

ชุดบับค่น้ำเสีย จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล



นางสาวณัฐ รจิตร์จิเรข  
นายรังสิมันต์ แก้วโชติช่วงกุล

เลขหมู่..... 83053  
เลขสารบัญ.....  
วันเดือนปี..... 131 ก.ค. 2551

b. 11960296  
i. ....

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **WASTE WATER TREATMENT UNIT FOR BIODIESEL PRODUCTION PROCESS**



**MS. NUTH RAJITRUJIREK**

**MR. RANGSIMAN KAEWCHOTCHUANGKUN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN INDUSTRIAL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LARDKRABANG  
ACADEMIC YEAR 2007**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท

ชุดบำบัดน้ำเสีย จากกระบวนการผลิต ไบโอดีเซล

นักศึกษา

น.ศ. ณัฐ รัชต์รุจิโรช รหัสนักศึกษา 47010214

นาย รังสมันต์ แก้วโชติช่วงกุล รหัสนักศึกษา 47010618

หลักสูตร

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท



(รศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช)



(ผศ.ดร. สรรพสิทธิ์ ลิมนรัตน์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ชุดบำบัดน้ำเสีย จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล
นักศึกษา	น.ศ. ณัฐฐา รจิตร์จิเรข นาย รังสิมันต์ แก้ว โชติช่วงกุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา	2550
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	รศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช ผศ.ดร. สรรพสิทธิ์ ลิ้มบรรทัดน์

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการนำเสนอเรื่องการออกแบบและพัฒนาชุดบำบัดน้ำที่ผ่านการใช้ทำความสะอาดน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ โดยเน้นที่ความเรียบง่าย ไม่ซับซ้อน ประหยัดพลังงาน ขนาดเล็ก ราคาถูก โดย เริ่มต้นจากการนำตัวอย่างน้ำมาทดสอบเพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ สำหรับนำไปเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำที่สามารถใช้ในกระบวนการได้ และนำมาวิเคราะห์เกี่ยวกับส่วนประกอบที่จะนำมารวมเป็นอุปกรณ์ จากนั้นทำการออกแบบระบบ โดยรวม ออกแบบส่วนประกอบต่างๆ และวิเคราะห์วัสดุ โดยภายในระบบจะประกอบด้วย ส่วนประกอบหลักคือส่วนที่ทำหน้าที่ตกไขมัน ส่วนกรองของเสีย และส่วนเติมอากาศ หลังจากได้แบบและวัสดุแล้วก็ทำการสร้างอุปกรณ์ออกมาให้สำเร็จ ขั้นตอนต่อไปเป็นการตรวจสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์ โดยการนำน้ำตัวอย่างมาผ่านอุปกรณ์ และทำการทดสอบหาค่าตัวแปรต่างอีกครั้งว่าลดลงจนได้มาตรฐานหรือไม่ แล้วทำการปรับปรุงโครงสร้างทางกายภาพของอุปกรณ์เพื่อทำให้น้ำที่ผ่านอุปกรณ์มีคุณภาพดีขึ้นและมีค่าตัวแปรต่างๆ ใกล้เคียงกับมาตรฐานมากที่สุด ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการคำนวณต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอัตราการไหลของน้ำเย็นผ่านท่อทองแดง ในถังตกไขมันหรือแม้แต่อุณหภูมิของน้ำที่เหมาะสมเพื่อทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยผลของการศึกษาในครั้งนี้สามารถนำอุปกรณ์นี้ไปใช้ได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถบำบัดน้ำได้ตามมาตรฐาน

**Thesis Title** Waste Water Treatment Unit for Biodiesel Production Process

**Student** Ms. Nuth Rajitrujirek  
Mr. Rangsiman Kaewchotchuangkun

**Degree** Bachelor of Engineering in Industrial Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Academic Year** 2007

**Thisis Advisor** Associate Prof. Pomsak Attavanich  
Assistant Prof .Dr. Sunpasit Limnararat

### ABSTRACT

This thesis presents design and development of waste water treatment unit for biodiesel production process. In general, this equipment is conceptually designed to be a small, non-complicated, energy saving, economy and non-chemical treatment unit. Not only it operates with high efficiency but also operates under the environmental rules. There are three parts of this unit; eliminating oils and grease, getting rid of substances and filling oxygen through air. In order to develop this unit, firstly, the system is designed then each part and their materials are assigned and analyzed. Then the unit is constructed and tested. After improving all defects, all parameters including unit efficiency are calculated. Finally, the qualification of the water passing through this unit that meets the general water standard is the final result of this project.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องการออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับบำบัดน้ำที่ผ่านการใช้ทำความสะอาดน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคลทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องส่งผลให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

รศ. พรศักดิ์ อรรถวานิช อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆ ด้าน

ผศ.ดร. สรรพสิทธิ์ ลิ้มบรรณรัตน์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการให้โอกาสในการศึกษาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ รวมทั้งความรู้ คำแนะนำ ความช่วยเหลือและความเอาใจใส่ในทุกๆด้าน ทั้งสำหรับทำงานและความอบอุ่นที่มีให้ รวมถึงทุกสิ่งทุกอย่างตลอดการใช้ชีวิตอยู่ในภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรมแห่งนี้

ดร. สกนธ์ คล่องบุญจิต กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำดีๆ และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน โดยเฉพาะในด้านการศึกษาทฤษฎีแลกเปลี่ยนความร้อน

ดร. สิทธิพร พิมพ์สกุล กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำดีๆ และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

อาจารย์เชาวลิต วัฒนศิริ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำดีๆ และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

ผศ. ดร. ภรณชัย คัลยาศิริ กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำดีๆ และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

อาจารย์ กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำดีๆ และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

ดร. อนิรุท ไชยจารุณนิช กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับความรู้ คำแนะนำดีๆ และความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

บริษัท บีเอ็นบี อินเทอร์เน็ต จำกัด กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับการเอื้อเฟื้อน้ำตัวอย่าง สำหรับการทดสอบอุปกรณ์

นักวิทยาศาสตร์ทุกท่าน ในภาควิชาเคมีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กลุ่มผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง สำหรับคำแนะนำ ความรู้ และความช่วยเหลือต่างๆ เกี่ยวกับการวิเคราะห์น้ำ

ขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ครอบครัว และเพื่อนๆทุกคนสำหรับกำลังใจที่มีให้ตลอดมา

น.ส. ณัฐ รจิตร์จิเรข

นาย รังสิมันต์ แก้วโชติช่วงกุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ณ
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	
1.1 ความสำคัญและความเป็นมาของโครงการ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสีย.....	3
2.1.1 กระบวนการทางเคมี (chemical process).....	3
2.1.2 กระบวนการทางชีววิทยา (Biological Process).....	3
2.1.3 กระบวนการทางกายภาพ (physical process).....	3
2.1.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (physical-chemical process).....	4
2.1.4.1 การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption).....	4
2.1.4.2 การแลกเปลี่ยนประจุ.....	4
2.2 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย.....	4
2.2.1 การบำบัดขั้นเตรียมการ (preliminary treatment).....	4
2.2.2 การบำบัดขั้นต้น (primary treatment).....	4
2.2.3 การบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment).....	4
2.2.4 การบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment).....	4
2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์น้ำ.....	5
2.3.1 ลักษณะของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์น้ำ.....	5
2.3.1.1 พีเอช (pH).....	5
2.3.1.2 บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand).....	5
2.3.1.3 ปริมาณของแข็ง (solids).....	5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1.4 ไนโตรเจน (Nitrogen).....	5
2.3.1.5 ไขมันและน้ำมัน (Fat, Oil, Grease) .....	5
2.3.1.6 ซีไอดี (Chemical Oxygen Demand).....	5
2.3.2 มาตรฐานน้ำ.....	6
2.4 การทดลอง ไขมันและน้ำมัน.....	6
2.4.1 การสกัดด้วยกรวยแยก.....	7
2.4.2 การสกัดด้วยซอกซ์เลต.....	8
2.4.3 การสกัดหาไขมันและน้ำมันในภาคตะกอนด้วยวิธีซอกซ์เลต.....	9
2.5 การทดลองหาค่า บีไอดี.....	10
2.5.1 การเตรียมน้ำที่ใช้ในการเจือจาง.....	10
2.5.2 การเตรียมน้ำตัวอย่าง.....	11
2.5.3 การหาค่าบีไอดีด้วยวิธีธรรมดา.....	11
2.5.4 การตรวจสอบความแม่นยำในการหาค่าบีไอดี.....	12
2.5.5 เครื่องมือและอุปกรณ์.....	13
2.5.6 สารเคมี.....	13
2.5.7 การทดลอง.....	13
2.5.8 การคำนวณ.....	15
2.5.8.1 เมื่อไม่เจือจาง.....	15
2.5.8.2 เมื่อเจือจางน้ำตัวอย่าง.....	15
2.6 การทดลองหาค่า ซีไอดี.....	15
2.6.1 การเก็บรักษาตัวอย่างน้ำ.....	17
2.6.2 การวิเคราะห์หาซีไอดีด้วยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด.....	17
2.7 ทฤษฎีตัวกรอง.....	19
2.7.1 ตัวกรองธรรมชาติ.....	19
2.7.2 เครื่องกรองแบบธรรมดา.....	19
2.7.3 เครื่องกรองชนิด Reverse Osmosis.....	20
2.8 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Transfer).....	20
2.8.1 กฎการถ่ายเทความร้อน (Principles of Heat Transfer).....	20
2.8.1.1 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำ (conduction Heat Transfer).....	20
2.8.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา(Convection Heat Transfer).....	24
2.8.1.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี(Radiation Heat Transfer).....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.8.2 การนำความร้อนเมื่อสถานะต่างๆคงที่ (Steady State Conduction).....	27
2.8.2.1 การนำความร้อนแบบมิติเดียวที่สถานะต่างๆคงที่และ ไม่มีความร้อน .....	27
2.8.2.1.1 ระบบแกนของวัตถุสี่เหลี่ยมมุมฉาก.....	27
2.8.2.1.2 ระบบแกนของวัตถุรูปทรงกระบอก.....	29
2.8.2.1.3 ระบบแกนของวัตถุรูปทรงกลม.....	30
2.8.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger).....	32
2.8.3.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่าย.....	32
2.8.3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม.....	36
2.8.3.3 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	36
<b>บทที่ 3 แผนการดำเนินงาน</b>	
3.1 แผนการดำเนินการ.....	42
3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ.....	42
3.2.1 ศึกษาทฤษฎีต่างๆ.....	42
3.2.2 หาหน่วยงานตรวจสอบน้ำ.....	42
3.2.3 หาโรงงานที่จะเข้าไปทำการทดสอบ.....	43
3.2.4 ออกแบบระบบ.....	43
3.2.4.1 กระบวนการดักไขมัน.....	44
3.2.4.2 กระบวนการกรอง.....	44
3.2.4.3 กระบวนการเติมอากาศ.....	44
3.2.5 ออกแบบตัวเครื่อง.....	44
3.2.6 ปรับปรุงแบบให้เหมาะสม.....	45
3.2.7 วิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง.....	45
3.2.8 ออกแบบและสร้างตัวกรอง.....	45
3.2.9 ประกอบส่วนดักไขมันและหุ้มฉนวน.....	46
3.2.10 ทดสอบส่วนดักไขมัน.....	46
3.2.11 ออกแบบลักษณะการขุดของท่อทองแดงใหม่.....	46
3.2.12 จัดทำส่วนดักไขมันใหม่.....	48
3.2.13 ปรับปรุงวิธีการนำน้ำเย็นผ่านท่อทองแดง.....	48
3.2.14 ทดสอบส่วนดักไขมันใหม่.....	49
3.2.15 ประกอบกัน.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.16 ทดสอบทิศทางการไหลของน้ำผ่านตัวกรองธรรมชาติ.....	50
3.2.17 ปรับปรุงแบบกึ่งหัน และ คัดตั้ง .....	50
3.2.18 ทดสอบความทนทานของตัวกรอง .....	50
3.2.19 นำน้ำตัวอย่างมาผ่านอุปกรณ์ และนำไปวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆ.....	51
3.2.20 เปรียบเทียบตัวแปรที่ได้กับ มาตรฐานน้ำ.....	51
3.2.21 คำนวณหาค่าต่างๆ.....	51
<b>บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน</b>	
4.1 ส่วนดักไขมัน.....	52
4.1.1 ส่วนดักไขมันเดิม .....	52
4.1.2 ส่วนดักไขมันใหม่.....	52
4.2 ตัวกรอง.....	53
4.3 คุณภาพน้ำหลังจากผ่านอุปกรณ์.....	54
4.4 การคำนวณค่าต่างๆ .....	54
4.4.1 ค่าคงที่.....	54
4.4.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากการทดลอง.....	54
4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน .....	55
4.4.4 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด.....	55
4.4.5 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์.....	55
4.4.6 ความสามารถของอุปกรณ์.....	55
4.4.7 อัตราการไหลของน้ำเย็น .....	55
<b>บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและอภิปรายผล</b>	
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน.....	56
5.2 แนวทางในการพัฒนาและปรับปรุง .....	56
<b>หนังสืออ้างอิง</b> .....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงมาตรฐานน้ำทิ้ง.....	6
ตารางที่ 2.2 การเลือกเจือจางน้ำตัวอย่างให้เหมาะสมในการหาค่าบีโอดี.....	12
ตารางที่ 2.3 ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ.....	18
ตารางที่ 2.4 ค่าการนำความร้อน $k$ ของโลหะ อโลหะ ของแข็ง ของเหลว และแก๊สบางชนิด .....	22
ตารางที่ 2.5 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การหาความร้อนเฉลี่ย.....	25
ตารางที่ 3.1 แผนگردำเนินการ .....	42
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่ามาตรฐานน้ำ.....	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 (ก)แสดงเครื่องหมายของค่า $dT/dx$ สำหรับการนำความร้อน.....	21
รูปที่ 2.1 (ข)แสดงทิศทางการไหลของความร้อน.....	21
รูปที่ 2.2 ค่าการนำความร้อน $k$ ของของเหลวและแก๊สที่แปรตามอุณหภูมิ.....	23
รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อน $k$ ของโลหะบางชนิดที่แปรตามอุณหภูมิ.....	24
รูปที่ 2.4 ผังจากรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากพร้อมด้วยเงื่อนไขที่ขอบเขต.....	28
รูปที่ 2.5 วัตถุรูปทรงกระบอกกลวงพร้อมเงื่อนไขที่ขอบเขต.....	30
รูปที่ 2.6 วัตถุรูปทรงกลมและเงื่อนไขที่ขอบเขต.....	31
รูปที่ 2.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ท่อสองขนาดซ้อนร่วมแกนเดียวกันและของไหลสวนทางกัน.....	32
รูปที่ 2.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับเซลล์ที่มีแผ่นบังกับทิศทางการไหล.....	32
รูปที่ 2.9 การจัดแผ่นบังกับทิศทางการไหลทั้งสามแบบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน.....	33
รูปที่ 2.10 การไหลตามแนวตั้งฉากของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก.....	34
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย.....	35
รูปที่ 2.12 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับเซลล์ที่มี floating head.....	35
รูปที่ 2.13 ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่ของไหลไหลทางเดียวกัน.....	39
รูปที่ 2.14 ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่ของไหลไหลสวนทางกัน.....	39
รูปที่ 2.15 ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับเซลล์.....	40
รูปที่ 2.16 ค่าค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากไม่ตลกเคล้ำปนกัน.....	40
รูปที่ 2.17 ค่าค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก.....	41
รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในระบบบำบัดน้ำเสีย.....	43
รูปที่ 3.2 การออกแบบอุปกรณ์เบื้องต้น.....	44
รูปที่ 3.3 ตะแกรงเติมอากาศที่ปรับปรุงแล้ว.....	45
รูปที่ 3.4 แบบส่วนกรองของเสีย.....	45
รูปที่ 3.5 ส่วนดักไขมันเดิม.....	46
รูปที่ 3.6 ส่วนดักไขมันเดิมพร้อมฉนวนหุ้ม.....	46
รูปที่ 3.7 การออกแบบลักษณะการขุดตัวของท่อทองแดงใหม่.....	47
รูปที่ 3.8 การออกแบบลักษณะการขุดของท่อทองแดงที่จะใช้ในระบบ.....	47
รูปที่ 3.9 ส่วนดักไขมันใหม่.....	48
รูปที่ 3.10 ขณะทำการทดลองส่วนดักไขมันใหม่.....	49
รูปที่ 3.11 กิ่งหินก่อนการปรับปรุง.....	49
รูปที่ 3.12 ตัวกรอง.....	50
รูปที่ 3.13 แบบกึ่งหินที่ปรับปรุงแล้ว.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ทั้งระบบระหว่างนำน้ำผ่าน.....	51
รูปที่ 3.15 น้ำที่ผ่านอุปกรณ์มาวัดปริมาตร.....	51
รูปที่ 4.1 ผลการทดลองส่วนตัดไขมันเดิม.....	52
รูปที่ 4.2 ผลการทดลองส่วนตัดไขมันใหม่ ที่ 30 นาที.....	52
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองส่วนตัดไขมันใหม่ ที่ 60 นาที.....	53
รูปที่ 4.4 การวัดประสิทธิภาพตัวกรอง.....	53



