's roles in soil and climate change: A review of research needs. **CSIRO Land and Water Science Report 05/09**: 1-64.
- Song, W. and M. Gu. 2012. Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 94: 138-145.
- Suhas, P.J.M. Carrott and M.M.L. Ribeiro Carrott. 2007. Lignin-from natural adsorbent to activated carbon: A review. **Bioresource Technology** 98: 2301-2312.
- Sun, R.C. and X.F. Sun. 2001. Identification and quantitation of lipophilic extractives from wheat straw. **Industrial Crops and Products** 14: 51-64.
- Uzun, B.B., A.E. Putun and E. Putun. 2006. Fast pyrolysis of soybean cake: Product yields and compositions. **Bioresource Technology** 97: 569-576.
- Van Krevelen, D.W. 1950. Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal. **Fuel** 29: 269-284.
- Velden, M.V., J. Baeyens, A. Brems, B. Janssens and R. Dewil. 2010. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. **Renewable energy** 35: 232-242.
- Verheijen, F., S. Jeffery, A.C. Bastos, M. van der Velde and I. Diafas. 2010. **Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions**. Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Wan Isahak, W.N.R., M.W.M. Hisham, M.A. Yarmo and T.Y.Y. Hin. 2012. A review on bio-oil production from biomass by using pyrolysis method. **Renewable and Sustainable Energy Review** 16: 5910-5923.

- Wang, L., A. Shahbazi and M.A. Hanna. 2011. Characterization of corn stover, distiller grains and cattle manure for thermochemical conversion. **Biomass and Bioenergy** 35: 171-178.
- Wang, Y., W.L. Wu, C. Wang, J. Yu and Z. Yang. 2011. Investigating the influence of extractives on the oil yield and alkane production obtained from three kinds of biomass via deoxy-liquefaction. **Bioresource Technology** 102: 7190-7195.
- Wells, G.L. 1962. Thermal dealkylation hydrocracking of alkyl penols. **I&EC Process Design and Development** 1: 73-78.
- Wright, W.E. 2008. Statistical evidence for exchange of oxygen isotopes in holocellulose during long-term storage. **Chemical Geology** 252: 102-108.
- Xiu, S., A. Shahbazi, V. Shirley and D. Cheng. 2010. Hydrothermal pyrolysis of swine manure to bio-oil: Effects of operating parameters on products yield and characterization of bio-oil. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** 88: 73-79.
- Xiu, S., A. Shahbazi, V.B. Shirley and L. Wang. 2011. Swine manure/Crude glycerol co-liquefaction: Physical properties and chemical analysis of bio-oil product. **Bioresource Technology** 102: 1928-1932.
- Yang, H., R. Yan, H. Chen, D.H. Lee and C. Zheng. 2007. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. **Fuel** 86: 1781-1788.
- Yanik, J., C. Kornmayer, M. Saglam and M. Yüksel. 2007. Fast pyrolysis of agricultural wastes: characterization of pyrolysis products. **Fuel Processing Technology** 88: 942-947.
- Zhang, S.Y., J.W. Xiu, P.C. Jing and T. Takayuki. 2011. Low temperature catalytic gasification of pig compost to produce H₂ rich gas. **Bioresource Technology** 102: 2033-2039.

Zych, D. 2008. **The viability of corn cobs as a bioenergy feedstock.** (pdf file). West Central Research and Outreach Center, Univ. of Minnesota, Morris.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การคำนวณร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

การคำนวณร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

การคำนวณร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัว ที่อัตราส่วนต่างๆ สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad CM_{11} = (C + M) / 2$$

เมื่อ CM_{11} = ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิที่ศึกษา ที่ได้จากการคำนวณ

C = ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพดที่ได้จากการทดลอง ที่อุณหภูมิที่ศึกษา

M = ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่า 33.2 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่า 50.7 โดยน้ำหนัก ดังนั้นร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{จากสูตร} \quad CM_{11} = (C + M) / 2$$

$$\text{แทนค่า C และ M} \quad CM_{11} = (33.2 + 50.7) / 2$$

$$CM_{11} = 41.9$$

ดังนั้นร้อยละการสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัว เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ มีค่า 41.9 โดยน้ำหนัก

2. ร้อยละการสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad CM_{3:1} = ((3 / 4) \times C + (1 / 4) \times M)$$

เมื่อ $CM_{3:1}$ = ร้อยละการสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัว เท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิที่ศึกษา

C = ร้อยละการสลายตัวของขี้ข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา

M = ร้อยละการสลายตัวของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิที่ศึกษา

