



วว.

โครงการวิจัยที่ ภ. 49-09 / ย. 2 / รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการ และใช้ประโยชน์ผลผลิตจากกระบวนการ แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส



สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย

โครงการวิจัยที่ ภ. 49-09

วิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และการเพิ่มมูลค่า
ขยะด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส

โครงการย่อยที่ 2

วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการ และใช้ประโยชน์ผลผลิตจากกระบวนการ
แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส

รายงานฉบับที่ 1 (ฉบับสมบูรณ์)

วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการ และใช้ประโยชน์ผลผลิตจากกระบวนการ
แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส

โดย

ชเนต อุทิศธรรม

วีรชัย สุนทรรังสรรค์

รมณีย์ หวังดีธรรม

โสภณ พรหมสุวรรณ

วิโรจน์ มีสุนทร

ประวิทย์ เทพนุ้ย

พงษ์ศักดิ์ หงษ์เจริญศรี

บรรณาธิการ

ลิขิต หาญางสิทธิ์

บุญเรียม น้อยชุมแพ

พิสุทธิ์ พลับสวาท

วว., กรุงเทพฯ 2555

สงวนลิขสิทธิ์

รายงานฉบับนี้ได้รับการอนุมัติให้พิมพ์โดย
ผู้ว่าการสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย



(นายขงวุฒิ เสาวพฤกษ์)

ผู้ว่าการ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอแสดงความขอบคุณ เจ้าหน้าที่เทคนิคของฝ่ายสิ่งแวดล้อมนิเวศวิทยาและพลังงานที่ได้ช่วยให้การดำเนินงานลุล่วงด้วยดี และเจ้าหน้าที่ห้องสมุดของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ได้อำนวยความสะดวกต่อการสืบค้นข้อมูลการวิจัยอย่างดียิ่ง.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
สารบัญตาราง	ค
สารบัญรูป	ง
ABSTRACT	1
บทคัดย่อ	2
1. บทนำ	3
2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	21
3. ผลการทดลองและวิจารณ์	39
4. สรุปผลการทดลอง	51
5. ข้อเสนอแนะ	54
6. บรรณานุกรม	55
7. ภาคผนวก	58

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1.1	องค์ประกอบของก๊าซที่ได้ (โดยปริมาตร, %) และค่าความร้อน	8
ตารางที่ 1.2	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเทคโนโลยีไพโรไลซิสชนิดต่างๆ	12
ตารางที่ 1.3	รายละเอียดข้อเสนอต่างๆที่จะลดการสูญเสีย	13
ตารางที่ 1.4	องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากระบวนการไพโรไลซิส	14
ตารางที่ 1.5	คุณสมบัติของชีวมวลชนิดต่างๆ	16
ตารางที่ 1.6	องค์ประกอบของชีวมวลชนิดต่างๆ	17
ตารางที่ 1.7	รายละเอียดสัดส่วนต่างๆของพืชชีวมวลทั้ง 9 ประเภท	19
ตารางที่ 1.8	ศักยภาพพลังงานเหลือทิ้งจากพืชชีวมวลทั้ง 9 ชนิด	20
ตารางที่ 3.1	คุณสมบัติเชื้อเพลิงของไม้ยูคาลิปตัส	39
ตารางที่ 3.2	คุณสมบัติเชื้อเพลิงของถ่านไม้ยูคาลิปตัส	40
ตารางที่ 3.3	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันด้วยไม้ยูคาลิปตัส	41
ตารางที่ 3.4	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันด้วยถ่านไม้ยูคาลิปตัส	41
ตารางที่ 3.5	เปรียบเทียบการนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปผลิตไฟฟ้าและความร้อน	43
ตารางที่ 3.6	ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเดินระบบไพโรไลซิสด้วยไม้ยูคาลิปตัส	45
ตารางที่ 3.7	ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่แยกได้จากของเหลวสีดำ	46
ตารางที่ 3.8	คุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันดิน	47
ตารางที่ 3.9	คุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้ยูคาลิปตัส	48

สารบัญรูป

	หน้า	
รูปที่ 1.1	ผลิตภัณฑ์ที่ได้และมีการผลิตเชิงพาณิชย์จากน้ำส้มควันไม้	13
รูปที่ 2.1	รายละเอียดเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันเปิดแบบไหลลง	22
รูปที่ 2.2	รายละเอียดเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส	23
รูปที่ 2.3	รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ประกอบระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส	24
รูปที่ 2.4	ชุดอบแห้ง	25
รูปที่ 2.5	ชุดไซโคลน	25
รูปที่ 2.6	ชุดควบแน่นแบบท่อ	26
รูปที่ 2.7	ชุดดักเก็บน้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้	27
รูปที่ 2.8	ชุดระบายความร้อนแบบคอคอด	28
รูปที่ 2.9	ชุดพัดลมดูดก๊าซ	29
รูปที่ 2.10	ชุดดักเก็บความชื้น	29
รูปที่ 2.11	เครื่องมือวัดก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์	30
รูปที่ 2.12	เครื่องมือวัดปริมาณน้ำมันดิน	31
รูปที่ 2.13	เครื่องวัดค่าความร้อน	32
รูปที่ 2.14	เครื่องวัดความชื้น	32
รูปที่ 2.15	เครื่องวัดสารระเหยและซีเอ็น	33
รูปที่ 2.16	เครื่องวัดค่าความถ่วงจำเพาะ	34
รูปที่ 2.17	เครื่องกลั่นลำดับส่วน	34
รูปที่ 2.18	เครื่องเหวี่ยงแยก	35
รูปที่ 2.19	วัตถุดิบไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส	36
รูปที่ 2.20	วัตถุดิบถ่านไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน	36
รูปที่ 3.1	ผลิตภัณฑ์ของเหลวสีดำที่ได้จากระบบไพโรไลซิส	45
รูปที่ 3.2	น้ำมันดินที่ได้จากวัตถุดิบไม้ยูคาลิปตัส	47
รูปที่ 3.3	น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากวัตถุดิบไม้ยูคาลิปตัส	48

RESEARCH AND DEVELOPMENT ON TECHNOLOGIES FOR MANAGING AND UTILIZING PRODUCTS FROM GASIFICATION AND PYROLYSIS

**Thanes Utistham, Wirachai Soontornrangson, Romanie Wungdheethum,
Sophon Prohmsuwan, Viroth Meesoontorn, Pravit Thepnui
and Pongsak Hongcharaeusri**

ABSTRACT

The main objective of this research was to evaluate the suitable options in managing and utilizing products from gasification and hydrolysis systems, syngas and tar respectively. The results showed that the option to use syngas from gasification system as fuel source in boiler instead of fuel oil (Grade C) gained the most added value when compared to that fuel source in engine for electricity generation. Using syngas in boiler could save energy of 45 baht/hour at feeding wood rate of 87 kilograms/hour. In case of tar from hydrolysis system, it should be used as fuel source in boiler with fuel oil (Grade C).

วิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและใช้ประโยชน์ผลผลิตจาก กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส

ชเนต อุทิศธรรม¹, วีรชัย สุนทรรังสรรค์¹, รมณีย์ หวังดีธรรม¹, โสภณ พรหมสุวรรณ¹,
วิโรจน์ มีสุนทร¹, ประวิทย์ เทพนุ้ย¹ และพงษ์ศักดิ์ หงษ์เจริญศรี¹

บทคัดย่อ

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลัก เพื่อที่จะหาแนวทางที่เหมาะสมในการนำผลิตภัณฑ์จากระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสไปใช้ประโยชน์, ก๊าซเชื้อเพลิงจากเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันและน้ำมันดินจากเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ควรพิจารณา. ผลการวิเคราะห์ได้แสดงว่า ก๊าซเชื้อเพลิงจากเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน ควรนำไปเป็นแหล่งพลังงานให้กับหม้อไอน้ำเพื่อทดแทนน้ำมันเตาเกรดซี ให้ผลตอบแทนสูงสุด, เทียบกับการนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้า, คิดเป็นมูลค่าที่สามารถประหยัดพลังงานได้เทียบเท่า 45 บาท/ชั่วโมงที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิงไม้ 87 กิโลกรัม/ชั่วโมง. สำหรับน้ำมันดินจากเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสควรนำไปเป็นแหล่งพลังงานให้กับหม้อไอน้ำเพื่อใช้ร่วมกับน้ำมันเตาเกรดซี.

¹ฝ่ายสิ่งแวดล้อมนิเวศวิทยาและพลังงาน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

1. บทนำ

การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมของประเทศไทยได้เติบโตอย่างมากตลอดระยะเวลา 20 ปีที่ผ่านมา โดยจำเป็นต้องอาศัยพลังงานเป็นตัวขับเคลื่อนอันดับหนึ่ง. เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นพลังงานชนิดหนึ่งที่มีสัดส่วนการใช้ค่อนข้างมาก ทำให้เกิดมลพิษที่ปลดปล่อยจากการใช้เป็นจำนวนมาก เช่นเดียวกัน ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างต่อเนื่อง. ทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถลดปัญหาลดลงได้คือการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อทดแทนการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เนื่องจากเชื้อเพลิงชีวมวลปลดปล่อยมลพิษน้อยกว่าเชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงชีวมวลที่มีศักยภาพนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิล เช่น แกลบ, ฟางข้าว, ชานอ้อย, เหง้ามันสำปะหลัง, กะลามะพร้าว และ กะลาปาล์ม เป็นต้น.

ตลอดระยะเวลาในช่วง 10 ปีที่ผ่านมา ราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิลมีแนวโน้มที่สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้การใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงในภาคอุตสาหกรรมเริ่มกลับมาแพร่หลาย. อย่างไรก็ตาม เทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงานความร้อนที่ใช้ในปัจจุบันยังมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพของห้องเผาไหม้แบบเบดไม่เคลื่อนที่ (Fixed bed). วิธีการหนึ่งที่จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ดีขึ้น คือ การสลายเชื้อเพลิงชีวมวลให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงก่อนโดยอาศัยกระบวนการที่เรียกว่า แก๊สซิฟิเคชัน, จากนั้น จึงนำก๊าซที่ผลิตได้ไปใช้เป็นเชื้อเพลิงซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้สูงขึ้น. อีกกระบวนการหนึ่งที่คล้ายกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน คือ กระบวนการไพโรไลซิส ที่ให้ผลผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิง, น้ำมันดิน และถ่าน, ทำให้มีความเหมาะสมที่จะใช้กับวัสดุบางประเภทโดยเฉพาะพวกขยะ, วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมและเกษตรอุตสาหกรรม เช่น ขางรถยนต์เก่าและกะลามะพร้าว, ซึ่งให้ผลผลิตที่มีมูลค่าสูงกว่าการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง.

แม้ว่าเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสจะเป็นเทคโนโลยีที่มีมานาน, แต่ก็ยังได้รับการวิจัย พัฒนาอย่างต่อเนื่องและใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในกลุ่มประเทศยุโรปและอเมริกา โดยเฉพาะในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลมีราคาแพงและขยะที่เพิ่มปริมาณขึ้นจนกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม. ในส่วนของประเทศไทยได้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส ทั้งในระดับมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัยต่างๆ รวมทั้ง วว. มานานนับทศวรรษ. หากแต่การวิจัยและพัฒนาดังกล่าวกระทำเพียงในระดับห้องปฏิบัติการ และไม่มี

นำไปใช้งานหรือเผยแพร่ในเชิงการค้า เนื่องจากที่ผ่านมาการพัฒนาเทคโนโลยีทั้งสองยังไม่ถึงจุดที่มีความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เมื่อเทียบกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลซึ่งมีราคาถูกกว่า.

เมื่อพิจารณาถึงราคาของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน และมีแนวโน้มจะสูงขึ้นอีกในอนาคต จะเห็นว่าชีวมวลที่มาจากขยะ, ของเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรม และเกษตรอุตสาหกรรมมีศักยภาพที่จะเป็นแหล่งเชื้อเพลิงทดแทนสำหรับประเทศไทยในระยะยาว. นอกจากนี้เทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสยังได้รับการวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง จนสามารถใช้กับเชื้อเพลิงได้อย่างหลากหลายรูปแบบและมีประสิทธิภาพสูง, ไม่เฉพาะแต่จากกลุ่มประเทศที่พัฒนาแล้วเท่านั้น แต่ยังรวมถึงประเทศในกลุ่มที่กำลังพัฒนา เช่น ประเทศอินเดียและจีน เป็นต้น.

จากเหตุผลดังกล่าว สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทยจึงได้ดำเนินการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มการใช้พลังงานจากชีวมวลสำหรับการผลิตความร้อนและไฟฟ้า, โดยการจัดทำชุดโครงการวิจัยและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้เชื้อเพลิงชีวมวล และการเพิ่มมูลค่าขยะด้วยเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส ซึ่งประกอบด้วย 4 โครงการย่อย คือ:

- โครงการวิจัยย่อยที่ 1: โครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชัน และไพโรไลซิส.
- โครงการวิจัยย่อยที่ 2: โครงการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและใช้ประโยชน์ผลผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส.
- โครงการวิจัยย่อยที่ 3: โครงการพัฒนาการใช้ประโยชน์จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส.
- โครงการวิจัยย่อยที่ 4: โครงการเศรษฐศาสตร์พัฒนาเทคโนโลยีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส.

รายงานการวิจัยฉบับนี้ เป็นรายงานสรุปการดำเนินงานวิจัยตามโครงการการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีการจัดการและใช้ประโยชน์ผลผลิตจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส (โครงการวิจัยย่อยที่ 2) ซึ่งได้มีการดำเนินการจนลุล่วงตามวัตถุประสงค์แล้ว.

1.1 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส

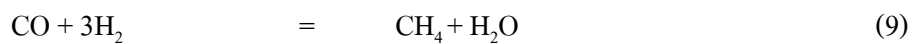
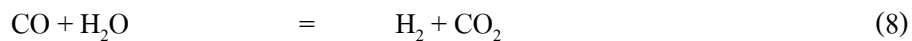
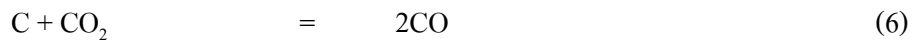
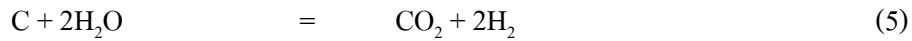
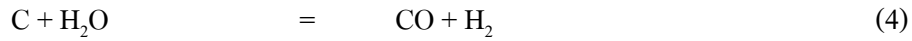
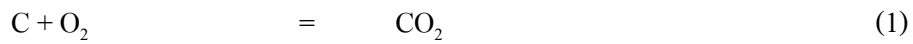
แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางเคมีความร้อนภายใต้สภาวะที่จำกัดปริมาณออกซิเจนและให้พลังงานในรูปแบบต่างๆ คือ ของเหลว, ของแข็ง และก๊าซ, ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพกว่ากระบวนการเผาไหม้ทั่วไป ที่จำเป็นจะต้องมีการเติมปริมาณอากาศให้มากเกินไปสำหรับการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นพลังงาน. แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางกายภาพ ทำให้มีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปกับอากาศที่มากเกินไป ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสเป็นการเปลี่ยนรูปพลังงานที่มีการสูญเสียน้อยกว่า, นอกจากนี้แล้วยังได้ผลิตภัณฑ์ในหลายรูปแบบซึ่งเหมาะต่อการนำไปเพิ่มมูลค่าต่อไป.

วัตถุดิบที่เหมาะสมกับการใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส คือ ชีวมวล. โดยทั่วไป ชีวมวลหมายถึงสิ่งที่ได้มาจากสารอินทรีย์หรือสิ่งมีชีวิต รวมทั้งผลผลิตที่ได้จากการเกษตร, การปศุสัตว์ และการทำป่าไม้ เช่น ไม้ฟืน, เศษไม้, แกลบ, มูลสัตว์, กากตะกอน เป็นต้น. ในที่นี้ กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสเป็นเครื่องมือที่เหมาะสมต่อการนำชีวมวลจากพืชซึ่งมีองค์ประกอบของคาร์บอน, ออกซิเจน และไฮโดรเจน, ในสัดส่วนประมาณร้อยละ 50, 43 และ 6 ตามลำดับ (Vigouroux 2001) นอกจากนี้ยังประกอบด้วยไนโตรเจน, โปแทสเซียม, ฟอสฟอรัส, ซัลเฟอร์ และอื่นๆ อีก. ส่วนสารประกอบของสารอินทรีย์ในชีวมวลเป็นเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในสัดส่วนประมาณร้อยละ 45, 35 และ 20 ตามลำดับ.

ในการนำชีวมวลจากพืชไปใช้ในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส ยังมีความแตกต่างในรายละเอียดของตัวแปรต่างๆ เช่น ปฏิกริยาที่เกิดขึ้น, ชนิดชีวมวล, ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เป็นต้น ซึ่งจะได้มีการกล่าวในรายละเอียดต่อไป.