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

นับตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ในประเทศไทยใช้น้ำอย่างไม่รู้คุณค่า แม้ในความเป็นจริงประเทศไทยจะมีน้ำในปริมาณมาก แต่คนไทยยังคงมีอุปนิสัยในการใช้น้ำดังเช่นที่เป็นมา มีโอกาสเป็นไปได้ว่าในอนาคตอันใกล้ปริมาณน้ำจืดในประเทศไทยอาจลดน้อยลงจนมีปริมาณไม่เพียงพอต่อความต้องการของคนไทย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีที่ทันสมัยมีส่วนในการเข้ามาปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพชีวิตของมนุษย์ดีขึ้น ดังนั้นจึงควรจะนำเทคโนโลยีเข้ามามีส่วนร่วมในการช่วยประหยัดทรัพยากรธรรมชาติ

โรงผลิตน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อนำมาใช้ภายในชุมชนได้แสดงความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อมโดยการสร้างโรงบำบัดน้ำเสียเพื่อบำบัดน้ำที่เหลือจากกระบวนการผลิตก่อนที่จะปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งเป็นการช่วยในด้านสิ่งแวดล้อมในระดับหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ถ้าหากมีอุปกรณ์มาช่วยนำน้ำในกระบวนการนั้นๆ มาทำการบำบัดเบื้องต้นและนำกลับไปใช้ในกระบวนการใหม่ได้ โดยที่อุปกรณ์นั้นมีราคาไม่สูง และเป็นอุปกรณ์ที่ประหยัดพลังงาน ก็น่าจะเป็นการช่วยเหลือชุมชนในการประหยัดต้นทุนและงบประมาณในการใช้น้ำได้ไม่มากนัก

### 1.2 วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ได้แก่

1. ศึกษาหลักการต่างๆเกี่ยวกับสภาพน้ำเสีย และวิธีในการบำบัด
2. ออกแบบและจัดทำอุปกรณ์บำบัดน้ำที่มีราคาถูก ขนาดเล็ก และประหยัดพลังงานสำหรับบำบัดน้ำที่ผ่านการใช้ทำความสะอาดน้ำมันไบโอดีเซลเพื่อหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่
3. ช่วยชุมชนประหยัดต้นทุนและงบประมาณในการใช้น้ำ
4. วิเคราะห์และเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียก่อนและหลังการใช้งาน

### 1.3 ขอบเขตปริญญานิพนธ์

ขอบเขตปริญญานิพนธ์ ได้แก่

1. ทดสอบและวิเคราะห์คุณภาพน้ำโดยใช้งบประมาณที่จำกัดไม่เกิน 5,000 บาท
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์บำบัดน้ำแบบประหยัดพลังงาน ขนาดเล็ก และราคาข้อมเยา
3. เพิ่มขั้นตอนการบำบัดน้ำเพื่อนำกลับไปใช้ในกระบวนการ แทนการปล่อยสู่โรงบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ ทั้งนี้เน้นผ่านใช้เพียงครั้งเดียว
4. บำบัดน้ำเพื่อนำกลับมาใช้กับกระบวนการเดิมหรือกิจกรรมอื่นๆที่ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำที่มีคุณภาพสะอาด 100%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ผลจากการศึกษารังนี้ ได้แก่

1. สามารถออกแบบอุปกรณ์ที่สามารถบำบัดน้ำเพื่อนำกลับมาใช้ในกระบวนการได้
2. สามารถช่วยชุมชนประหยัดต้นทุนในการใช้น้ำได้
3. สามารถเปรียบเทียบข้อได้เปรียบและข้อเสียเปรียบก่อนและหลังการใช้อุปกรณ์บำบัด
4. เพิ่มความรู้เกี่ยวกับการลดมลภาวะทางน้ำมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไป หรือทำให้เหลือ น้อยที่สุด ได้มาตรฐานตามที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม น้ำเสียจากแหล่งที่มาต่างกันจะมีคุณสมบัติ ไม่เหมือนกันดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำจึงมีหลายวิธี โดยระบบบำบัดน้ำเสียทั่วไปมี 4 วิธีคือ

##### 2.1.1 กระบวนการทางเคมี (chemical process)

เป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียโดยการแยกสารต่างๆ หรือสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่บำบัด เช่น โลหะหนัก สารพิษ สภาพความเป็นกรดต่างสูงๆที่ปนเปื้อนอยู่ด้วยการเติมสารเคมีต่าง ๆ ลงไปเพื่อให้เข้าไปทำปฏิกิริยาซึ่งจะมี ประโยชน์ในการแยกสาร แต่มีข้อเสียคือ เมื่อเติมสารเคมีลงในน้ำเสียแล้ว อาจทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและมี ค่าใช้จ่ายสำหรับสารเคมีค่อนข้างสูง ดังนั้นกระบวนการทางเคมีจะเลือกใช้ก็ต่อเมื่อน้ำเสียไม่สามารถบำบัดได้ด้วย กระบวนการทางกายภาพหรือชีวภาพ

##### 2.1.2 กระบวนการทางชีววิทยา (biological process)

กระบวนการทางชีววิทยา (biological process) เป็นการย่อยสลายหรือการกำจัดของเสียต่าง ๆ มาทำ การย่อยสลายเปลี่ยนอินทรีย์สารให้เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และแอมโมเนีย เป็นการบำบัดน้ำเสียที่ดีที่สุดในแง่ ของการลดปริมาณสารอินทรีย์ในแหล่งน้ำ แต่หลักการนี้ต้องทำการเลือกสภาวะแวดล้อมให้เหมาะกับการทำงานของ จุลินทรีย์ ปริมาณของจุลินทรีย์ และเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย แบคทีเรียที่เลือกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์แยกออก ได้เป็น 2 ประเภท คือ แบคทีเรียที่ต้องใช้ออกซิเจน (aerobic bacteria) และพวกไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic bacteria)

##### 2.1.3 กระบวนการทางกายภาพ (physical process)

กระบวนการทางกายภาพ (physical process) เป็นการบำบัดน้ำเสียอย่างง่ายซึ่งจะแยกของแข็งที่ไม่ ละลายน้ำออก วิธีนี้จะแยกตะกอนได้ประมาณ 50-65% ส่วนเรื่องการแยกความสกปรกในรูปของสารอินทรีย์ (BOD5) ประมาณ 20-30% เท่านั้น วิธีการต่าง ๆ ในกระบวนการนี้มีหลายวิธี เช่น การคัดด้วยตะแกรง (screening) เพื่อแยก เศษขยะต่าง ๆ ที่มากับน้ำเสีย เช่น เศษไม้ ถุงพลาสติก กระดาษ ตะแกรงมีหลายขนาด การคัดด้วยตะแกรงถึงเป็น ขั้นตอนแรกในการบำบัดน้ำเสีย การตัดย่อย (combination) คือ การใช้เครื่องตัดทำลายเศษขยะขนาดใหญ่ให้มีขนาดเล็ก ลง การกวาด (skimming) เป็นการกำจัดน้ำมันและไขมัน โดยการดักหรือกวาดออกจากน้ำเสีย การทำให้ลอย (floating) จะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ การตกตะกอน (sedimentation) เป็นการแยกตะกอนออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยหลักการเรื่องแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะใช้กับตะกอนที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.1.4 กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (physical-chemical process)

เป็นกระบวนการที่ต้องมีอุปกรณ์ช่วยมากกว่ากระบวนการต่างๆที่กล่าวมา ซึ่งกระบวนการนี้มักจะใช้เป็นขั้นตอนสุดท้ายในการบำบัดน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการในขั้นตอนอื่นแล้ว เช่น

2.1.4.1 การดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) วิธีการนี้ใช้ผงถ่านหรือคาร์บอนเป็นตัวดูดซับสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำทิ้ง

2.1.4.2 การแลกเปลี่ยนประจุ วิธีการนี้อาศัยหลักการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างสารปนเปื้อนในน้ำเสียกับตัวกลางที่บรรจุซึ่งมีทั้งประจุบวกและประจุลบ

### 2.2 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

โดยทั่วไปการบำบัดน้ำทิ้งแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนดังนี้

2.2.1 การบำบัดขั้นเตรียมการ (preliminary treatment) เป็นขั้นตอนการแยกสิ่งสกปรกที่มีขนาดใหญ่และไม่ละลายน้ำออกจากน้ำ โดยการใช้ตะแกรง (Screens)

2.2.2 การบำบัดขั้นต้น (primary treatment) น้ำเสียที่ผ่านขั้นตอนจากข้อที่ 2.2.1 แล้ว จะถูกนำมาตกตะกอนในถังตกตะกอน ซึ่งเรียกว่า primary sludge การบำบัดในขั้นนี้จะลดค่า BOD ได้ประมาณ 25-40% แล้วแต่คุณลักษณะของน้ำทิ้งและประสิทธิภาพของถังตกตะกอน

2.2.3 การบำบัดขั้นที่สอง (secondary treatment) น้ำเสียจากข้อ 2.2.2 จะถูกนำเข้าไปสู่ถังเติมอากาศซึ่งจะมีการเติมอากาศให้แก่แบคทีเรียโดยใช้เครื่องเติมอากาศ แบคทีเรียจะช่วยย่อยสลายและกำจัดสารอินทรีย์หรือ BOD ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายหรืออนุภาคคอลลอยด์ ออกไปจากน้ำ กลายเป็นตะกอนตกลงไปที่ก้นถัง ถังตกตะกอนในส่วนนี้จะถูกนำไปกำจัดต่อไป น้ำในส่วนบนของถังตกตะกอนจะใสขึ้น ในขั้นตอนนี้จะช่วยลดค่า BOD ลงได้ประมาณ 75-95% ซึ่งค่า BOD ของน้ำส่วนนี้จะต่ำกว่า 20 มิลลิกรัม/ลิตร สามารถปล่อยทิ้งลงสู่แม่น้ำได้ แต่ต้องการความสะอาดเหมาะสมแก่การนำกลับมาใช้ใหม่เข้าสู่การบำบัดขั้นที่ 3 ต่อไป

2.2.4 การบำบัดขั้นที่สาม (tertiary treatment) จะทำเมื่อต้องการให้น้ำมีความบริสุทธิ์และสะอาดจนสามารถนำกลับมาใช้อุปโภคและบริโภคได้ ขบวนการบำบัดนี้จึงเป็นขบวนการเคมีร่วมกับฟิสิกส์-เคมี โดยน้ำทิ้งจากการบำบัดขั้นตอนที่สอง จะถูกนำมาตกตะกอนด้วยวิธีทางเคมีแยกสารประกอบฟอสเฟตออกด้วยปูนขาว จากนั้นจึงนำมากำจัดสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ด้วยขบวนการ ฟิสิกส์-เคมีด้วยขบวนการ ion exchange จากนั้นนำไปผ่านการฆ่าเชื้อโรคก็จะได้น้ำที่สะอาด

## 2.3 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์น้ำ

### 2.3.1 ลักษณะของตัวแปรต่างๆที่เกี่ยวกับการวิเคราะห์น้ำ

2.3.1.1 พีเอช (pH) เป็นค่าที่บอกถึงความเข้มข้นกรดเป็นค่าของน้ำเสีย โดยทั่วไปสิ่งมีชีวิตในน้ำหรือจุลินทรีย์ในถังบำบัดจะดำรงชีพได้ดีในสภาวะเป็นกลาง คือ pH ประมาณ 6-8

2.3.1.2 บีโอดี (Biochemical Oxygen Demand) เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ถ้าค่าบีโอดีสูงแสดงว่าความต้องการออกซิเจนสูง นั่นคือมีความสกปรกหรือสารอินทรีย์ในน้ำมาก

2.3.1.3 ปริมาณของแข็ง (Solids) หมายถึงปริมาณสารต่างๆที่มีอยู่ในน้ำเสีย ทั้งในลักษณะที่ไม่ละลายน้ำและที่ละลายน้ำของแข็งบางชนิดมีน้ำหนักเบาและแขวนลอยอยู่ในน้ำ บางชนิดหนัก และจมตัวอยู่เบื้องล่าง

2.3.1.4 ไนโตรเจน (Nitrogen) เป็นธาตุจำเป็นในการสร้างเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ไนโตรเจนจะเปลี่ยนสภาพเป็นแอมโมเนีย ถ้าหากในน้ำมีออกซิเจนพอเพียงก็จะถูกย่อยสลายไปเป็นไนไตรต์และไนเตรท ดังนั้นการปล่อยน้ำเสียที่มีสารประกอบไนโตรเจนสูงจึงทำให้ออกซิเจนที่มีอยู่ในลำน้ำลดลง

2.3.1.5 ไขมันและน้ำมัน (Fat, Oil, Grease) ส่วนใหญ่ได้แก่ น้ำมันและไขมันจากพืชและสัตว์ที่ใช้ในการทำอาหาร สบู่จากการอาบน้ำ ฟองจากการชำระล้าง สารเหล่านี้มีน้ำหนักเบาและลอยน้ำ ทำให้เกิดสภาพไม่แน่นอนและขวางกั้นการซึมของออกซิเจนจากอากาศสู่แหล่งน้ำ นอกจากนี้ยังมีค่าบีโอดีสูงเพราะเป็นสารอินทรีย์

2.3.1.6 ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) คือค่าปริมาณออกซิเจนที่ใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ด้วยวิธีการทางเคมี มักใช้เทียบหาค่าบีโอดีโดยคร่าวๆ ปกติ COD:BOD ของน้ำเสียชุมชนประมาณ 2-4 เท่า