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสลายตัวของขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ร้อยละการสลายตัวของขี้ข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่า 33.2 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละการสลายตัวของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่า 50.7 โดยน้ำหนัก ดังนั้นร้อยละการสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{จากสูตร} \quad CM_{3:1} = ((3 / 4) \times C + (1 / 4) \times M)$$

$$\text{แทนค่า C และ M} \quad CM_{3:1} = ((3 / 4) \times 33.2 + (1 / 4) \times 50.7)$$

$$CM_{3:1} = 37.6$$

ดังนั้นร้อยละการสลายตัวของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ มีค่า 37.6 โดยน้ำหนัก

3. ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพด และมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad CM_{13} = ((1/4) \times C + (3/4) \times M)$$

เมื่อ CM_{13} = ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัว
เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิที่ศึกษา

C = ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่
อุณหภูมิที่ศึกษา

M = ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่
อุณหภูมิที่ศึกษา

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3
โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของขี้ข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศา-
เซลเซียสมีค่า 33.2 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของมูลวัวที่ได้จากการ
ทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่า 50.7 โดยน้ำหนัก ดังนั้นร้อยละการสลายตัวทางความ
ร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้
จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{จากสูตร} \quad CM_{13} = ((1/4) \times C + (3/4) \times M)$$

$$\text{แทนค่า C และ M} \quad CM_{13} = ((1/4) \times 33.2 + (3/4) \times 50.7)$$

$$CM_{13} = 46.3$$

ดังนั้นร้อยละการสลายตัวทางความร้อนของของผสมขี้ข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดย
น้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ มีค่า 46.3 โดยน้ำหนัก

ตารางผนวกที่ ก1 การสลายตัวทางความร้อนของซังข้าวโพด มูลวัว จากการทดลอง และของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว จากการคำนวณ

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	ซัง ข้าวโพด	มูลวัว	ซังข้าวโพด:มูลวัว (โดยน้ำหนัก)				ซัง ข้าวโพด	มูลวัว	ซังข้าวโพด:มูลวัว (โดยน้ำหนัก)		
			1:1	3:1	1:3				1:1	3:1	1:3
40	99.7	99.1	99.4	99.6	99.2	170	91.4	87.7	89.6	90.5	88.6
50	99.2	97.9	98.6	98.9	98.	180	91.2	87.6	89.4	90.3	88.5
60	98.6	96.0	97.3	97.9	96.7	190	91.8	87.5	89.3	90.2	88.4
70	97.8	93.6	95.7	96.7	94.6	200	90.9	87.4	89.2	90.0	88.3
80	96.8	91.6	94.2	95.5	92.9	210	90.8	87.2	89.0	89.9	88.1
90	95.7	90.4	93.0	94.4	91.7	220	90.6	87.0	88.8	89.7	87.9
100	94.8	89.6	92.2	93.5	90.9	230	90.4	86.6	88.5	89.4	87.5
110	94.0	89.0	91.5	92.8	90.3	240	89.9	86.0	88.0	88.9	87.0
120	93.3	88.6	91.0	92.2	89.8	250	88.8	85.0	86.9	87.9	86.0
130	92.8	88.3	90.6	91.7	89.4	260	86.1	83.5	84.8	85.4	84.2
140	92.3	88.1	90.2	91.2	89.2	270	81.5	81.3	81.4	81.4	81.4
150	91.9	88.0	89.9	90.9	89.0	280	75.9	78.4	77.2	76.6	77.8
160	91.6	87.8	89.7	90.7	88.8	290	71.1	75.2	73.1	72.1	74.2

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	ชั่ง ข้าวโพด	มูลวัว	ชั่งข้าวโพด:มูลวัว (โดยน้ำหนัก)				ชั่ง ข้าวโพด	มูลวัว	ชั่งข้าวโพด:มูลวัว (โดยน้ำหนัก)		
			1:1	3:1	1:3				1:1	3:1	1:3
300	67.2	71.7	69.5	68.3	70.6	430	31.2	47.7	39.5	35.3	43.6
310	63.7	68.0	65.9	64.8	67.0	440	30.7	46.8	38.7	34.7	42.8
320	59.9	64.3	62.1	61.0	63.2	450	30.2	45.8	38.0	34.0	41.9
330	54.2	60.9	57.6	55.9	59.2	460	29.6	44.9	37.3	33.4	41.1
340	45.8	58.3	52.0	48.9	55.2	470	29.2	44.0	36.6	32.9	40.3
350	38.8	56.4	47.6	43.2	52.0	480	28.8	43.1	36.0	32.3	39.5
360	36.4	55.0	45.7	41.1	50.4	490	28.3	42.3	35.3	31.8	38.8
370	35.4	53.8	44.6	40.0	49.2	500	28.0	41.5	34.7	31.3	38.1
380	34.6	52.7	43.7	39.1	48.2	510	27.6	40.7	34.2	30.9	37.4
390	33.9	51.7	42.8	38.3	47.2	520	27.3	39.9	33.6	30.4	36.8
400	33.2	50.7	41.9	37.6	46.3	530	27.0	39.2	33.1	30.1	36.2
410	32.5	49.7	41.1	36.8	45.4	540	26.7	38.5	32.6	29.7	35.6
420	31.9	48.7	40.3	36.1	44.5	550	26.4	37.9	32.2	29.3	35.0