1.1.1 ทฤษฎีแก๊สซิฟิเคชัน

เป็นกระบวนการแปรรูปชีวมวลซึ่งมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ (Carbonaceous materials) โดยอาศัยปฏิกิริยาการเผาไหม้ของชีวมวลในเตาปฏิกรณ์ที่มีออกซิเจนเพียง 1 ใน 3 ของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการสำหรับการเผาไหม้แบบปกติ. ปฏิกริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมีดังนี้ (Rezaiyan and Cheremisinoff 2005):



ปฏิกิริยา (1), (2) และ (3) เป็นปฏิกิริยาที่ทำให้เกิดพลังงานความร้อนสำหรับไล่ความชื้น, สลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในเชื้อเพลิง และทำให้อุณหภูมิของเตาปฏิกรณ์สูงขึ้นจนถึงจุดที่ปฏิกิริยาอื่นๆ ของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันเกิดได้อย่างต่อเนื่อง. ปฏิกิริยา (4) และ (5) คือปฏิกิริยาที่เรียกว่า Water-gas reactions ซึ่งเป็นปฏิกิริยาหลักของกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน, เป็นปฏิกิริยาคูดกลืนพลังงานความร้อน (Endothermic reaction) ที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะอุณหภูมิสูงและความดันต่ำ. ปฏิกิริยา (6) เรียกว่าปฏิกิริยา Boudurd reaction เป็นปฏิกิริยาคูดกลืนพลังงานความร้อนเช่นเดียวกับสมการ (1), แต่เป็นปฏิกิริยาที่เกิดอย่างช้าๆ เนื่องจากสภาวะที่ขาดแคลนออกซิเจน. ปฏิกิริยา (7) เรียกว่าปฏิกิริยา Hydro-gasification reaction, เป็นปฏิกิริยาที่เกิดช้ามากภายใต้สภาวะความดันต่ำ แต่จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะความดันสูง. ปฏิกิริยา (8) เรียกว่าปฏิกิริยา Water-gas shift reaction มีความสำคัญในกรณีที่ต้องการเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนในก๊าซเชื้อเพลิง (Syngas). ปฏิกิริยาดังกล่าวจะให้ก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดโดยการใช้น้ำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในช่วงอุณหภูมิไม่เกิน 260 องศาเซลเซียส, การเพิ่มความดันในปฏิกิริยาจะไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น. ปฏิกิริยา (9) เรียกว่าปฏิกิริยา Methanation reaction เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ ภายใต้สภาวะอุณหภูมิต่ำและขาดแคลนออกซิเจน. ปฏิกิริยา (10) เป็นปฏิกิริยาที่ไม่มีการดูดกลืนหรือคายพลังงานความร้อน. จากปฏิกิริยานี้ทำให้ทราบว่า การให้พลังงานความร้อนเข้าสู่กระบวนการเริ่มต้นในปริมาณที่ไม่สูงมาก สามารถทำให้เกิดกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันขึ้นได้. ผลผลิตส่วนใหญ่อยู่ในรูปของก๊าซที่เรียกว่า Synthetic gas, Producer gas, Syngas หรือก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบด้วยก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ประมาณร้อยละ 85 ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซมีเทน และ Complex hydrocarbons เช่น C_2H_2 , C_2H_4 . ก๊าซ

เชื้อเพลิง เป็นก๊าซที่มีค่าความร้อนจึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ, โรงไฟฟ้ากังหันก๊าซ หรือแม้กระทั่งเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการคมนาคมและขนส่ง.

การนำก๊าซเชื้อเพลิงไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ จะให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงโดยตรง เนื่องจากออกซิเจนสามารถรวมตัวกับก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อทำปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้ดีกว่าเชื้อเพลิงแข็ง. ผลการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพเชิงความร้อนระหว่างการเผาไหม้ชีวมวลโดยตรง (Mass burn) กับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลภายใต้สภาวะแวดล้อมเดียวกัน พบว่า การเผาไหม้ชีวมวลโดยตรงให้ประสิทธิภาพร้อยละ 21 ในขณะที่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันของชีวมวลให้ประสิทธิภาพถึงร้อยละ 36 (Cardiff University 2004, UH 2004; FOE 2002). ก๊าซที่ผลิตได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันมักจะมีสิ่งเจือปน เช่น ฝุ่นผง (particulate matters), น้ำมันดิน (tar) และสารที่มีคลอรีนหรือกำมะถันเป็นองค์ประกอบ (Chlorine or sulphur compounds) แต่สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำได้โดยตรง. ในกรณีที่นำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงขับเคลื่อนกังหันก๊าซหรือรถยนต์, ควรจะทำความสะอาดก๊าซโดยกำจัดหรือแยกสิ่งปนเปื้อนต่างๆ ออกเสียก่อน เพื่อเป็นการป้องกันการกัดกร่อนใบกังหันหรือเครื่องยนต์. กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไม่เพียงแต่ใช้ได้กับชีวมวลเท่านั้น หากแต่สามารถใช้ได้กับขยะหรือของเหลือทิ้งจากภาคอุตสาหกรรมและเกษตรอุตสาหกรรมที่เป็นสารอินทรีย์ และ Petroleum-based waste เช่น พลาสติก และยางรถยนต์เก่า เป็นต้น มีการทดลองนำกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันไปกลั่นสลายขยะที่เป็นสารอินทรีย์ประเภท Petroleum-based waste เพื่อเป็นการกำจัดหรือแปรรูปขยะให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่เป็นประโยชน์ ซึ่งเป็นการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมที่ได้ผลดีในระดับหนึ่ง แต่ก็มีข้อจำกัดที่กระบวนการแก๊สซิฟิเคชันให้ผลผลิตส่วนใหญ่เป็นก๊าซเชื้อเพลิง ทำให้ไม่เหมาะที่จะใช้เพิ่มมูลค่าของขยะอินทรีย์ประเภท Petroleum-based waste ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำมัน.

1.1.2 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ระบบแก๊สซิฟิเคชันจะให้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นก๊าซเกือบทั้งหมดและมีส่วนอื่นๆ อีกเล็กน้อยคือ ถ่าน (char) และน้ำมัน (tar). โดยทั่วไปผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้จะแปรผันสัดส่วนตามตัวแปรต่างๆ เช่น อุณหภูมิ, เวลาที่สัมผัสปฏิกิริยา, อัตราการส่งผ่านความร้อน, โครงสร้างของปฏิกรณ์ เป็นต้น. จากงานวิจัยของ Gallagher (2002) พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันเป็นก๊าซและถ่าน ในสัดส่วนประมาณร้อยละ 92 และ 8, ส่วนน้ำมันดินมีสัดส่วนไม่เกินร้อยละ 4.

จากที่ระบบแก๊สซิฟิเคชันให้ผลิตภัณฑ์ออกมาในสัดส่วนต่างๆ กันนั้น ได้มีงานวิจัยหลายชิ้นที่ศึกษาถึงตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น งานวิจัยของ Mukunda *et al.* (1994) ได้ทำการทดลองหาองค์ประกอบของก๊าซที่แปรผันตามเวลาช่วงต่างๆ โดยการจำกัดอัตราไหลของก๊าซร้อนที่ 2.5 - 2.7 ลบ.ม/ชม. (ก๊าซที่ออกจากระบบภายหลังผ่านระบบทำความสะอาดแล้ว) ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1.1 ซึ่งมีองค์ประกอบเฉลี่ยเป็นคาร์บอนมอนนอกไซด์ประมาณร้อยละ 18 - 20, ก๊าซไฮโดรเจนประมาณร้อยละ 16 - 20, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณร้อยละ 10 - 14, ก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 0.75 - 1.75 และที่เหลือเป็นก๊าซไนโตรเจน. องค์ประกอบเฉลี่ยของก๊าซเหล่านี้มีค่าความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 4.0 เป็น 4.4 MJ/kg ในเวลา 2 ชั่วโมงนับจากเวลาเริ่มต้นเก็บข้อมูล ซึ่งเป็นระยะเวลาที่ระบบได้เข้าสู่ภาวะคงที่แล้ว, องค์ประกอบของก๊าซที่ได้จะมีค่าค่อนข้างคงที่.

ตารางที่ 1.1 องค์ประกอบของก๊าซที่ได้ (โดยปริมาตร, %) และค่าความร้อน (Mukunda *et al.* 1994)

เวลา นาที	CO	H ₂	CH ₄	cmb	CO ₂	N ₂	H ₂ O	Ar	sum	μ	Q, MJ/kg
0	15.57	17.74	1.06	0.25	13.26	50.36	2.50	0.50	102.24	25.55	3.97
59	10.44	16.51	0.69	0.25	9.95	49.23	2.50	0.50	98.07	24.22	4.16
119	18.00	17.52	1.29	0.25	11.75	43.53	2.50	0.50	95.34	23.41	4.56
200	19.39	16.84	0.64	0.25	10.97	60.55	2.50	0.50	111.65	24.45	4.25
297	17.06	19.21	1.59	0.25	15.11	47.28	2.50	0.50	103.51	25.76	4.29
365	18.5	18.71	1.27	0.25	13.61	48.16	2.50	0.50	103.50	25.68	4.32
404	17.79	18.72	1.29	0.25	12.07	48.62	2.50	0.50	103.73	25.49	4.50
404	18.76	20.17	1.51	0.25	13.60	46.78	2.50	0.50	104.61	25.44	4.65

ส่วนการทดลองหาปริมาณของน้ำมันที่ได้จากระบบ โดยการดักจับทั้งที่ด้านก๊าซออก (hot end) และที่ผ่านระบบทำความสะอาดแล้ว (cold end) พบว่า ด้านก๊าซออกมีน้ำมัน 100 มก./ลบ.ม และลดลงเหลือ 10-30 มก./ลบ.ม ที่สภาวะไหลประมาณร้อยละ 50.

เนื่องจากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันจะให้ความสำคัญที่ปริมาณก๊าซที่ได้จากระบบมากที่สุด ในทางกลับกันปริมาณน้ำมันและถ่านที่ได้ต้องมีปริมาณน้อยที่สุดด้วย. ในส่วนของก๊าซที่ได้จะต้องมีส่วนของก๊าซเชื้อเพลิงสูง เช่น คาร์บอนมอนนอกไซด์, ไฮโดรเจน และมีเทน เป็นต้น และมีสัดส่วนของก๊าซอื่นๆ ต่ำ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น. ทั้งนี้เพื่อจะทำให้ได้ก๊าซที่มีค่าความร้อนสูง, ส่วนปริมาณน้ำมันจะมีความเกี่ยวข้องกับระบบทำความสะอาดก๊าซ ซึ่งจะทำให้มีผลโดยตรงต่อการลงทุนระบบสูงขึ้นหรือมีปัญหาเกี่ยวกับการทำสะอาดเครื่องยนต์ในกรณีที่น่าไปใช้เป็นเชื้อเพลิง. สิ่งเหล่านี้เป็นข้อกำหนดของโครงการย่อยที่ 1 ที่จะต้องทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์เหล่านี้และนำไปสู่การออกแบบปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันที่ให้ปริมาณก๊าซมาก, มีสัดส่วนก๊าซเชื้อเพลิงสูง และมีน้ำมันดินต่ำ.

1.1.3 ทฤษฎีไพโรไลซิส

เป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปชีวมวลให้เป็นพลังงานในปฏิกรณ์ที่มีปริมาณออกซิเจนน้อย เช่นเดียวกับกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันแต่ปริมาณออกซิเจนที่ใช้น้อยกว่าในระบบแก๊สซิฟิเคชัน. ภายใต้สภาวะดังกล่าว ชีวมวลจะสลายตัวเป็นไอ (organic vapour), ก๊าซ (Pyrolysis gas) และถ่าน ซึ่งเมื่อควบแน่นไอก็จะได้ผลิตภัณฑ์น้ำมัน (bio-oil) เป็นส่วนใหญ่ ประมาณร้อยละ 20 - 70 ของน้ำหนักชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่ปฏิกรณ์ (Nan *et al.* 1994). ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ. จากผลการศึกษา พบว่า กระบวนการไพโรไลซิสของไม้ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสจะให้ผลิตภัณฑ์น้ำมันสูงถึงร้อยละ 79 และจากการศึกษาเดียวกันนี้ พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของกระบวนการจะทำให้ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นแต่จะทำให้ปริมาณถ่านลดลง (BTG 2004a). ผลิตภัณฑ์น้ำมันที่ได้มีองค์ประกอบซับซ้อนประกอบด้วย oxygenated hydrocarbons และน้ำร้อยละ 15-50 โดยน้ำหนัก. ผลิตภัณฑ์น้ำมันมีน้ำเป็นองค์ประกอบร้อยละ 25 โดยน้ำหนัก มีค่าความร้อน 17 MJ/kg (20 GJ/m³) หรือประมาณร้อยละ 40 ของค่าความร้อนของน้ำมันเตาหรือน้ำมันดีเซล จึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำ, เตาอบ (furnace) ตลอดจนเครื่องยนต์ต่างๆ (BTG 2004b). นอกจากนี้ ก๊าซและถ่านที่เกิดจากกระบวนการไพโรไลซิสยังสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงได้เช่นเดียวกัน.

ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการไพโรไลซิสอีกชนิดหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจในแง่ของการเพิ่มมูลค่า คือ น้ำส้มควันไม้ (wood vinegar) หรือ Pyroligneous acid ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก (ร้อยละ 80-90) และองค์ประกอบทางเคมีอื่นๆ อีกกว่า 200 ชนิด (Wood Vinegar 2007). น้ำส้มควันไม้มีคุณสมบัติเป็นทั้งปุ๋ยและสารกำจัดแมลงโดยธรรมชาติ, จึงได้รับการคาดหมายว่า จะเป็น

ผลิตภัณฑ์อนุรักษ์ธรรมชาติอีกผลิตภัณฑ์หนึ่ง แต่ปัจจุบันยังมีราคาค่อนข้างแพง กล่าวคือ น้ำส้มควันไม้ที่ใช้สำหรับเป็นปุ๋ยหรือสารกำจัดแมลงพืชขายกันในราคา 30 ดอลลาร์สหรัฐต่อ 1.5 ลิตร. นอกจากนี้ ยังมีรายงานว่า หากนำมากลั่นแบบแยกลำดับส่วน (Fractional distillation) จะได้น้ำส้มควันไม้ที่มีความบริสุทธิ์สามารถใช้เป็นอาหารได้ โดยมีคุณสมบัติเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ เนื่องจากเชื่อกันว่า มีสรรพคุณในการขับพิษต่างๆจากร่างกาย (The Making of Wood Vinegar 2007).

เนื่องจากกระบวนการไพโรไลซิสสามารถรองรับความหลากหลาย ตลอดจนความชื้นของวัตถุดิบที่ใช้จึงนิยมนำไปใช้ในการกลั่นสลายขยะอินทรีย์ (เช่น ขยะชุมชน, เศษชีวมวล, เศษกระดาษ) Petroleum-based waste (เช่น กากน้ำมัน, พลาสติก) และยางรถยนต์เก่า. การนำกระบวนการไพโรไลซิสไปใช้ผลิตพลังงานหรือเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้งที่มีการดำเนินการมานานแล้ว เช่น ในประเทศญี่ปุ่นมีโรงผลิตไฟฟ้าจากขยะที่ใช้กระบวนการไพโรไลซิส ตั้งแต่ปี ค.ศ.1984, โดยที่โรงไฟฟ้างดังกล่าวมีกำลังผลิตติดตั้ง 2.2 เมกะวัตต์ สามารถป้อนขยะหลากหลายประเภท เช่น ขยะจากชุมชน, โรงงานอุตสาหกรรม, เศษชีวมวล และกากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสีย (ความชื้นสูงถึงร้อยละ 30) ได้ในอัตรา 6 ตัน/ชั่วโมง และโรงไฟฟ้างดังกล่าวกำลังมีการศึกษาเพื่อที่จะเพิ่มความสามารถของระบบให้สามารถรองรับขยะพลาสติก, กระดาษ และยางรถยนต์เก่า (JAE 2004).

การใช้กระบวนการไพโรไลซิสในการแปรรูปยางรถยนต์เก่า กำลังเป็นที่สนใจเนื่องจากเป็นขยะที่มีอัตราการย่อยสลายตามธรรมชาติที่ยาวนานมาก. นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ เช่น ก๊าซเชื้อเพลิง (ร้อยละ 10-30 โดยน้ำหนัก), น้ำมันหอมระเหย (Aromatic oil, ร้อยละ 38-55 โดยน้ำหนัก) และถ่านกัมมันต์ (ร้อยละ 33-38 โดยน้ำหนัก) (pyrolysis 2004) เป็นสิ่งที่เพิ่มมูลค่าของระบบดังกล่าว. การนำกระบวนการไพโรไลซิสไปใช้กำจัดหรือเพิ่มมูลค่าขยะในเชิงอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมได้รับความนิยมนิยม และมีการพัฒนาเพิ่ม ขึ้นเรื่อยๆ มีรายงานว่าในปัจจุบันมีการดำเนินการกว่า 100 แห่งในกว่า 20 ประเทศ (Juniper 2004).

1.1.4 ทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับระบบไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิสเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางเคมีความร้อน ในที่จำกัดปริมาณออกซิเจนที่อุณหภูมิช่วง 500 – 1,100 °ซ. เนื่องจากปฏิกิริยาในกระบวนการไพโรไลซิสเกิดในช่วงอุณหภูมิที่กว้างและได้แบ่งปฏิกิริยานี้ออกตามระยะเวลาที่เกิด คือตามอัตราความเร็ว

ในการให้ความร้อน ซึ่งแบ่งเป็นประเภทช้า, ปานกลาง และเร็ว. โดยทั่วไป กระบวนการไพโรไลซิสทั้งสามประเภทนี้ให้ผลิตภัณฑ์เป็น 3 ชนิด คือ:

- ส่วนที่เป็นของแข็ง ประกอบด้วย ถ่านคาร์บอนและขี้เถ้า.
- ส่วนที่เป็นของเหลว ประกอบด้วยน้ำ น้ำส้มควันไม้, น้ำมันดิน และสารอินทรีย์อื่นๆ เช่น แอซีโตน, กรดแอซีติก, เมทานอล เป็นต้น. น้ำเป็นส่วนที่ได้มาจากความชื้นในชีวมวลที่มีค่าตั้งแต่ร้อยละ 10 – 85. ความชื้นนี้ถูกขับออกจากชีวมวลในช่วงอุณหภูมิ 70 - 250 °ซ. ความชื้นที่ถูกขับออกอยู่ในช่วงอุณหภูมิกว้าง เนื่องจากจะขึ้นกับขนาดของชีวมวล เช่น ถ้าชีวมวลมีขนาดใหญ่ จำเป็นต้องใช้เวลาในการไล่ความชื้นที่อยู่ในแกน กลางซึ่งอุณหภูมิผิวนอกอาจร้อนถึง 250 °ซ. แต่ถ้าชีวมวลมีขนาดเล็กการถ่ายเทความร้อนถึงแกนกลางใช้เวลาสั้น อุณหภูมิสำหรับการระเหยความชื้นเพียง 100 °ซ. ส่วนน้ำส้มควันไม้เป็นของเหลวสีน้ำตาลใสที่หลุดออกมาจากกระบวนการไพโร-ไลซิสในช่วงอุณหภูมิ 300 - 400 °ซ. มีกลิ่นควันไฟ สารประกอบต่างๆ ในน้ำส้มควันไม้มีหลายชนิด เช่น กรดอินทรีย์, ฟีนอล, คาร์บอนิล, แอลกอฮอล์ และด่าง เป็นต้น. ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่สูงกว่า 400 °ซ. น้ำมันดินจะหลุดออกมา, แต่ในการกลั่นสลายที่อุณหภูมิสูง น้ำมันดินบางส่วนจะสลายเป็นก๊าซเชื้อเพลิง ซึ่งประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด เช่น ไฮโดรเจน, มีเทน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น.
- ส่วนที่เป็นก๊าซ ประกอบด้วยก๊าซที่ติดไฟและไม่ติดไฟ เช่น ไฮโดรเจน, มีเทน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น.