## 2.3.2 มาตรฐานน้ำ

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงมาตรฐานน้ำทิ้ง

คุณสมบัติ	มาตรฐาน
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0
ค่า TDS (Total Dissolve Solids)	3,000-5,000 mg/L
ค่า SS (Suspended Solids)	50-150 mg/L
BOD <sub>5</sub>	20-60 mg/L
COD	120-400 mg/L
ไขมันและน้ำมัน	5-15 mg/L
อุณหภูมิ	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส
สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ

## 2.4 การทดลอง ไขมันและน้ำมัน

น้ำมันหรือไขมัน หมายถึง กลุ่มของสารอินทรีย์ที่ละลายหรือแขวนลอยในน้ำ ได้แก่สารประกอบไฮโดรคาร์บอน เอสเทอร์ น้ำมัน ไขมัน แวกซ์ และกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ซึ่งสารต่างๆเหล่านี้ละลายน้ำได้ยากและมีจะลอยตัวอยู่บนผิวน้ำก่อให้เกิดปัญหาในระบบบำบัดแบบชีวภาพ เพราะจะทำให้ตะกอนลอยตัวขึ้นมา (scum) ในถังย่อยสลายตะกอน (sludge digestion tank) หรือในระบบบำบัดแบบไปรยกรอง น้ำมันและไขมันจะไปเคลือบบนตัวกลาง หรือบริเวณกลุ่มของจุลินทรีย์เกาะอยู่ทำให้การถ่ายเทออกซิเจนไม่ดีพอ

การวิเคราะห์หาปริมาณ ไขมันและน้ำมัน ไม่ได้เป็นการวัดปริมาณไขมันทั้งหมดที่มีในตัวอย่างนั้นๆ แต่เป็นการหาค่าของไขมันหรือน้ำมันที่ละลายได้ในตัวทำละลายบางชนิด เช่น เฮกเซน (Hexane) หรือ ฟร็อน (Freon) และรวมถึงสารอื่นๆที่สามารถสกัดได้โดยตัวทำละลาย โดยไขมันปกติจะตกตะกอนเมื่อทำปฏิกิริยากับแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีอยู่ในสบู่จึงทำให้ไม่ละลายในตัวทำละลาย ดังนั้นจึงต้องปรับพีเอชให้เป็นกรดประมาณ 2.0 เพื่อให้เกลือละลายอยู่ในรูปกรดไขมันให้หมด นอกจากจะทำให้เป็นกรดแล้วสารนั้นต้องไม่กลายเป็นไอในระหว่างการระเหยตัวทำละลาย สารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย เช่น สารประกอบซัลเฟอร์ สีย้อมอินทรีย์ และคลอโรฟิลล์

วิธีที่นิยมใช้หาปริมาณไขมันมี 3 วิธีคือ

1.การสกัดด้วยกรวยแยก (Partition – Gravimetric method) ไขมันหรือน้ำมันที่อยู่ในรูปสารละลาย (emulsion) หรือไม่ละลายในน้ำตัวอย่างจะถูกทำให้เป็นกรดโดยปรับค่าพีเอชให้ต่ำกว่า 2 และสกัดไขมันออกจากน้ำตัวอย่างโดยการนำไปเขย่ากับตัวทำละลาย เช่น ฟร็อน หรือ เฮกเซน ในกรวยแยก จากนั้นระเหยตัวทำละลายจนแห้งทิ้งให้เย็นในโถแห้ง วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำที่ประกอบด้วยไขมันและน้ำมันที่มีจุดเดือดสูง

2.การสกัดด้วยซอกซ์เลต (Soxhlet extraction method) วิธีนี้ใช้สำหรับน้ำตัวอย่างที่มีสารพวกไฮโดรคาร์บอนที่ไม่ระเหย น้ำมันพืช ไขมันสัตว์ ขี้ผึ้ง สบู่ และสารอื่นๆที่เกี่ยวข้อง โดยนำตัวอย่างน้ำไปสกัดในเครื่องมือซอกซ์เลต โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย จากนั้นระเหยตัวทำละลายจนแห้ง ชั่งน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น วิธีนี้สารประกอบที่เป็นไอที่อุณหภูมิต่ำกว่า 103 องศาเซลเซียส จะระเหยไปได้ระหว่างการกรองและการทำให้แห้ง เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำควรทำอย่างน้อย 2 ครั้ง อัตราการกลั่นและวิธีที่ใช้ในการกลั่นและการทำให้แห้งควรคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.การสกัดกากตะกอน (Extraction method for sludge samples) นำกากตะกอนมาปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 2 แล้วทำให้แห้งโดยโซเดียมซัลเฟต (ซึ่งสารนี้สามารถดูดซึมน้ำได้ถึง 7 เท่าของน้ำหนักสาร) ดังนั้นกากตะกอนจะแห้งโดยไม่ต้องอบ หลังการนั้นจึงนำไปสกัดไขมันและน้ำมันด้วยซอกซ์เลต โดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย

#### สารรบกวน

ตัวทำละลายที่ใช้มีความสามารถในการละลายไม่เฉพาะไขมันและน้ำมันเท่านั้น แต่สามารถละลายสารอินทรีย์บางชนิดได้ด้วย ดังนั้นเมื่อระเหยตัวทำละลายหลังการสกัด ถ้ามีสารประกอบคาร์บอนสารสั้นๆ (shot chains hydrocarbon) และสารประกอบอะโรมาติก (simple aromatic compounds) จะสามารถระเหยหายไปได้ทำให้ผลที่ได้มีน้อยกว่าความเป็นจริง

#### 2.4.1 การสกัดด้วยกรวยแยก

##### 1.เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.กรวยแยกมีจุกปิด ขนาด 500 มล.
- 2.ขวดกั่นกลมขนาด 250 มล.
- 3.เครื่องอั้งน้ำ
- 4.กระดาษกรองเบอร์ 40
- 5.เครื่องชั่งละเอียด

##### 2.สารเคมี

- 1.กรดไฮโดรคลอริก 1+1
- 2.เฮกเซน (n - hexane) และฟริออน
3. โซเดียมซัลเฟตปราศจากน้ำในรูปผลึก (sodium sulfate anhydrous)

##### 3.วิธีการทดลอง

1.นำน้ำตัวอย่างประมาณ 500 มล. ใส่ในบีกเกอร์ที่ล้างด้วยเฮกเซน แล้วเติมกรดไฮโดรคลอริก 1+1 จนมีพีเอชเท่ากับ 2 หรือต่ำกว่า

2.เทตัวอย่างน้ำลงในกรวยแยก ล้างภาชนะที่ใส่ตัวอย่างน้ำด้วยเฮกเซน 30 มล. แล้วเทใส่กรวยแยก ปิดฝาและเขย่าอย่างแรง 2 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้สารผสมแยกชั้น ชั้นเฮกเซนจะอยู่บน ตัวอย่างน้ำจะอยู่ด้านล่าง

3.ถ่ายชั้นตัวอย่างน้ำไว้บีกเกอร์ที่สะอาดเพื่อนำมาสกัดอีกครั้งหนึ่ง ถ่ายชั้นเฮกเซนซึ่งมีไขมันและน้ำมันละลายอยู่หลังการสกัดเก็บไว้ในฟลาสก์หรือขวดกั่นกลมซึ่งทำให้แห้งและมีน้ำหนักคงที่ซึ่งได้ชั่งไว้แล้ว สมมติมีน้ำหนัก A กรัม

4.นำตัวอย่างน้ำที่เก็บไว้จากข้อ 3 กลับมาสกัดอีกครั้งด้วยเฮกเซน 15 – 20 มล. สกัดด้วยวิธีเดียวกับที่กล่าวมาข้างต้น ทำหลายๆครั้งจนไขมันและน้ำมันถูกสกัดออกจากตัวอย่างน้ำทั้งหมด

5.นำฟลาสก์ที่มีเฮกเซนไขมันและน้ำมันที่ได้จากการสกัด มาระเหยเฮกเซนออกบนเครื่องอั้งน้ำจนแห้งปราศจากความชื้น แล้วนำมาทำให้เย็นในโถทำแห้งประมาณ 30 นาที แล้วชั่ง สมมติน้ำหนักที่ชั่งได้เป็น B กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การคำนวณ

$$\text{ไขมันและน้ำมัน (มก./ล.)} = \frac{B-A \text{ (กรัม)} \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ(ม.ล.)}}$$

หมายเหตุ ในกรณีที่ชั้นของตัวทำละลายมีน้ำปนอยู่ให้ใส่โซเดียมซัลเฟตประมาณ 1 กรัมไปบนกระดาษกรอง แล้วค่อยๆกรอง เทตัวทำละลายดังกล่าวลงบนกระดาษกรองเพื่อให้มีลชั้นแตกออกและโซเดียมซัลเฟตจับกับน้ำ

#### 2.4.2 การสกัดด้วยซอกซ์เลต

##### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องมือที่ใช้ในการสกัด (Soxhlet extraction apparatus)
2. เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum pump)
3. กรวยบุคเนอว์ (Buchner funnel)
4. ทิมเบล (Extraction thimble) และ กระดาษกรองเบอร์ 40
5. ผ้าดิบเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม.

##### 2. สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก 1+1
2. เฮกเซน (n - hexane) ที่มีจุดเดือด 60 องศาเซลเซียส หรือ ไตรคลอโรฟลูออโรอีเทน (1, 1, 2 - trichloro - 1, 2, 2 trifluorethane)
3. ตัวกรอง (Diatomaceous - silica filter acid suspension) ซึ่ง diatomaceous - silica 10 กรัมค่อน้ำ 1 ลิตร

##### 3. วิธีการทดลอง

1. นำตัวอย่างน้ำมันปริมาณหนึ่งใส่ในภาชนะแล้วปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 2 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1+1
2. เตรียมการกรอง โดยวางผ้าดิบ กระดาษกรองบนกรวยบุคเนอว์เทตัวกรอง 100 มล. ลงบนที่กรอง แล้วเปิดเครื่องดูดสุญญากาศและล้างด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร เปิดเครื่องดูดสุญญากาศ
3. กรองตัวอย่างน้ำที่เตรียมจากข้อ 1 ผ่านบนกระดาษกรองที่มีตัวอย่าง (ในข้อ 2) เพื่อดูดซับน้ำมันที่ติดค้างบนตัวกรอง
4. ใช้ปากคีบหยิบกระดาษกรองแล้วม้วนเป็นวงใส่ลงในกระดาษทิมเบล ใช้สำลีชุบเฮกเซนหรือตัวทำละลายที่ใช้สกัด แล้วใส่รวมลงในทิมเบล และนำทิมเบล ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส 15 นาที
5. ชั่งน้ำหนักขวดกันกลมที่จะนำไปใช้สกัด สมมติน้ำหนักเท่ากับ A กรัม แล้วจึงเติมเฮกเซนในขวดสกัด 200 มล.

6. ใส่เม็ดแก้วหรือใยแก้ว ลงในทิมเบลให้เต็มแล้วนำไปใส่ในซอกซ์เลตทำการสกัดโดยใช้เฮกเซน

เป็นตัวทำละลาย อย่างช้าๆเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. นำส่วนที่สกัดได้ในขวดสกัดไประเหยตัวทำละลายบนเครื่องอังน้ำจนแห้ง ทำให้เย็นในโถแห้ง 30 นาที ชั่งน้ำหนักที่ได้ สมมติเท่ากับ B กรัม

#### 4. การคำนวณ

$$\text{ไขมันและน้ำมัน (มก./ล.)} = \frac{B-A \text{ (กรัม)} \times 10^6}{\text{ปริมาตรตัวอย่างน้ำ (ม.ล.)}}$$

หมายเหตุ ถ้าตัวทำละลายเมื่อระเหยแล้วมีตะกอนเหลืออยู่ต้องนำมาหักออกจากร้าน้ำหนักของไขมันและน้ำมัน ที่คำนวณได้

### 2.4.3 การสกัดหาไขมันและน้ำมันในกากตะกอนด้วยวิธีซอกซ์เลต

#### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องมือที่ใช้ในการสกัด (Soxhlet extraction apparatus)
2. เครื่องดูดสุญญากาศ (Vacuum pump)
3. กรวยบุคเนออร์ (Buchner funnel)
4. ทิมเบล (Extraction thimble) และ กระดาษกรองเบอร์ 40
5. ฝ้ายดิบเส้นผ่านศูนย์กลาง 11 ซม.

#### 2. สารเคมี

1. กรดไฮโดรคลอริก 1+1
2. เฮกเซน (n - hexane) ที่มีจุดเดือด 60 องศาเซลเซียส หรือ ไตรคลอโรฟลูออโรอีเทน (1, 1, 2 - trichloro - 1, 2, 2 trifluorethane)
3. ตัวกรอง (Diatomaceous - silica filter acid suspension) ซึ่ง diatomaceous - silica 10 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร

#### 3. วิธีการทดลอง

1. ชั่งน้ำหนักกากตะกอนที่ยังเปียกอยู่จำนวน  $20 \pm 0.5$  กรัม (ซึ่งทราบค่าร้อยละของตะกอนแห้ง) ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 150 มล.
2. ปรับพีเอชกากตะกอนให้เท่ากับ 2 โดยเติมกรดเกลือเข้มข้น 0.3 มล.
3. เติมโซเดียมซัลเฟต 25 กรัม คนให้เข้ากัน แล้วเกลี่ยให้เป็นแผ่นบางๆ ข้างบีกเกอร์ทิ้งไว้ประมาณ 15 - 30 นาที นำออกมาเทใส่กรก บดให้ละเอียด
4. ถ่ายตัวอย่างลงในทิมเบล ใช้สำลีชุบเฮกเซนแช่ไขมันที่ติดข้างบีกเกอร์และครกใส่ลงในทิมเบล แล้วเติมลูกแก้วให้เต็ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ชั่งน้ำหนักขวดสก็ด ซึ่งอบแห้งที่ 103 องศาเซลเซียส จนมีน้ำหนักคงที่ สมมติน้ำหนักเท่ากับ A กรัม เติมน้ำลงไป 200 มล.

6. นำทิมเบิลในข้อ 4 ใส่ชุดสกัดซอกซ์เลต ใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย สก๊ตอย่างช้าๆ เป็นเวลา 4 ชม.