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					อุณหภูมิ (องศา เซลเซียส)	น้ำหนัก (ร้อยละโดยน้ำหนัก)				
	ซัง ข้าวโพด	มูลวัว	ซังข้าวโพด:มูลวัว (โดยน้ำหนัก)				ซัง ข้าวโพด	มูลวัว	ซังข้าวโพด:มูลวัว (โดยน้ำหนัก)		
			1:1	3:1	1:3				1:1	3:1	1:3
560	26.2	37.2	31.7	29.0	34.5	690	24.1	31.2	27.6	25.8	29.4
570	25.9	36.6	31.3	28.6	34.0	700	23.9	30.9	27.4	25.7	29.2
580	25.7	36.1	30.9	28.3	33.5	710	23.8	30.6	27.2	25.5	28.9
590	25.5	35.5	30.5	28.0	33.0	720	23.7	30.4	27.1	25.4	28.7
600	25.3	35.0	30.2	27.8	32.6	730	23.6	30.1	26.9	25.2	28.5
610	25.2	34.5	29.8	27.5	32.2	740	23.5	29.8	26.7	25.1	28.2
620	25.9	34.0	29.5	27.2	31.8	750	23.4	29.6	26.5	25.0	28.0
630	24.8	33.6	29.2	27.0	31.4	760	23.3	29.3	26.3	24.8	27.8
640	24.7	33.2	28.9	26.8	31.0	770	23.3	29.1	26.2	24.7	27.6
650	24.5	32.8	28.6	26.6	30.7	780	23.2	28.9	26.0	24.6	27.4
660	24.4	32.4	28.4	26.4	30.4	790	23.1	28.6	25.9	24.5	27.3
670	24.3	32.0	28.1	26.2	30.1	800	23.1	28.6	25.8	24.5	27.2
680	24.2	31.6	27.9	26.0	29.7						



ภาคผนวก ข

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไฟโรไลซิสชีวมวลที่ได้จากการคำนวณ
และร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไฟโรไลซิสชีวมวลที่ได้จากการคำนวณ

การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไฟโรไลซิสของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วน 3:1, 1:1, และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้ดังนี้

1. ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไฟโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad Y_{11} = (Y_C + Y_M) / 2$$

เมื่อ Y_{11} = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ

Y_C = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของซังข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

Y_M = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของซังข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสมีค่า 19.3 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของมูลวัวที่ได้จากการทดลอง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่า 16.9 โดยน้ำหนัก ดังนั้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{จากสูตร} \quad Y_{11} = (Y_C + Y_M) / 2$$

$$\text{แทนค่า } Y_C \text{ และ } Y_M \quad Y_{11} = (19. + 16.9) / 2$$

$$Y_{11} = 18.1$$

ดังนั้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ มีค่า 18.1 โดยน้ำหนัก

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและของแข็ง ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ซึ่งสามารถสรุปร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณดังตารางผนวกที่ ข1

2. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad Y_{31} = ((3 / 4) \times Y_C + (1 / 4) \times Y_M)$$

เมื่อ Y_{31} = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ

Y_C = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของซังข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

Y_M = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของซังข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่า 19.3 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของมูลวัวที่ได้จากการทดลอง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่า 16.9 โดยน้ำหนัก ดังนั้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{จากสูตร} \quad Y_{31} = ((3 / 4) \times Y_C + (1 / 4) \times Y_M)$$

$$\text{แทนค่า } Y_C \text{ และ } Y_M \quad Y_{31} = ((3 / 4) \times 19.3 + (1 / 4) \times 16.9)$$

$$Y_{31} = 18.8$$

ดังนั้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 3:1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ มีค่า 18.8 โดยน้ำหนัก

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและของแข็ง ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ซึ่งสามารถสรุปร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณดังตารางผนวกที่ ข1

3. การคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่ได้จากการคำนวณ

$$\text{สูตรการคำนวณ} \quad Y_{13} = ((1/4) \times Y_C + (3/4) \times Y_M)$$

เมื่อ Y_{13} = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ

Y_C = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของซังข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

Y_M = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของมูลวัวที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของซังข้าวโพดที่ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่า 19.3 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของมูลวัวที่ได้จากการทดลอง ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส มีค่า 16.9 โดยน้ำหนัก ดังนั้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{จากสูตร} \quad Y_{13} = ((1/4) \times Y_C + (3/4) \times Y_M)$$

$$\text{แทนค่า } Y_C \text{ และ } Y_M \quad Y_{13} = ((1/4) \times 19.3 + (3/4) \times 16.9)$$

$$Y_{13} = 17.5$$

ดังนั้นร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัว เท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ได้จากการคำนวณ มีค่า 17.5 โดยน้ำหนัก

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและของแข็ง ที่ได้จากการคำนวณ สามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ซึ่งสามารถสรุปร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณดังตารางผนวกที่ ข1

ตารางผนวกที่ ข1 ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์จากการไพโรไลซิสของซังข้าวโพดและมูลวัว จากการทดลอง และของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก จากการคำนวณ ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ชีวมวล	ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์		
	แก๊ส	ของเหลว	ของแข็ง
ซังข้าวโพด	19.3	48.0	32.7
มูลวัว	16.9	27.3	55.9
ซังข้าวโพด:มูลวัว (1:1 โดยน้ำหนัก)	18.1	37.6	44.3
ซังข้าวโพด:มูลวัว (3:1 โดยน้ำหนัก)	18.8	42.8	38.5
ซังข้าวโพด:มูลวัว (1:3 โดยน้ำหนัก)	17.5	32.4	50.1

4. การคำนวณร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

การคำนวณร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน สามารถคำนวณได้ดังสูตร

$$\text{สูตรคำนวณ} \quad \%Y = (100 \times (Y_E - Y_C)) / Y_C$$

เมื่อ $\%Y$ = ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน

Y_E = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทดลอง

Y_C = ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการคำนวณ

ตัวอย่างการคำนวณร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส

ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก จากการทดลองมีค่า 20.0 โดยน้ำหนัก ในขณะที่ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก จากการคำนวณมีค่า 18.1 โดยน้ำหนัก ดังนั้น ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสูตร} \quad \%Y &= ((Y_E - Y_C) \times 100) / Y_C \\ \text{แทนค่า } Y_E \text{ และ } Y_C \quad \%Y &= ((20 - 18.1) \times 100) / 18.1 \\ \%Y &= 10.2 \end{aligned}$$

ดังนั้นร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊สของของผสมซังข้าวโพดและมูลวัวเท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก มีค่า 10.2 โดยน้ำหนัก

ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวและของแข็งสามารถคำนวณได้เช่นเดียวกับร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส ซึ่งสามารถสรุปร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ดังตารางผนวกที่ ข2

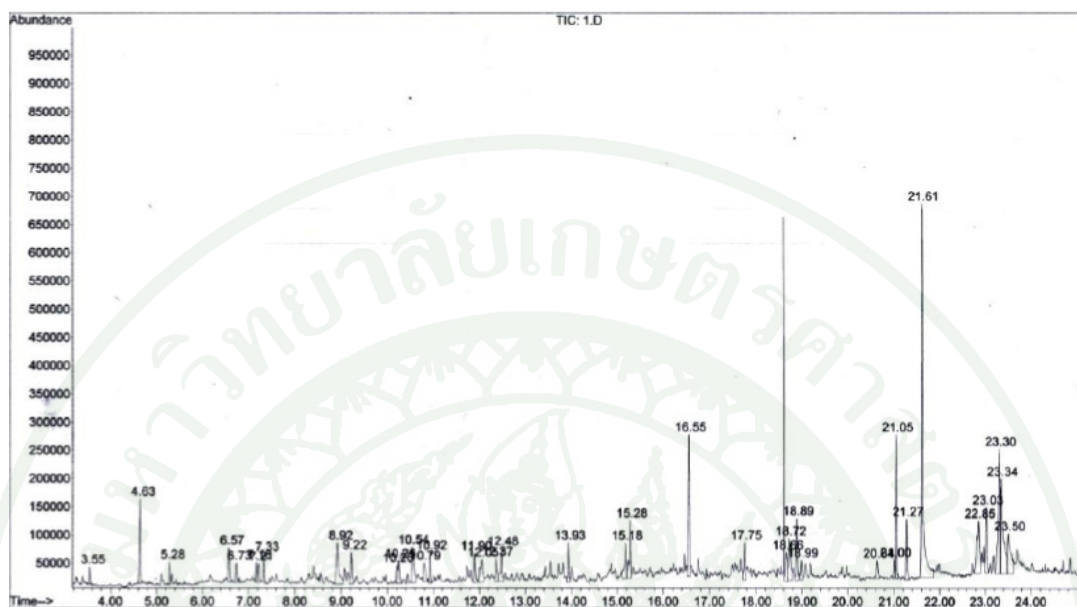
ตารางผนวกที่ ข2 ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กันของผลิตภัณฑ์ของแข็ง ของเหลว และแก๊สของการไพโรไลซิสของผสมของซังข้าวโพดและมูลวัวที่อัตราส่วนเท่ากับ 3:1, 1:1 และ 1:3 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส

ชีวมวล	ร้อยละของผลของการเสริมฤทธิ์กัน		
	แก๊ส	ของเหลว	ของแข็ง
ซังข้าวโพด:มูลวัว (1:1 โดยน้ำหนัก)	10.2	4.7	-8.2
ซังข้าวโพด:มูลวัว (3:1 โดยน้ำหนัก)	20.8	-1.7	-7.6
ซังข้าวโพด:มูลวัว (1:3 โดยน้ำหนัก)	-3.1	10.9	-6.0



ภาคผนวก ค
ข้อมูลการวิเคราะห์ GC-MS ของน้ำมันซีมวล

ข้อมูลการวิเคราะห์ GC-MS ของน้ำมันชีวมวล



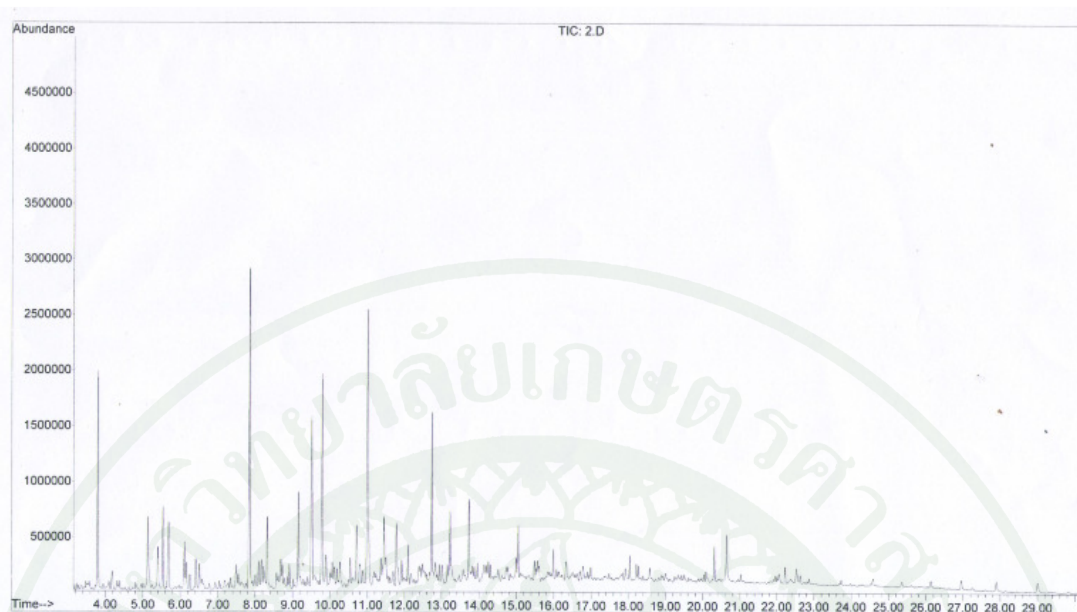
ภาพผนวกที่ ค1 โครมาโทแกรมองค์ประกอบสารในน้ำมันชีวมวลส่วนวัตถุดิบที่ได้ออกจากไพโรไลซิสซึ่งข้าวโพด

ตารางผนวกที่ ค1 ผลของโครมาโทแกรมภาพผนวกที่ ค1 ประกอบด้วย ชื่อสารประกอบ สูตรโมเลกุล และร้อยละพื้นที่ทั้งหมด

สารประกอบ	สูตรโมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด
phenol	C_6H_6O	7.2
2-methyl phenol	C_7H_8O	4.2
4-methyl phenol	C_7H_8O	7.3
2-methoxy phenol	$C_7H_8O_2$	5.3
2, 6-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	0.8
2, 3-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	2.9
4-ethyl phenol	$C_8H_{10}O$	19.3
2-ethyl phenol	$C_8H_{10}O$	0.9
2-methoxy-4-methyl phenol,	$C_8H_{10}O_2$	3.6
2, 6-dimethoxy phenol	$C_8H_{10}O_3$	2.8