ผลิตภัณฑ์ทั้งสามชนิดที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสทั้งประเภทช้า, ปานกลาง และเร็ว มีคุณสมบัติเหมือนกันแต่มีสัดส่วนและปริมาณไม่เท่ากัน. ตารางที่ 1.2 ได้แสดงถึงผลิตภัณฑ์ทั้งสามชนิดที่ได้จากเทคโนโลยีและสภาวะการทดลองต่างๆ.

งานวิจัยทางด้านไพโรไลซิสที่ผ่านมา โดยทั่วไปแล้วมุ่งเน้นในการนำ ถ่าน, ก๊าซ และน้ำมันดินไปใช้ประโยชน์ ซึ่งมีอยู่หลายรูปแบบ เช่น ใช้ถ่านเพื่อการหุงต้ม, ก๊าซเพื่อเผาไหม้เป็นเชื้อเพลิง และน้ำมันดินเพื่อทาร์กาน้ำมัน เป็นต้น. งานวิจัยในแนวทางการใช้ประโยชน์ของผลิตภัณฑ์ทั้งสามได้มีการทำอย่างแพร่หลาย (BTG 2004; The Making of wood vinegar 2007; JAE 2004). อย่างไรก็ตาม ระบบไพโรไลซิสยังมีผลิตภัณฑ์บางตัวที่ยังไม่มีการนำมาใช้ประโยชน์ คือ น้ำส้มควันไม้ ซึ่งมีการศึกษาและนำไปใช้งานบ้างแต่อยู่ในวงการเฉพาะเท่านั้น เช่น กลุ่มเกษตรธรรมชาติ กลุ่มชีวบำบัดธรรมชาติ เป็นต้น. ผลิตภัณฑ์นี้มีการนำมาใช้ในเชิงการค้าในรูปแบบต่างๆ ในต่างประเทศดังแสดงในรูปที่ 1.1, แต่ในระยะไม่เกิน 10 ปีที่ผ่านมา ได้มีงานวิจัยจำนวนมากใน

ประเทศไทยที่ได้ให้ความสนใจในการนำน้ำส้มควันไม้มาใช้ประโยชน์บ้างแล้ว (อินทะศรี 2549; โชติษฐยากร และคณะ 2549 และพิมพ์สมาน 2549).

ตารางที่ 1.2 ผลลัพธ์ที่ได้จากเทคโนโลยีไพโรไลซิสชนิดต่างๆ

เทคโนโลยีของ	GIT	Ensyn	laval	SERI	Twente
อุณหภูมิ, °ซ.	500	550	480	510	600
ความดัน, บาร์	1.0	1.0	0.01	1.0	1.0
อัตราป้อน, กก./ชม.	50	50	30	30	12
dp [mm]	0.5	0.2	10	5	0.5
อุณหภูมิก๊าซ, °ซ.	1.0	0.4	3	1	0.5
อุณหภูมิถ่าน, °ซ.	1.0	0.4	100	n.a.	0.5
ปริมาณก๊าซ, %โดยน้ำหนัก	30	25	14	35	20
ปริมาณน้ำมัน, %โดยน้ำหนัก	60	65	65	55	70
ปริมาณถ่าน, %โดยน้ำหนัก	10	10	21	10	10
คุณสมบัติของน้ำมัน (ที่สภาพนำส่ง)					
ความหนาแน่น	1.23	1.21	1.23	1.20	1.20
ความหนืด, cp	10 (60c)	90 (25c)	5 (40c)	90 (30c)	80 (20c)
คาร์บอน, %โดยน้ำหนัก	39.5	45.5	49.9	54.4	43.2
ไฮโดรเจน, %โดยน้ำหนัก	7.5	7.0	7.0	5.7	8.2
ออกซิเจน, %โดยน้ำหนัก	52.6	45.4	43.0	39.8	48.6
ค่าความร้อน, เมกะจูล/กก.	24	19.3	21	15	25
น้ำในน้ำมัน, %โดยน้ำหนัก	29	16	18	15	25
ผลลัพธ์ที่ได้					
น้ำมัน, %โดยน้ำหนัก	21	-	59	66	70
น้ำ, %โดยน้ำหนัก	26	-	26	10	10
ถ่าน, %โดยน้ำหนัก	21	-	15	14	10
ก๊าซ, %โดยน้ำหนัก	32	-	-	10	10

ที่มา: Nan *et al.* (1994)



รูปที่ 1.1 ผลลัพธ์ที่ได้และมีการผลิตเชิงพาณิชย์จากน้ำส้มควันไม้.

น้ำส้มควันไม้เป็นของเหลวใสสีเหลืองปนน้ำตาล มีความเป็นกรด-เบส ประมาณ 3, ความถ่วงจำเพาะ 1.007 – 1.013, มีน้ำผสมอยู่ประมาณร้อยละ 85 และมีกลิ่นควันไฟ (โซเดียมซัลไฟด์ 2549) เป็นส่วนที่ได้จากกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันหรือไพโรไลซิสของชีวมวลและถูกดักเก็บโดยการกลั่นตัวให้เป็นของเหลวที่อุณหภูมิ 80 – 150 °ซ. ถ้ามีการดักเก็บของเหลวที่อุณหภูมิน้อยกว่า 80 °ซ. สิ่งที่ได้จะเป็นน้ำ, แต่ถ้ามีการดักเก็บของเหลวที่อุณหภูมิมากกว่า 150 °ซ. สิ่งที่ได้จะเป็นน้ำมันดิน. แต่ในทางปฏิบัติสามารถเก็บของเหลวที่อุณหภูมิมากกว่า 150 °ซ. เนื่องจากน้ำส้มควันไม้และน้ำมันดินจะมีการแยกชั้นออกจากกันในภายหลัง.

ชีวมวล โดยเฉพาะไม้ซึ่งมีอยู่หลากหลายชนิดย่อมจะมีความแตกต่างในองค์ประกอบ แต่เมื่อผ่านกระบวนการแก๊สซิฟิเคชันหรือไพโรไลซิสและได้ผลผลิตเป็นน้ำส้มควันไม้แล้วจะมีองค์ประกอบแตกต่างไม่มากนัก, จะมีความแตกต่างบ้างในส่วนของกลิ่น, สี เป็นต้น. สัดส่วนของน้ำส้มควันไม้และองค์ประกอบหลักที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิส ดังแสดงในตารางที่ 1.3 และ 1.4.

ตารางที่ 1.3 สัดส่วนของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากระบวนการไพโรไลซิส

ชนิดของไม้	ไม้ใบกว้าง, เผาที่			ไม้สน, เผาที่		
	300 °ซ.	400 °ซ.	500 °ซ.	300 °ซ.	400 °ซ.	500 °ซ.
ถ่าน	45.9	33.6	29.8	49.2	35.4	31.5
น้ำส้มควันไม้	24.7	28.8	30.2	24.0	26.7	27.7
น้ำมัน	16.8	21.1	21.3	14.4	21.4	22.8
ก๊าซต่างๆ	12.1	16.0	18.5	12.1	15.3	18.0
สูญเสียน้ำ	0.5	0.5	0.2	0.3	1.2	0.0

ที่มา: www.zzic.com.cn/dz/En/charcoal-tech.htm.

ตารางที่ 1.4 องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากระบวนการไพโรไลซิส

องค์ประกอบ	สัดส่วน, %	
	A	B
Acetic acid	58.4	2.70
Propionic acid	1.9	0.12
Methanol	2.1	0.13
Furfural	1.7	0.11
Acetone	0.2	0.01
Cycloten	2.3	0.15
2-Cyclopentenon	0.5	0.03
Furfuryl alcohol	0.3	0.02
Gulalcohol	0.6	0.04
Tetrahydro furfuryl alcohol	1.0	0.06
Para-Cresol & Metal-Cresol	1.4	0.09
2-Metroxy-4-cresol	1.3	0.08
Ortho-Cresol	1.2	0.08
Nonan-1, 4-Olld	0.7	0.04
Ethyl-Gulalcohol	0.3	0.01

ที่มา: Kishimoto S., Wood vinegar liquid. (20)

หมายเหตุ: 1. วิเคราะห์โดย FFPRI, Japan, ด้วยวิธี Gas chromatography.

2. ความชื้นตัวอย่างร้อยละ 84.2, สารอินทรีย์ร้อยละ 15.8.

3. A = สัดส่วนตามสารอินทรีย์, B = สัดส่วนตามน้ำส้มควันไม้.

องค์ประกอบหลักที่มีในน้ำส้มควันไม้เป็นกรดแอสติก กว่าร้อยละ 2.7, ซึ่งกรดอินทรีย์ เช่น กรดน้ำส้ม, แอลกอฮอล์ ได้จากส่วนที่เป็นเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และฟีนอลได้จากส่วนที่เป็น ลิกนิน, น้ำส้มควันไม้จึงมีความแตกต่างจากน้ำส้มทั่วไปที่มีส่วนที่ได้จากลิกนิน.

1.2 แหล่งวัตถุดิบสำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสภายในประเทศ

วัตถุดิบที่จะนำมาใช้กับระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสมีได้หลากหลายชนิด เช่น ถ่านหิน, ชีวมวล และขยะ เป็นต้น. วัตถุดิบแต่ละชนิดมีข้อดีและข้อด้อยต่างๆ กัน. ในส่วนของชีวมวลนั้นนอกจากมีข้อดีมากแล้วยังมีศักยภาพสูงสำหรับการนำมาใช้ในระบบนี้. ข้อดีที่เด่นมากคือเป็นวัตถุดิบที่สามารถปลูกทดแทนได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะกับประเทศในเขตเส้นศูนย์สูตร เช่น ประเทศไทย, จึงเป็นหลักประกันว่าจะมีวัตถุดิบชนิดนี้ใช้อย่างยั่งยืนภายในประเทศ. ข้อดีอีกประการหนึ่งคือ เป็นเชื้อเพลิงที่ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สู่บรรยากาศโลก. เพื่อประกอบการพิจารณาควบคู่กับทางด้านเทคนิคของชีวมวล จึงต้องมีการศึกษาถึงแหล่งชีวมวล, คุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวล, การนำชีวมวลไปใช้งาน และศักยภาพของชีวมวล, เพื่อเป็นหลักประกันว่า ชีวมวลมีมากเพียงพอต่อการใช้งานและมีคุณสมบัติที่ดี.

1.2.1 แหล่งชีวมวล

ชีวมวลเป็นแหล่งพลังงานหมุนเวียนที่สำคัญของประเทศไทยชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาและใช้ทดแทนพลังงานจากแหล่งอื่นๆ โดยเฉพาะจากแหล่งพลังงานที่มาจากฟอสซิล, ซึ่งเป็นพลังงานที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ. ในการพัฒนาแหล่งชีวมวลของประเทศที่มีศักยภาพเพื่อนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากแหล่งอื่นๆ แบ่งเป็น:

- พืชผลทางการเกษตร (agricultural crops) เป็นสิ่งที่เหลือหรือค้ดทิ้งจากการใช้ในระบบการผลิด เช่น ชานอ้อย, ชังข้าวโพด, ทะลายปาล์มน้ำมัน เป็นต้น. ชีวมวลประเภทนี้จะถูกนำไปใช้ผลิตเป็นพลังงานความร้อน/ไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในระบบการผลิดนั้นๆ, ส่วนพลังงานที่เหลือใช้โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้าจะถูกขายเข้าสู่ระบบไฟฟ้าของประเทศ.

- เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร (agricultural residues) เป็นส่วนที่เหลือทิ้งจากการเก็บเกี่ยวพืชผลทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว, เศษลำต้นข้าวโพด, ชังข้าวโพด, เหง้ามันสำปะหลัง เป็นต้น. ในอดีตชีวมวลประเภทนี้ไม่มีการนำมาใช้ เนื่องจากไม่มีความคุ้มทุนในการขนส่งไปสู่แหล่งที่ใช้งาน, แต่ในปัจจุบันมีการนำมาใช้มากขึ้นเนื่องจากเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ มีราคาสูงขึ้นทำให้ชีวมวลประเภทนี้สามารถแข่งขันด้านราคาได้.

- ของเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมและชุมชน (waste streams) ในระบบการผลิดบางประเภทก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เช่น ปึกไม้ยางพารา/ขี้เลื่อยที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิดเครื่องเรือน, เศษไม้ยูคาลิปตัสที่เหลือทิ้งจากโรงงานผลิดเยื่อกระดาษ เป็นต้น. ชีวมวลประเภทนี้ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในระบบการผลิดบางส่วน และขายเป็นเชื้อเพลิงสำหรับผู้ใช้นอื่นๆ.

1.2.2 คุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของชีวมวล

เนื่องจากชีวมวลแต่ละชนิดมีความแตกต่างทั้งทางกายภาพและเคมี ดังนั้น การนำชีวมวลไปใช้งานจึงจำเป็นต้องรู้คุณสมบัติของชีวมวลก่อน. จากการวิเคราะห์คุณสมบัติชีวมวลที่สภาพน้ำหนักแห้ง พบว่า มีสารอินทรีย์มากถึงร้อยละ 76.5 – 99.7 (Vigouroux 2001) ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลสร้อยละ 40 – 45, ลิกนินร้อยละ 25 - 35 (ส่วนที่อ่อนของชีวมวล) และร้อยละ 17 - 25 (ส่วนที่แข็งของชีวมวล), เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 20 (ส่วนที่อ่อนของชีวมวล) และร้อยละ 15 - 35 (ส่วนที่แข็งของชีวมวล), ตามที่แสดงในตารางที่ 1.5. ส่วนองค์ประกอบเฉลี่ยของชีวมวลเป็นคาร์บอน ร้อยละ 50, ออกซิเจนร้อยละ 44 และไฮโดรเจนร้อยละ 6. องค์ประกอบของชีวมวลชนิดต่างๆ รวมทั้งค่าความร้อนและเถ้าได้แสดงในตารางที่ 1.6.

ตารางที่ 1.5 คุณสมบัติของชีวมวลชนิดต่างๆ

ชนิด	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	สารเจือปนอื่นๆ	เถ้า
Scandinavian birch*	40.0	39.0	21.0	n.a.	0.3
ส่วนที่อ่อนของชีวมวล*	45.8	24.4	28.0	n.a.	1.7
ส่วนที่แข็งของชีวมวล*	45.2	31.3	21.7	n.a.	2.7
Scandinavian pine**	40.0	28.5	27.7	3.5	n.a.
เปลือกไม้*	24.8	29.8	43.8	n.a.	1.6
อ้อย**	41.3	22.6	18.3	13.7	2.9
กะลามะพร้าว**	36.3	25.1	28.7	8.3	0.7
ซังข้าวโพด**	42.7	23.6	17.5	9.8	6.8
เปลือกเมล็ดมะกอก*	24.0	23.6	48.4	n.a.	4.0
ซังข้าวสาลี**	30.5	28.9	16.4	2.4	6.6-11.2
แกลบ**	31.3	24.3	14.3	8.4	23.5
ซังข้าว**	37.0	22.7	2.6	2.1	16.1-19.8

หมายเหตุ: * = ที่สภาพแห้งและไม่มีสารเจือปน, ** = ที่สภาพแห้ง, n.a. = ไม่มีการวิเคราะห์
ที่มา: Vigouroux (2001)

ตารางที่ 1.6 องค์ประกอบของชีวมวลชนิดต่างๆ

ชนิด	C (% maf)	H (% maf)	O (% maf)	N (% maf)	S (% maf)	Ash (% maf)	Heating value (KJ/g)
Birch wood	48.8	6.0	44.2	0.5	0.01	0.5	20.0
Poplar wood	49.8	5.9	44.4	0.6	0.04	1.9	18.3
Aspen wood	48.8	6.0	44.7	0.5	0.01	0.5	20.0
Pine wood	49.3	6.0	44.2	0.5	0.01	0.5	20.1
เปลือกไม้	47.2	5.6	46.9	0.3	0.07	3.9	20.9
ฟางข้าวสาลี	49.6	6.2	43.6	0.6	n.a.	4.7	18.6
อ้อย	49.5	6.2	43.8	0.5	n.a.	3.7	18.5
หญ้า Reed canary	49.4	6.3	42.7	1.6	n.a.	8.8	18.8

ที่มา: Vigouroux (2001)

1.2.3 การนำชีวมวลไปใช้งาน

การนำชีวมวลแต่ละชนิดไปใช้งานจะต้องมีการคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ ด้วย เช่น การนำกากมันสำปะหลังหรือส่าเหล้าที่มีความชื้นสูงถึงร้อยละ 80-90 ไปเผาโดยตรงเป็นการไม่ถูกต้อง เนื่องจากมีการสูญเสียมากจากความชื้น เป็นต้น. กระบวนการแปรรูปชีวมวลชนิดต่างๆ ไปเป็นพลังงาน สรุปได้ตามเทคโนโลยี/ผลผลิตที่ได้ ดังนี้:

- การเผาไหม้โดยตรง (direct combustion) โดยการนำชีวมวลไปเผาไหม้ในห้องเผาไหม้โดยตรง โดยทั่วไปแล้วเป็นแบบห้องเผาไหม้อยู่กับที่ (Fixed bed combustion chamber). พลังงานความร้อนที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการผลิตไอน้ำ เพื่อการใช้งานในกระบวนการผลิต. ปัจจุบันการใช้ชีวมวลเพื่อการเผาไหม้โดยตรงเป็นที่นิยมใช้ในภาคอุตสาหกรรม เนื่องจากใช้เงินลงทุนต่ำและควบคุมการใช้งานง่าย.

- การผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Producer gas) เป็นกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิงโดยปฏิกิริยาเคมีความร้อน. องค์ประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้ประกอบด้วย ก๊าซมีเทน, ไฮโดรเจน, คาร์บอนมอนอกไซด์ และที่ไม่ใช่ก๊าซเชื้อเพลิง เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น. การนำชีวมวลไปผลิตเป็นก๊าซเชื้อเพลิงก่อนการนำไปใช้งานมีข้อดีที่สามารถนำไปเพิ่มมูลค่าได้ และประสิทธิภาพการเผาไหม้รวมสูงกว่าการเผาไหม้โดยตรง, แต่มีข้อเสียที่การลงทุนเบื้องต้นและค่าการดำเนินงานสูง.

- การผลิตเป็นก๊าซชีวภาพ (Biogas) เป็นกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการชีวภาพ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ได้ประกอบด้วยก๊าซมีเทนและคาร์บอนมอนอกไซด์เป็นส่วนใหญ่ และก๊าซไฮโดรเจนอีกเล็กน้อย, ที่เหลือเป็นก๊าซที่ไม่ติดไฟ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น. วิธีการนี้เหมาะกับชีวมวลที่มีสภาพเป็นของเหลว.

- การผลิตเชื้อเพลิงเหลว (Bio fuel) เป็นกระบวนการเปลี่ยนชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลวเพื่อให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานกับเครื่องยนต์. กระบวนการผลิตเชื้อเพลิงเหลวจากชีวมวลแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ กระบวนการทางชีวภาพ โดยการย่อยสลายแป้ง, น้ำตาล และเซลลูโลสจากชีวมวลให้เป็นเอทานอล, กระบวนการทางฟิสิกส์และเคมี โดยการสกัดน้ำมันออกจากพืชน้ำมันจากนั้นจึงนำน้ำมันที่ได้ไปผ่านกระบวนการทรานเอสเตอริฟิเคชัน (Tran-esterification) เพื่อผลิตเป็นไบโอดีเซล และกระบวนการความร้อนเคมี โดยการให้ความร้อนกับชีวมวลในสภาพไร้ออกซิเจนจนเกิดการสลายตัว เป็นของเหลวและก๊าซ เช่น กระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน/ไพโรไลซิส.

1.2.4 ศักยภาพของชีวมวล

แหล่งชีวมวลที่สำคัญของประเทศจากทั้ง 3 แหล่ง คือ พืชผลทางการเกษตร, เศษวัสดุเหลือทิ้งการเกษตร และของเหลือจากอุตสาหกรรมและชุมชน. ปัจจุบันมีการนำชีวมวลเหล่านี้มาใช้งานได้อย่างกว้างขวางจนชีวมวลบางประเภทขาดแคลนในบางท้องที่ เช่น แกลบ ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตไอน้ำเพื่อเป็นต้นกำลังในโรงสีข้าวและผลิตไฟฟ้า เป็นต้น, หรือถูกใช้จนไม่มีเหลือแล้ว เช่น ชานอ้อย ถูกนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตไอน้ำและไฟฟ้าเพื่อเป็นต้นกำลังในโรงงานน้ำตาล เป็นต้น.

อย่างไรก็ตาม ยังมีชีวมวลอีกหลายประเภทที่ยังคงเหลืออยู่และยังไม่มีนำมาใช้งาน. งานวิจัยของ (Soontornrangson *et al.* 2007) ได้ศึกษาจากข้อมูลชีวมวล 9 ประเภทของปีผลิต 2545/46 เพื่อหาศักยภาพของชีวมวลที่ยังมีส่วนเหลือทิ้งและมีศักยภาพเพื่อการพัฒนาเป็นแหล่งพลังงานนั้น. โดยได้พิจารณาจากพืชที่มีการเพาะปลูกมาก คือ ปาล์ม, อ้อย, มันสำปะหลัง, ข้าว, ข้าวโพด, ถั่วเหลือง, สับปะรด, มะพร้าว และไม้ยางพารา. สิ่งที่เหลือทิ้งในพืชชีวมวลทั้ง 9 ประเภท มีข้อที่ควรพิจารณาในเบื้องต้น 3 ส่วน คือ ส่วนที่เหลือทิ้งจากผลผลิตที่เก็บเกี่ยวแล้วทั้งในที่เพาะปลูกหรือกระบวนการผลิต เช่น แกลบ, ชังข้าวโพด, เหว้า, เปลือก เป็นต้น. ส่วนต่อมาคือ สัดส่วนการเกิดของสิ่งเหลือทิ้งเหล่านี้ เช่น ชานอ้อยเป็นส่วนที่เกิดจากการบีบน้ำตาลออกจากต้นอ้อยแล้ว ซึ่งมีสัดส่วนร้อยละ 30 เป็นต้น และส่วนสุดท้ายคือ สัดส่วนการนำไปใช้งานของสิ่งเหลือ

ที่นั่นๆ เช่น ชานอ้อยมีสัดส่วนการนำไปใช้งานทั้งหมด หรือฟางข้าวมีสัดส่วนการนำไปใช้ร้อยละ 50, นั่นคือยังคงมีชีวมวลเหลือจากการนำไปใช้แล้ว. ดังแสดงรายละเอียดทั้ง 3 ส่วนของพืชชีวมวลแต่ละชนิดในตารางที่ 1.7.

ตารางที่ 1.7 รายละเอียดสัดส่วนต่างๆ ของชีวมวลทั้ง 9 ประเภท

ชนิด	ส่วนเหลือทิ้ง	สัดส่วนการเกิด (ร้อยละ)	สัดส่วนการนำไปใช้ (ร้อยละ)
อ้อย	ส่วนยอด	0.20	10-30
	ชานอ้อย	0.30	100
ข้าว	แกลบ	0.23	70-80
	ฟางข้าว	1.19	50
ข้าวโพด	ต้นและใบ	0.89	10
	ซังข้าวโพด	0.19	70
มันสำปะหลัง	ต้นและใบ	0.12	60-80
	เหง้า	0.09	0
มะพร้าว	กะลา	0.25	50-70
	เปลือก	0.57	20
	คั้นและทะลาย	0.56	0
สับปะรด	ยอดสับปะรด	0.59	0
ปาล์ม	ใบปาล์ม	0.15	100
	ทะลายปาล์ม	0.22	50-60
	ทางปาล์ม	0.27	100
	กะลาปาล์ม	0.13	70-80
ยางพารา	ไม้พิน	0.25	100
	ขี้เลื่อย	0.03	100
	อื่นๆ	0.10	20
ถั่วเหลือง	ต้นและใบ	1.18	50-60

ที่มา: Soontornrangson *et al.* (2007)

ศักยภาพพลังงานจากสิ่งเหลือทิ้งในชีวมวลทั้ง 9 ชนิด พบว่า มีพลังงานเหลือทิ้งที่ยังไม่มีการนำมาใช้อีก 13.0 เมกะตันน้ำมันดิบต่อปีตามที่แสดงในตารางที่ 1.8. ทั้งนี้ อ้อยและข้าวเป็นพืชชีวมวลที่ยังมีสิ่งเหลือทิ้งทั้งในพื้นที่เพาะปลูกและในกระบวนการผลิตมากที่สุดเทียบเท่าพลังงาน 4.9 และ 4.2 เมกะตันน้ำมันดิบต่อปีตามลำดับ, คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 70.1 ของพลังงานเหลือทิ้งในชีวมวลทั้งหมด.

ตารางที่ 1.8 ศักยภาพพลังงานเหลือทิ้งจากพืชชีวมวลทั้ง 9 ชนิด

ชนิด	ผลผลิต (ตัน/ปี)	ส่วนเหลือทิ้ง	สัดส่วนการเกิด	สัดส่วนการใช้ (ร้อยละ)	ค่าความร้อน (กิโลจูล/ตัน)	ศักยภาพพลังงาน (กิโลตันน้ำมันดิบ/ปี)
อ้อย	74,249,407	ส่วนยอด	0.20	10-30	17.39	4,892
		ชานอ้อย	0.30	100	16.62	
ข้าว	26,076,846	แกลบ	0.23	70-80	14.27	4,239
		ฟางข้าว	1.19	50	10.24	
ข้าวโพด	4,230,976	ต้นและใบ	0.89	10	17.39	1,494
		ชังข้าวโพด	0.19	70	18.04	
มันสำปะหลัง	16,868,310	ต้นและใบ	0.12	60-80	17.39	917
		เหง้า	0.09	0	18.42	
มะพร้าว	1,870,975	กะลา	0.25	50-70	16.23	810
		เปลือก ต้นและทะลาย	0.57 0.56	20 0	17.93 15.4	
สับปะรด	1,738,833	ยอดสับปะรด	0.59	0	12.68	305
ปาล์ม	4,001,376	ใบปาล์ม	0.15	100	17.76	219
		ทะลายปาล์ม	0.22	50-60	17.86	
		ทางปาล์ม	0.27	100	15.22	
		กะลาปาล์ม	0.13	70-80	18.46	
ยางพารา	3,005,212	ไม้พิน	0.25	100	16.80	86
		ขี้เลื่อย	0.03	100	16.80	
		อื่นๆ	0.10	20	14.98	
ถั่วเหลือง	259,863	ต้นและใบ	1.18	50-60	19.44	63
รวม	132,301,798					13,026

ที่มา: Soontornrangson *et al.* (2007)

ข้อที่น่าสนใจคือสิ่งเหลือทิ้งจากอ้อย ในส่วนที่ยังไม่มีการนำไปใช้เพื่อการผลิตเป็นพลังงาน คือส่วนยอดของอ้อยซึ่งเป็นส่วนที่ยังคงเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากถึงร้อยละ 70 - 90 ของส่วนยอดของอ้อยทั้งหมด, ในขณะที่ชานอ้อยมีการนำไปใช้จนไม่มีส่วนที่เหลือทิ้งอีกแล้ว. ส่วนสิ่งเหลือทิ้งจากข้าวที่มีศักยภาพสูงต่อการนำมาผลิตพลังงาน คือฟางข้าว ซึ่งเป็นส่วนที่ยังเหลือทิ้งในพื้นที่เพาะปลูกถึงร้อยละ 50 ของฟางข้าวทั้งหมด. ในขณะที่แกลบมีการนำไปใช้และยังมีส่วนเหลือทิ้งเพียงร้อยละ 20-30 เท่านั้น. ส่วนชีวมวลชนิดอื่นๆ แม้ว่าจะมีสิ่งเหลือทิ้งเทียบเท่าพลังงานน้อยกว่าอ้อยและข้าวก็ตาม แต่ยังมีสิ่งเหลือทิ้งที่มีศักยภาพสูง เช่น ต้นและใบของข้าวโพด, เหง้ามันสำปะหลัง, ต้นและทะลายมะพร้าว หรือยอดสับปะรด, เนื่องจากสิ่งเหลือทิ้งเหล่านี้ยังมีการนำมาใช้น้อยมาก.

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์

การดำเนินโครงการนี้มีการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ประกอบการทดลอง แบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก คือ เตาปฏิกรณ์, อุปกรณ์ประกอบเตาปฏิกรณ์ และเครื่องมือวัด/วิเคราะห์, โดยมีรายละเอียดดังนี้:

2.1.1 เตาปฏิกรณ์

เตาปฏิกรณ์ที่ใช้เพื่อการวิจัยและพัฒนาในโครงการนี้ประกอบด้วย 2 ชุด คือ เตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันเปิดแบบไหลลง และเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น รายละเอียดของเตาปฏิกรณ์แต่ละชุดมีดังนี้:

2.1.1.1 เตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันเปิดแบบไหลลง

เตาปฏิกรณ์นี้ได้ออกแบบตามแบบของ Dasappa and Mukunda (2003) แต่ได้มีการดัดแปลงในส่วนของอากาศเข้าช่วงโซนเผาไหม้, โดยออกแบบให้อากาศเข้าในแนวทำมุม 45 องศา กับเส้นรอบวงแทนที่จะเป็นแนวตั้งฉาก. รายละเอียดของเตาปฏิกรณ์ (รูปที่ 2.1) ประกอบด้วย :

- เตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันเปิดแบบไหลลง แบ่งเป็น 2 ชั้น, ชั้นนอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร และมีช่องให้ก๊าซไหลผ่านระหว่างเตาปฏิกรณ์ชั้นนอกและชั้นในขนาด 5 เซนติเมตร. ผนังระหว่างเตาปฏิกรณ์ชั้นนอกและชั้นในหุ้มด้วยฉนวนใยหิน (rock wool) หนา 3.8 เซนติเมตร. จากตะแกรงด้านล่างของเตาขึ้นมา 45 เซนติเมตร มีช่องจ่ายอากาศเข้าด้านข้างเตาปฏิกรณ์ในบริเวณโซนเผาไหม้จำนวน 4 ช่อง, โดยออกแบบให้จ่ายอากาศเข้าด้านข้างเตาปฏิกรณ์ในแนวทำมุม 45 องศา กับเส้นรอบวง. อากาศที่จ่ายเข้าเตาปฏิกรณ์มาจาก 2 ส่วน คือ อากาศที่เข้าทางด้านบนของเตาปฏิกรณ์ที่เปิดและอากาศจากช่องจ่ายเข้าด้านข้างเตาปฏิกรณ์ซึ่งมาจากปั๊มลม.
- ตะแกรงระบายขี้เถ้า ประกอบด้วยตรงด้านล่างของเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน ซึ่งถูกขั้วให้หมุนด้วยมือหมุน ตะแกรงนี้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร และแบ่งเป็นช่องเล็กๆ รูปทรงสี่เหลี่ยมขนาดกว้าง 5 เซนติเมตร และยาว 5 เซนติเมตร โดยรอบ ขี้เถ้าที่ร่วงผ่านตะแกรงจะตกลงสู่ด้านล่างที่มีน้ำบรรจุอยู่
- ระบบกักเก็บขี้เถ้า มีรูปทรงสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 50 เซนติเมตร ยาว 100 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร ติดตั้งอยู่ด้านล่างเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน และบรรจุน้ำสูง 30 เซนติเมตร. ระบบนี้ถูกออกแบบให้ทำหน้าที่เป็นระบบป้องกันการระเบิดอีกด้วย, โดยการออกแบบให้ถังบรรจุ

น้ำนี้เปิดสู่บรรยากาศภายนอกที่สามารถทนความดันได้ช่วง 15 - 30 เซนติเมตรน้ำ. ถ้าความดันเกินค่าที่กำหนด ก๊าซจากเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันจะดันออกสู่บรรยากาศภายนอกได้.



รูปที่ 2.1 เตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันเปิดแบบไหลลง.

2.1.1.2 เตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น

เป็นเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแบบไหลขึ้น ตามที่แสดงรายละเอียดในรูปที่ 2.2 มีส่วนประกอบ 4 ส่วนย่อย คือ:

- เตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์ด้านล่าง 30 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร และด้านบนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 39 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร. การขยายเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาปฏิกรณ์ระหว่างด้านล่างและด้านบนจะเอียงมุม 73 องศา ซึ่งเป็นมุมที่วัตถุดิบทุกชนิดสามารถไหลได้อย่างไม่ติดขัด. ผนังระหว่างเตาปฏิกรณ์ชั้นนอกและชั้นในหุ้มด้วยฉนวนใยหินหนา 5 เซนติเมตร.

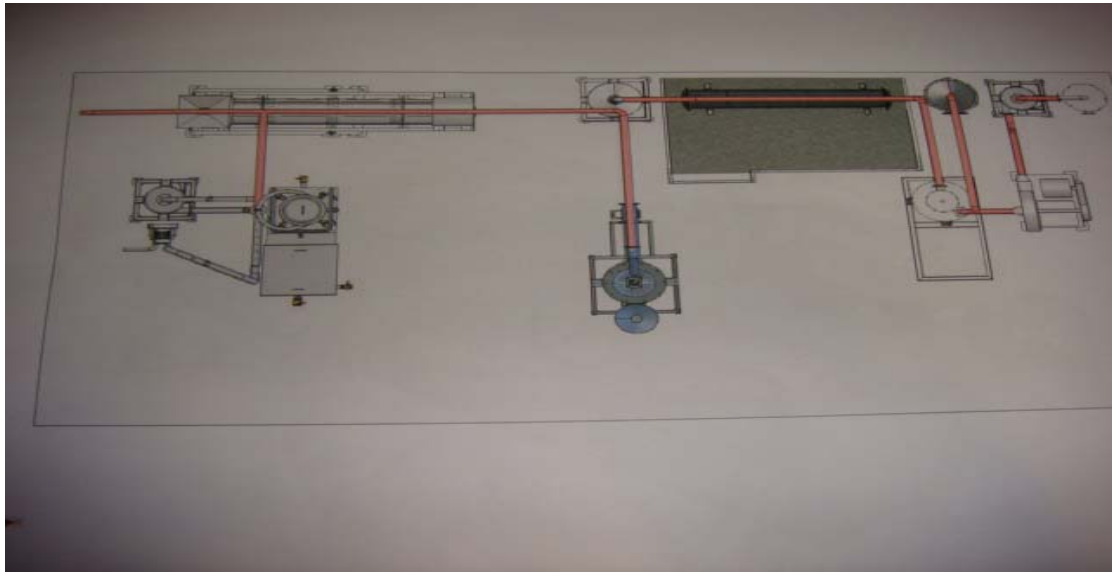
- ไบโกลาน มีจำนวน 2 ไบพัต ขนาดยาว 10 เซนติเมตร, กว้าง 3 เซนติเมตร, หนา 0.6 เซนติเมตร, ยึดติดกับแกนกลางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.9 เซนติเมตร, ยาว 250 เซนติเมตร ไบโกลานนี้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เกียร์ขนาด 1 แรงม้าที่ความเร็วรอบไบโกลาน 15 รอบต่อนาที.
- ระบบถ่ายเทถ่านและชี้เถ้า ที่ร่วงผ่านตะแกรงออกทางด้านล่างของเตาปฏิกรณ์จะถูกดึงออกโดยสกรูเกลียวขนถ่ายขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 เซนติเมตร ยาว 1 เมตร. สกรูเกลียวนี้ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์เกียร์ขนาด 0.5 แรงม้าที่ความเร็วรอบ 50 รอบต่อนาที.
- ระบบป้องกันการระเบิด ติดตั้งอยู่ด้านบนของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส โดยเชื่อมต่อผ่านท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ที่จมลงไปใต้น้ำสูง 15 - 30 เซนติเมตร.