7. ระเหยเฮกเซนในขวดสก็ดด้วยเครื่องอังน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จนแห้ง

8. นำขวดสก็ดมาทำให้เย็นใน โถทำแห้ง นำไปชั่งน้ำหนัก สมมติเท่ากับ B กรัม

#### 4. การคำนวณ

$$\text{ไขมันและน้ำมัน (ร้อยละของน้ำหนักแห้ง)} = \frac{B-A \text{ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักเปียก} \times \% \text{ ตะกอนแห้ง}}$$

### 2.5 การทดลองหาค่า บี โอ ดี

สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ก่อให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติ ซึ่งต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายด้วย ปกติแล้วออกซิเจนละลายในน้ำได้อิ่มตัวมากที่สุด 8 – 84 ppm ที่ 20 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ 760 มม. ของปรอท การละลายจะลดลงเมื่อความดันบรรยากาศลดลงหรือเมื่ออุณหภูมิและความเค็มเพิ่มขึ้น ปริมาณออกซิเจนที่ถูกใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยวัดจากการนำน้ำตัวอย่างมาบ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน เรียกว่า ค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand BOD<sub>5</sub>) หรือค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี โดยมีการเปรียบเทียบปริมาณของออกซิเจนก่อนและหลังการบ่ม ซึ่งการหาค่าบีโอดีนั้นนำมาใช้เป็นตัวแปรในการประเมินคุณภาพน้ำดิบ (ก่อนนำไปใช้ในกิจกรรมต่างๆ) และคุณภาพน้ำทิ้งจากกิจกรรมต่างๆ ซึ่งสามารถจำแนกสารอินทรีย์ที่ต้องใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายได้ 2 ชนิด คือสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจนนำมาใช้เป็นสารอาหารได้ (Carbonaceous compound) และสารประกอบไนโตรเจน (Nitrogenous compound) เช่น ไนไตรต์ แอมโมเนีย สารอินทรีย์ไนโตรเจน ซึ่งเป็นอาหารของแบคทีเรียบางชนิด โดยเฉพาะแบคทีเรียพวก ไนโตรโซโมแนส และ ไนโตรแบคเตอร์ นอกจากนี้ยังมีสารอินทรีย์บางชนิดที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้ เช่น Fe<sup>2+</sup> S<sup>2-</sup> SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> ซึ่งถ้ามีอยู่ในน้ำจะทำให้ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำอยู่ลดลงได้

จุลินทรีย์ทั่วไป จะไม่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์จากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมได้ ในกรณีนี้อาจต้องมีการเติมเชื้อ (Seeding) เพื่อช่วยในการย่อยสลาย นอกจากนี้สารพิษ (Toxic agent) บางชนิดยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ซึ่งจะทำให้จำนวนจุลินทรีย์ลดน้อยหรือตายได้ เช่น ไอออนของทองแดงจากการกลั่นน้ำมัน ผลต่อการหาค่าบีโอดี

#### 2.5.1 การเตรียมน้ำที่ใช้ในการเจือจาง

นำน้ำกลั่นมาเติมอากาศโดยควบคุมให้อุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียส จนเกิดสภาพออกซิเจนที่ละลายน้ำอิ่มตัว (ตัวอย่างเช่น น้ำ 19 ลิตร หรือ 5 แกลลอน ต้องพ่นอากาศอย่างน้อย 1 ชั่วโมง จะมีแก๊สออกซิเจนละลายน้ำประมาณ 9.2 มิลลิกรัมต่อลิตรสำหรับน้ำบริสุทธิ์) สำหรับน้ำที่มีออกซิเจนละลายเพียงพอแล้ว จำนวน 1 ลิตร ต้องเติมสารอาหารอื่นเพื่อช่วยในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ด้วย โดยเติมสารละลายบัฟเฟอร์ แมกนีเซียมซัลเฟต คัลเซียมคลอไรด์ และเฟอร์ริกคลอไรด์ อย่างละ 1 มล. กรณีที่ต้องเติมหัวเชื้อควรใช้ภายใน 24 ชั่วโมงหลังจากเตรียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 การเตรียมน้ำตัวอย่าง

นับตั้งแต่ช่วงระยะเวลาเก็บตัวอย่างน้ำจนถึงเริ่มการวิเคราะห์ ควรใช้เวลาให้น้อยที่สุดและขณะที่ยังไม่ได้วิเคราะห์ต้องป้องกันน้ำตัวอย่างไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศ และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และมีการเตรียมน้ำตัวอย่างดังนี้

- ก. ถ้าค่าพีเอชของน้ำไม่เป็นกลางควรใช้กรดซัลฟิวริกเจือจาง 0.5 M หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ 5% (1M) ในการปรับค่าพีเอชให้อยู่ในช่วง 6.5 - 7.5 ใช้เครื่องวัดพีเอชตรวจสอบหรือใช้บรอมไซมอลบลูเป็นอินดิเคเตอร์ (ค่าพีเอช 6.0 - 7.6 เปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน) และกรณีที่ได้เติมหัวเชื้อหรือเจือจางก็ต้องไม่ทำให้ค่าพีเอชเปลี่ยนไป
- ข. กรณีที่คลอรีนตกค้าง โดยทั่วไปการตั้งทิ้งไว้ 1 - 2 ชั่วโมง คลอรีนตกค้างจะสลายไปเองแต่ถ้ามีปริมาณมากๆ ต้องกำจัดโดยการเติมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  โดยหาปริมาณที่เหมาะสมก่อน โดยนำน้ำตัวอย่างเติมกรดแอสซีตริก (1+1) หรือกรดซัลฟิวริก (1+49) จำนวน 10 ลบ.ซม. และสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ 10% จำนวน 10 ลบ.ซม. ค่อน้ำตัวอย่าง 1 ลิตร จากนั้นนำน้ำมาทำการไทเทรตกับสารละลายโซเดียมซัลไฟด์โดยมีแป้งเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดยุติจะสังเกตจากการเกิดสีน้ำเงินของแป้งกับไอโอไดด์ ซึ่งจะทราบปริมาณสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่ต้องเติมเพื่อกำจัดคลอรีนตกค้าง
- ค. กรณีที่น้ำตัวอย่างมีสารพิษ การทดสอบความเป็นพิษทำได้โดยเติมหัวเชื้อในปริมาณเท่าเดิมแต่ทำการเจือจางน้ำตัวอย่างอีก 1 ชุด (duplicate set) โดยให้ความเข้มข้นของน้ำตัวอย่างภายหลังเจือจางเป็น 0.06, 0.12, 0.25, 0.50, 1.0, 2.5, 5, 10, 20 และ 40% ทำการหาออกซิเจนที่ละลายน้ำในขวดบีโอดี 1 ขวด ในชุด 1 ทันที ( $\text{DO}_0$ ) และหาออกซิเจนที่ละลายน้ำในขวดบีโอดีหลังจากบ่ม นำค่าการใช้ ออกซิเจนที่ละลายน้ำไปพลอตกราฟเทียบกับความเข้มข้นของน้ำ
- ง. น้ำมีออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยออกซิเจน (Super saturation with oxygen) ในช่วงฤดูหนาว น้ำตัวอย่างอาจมีปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำที่ 20 องศาเซลเซียส มากกว่า 9.2 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือในขณะที่มีการเจริญเติบโตของสาหร่ายเพื่อป้องกันการสูญเสียออกซิเจนระหว่างการบ่มหรือลดปริมาณออกซิเจนที่อิ่มตัวด้วยออกซิเจนทำได้โดยการถ่ายน้ำตัวอย่างด้วยวิธีกลักน้ำ และตั้งไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส ก่อนบรรจุลงขวดบีโอดี และเขย่าขวดแรงๆ

## 2.5.3 การหาค่าบีโอดีด้วยวิธีธรรมดา

### 1. น้ำตัวอย่างค่อนข้างสะอาด

กรณีที่น้ำมีสารอินทรีย์เจือปนน้อย เมื่อผ่านการเตรียมน้ำตัวอย่าง ไม่จำเป็นต้องทำการเจือจางน้ำตัวอย่าง นำมาปรับอุณหภูมิให้อยู่ที่ 20 องศาเซลเซียส และทำการเติมออกซิเจนให้อิ่มตัว (พ่นอากาศ 5 - 10 นาที) จากนั้นรินน้ำตัวอย่างใส่ขวดบีโอดีจนเต็ม 3 ขวด ระวังอย่าให้มีฟองอากาศปิดจุกให้สนิทโดยมีน้ำหล่อที่ปากขวดตลอดช่วงเวลาที่ทำการบ่ม (เพื่อมิให้ออกซิเจนจากบรรยากาศละลายน้ำลงขวดบีโอดีได้) ขวดแรกนำไปหาค่า  $\text{DO}_0$  ทันที ส่วนที่เหลือนำไปบ่มที่  $20 \pm 1$  องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วันจึงนำมาหาค่า  $\text{DO}_5$  กรณีที่  $\text{DO}_5$  เหลือน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะไม่สามารถนำมาคำนวณหาค่าบีโอดีได้ซึ่งหมายถึงจุลินทรีย์ได้นำออกซิเจนมาใช้ในการย่อยสลายมาก ควรมีการเจือจางน้ำตัวอย่างน้ำให้เหมาะสมก่อนหาค่าบีโอดี ซึ่งการหาค่าบีโอดีก่อนจะเป็นแนวทางในการเลือกสัดส่วนเจือจางให้เหมาะสมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. น้ำที่มีการปนเปื้อนมาก

กรณีที่มีน้ำมีความสกปรกมากต้องมีการเจือจางคลัสเตอร์ที่มีสารพิษในน้ำ และควรทำอย่างน้อย 3 ความเข้มข้น โดยเลือกจากรายที่ 2.2. เลือกความเข้มข้นที่ต้องการและความเข้มข้นที่น้อยกว่าและมากกว่าอีกอย่างละ 1 ความเข้มข้น ในขั้นตอนการเจือจางต้องค่อยๆ ถู้น้ำที่ใช้สำหรับการเจือจางด้วยวิธีกาลักน้ำ (Siphon) ลงไป ประมาณ 500 ลบ.ซม. กระบอกตวงขนาด 1 ลิตร จากนั้นค่อยๆ เติมน้ำตัวอย่าง (ปริมาตรขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่เลือกใช้ตามตารางที่ 1) โดยให้ไหลลงช้าๆ ตามผนังกระบอกตวง จากนั้นจึงเติมน้ำที่ใช้สำหรับการเจือจางให้ถึงขีดปริมาตร 1 ลิตร ผสมให้เข้ากันโดยการกวนขึ้นลงช้าๆ ด้วยแท่งแก้วสำหรับผสมน้ำตัวอย่าง (plunger type mixed rod) จนเป็นสารละลายเนื้อเดียวกันและหลีกเลี่ยงการเกิดฟองขณะกวนผสม (กรณีที่ต้องเติมหัวเข็มก้นเข็มลงไป 2 ลบ.ซม. ก่อนปรับปริมาตรและก่อนกวนผสม) จากนั้นบรรจุลงขวดบีโอดีและทำการหา  $DO_0$  และ  $DO_5$  เหมือนกรณีที่ไม่ได้เจือจาง

กรณีที่มีการเจือจางไม่มาก (น้อยกว่า 1:100) ควรใช้ปิเปตปากกว้างดูดน้ำตัวอย่างตามสัดส่วนลงในขวดบีโอดี เติมหวเชื้อ (ถ้าจำเป็นต้องเติม) และเติมน้ำที่ใช้สำหรับเจือจางได้โดยตรง โดยให้ไหลลงตามคอขวดเช่นกัน แต่กรณีที่ต้องเจือจางมากควรทำในกระบอกตวงก่อน

ตารางที่ 2.2 การเลือกเจือจางน้ำตัวอย่างให้เหมาะสมในการหาค่าบีโอดี

เมื่อใช้ % ของผสม		เมื่อใช้การเจือจางโดยตรง	
% ของผสม	ช่วงค่าบีโอดี	ปริมาตรน้ำตัวอย่าง	ช่วงค่าบีโอดี
0.01	20000 – 70000	0.01	30000 – 105000
0.02	10000 – 35000	0.02	12000 – 42000
0.05	4000 – 14000	0.10	6000 – 21000
0.1	2000 – 7000	0.2	3000 – 10500
0.2	1000 – 3500	0.5	1200 – 4200
0.5	400 – 1400	1.0	600 – 2100
1.0	200 – 700	2.0	300 – 1050
2.0	100 – 350	5.0	120 – 420
5.0	40 – 140	10.0	60 – 210
10.0	20 – 70	20.0	30 – 105
20.0	10 – 35	50.0	12 – 42
50.0	4 – 14	100	6 – 21
100	0 – 7	300	0 – 7

### 2.5.4 การตรวจสอบความแม่นยำในการหาค่าบีโอดี

ตรวจสอบความแม่นยำในการหาค่าบีโอดีมาตรฐาน (BOD Standard) ใช้สารละลายกลูโคสและกรดกลูตามิก (อบแห้งที่ 105 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง เมื่อเย็นซึ่งอย่างละ 150 มิลลิกรัมต่อลิตร) เติมหาอาหารที่จำเป็นในน้ำด้วย ใช้สารละลายผสมนี้แทนน้ำตัวอย่าง นำไปหาค่า  $DO_0$  และ  $DO_5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.5 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่  $20 \pm 1$  องศาเซลเซียส
2. เครื่องเค็มอากาศ
3. ตู้บ่ม (Incubator) ที่ควบคุมอุณหภูมิได้  $20 \pm 1$  องศาเซลเซียส และไม่มีแสงเข้าภายใน
4. ขวดบีโอดี ขนาดมาตรฐาน 300 มล. พร้อมจุก
5. กระบอกตวงขนาด 1000 มล.
6. แท่งแก้วสำหรับเจือจางน้ำตัวอย่าง (plunger type mixed rod)
7. เครื่องวัดดีไอแบบเมมเบรน อิเล็กโทรด
8. เครื่องแก้วอื่นๆ

### 2.5.6 สารเคมี

1. น้ำกลั่น 2 ครั้ง (ต้องมีทองแดงน้อยกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร)  
กรณีที่ต้องเจือจางน้ำตัวอย่าง โดยนำน้ำกลั่นมาแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส และ  
พ่นอากาศก่อนทำการเจือจางอย่างน้อย 1 ชั่วโมง
2. สารละลายแคลเซียมคลอไรด์ แครียม โดยละลาย Anhydrous  $\text{CaCl}_2$  27.5 กรัม ในสารละลาย 1 ลิตร
3. สารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ แครียม โดยละลาย  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0.25 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรสารละลาย  
เป็น 1 ลิตร
4. สารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต แครียม โดยละลาย  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  22.5 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรสารละลาย  
เป็น 1 ลิตร
5. สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต พีเอช 7.2 ละลาย  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  8.5 กรัม  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  21.75 กรัม  $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  33.40  
กรัม และ  $\text{NH}_4\text{Cl}$  1.70 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
6. หัวเชื้อที่ต้องเค็มสามารถหาได้จากส่วนผิวบนของน้ำโสโครกจากบ้านเรือน โดยนำมาเก็บที่อุณหภูมิ 20  
องศาเซลเซียส อย่างน้อย 24 – 36 ชั่วโมง หรือใช้น้ำที่อยู่จุดท้ายน้ำโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหัวเชื้อ กรณีที่นำน้ำเสียจาก  
โรงงานนั้นๆ มาวิเคราะห์โดยมีการเลี้ยงเชื้อในห้องทดลองก่อน
7. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 50 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร
8. สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ละลาย  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$  1.575 กรัม ในน้ำและปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร ต้องเตรียมใหม่  
เมื่อจะใช้
9. ละลายกลูโคสและกรดกลูตามิก นำกลูโคสและกรดกลูตามิกไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส  
1 ชั่วโมง นำไปใส่เคสซิเคเตอร์เมื่อเย็นซั่งอย่างละ 150 มิลลิกรัม นำไปละลาย และใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 1 ลิตร  
ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

### 2.5.7 การทดลอง

น้ำที่ใช้ในการเจือจาง ชุดควบคุม (Blank set)