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

สารประกอบ	สูตรโมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด
3-ethyl-5-methyl phenol	$C_9H_{12}O$	1.0
2-(1-methylethyl) phenol	$C_9H_{12}O$	1.8
4-ethyl-2-methoxy phenol	$C_9H_{12}O_2$	7.4
4-ethenyl-2-methoxy phenol	$C_9H_{12}O_2$	3.3
2, 6-dimethoxy-4-(2-propenyl) phenol	$C_{11}H_{14}O_3$	0.6
2, 4-bis(1,1-dimethylethyl) phenol	$C_{14}H_{22}O$	8.7
4-methyl benzaldehyde	C_8H_8O	3.0
n-hexadecanoic acid	$C_{16}H_{32}O_2$	1.0
2-furyl methyl ketone	$C_6H_6O_2$	0.6
3-methyl-2-cyclopenten-1-one	C_6H_8O	1.4
2-methyl-2-cyclopenten-1-one	C_6H_8O	1.0
2-hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one	$C_6H_8O_2$	1.5
2, 3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O$	1.1
3-ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O_2$	0.8
7, 9-di-tert-butyl-1-oxaspiro(4, 5)deca-6, 9-diene-2, 8-dione	$C_{17}H_{26}O_3$	1.5
2-furanmethanol	$C_5H_6O_2$	0.8
cis-isoeugenol	$C_{10}H_{12}O_2$	1.2
hexadecanoic acid methyl ester	$C_{17}H_{32}O_2$	0.9
p-xylene	C_8H_{10}	0.7
1, 2, 3-trimethoxy benzene	$C_9H_{12}O_3$	1.4
2, 5-dimethyl-2, 4-hexadiene	C_8H_{14}	0.6
n-tetradecane	$C_{14}H_{30}$	0.6
heptacosane	$C_{27}H_{56}$	0.8
3-methylidene-anti-tricyclo	-	1.7
total		97.7



ภาพผนวกที่ ค2 โครมาโทแกรมองค์ประกอบสารในน้ำมันชีวมวลส่วนวัตถุดิบอินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสมูลวัว

ตารางผนวกที่ ค2 ผลของโครมาโทแกรมภาพผนวกที่ ค2 ประกอบด้วย ชื่อสารประกอบ สูตรโมเลกุล และร้อยละพื้นที่ทั้งหมด

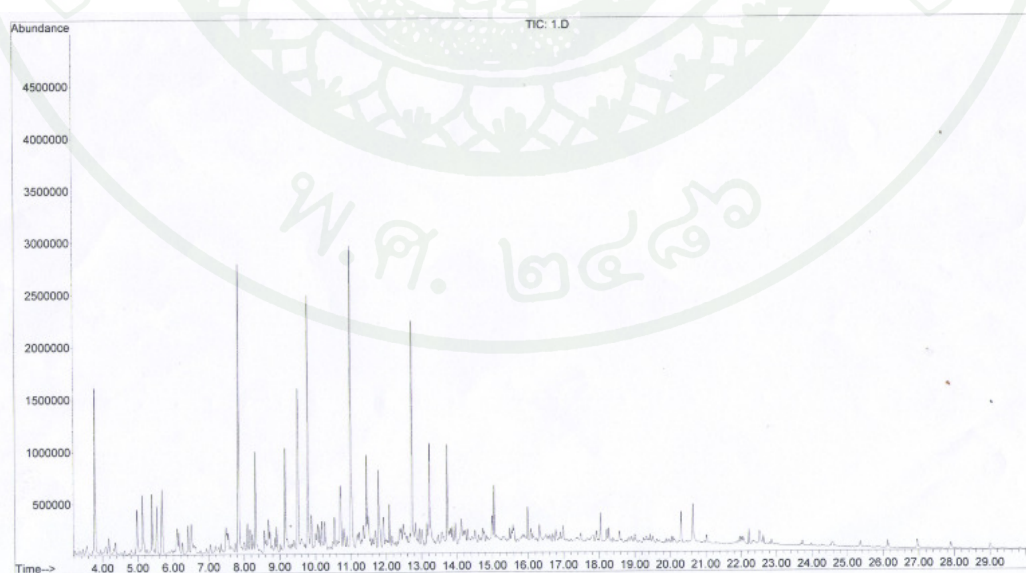
สารประกอบ	สูตรโมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด
2-furan methanol	$C_5H_6O_2$	7.4
phenol	C_6H_6O	7.7
2-methyl phenol	C_7H_8O	2.1
4-methyl phenol	C_7H_8O	4.6
2-methoxy phenol	$C_7H_8O_2$	4.3
2, 6-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	1.2
3, 5-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	1.6
4-ethyl phenol	$C_8H_{10}O$	6.3
2-ethyl phenol	$C_8H_{10}O$	0.8
2-methoxy-4-methyl phenol,	$C_8H_{10}O_2$	2.5
2, 6-dimethoxy phenol	$C_8H_{10}O_3$	2.0
3-ethyl-5-methyl phenol	$C_9H_{12}O$	2.5