รูปที่ 2.2 รายละเอียดเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส.

2.1.2 อุปกรณ์ประกอบเตาปฏิกรณ์

ในการเดินระบบเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันและเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสนั้น จะประกอบด้วยอุปกรณ์ประกอบอีกหลายรายการ. โครงการนี้ได้ออกแบบเป็นระบบรวมดังแสดงในรูปที่ 2.3 ซึ่งมีอุปกรณ์ประกอบเตาปฏิกรณ์ดังนี้:



รูปที่ 2.3 รายละเอียดการติดตั้งอุปกรณ์ประกอบระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส.

- ชุดอบแห้ง (รูปที่ 2.4) ใช้ก๊าซจากเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันเป็นแหล่งพลังงานความร้อนเพื่ออบแห้งวัตถุดิบไม้ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 - 2 นิ้ว ยาว 2 - 3 นิ้ว. ชุดอบแห้งนี้ประกอบด้วยท่อ 2 ชั้น ชั้นในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร ทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม หนา 2 มิลลิเมตร. ชั้นนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 เซนติเมตร ยาว 3 เมตร เป็นเหล็กแผ่นหนา 2 มิลลิเมตร. ก๊าซร้อนไหลอยู่ภายในท่อชั้นใน, วัตถุดิบบรรจุอยู่ระหว่างท่อชั้นในและชั้นนอก.



รูปที่ 2.4 ชุดอบแห้ง.

- ชุดไซโคลน (รูปที่ 2.5) มีจำนวน 2 ตัว ตัวแรกติดตั้งตรงด้านออกของชุดอบแห้ง ทำหน้าที่ดักจับขี้เถ้าและไอน้ำที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส. ส่วนตัวที่สองอยู่ตรงทางออกของพัฒนาชุดก๊าซ ทำหน้าที่ดักจับไอน้ำขนาดเล็กที่ออกมาจากชุดระบายความร้อนแบบคอคอด.



ชุดที่ 1



ชุดที่ 2

รูปที่ 2.5 ชุดไซโคลน.

- ชุดควบแน่นแบบท่อ (รูปที่ 2.6) ใช้สำหรับควบแน่นก๊าซที่ออกจากเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส. ชุดควบแน่นนี้ประกอบด้วยท่อเล็กๆ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 เซนติเมตร ยาว 2 เมตร จำนวน 30 ท่อ, บรรจุอยู่ในท่อใหญ่เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 เซนติเมตร ยาว 2 เมตร, ใช้น้ำเย็นอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสสำหรับการหล่อเย็น, โดยที่ก๊าซร้อนไหลนอกท่อสวนทางกับน้ำเย็นที่ไหลในท่อ.



รูปที่ 2.6 ชุดควบแน่นแบบท่อ.

- ชุดถังกักเก็บน้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้ (รูปที่ 2.7) ของเหลวที่อยู่ในสภาพเป็นก๊าซ จะถูกควบแน่นที่ชุดควบแน่นแบบท่อและไหลมาเก็บที่ถังกักเก็บน้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้, ซึ่งเป็นถังทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร สูง 2 เมตร ทำด้วยเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมหนา 2 มิลลิเมตร มีวาล์วเพื่อเปิดให้ของเหลวไหลออกที่ระดับต่างๆ กัน.



รูปที่ 2.7 ชุดล้างกักเก็บน้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้.

- ชุดระบายความร้อนแบบคอคอด (รูปที่ 2.8) (Venture scrubber) ใช้เพื่อลดอุณหภูมิก๊าซร้อนให้ใกล้เคียงอุณหภูมิบรรยากาศ โดยให้ก๊าซร้อนและน้ำหล่อเย็นไหลลงในทิศทางเดียวกัน. ชุดระบายความร้อนแบบคอคอดนี้ทำจากเหล็กกล้าไม่พ่นสนิมหนา 2 มิลลิเมตร ประกอบด้วยกรวยบนและล่างขนาดเท่ากันเชื่อมต่อด้วยคอคอด, กรวยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 26 เซนติเมตร ยาว 26 เซนติเมตร และเรียวยาวด้วยในระยะ 50 เซนติเมตร จนเส้นผ่านศูนย์กลางเหลือ 6.5 เซนติเมตร, เชื่อมต่อกับคอคอดที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6.5 เซนติเมตร ยาว 27 ชุดนี้สูงรวม 2.4 เมตร.



รูปที่ 2.8 ชุดระบายความร้อนแบบคอคอด.

- ชุดพัดลมดูดก๊าซ (รูปที่ 2.9) เป็นพัดลมแบบความดันสูงที่อัตราส่งลม 2.4 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ที่ความดัน 140 มิลลิบาร์ ขับด้วยมอเตอร์ 3 เฟส 10 แรงม้า, ท่อดูดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ท่อส่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.6 เซนติเมตร.



รูปที่ 2.9 ชุดพัดลมดูดก๊าซ.

- ชุดถังเก็บความชื้น (รูปที่ 2.10) ใช้เพื่อลดความชื้นที่ยังหลุดรอดจากไซโคลนด้วยเศษชื้นไม้สับ. ถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 40 เซนติเมตร สูง 1.2 เมตร ทำจากเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมหนา 2 มิลลิเมตร.



รูปที่ 2.10 ชุดถังเก็บความชื้น.

2.1.3 เครื่องมือวัด

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสจะมีการนำมาวิเคราะห์หาคุณสมบัติต่างๆ ด้วยเครื่องมือวัดหลายชนิด, แบ่งออกเป็น เครื่องมือวัดก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์, เครื่องมือวัดปริมาณน้ำมันดิน และเครื่องมือวัดคุณสมบัติเชื้อเพลิง.

2.1.3.1 เครื่องมือวัดก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์

สามารถตรวจวัดก๊าซเชื้อเพลิงจากระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสได้ 3 ชนิด คือ คาร์บอนมอนอกไซด์, ไนโตรเจน และไฮโดรเจน. เครื่องวัดนี้ประกอบด้วย ป้อนชุดก๊าซตัวอย่าง, เครื่องลดอุณหภูมิก๊าซตัวอย่าง และเครื่องกรอง ซึ่งติดตั้งอยู่ในตู้นิรภัยและมีระบบเตือนภัยสำหรับกรณีที่มีการรั่วไหลของก๊าซในระหว่างการใช้เครื่องมือวัด ดังแสดงในรูปที่ 2.11.



รูปที่ 2.11 เครื่องมือวัดก๊าซเชื้อเพลิงสังเคราะห์.

2.1.3.2 เครื่องมือวัดปริมาณน้ำมันดิน

ใช้ตรวจวัดปริมาณน้ำมันดินในก๊าซ มีลักษณะเป็นหลอดแก้วทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5 เซนติเมตร ยาว 30 เซนติเมตร จำนวน 1 ตัว, ใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 2.12.



รูปที่ 2.12 เครื่องมือวัดปริมาณน้ำมันดิน.

2.1.3.3 เครื่องมือวัดคุณสมบัติเชื้อเพลิง

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงของวัตถุดิบที่เป็นชีวมวลและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสประกอบด้วย การวัดความชื้น, สารระเหย, คาร์บอนคงที่, จี๊ถั่ว และค่าความร้อน, โดยใช้

- เครื่องวัดค่าความร้อน (Bomb calorimeter) ดังแสดงในรูปที่ 2.13.
- เครื่องวัดความชื้น (Infrared Dryer) ดังแสดงในรูปที่ 2.14.
- เครื่องวัดสารระเหย (Volatile meter) และจี๊ถั่ว (Ash meter) ดังแสดงในรูปที่ 2.15.

นอกจากนี้ จะมีการวิเคราะห์สัดส่วนของคาร์บอน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน, ด้วย

- เครื่องวิเคราะห์ค่าคาร์บอน, ไฮโดรเจน และไนโตรเจน (CHN analyzer) ใช้การส่งวิเคราะห์จากภายนอก.



รูปที่ 2.13 เครื่องวัดค่าความร้อน.



รูปที่ 2.14 เครื่องวัดความชื้น.



รูปที่ 2.15 เครื่องวัดสารระเหยและจีเอ็ม.

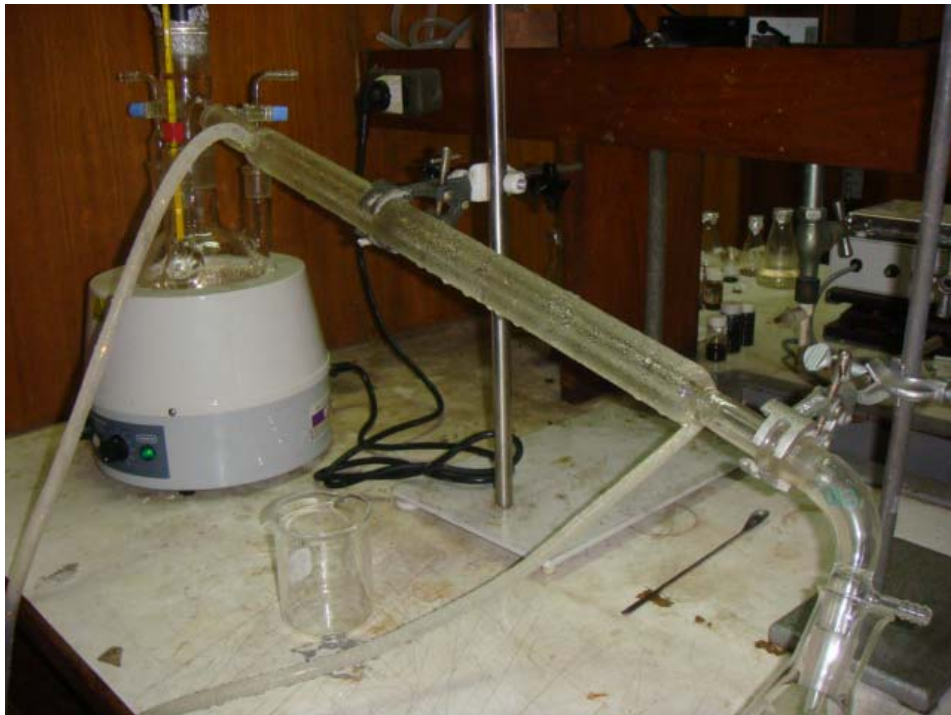
2.1.3.4 เครื่องมือแยกน้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้

ผลิตภัณฑ์ที่ออกจากระบบไพโรไลซิสมีสภาพเป็นก๊าซ ซึ่งประกอบด้วย ก๊าซเชื้อเพลิง, น้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้ และเมื่อทำให้กลั่นตัวเป็นของเหลวแล้วจะต้องแยกน้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้ออกจากกัน จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือเพื่อการแยกผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดออกจากกันและการวิเคราะห์เบื้องต้นซึ่งประกอบด้วย:

- เครื่องวัดค่าความถ่วงจำเพาะ ดังแสดงในรูปที่ 2.16.
- เครื่องกลั่นลำดับส่วน ดังแสดงในรูปที่ 2.17.
- เครื่องเหวี่ยงแยก ดังแสดงในรูปที่ 2.18.



รูปที่ 2.16 เครื่องวัดค่าความถ่วงจำเพาะ.



รูปที่ 2.17 เครื่องกลั่นลำดับส่วน.



รูปที่ 2.18 เครื่องเหวี่ยงแยก.

2.2 วัสดุคืบที่ใช้ในการทดลอง

ในการดำเนินการโครงการนี้ได้เลือกชีวมวลไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัสดุคืบเชื้อเพลิง. เหตุผลที่เลือกชีวมวลชนิดนี้เนื่องจาก ปัจจุบันมีการปลูกอย่างแพร่หลายเพื่อใช้เป็นวัสดุคืบในอุตสาหกรรมเชื้อกระดาษ ซึ่งมีการใช้ประมาณร้อยละ 80, ส่วนที่เหลือก็จะนำไปใช้เป็นฟืนหรือเผาถ่าน. ในการดำเนินโครงการนี้จึงได้เลือกพิจารณาที่จะนำส่วนที่เหลือนี้มาใช้เป็นวัสดุคืบเนื่องจากมีศักยภาพสูง, นอกจากนี้แล้วยังมีช่องทางที่จะเพิ่มมูลค่าได้อีก.

สำหรับเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัสดุคืบเชื้อเพลิง ซึ่งไม่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 - 2 นิ้ว ยาว 2 - 3 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.19. กำหนดให้ความชื้นของไม้ไม่เกินร้อยละ 10, ทั้งนี้เพื่อเป็นการควบคุมคุณภาพของน้ำส้มควันไม้ไม่ให้มีน้ำปนออกมามาก.



รูปที่ 2.19 วัตถุดิบไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส.

สำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันใช้ไม้ยูคาลิปตัส และถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่ได้จากเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเป็นวัตถุดิบเชื้อเพลิง ดังแสดงในรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20.



รูปที่ 2.20 วัตถุดิบถ่านไม้ยูคาลิปตัสสำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน.

2.3 วิธีการทดลอง

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส จะมีการนำไปหาแนวทางการใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า. ดังนั้น ในการออกแบบระบบนี้จึงได้แยกระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสออกจากกันเพื่อให้สามารถเก็บผลิตภัณฑ์ได้อย่างหลากหลายชนิด. กล่าวคือระบบไพโรไลซิสจะทำหน้าที่เปลี่ยนชีวมวลให้ได้ก๊าซเชื้อเพลิง น้ำมันดิน, ถ่าน และน้ำส้มควันไม้. ถ่านที่ได้จากระบบไพโรไลซิสจะนำไปเป็นวัตถุดิบให้กับระบบแก๊สซิฟิเคชันและได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซเชื้อเพลิง, น้ำมันดิน และถ่าน. การทดลองเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้จึงแบ่งออกตามชนิดของเตาปฏิกรณ์. สำหรับวัตถุดิบชีวมวลที่ใช้ในการทดลองกับเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเป็นไม้ยูคาลิปตัสและสำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน เป็น ไม้ยูคาลิปตัสและถ่านยูคาลิปตัส. ส่วนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสจะนำไปแยกวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี.

2.3.1 เตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชัน

ในการเริ่มต้นเดินเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันนั้น ใช้ถ่านที่ลวกดีไฟดีแล้วป้อนเข้าทางด้านบนประมาณ 1 - 2 กิโลกรัมและเปิดพัดลมดูดเพื่อเร่งให้ถ่านติดไฟอย่างทั่วถึง. จากนั้น จึงเติมวัตถุดิบจนเต็มระบบ, วัตถุดิบที่ใช้เดิมมี 2 ชนิด คือ ไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัส. ในการเก็บข้อมูลสำหรับการเติมวัตถุดิบที่เป็นไม้ยูคาลิปตัส คือ ก๊าซและของเหลว (น้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้). สำหรับการเติมวัตถุดิบที่เป็นถ่านไม้ยูคาลิปตัส คือ ก๊าซและของเหลว (น้ำมันดิน).

การเดินเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันนี้ จะมีการควบคุมไม่ให้อุณหภูมิในโซนเผาไหม้เกิน 700 องศาเซลเซียส. ทั้งนี้ จะต้องควบคุมการป้อนวัตถุดิบไว้ที่ 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งเป็นอัตราการเติมวัตถุดิบสูงสุดตามที่ได้ออกแบบไว้, อากาศที่ป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันมี 2 ทาง คือ จากทางด้านบนและด้านข้างซึ่งจะกำหนดไว้ที่สัดส่วน 50 : 50 และภายหลังจากการหยุดการเดินเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันแล้วจะเก็บผลิตภัณฑ์ที่เหลือ คือ ถ่านที่เผาไหม้ไม่หมด.

2.3.2 เตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิส

การเดินเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสและการเก็บข้อมูลเช่นเดียวกับ การเดินเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันที่การเติมวัตถุดิบที่เป็นไม้ยูคาลิปตัส จะมีความแตกต่างเพียงการควบคุมอุณหภูมิภายในเตาไว้ที่ 500 องศาเซลเซียส และการป้อนอากาศทั้งหมดจากทางด้านล่างของเตาเท่านั้น. ทั้งนี้ จะต้องควบคุมปริมาณการป้อนอากาศให้ได้จุดที่ได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดินสูงสุด.

2.3.3 คุณสมบัติเชื้อเพลิงของไม้และถ่านยูคาลิปตัส

วัตถุประสงค์และผลที่คาดว่าจะนำไปหาคุณสมบัติเชื้อเพลิงนี้มาจากชีวมวลจึงไม่มีกัมมะถัน. ดังนั้นการวิเคราะห์จึงกำหนดแต่

ค่าความร้อน (Heating value) ตามวิธี ASTM D 5865.

ความชื้น (Moisture content) ตามวิธี ASTM D 3173.

เถ้า (Ash) ตามวิธี ASTM D 3174.

สารระเหย (Volatile matter) ตามวิธี ASTM D 3175.

ถ่านคงตัว (Fixed carbon) จะหาจากสูตร $100 - \text{ความชื้น} - \text{เถ้า} - \text{สารระเหย}$.

2.3.4 คุณสมบัติน้ำมันดิน

น้ำมันดินที่ได้จะถูกนำไปใช้เพื่อการเผาไหม้เป็นส่วนใหญ่ จึงต้องหาคุณสมบัติเชื้อเพลิงตามการวิเคราะห์ดังนี้ :

ค่าความร้อน (Heating value) ตามวิธี ASTM D 5865.

ความชื้น (Moisture content) ตามวิธี ASTM D 3173.

เถ้า (Ash) ตามวิธี ASTM D 3174.

