

การออกแบบโรงงานผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากชีวมวล



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ปีการศึกษา 2563

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Design of formaldehyde production plant from biomass



A REPORT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน **ACADEMIC YEAR 2020** อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การออกแบบโรงงานผลิตพอร์มาลดีไฮด์จากชีวมวล  
โดย นายภาณุพงศ์ ปรีภักธาทารณ  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. อีรพร สุธีวงศ์  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี  
คณะกรรมการตรวจสอบปริญญานิพนธ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง	การออกแบบโรงงานผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากชีวมวล
โดย	นายภาณุพงศ์ ปรีภักธนาภรณ์
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2563
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร. อธิพร สุวีวงศ์

## บทคัดย่อ

ฟอร์มัลดีไฮด์เป็นสารที่สำคัญในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นสารตั้งต้นในหลายอุตสาหกรรม เช่น อาหาร ยา และพอลิเมอร์ เป็นต้น ผลิตได้จากปฏิกิริยาออกซิเดชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่างเมทานอลและอากาศ ซึ่งเมทานอลผลิตจากแก๊สสังเคราะห์จากกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส ของแก๊สธรรมชาติหรือถ่านหิน รวมทั้งชีวมวล ซึ่งงานวิจัยนี้สนใจการออกแบบกระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากฟางข้าว เนื่องจาก ต้องการนำฟางข้าวซึ่งเป็นของเหลือทางการเกษตรในประเทศไทยมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เพื่อลดการกำจัดอย่างผิดวิธีของเกษตรกร เช่น การเผาซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เป็นต้น โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับแต่ละหน่วยปฏิบัติการในกระบวนการผลิตและวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ จากผลการทดลองพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมกับกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สอยู่ที่ 900 องศาเซลเซียส ผลของการเพิ่มความดันในเครื่องปฏิกรณ์เมทานอลส่งผลให้ได้เมทานอลมากขึ้น แต่การเพิ่มความดันมากเกินไปทำให้ต้องเสียค่าดำเนินการมากขึ้น ความดันที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ คือ 50 บาร์ อัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเมทานอลที่เหมาะสมเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มัลดีไฮด์ คือ 1.4 โดยมวล และจากการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีผลเป็นบวกที่ 12.4 ล้านดอลลาร์สหรัฐ คืนทุนภายใน 7 ปี และโครงการนี้น่าลงทุนเนื่องจากตลาดฟอร์มัลดีไฮด์ยังมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

<b>Report Title</b>	Design of formaldehyde production plant from biomass
<b>By</b>	Mr. Panuphong Paripantaporn
<b>Degree</b>	Bachelor of Engineering
<b>Program</b>	Chemical Engineering
<b>Year</b>	2020
<b>Advisor</b>	Ast.Prof.Dr. Teeraporn Suteewong

## ABSTRACT

Formaldehyde is one of the most important chemicals in industry since formaldehyde can be used as starting material in many industries such as food, pharmaceuticals and polymers. It is produced from catalytic oxidation reaction between methanol and air. Methanol is produced from syngas in gasification process of natural gas, coal or biomass. In this work, we design the production process of formaldehyde from rice straw. Optimum conditions for each operation unit and economic evaluation were studied. It was found that, the optimum gasification temperature was 900 °C. Increasing pressure in the methanol reactor not only promoted methanol yield but also increased operating cost of compressor. So, optimum pressure this research was 50 bar. Best air to methanol feed ratio for formaldehyde reactor was 1.4 by mass. NPV is positive at \$12.4 million with payback period in 7 years. This project is worth investing because formaldehyde market is continually growing.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

||

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ผศ.ดร.ธีรพร สุธีวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโทที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ช่วยเหลือ และชี้แนะแนวทางแก้ไขปัญหา ตลอดจนดูแลเอาใจใส่ จนทำให้ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ และ ผศ.ดร.พรสวรรค์ อัครแสงรัตน์ กรรมการตรวจสอบเล่มปริญญาโท ที่ให้คำแนะนำในการปรับปรุงแก้ไขปริญญาโทฉบับนี้จนมีความสมบูรณ์

ขอขอบคุณ ผศ.ดร.ญาณิพร พัทธวรโชติ ที่ช่วยตรวจสอบเล่มปริญญาโทและตรวจสอบความถูกต้องของการดำเนินงานในขั้นตอนการจำลอง จนปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณาจารย์และบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ ให้ความรู้ และคำปรึกษาตลอดการทำปริญญาโท

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่คอยให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ และการสนับสนุนที่ดีเสมอมา ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี หากมีข้อผิดพลาดประการใดข้าพเจ้าน้อมรับและขออภัยไว้ ณ ที่นี้

ภาณุพงศ์ ปริภัมทาภรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

III

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

# สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ .....	I
ABSTRACT .....	II
กิตติกรรมประกาศ .....	III
สารบัญ .....	IV
สารบัญตาราง .....	VI
สารบัญรูปภาพ .....	VII
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ .....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย .....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ .....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	3
2.1 ข้อมูลทั่วไปของฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) .....	3
2.2 กระบวนการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde Production) .....	4
2.3 ฟางข้าว (Rice Straw) .....	5
2.4 กระบวนการผลิตเมทานอล (Methanol Production) .....	5
2.5 กระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส .....	7
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	7
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	11
3.1 การรวบรวมข้อมูล (Data Collecting) .....	11
3.2 การจำลองกระบวนการผลิต (Process Simulation) .....	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้วย  
การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2	ขั้นตอนการจำลองกระบวนการผลิต .....	12
3.2.3	แบบจำลองและสถานะที่ใช้ .....	13
3.2.4	ปริมาณการป้อนและสาธารณูปโภค.....	14
3.3	การแก้ปัญหา (Solution).....	15
3.4	การประเมินผล (Evaluation).....	15
3.4.1	มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV).....	15
3.4.2	ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period).....	16
3.4.3	ความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต (Sensitivity Analysis).....	16
<b>บทที่ 4</b>	<b>ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....</b>	<b>17</b>
4.1	การศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส .....	17
4.1.1	ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ .....	17
4.1.2	ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อชีวมวลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์ .....	18
4.2	การศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล.....	19
4.2.1	ผลของความดันต่อเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล .....	19
4.3	การศึกษาสถานะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มัลดีไฮด์.....	20
4.3.1	ผลของอัตราส่วนอากาศต่อเมทานอล .....	20
4.4	การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Evaluation) .....	22
4.4.1	การวิเคราะห์กระแสเงินสดสะสม และระยะเวลาคืนทุน.....	22
4.4.2	การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต (Sensitivity Analysis) .....	23
<b>บทที่ 5</b>	<b>สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....</b>	<b>24</b>
5.1	สรุปผลการทดลอง .....	24
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	24
	<b>เอกสารอ้างอิง .....</b>	<b>25</b>
	<b>ภาคผนวก .....</b>	<b>27</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 สมบัติทั่วไปของฟอร์มมาลดีไฮด์.....	3
2.2 Proximate analysis ของฟางข้าวในหน่วยอัตราส่วนเชิงมวล.....	5
2.3 Ultimate analysis ของฟางข้าวในหน่วยอัตราส่วนเชิงมวล.....	5
2.4 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล.....	9
2.5 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มมาลดีไฮด์.....	10
3.1 แบบจำลองและสถานะของกระบวนการผลิตในโปรแกรม ASPEN.....	13
3.2 ปริมาณการป้อนและสารารณูปโภค.....	14
4.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์.....	22



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูปร่างภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างโมเลกุลของฟอร์มัลดีไฮด์ .....	3
2.2 กระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์.....	5
2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเมทานอล .....	6
2.4 กระบวนการผลิตเมทานอล .....	7
2.5 เครื่องแปรรูปภาพเป็นแก๊สชนิดเครื่องปฏิกรณ์คู่ [12] .....	8
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน .....	11
3.2 ภาพรวมกระบวนการผลิต .....	12
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงโมลกับอุณหภูมิจากคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนจากเครื่องแปรรูปภาพเป็นแก๊ส ณ อัตราส่วนไอน้ำต่อชีวมวล 0.28 โดยมวล.....	18
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนกับอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส.....	19
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของเมทานอลกับความดัน ณ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส .....	20
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฟอร์มัลดีไฮด์กับอัตราส่วนป้อนอากาศต่อเมทานอล .....	21
4.5 กราฟแสดงกระแสเงินสดสะสมของกระบวนการผลิต .....	22
4.6 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต .....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde) เป็นสารเคมีที่สำคัญอย่างยิ่งในหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมพลาสติกและพอลิเมอร์ ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารตั้งต้นของพอลิเมอร์และเรซินหลายชนิด เช่น ยูเรีย-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน (Urea-formaldehyde resin), ฟีนอล-ฟอร์มาลดีไฮด์ เรซิน (Phenol-formaldehyde resin) และอะซิเตอล เรซิน (Acetal resin) เป็นต้น ในปัจจุบันกระบวนการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์ทั่วไปใช้เมทานอล (Methanol) เป็นสารตั้งต้นผ่านกระบวนการออกซิเดชันโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นชนิดโลหะออกไซด์ [1] โดยส่วนใหญ่ผลิตเมทานอลจากแก๊สสังเคราะห์ (Synthesis gas หรือ Syngas) ซึ่งเตรียมได้จากหลายกระบวนการ เช่น กระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส ของไฮโดรคาร์บอนโดยทั่วไปเป็นแก๊สธรรมชาติและถ่านหิน และกระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำของมีเทน (Methane) เป็นต้น [2] อย่างไรก็ตามแก๊สธรรมชาติและถ่านหินเป็นสิ่งที่ใช้แล้วหมดไปตามธรรมชาติ จึงมีการใช้ไฮโดรคาร์บอนทางเลือกที่ใช้แล้วไม่หมดไป หรือทดแทนได้ง่าย เช่น ชีวมวล (Biomass) เป็นต้น