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

สารประกอบ	สูตร โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด
2-methoxy-4-vinylphenol	$C_9H_{10}O_2$	2.6
2, 4, 6-trimethyl phenol	$C_9H_{12}O$	1.2
2-methoxy-5-(1-propenyl) phenol	$C_{10}H_{12}O_2$	2.4
2-methoxy-4-propyl phenol	$C_{10}H_{14}O_2$	0.6
2-ethyl -5-n-propylphenol	$C_{11}H_{14}O$	0.6
2, 6-dimethoxy-4-(2-propenyl) phenol	$C_{11}H_{14}O_3$	0.4
4-methyl benzaldehyde	C_8H_8O	1.6
2-methyl-propanoic acid	$C_4H_8O_2$	1.5
butanoic acid	$C_4H_8O_2$	0.2
tetradecanoic acid	$C_{14}H_{28}O_2$	0.5
n-hexadecanoic acid	$C_{16}H_{32}O_2$	1.3
octadecanoic acid	$C_{18}H_{36}O_2$	0.5
cyclopentanone	C_5H_8O	0.5
1-(2-furanyl)-ethanone	$C_6H_6O_2$	0.5
2-methyl-2-cyclopenten-1-one	C_6H_8O	0.8
2-hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one	$C_6H_8O_2$	0.7
4-hydroxy-4-methyl-2-pentanone	$C_6H_{12}O_6$	1.7
2, 3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O$	0.7
2-furanmethanol	$C_5H_6O_2$	1.0
2-methoxy benzeneethanol	$C_9H_{12}O_2$	3.4
2, 3-dihydro-1H-inden-5-ol	$C_9H_{10}O$	0.6
1-(5-pentyl-2-furyl)ethan-1-ol	$C_{11}H_{19}O_2$	0.8
benzoic acid methyl ester	$C_8H_8O_2$	0.8
hexadecanoic acid methyl ester	$C_{17}H_{32}O_2$	0.7
9-octadecanoic acid methyl ester	$C_{19}H_{36}O_2$	0.4
toluene	C_7H_8	4
styrene	C_8H_8	1.5

ตารางผนวกที่ ค2 (ต่อ)

สารประกอบ	สูตร โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด
p-xylene	C_8H_{10}	1.6
ethyl benzene	C_8H_{10}	1.5
1, 2, 3-trimethoxy benzene	$C_9H_{12}O_3$	0.5
1-ethyl-2-methyl benzene	C_9H_{12}	0.9
1-methoxy-4-methyl-benzene	C_9H_{12}	0.6
naphthalene	$C_{10}H_8$	0.8
(2-methyl-2-propenyl)-benzene	$C_{10}H_{12}$	0.6
1, 3-dimethyl naphthalene	$C_{12}H_{12}$	0.7
3-(2-methyl-propenyl)-1H-indene	$C_{13}H_{14}$	0.9
1-methyl-4-(1-methyletenyl)-cyclohexene	$C_{10}H_{16}$	1.1
pentadecane	$C_{15}H_{30}$	0.8
nonadecane	$C_{19}H_{40}$	0.4
eicosane	$C_{20}H_{42}$	0.5
total		85.4



ภาพผนวกที่ ค3 โครมาโทแกรมองค์ประกอบสารในน้ำมันชีวมวลส่วนวิทยาศาสตร์อินทรีย์ที่ได้จากการไพโรไลซิสซังข้าวโพดต่อมูลวัวเท่ากับ 1:3 โดยน้ำหนัก

ตารางผนวกที่ ค3 ผลของโครมาโทแกรมภาพผนวกที่ ค3 ประกอบด้วย ชื่อสารประกอบ สูตรโมเลกุล และร้อยละพื้นที่ทั้งหมด