สารระเหย (Volatile matter) ตามวิธี ASTM D 3175.

ถ่านคงตัว (Fixed carbon) จะหาจากสูตร $100 - \text{ความชื้น} - \text{เถ้า} - \text{สารระเหย}$.

2.3.5 คุณสมบัติน้ำส้มควันไม้

น้ำส้มควันไม้ที่ได้นำไปหาค่า ความเป็นกรด-เบส (pH), ปริมาณ (%), ความหนาแน่น (Density), ถ.พ. (Specific gravity) และคุณสมบัติทางกายภาพ.

3. ผลการทดลองและวิจารณ์

วัตถุประสงค์ของโครงการนี้ เพื่อการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า, ซึ่งจากการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสแล้วได้ผลิตภัณฑ์ 4 ชนิด คือ ก๊าซเชื้อเพลิง, น้ำมันดิน, ถ่าน และน้ำส้มควันไม้. ผลิตภัณฑ์ที่ได้แต่ละชนิดจะมีการศึกษาแนวทางที่จะนำไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่าซึ่งมีได้อย่างหลากหลาย เช่น การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ชนิดต่างๆ, การแยกผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดออกในกระบวนการผลิต เป็นต้น.

3.1 การวิเคราะห์คุณสมบัติเชื้อเพลิงของวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสประกอบด้วย 2 ชนิด คือ ไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัส. สำหรับเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันใช้ไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ. ส่วนเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบเท่านั้น. วัตถุดิบทั้งสองได้มีการวิเคราะห์เพื่อหาคุณสมบัติเชื้อเพลิงดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ ตารางที่ 3.2.

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเชื้อเพลิงของไม้ยูคาลิปตัส

รายการ	ตามสภาพนำส่ง	ตามสภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น ¹ , %	8.9	-
สารระเหย ¹ , %	70.6	77.5
ถ่านคงตัว ¹ , %	19.4	21.3
เถ้า ¹ , %	1.1	1.2
ค่าความร้อน ¹ , กิโลแคลอรี/กก.	4,170	4,570
คาร์บอน ² , %	44.24	-
ไฮโดรเจน ² , %	6.35	-
ไนโตรเจน ² , %	0.22	-

หมายเหตุ: ¹ ห้องทดสอบสาขาวิจัยสิ่งแวดล้อมนิเวศวิทยาและพลังงาน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550.

² ห้องทดสอบการปีโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2550.

ไม้ยูคาลิปตัสที่ใช้ในการทดลองจะควบคุมไม่ให้มีความชื้นเกินร้อยละ 10, ทั้งนี้เพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดจากน้ำเข้าไปรบกวนปฏิกิริยาในห้องเผาไหม้และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไม่มีคุณภาพ, แต่ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้ตามสภาพน้ำหนักแห้งซึ่งไม่มีความชื้นเหลือในวัตถุดิบ.

ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติเชื้อเพลิงของถ่านไม้ยูคาลิปตัส

รายการ	ตามสภาพน้ำสด	ตามสภาพน้ำหนักแห้ง
ความชื้น ¹ , %	2.1	-
สารระเหย ¹ , %	10.5	10.7
ถ่านคงตัว ¹ , %	83.2	85.1
เถ้า ¹ , %	4.2	4.2
ค่าความร้อน ¹ , กิโลแคลอรี/กก.	7,650	7,810
คาร์บอน ² , %	80.01	-
ไฮโดรเจน ² , %	3.33	-
ไนโตรเจน ² , %	0.56	-

หมายเหตุ: ¹ ห้องทดสอบสาขาวิจัยสิ่งแวดล้อมนิเวศวิทยาและพลังงาน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550.

² ห้องทดสอบการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2550.

3.2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ในการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันนี้ใช้ไม้ยูคาลิปตัสและถ่านยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ ซึ่งวัตถุดิบทั้งสองจะให้ผลิตภัณฑ์ที่ต่างกัน. ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซเชื้อเพลิง, น้ำมันดิน และถ่านที่เหลือจากการเดินระบบ, ในสัดส่วนดังแสดงในตารางที่ 3.3. ระบบแก๊สซิฟิเคชันนี้ออกแบบให้เก็บจี้เถ้าเป็นแบบเปียกทำให้ไม่สามารถกักเก็บจี้เถ้าได้, อย่างไรก็ตามจี้เถ้ามีปริมาณน้อยมาก (อาจหาญ 2550), ในที่นี้จึงไม่มีการวัดค่านี้. การทดลองจะกำหนดไว้ที่สถานะไหลตสูงที่สุดที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและควบคุมอุณหภูมิภายในโชนเผาไหม้ที่ 700 องศาเซลเซียส. ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเดินระบบด้วยไม้ยูคาลิปตัส เป็นก๊าซเชื้อเพลิงคิดเป็นร้อยละ 87.9, ถ่านที่เหลือจากการเดินระบบคิดเป็นร้อยละ 11.1 และน้ำมันดินคิดเป็นร้อยละน้อยกว่า 1.0. ก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือก๊าซที่ติดไฟ ซึ่งมีก๊าซมีเทนร้อยละ 1.3, ไฮโดรเจนร้อยละ 16.2 และก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ร้อยละ 18.5 และก๊าซที่ไม่ติดไฟ ซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 11.2 และก๊าซอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซไนโตรเจนและอีกเล็กน้อยเป็นออกซิเจน รวมเป็นร้อยละ 40.7.

ตารางที่ 3.3 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันด้วยไม้อยูคาลิปตัส

รายการ	ร้อยละ
น้ำมันดิน	< 1.0
ถ่านที่เหลือจากการเดินระบบ	11.1
ก๊าซ	87.9
มีเทน	1.3
คาร์บอนไดออกไซด์	11.2
คาร์บอนมอนนอกไซด์	18.5
ไฮโดรเจน	16.2
อื่นๆ	40.7
รวม	100.0

การเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ถ่านไม้อยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ จะกำหนดสภาวะเดียว กับที่เดินระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ไม้อยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ. ผลลัพธ์ที่ได้จากการเดินระบบดังแสดงในตารางที่ 3.4, เป็นก๊าซเชื้อเพลิงคิดเป็นร้อยละ 91.88, ถ่านที่คงเหลือคิดเป็นร้อยละ 8.1 และน้ำมันดินคิดเป็นร้อยละน้อยกว่า 0.02. ก๊าซเชื้อเพลิงประกอบด้วยก๊าซหลายชนิดแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ ก๊าซที่ติดไฟ ซึ่งมีก๊าซมีเทนในร้อยละ 0.3, ไฮโดรเจนร้อยละ 5.0 และก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ร้อยละ 22.6 และก๊าซที่ไม่ติดไฟ ซึ่งมีคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 16.5 และก๊าซอื่นๆซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซไนโตรเจนและอีกเล็กน้อยเป็นออกซิเจน รวมเป็นสัดส่วนร้อยละ 47.48.

ตารางที่ 3.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันด้วยถ่านไม้อยูคาลิปตัส

รายการ	ร้อยละ
น้ำมันดิน	< 0.02
ถ่านที่เหลือจากการเดินระบบ	8.1
ก๊าซ	91.9
มีเทน	0.3
คาร์บอนไดออกไซด์	16.5
คาร์บอนมอนนอกไซด์	22.6
ไฮโดรเจน	5.0
อื่นๆ	47.5
รวม	100.0

3.2.1 แนวทางการเพิ่มมูลค่าก๊าซเชื้อเพลิงจากระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ไม้อุคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ ให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซเชื้อเพลิงประมาณร้อยละ 87.9 และในจำนวนนี้เป็นก๊าซที่ติดไฟประมาณร้อยละ 40.9, ส่วนผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น ถ่านที่เหลือจากการเดินระบบ, น้ำมันดิน และซีเถ้า มีเพียงเล็กน้อย. การนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่าจึงได้มุ่งเน้นไปที่ก๊าซเชื้อเพลิง. จากที่ได้มีการทดลองติดตั้งระบบแก๊สซิฟิเคชันในหลายแห่ง พบว่า ท่วมไปแล้วมีการนำก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้นี้ไปใช้เดินเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้า เช่น เครื่องต้นแบบแก๊สซิฟิเคชันขนาด 100 กิโลวัตต์ ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (อาจหาญ 2550) มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าประมาณร้อยละ 11 – 18. เพื่อวิเคราะห์ถึงการ ใช้ประโยชน์และหรือการเพิ่มมูลค่าของก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้นี้ จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบมูลค่าของชีวมวลจากการเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยใช้ระบบแก๊สซิฟิเคชัน กับการเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันและนำไปใช้เป็นพลังงานความร้อนในเครื่องกำเนิดไอน้ำ, โดยกำหนดวิธีวิเคราะห์เฉพาะต้นทุนเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับการผลิตพลังงานของทั้งสองระบบเท่านั้น ซึ่งจะไม่นวมถึงเงินลงทุนขั้นต้น, ค่าแรงงาน และการบำรุงรักษา เป็นต้น. ดังแสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบในตารางที่ 3.5. เนื่องจากระบบทั้งสองมีการใช้งานที่ต่างกัน จึงต้องกำหนดเป็นมูลค่าเพื่อสามารถเปรียบเทียบกันได้ โดยเลือกหม้อไอน้ำที่มีการใช้น้ำมันเตาเกรดซีอยู่ก่อนแล้วถูกทดแทนด้วยระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิง และด้วยไม้ในปริมาณเท่ากันนี้นำไปผลิตเป็นไฟฟ้าแล้วมีมูลค่ามากกว่าหรือน้อยกว่า. จากการศึกษาพบว่า ที่การผลิตไอน้ำ 1 ตัน ต้นทุนเชื้อเพลิงน้ำมันเตาเกรดซีรวม 960 บาท/ชม. และด้วยปริมาณการผลิตไอน้ำ 1 ตันนี้ ต้นทุนเชื้อเพลิงไม้ในระบบแก๊สซิฟิเคชันรวม 330 บาท/ชม. กล่าวคือสามารถประหยัดพลังงานได้ 630 บาท/ชม. และถ้ากำหนดให้ใช้ไม้เพียง 87 กก./ชม. เพื่อให้เท่ากับปริมาณการใช้ไม้ในระบบแก๊สซิฟิเคชันที่การผลิตไฟฟ้าแล้ว, การใช้น้ำมันเตาเกรดซีจะมีต้นทุนที่ 304 บาท/ชม. และที่ 104 บาท/ชม. สำหรับการใช้น้ำมันเตาเกรดซี นั่นคือ ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ไม้เป็นเชื้อเพลิงไปทดแทนการใช้น้ำมันเตาเกรดซี สามารถประหยัดคิดเป็นมูลค่าเพิ่มเท่ากับ 199 บาท/ชม. (304 - 104 บาท/ชม.) ในขณะที่นำไม้ในจำนวนที่เท่ากันนี้ไปผลิตไฟฟ้าและขายได้มูลค่าเพียง 150 บาท/ชม. จึงกล่าวได้ว่า การนำไม้ไปใช้ในระบบแก๊สซิฟิเคชันเพื่อทดแทนการใช้น้ำมันเตาเกรดซี สามารถประหยัดคิดเป็นมูลค่าเพิ่มมากกว่าการนำไปผลิตไฟฟ้า 45 บาท/ชม.

ตารางที่ 3.5 เปรียบเทียบการนำเชื้อเพลิงชีวมวลไปผลิตไฟฟ้าและความร้อน

รายการ	หม้อไอน้ำ ¹		แก๊สซิฟิเคชันผลิตไฟฟ้า ^{1,2}
	แก๊สซิฟิเคชันไม้	น้ำมันเตาเกรดซี	
พลังงานที่ได้, 1 ตันไอน้ำ/ชม., กิโลวัตต์	1	1	60
ราคาเชื้อเพลิง, บาท/กก., บาท/ลิตร	1.2	15	1.2
ปริมาณเชื้อเพลิงที่ใช้, กก./ชม.	275	64	87
ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, กิโลแคลอรี/กิโลกรัม	2,800	9,900	2,800
ประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน, %	70	85	16
ต้นทุนพลังงาน, บาท/ชม.	330	960	104
ราคาขายพลังงาน, บาท/ชม.	-	-	150

หมายเหตุ: 1. ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าสำหรับ VSPP (2550)

2. อัจฉาญ (2550).

3.2.2 แนวทางการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน

นอกจากก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์หลักของระบบแก๊สซิฟิเคชันแล้ว, ผลิตภัณฑ์อื่นๆ คือ ถ่านคงเหลือที่หลุดรอดออกมากับขี้เถ้าและน้ำมันดิน ยังเป็นส่วนที่ควรจะได้มีการพิจารณาเพื่อให้ระบบมีความเป็นไปได้ทางด้านการเงิน. การพิจารณานำถ่านคงเหลือและน้ำมันดินนี้ไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่าแบ่งได้เป็น 2 แนวทางตามวัตถุประสงค์ที่ใช้ คือ ไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ยูคาลิปตัส.

3.2.2.1 แนวทางการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ จากการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ

ในการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันโดยใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบนี้ ผลิตภัณฑ์ที่คงเหลือจากก๊าซเชื้อเพลิงแล้วเป็นถ่านคงเหลือที่หลุดรอดออกมากับขี้เถ้าซึ่งมีประมาณร้อยละ 11.1. ถ่านส่วนนี้ไม่เหมาะสมต่อการนำกลับไปใช้ซ้ำในระบบ เนื่องจากมีค่าความร้อนเหลือน้อยและมีขนาดเล็กเกินไป. แนวทางที่เป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ คือ การนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการหุงต้ม, การนำไปเป็นส่วนผสมกับถ่านประเภทอื่นเพื่อการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง, การนำไปเป็นวัสดุปรับปรุงดิน เป็นต้น.

ส่วนผลิตภัณฑ์ที่คงเหลืออีกส่วนหนึ่งเป็นน้ำมันดิน, มีแนวทางการเพิ่มมูลค่า 2 วิธี คือ กรณีที่ใช้ก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานความร้อน เช่น ใช้เผาไหม้ในหม้อไอน้ำ เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มความคุ้มค่าของทั้งระบบ. กล่าวคือ จะไม่มีการติดตั้งระบบแยกน้ำมันดินออกจากก๊าซเชื้อเพลิง ทำให้ลดต้นทุนการติดตั้งระบบแยกน้ำมันดิน ซึ่งรวมถึงลดค่าใช้จ่ายจากการซ่อมบำรุง ค่าใช้จ่ายส่วนนี้จึงลดลงได้มาก. ปกติแล้วน้ำมันดินมีค่าความร้อนค่อนข้างสูง เมื่อผสมอยู่ในก๊าซเชื้อเพลิงจึงเป็นการเพิ่มค่าความร้อนรวมของก๊าซเชื้อเพลิงนั่นเอง น้ำมันดินที่ออกจากระบบแก๊สซิฟิเคชันมีอุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งมีสภาพเป็นไอน้ำมัน จึงมีความเหมาะสมต่อการนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตความร้อนได้โดยตรง. ส่วนกรณีที่ใช้ก๊าซเชื้อเพลิงเป็นส่วนผสมกับน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์ดีเซลเพื่อผลิตไฟฟ้า น้ำมันดินจะต้องถูกแยกออกจากระบบแก๊สซิฟิเคชัน เนื่องจากน้ำมันดินจะเข้าไปสร้างปัญหาให้กับระบบการทำงานของเครื่องยนต์ จึงต้องมีระบบแยกน้ำมันดินส่วนนี้ออกจากก๊าซเชื้อเพลิงและนำไปใช้ให้ได้มูลค่าสูงสุดจะต้องคำนึงถึงเงินลงทุนด้วย. ในเบื้องต้นมี 2 แนวทางสำหรับการนำน้ำมันดินที่แยกออกมาไปใช้งาน คือ การนำไปเป็นเชื้อเพลิงผสมกับน้ำมันเตาเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ. ส่วนอีกแนวทางหนึ่งซึ่งยังต้องการวิจัยและพัฒนาอีกคือ การนำไปเป็นวัตถุดิบทางยาหรือการนำไปเป็นวัตถุดิบของระบบ Entrained gasification เพื่อผลิตเป็นน้ำมันเกรดต่างๆ หรือการนำไปเป็นวัสดุกันแมลง เป็นต้น.

3.2.2.2 แนวทางการเพิ่มมูลค่าผลิตภัณฑ์อื่นๆ จากการใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ

ส่วนในการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชัน โดยใช้ถ่านไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบนี้ ผลิตภัณฑ์ที่คงเหลือจากก๊าซเชื้อเพลิงแล้วมีสัดส่วนใกล้เคียงกับการใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ. แนวทางการใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่าถ่านส่วนนี้เช่นเดียวกับที่เสนอในหัวข้อ 3.2.2.1. ส่วนน้ำมันดินมีปริมาณน้อยมากจนไม่มีปัญหาต่อการนำไปใช้เพื่อการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำหรือในเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้า และไม่ต้องมีระบบที่ต้องแยกน้ำมันดินออกจากก๊าซเชื้อเพลิง.

3.3 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบไพโรไลซิส

เนื่องจากผลิตภัณฑ์หลักที่ต้องการจากระบบไพโรไลซิสนี้เป็นน้ำมันดิน ส่วนผลิตภัณฑ์อื่นๆเป็นผลพลอยได้ ซึ่งมวลประเภทไม้จึงเหมาะสมกว่าการใช้ถ่านเป็นวัตถุดิบ. ในการทดลองนี้ได้เลือกไม้ยูคาลิปตัสที่สับย่อยเป็นท่อนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 - 2 นิ้ว ยาว 2 - 3 นิ้ว เป็นวัตถุดิบ. โดยการทดลองที่สภาวะโหลดสูงสุดของเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และควบคุมอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ 500 องศา

เซลเซียส. ผลลัพธ์ที่ได้จากการเดินระบบตามสภาพน้ำหนักแห้งดังแสดงในตารางที่ 3.6. ผลลัพธ์หลักที่ได้จากระบบเป็นของเหลวสีดำคิดเป็นร้อยละ 38.6, รองลงมาเป็นก๊าซเชื้อเพลิงคิดเป็นร้อยละ 32.1 และถ่านคิดเป็นร้อยละ 29.3.