ชีวมวล หมายถึงวัสดุใดๆก็ตามที่มีต้นกำเนิดมาจากสิ่งทางชีวภาพ เป็นวัสดุที่มีอยู่มากมายตามธรรมชาติซึ่งรวมถึงองค์ประกอบของวัสดุทางชีวภาพนั้นด้วย เช่น ลิกนิน (Lignin), เซลลูโลส (Cellulose) และ เฮมิเซลลูโลส (Hemi-cellulose) เป็นต้น [3] ในปัจจุบันมีการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์อย่างหลากหลาย เช่น การผลิตน้ำตาล, การเป็นแหล่งเชื้อเพลิง และใช้ผลิตสารเคมีเพื่อต่อยอดผลิตภัณฑ์ เช่น ไบโอดีเซล (Biodiesel), ไบโอเอทานอล (Bioethanol) และแก๊สสังเคราะห์ เป็นต้น

ของเหลือทางการเกษตร (Agricultural residues) คือผลพลอยได้ที่เหลือจากการทำเกษตรกรรม เช่น ฟางข้าว แกรบ และซังข้าวโพด เป็นต้น จัดเป็นชีวมวลที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรมได้ [4] ในประเทศไทยมีการทำการเกษตร และทำให้มีของเหลือทางการเกษตรมากกว่า 100 ล้านตันต่อปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟางข้าวที่มีมากกว่า 47 ล้านตันต่อปี [5] การเพิ่มทางเลือกในการใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ในงานวิจัยนี้สนใจที่ศึกษากระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากชีวมวล เพื่อออกแบบกระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากฟางข้าวโดยวิเคราะห์สภาวะ ด้านอุณหภูมิ ความดัน และอัตราส่วนการป้อนสารตั้งต้นที่เหมาะสมสำหรับหน่วยปฏิบัติการที่สำคัญโดยใช้โปรแกรม ASPEN Plus รวมทั้งวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐกิจของกระบวนการผลิตที่ออกแบบ

## 1.2 วัตถุประสงค์

1. ออกแบบกระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากชีวมวล
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์
3. วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิต

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส
2. ศึกษาอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อชีวมวลที่ป้อนเข้าสู่เครื่องแปรสภาพเป็นแก๊ส (S/B ratio)
3. ศึกษาความดันที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล
4. ศึกษาอัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเมทานอลสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มัลดีไฮด์
5. วิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตจากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value), ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) และความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต (Sensitivity analysis)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

สามารถนำกระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากชีวมวลไปใช้ได้จริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

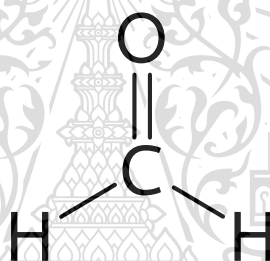
Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลทั่วไปของฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)

ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde, Methanal or Formalin;  $\text{CH}_2\text{O}$ ) เป็นสารจำพวกแอลดีไฮด์ (Aldehyde) ที่มีคาร์บอน 1 อะตอมมีพันธะคู่กับออกซิเจน 1 พันธะ และพันธะเดียวกับไฮโดรเจน 2 พันธะ มีสถานะโดยทั่วไปอยู่ในรูปสารละลายในน้ำที่ความเข้มข้น 37% โดยมวล ใส ไม่มีสี มีกลิ่น และเป็นพิษต่อมนุษย์โครงสร้างโมเลกุลของฟอร์มาลดีไฮด์แสดงดังรูปที่ 2.1 และสมบัติทั่วไปของฟอร์มาลดีไฮด์แสดงดังตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างโมเลกุลของฟอร์มาลดีไฮด์

ตารางที่ 2.1 สมบัติทั่วไปของฟอร์มาลดีไฮด์

สมบัติ	รายละเอียด
มวลโมเลกุล (Molecular weight)	30.03 g/mol
จุดหลอมเหลว (Melting point)	-92 °C
จุดเดือด (Boiling point)	-19.1 °C
ความหนาแน่น (Density at -20 °C)	0.8153 g/cm <sup>3</sup>
การละลายน้ำ (Solubility in water)	400 g/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

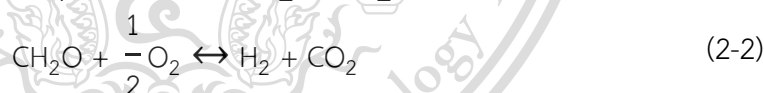
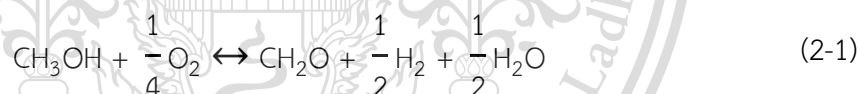
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมโดยทั่วไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิต และใช้ในด้านอื่น เช่น เป็นยาฆ่าเชื้อ และสารกันบูด เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมเซตติง เช่น Urea-formaldehyde ที่ใช้เป็นสารเคลือบในอุตสาหกรรมไม้ Melamine-formaldehyde และ Melamine-urea-formaldehyde ที่ทำการเติมเมลามีนเข้าไปในโครงสร้าง Urea-formaldehyde เพื่อเสริมคุณสมบัติด้านความแข็งแรงเชิงกล และ Phenol-formaldehyde ที่นำไปใช้ในอุตสาหกรรมเคลือบพื้นผิว, ฉนวนกันความร้อน และอุตสาหกรรมโฟม เป็นต้น เนื่องจากคุณสมบัติที่มีความเสถียรสูงและกันความชื้น [6]

## 2.2 กระบวนการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde Production)

ฟอร์มาลดีไฮด์สามารถผลิตได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี ผ่านปฏิกิริยา Catalytic oxidation ของเมทานอลโดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการผลิตจะป้อนเมทานอลในสถานะแก๊สร่วมกับอากาศในเครื่องปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิสูง 300-600 องศาเซลเซียสเพื่อสังเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์กับน้ำ ผลิตภัณฑ์ฟอร์มาลดีไฮด์ในอุตสาหกรรมอยู่ที่ 37% โดยน้ำหนัก แต่ในเชิงการผลิตจะทำความเข้มข้นให้สูงถึง 55% โดยน้ำหนัก ปฏิกิริยาหลักการสังเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในเครื่องปฏิกรณ์เป็นดังสมการที่ 2-1 ถึง 2-3 [7][8]

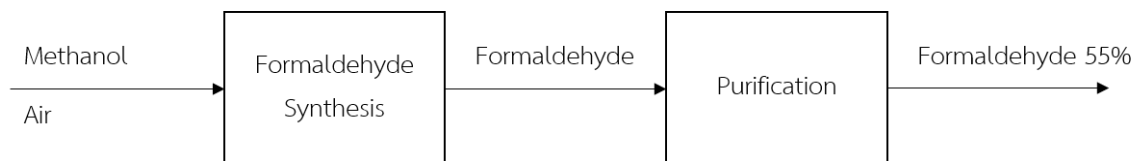


กระบวนการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์จากเมทานอล หลังการสังเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์จำเป็นต้องทำให้ฟอร์มาลดีไฮด์บริสุทธิ์มากขึ้นโดยผ่านการดูดซับ เพื่อกำจัดไนโตรเจนที่มากับอากาศและนำไปกลั่นเพื่อแยกน้ำและเมทานอลออกบางส่วนออกจากฟอร์มาลดีไฮด์จนได้ความบริสุทธิ์ประมาณ 55% โดยน้ำหนัก [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.2 กระบวนการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์

### 2.3 ฟางข้าว (Rice Straw)

ฟางข้าวเป็นของเหลือทางการเกษตรที่ได้จากการปลูกข้าว ซึ่งเป็นชีวมวลประเภท Lignocellulose ซึ่งประกอบองค์ประกอบหลัก คือ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสโดยในกระบวนการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์จากฟางข้าวในกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สเพื่อผลิตแก๊สสังเคราะห์เพื่อนำไปผลิตเมทานอลและฟอร์มาลดีไฮด์ต่อไป โดยในฟางข้าวประกอบด้วยธาตุสำคัญ 5 ตัว คือ คาร์บอน (C), ออกซิเจน (O), ไฮโดรเจน (H), ไนโตรเจน (N) และซัลเฟอร์ (S) และแบ่งองค์ประกอบในชีวมวลออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ระเหยง่าย (Volatile matter) คาร์บอนคงรูป (Fixed carbon) ความชื้น (Moisture) และขี้เถ้า (Ash) โดยองค์ประกอบต่างๆ ของฟางข้าวเป็นดังตารางที่ 2.2 และตารางที่ 2.3 [10]