1. บรรจุน้ำที่ใช้ในการเจือจางลงขวดบีโอดี 2 ขวด ให้เต็มขวดด้วยวิธีการกักน้ำ และให้ไหลรินลงตามคอขวด
2. ขวดที่ 1 ทำการวัดค่าดีไอทันที เป็นค่า  $\text{DO}_0$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.ขวดที่ 2 นำไปบ่มที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน แล้ววัดค่าเป็น  $DO_5$  ขณะที่บ่มต้องมีน้ำหล่อบนฝาขวดแก้วและปิดจุกพลาสติกครอบที่จุกแก้วอีกครั้ง เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำที่หล่อเหนือจุกแก้ว

4.ค่า  $DO_0 - DO_5$  ต้องน้อยกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ้ามากกว่าแสดงว่ามีผลต่อความถูกต้องในการวัดสารละลายมาตรฐานกลูโคสและกรดกลูตามิก

1. ใช้การเจือจางโดยตรง บีบปรดสารละลายกลูตามิกมา 5 มล. ลงในขวดบีโอดี เติมน้ำที่ใช้สำหรับการเจือจางลงไปจำนวน 3 ขวด ระวังไม่ให้เกิดฟองอากาศภายใน เช่นเดียวกับ การบรรจุน้ำที่ใช้เจือจาง

2. ครว่ สลับหยางขวดให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกันทั่วทั้งขวด เติมน้ำที่ใช้สำหรับการเจือจางหล่อไว้ที่จุกแก้วด้วย

3. วัดค่าดีไอขวดที่ 1 หน้าที่เป็นค่า  $DO_0$

4. ขวดที่ 2 และ 3 นำไปบ่มที่ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน แล้ววัดค่าเป็น  $DO_5$

5. คำนวณหาค่า บีโอดี

#### น้ำตัวอย่าง

1. เก็บน้ำตัวอย่างที่ต้องการวิเคราะห์มายังห้องปฏิบัติการ บันทึกข้อมูลแหล่งที่เก็บตัวอย่างน้ำโดยละเอียด

2. ตรวจสอบคุณภาพน้ำทางกายภาพ เช่นสี ความขุ่น กลิ่น ค่าพีเอช ข้อมูลของแหล่งน้ำ เพื่อตัดสินใจเลือกความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเจือจางหรือไม่

3. เตรียมน้ำตัวอย่างตามทฤษฎี เช่นการปรับพีเอช การจัดคลอริเนตค่าง การเจือจาง ฯลฯ จากนั้นจึงถ่ายน้ำลงขวดบีโอดีตามวิธี ชุดละ 3 ขวด โดยขวดที่ 1 ใช้หาค่า  $DO_0$  หน้าที่ อีก 2 ขวดนำไปบ่มที่ 20 องศาเซลเซียส ไว้สำหรับหาค่า  $DO_5$  กรณีที่ไม่ต้องเจือจาง

กรณีที่ต้องเจือจางต้องทำ 3 ชุดของความเข้มข้น ดูจากตารางที่ 2.2.

- ให้เติมน้ำที่ใช้สำหรับการเจือจางลงในกระบอกควงขนาด 1 ลิตรด้วยวิธีกักน้ำ ลงประมาณ 500 มล. บีบปรดน้ำตัวอย่างปริมาตรตามตารางที่ 2.2. ระบุไว้ โดยจุ่มปลายบีบปรดลงได้ผิวน้ำ

- ทำการเติมน้ำสำหรับการเจือจางให้ไหลรินตามข้างกระบอกควงจนถึง 1 ลิตร

- ใช้แท่งแก้วคนขึ้นลงเบาๆ ให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน แล้วเทลงขวดบีโอดีให้ไหลลงตามคอขวดจนเต็ม และไม่มีฟองอากาศเลย เมื่อปิดจุกต้องมีน้ำหล่อค้ำอยู่

กรณีที่ต้องเติมหัวเชื้อ ในน้ำตัวอย่างและต้องเจือจาง

- ทำเช่นเดียวกับข้อ 4 แต่ให้เติมหัวเชื้อ 2 มล. ลงนี้ ก่อนปรับปริมาตรให้เป็น 1 ลิตร ผสมให้เข้ากัน และบรรจุขวดบีโอดีด้วยวิธีเดียวกัน

- ทำชุดควบคุมที่มีหัวเชื้อเพิ่มอีก 1 ชุด โดยใส่หัวเชื้อ 2 มล. ดับน้ำที่ใช้เจือจางจนได้ 1 ลิตร แต่ไม่ต้องมีน้ำตัวอย่างเช่นกัน

4. วัดค่าดีไอขวดที่ 1 ของแต่ละชุดทันทีเป็นค่า  $DO_0$

5. ขวดที่ 2 และ 3 ของแต่ละชุด นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน แล้ววัดค่าดีไอเป็น  $DO_5$

6. คำนวณหาค่า บีโอดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.8. การคำนวณ

### 2.5.8.1 เมื่อไม่เจือจาง

$$BOD_5 = DO_0 - DO_5$$

- เมื่อ  $BOD_5$  = ค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (mg/L)  
 $DO_0$  = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำได้ คำนวณจากการวัดหรือการไทเทรตเมื่อเตรียมน้ำตัวอย่างเสร็จทันที (โดยไม่เจือจาง)  
 $DO_5$  = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำได้ คำนวณจากการวัดหรือการไทเทรตเมื่อบ่มครบ 5 วัน

### 2.5.8.2 เมื่อเจือจางน้ำตัวอย่าง

#### 1. ไม่เติมหัวเชื้อ

$$BOD = \frac{D_1 - D_2}{P}$$

#### 2. เติมหัวเชื้อ

$$BOD = \frac{(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2)f}{P}$$

- เมื่อ  $D_1$  = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ เมื่อหาหลังจากเจือจางน้ำแล้ว  
 $D_2$  = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ เมื่อหาหลังจากเจือจางน้ำแล้วและบ่มเป็นเวลา 5 วัน  
 $B_1$  = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ เมื่อเติมหัวเชื้ออย่างเดียว โดยหาทันที  
 $B_2$  = ค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำ เมื่อเติมหัวเชื้ออย่างเดียว โดยหาหลังจากบ่ม 5 วัน  
 $F$  = อัตราส่วนของหัวเชื้อ ในน้ำตัวอย่างต่อกลุ่มควบคุม  
= (%หัวเชื้อใน  $D_1$ ) / (%หัวเชื้อใน  $B_1$ )  
 $P$  = สัดส่วนที่ทำการเจือจางน้ำ

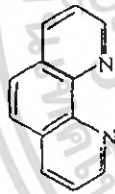
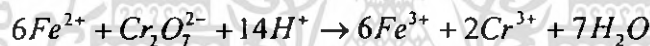
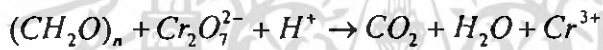
## 2.6 การทดลองหาค่า ซี โอ ดี

ค่าซีโอดี เป็นค่าที่ใช้บอกถึงความสกปรกของน้ำเสีย โดยเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่ใช้ในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสียให้ได้เป็นคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ด้วยสารออกซิไดซ์เชิงเอนเจินตัวอย่างแรงกับกรดเข้มข้นและใช้สารตัวเร่งร่วมด้วยโดยการต้มเดือด (reflux) นาน 1-2 ชั่วโมงเพื่อให้เกิดการออกซิเดชันอย่างสมบูรณ์และป้องกันไม่ให้อาร์ที่ระเหยจะระเหยออกไปหมด ดังสมการ ดังนั้นค่าซีโอดีเป็นพารามิเตอร์ที่ใช้แสดงค่าความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสียแต่ไม่สามารถบ่งชี้ได้ว่าสารอินทรีย์นั้นย่อยสลายทางชีวภาพได้หรือไม่ ในขณะที่ค่าบีโอดีเป็นการวัดปริมาณออกซิเจนทั้งหมดที่จุลินทรีย์ใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้ได้เป็น

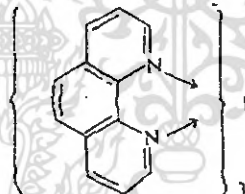
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คาร์บอนไดออกไซด์กับน้ำ จึงใช้ประโยชน์ในการควบคุมระบบบำบัดทางชีววิทยามากกว่าค่าซีไอดี แต่ค่าซีไอดีจะใช้เวลาในการหาเพียง 3 ชั่วโมง มีตัวผันแปรน้อยกว่า และค่าที่ได้จะมีความแน่นอนมากกว่า อัตราส่วนของค่าซีไอดีและบีไอดีสำหรับน้ำเสียชนิดต่างๆมีค่าไม่เท่ากันขึ้นกับชนิดของสารเจือปนในน้ำ โดยปกติบีไอดีจะน้อยกว่าประมาณ 60 – 80 % ของซีไอดี

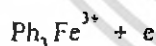
สารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิไดส์ คือ โพแทสเซียมไดโครเมต ( $K_2Cr_2O_7$ ) ซึ่งถือว่าเป็นออกซิไดส์ที่ดีกว่าตัวอื่นๆ เช่น เฟอร์ริกซัลเฟต โพแทสเซียมไอโอเดต (ferric sulfate, potassium iodate) เนื่องจากทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย และมีอำนาจในการออกซิไดส์สูง สารอินทรีย์ส่วนใหญ่จะถูกทำลายได้ถ้าต้มกับโพแทสเซียมไดโครเมตที่ทราบปริมาณแน่นอนกับกรดซัลฟิวริก ปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตบางส่วนจะถูกใช้ไปในการออกซิไดส์สารอินทรีย์ ปริมาณส่วนที่เหลือหลังจากการออกซิไดส์ทำได้โดยการไทเทรตย้อนกลับ (back titration) กับเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต โดยใช้เฟอโรอิน (ferroin) เป็นอินดิเคเตอร์ (ปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่ใช้ในการออกซิไดส์จะมากน้อยเท่าใดขึ้นกับปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำตัวอย่าง) จุดยุติคือจุดที่เฟอร์รัส ( $Fe^{2+}$ ) ทำปฏิกิริยากับเฟอโรอิน ได้สารประกอบสีน้ำตาลแดง เฟอโรอินคือสารประกอบเชิงซ้อนของเฟอร์รัสกับ 1,10 ฟิแนนโทโรลีนที่มีคู่ของอิเล็กตรอนอิสระอยู่ซึ่งสามารถเกิดพันธะกับเฟอร์รัสไอออนได้โดยใช้ 1,10 ฟิแนนโทโรลีน 3 ตัวและให้สีแดงเข้ม เฟอร์รัสไอออนสามารถถูกออกซิไดส์เป็นเฟอร์ริกในขณะที่อยู่ในสารประกอบเชิงซ้อนกับ 1,10 ฟิแนนโทโรลีน ดังสมการ



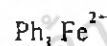
1, 10 phenanthroline



Ferrous 1, 10 phenanthroline



light blue



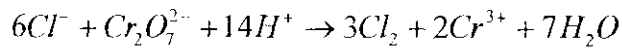
dark blue

#### สารรบกวน

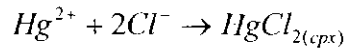
สารอินทรีย์บางชนิด เช่น กรดไขมันที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำๆ อโรมาติกไฮโดรคาร์บอน สารเหล่านี้จะไม่ถูกออกซิไดส์ด้วยวิธีนี้ สารประกอบพวกอลิฟาติกไฮโดรคาร์บอนและกรดอินทรีย์อื่นๆ จะถูกออกซิไดส์ได้ดี ถ้าใส่ซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) เป็นตัวเร่ง

สารรบกวนที่สำคัญในการวิเคราะห์ซีไอดีก็คือ คลอไรด์ ซึ่งจะทำให้ค่าซีไอดีสูงขึ้นจึงจำเป็นที่จะต้องใส่สารเคมีเพื่อให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนขึ้นเช่น ไฮเมอคิวริกซัลเฟต ( $HgSO_4$ ) ลงไปก่อนที่จะนำไปตีพิมพ์เพื่อที่จะไปจับคลอไรด์ให้อยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน (mercuric chloride complex) ดังสมการ

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



ทำให้ค่าซีโอดีสูงเกินความจริง



ไนไตรต์สามารถทำให้ค่าซีโอดีสูงขึ้น แต่ในน้ำทิ้งหรือน้ำสกปรกโดยทั่วไปมักจะมีไนไตรต์ไม่เกิน 1 – 2 มก./ล. จึงถือว่าไม่ค่อยมีผลกระทบต่อการวิเคราะห์ ในกรณีที่ปริมาณไนไตรต์มากกว่านี้แก้ไขโดยใช้กรดซัลฟามิก 10 มก.ต่อทุกๆ 1 มก.ของไนไตรต์ สารอินทรีย์รูปร่างอื่น ๆ จะมีผลต่อการวิเคราะห์เช่น เฟอร์รัสไอออน ซัลไฟด์ แอมโมเนียส ดังนั้นวิธีนี้สามารถวิเคราะห์หาซีโอดีในน้ำตัวอย่างที่มีค่าตั้งแต่ 50 มก.ขึ้นไป

### 2.6.1 การเก็บรักษาตัวอย่างน้ำ

1. วิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทันที
2. ตัวอย่างน้ำที่มีของแข็งจมตัวปะปนมากๆ ต้องเขย่าหรือกวนให้เข้ากัน
3. ถ้าไม่สามารถวิเคราะห์ได้ทันที ให้เก็บรักษาโดยใช้กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 0.8 มก./ลิตรน้ำเสีย หรือปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 2
4. ในกรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นมากให้ทำการเจือจางเสียก่อนจึงทำการวิเคราะห์

### 2.6.2 การวิเคราะห์หาซีโอดีด้วยวิธีฟลักซ์แบบปิด (Closed Reflux, Titrimetric Method)

#### 1. เครื่องมือและอุปกรณ์

1. หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ใช้แก้วที่ทำด้วยบอโรซิลิเกต (borosilicate culture tubes) ขนาด 16 x 100 มม. ที่มีฝาเกลียวชนิดทีเอฟอี (Tetrafluoroethylene; TFE)
2. ซีทติ้งบล็อก (Heating block) ก่อองอลูมิเนียมตัน ลึก 40 – 50 มม. มีรูขนาดพอดีกับหลอดแก้ว
3. ตู้ควบคุมอุณหภูมิที่  $150 \pm 2$  องศาเซลเซียส การใช้ตู้ต้องแน่ใจว่าในรอบ 2 ชั่วโมงที่ 150 องศาเซลเซียส จะไม่ทำให้ฝาหลอดแก้วถูกทำให้เสียหาย

#### 2. สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน โพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลาย (Standard potassium digestion solution) 0.1 นอร์มัล

- นำ  $K_2Cr_2O_7$  อบแห้งใน 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วชั่งน้ำหนัก  $K_2Cr_2O_7$  มา 4.913 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 500 มล. เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 167 มล. และเติมปรอทซัลเฟต 33.3 กรัม ที่ให้ละลายและปล่อยให้เย็นจึงเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1,000 มล.

#### 2. สารละลายกรดซัลฟิวริก

- ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต ( $Ag_2SO_4$ ) 22 กรัมลงในกรดซัลฟิวริกเข้มข้นซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม (2.5 ลิตร) ที่ไว้ 1 – 2 วัน ซิลเวอร์ซัลเฟตจึงจะละลาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

83053

3. สารละลายเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ (Ferroin Indicator)

- ละลาย (I. 10-phenanthroline monohydrate  $C_{12}H_{14}N_2 \cdot H_2O$  1.485 กรัม และ ไอร์ออน (II) ซัลเฟตเฮปตาไฮเดรต ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) 0.695 กรัม ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางให้เป็น 100 มล.

4. สารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) 0.05 นอร์มัล

- ละลายไอร์ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต  $Fe (NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$  ชนิดเอ.อาร์ (Analytical grade crystal) ประมาณ 19.6 กรัม ในน้ำกลั่น เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 20 มล. ทำให้เย็นและเจือจาง 1,000 มล.

- คือนำไปหาความเข้มข้นที่แน่นอน กับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตทุกครั้งก่อนใช้ โดยเติมสารเคมีทุกชนิดตามตารางที่ 2.3 ลงในหลอดแก้วขนาดที่ต้องการโดยใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างน้ำ ทั้งให้เย็นแล้วเติมเฟอร์โรอิน อินดิเคเตอร์ 1 – 2 แล้วไทเทรตด้วยสารละลาย FAS ที่จุดยุติตัวอย่างน้ำจะเปลี่ยนจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง

5. สารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟทาเลต (Potassium hydrogen phthalate; KHP)

- ชั่ง KHP จำนวน 425 มก. ที่บดแห้งและอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส ในน้ำกลั่นเจือจางเป็น 1 ลิตร สารละลายนี้มีซีไอดีเท่ากับ 500 มก. /ล. (ปกติเก็บไว้ในตู้เย็นได้นาน 3 เดือน)

ตารางที่ 2.3 ปริมาตรตัวอย่างน้ำและสารเคมีสำหรับหลอดแก้วขนาดต่างๆ

หลอดย่อยสลาย	ปริมาตรน้ำ (มล.)	ปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมต สำหรับย่อยสลาย (มล.)	สารละลายกรดซัลฟิวริก (มล.)	ปริมาตรรวม (มล.)
หลอดแก้วขนาด 16 x 100 มม. หรือหลอดมาตรฐาน 10 มล.	2.5	1.5	3.5	7.5
หลอดแก้วขนาด 20 x 150 มม.	5.0	3.0	7.0	15.0
หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มม.	10.0	6.0	14.0	30.0

2. การทดลอง

1. ล้างหลอดแก้วและฝาด้วยกรดซัลฟิวริก 20 % ก่อนใช้ทุกครั้ง เพื่อป้องกันการปนเปื้อน

2. หลอดแก้วที่ใช้หาค่าซีไอดีมีหลายขนาด การเลือกใช้ขึ้นกับค่าซีไอดีที่มีในตัวอย่างน้ำ ในกรณีที่ค่าซีไอดีต่ำ (< 50 มก. /ล.) ให้ใช้หลอดแก้วขนาด 25 x 150 มม. ถ้าค่าซีไอดีสูงใช้ตัวอย่างน้ำปริมาณน้อยจึงใช้หลอดแก้วขนาดเล็ก (16 x 100 มม.) โดยปกติจะใช้หลอดมาตรฐานที่มีความจุสูงสุด 10 มล. (หรือขนาด 16 x 100 มม.) เพราะใช้สารเคมีน้อยที่สุด ดังนั้นตัวอย่างน้ำที่มีค่าซีไอดีต่ำมาก ค่ามันจะผิดพลาดเนื่องจากปริมาตรน้ำน้อยเกินไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.เมื่อเลือกขนาดหลอดแก้วได้แล้วให้ใช้ปริมาตรตัวอย่างน้ำ และสารเคมีตามตารางที่ 2.3 โดยเติมตัวอย่างน้ำลงในหลอดแก้วแล้วเติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตสำหรับย่อยสลายแล้วค่อยๆเติมสารละลายกรดซัลฟิวริกให้เกิดชั้นกรดอยู่ที่ก้นแก้ว ปิดฝาให้แน่นพอดี แล้วกลับไปมาเพื่อให้สารละลายผสมกันดี

ข้อควรระวัง ควรสวมถุงมือเพื่อป้องกันความร้อนขณะกลับหลอดแก้วไปมา และควรผสมสารละลายให้เข้ากันก่อนให้ความร้อนเพื่อป้องกันการระเบิด

4.นำหลอดแก้วใส่ลงในฮีทติ้งบล็อกหรือตู้อบที่ 150 องศาเซลเซียส แล้วต้มเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ให้อุ่นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำหลอดแก้ววางลงในขาตั้ง

5.เปิดฝาหลอดแก้วใส่แท่งแม่เหล็กกวนขนาดเล็กๆ ที่หุ้ม TFE แล้วเติมเฟอโรอินอินดิเคเตอร์ 1 – 2 หยด คนอย่างรวดเร็วบนเครื่องกวนแม่เหล็กแล้วไทเทรตกับ FAS 0.05 นอร์มัลจนกระทั่งสีเปลี่ยนเป็นน้ำตาลแดง หรือเทสารละลายจากหลอดแก้วลงขวดรูปกรวยก็ได้เพื่อความสะดวกในการไทเทรต แต่ต้องใช้น้ำกลั่นฉีดล้างสารละลายในหลอดแก้วให้หมด

6.ทำแบลนด์ด้วยทุกครั้ง โดยใช้สารเคมีและน้ำกลั่นปริมาตรเท่ากับน้ำตัวอย่าง

### 3.การคำนวณ

$$COD(mg.O_2/l) = \frac{(A - B) \times N \times 8000}{V}$$

เมื่อ A = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ไทเทรตลงแบลนด์ (มล.)

B = ปริมาณของ FAS ที่ใช้ไทเทรตตัวอย่างน้ำ (มล.)

N = ความเข้มข้นของ FAS (นอร์มัล)

V = ปริมาตรตัวอย่างน้ำ

## 2.7. ทฤษฎีตัวกรอง

เครื่องกรองน้ำที่นิยมใช้ในบ้านในปัจจุบันมี 2 แบบ คือ แบบธรรมดา (กรองด้วยวิธีให้น้ำผ่านตัวกรองปกติ) และแบบ Reverse Osmosis หรือ R/O (กรองโดยมีตัวกรองชนิดพิเศษที่ถี่มาก รูกรองมีขนาดใหญ่มากกว่า โมเลกุลน้ำเพียงเล็กน้อย)

2.7.1 ตัวกรองธรรมชาติ ทำจากวัสดุทางธรรมชาติ ประกอบด้วย สาลี ถ่าน ทราช กรวดละเอียด กรวดหยาบ และ หิน

2.7.2 เครื่องกรองแบบธรรมดา มักจะมีอยู่ 2 หลอด คือ ตัวกรองคาร์บอน (กรองกลิ่น) และตัวกรองเรซิน (กรองวัตถุหนักบางชนิด เช่น แอมโมเนียฯ) เครื่องกรองชนิดนี้มักจะใช้กับการกรองน้ำที่ไม่ต้องการความสะอาดมากนัก น้ำที่ได้มักจะนำไปผ่านขบวนการอีกครั้งก่อนนำมาบริโภค เช่น นำไปต้มหรือผสมคอนแทกซ์กับข้าว แต่สำหรับชุมชนที่มีระบบน้ำประปาที่ทันสมัยและเชื่อถือได้ น้ำที่ได้จากเครื่องกรองชนิดนี้ก็สามารถบริโภคได้ เพียงแต่เครื่องนี้ยังกรองคลอรีนที่ผสมในน้ำประปาไม่ได้เพียงพอ (ปกติน้ำประปาก็สามารถบริโภคได้แล้ว ตามโฆษณาของ การประปา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.3 เครื่องกรองชนิด Reverse Osmosis เครื่องกรองน้ำชนิดนี้ปกติมีใช้ในแถบประเทศที่หาแหล่งน้ำจืดได้ยากและอยู่ติดทะเล จะใช้กรองน้ำทะเลเพื่อมาใช้บริโภค เนื่องจากระบบน้ำประปาที่ทันสมัยที่สุดยังไม่สามารถกรองแยกเอาเกลือออกจากน้ำทะเลให้เหลือที่จืดได้ แต่ในปัจจุบัน R/O ก็นิยมแพร่หลายมาใช้ตามบ้านเรือนทั่วไป วัสดุกรองของเครื่อง R/O นี้มีขนาดเล็กมากกว่าขนาดใกล้เคียง โมเลกุลของน้ำ ดังนั้นมันจึงยอมให้เพียง โมเลกุลของน้ำ ผ่านได้ ส่วน โมเลกุลของสารอื่นๆที่ละลายผสมอยู่ในน้ำก็จะถูกกรองเอาไว้ และด้วยเหตุที่ว่าวัสดุที่เป็นตัวกรองมีขนาดเล็กมาก ดังนั้นน้ำที่จะมาผ่านของเครื่องนี้จะผ่านไปได้ยากมาก บริษัทที่ผลิตเครื่องก็มักจะติดตั้งปั๊มตัวเล็กๆ สำหรับเพื่อเพิ่มแรงดันบังคับให้น้ำให้ผ่านตัวกรองไปได้เร็วขึ้น ในบางบทความ ได้กล่าวไว้เกี่ยวกับเครื่อง R/O ว่า เนื่องจากว่าประสิทธิภาพการกรองของเครื่องสูงมาก เครื่องจะกรองเอาแร่ธาตุที่ดีและจำเป็นสำหรับร่างกายออกไปด้วย ทำให้ในระยะยาวผู้ที่บริโภคน้ำที่ผ่านจากเครื่อง R/O นี้เป็นประจำร่างกายก็จะขาดแร่ธาตุที่จำเป็นไปด้วย ส่วนตัว Ultra Violet มักจะเป็นอุปกรณ์เสริมที่สามารถติดตั้งได้ (เป็นกระบอก ให้น้ำผ่านและฉายรังสี) บางเครื่องก็อาจจะเป็นอุปกรณ์มาตรฐานติดตั้งอยู่แล้ว วัตถุประสงค์ของ UV นี้มักจะเอาไว้ฉายสำหรับฆ่าเชื้อโรคหรือจุลินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำ โดยส่วนตัวแล้วหากน้ำดื่มดื่มน้ำที่เอามาผ่านเครื่องกรองนี้เป็นน้ำที่เชื่อถือได้อยู่แล้ว เช่น น้ำประปาในเขตนครหลวง UV ก็ไม่จำเป็น แต่หากน้ำที่เอามาผ่านเครื่องนี้ไม่ได้ผ่านขั้นตอนอะไรมาก่อนเลยเช่น น้ำจากแม่น้ำลำคลอง ก็อาจจำเป็นต้องติดตั้ง UV เพิ่ม

## 2.8 ทฤษฎีการแลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Transfer)

### 2.8.1 กฎการถ่ายเทความร้อน (Principles of Heat Transfer)

การวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนที่ดีจะต้องทราบถึงกลไกของการถ่ายเทความร้อนแบบต่างๆซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบคือ

1. การถ่ายเทความร้อน โดยการนำ หรือการนำความร้อน (conduction)
2. การถ่ายเทความร้อน โดยการพา หรือการพาความร้อน (convection)
3. การถ่ายเทความร้อน โดยการแผ่รังสี หรือการแผ่รังสีความร้อน (radiation)

ในการออกแบบระบบความร้อนและการวิเคราะห์การแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นจะต้องเข้าใจกลไกของการถ่ายเทความร้อนแต่ละแบบ และต้องทราบถึงความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนแบบนี้ๆ

#### 2.8.1.1 การถ่ายเทความร้อน โดยการนำ (conduction Heat Transfer)

การถ่ายเทความร้อน โดยการนำหรือการนำความร้อน เป็นการถ่ายเทความร้อนเพียงวิธีเดียวที่เกิดขึ้นในวัตถุที่เป็นตัวกลางที่บดเสงเมื่อมีความลาดชันเกิดขึ้นของอุณหภูมิเกิดขึ้นในวัตถุก้อนนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำซึ่งใช้  $q_k$  เป็นสัญลักษณ์นี้จะเป็นสัดส่วนกับ  $dT/dx$  ซึ่งเป็นค่าความลาดชันของอุณหภูมิคูณกับพื้นที่  $A$  ที่ความร้อนไหลผ่าน (รูปที่ 2.1 ก) ถ้าหากเขียนเป็นสมการแล้วจะได้รูปสมการเป็น

$$q_k \propto A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $q_k$  = อัตราการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ หรือการนำความร้อน

$A$  = พื้นที่ที่ความร้อนไหลผ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

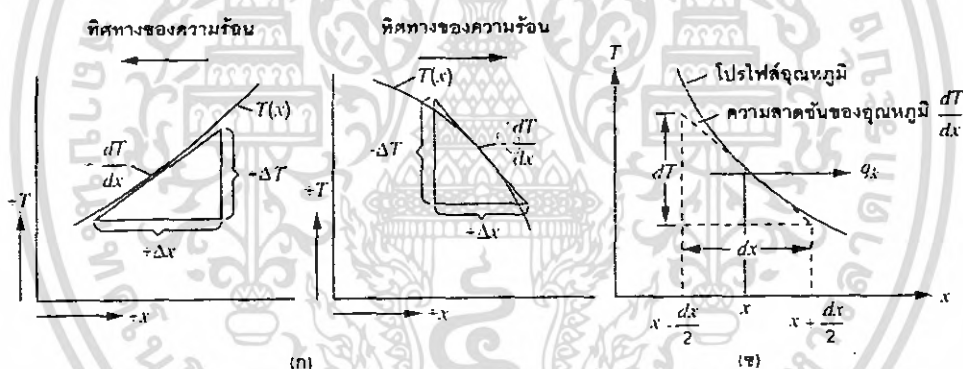
$T$  = อุณหภูมิ

$x$  = ระยะทางการเคลื่อนที่ของความร้อน

สำหรับอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงนั้นจะขึ้นอยู่กับค่าการนำความร้อน (thermal conductivity),  $k$  ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของตัวกลางที่ความร้อนเคลื่อนที่ผ่าน ดังนั้นอัตราการนำความร้อนจึงมีค่าเป็น

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.2)$$

สมการที่ 2.2 มีชื่อเรียกว่า “กฎการนำความร้อนของฟูเรียร์ (Fourier’s law of conduction)” เครื่องหมายลบทางด้านขวามือของสมการเป็นผลที่เนื่องมาจากกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ซึ่งกำหนดไว้ว่า ความร้อนจะต้องไหลจากจุดที่มีอุณหภูมิสูงไปยังจุดที่มีอุณหภูมิต่ำ แต่เนื่องจากความลาดชันของอุณหภูมิที่อยู่ในรูปที่ 2.1(ข) นั้นมีเครื่องหมายเป็นลบ ทั้งนี้เพราะอุณหภูมิจะลดน้อยลงเมื่อระยะทาง  $x$  เพิ่มมากขึ้น ดังนั้น ถ้าหากต้องการให้อัตราการถ่ายเทความร้อนมีค่าเป็นบวกเมื่อไหลไปในทิศทางที่เป็นบวกแล้ว ก็จะต้องเคมเครื่องหมายลบไว้ทางด้านขวาของสมการ 2.2