ตารางที่ 3.6 ผลลัพธ์ที่ได้จากการเดินระบบไพโรไลซิสด้วยไม้ยูคาลิปตัส

รายการ	ร้อยละ
ของเหลวสีดำ	38.6
ถ่าน	29.3
ก๊าซ	32.1
รวม	100.0

น้ำมันดินเป็นส่วนที่การทดลองนี้ต้องการมากที่สุด ซึ่งจะผสมอยู่ในของเหลวสีดำนี้ (รูปที่ 3.1). เพื่อให้ได้สัดส่วนของเหลวสีดำมากกว่าร้อยละ 50 และสัดส่วนของถ่านและก๊าซดำ, จะต้องมี การควบคุมอุณหภูมิภายในเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสไม่ให้เกิน 500 องศาเซลเซียสและให้ปฏิกิริยา เกิดในเวลาสั้นๆ. ตัวแปรหลักที่ต้องควบคุม คือ วัตถุดิบต้องมีความชื้นต่ำ, ต้องมีขนาดเล็ก และต้อง ให้วัตถุดิบเกิดการหมุนวนขณะทำปฏิกิริยา. ในการเดินระบบนี้ จึงได้พยายามควบคุมในด้านความ ชื้นของวัตถุดิบไม่ให้เกินร้อยละ 10, การสับย่อยวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 - 2 นิ้ว ยาว 2 - 3 นิ้ว และตัวกวนภายในเตาปฏิกรณ์. ผลการทดลองยังได้สัดส่วนของส่วนที่เป็น ของเหลวต่ำกว่าที่ต้องการมาก ซึ่งยังต้องมีการปรับปรุงอีก.



รูปที่ 3.1 ผลลัพธ์ของเหลวสีดำที่ได้จากระบบไพโรไลซิส.

เนื่องจากวัตถุดิบยังมีความชื้นประมาณร้อยละ 10 ซึ่งเมื่อความชื้นก๊าซที่ออกมาจากเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสแล้วจะได้ของเหลวสีดำคิดเป็นร้อยละ 38.6, ดังแสดงในตารางที่ 3.6. เมื่อนำของเหลวสีดำนี้ไปแยกชั้นโดยวิธีหมุนเหวี่ยง (Centrifugal method) จะได้ส่วนที่เป็นน้ำมันดินในสัดส่วนร้อยละ 11.6 และส่วนที่เป็นน้ำสีน้ำตาลใสในสัดส่วนร้อยละ 88.4. ดังนั้น สัดส่วนของผลผลิตใหม่ที่ได้จากเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสเป็นน้ำมันดินและน้ำสีน้ำตาลใส. น้ำสีน้ำตาลใสนี้มีส่วนประกอบของสารเคมีหลากหลายชนิด แต่ส่วนประกอบส่วนใหญ่เป็นกรดเอซิดิก, น้ำส่วนนี้จึงมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อนๆ ซึ่งเกิดขึ้นในกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิระหว่าง 300 - 400 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่ไม้กำลังจะเปลี่ยนเป็นถ่าน, สารประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในไม้จะถูกสลายตัวด้วยความร้อนเกิดเป็นสารประกอบใหม่มากมาย. ดังนั้น ตั้งแต่เริ่มป้อนวัตถุดิบจนอุณหภูมิของวัตถุดิบถึง 400 องศาเซลเซียส ก๊าซที่ออกจากเตาปฏิกรณ์และนำไปควบแน่นจะได้น้ำส่วนนี้หรือเรียกว่า น้ำส้มควันไม้. สัดส่วนของผลิตภัณฑ์ใหม่ที่มีการคัดแยกชั้นโดยวิธีหมุนเหวี่ยงแล้วดังแสดงในตารางที่ 3.7.

ตารางที่ 3.7 ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่แยกได้จากของเหลวสีดำ

รายการ	ร้อยละ
น้ำมันดิน	4.5
น้ำส้มควันไม้	34.1
ถ่าน	29.3
ก๊าซ	32.1
รวม	100.0

น้ำมันดินที่ได้จากเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ใช้วัตถุดิบเป็นไม้ยูคาลิปตัส สามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงเพื่อการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำหรือนำไปใช้ประโยชน์อื่นๆ ซึ่งในเบื้องต้นได้นำไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง, ดังแสดงในตารางที่ 3.8 และรูปที่ 3.2.

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิงของน้ำมันดิน

รายการ	ร้อยละ
ความชื้น ¹ , %	-
สารระเหย ¹ , %	81.2
ถ่านคงตัว ¹ , %	18.8
เถ้า ¹ , %	0.1
ค่าความร้อน ¹ , กิโลแคลอรี/กก.	7,640
คาร์บอน ² , %	71.2
ไฮโดรเจน ² , %	6.8
ไนโตรเจน ² , %	0.7

หมายเหตุ: ¹ ห้องทดสอบสาขาวิจัยสิ่งแวดล้อมนิเวศวิทยาและพลังงาน, สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2550.

² ห้องทดสอบการปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย, 2550.



รูปที่ 3.2 น้ำมันดินที่ได้จากวัตถุดิบไม้ยูคาลิปตัส.

ส่วนน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากการเดินเตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสที่ใช้วัตถุดิบเป็นไม้ยูคาลิปตัสสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย, ได้นำไปหาคุณสมบัติเบื้องต้นดังแสดงผลในตารางที่ 3.9 และรูปที่ 3.3.

ตารางที่ 3.9 คุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้ยูคาลิปตัส

รายการ	คุณสมบัติ
ความเป็นกรดค่า	2.5
ความถ่วงจำเพาะ	1.01
ความหนาแน่น, กรัม/ซีซี	1.004
สี	น้ำตาลอ่อนปนแดงใส
ความโปร่งแสง	โปร่งแสง



รูปที่ 3.3 น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากวัตถุดิบไม้ยูคาลิปตัส.

3.3.1 แนวทางการเพิ่มมูลค่าน้ำมันดินจากระบบไพโรไลซิส

น้ำมันดินที่ได้มีปริมาณเพียงร้อยละ 4.5 ของวัตถุดิบที่เดิมที่สภาพน้ำหนักแห้ง ซึ่งจำเป็นต้องนำไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่าเพื่อให้ระบบมีความคุ้มทุน. เช่นเดียวกับน้ำมันดินที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันที่มีแนวทางการใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า 2 วิธี คือ กรณีที่ใช้เพื่อผลิตพลังงานความร้อนโดยใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ จำเป็นจะต้องนำไปผสมกับเชื้อเพลิงที่มีการใช้เดิมอยู่แล้ว. เชื้อเพลิงเดิมที่เหมาะสม คือ น้ำมันเตา เนื่องจากมีค่าความหนืดใกล้เคียงที่สุด. การอุ่นน้ำมันเตาและน้ำมันดินให้ร้อนเพื่อให้เหมาะสมต่อการฉีดเข้าห้องเผาไหม้. ส่วนอีกแนวทางหนึ่งซึ่งยังต้องมีการวิจัยและพัฒนาอีก คือ การนำไปเป็นวัตถุดิบทางยา หรือการนำไปเป็นวัตถุดิบของระบบ Entrained gasification เพื่อผลิตเป็นน้ำมันเกรดต่างๆ หรือการนำไปเป็นวัสดุกันแมลง เป็นต้น.

3.3.2 แนวทางการเพิ่มมูลค่าน้ำส้มควันไม้จากระบบไพโรไลซิส

น้ำส้มควันไม้เป็นของเหลวสีน้ำตาลใส ที่ได้จากการควบแน่นก๊าซที่ออกจากระบบที่อุณหภูมิภายในเตาไม่เกิน 400 องศาเซลเซียส. จากผลการเดินระบบพบว่าปริมาณถึงร้อยละ 34.1 ของวัตถุดิบที่เดิมที่สภาพน้ำหนักแห้ง. เนื่องจากน้ำส้มควันไม้มีสารประกอบหลายชนิด, ดังนั้น จึงมีแนวทางที่จะนำมาใช้หรือเป็นส่วนผสมเพื่อใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นกลุ่มสำคัญๆ ทางด้านอุตสาหกรรมและเกษตร ดังนี้:

- ด้านอุตสาหกรรม ได้มีการนำน้ำส้มควันไม้มาใช้ประโยชน์ทางด้านอุตสาหกรรมแล้วในหลายผลิตภัณฑ์ เช่น เป็นส่วนผสมในการผลิตสารดับกลิ่นตัว, สารปรับผิวนุ่มที่ใช้ทั้งแบบโดยตรงทางผิวหนังหรือผสมน้ำอาบ, อาหารรมควัน, ย้อมผ้า, สารป้องกันเนื้อไม้จากเชื้อราและแมลง, ยารักษาโรคผิวหนัง, เครื่องสำอาง เป็นต้น.

- ด้านการเกษตร น้ำส้มควันไม้สามารถใช้ในการกำจัดศัตรูพืชประเภทเชื้อราและไส้เดือนฝอยในดิน, การป้องกันศัตรูพืชจากแมลงเกือบทุกชนิดทั้งในช่วงที่เป็นต้นกล้าและช่วงที่พืชโตแล้ว เป็นต้น.

เนื่องจากการเดินระบบไพโรไลซิสด้วยชีวมวลให้ผลิตภัณฑ์น้ำส้มควันไม้มีปริมาณถึงร้อยละ 34.1 ของวัตถุดิบที่เดิมที่สภาพน้ำหนักแห้ง. ในเบื้องต้นจึงมีความจำเป็นต้องหาแนวทางการใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์นี้ก่อนที่จะหาแนวทางการเพิ่มมูลค่า. แนวทางการใช้ประโยชน์ที่น่าสนใจคือการใช้เพื่อป้องกันศัตรูพืชและสัตว์ในครัวเรือน, ดังแสดงผลการศึกษาและข้อเสนอแนะจากแหล่ง

ต่างๆ ในภาคผนวกที่ 4. อย่างไรก็ตาม แนวทางการใช้ประโยชน์ดังกล่าวนี้ ยังเพียงมีการประชาสัมพันธ์ผู้ใช้ ซึ่งยังไม่มีการยอมรับมากนัก, จึงจำเป็นต้องอาศัยเวลาอีกช่วงระยะหนึ่งก่อน.

3.3.3 แนวทางการเพิ่มมูลค่าถ่านและก๊าซเชื้อเพลิงจากระบบไพโรไลซิส

ด้วยสัดส่วนของผลิตภัณฑ์ถ่านและก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้มีมากถึงร้อยละ 29.3 และ 32.1, จึงต้องการแนวทางการใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่าให้มากที่สุดเพื่อให้ระบบไพโรไลซิสมีความคุ้มค่า โดยเน้นที่การหาแนวทางการใช้ประโยชน์ทั้งของถ่านและก๊าซเชื้อเพลิงก่อน.

แนวทางการใช้ประโยชน์ถ่านที่ได้จากระบบไพโรไลซิสแบ่งได้เป็น 3 วิธี คือ ขายให้กับผู้ใช้สำหรับการหุงต้มทั่วไป วิธีนี้มีผู้ใช้ทั่วไปอยู่แล้วซึ่งราคาขายปลีกจะอยู่ในช่วง 4 - 5 บาท/กก. วิธีที่สองคือการนำไปใช้เป็นวัตถุดิบให้กับระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ผลิตไฟฟ้า วิธีนี้ยังมีปัญหาที่ระบบแก๊สซิฟิเคชันขนาดเล็กที่ต่ำกว่า 100 - 200 กิโลวัตต์ ยังไม่มีเทคโนโลยีของไทยที่มีความน่าเชื่อถือในเชิงการค้า. นั่นคือ จะต้องมีการนำเข้าเทคโนโลยีจากต่างประเทศซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ นำเข้าจากกลุ่มประเทศที่เจริญแล้ว เช่น ญี่ปุ่น, อเมริกา และยุโรป เป็นต้น ซึ่งมีราคานำเข้าที่สูงประมาณ 10 - 20 ล้านบาท/ 100 กิโลวัตต์ไฟฟ้า และนำเข้าจากกลุ่มประเทศที่ยังไม่เจริญ เช่น จีน, อินเดีย เป็นต้น ซึ่งมีราคานำเข้าที่สูงประมาณ 4 - 7 ล้านบาท/ 100 กิโลวัตต์ไฟฟ้า. ไม่ว่าจะนำเข้ามาจากกลุ่มใดก็ตาม ราคาของเทคโนโลยีนี้ยังสูงเกินไปจนไม่สามารถเดินระบบแล้วมีกำไรที่ราคาของถ่าน ที่ขายในท้องตลาดที่อยู่ในช่วง 4 - 5 บาท/กก. การใช้ถ่านเป็นวัตถุดิบให้กับระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ผลิตไฟฟ้าจะมีความเป็นไปได้ที่การสร้างเทคโนโลยีนี้ขึ้นในประเทศ ซึ่งจะทำให้ราคาเทคโนโลยีถูกลงจนอยู่ที่ประมาณ 1.5 - 2.0 ล้านบาท/ 100 กิโลวัตต์ไฟฟ้า จึงจะมีความคุ้มค่า. ส่วนวิธีที่สาม คือ การวิจัยและพัฒนาถ่านเพื่อไปเป็นวัตถุดิบทางยาสำหรับการปลูกสัตว์เพื่อใช้แทนผลิตภัณฑ์เคมี แต่วิธีนี้ยังต้องอาศัยเวลาเพื่อการศึกษา.

ก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบไพโรไลซิส มีส่วนประกอบของก๊าซเชื้อเพลิงใกล้เคียงกับก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน จึงเสนอแนวทางการใช้ประโยชน์เช่นเดียวกับที่เสนอในก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันในหัวข้อ 3.2.1.

4. สรุปผลการทดลอง

วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ เพื่อศึกษาแนวทางการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า เพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ดังกล่าว การวิเคราะห์ได้แบ่งออกเป็น:

- การศึกษาแนวทางการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน ไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า.
- การศึกษาแนวทางการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบไพโรไลซิส ไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า.

4.1 สรุปจากระบบแก๊สซิฟิเคชัน

ในการเดินระบบแก๊สซิฟิเคชันนี้ใช้ไม้ยูคาลิปตัสและถ่าน ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ โดยกำหนดให้เดิมวัตถุดิบที่ไหลสูงสุดที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและควบคุมอุณหภูมิภายในโซนเผาไหม้ที่ 700 องศาเซลเซียส. ระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซเชื้อเพลิง, น้ำมันดิน และถ่านที่เหลือจากการเดินระบบ, ในสัดส่วนร้อยละ 87.9, 1.0 และ 11.1 ตามลำดับ. ในขณะที่ใช้ถ่าน ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบจะให้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซเชื้อเพลิง, น้ำมันดิน และถ่านที่เหลือจากการเดินระบบ ในสัดส่วนเป็นร้อยละ 91.9, 0.02 และ 8.1 ตามลำดับ.

แนวทางการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่านั้น ก๊าซเชื้อเพลิงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบมากที่สุดถึงร้อยละ 87.9 และร้อยละ 91.9. ในกรณีที่ใช้ถ่าน ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ ได้เสนอแนวทางการนำไปใช้เพื่อการใช้ที่ให้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า โดยการนำไปเผาไหม้แทนน้ำมันเตาเกรดซีในหม้อไอน้ำ. เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับแนวทางการใช้เพื่อผลิตไฟฟ้า พบว่า แนวทางการนำไปใช้เพื่อเผาไหม้แทนน้ำมันเตาเกรดซี ให้ผลตอบแทนมีมูลค่าเพิ่มสูงกว่าแนวทางการใช้เพื่อผลิตไฟฟ้าคิดเป็นมูลค่า 45 บาท/ชม. ที่ขนาดการผลิตไฟฟ้า 60 กิโลวัตต์.

น้ำมันดินเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่ได้จากระบบที่สามารถนำไปเพิ่มมูลค่าได้ แต่ในการวิเคราะห์นี้ เสนอแนวทางที่มีความเป็นไปได้สูงที่มีความคุ้มค่า, โดยเสนอแนวทางที่ไม่ควรแยกน้ำมันดินออกจากก๊าซเชื้อเพลิงและควรรนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อการเผาไหม้ในหม้อไอน้ำ ซึ่งนอกจากจะเป็นการเพิ่มความร้อนให้กับก๊าซเชื้อเพลิงแล้ว ยังทำให้ระบบแก๊สซิฟิเคชันไม่ต้องมีการลงทุนกับระบบดักแยกน้ำมันดิน ซึ่งเป็นระบบที่มีการลงทุนและค่าบำรุงรักษาสูงมาก.

ส่วนถ่านคองเหลือที่หลุดรอดออกมากับชี้เถ้าซึ่งมีประมาณร้อยละ 11.1, ถ่านส่วนนี้ไม่เหมาะสมต่อการนำกลับไปใช้ซ้ำในระบบ เนื่องจากมีค่าความร้อนเหลือน้อยและมีขนาดเล็กเกินไป แนวทางที่เป็นไปได้ในการนำไปใช้ประโยชน์ คือ การนำไปเป็นเชื้อเพลิงสำหรับการหุงต้ม, การนำไปเป็นส่วนผสมกับถ่านประเภทอื่นเพื่อการอัดเป็นแท่งเชื้อเพลิง, การนำไปเป็นวัสดุปรับปรุงดิน เป็นต้น.

4.2 สรุปจากระบบไพโรไลซิส

ส่วนการเดินระบบไพโรไลซิสนี้ใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบเท่านั้น โดยกำหนดให้เดิมวัตถุดิบที่ไหลตสูงที่สุดที่อัตราการป้อนเชื้อเพลิง 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมงและควบคุมอุณหภูมิภายในโซนเผาไหม้ที่ 500 องศาเซลเซียส. ระบบไพโรไลซิสให้ผลิตภัณฑ์เป็นของเหลวสีดำ, ก๊าซเชื้อเพลิงและถ่าน ในสัดส่วนร้อยละ 38.6, 32.1 และ 29.3 ตามลำดับ. ของเหลวสีดำประกอบด้วยน้ำมันดินและน้ำส้มควันไม้ ซึ่งเมื่อนำไปแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยกจะได้เป็นสัดส่วนร้อยละ 4.5 และ 34.1 ตามลำดับ.