สารประกอบ	สูตรโมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด
phenol	C_6H_6O	7.4
2, 4 diaminophenol	C_6H_7NO	0.8
2-methyl phenol	C_7H_8O	2.5
4-methyl phenol	C_7H_8O	4.4
2-methoxy phenol	$C_7H_8O_2$	5.3
4-vinylphenol	C_8H_8O	2.1
2, 6-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	1.2
3, 5-dimethyl phenol	$C_8H_{10}O$	1.5
4-ethyl phenol	$C_8H_{10}O$	7.7
2-ethyl phenol	$C_8H_{10}O$	0.9
2-methoxy-4-methyl phenol,	$C_8H_{10}O_2$	1.5
2-methoxy-6-methylphenol	$C_8H_{10}O_2$	0.6
4-methoxy-3-methyl phenol	$C_8H_{10}O_2$	0.9
2, 6-dimethoxy phenol	$C_8H_{10}O_3$	2.1
3-ethyl-5-methyl phenol	$C_9H_{12}O$	0.9
3-ethyl-5-methyl phenol	$C_9H_{12}O$	0.9
4-ethyl-3-methyl phenol	$C_9H_{12}O$	1.4
4-ethyl-2-methoxy phenol	$C_9H_{12}O_2$	3.0
2-methoxy-4-(1-propenyl) phenol	$C_{10}H_{12}O_2$	2.3
2-methoxy-4-(2-propenyl) phenol	$C_{10}H_{12}O_2$	0.4
2-methoxy-4-propyl phenol	$C_{10}H_{14}O_2$	3.4
2-ethyl -5-n-propyphenol	$C_{11}H_{14}O$	0.4
2, 6-dimethoxy-4-(2-propenyl) phenol	$C_{11}H_{14}O_3$	0.8
2-furancarboxaldehyde (furfural)	$C_5H_4O_2$	1.2
2-methyl propanoic anhydride	$C_8H_{14}O_3$	2.2
n-hexadecanoic acid	$C_{16}H_{32}O_2$	1.2

ตารางผนวกที่ ก3 (ต่อ)

สารประกอบ	สูตรโมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด
octadecanoic acid	$C_{18}H_{36}O_2$	0.5
2(3h)-furanone dihydro	$C_4H_6O_2$	1.0
cyclopentanone	C_5H_8O	0.4
2-methyl-2-cyclopenten-1-one	C_6H_8O	0.7
2-hydroxy-3-methyl-2-cyclopenten-1-one	$C_6H_8O_2$	1.2
4-hydroxy-4-methyl-2-pentanone	$C_6H_{12}O_6$	1.4
2, 3-dimethyl-2-cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O$	0.8
3-ethylcyclopent-2-en-1-one	$C_7H_{10}O$	0.3
3-ethyl-2-hydroxy-2-cyclopenten-1-one	$C_7H_{10}O_2$	0.7
2-furanmethanol	$C_5H_6O_2$	1.3
tetrahydro-2-furanmethanol	$C_5H_{10}O_2$	0.3
2-methoxy benzeneethanol	$C_9H_{12}O_2$	4.4
2, 3-dihydro-1H-inden-1-ol	$C_9H_{10}O$	0.6
benzoic acid methyl ester	$C_8H_8O_2$	0.8
benzeneacetic acid methyl ester	$C_9H_{10}O_2$	1
hexadecanoic acid methyl ester	$C_{17}H_{32}O_2$	0.7
10-octadecanoic acid methyl ester	$C_{19}H_{36}O_2$	0.4
octadecenoic acid methyl ester	$C_{19}H_{34}O_2$	0.2
toluene	C_7H_8	3.4
styrene	C_8H_8	1.1
p-xylene	C_8H_{10}	1.7
ethyl benzene	C_8H_{10}	1.0
1-ethyl-4-methyl benzene	C_9H_{12}	1.2
1, 2, 3-trimethoxy benzene	$C_9H_{12}O_3$	0.6
1-methoxy-4-methyl-benzene	C_9H_{12}	0.7
(2-methyl-1-propenyl) benzene	$C_{12}H_{12}$	0.5

ตารางผนวกที่ ๓ (ต่อ)

สารประกอบ	สูตร โมเลกุล	ร้อยละพื้นที่ทั้งหมด
2, 6 dimethyl naphthalene	$C_{12}H_{12}$	0.6
1, 4, 6 trimethyl naphthalene	$C_{13}H_{14}$	0.8
3-octyne	C_8H_{14}	0.7
1, 4-dimethylcyclohexene	C_8H_{14}	0.4
1-pentadecene	$C_{15}H_{30}$	0.4
nonadecane	$C_{19}H_{40}$	0.2
eicosane	$C_{20}H_{42}$	0.3
total		87.3

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายณัฐ ชื่อลือชา
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 12 ตุลาคม 2530
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	ระดับอุดมศึกษา วศ.บ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ประวัติการทำงาน	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนผู้ช่วยสอนจากโครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและ วิจัยด้านวิศวกรรม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ (2553)