รูปที่ 2.1 (ก) แสดงเครื่องหมายของค่า  $dT/dx$  สำหรับการนำความร้อน

(ข) แสดงทิศทางการไหลของความร้อน

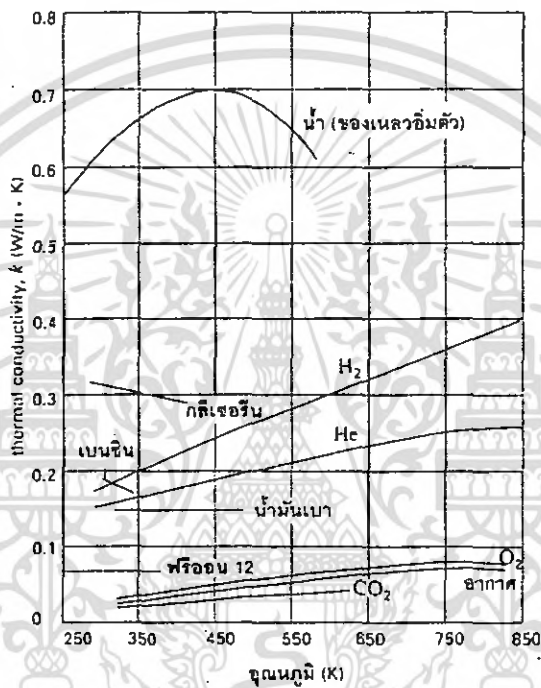
สมการ 2.2 เป็นสมการที่ใช้สำหรับนิยามความหมายของค่าการนำความร้อน  $k$  สำหรับตัวแปรต่างๆที่อยู่ในระบบเอสไอ นั่นพื้นที่  $A$  จะมีหน่วยเป็น  $m^2$ , อัตราการถ่ายเทความร้อน  $q_k$  มีหน่วยเป็น  $Watt$  ส่วนค่าการนำความร้อน  $k$  จะมีหน่วยเป็น  $W/m \cdot K$

#### การนำความร้อนเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้า (Electric Analogy of Conduction)

การนำเอาการไหลของความร้อน ไปเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าจะช่วยให้สามารถวิเคราะห์ปัญหาการถ่ายเทความร้อนที่ซับซ้อนได้สะดวกยิ่งขึ้น แนวคิดที่ใช้แก้ปัญหาการถ่ายเทความร้อนโดยใช้หลักการของวงจรไฟฟ้ามีชื่อเรียกว่า “ความคล้ายคลึง (analogy)” ระหว่างการไหลของความร้อนกับการไหลของกระแสไฟฟ้า” ถ้าหากนำอัตราการไหลของความร้อนไปเปรียบเทียบกับกระแสไฟฟ้าแล้ว กลุ่มของ  $1/kA$  จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กลไกการถ่ายเทความร้อน โดยการนำของแก๊สสามารถอธิบายได้จากทฤษฎีคิเนแมติกว่า เนื่องจากโมเลกุลของแก๊สมีการเคลื่อนที่อิสระ ไม่มีเส้นทางการเคลื่อนที่ที่แน่นอนตายตัว ดังนั้นเมื่อโมเลกุลเหล่านั้นเกิดการชนกันขึ้นก็จะมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและ โมเมนตัมซึ่งกันและกัน แต่เนื่องจาก โมเลกุลที่มีอุณหภูมิสูงนั้นมีพลังงานจลน์มากกว่า ดังนั้นเมื่อ โมเลกุลจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงเคลื่อนที่ไปยังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าก็จะพาเอาพลังงานจลน์ไปในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่านั้นด้วย และเมื่อ โมเลกุลที่มีพลังงานจลน์สูงเกิดการชนกับ โมเลกุลที่มีพลังงานจลน์ต่ำกว่า จะมีการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้น กลไกการนำความร้อนทางกายภาพภายในของเหลวก็มีลักษณะเช่นเดียวกัน แต่เนื่อง โมเลกุลของเหลวนั้นมีจำนวนหนาแน่นกว่า และสนามของแรงในของเหลวก็มีบทบาทต่อการถ่ายเทพลังงานมากกว่า ดังนั้นลักษณะการถ่ายเทความร้อนจึงมีการซับซ้อนมากกว่าของแก๊ส



รูปที่ 2.2 ค่าการนำความร้อน  $k$  ของของเหลวและแก๊สที่แปรตามอุณหภูมิ

รูปที่ 2.2 เป็นกราฟที่แสดงให้เห็นค่าการนำความร้อน  $k$  ของของเหลวและแก๊สบางชนิดที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ จะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อน  $k$  ของแก๊สต่าง ๆ นั้นเกือบจะไม่ขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของความดัน ยกเว้นในช่วงที่อยู่ใกล้จุดวิกฤตเท่านั้น โดยการวิเคราะห์จากการแลกเปลี่ยนพลังงานจลน์อย่างง่ายปรากฏว่าค่าการนำความร้อน  $k$  ของแก๊สเพิ่มขึ้นตามกำลังสองของอุณหภูมิสัมบูรณ์

นอกจากนี้ยังเห็นได้จากกราฟรูปที่ 2.2 อีกว่า ค่าการนำความร้อน  $k$  ของของเหลวเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และจะเห็นได้ว่าค่าการนำความร้อน  $k$  ของของเหลวต่าง ๆ ยกเว้นค่าการนำความร้อน  $k$  ของน้ำจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ แต่การเปลี่ยนแปลงของค่าการนำความร้อนนั้นมีค่าน้อยมากจนสามารถถือว่าไม่มีค่าคงที่ที่อุณหภูมิเฉลี่ยค่าหนึ่งของการใช้งานส่วนใหญ่ และก็ไม่ปรากฏว่าค่าการนำความร้อน  $k$  นั้นขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงของความดัน

ส่วนรูปที่ 2.3 นั้นเป็นค่าการนำความร้อน  $k$  ของโลหะและอโลหะที่เป็นของแข็งบางชนิด พลังงานความร้อนในวัตถุที่เป็นของแข็งนั้นจะถูกเคลื่อนย้ายโดยอิเล็กตรอนอิสระและการสั่นสะเทือนภายในโครงสร้าง โดยปกติแล้วการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระจะเป็นการเคลื่อนที่ที่มีบทบาทสำคัญ และเนื่องจากภายใน

เปรียบเทียบได้กับค่าความต้านทานไฟฟ้า ส่วนความแตกต่างของอุณหภูมิก็เปรียบเทียบกับความแตกต่างของแรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังนั้นสามารถเขียนสมการ 2.2 ใหม่ให้อยู่ในรูปของสมการไฟฟ้าตาม กฎของโอห์ม ได้เป็น

$$q_r = \frac{\Delta T}{R_k} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\Delta T = T_1 - T_2$  เป็นศักยภาพทางด้านความร้อน (thermal potential)

$$R_k = \frac{L}{kA} \quad \text{เป็นความต้านทานความร้อน (thermal resistance)}$$

ส่วนกลับของความต้านทานความร้อนนี้มีชื่อเรียกว่า “ค่าการนำความร้อน (thermal conductance)” และเรียกค่า  $k/L$  ซึ่งเป็นค่าการนำความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ว่า “หนึ่งหน่วยการนำความร้อน (unit thermal conductance)”

#### ค่าการนำความร้อน (Thermal Conductivity), $k$

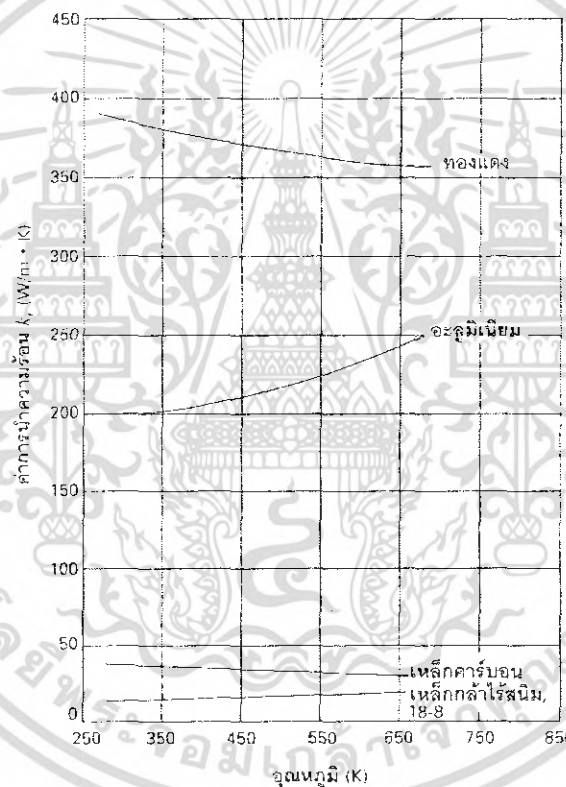
ค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติอย่างหนึ่งของวัตถุ นิยามความหมายด้วยสมการ 2.2 ค่าการนำความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆของแก๊สนั้นไม่สามารถหาได้จากทฤษฎี ดังนั้น ข้อมูลเกี่ยวกับการนำความร้อนส่วนใหญ่ของวัตถุจึงได้มาจากการวัดและการทดสอบ โดยทั่วไปแล้วค่าการนำความร้อนของวัตถุจะแปรค่าไปตามอุณหภูมิ แต่การใช้งานส่วนใหญ่จะใช้ค่าการนำความร้อนคงที่ที่หาจากอุณหภูมิต่ำ ซึ่งก็ให้ผลเป็นที่น่าพอใจ ตารางที่ 2.4 เป็นตัวอย่างค่าการนำความร้อนของโลหะ อโลหะ ของแข็ง ของเหลว และแก๊สบางชนิด

ตารางที่ 2.4 ค่าการนำความร้อน  $k$  ของโลหะ อโลหะ ของแข็ง ของเหลว และแก๊สบางชนิด

ชนิดของวัสดุ	ค่าการนำความร้อนที่ 300 K (W/m.K)
ทองแดง	386
อะลูมิเนียม	204
เหล็กคาร์บอน	54
แก้ว	0.75
พลาสติก	0.2 – 0.3
น้ำ	0.6
เอทิลไกลคอล (ethyl glycol)	0.2
น้ำมันเครื่อง	0.15
ฟร็อนเหลว	0.07
ไฮโดรเจน	0.18
อากาศ	0.026

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวนำไฟฟ้าที่คืบนั้นจะมีจำนวนอิเล็กตรอนอิสระเป็นจำนวนมากที่เคลื่อนที่ ไปมาอยู่ภายในโครงสร้างของมัน ดังนั้น ตัวนำไฟฟ้าที่ดี (เช่น ทองแดงและอะลูมิเนียม) จึงเป็นตัวนำความร้อนที่ดีด้วย ในทำนองเดียวกันตัวกลางที่เป็น ฉนวนไฟฟ้าที่ดี (เช่น แก้วและพลาสติก) ก็จะเป็นฉนวนความร้อนที่ดีด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามสมรรถนะในการ ป้องกันความร้อนของฉนวนจะดีหรือเลวเพียง ไรนั้นขึ้นอยู่กับความสามารถในการกักอากาศไว้ในรูพรุนของ โครงสร้าง ของวัสดุเหล่านั้น การถ่ายเทความร้อนในวัสดุเหล่านั้นเกิดขึ้นได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การนำความร้อนผ่าน โครงสร้าง แบบเส้นใยและโครงสร้างที่เป็นรูพรุน การนำและการพาความร้อนผ่านอากาศที่ถูกกักไว้ในโพรงว่างและการแผ่ ความร้อนในระหว่างโครงสร้างที่ติดกันต่างๆ ซึ่งมีบทบาทสำคัญสำหรับในกรณีที่มีอุณหภูมิสูงๆ และในบริเวณที่เป็น สุญญากาศ ปัจจุบันได้มีการพัฒนาฉนวนกันความร้อนแบบพิเศษไว้สำหรับใช้งานในที่ที่มีอุณหภูมิค่าถึง 25 K ชั้น ฉนวนพิเศษเหล่านี้ประกอบด้วยชั้นของวัสดุที่สามารถสะท้อนความร้อนได้ดีเป็นจำนวนหลายๆ ชั้น ฉนวนแต่ละชั้นจะ ถูกคั่นด้วยช่องว่างที่เป็นสุญญากาศเพื่อให้มีการนำและพาความร้อนน้อยที่สุด ฉนวนพิเศษเหล่านี้จะให้ค่าการนำความร้อนต่ำถึง  $0.02 \text{ W/m.K}$



รูปที่ 2.3 ค่าการนำความร้อน  $k$  ของโลหะบางชนิดที่แปรตามอุณหภูมิ

### 2.8.1.2 การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน (Convection Heat Transfer)

เมื่อของไหลสัมผัสกับผิวของวัสดุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันก็จะมี การแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่าง ของไหลกับวัตถุ กระบวนการแลกเปลี่ยนความร้อนนี้เรียกว่า “การถ่ายเทความร้อนโดยการพา หรือการพาความร้อน” ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ

1. การพาความร้อนแบบอิสระ (free convection)
2. การพาความร้อนแบบบังคับ (force convection)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงที่ทำให้ของไหลเกิดการเคลื่อนไหลของการพาความร้อนแบบอิสระนั้นเกิดจากความแตกต่างของอุณหภูมิภายในก้อนของไหล เนื่องมาจากการที่ของไหลสัมผัสกับผิวของวัตถุที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจนทำให้เกิดแรงลอยตัวขึ้น ตัวอย่างของการพาความร้อนแบบอิสระนี้ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนระหว่างผนังหรือหลังคาบ้านที่เกิดขึ้นในวันที่ไม่มีลมพัด การพาความร้อนภายในภาชนะน้ำที่มีขดลวดให้ความร้อนหรือการถ่ายเทความร้อนจากผิวของตัวเก็บความร้อนที่ได้มาจากดวงอาทิตย์ในช่วงที่ไม่มีลมพัด

การพาความร้อนแบบบังคับจะเกิดขึ้นเมื่อมีแรงภายนอกมาบังคับให้ของไหลเคลื่อนที่ผ่านผิววัตถุที่ร้อนกว่าหรือเย็นกว่า เนื่องจากการไหลของการพาความร้อนแบบบังคับมีความเร็วที่สูงกว่าแบบอิสระ ดังนั้นถ้าหากความแตกต่างของอุณหภูมิมิขนาดเท่าๆกันแล้ว การพาความร้อนแบบบังคับก็จะมีอัตราการพาความร้อนที่สูงกว่า แต่ไม่ว่าจะเป็นการพาความร้อนแบบใดก็ตาม ต่างมีสมการสำหรับหาอัตราการพาความร้อนที่อยู่ในรูปของ “กฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton’s law of cooling)” ซึ่งมีรูปสมการเป็น

$$q_c = \bar{h}_c A (T_s - T_{f,\infty}) \quad (2.4)$$

เมื่อ  $\bar{h}_c$  = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย (average convective heat transfer coefficient) ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับวัตถุ หรือหนึ่งหน่วยการนำจากการพาความร้อน (unit thermal convective conductance);  $W/m.K$

$A$  = พื้นที่ผิวของวัตถุที่สัมผัสกับของไหล

$T_s$  = อุณหภูมิของวัตถุ;  $K$

$T_{f,\infty}$  = อุณหภูมิของของไหลอิสระที่อยู่ห่างออกไปจากผิววัตถุมากๆ;  $K$

ค่า  $\bar{h}_c$  นี้หาได้โดยวิธีการวิเคราะห์และวิธีการทดลอง หน่วยของ  $\bar{h}_c$  ในระบบเอสไอ นั้นเป็นวัตต์ต่อตารางเมตรต่อองศาเซลเซียส ตารางที่ 2.5 เป็นค่าโดยประมาณของ  $\bar{h}_c$  รวมทั้งค่า  $\bar{h}_c$  จากการเดือดและการกลั่นตัวของไอน้ำ