ตารางที่ 2.2 Proximate analysis ของฟางข้าวในหน่วยอัตราส่วนเชิงมวล

ส่วนที่ระเหยง่าย	คาร์บอนคงรูป	ความชื้น	ขี้เถ้า
59.4	14.4	7.6	18.6

ตารางที่ 2.3 Ultimate analysis ของฟางข้าวในหน่วยอัตราส่วนเชิงมวล

คาร์บอน	ออกซิเจน	ไฮโดรเจน	ไนโตรเจน	ซัลเฟอร์
50.1	43.0	5.7	1.0	0.16

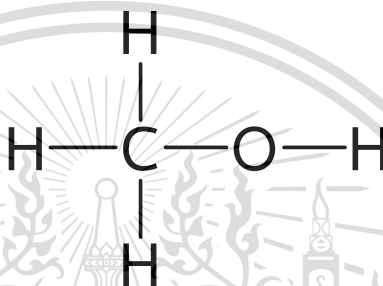
### 2.4 กระบวนการผลิตเมทานอล (Methanol Production)

เมทานอล คือ สารจำพวกแอลกอฮอล์ (Alcohols) โครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอน 1 อะตอม มีพันธะเดียวกับไฮโดรเจน 3 อะตอม และมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นองค์ประกอบ โดยโครงสร้างของเมทานอลเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัว ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างได้โดยไม่ใช้กระบวนการทางเคมีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

นอลแสดงดังรูปที่ 2.3 เมทานอลสามารถนำไปใช้ในหลายอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผลิตฟอร์มาลดีไฮด์ ไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether) และกรดอะซิติก (Acetic acid) เมทานอลมีสมบัติลุกติดไฟง่ายจึงสามารถนำไปผสมกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นเพื่อใช้งานกับยานพาหนะได้ และสามารถลดมลพิษจากการใช้เชื้อเพลิงได้ เมทานอลสามารถนำไปใช้ได้หลายความเข้มข้นตั้งแต่ 15% ถึง 99% ในการใช้งานที่ต่างกัน เมทานอลเป็นสารไม่มีพิษและไม่ไวไฟสารก่อให้เกิดมะเร็งเมื่อสูดดม แต่สามารถส่งผลเสียในกรณีบริโภคในปริมาณมาก สามารถทำให้ตาบอด หรือเสียชีวิตได้ [11]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างโมเลกุลของเมทานอล

กระบวนการผลิตเมทานอลโดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการใช้แก๊สสังเคราะห์ในเครื่องปฏิกรณ์ที่มีตัวเร่งปฏิกิริยา โดยทั่วไปคือ  $\text{Cu/ZnO/Al}_2\text{O}_3$  ที่อุณหภูมิและความดันสูงประมาณ 180-300 องศาเซลเซียส และ 50-100 บาร์ปฏิกิริยาการสังเคราะห์เมทานอลเป็นดังสมการที่ 2-4 ถึง 2-6 [11]

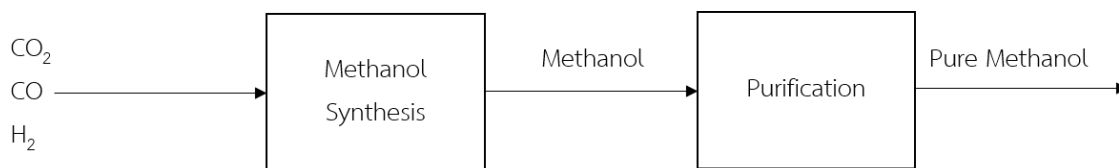


หลังจากการสังเคราะห์เมทานอลต้องนำเข้าสู่ขั้นตอนการทำให้บริสุทธิ์ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีเพื่อกำจัดน้ำและแก๊สสังเคราะห์ที่ไม่ทำปฏิกิริยาออกจากเมทานอล เช่น การกลั่น หอดูดซับ และการใช้ Flash drum เป็นต้น โดยความบริสุทธิ์ของเมทานอลขึ้นอยู่กับความต้องการและการนำไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 2.4 กระบวนการผลิตเมทานอล

## 2.5 กระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส

กระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส คือ กระบวนการแปรสภาพของเชื้อเพลิงอย่างหนึ่งเช่นเดียวกับการเผาโดยอาศัยตัวกลางหรือตัวพา เป็นอากาศ น้ำ หรือทั้งสองอย่างรวมทั้งแก๊สชนิดอื่นๆได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นแก๊สสังเคราะห์ และไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นเล็กน้อย เช่น มีเทน และอีเทน เป็นต้น รวมทั้งสารประกอบซัลเฟอร์ในปริมาณน้อยมาก โดยทั่วไปกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส ของชีวมวลจะใช้อุณหภูมิที่ค่อนข้างสูงตั้งแต่ 450–1500 องศาเซลเซียสและใช้ความดันที่หลากหลายขึ้นอยู่กับการออกแบบ ชนิดของชีวมวล รวมไปถึงชนิดของเครื่องแปรสภาพเป็นแก๊สที่ใช้โดยปฏิกิริยาที่สำคัญภายในกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส ที่มีการเติมไอน้ำประกอบด้วย 4 สมการหลักดังสมการที่ 2-7 ถึง 2-14



## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การผลิตสารเคมีจากชีวมวลกำลังเป็นที่ได้รับความสนใจในปัจจุบันเนื่องจากการใช้ทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่ในปริมาณมากในโลกอย่างเกิดประโยชน์ เพื่อลดการกำจัดอย่างผิดวิธีของเกษตรกร เช่น การเผาซึ่งก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เป็นต้น แต่กระบวนการผลิตสารเคมีจากชีวมวลมีโอกาส

ขาดทุนสูงเมื่อเทียบกับการใช้แก๊สธรรมชาติ หรือถ่านหินเป็นวัตถุดิบ เนื่องจากชีวมวลมีองค์ประกอบที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครู ใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ คือ คาร์บอนในอัตราส่วนที่น้อยเมื่อเทียบกับถ่านหิน การออกแบบ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

กระบวนการผลิตที่เหมาะสมจึงช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ กระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากฟางข้าวเริ่มต้นจากกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สโดย Stanislav และคณะ [10] ได้ศึกษาองค์ประกอบของชีวมวลแต่ละชนิดรวมไปถึงฟางข้าวพบว่า ฟางข้าวมีปริมาณคาร์บอนอยู่ที่ประมาณ 50.1% โดยน้ำหนักซึ่งเป็นปริมาณที่มากในระดับกลางๆเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น Ronaldo และคณะ[5] ได้มีการรวบรวมข้อมูลของเหลือทางการเกษตรในประเทศที่กำลังพัฒนา พบว่าประเทศไทยมีฟางข้าวเหลือในปริมาณมากประมาณ 47 ล้านตันต่อปีจึงควรนำฟางข้าวมาใช้ประโยชน์ เมื่อทำการจำลองกระบวนการผลิตผ่านโปรแกรม ASPEN พบว่าการป้อนอากาศในเครื่องแปรสภาพเป็นแก๊ส ทำให้มีไนโตรเจนในระบบมากเกินไป และไม่สามารถเปลี่ยนไปป้อนแก๊สออกซิเจนได้เนื่องจากมีราคาสูง Basu และคณะ[12] ได้จัดทำหนังสือชื่อว่า Biomass Gasification and Pyrolysis ซึ่งมีเครื่องแปรสภาพเป็นแก๊ส ชนิดหนึ่งที่สามารถแก้ปัญหาไนโตรเจนเกินในระบบได้ คือ เครื่องแปรสภาพเป็นแก๊สชนิดเครื่องปฏิกรณ์คู่ ซึ่งแก๊สผลิตภัณฑ์จะออกคนละทางกับแก๊สไนโตรเจนเพื่อป้องกันไนโตรเจนเข้าสู่ระบบต่อไป ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 เครื่องแปรสภาพเป็นแก๊สชนิดเครื่องปฏิกรณ์คู่ [12]