ระบบไพโรไลซิสให้ความสำคัญกับผลิตภัณฑ์น้ำมันดินมาก แต่ระบบที่ออกแบบนี้ยังมีข้อบกพร่องทำให้ได้สัดส่วนของน้ำมันดินค่อนข้างต่ำเพียงร้อยละ 4.5 เท่านั้น. อย่างไรก็ตาม น้ำมันดินจำนวนนี้จะต้องมีการนำไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นการเพิ่มรายได้ให้กับระบบ ซึ่งมีแนวทางอยู่ 2 วิธี คือ ใช้เพื่อผลิตพลังงานความร้อนโดยใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ ซึ่งแนวทางนี้จะเหมือนกับที่เสนอในระบบแก๊สซิฟิเคชัน. ส่วนอีกแนวทางหนึ่งซึ่งยังต้องมีการวิจัยและพัฒนาอีก คือ การนำไปเป็นวัตถุดิบทางยาหรือการนำไปวัตถุดิบของระบบ Entrained gasification เพื่อผลิตเป็นน้ำมันเกรดต่างๆ หรือการนำไปเป็นวัสดุกันแมลง เป็นต้น.

น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากระบบมีสัดส่วนร้อยละ 34.1, ปัจจุบันมีการนำไปใช้หรือเป็นส่วนผสมเพื่อใช้ประโยชน์ได้อย่างหลากหลาย เช่น ด้านอุตสาหกรรม นำไปเป็นส่วนผสมในการผลิตสารดับกลิ่นตัว, สารปรับผิวนุ่มที่ใช้ทั้งแบบโดยตรงทางผิวหนังหรือผสมน้ำอาบ, อาหารรบกวน, ย้อมผ้า, สารป้องกันเนื้อไม้จากเชื้อราและแมลง, ยารักษาโรคผิวหนัง, เครื่องสำอาง เป็นต้น. ด้านการเกษตร นำไปใช้เป็นสารกำจัดศัตรูพืชประเภทเชื้อราและไส้เดือนฝอยในดิน, การป้องกันศัตรูพืชจากแมลงเกือบทุกชนิดทั้งในช่วงที่เป็นต้นกล้าและช่วงที่พืชโตแล้ว เป็นต้น ซึ่งเสนอให้นำไปใช้ทางด้านการเกษตรก่อนเนื่องจากไม่มีความยุ่งยาก.

ถ่านที่ได้จากระบบมีสัดส่วนร้อยละ 29.3, มีแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ได้ 3 วิธี คือ ขายให้กับผู้ใช้สำหรับการหุงต้มทั่วไป, นำไปใช้เป็นวัตถุดิบให้กับระบบแก๊สซิฟิเคชันที่ใช้ผลิตไฟฟ้า และเน้นการวิจัยและพัฒนาเพื่อนำไปเป็นวัตถุดิบทางยาสำหรับการปลูกสัตว์เพื่อใช้แทนผลิตภัณฑ์เคมี.

ส่วนก๊าซเชื้อเพลิงที่ได้จากระบบมีสัดส่วนร้อยละ 32.1 ควรนำไปเป็นก๊าซเชื้อเพลิงเพื่อทดแทนน้ำมันเตาเกรดซีในหม้อไอน้ำ เช่นเดียววิธีที่เสนอในระบบแก๊สซิฟิเคชันซึ่งเป็นวิธีที่ให้ผลตอบแทนสูงที่สุด.

5. ข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์ข้อมูลการนำผลิตภัณฑ์ที่ได้จากระบบแก๊สซิฟิเคชัน และไพโรไลซิสไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่า, พร้อมกับได้เสนอแนวทางที่จะทำให้การเดินระบบนี้มีความคุ้มค่าที่สุด. ผลการวิเคราะห์ได้แสดงแนวทางการนำผลิตภัณฑ์ไปใช้ประโยชน์และหรือเพิ่มมูลค่าอย่างหลากหลาย. อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังไม่ได้รับผลการวิเคราะห์ที่สมบูรณ์ทั้งหมดยังมีส่วนที่ควรจะได้ดำเนินการต่อ จึงได้เสนอแนวทางการวิจัยต่อไปในอนาคต ดังนี้:

- เนื่องจากระบบที่ทำการทดลองนี้ เป็นระบบที่แยกเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิสออกจากกัน แต่ได้มีการออกแบบให้ใช้บางอุปกรณ์ทำงานร่วมกัน, ประสิทธิภาพของอุปกรณ์บางตัวจึงต่ำเกินไปและก่อให้เกิดปัญหาทั้งระบบทั้งหมด เช่น พัดลมดูดที่ถูกออกแบบให้วางในตำแหน่งไกลที่สุดจากเตาปฏิกรณ์แก๊สซิฟิเคชันและไพโรไลซิส เพื่อหลีกเลี่ยงการบำรุงรักษาจากน้ำมันดินอุดตันแต่ก็ประสบปัญหาที่กำลังดูดของพัดลมต่ำเกินไป. การวางตำแหน่งของไซโคลอนทั้งสองตัวยังเป็นตำแหน่งที่ยังไม่ใช่จุดที่ดีที่สุด การวางชุดควบแน่นในตำแหน่งไม่ถูกต้องซึ่งเป็นแนวนอน เป็นต้น. การแก้ไขระบบจะต้องมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แต่ละตัว จะต้องได้รับการทดสอบและแก้ไข.

- ศึกษาแนวทางการนำความร้อนของก๊าซเชื้อเพลิงที่มีอุณหภูมิสูงประมาณ 300 – 500 องศาเซลเซียส ในระบบแก๊สซิฟิเคชันไปใช้ประโยชน์ เช่น การนำไปเป็นอากาศป้อนในระบบไพโรไลซิสเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพ.

- เตาปฏิกรณ์ไพโรไลซิสจะต้องมีการวิจัยและพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อการผลิตน้ำมันดินให้ได้ปริมาณมากกว่าชุดปัจจุบัน โดยเฉพาะการเร่งปฏิกิริยาของเตาปฏิกรณ์ให้ถึงอุณหภูมิที่กำหนดภายในช่วงเวลาสั้นที่สุด.

- ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากทั้งสองระบบยังมีแนวทางการวิจัยและพัฒนาในอีกหลายช่องทาง แต่ยังไม่มีการดำเนินการทดลองครั้งนี้, โดยเฉพาะการหาแนวทางสกัดสารที่มีประโยชน์จากน้ำมันดินเพื่อใช้ในวงการอุตสาหกรรม เช่น การสกัดสารปรุ่กกลิ่นควันไฟ เป็นต้น, การหาแนวทางสกัดสารที่มีประโยชน์จากน้ำส้มควันไม้ เพื่อใช้ในวงการอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง เกษตร เป็นต้น.

6. เอกสารอ้างอิง

- โชติขจร, ดร.ณิ และคณะ. 2549. การวิจัยการใช้ประโยชน์จากน้ำส้มควันไม้ในทางการเกษตร, จัดโดย สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สมาคมเทคโนโลยีที่เหมาะสม และมหาวิทยาลัยขอนแก่น ณ ห้องประชุมวิจิตรกุล คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- ตัวอย่างการคำนวณค่าไฟฟ้าสำหรับ VSPP. 2550. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก <http://www.pea.co.th/vspp/vspp/calculationVSPP-netadder.pdf>, [เข้าถึงเมื่อ 20 ตุลาคม 2550]. หน้า 43.
- พิมพ์สมาน, สุภาณี. 2549. ผลของการใช้สารฆ่าแมลงจากพืชต่อประสิทธิภาพการเบียนไข่เพลี้ยกระโดดสีน้ำตาลในสภาพนาข้าว, สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สมาคมเทคโนโลยีที่เหมาะสม และมหาวิทยาลัยขอนแก่น ณ ห้องประชุมวิจิตรกุล คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- อินทศรี, สุชาติ. 2549. ผลของน้ำส้มควันไม้ต่อการเจริญเติบโต และผลผลิตของถั่วฝักยาวไร้ค้างพันธ์ มข.25, จัดโดย สำนักงานวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สมาคมเทคโนโลยีที่เหมาะสม และมหาวิทยาลัยขอนแก่น ณ ห้องประชุมวิจิตรกุล คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.
- อจหาญ, วีรัชย์. 2550. การศึกษาดันแบบโรงไฟฟ้าชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชน, การสัมมนาเผยแพร่ผลงานวิจัย โรงไฟฟ้าต้นแบบชีวมวลขนาดเล็กสำหรับชุมชนแบบครบวงจร, สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โรงแรมราชพฤกษ์แกรนด์ไฮเทล, นครราชสีมา.
- BTG, 2004a, Flash Pyrolysis, Biomass Technology Group, [online]. Available at: <http://www.btgworld.com/technologies/pyrolysis.html>, [accessed 20th October 2007].
- BTG, 2004b, Pyrolysis produces a clean liquid biomass energy carrier, Biomass Technology Group, [online]. Available from: <http://www.btgworld.com/technologies/pdf/leaflet-fast-pyrolysis.pdf>, [accessed 20th October 2007], Bangkok.
- CU, 2004. Energy from Waste: Pyrolysis & Gasification, Cardiff University, Waste research Station, [online]. available at: <http://www.wasteresearch.co.uk/ade/efw/gasification.htm>, [accessed 20th October 2007].
- Dasappa, S., Mukunda, H.S., 2003. Biomass gasification theory and design. Indian : Institute of Science, Bangalore.

- FOE, 2002, Briefing: Pyrolysis and gasification, Friends of the Earth, [online]. Available from: http://www.foe.co.uk/resource/briefings/gasification_pyrolysis.pdf, [accessed 20th October 2007].
- Gallagher, G. J., 2002, Development of a Small-Scale Biomass CHP System, [online]. Available from: www.berr.gov.uk/files/file14931.pdf, [accessed 20th September 2007].
- Internet: [online]. Available from: <http://www.zzic.com.cn/dz/En/charcoal-tech.htm>, [accessed 22th September 2006].
- Internet: [online]. Available from: <http://www.eppo.go.th/vrs/VRS55-06-biomass.html>, [accessed 22th September, 2006].
- JAEE, 2004, Pyrolysis Kiln, Japanese Advanced Environment Equipment, [online]. Available at: http://nett21gee.jp/JSIM_DATA/WASTE/WASTE_3/html/Doc_433html, [accessed 20th October 2007].
- Juniper, 2004, Pyrolysis and Gasification, Technology Reviews for the waste, Environmental and Renewable Energy Sectors, [online]. Available at: <http://www.juniper.co.uk/services/Our%20Services/P&G.html>, [accessed 20th October 2007].
- Kishimoto S., (n.d.) Textbook for the international training course on charcoal making and utilization.
- Mukunda, H.S., Dasappa S., Rajan N.K.S., and Paul P.J., and Shrinivasa U., 1994, Gasifiers and combustors for biomass – technology and field studies, Energy for sustainable development, 1(3).
- Nan L., Best G. and Neto C.C.C.C., 1994. Integrated energy systems in China - The cold North-eastern region experience, UN.
- Pyrolysis, 2004, General Process of Tire Pyrolysis, [online]. Available from: <http://www.p2pays.org/ref/11/10504/html/usa/pyro.htm>, [accessed 20th October 2007].
- Rezaiyan, J., Cheremisinoff, N.P., 2005. Gasification Technologies: A Prime for Engineers and Scientists, CPR Press, Taylor & Francis Group, Florida.
- The Making of Wood Vinegar (Pyroligneous Acid), 2007. [online]. Available from: <http://www.storesonline.com/Site/466295/page/241832>, [accessed 20th October 2007].

- Takamura, Y., 2000. เทคนิคการประหยัดพลังงานความร้อนในอุตสาหกรรม, ระนอง พืชผพันธุ์, วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, บัณฑิต วิศวกรรมการยานยนต์ แปล, กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น), สำนักพิมพ์.
- UH, 2004, Pyrolysis team, Department of Chemistry, University of Hamburg, [online]. Available from:http://www.chemie.uni-hamburg.de/tmc/kaminsky/html/pyrolysis_team.html, [accessed 20th October 2007].
- Vigouroux R.Z., 2001. Pyrolysis of biomass, Dissertation in doctoral degree, Royal institute of technology, Stockholm.
- Venderbosch, R.H., Prins, W., 2004, Entrained flow gasification of bio-oil for syngas, BTG biomass technology group, [online]. Available from: <http://bioproducts-bioenergy.gov/pdfs/bcota/abstracts/23/51.pdf>, [accessed 20th October 2007].
- Wirachai S., Thanet U. and Prapun P., 2007. Biomasses & Wastewaters Surveys for the Application Enlargement of the 100 kW PAFC in Thailand, Research Project No. 50 – 01, Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Thailand.
- Wood Vinegar, [online]. Available from: <http://www.sumiworld.com/vinegar.html>, [accessed 20th October 2007].

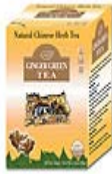
7. ภาคผนวก

ตารางสารประกอบต่างๆ ในน้ำส้มควันไม้

ประเภทสารประกอบ	ชนิดสาร
Organic acid	Formic acid, acetic acid, propanoic acid, butyric acid, isobutyric acid, varellic acid, isovarellic acid, Crotonic acid, Enanthic acid, levulinic acid, etc.
Phenol	Phenol, 2.4 xylenol, 3.5 xylenol, o.m.p-cresol, 4-ethyl-guaiacol, 4-propyl-guaiacol , pyrogallol, 4-ethylphenol, 4-propylphenol, 5-methylpyrogallol, 5-ethylpyrogallo-1.3 dunethyl ether, 5-propylpyrogallol-1.3dunethyl ether, catechol, 4-methyl catechol, 4-ethyl catechol, 4-propyl catechol, etc.
Carbonyl	Formaldehyde, acetaldehyde, propuonaldehyde, isobuthylaldehyde, buthylaldehyde, valeraldehyde, isovaleraldehyde, glyoxal, acrolein, crotonaldehyde, Furfural, 5-hydroxymetylfural, acetone, metyl ethyl ketone metyl propyl ketone, metyl isopropyl ketone, metyl buthyl tulyl ketone, Diacetyl, metyl cyclo pentenone, metyl cyclo pentenorone, etc.
Alcohol	Methanol, ethanol, propanol, isopropanol, Allyl alcohol, isobuthy lalcohol, isoamyl alcohol, etc.
Neutral ingredients	Levoglucozan, acetol, maltor, roganic acid methyl ester, Veratrole, 4-methyl veratrole, 4-ethyl veratrole, 4-propyl veratrole, 3.4-benzopyrene, 1.2.5.6-dibenzanthracene, 20-methylcholinsene, hydroxyl- valerolactone, ammonia, methylamine, dimethylamine, pyridine, methylpyridine, dimethylpyridine, trimethylamine, etc.

ตารางสัดส่วนสารประกอบในน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากเตาผลิตถ่าน

สารประกอบ HCETIC	CONTENT
Acetic acid	2.70
Propanoic acid	0.12
Methanol	0.13
Furfural	0.11
Acetone	0.01
Cycloten	0.15
2-Cyclopinternon	0.03
Furfuryl alcohol	0.02
Gulalcohol	0.04
Tetrahydro furfuryl alcohol	0.06
Para-Cresol & Meta-Cresol	0.09
2-Methoxy-4- Cresol	0.08
Ortho-Cresol	0.08
Nornan-1 , 4-Olld	0.04
Ethyl- Gulalcool	0.01



รูปผลิตภัณฑ์ตัวอย่างที่มีการนำน้ำส้มควั่นไม่เป็นส่วนผสม.

ตารางข้อแนะนำวิธีการใช้น้ำส้มควันไม้ตามอัตราส่วนผสมกับน้ำ

ประโยชน์	อัตราส่วน น้ำส้มควันไม้ต่อน้ำ	วิธีการใช้
ป้องกันศัตรูพืชและสัตว์		
- กำจัดไส้เดือนฝอย แมลงในดิน มด และปลวก	1:20	ราดหรือพ่นบริเวณที่มี ก่อนปลูกพืช 15 วัน
- รักษาโรคเชื้อราในขางพารา	1:20	ทาหน้าขางพารา
- เร่งการเจริญเติบโต กระตุ้นความต้านทานโรค	1:100	ฉีดพ่นลงดิน ก่อนปลูกพืช 15 วัน
- ขับไล่แมลงทุกชนิดและ เชื้อรา	1:200	ราดโคนต้นทุก 7-15 วัน หรือฉีดพ่นที่ใบทุก 7-15 วัน
- ช่วยในการสังเคราะห์น้ำตาลของพืช ทำให้ผักและผลไม้มีรสหวาน	1:200	ฉีดพ่นผลอ่อนหลังติดผลแล้ว 15 วัน และก่อนเก็บ 20 วัน
- เป็นสารจับใบ		
- กำจัดกลิ่นและขับไล่แมลงในคอกสัตว์	1:500	ผสมกับน้ำแทนสารเคมี
- ขับไล่เห็บ หมัด และรักษาโรคเรื้อนของสัตว์	1:1000	ราดพื้นคอกสัตว์หรือบริเวณที่มีกลิ่นทุก 7 วัน
	1:100	ฉีดพ่นที่ตัวสัตว์อาทิตย์ละ 2-3 ครั้ง
ในครัวเรือน		
- ป้องกัน ปลวก มด และสัตว์ต่างๆ		พ่นหรือราดทั่วบริเวณทุก 7-15 วัน
- ดับกลิ่นห้องน้ำ ห้องครัว บริเวณที่ชื้นแฉะ และกำจัดกลิ่นขยะ	1: 50	พ่นบริเวณที่มีกลิ่น หรือ ถึงขยะทุก 7 วัน
- รักษาแผลสด แผลถูกน้ำร้อนลวก และ ไฟลวก	1:100	ทาบริเวณแผลทุกวัน เช้าและเย็น
- ฆ่าปลวก มด		พ่นหรือราดรังปลวก หรือมด
	1:0	
	1:0	



รูปน้ำส้มควันไม้ตามอัตราส่วนผสมกับน้ำ