หลังจากการสังเคราะห์แก๊สสังเคราะห์จะไปสู่การสังเคราะห์เมทานอลซึ่งจำเป็นต้องรู้จลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาเพื่อทำการจำลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุด Van-Dal และคณะ [11] ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตเมทานอลจากแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเอกสารนี้เป็น Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ซึ่งได้สรุปจลนพลศาสตร์ปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์เมทานอลไว้ ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ารค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความสัมพันธ์หลัก คือ การสังเคราะห์เมทานอล และสมการ Reverse water gas shift ดังสมการที่ 2-11 ถึง 2-12 และตารางที่ 2.4 ในรูปแบบของแบบจำลอง Langmuir-Hinshelwood-Hougen-Watson (LHHW) และกำหนดค่า k ของสมการดังสมการที่ 2-17

$$r_{\text{CH}_3\text{OH}} = \frac{k_1 P_{\text{CO}_2} P_{\text{H}_2} - k_6 P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CH}_3\text{OH}} P_{\text{H}_2}^{-2}}{(1 + k_2 P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{H}_2}^{-1} + k_3 P_{\text{H}_2}^{0.5} + k_4 P_{\text{H}_2\text{O}})^3} \quad (2-15)$$

$$r_{\text{RWGS}} = \frac{k_5 P_{\text{CO}_2} - k_7 P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{CO}} P_{\text{H}_2}^{-1}}{1 + k_2 P_{\text{H}_2\text{O}} P_{\text{H}_2}^{-1} + k_3 P_{\text{H}_2}^{0.5} + k_4 P_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (2-16)$$

$$\ln k_i = A_i + \frac{B_i}{T} \quad (2-17)$$

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล

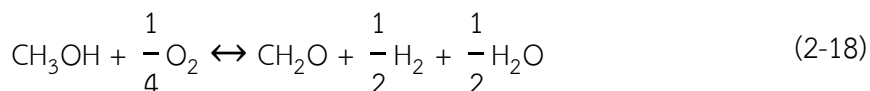
ค่าคงที่	ตัวแปร	ค่า
k <sub>1</sub>	A <sub>1</sub>	-29.87
	B <sub>1</sub>	4811.2
k <sub>2</sub>	A <sub>2</sub>	8.147
	B <sub>2</sub>	0
k <sub>3</sub>	A <sub>3</sub>	-6.452
	B <sub>3</sub>	2068.4
k <sub>4</sub>	A <sub>4</sub>	-34.95
	B <sub>4</sub>	14,928.9
k <sub>5</sub>	A <sub>5</sub>	4.804
	B <sub>5</sub>	-11,797.5
k <sub>6</sub>	A <sub>6</sub>	17.55
	B <sub>6</sub>	-2249.8
k <sub>7</sub>	A <sub>7</sub>	0.131
	B <sub>7</sub>	-7023.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

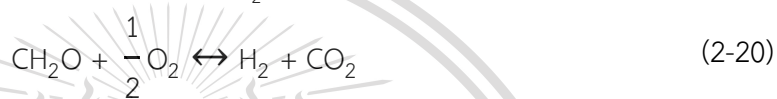
This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

หลังจากการจำลองกระบวนการผลิต ขั้นตอนการสังเคราะห์เมทานอลและทำให้บริสุทธิ์จะเข้าสู่ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์ Marco และคณะ[8] ได้รวบรวมข้อมูลและทำแบบจำลองเพื่อหาค่าคงที่ปฏิกิริยาของการสังเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์ในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นสารประกอบของโลหะเงิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2-18 ถึง 2-23 และตารางที่ 2.5



$$r_1 = A_1 e^{-\frac{E_{a1}}{RT}} \frac{C_{\text{CH}_3\text{OH}} C_{\text{O}_2}^{0.25}}{C_{\text{H}_2\text{O}}^{0.5}} \quad (2-19)$$



$$r_1 = A_2 e^{-\frac{E_{a2}}{RT}} \frac{C_{\text{CH}_2\text{O}} C_{\text{O}_2}^{0.5}}{C_{\text{H}_2}^{0.5}} \quad (2-21)$$



$$r_1 = A_3 e^{-\frac{E_{a3}}{RT}} C_{\text{H}_2} C_{\text{O}_2}^{0.5} \quad (2-23)$$

ตารางที่ 2.5 ค่าคงที่ของปฏิกิริยาภายในเครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มัลดีไฮด์

ตัวแปร	ค่า
$A_1$	$5.33 \times 10^{11}$
$A_2$	$1.03 \times 10^7$
$A_3$	$1.07 \times 10^4$
$E_{a1}$	$1.42 \times 10^5$
$E_{a2}$	$9.02 \times 10^4$
$E_{a3}$	$1.83 \times 10^4$

เมื่อทำการจำลองทั้งกระบวนการผลิตผ่านโปรแกรม ASPEN สำเร็จจึงทำการประมาณขนาดของหน่วยปฏิบัติการแต่ละตัวรวมทั้งทำการประเมินราคาของแต่ละหน่วยปฏิบัติการโดยอาศัยข้อมูลจาก ASPEN และหนังสือทางวิศวกรรมเคมี [13][14][15][16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงานของงานวิจัยออกแบบกระบวนการผลิตฟอร์มัลดีไฮด์จากชีวมวลแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ได้แก่ การรวบรวมข้อมูล (Data collecting) การจำลองกระบวนการผลิต (Process simulation) การแก้ปัญหา (Solution) และการประเมินผล (Evaluation) ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

#### 3.1 การรวบรวมข้อมูล (Data Collecting)

ของเหลือทางการเกษตร สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารฟอร์มัลดีไฮด์ได้โดยผ่านกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สของชีวมวล การสังเคราะห์เมทานอล และการสังเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์ตามลำดับ การรวบรวมข้อมูลจึงต้องรวบรวมการทำงานของเครื่องแปรสภาพเป็นแก๊ส องค์ประกอบของชีวมวลที่ใช้ คือ ฟางข้าว จลนพลศาสตร์ของการสังเคราะห์เมทานอล จลนพลศาสตร์ของการสังเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์ รวมถึงขั้นตอนการทำให้สารเคมีที่ต้องการมีความบริสุทธิ์ (Purification) และทำการประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตที่ออกแบบจึงต้องรวบรวมข้อมูลราคาของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



4. จำลองในส่วนเครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มาลดีไฮด์โดยอาศัยจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
5. จำลองในส่วนทำให้บริสุทธิ์ของฟอร์มาลดีไฮด์ และวิเคราะห์สารที่สามารถวนกลับมาใช้ได้ ซึ่งคือเมทานอลที่ยังไม่ทำปฏิกิริยา
6. เพิ่มส่วน process equipment เพื่อให้กระบวนการผลิตสมบูรณ์ และใช้ในการประเมินมูลค่าในหัวข้อ 3.4 เช่น ปัม คอมเพรสเซอร์ วาล์ว เป็นต้น
7. วิเคราะห์และเลือกใช้สาธารณูปโภคภายในโครงการ เช่น น้ำหล่อเย็น และไฟฟ้า เป็นต้น

### 3.2.3 แบบจำลองและสภาวะที่ใช้

กระบวนการผลิตใช้ equation of state แบ่งตามส่วนของกระบวนการผลิต ดังนี้

- ส่วนกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สใช้ SRK
- ส่วนสังเคราะห์เมทานอลใช้ SRK
- ส่วนทำให้เมทานอลบริสุทธิ์ใช้ NRTL
- ส่วนสังเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ใช้ SRK
- ส่วนทำให้ฟอร์มาลดีไฮด์บริสุทธิ์ใช้ NRTL

ตารางที่ 3.1 แบบจำลองและสภาวะของกระบวนการผลิตในโปรแกรม ASPEN

ชื่อหน่วยปฏิบัติการ	แบบจำลอง	สภาวะ
Gasifier	RGibbs	-อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส -ความดัน 1 บาร์
Reactor 1	RPlug	-อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส -ความดัน 50 บาร์
Reactor 2	RPlug	-อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส -ความดัน 1 บาร์
Absorber 1	RadFrac	-ความดัน 10 บาร์ -จำนวนชั้น 6 ชั้น
Absorber 2	RadFrac	-ความดัน 1 บาร์ -จำนวนชั้น 9 ชั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Distillation 1	RadFrac	-ความดัน 10 บาร์ -จำนวนชั้น 15 ชั้น -Reflux ratio 5
Distillation 2	RadFrac	-ความดัน 1 บาร์ -จำนวนชั้น 8 ชั้น -Reflux ratio 5
HX1	HeatX	ไม่มี
HX2	HeatX	ไม่มี
HX3	HeatX	ไม่มี
Compressor	MCompr	-จำนวนชั้น 3 ชั้น

### 3.2.4 ปริมาณการป้อนและสาธารณูปโภค

ตารางที่ 3.2 ปริมาณการป้อนและสาธารณูปโภค

หน่วยปฏิบัติการ	ปริมาณการป้อน	สาธารณูปโภค
Gasifier	-ชีวมวล 5000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง -ไอน้ำ 1400 กิโลกรัมต่อชั่วโมง -อากาศ 1500 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	ไม่มี
Reactor 1	ไม่มี	-น้ำ 20000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
Reactor 2	-อากาศ 3200 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	-น้ำ 38000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
Absorber 1	-น้ำ 19000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	ไม่มี
Absorber 2	-น้ำ 50000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	ไม่มี
Distillation 1	ไม่มี	-น้ำเกลือ 100000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง -ไอน้ำ 13000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
Distillation 2	ไม่มี	-น้ำเกลือ 90000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง -ไอน้ำ 12000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง
HX3	-น้ำ 50000 กิโลกรัมต่อชั่วโมง	ไม่มี
Compressor	ไม่มี	-ไฟฟ้า 5449.79 kW

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.3 การแก้ปัญหา (Solution)

การจำลองกระบวนการผลิตของฟอร์มมาลดีไฮด์ที่ได้จากหัวข้อที่ 3.2 จำเป็นต้องวิเคราะห์หาสถานะที่เหมาะสม และแก้ปัญหาในส่วนที่มีปัญหา โดยทั่วไปจะอยู่ในส่วนที่ทำให้บริสุทธิ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งหอกลิ้น และหอดูดซับ ที่จำเป็นต้องกำหนดตัวแปรที่จำเป็นอย่างเหมาะสม เช่น Reflux ratio, จำนวนชั้นของหอกลิ้น และปริมาณน้ำที่ใช้เป็นตัวดูดซับ เป็นต้น เมื่อแก้ไขปัญหาลำเร็จก็นำไปแก้ไขกระบวนการผลิตในข้อที่ 3.2

### 3.4 การประเมินผล (Evaluation)

การประเมินผลจะเป็นการประเมินความเป็นไปทางเศรษฐศาสตร์ทั้งหมด 3 ดัชนี คือ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) ระยะเวลาคืนทุน (Payback period) และความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต (Sensitivity analysis)

#### 3.4.1 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV)

มูลค่าปัจจุบันสุทธิ หมายถึง จำนวนเงินในปัจจุบันที่จะมีเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาโครงการที่กำหนด โดยคำนวณผ่านการกำหนดอัตราคิดลด (Discount rate) ซึ่งเป็นค่าที่แต่ละโครงการจะกำหนดขึ้นอยู่กับความเสี่ยง และความแปลกใหม่ของโครงการ โดยถ้าหากมูลค่าปัจจุบันสุทธิ เป็นบวกสามารถบ่งบอกถึงว่าโครงการนี้น่าลงทุนและไม่ขาดทุนในมุมมองของเศรษฐศาสตร์ ถ้าหากมีการต้องเลือกระหว่างหลายโครงการโครงการที่ให้มูลค่าปัจจุบันสุทธิเป็นบวกมากที่สุดเป็นโครงการที่น่าสนใจที่สุดซึ่งมูลค่าปัจจุบันสุทธิสามารถคำนวณได้จากสมการ 3-1 [17]

$$NPV = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{S_i}{(1+r)^i} - C \quad (3-1)$$

เมื่อ	$S_i$	คือ	กำไรสุทธิในปีที่ $i$
	$r$	คือ	อัตราคิดลด (Discount rate)
	$i$	คือ	ปีที่
	$C$	คือ	เงินลงทุน (Capital investment)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

### 3.4.2 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

ระยะเวลาคืนทุน คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการทำให้เงินลงทุนคืนทุนทั้งหมดโดยทั่วไปจะคิดระยะเวลาเป็นปี จะคิดในวิธีเดียวกับมูลค่าปัจจุบันสุทธิโดยจะแทนค่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิให้เป็น 0 แล้วแก้สมการหาจำนวนปีที่ใช้ในการคืนทุน โดยโครงการระยะเวลาคืนทุนที่สั้นกว่าจะเป็นโครงการที่น่าสนใจมากกว่า [17]

### 3.4.3 ความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต (Sensitivity Analysis)

ความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต คือ การวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ในกระบวนการผลิตว่าเมื่อมีการปรับราคาขึ้นหรือลง จะส่งผลต่อกำไรหรือขาดทุนของโครงการมากน้อยอย่างไรโดยในงานวิจัยนี้วิเคราะห์ตัวแปรในกระบวนการผลิตทั้งหมด 3 ตัว คือ ราคาของฟอร์มาลดีไฮด์ ราคาของสารอนุมูลโคค (Utilities) และราคาของวัตถุดิบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

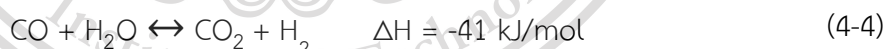
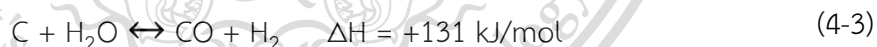
## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊ส

##### 4.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์

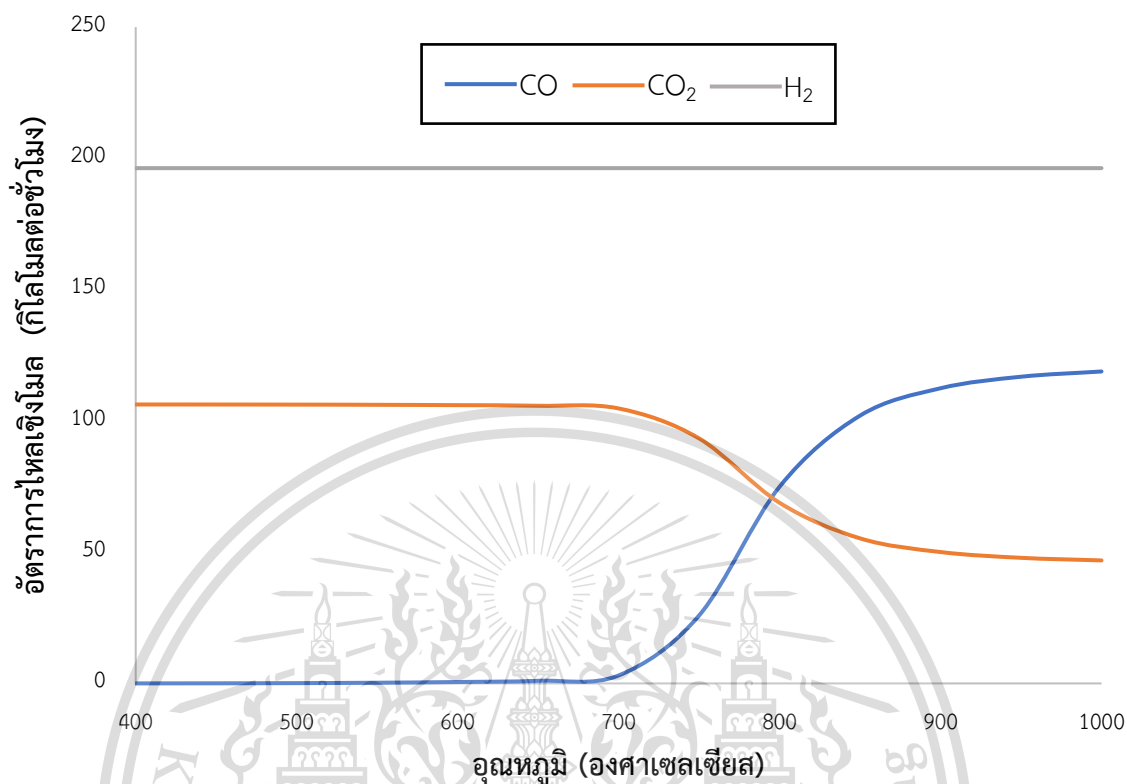
พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมกับเครื่องแปรสภาพเป็นแก๊สอยู่ที่ 900 องศาเซลเซียสหรือมากกว่าเล็กน้อย เนื่องจาก สารตั้งต้นหลักสำหรับการสังเคราะห์เมทานอล คือคาร์บอนมอนอกไซด์และไฮโดรเจนจึงควรเผาไหม้อัตราส่วนคาร์บอนมอนอกไซด์ที่สูง รูปที่ 4.1 แสดงอัตราการไหลเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์, คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนที่อุณหภูมิ 400 ถึง 1000 องศาเซลเซียสอัตราการไหลเชิงโมลของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงเมื่ออุณหภูมิของเตาเผาสูงขึ้น ตรงข้ามกับแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่มีอัตราการไหลเชิงโมลเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของเครื่องแปรสภาพเป็นแก๊สสูงขึ้นซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของ Le Chatelier ที่กล่าวไว้ว่าการเพิ่มพลังงานให้กับระบบปฏิกิริยาคัดความร้อนจะเกิดผลิตภัณฑ์มากขึ้น และสมการเผาไหม้หลักภายในเครื่องแปรสภาพเป็นแก๊สดังสมการที่ 4-1, 4-2, 4-3 และ 4-4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงโมลกับอุณหภูมิของคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนจากเครื่องแปรรูปเป็นแก๊ส ณ อัตราส่วนไอน้ำต่อชีวมวล 0.28 โดยมวล

#### 4.1.2 ผลของอัตราส่วนไอน้ำต่อชีวมวลต่อองค์ประกอบของแก๊สสังเคราะห์

พบว่าอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 0.28 โดยมวลเมื่อเพิ่มอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวลทำให้อัตราการไหลเชิงโมลของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยทั่วไปการเพิ่มอัตราส่วนของไฮโดรเจนในแก๊สสังเคราะห์ส่งผลให้การเตรียมเมทานอลได้สูงขึ้น แต่จะทำให้ขาดคาร์บอนมอนอกไซด์ในการทำปฏิกิริยากรณีป้อนชีวมวลในอัตราคงที่ รูปที่ 4.2 แสดงอัตราการไหลเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนเมื่ออัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล อัตราการไหลเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ค่อยๆ ลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไอน้ำ ตรงข้ามกับคาร์บอนไดออกไซด์ที่ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับไฮโดรเจนที่มี

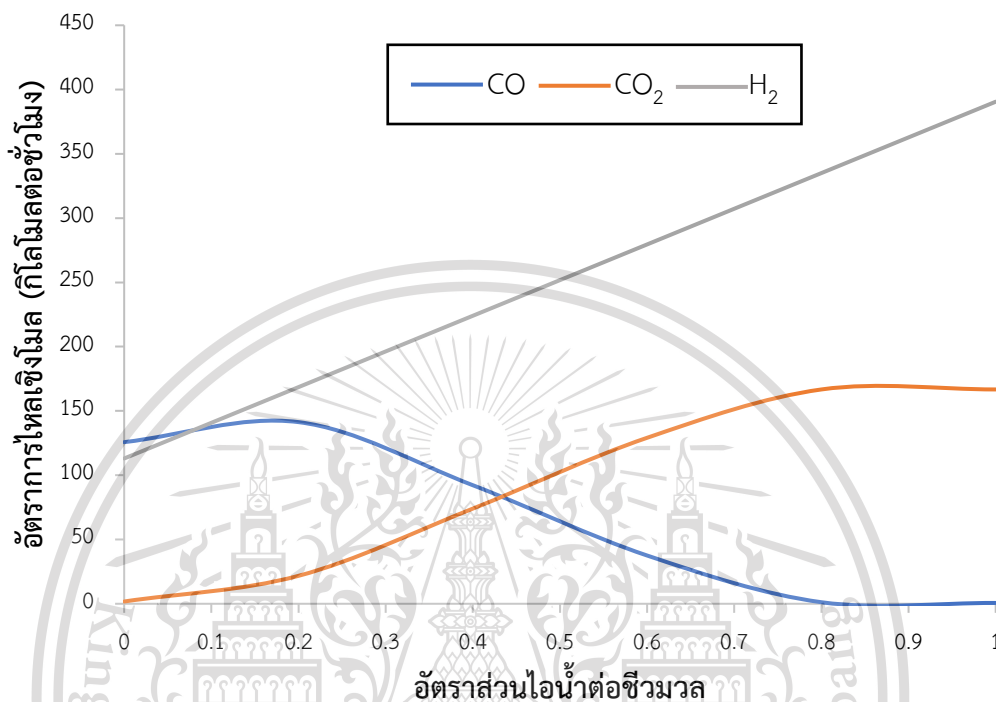
การเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มอัตราส่วนของไอน้ำ ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยา Water gas shift ดังสมการที่ 4-5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงโมลของคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนกับอัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล ณ อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส

## 4.2 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล

### 4.2.1 ผลของความดันต่อเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล

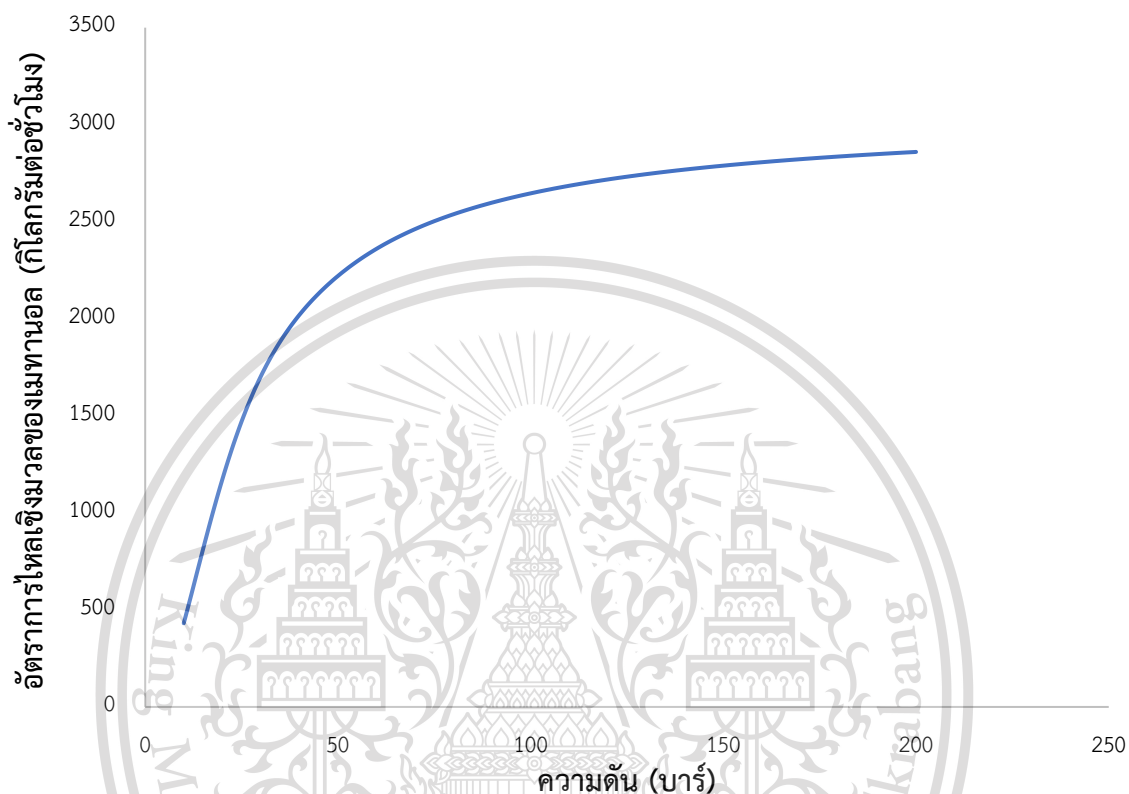
เมื่อเพิ่มความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์เมทานอลทำให้ผลิตภัณฑ์เมทานอลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยมีการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 10-60 bar และค่อยๆเพิ่มขึ้นอย่างช้าลง เมื่อความดันมากขึ้นเกิน 60 bar รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของเมทานอลกับความดันภายในเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล แต่การเพิ่มความดันให้มากที่สุดจะส่งผลให้ค่าเครื่อง

Compressor ที่ต้องใช้สูงขึ้นตามไปด้วย รวมทั้งค่าใช้จ่ายในการดำเนินการของ Compressor ก็

สูงขึ้นด้วยทั้งค่าไฟฟ้า และค่าน้ำหล่อเย็น ความดันที่เหมาะสมจึงขึ้นอยู่กับแต่ละกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษานี้เท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องมีการจำลองกระบวนการผลิต สำหรับในโครงการนี้มีอัตราการป้อนชีวมวล 5000 kg/hr ความดันอยู่ที่ 50 bar เป็นความดันที่เหมาะสมที่สุด



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของเมทานอลกับความดัน ณ อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส

### 4.3 การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มัลดีไฮด์

#### 4.3.1 ผลของอัตราส่วนอากาศต่อเมทานอล

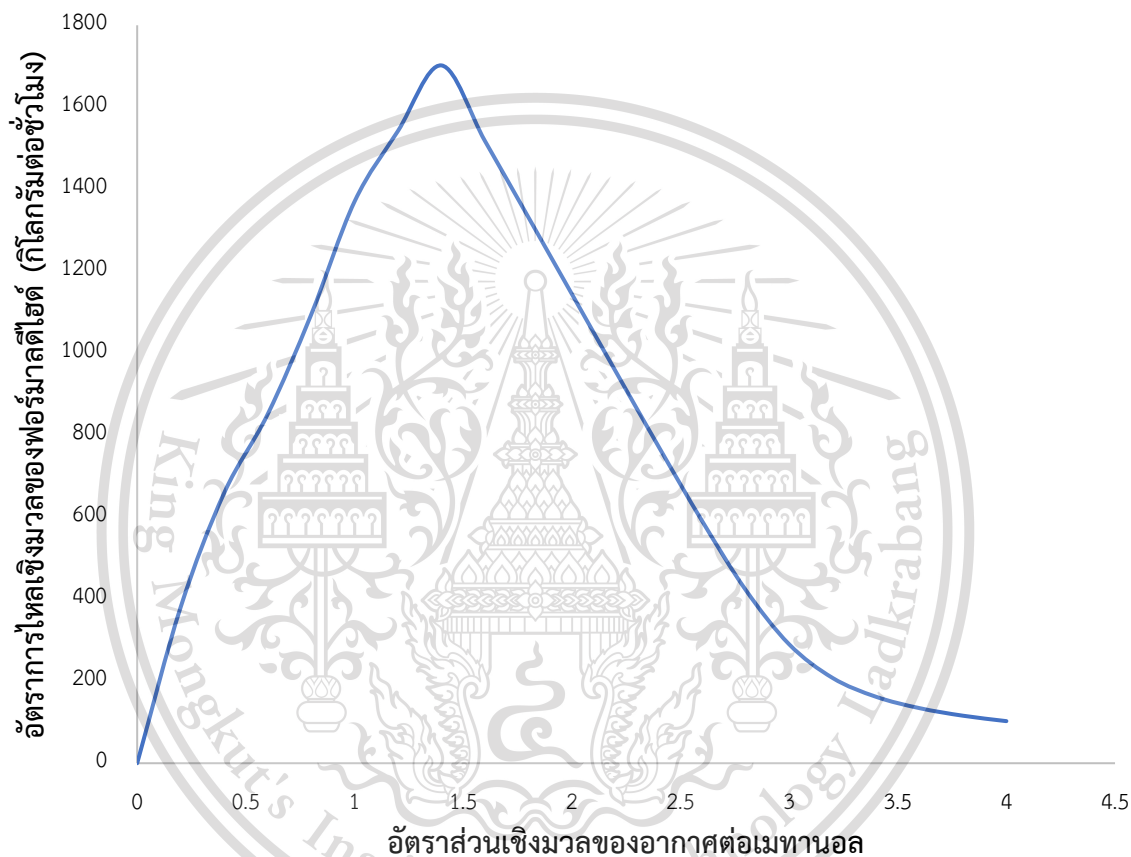
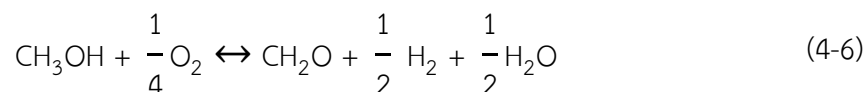
พบว่าอัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเมทานอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มัลดีไฮด์ที่ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ฟอร์มัลดีไฮด์มากที่สุดอยู่ที่ 1.4 โดยมีมวล รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฟอร์มัลดีไฮด์กับอัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเมทานอลเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มัลดีไฮด์จาก 0 ถึง 4 ฟอร์มัลดีไฮด์เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามการเพิ่มอัตราส่วนของอากาศในช่วง 0 ถึง 1.4 เนื่องจากการเพิ่มอากาศเป็นการเพิ่มออกซิเจนที่จำเป็นในการสังเคราะห์ฟอร์มัลดีไฮด์ดังสมการที่ 4-6 และเนื่องจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นส่งผลต่ออัตราการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเนื้อหาไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

เกิดปฏิกิริยา การป้อนอากาศจนมากเกินไปส่งผลให้ความเข้มข้นลดลง และเกิดฟอร์มัลดีไฮด์น้อยลงดังรูปที่ 4.4 ฟอร์มัลดีไฮด์ลดลงเมื่ออัตราส่วนของอากาศต่อเมทานอลที่ป้อนเกิน 1.4 โดยมวล



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลเชิงมวลของฟอร์มัลดีไฮด์กับอัตราส่วนป้อนอากาศต่อเมทานอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

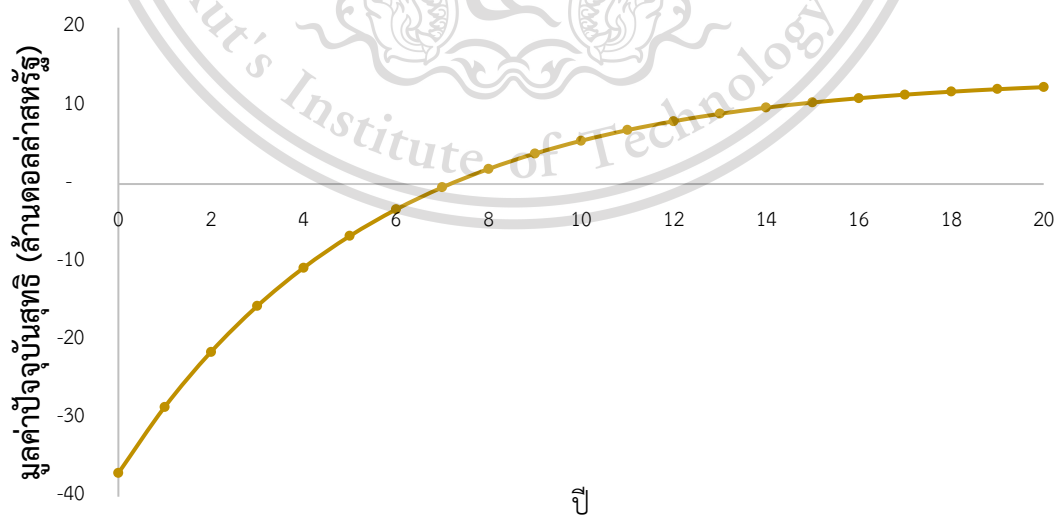
## 4.4 การประเมินทางเศรษฐศาสตร์ (Economic Evaluation)

ตารางที่ 4.1 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
ระยะเวลาโครงการ	20	year
อัตราคิดลด (r)	20	%
CEPCI (2020)	596.3	-

### 4.4.1 การวิเคราะห์กระแสเงินสดสะสม และระยะเวลาคืนทุน

เมื่อทำการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาโครงการที่ 20 ปีจะมีมูลค่าปัจจุบันสุทธิ อยู่ที่ประมาณ 12.4 ล้านดอลลาร์สหรัฐ และระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ประมาณ 7 ปี 2 เดือน รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมูลค่าปัจจุบันสุทธิกับจำนวนปีหลังจากที่เริ่มโครงการเห็นได้ว่าในปีที่ 0 มูลค่าปัจจุบันสุทธิติดลบอยู่ที่ 37 ล้านดอลลาร์สหรัฐ ซึ่งเป็นเงินลงทุนและค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ด้วยกำไรในแต่ละปีจนถึงในปีที่ 7 มูลค่าปัจจุบันสุทธิมีค่าเกิน 0 หมายความว่าคุ้มค่ากับเงินลงทุนแล้วหลังจากปีที่ 7 ถึงปีที่ 20 จึงเป็นกำไร และได้กำไร 12.4 ล้านดอลลาร์สหรัฐเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาโครงการที่กำหนดไว้



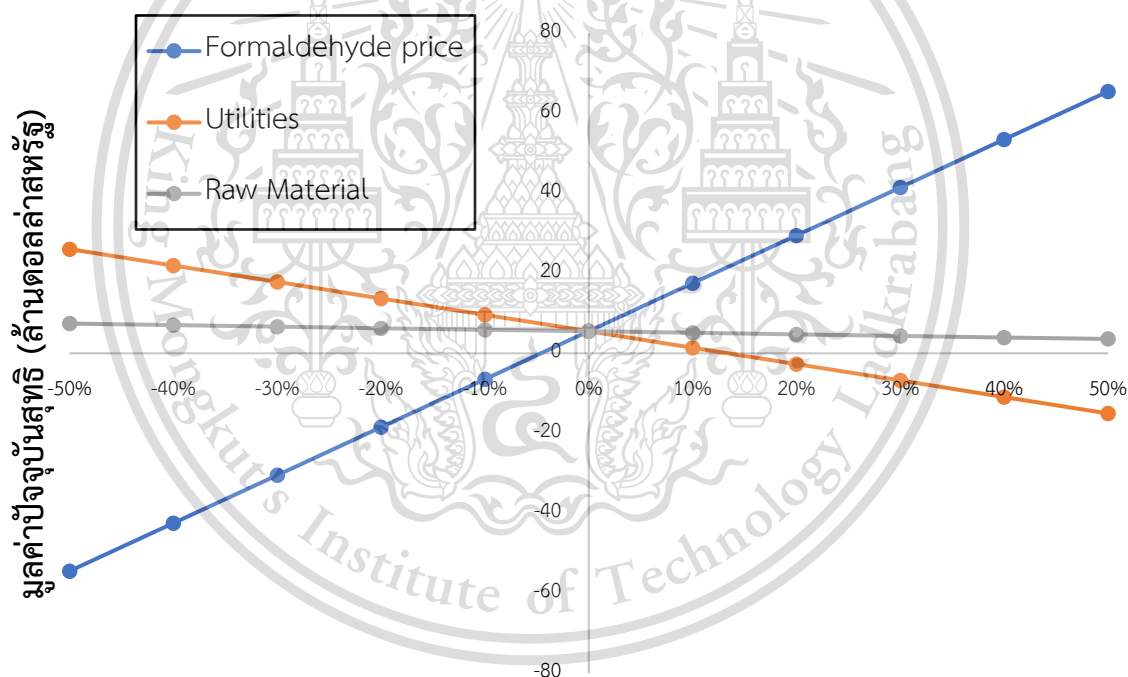
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 4.5 กราฟแสดงกระแสเงินสดสะสมของกระบวนการผลิต  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

#### 4.4.2 การวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต (Sensitivity Analysis)

จากการวิเคราะห์พบว่าตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อกำไรและขาดทุนมากที่สุดคือ ราคาของผลิตภัณฑ์ คือ ฟORMALดีไฮด์ รูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง NPV และการเปลี่ยนแปลงของราคา (%) เห็นว่าราคาของฟORMALดีไฮด์ส่งผลกระทบต่อกำไรของโครงการมากที่สุด และสาธารณูปโภคในโครงการส่งผลกระทบต่อกำไรของโครงการรองลงมา จากการวิเคราะห์ตลาดของฟORMALดีไฮด์พบว่าเนื่องจากวิกฤตการณ์โควิด-19 ทำให้อัตราการเติบโตของตลาดฟORMALดีไฮด์เติบโตขึ้นในอัตราที่ช้าลงกว่าช่วงก่อนหน้านี้ แต่ยังมีการเติบโตอย่างช้าๆจากการวิเคราะห์ของนักเศรษฐศาสตร์ตลาดของฟORMALดีไฮด์จะเติบโตด้วย CAGR มากกว่า 6% จากปี 2016-2026 โครงการการผลิตฟORMALดีไฮด์จากชีวมวลจึงเป็นโครงการที่น่าลงทุน ราคาปัจจุบันของฟORMALดีไฮด์อยู่ที่ประมาณ 700 ดอลลาร์สหรัฐต่อตัน และราคาแพงขึ้นอย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตฟอร์มมาลดีไฮด์จากชีวมวล ได้แก่ อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับเครื่องแปรสภาพเป็นแก๊ส อัตราส่วนการป้อนไอน้ำต่อชีวมวล ความดันที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปฏิกรณ์เมทานอล อัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มมาลดีไฮด์ และศึกษาความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ ได้แก่ มูลค่าปัจจุบันสุทธิ ระยะเวลาคืนทุน และความอ่อนไหวของกระบวนการผลิต พบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการแปรสภาพเป็นแก๊สมากที่สุดคือ 900 องศาเซลเซียส เพราะทำให้ได้แก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์สูงสุด ความดันที่เหมาะสมต่อเครื่องปฏิกรณ์เมทานอลที่สุดสำหรับโครงการนี้อยู่ที่ 50 บาร์ การเพิ่มความดันที่ใช้ทำให้สามารถผลิตเมทานอลได้มากขึ้นแต่ต้องดูในด้านความคุ้มค่า และอัตราส่วนการป้อนอากาศต่อเมทานอลในเครื่องปฏิกรณ์ฟอร์มมาลดีไฮด์อยู่ที่ 1.4 โดยมวล เนื่องจากทำให้ได้ฟอร์มมาลดีไฮด์มากที่สุด การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์พบว่ามูลค่าปัจจุบันสุทธิกำไรอยู่ที่ 12.4 ล้านดอลลาร์สหรัฐเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาโครงการ คืนทุนในปีที่ 7 จากผลงานวิจัยพบว่าโครงการนี้น่าลงทุนเพราะตลาดของฟอร์มมาลดีไฮด์ยังมีการเติบโตอย่างต่อเนื่อง

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการทดลองหาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทั้งเมทานอลและฟอร์มมาลดีไฮด์ด้วยตัวเองเพื่อความสามารถในการจำลองที่กว้างและครอบคลุมขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

## เอกสารอ้างอิง

- [1] D.L. Jarvis, Polyacetals, Elsevier Ltd, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-35824-8.00019-0>.
- [2] S. Smart, L.P. Ding, J.C. Diniz Da Costa, Inorganic membranes for synthesis gas processing, *Adv. Membr. Sci. Technol. Sustain. Energy Environ. Appl.* (2011) 214–254. <https://doi.org/10.1533/9780857093790.2.214>.
- [3] C. Bonechi, M. Consumi, A. Donati, G. Leone, A. Magnani, G. Tamasi, C. Rossi, Biomass: An overview, Elsevier Ltd., 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101031-0.00001-6>.
- [4] S. Adhikari, H. Nam, J.P. Chakraborty, Conversion of solid wastes to fuels and chemicals through pyrolysis, Elsevier B.V., 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63992-9.00008-2>.
- [5] R.G. dos Santos, A.C. Alencar, Biomass-derived syngas production via gasification process and its catalytic conversion into fuels by Fischer Tropsch synthesis: A review, *Int. J. Hydrogen Energy*. 45 (2020) 18114–18132. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.133>.
- [6] A. Talaiekhosravi, M.A. Fulazzaky, P. Mohanadoss, Formaldehyde from production to application, (2013).
- [7] C.C. Ibeh, Phenol-Formaldehyde Resins, (1939).
- [8] M. Quaglio, F. Bezzo, A. Gavriilidis, E. Cao, N. Al-Rifai, F. Galvanin, Identification of kinetic models of methanol oxidation on silver in the presence of uncertain catalyst behavior, *AIChE J.* 65 (2019) 1–16. <https://doi.org/10.1002/aic.16707>.
- [9] L. Pilato, Phenolic resins: A century of progress, *Phenolic Resins A Century Prog.* (2010) 1–545. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

- [10] S. V. Vassilev, D. Baxter, L.K. Andersen, C.G. Vassileva, An overview of the chemical composition of biomass, *Fuel*. 89 (2010) 913–933.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.
- [11] É.S. Van-Dal, C. Bouallou, Design and simulation of a methanol production plant from CO<sub>2</sub> hydrogenation, *J. Clean. Prod.* 57 (2013) 38–45.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.008>.
- [12] P. Basu, *Design of Biomass Gasifiers*, First Edit, © 2010 Elsevier Inc., 2010.  
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-374988-8.00006-4>.
- [13] *An Applied Guide to Process and Plant Design*, 2019.  
<https://doi.org/10.1016/c2017-0-01972-9>.
- [14] K.D. Peters, Max S. Timmerhaus, *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*: , Ronald West, Max Peters : 0639785503897: Amazon.com: Book, 1991.  
<http://www.amazon.com/Plant-Design-Economics-Chemical-Engineers/dp/0072392665>.
- [15] C.R. Branan, *Rules of Thumb for Chemical Engineers*, 2005.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-7856-8.X5000-2>.
- [16] L.T. Biegler, I.E. Grossmann, A.W. Westerberg, *Systematic Methods of Chemical Process Design - BieglerGrossmannWesterberg.pdf*, (1999) 796.
- [17] E.R. Andersson, W. Science, *Economic evaluation of ergonomic solutions : Part I - Guidelines for the practitioner \**, (n.d.) 463–471.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ก1 ค่าการลงทุนหน่วยปฏิบัติการ

Unit	Cost (USD)
Gasifier	408,497
Heat Exchanger 1	3,444
Heat Exchanger 2	3,795
Heat Exchanger 3	1,628
Reactor 1	6,506
Reactor 2	6,336
Compressor	6,546,714
Absorber Column 1	22,723
Absorber Column 2	27,902
Distillation Column 1	32,913
Distillation Column 2	100,415
Reboiler 1	317,934
Reboiler 2	197,688
Condenser 1	177,490
Condenser 2	407,512
Total	8,261,503

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

Purchase equipment cost	8,261,503	USD
Delivered equipment cost	10,739,955	USD

**ตารางที่ ก2 ค่าการลงทุน**

Fixed		
Direct		
	Factor	Cost (USD)
Purchase equipment installation	0.39	4,188,582
Instrumentation and control	0.13	1,396,194
Piping	0.31	3,329,386
Electrical	0.1	1,073,995
Building	0.29	3,114,587
Yard improvement	0.1	1,073,995
Service facilities	0.55	5,906,975
Land	0.06	644,397
<b>Total</b>		<b>20,728,113</b>
Indirect		
Engineering and supervision	0.32	3,436,786
Construction expense	0.34	3,651,585
Contractor's fee	0.18	1,933,192
Contingency	0.36	3,866,384
<b>Total</b>		<b>12,887,946</b>
<b>Total fixed capital investment</b>		<b>33,616,059</b>
Working		
Working	0.1	3,361,606
<b>Total Capital Investment</b>		<b>36,977,665</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

**ตารางที่ ก3 ค่าการดำเนินงาน**

Direct production cost			
	Factor	Based on	Cost (USD)
Raw material			917,319
Catalyst			992,040
Operating labor	0.05	Total product cost	89,400
Direct supervisory and clerical labor	0.15	Operating labor	148,410
Utilities			9,803,397
Maintenance and repair	0.02	Equipment cost	165,230
Operating supplies	0.15	Maintenance and repair	24,785
Laboratory charges	0.15	Operating labor	148,410
Patent and royalties	0.03	Total product cost	554,114
<b>Total</b>			<b>13,743,106</b>
Fixed charge			
Local taxes	0.02	Capital investment	739,553
Insurance	0.01	Capital investment	369,777
<b>Total</b>			<b>1,109,329</b>
Plant overhead			
Plant overhead	0.6	Operating labor + supervision + maintenance	781,824
General Expenses			
Administrative	0.25	Operating labor	247,350
Distribution and marketing	0.1	Total product cost	1,847,048
Research and development	0.04	Total product cost	738,819

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.

ตารางที่ ก4 Net Present Value (NPV)

Year	NPV (USD)
0	-36,977,665
1	-28,529,277
2	-21,488,955
3	-15,622,019
4	-10,732,906
5	-6,658,645
6	-3,263,428
7	-434,080
8	1,923,710
9	3,888,535
10	5,525,889
11	6,890,351
12	8,027,402
13	8,974,945
14	9,764,564
15	10,422,580
16	10,970,927
17	11,427,882
18	11,808,678
19	12,126,008
20	12,390,450

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

This material is reserved for educational use only, not allowed for commercial use.

Forbidden to modify the content, and cite the document when use.