ตารางที่ 2.5 ค่าโดยประมาณของสัมประสิทธิ์การพาความร้อนเฉลี่ย

ประเภทของการพาความร้อนและชนิดของของไหล	$\bar{h}_c (W/m.K)$
การพาความร้อนแบบอิสระ, อากาศ	5 – 25
การพาความร้อนแบบอิสระ, น้ำ	20 – 100
การพาความร้อนแบบบังคับ, อากาศ	10 – 200
การพาความร้อนแบบบังคับ, น้ำ	50 – 10,000
น้ำที่ก่ เล็งเดือด	30,000 – 100,000
ไอน้ำที่ก่ เล็งกลั่นตัว	5,000 – 100,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1.3 การถ่ายเทความร้อนโดยการแผ่รังสี หรือการแผ่รังสีความร้อน (Radiation Heat Transfer)

ความร้อนจากการนำและพาจะเคลื่อนที่ผ่าน ได้เฉพาะ ในกรณีที่มีตัวกลางเป็นตัวกลาง (medium) เท่านั้น สำหรับความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะสามารถเคลื่อนที่ผ่าน ได้โดยไม่ต้องมีตัวกลางเลย เช่น ในบริเวณที่เป็นสุญญากาศ เป็นต้น พลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีนั้นจะเคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง ซึ่งมีความเร็วเท่ากับ  $3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$  พลังงานที่เคลื่อนที่ไปในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้มีอยู่มาหลายชนิด เช่น รังสีเอกซ์ รังสีอินฟราเรด

จำนวนพลังงานที่ส่งออกมาในรูปรังสีความร้อน (radiant heat) นั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิสัมบูรณ์และลักษณะของผิว วัตถุที่สามารถแผ่รังสีได้สูงสุด หรือที่เรียกว่า “วัตถุดำ (black box)” นั้นจะมีอัตราการแผ่รังสีความร้อนเป็น

$$q_r = \sigma AT^4 \quad (2.5)$$

เมื่อ  $q_r$  = อัตราความร้อนจากการแผ่รังสี; Watt

$A$  = พื้นที่ผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน;  $m^2$

$T$  = อุณหภูมิผิวของตัวแผ่รังสีความร้อน; K

$\sigma$  = ค่าคงที่ “สเติฟาน – โบลทซ์มันน์ (Stefan – Boltzmann constant)” มีค่าเท่ากับ  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

จากสมการที่ 2.5 จะเห็นได้ว่า อัตราความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุดำนี้แปร โดยตรงกับกำลังสี่ของอุณหภูมิสัมบูรณ์ และทั้งๆที่อัตราการแผ่รังสีความร้อน ไม่ขึ้นอยู่กับสภาพของสิ่งแวดล้อม ก็ปรากฏว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิของการแผ่รังสีจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างวัตถุ 2 ชิ้น หรือมากกว่า 2 ชิ้นที่ กำลังแลกเปลี่ยนความร้อนซึ่งกันและกัน ถ้าวัตถุดำแผ่รังสีความร้อน ไปยังวัตถุที่อยู่รอบๆ (enclosure) และวัตถุที่อยู่รอบๆก็เป็นวัตถุดำ (สามารถดูดซึมพลังงานจากการแผ่รังสีที่มาจากกระทบได้หมด) ด้วยแล้ว อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีความร้อนของวัตถุดำที่มีอุณหภูมิ  $T_1$  ไปยังวัตถุที่อยู่รอบๆซึ่งมีอุณหภูมิเป็น  $T_2$  จะมีค่าเป็น

$$q_r = \sigma A_1(T_1^4 - T_2^4) \quad (2.6)$$

เมื่อ  $T_1$  = อุณหภูมิผิวของวัตถุดำ; K

$T_2$  = อุณหภูมิผิวของวัตถุที่อยู่รอบๆ (เป็นวัตถุดำด้วย); K

วัตถุจริงจะไม่สามารถแผ่รังสีความร้อนได้มากเท่ากับตัวแผ่รังสีในจินตนาการที่เรียกว่าวัตถุดำ แต่จะแผ่รังสีได้น้อยกว่า ถ้าหากอุณหภูมิที่เท่ากันนั้นวัตถุจริงสามารถแผ่รังสีความร้อนในอัตราส่วนที่คงที่กับวัตถุดำได้ทุกความยาวคลื่นแล้ว วัตถุจริงนั้นก็จะมีชื่อเรียกว่า “วัตถุธา” ซึ่งจะแผ่รังสีความร้อนในอัตรา

$$q_r = \sigma \epsilon AT^4 \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนอัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิจากการแผ่รังสีของวัตถุเท่าที่มีอุณหภูมิ  $T_1$  ไปยังวัตถุดำที่อยู่รอบๆ และมีอุณหภูมิเป็น  $T_2$  จะมีค่าเป็น

$$q_r = \sigma A_1 \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

เมื่อ  $\varepsilon_1$  = ค่าการแผ่รังสี (emittance) ของวัตถุเท่า มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของความร้อนจากการแผ่รังสีของวัตถุเท่ากับวัตถุดำเมื่อมีอุณหภูมิเท่าๆกัน

## 2.8.2 การนำความร้อนเมื่อสภาวะต่างๆคงที่ (Steady State Conduction)

เนื่องจากสมการการนำความร้อนในรูปทั่วไปนั้นจะรวมเอาพลังงานที่เก็บไว้ภายในก้อนวัตถุเข้าไปด้วย จากวิชาเทอร์โมไดนามิกส์นั้นทราบกันแล้วว่า ถ้าหากอุณหภูมิของวัตถุก้อนใดเพิ่มขึ้น พลังงานภายในของวัตถุก้อนนั้นก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นพลังงานสุทธิที่เก็บสะสมไว้ภายในก้อนวัตถุก็จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นตามเวลา และจะลดลงตามอุณหภูมิที่ลดลงตามเวลา แต่ถ้าหากอุณหภูมิของวัตถุคงที่แล้ว ก็จะไม่มีการเก็บพลังงานเพิ่มเติมเข้าไปในวัตถุ และจะเรียกวัดอยู่ที่อยู่ในสภาวะดังกล่าวว่าอยู่ในสภาวะที่ค่าต่างๆคงที่หรือไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาแล้ว

### 2.8.2.1 การนำความร้อนแบบมิติเดียวที่สภาวะต่างๆคงที่และไม่มีความร้อนเกิดขึ้น (Steady, One Dimensional Conduction without Generation)

#### 2.8.2.1.1 ระบบแกนของวัตถุสี่เหลี่ยมมุมฉาก (Rectangular Coordinate)

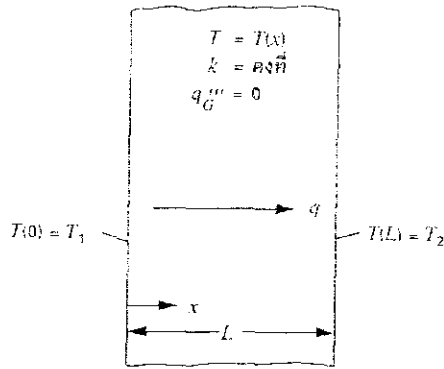
การกระจายอุณหภูมิในผนังแบบมิติเดียวที่ไม่มีความร้อนเกิดขึ้น และสภาวะต่างๆคงที่แล้วนั้นจะเป็นไปตามสมการการนำความร้อนที่มีรูปร่างว่า

$$\frac{d^2T}{dx^2} = 0 \quad (2.9)$$

เมื่ออินทิเกรตแล้วจะได้

$$T = C_1 x + C_2$$

ค่า  $C_1$  และ  $C_2$  นี้จะหาได้ก็ต่อเมื่อทราบเงื่อนไขที่ขอบเขต 2 ขุด ซึ่งจะสมมติโดยการกำหนดอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองของผนังให้ดังรูปที่ 2.4.



รูปที่ 2.4 ผังจากรูปสี่เหลี่ยมมุมฉากพร้อมด้วยเงื่อนไขที่ขอบเขต

จากรูปที่ 2.4 จะได้เงื่อนไขที่ขอบเขต 2 ชุดดังนี้

(1) ที่  $x = 0$  จะได้ค่า  $T = T_1$

(2) ที่  $x = L$  จะได้ค่า  $T = T_2$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขที่ขอบเขต  $T = T_1$  ที่  $x = 0$  ลงในสมการข้างต้นจะได้

$$C_2 = T_1$$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขที่ขอบเขต  $T = T_2$  ที่  $x = L$  ลงในสมการข้างต้นจะได้

$$C_1 = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

และเมื่อแทนค่า  $C_1$  และ  $C_2$  กลับลงในสมการที่ใช้แสดงการกระจายของอุณหภูมิ  $T$  จะได้

$$T = \frac{T_2 - T_1}{L} \cdot x + T_1 \tag{2.10}$$

$$\therefore \frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

จะเห็นได้จากสมการ 2.10 ว่า อุณหภูมิ  $T$  นี้แปรเป็นเส้นตรงตามแนวแกน  $x$  ดังนั้นเมื่อแทนค่า  $dT / dx$  ลงในกฎของฟูรีเยร์ที่อยู่ในรูปของสมการ 2.2 ก็จะได้

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \tag{2.11}$$

และถ้าเขียนสมการ 2.11 ใหม่ให้อยู่ในรูปกฎของโอห์มก็จะเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_k = \frac{\Delta T}{R_t} = \frac{\Delta T}{L/kA} \quad (2.12)$$

ค่าความต้านทานความร้อนของผนังราบก็จะเป็น

$$R_t = \frac{L}{kA} \quad (2.13)$$

#### 2.8.2.1.2 ระบบแกนของวัตถุรูปทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate)

ปัญหาการนำความร้อนที่อีกปัญหาหนึ่งก็คือ การนำความร้อนตามแนวรัศมีของวัตถุรูปทรงกระบอกกลวงยาวตั้งรูปที่ 2.2 โดยมี  $T_i$  เป็นอุณหภูมิของผิวด้านใน และ  $T_o$  เป็นอุณหภูมิของผิวด้านนอก สำหรับกรณีที่สภาวะต่างๆคงที่ วัตถุมีคุณสมบัติคงที่และไม่มีความร้อนเกิดขึ้นในวัตถุรูปทรงกระบอกกลวงนั้นแล้ว การกระจายอุณหภูมิภายในวัตถุรูปทรงกระบอกกลวงจะเป็นไปตามสมการ

$$\frac{d}{dr} \left( r \cdot \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.14)$$

โดยมีเงื่อนไขที่ขอบเขต 2 จุดดังนี้

(1) ที่  $r = r_i$  จะได้ค่า  $T = T_i$

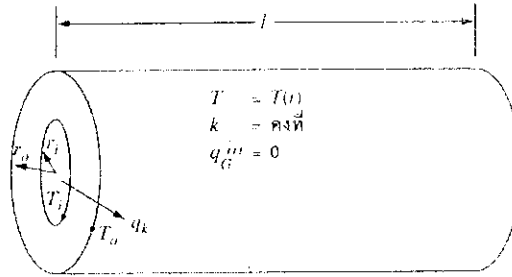
(2) ที่  $r = r_o$  จะได้ค่า  $T = T_o$

และเมื่อแก้สมการ (2.14) และใช้เงื่อนไขที่ขอบเขต 2 จุดนั้น จะได้อุณหภูมิที่รัศมีต่างๆเป็น

$$T = T_i + (T_o - T_i) \frac{\ln(r/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (2.15)$$

เมื่อเขียนสมการ (2.15) ในรูปของสมการไร้มิติแล้ว จะได้

$$\frac{T - T_i}{T_o - T_i} = \frac{\ln(r/r_i)}{\ln(r_o/r_i)} \quad (2.16)$$



รูปที่ 2.5 วัสดุรูปทรงกระบอกกลวงพร้อมเงื่อนไขที่ขอบเขต

เมื่อทราบลักษณะการกระจายของอุณหภูมิแล้ว ก็สามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากกฎของฟูเรียร์ที่ใช้กับระบบแกนของวัสดุทรงกระบอกกลมได้ คือ

$$q_k = -kA \frac{dT}{dr} = -k(2\pi rl) \frac{dT}{dr} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $l$  = ความยาวของวัสดุทรงกระบอก

และเมื่อแทนค่าการกระจายอุณหภูมิ  $dT/dr$  ที่ได้จากการตีเฟอเรนเชียลสมการ 2.7 ลงในสมการ 2.17 แล้ว จะได้อัตราการไหลของความร้อนเป็น

$$q_k = \frac{T_i - T_o}{\ln(r_o/r_i)/2\pi kl} \quad (2.18)$$

เนื่องจากสมการ 2.18 อยู่ในรูปกฎของโอห์ม ดังนั้นตัวที่เป็นส่วนก็จะเป็ค่าความต้านทานความร้อนของวัสดุรูปทรงกระบอกกลวงนั้น และจะมีค่าเป็น

$$R_i = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kl} \quad (2.19)$$

### 2.8.2.1.3 ระบบแกนของวัสดุรูปทรงกลม (Spherical Coordinate)

การกระจายอุณหภูมิและอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านวัสดุรูปทรงกลมกลวงก็สามารถหาได้ในลักษณะเดียวกับกรณีของผนังราบและวัสดุรูปทรงกระบอกกลวงการกระจายอุณหภูมิในผนังของวัสดุรูปทรงกลมกลวงที่สภาวะต่างๆที่ ความร้อนไหลแบบมิติเดียวและไม่มีความร้อนเกิดขึ้นในวัตถุนั้นหาได้จากการแก้สมการง่ายๆของสมการการนำความร้อนในระบบแกนของวัสดุรูปทรงกลม สมการดังกล่าวคือ

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{d}{dr} \left( r^2 \cdot \frac{dT}{dr} \right) = \frac{1}{r^2} \cdot \frac{d^2(rT)}{dr^2} = 0 \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าสมมติว่ามีการระบุเงื่อนไขที่ขอบเขตด้วยการกำหนดอุณหภูมิที่ผิวด้านในและผิวด้านนอกของ  
 วัตถุรูปทรงกลมกลวงดังรูปที่ 2.6 ว่า

- (1) ที่  $r = r_i$  จะได้ค่า  $T = T_i$
- (2) ที่  $r = r_o$  จะได้ค่า  $T = T_o$

ในกรณีดังกล่าวนี้การกระจายอุณหภูมิในผนังของวัตถุรูปทรงกลมกลวงก็จะเป็น

$$\frac{T - T_i}{T_o - T_i} = \frac{r_o}{r_o - r_i} \left(1 - \frac{r_i}{r}\right) \quad (2.21)$$

นั่นคือ อุณหภูมิในผนังของวัตถุรูปทรงกลมกลวงจะแปรเป็นรูปไฮเปอร์โบลาคตามแนวรัศมีของวัตถุรูปทรง  
 กลมกลวงนั้น



รูปที่ 2.6 วัตถุรูปทรงกลมและเงื่อนไขที่ขอบเขต

อัตราการถ่ายเทความร้อนในวัตถุรูปทรงกลมกลวงนี้หาได้จากการประยุกต์กฎของฟูเรียร์มาใช้กับสมการ  
 2.21 ซึ่งจะได้ผลลัพธ์เป็น

$$q_k = \frac{T_i - T_o}{(r_o - r_i) / 4\pi k r_o r_i} \quad (2.22)$$

ดังนั้นความต้านทานความร้อนของวัตถุรูปทรงกลมกลวงจะมีค่าเป็น

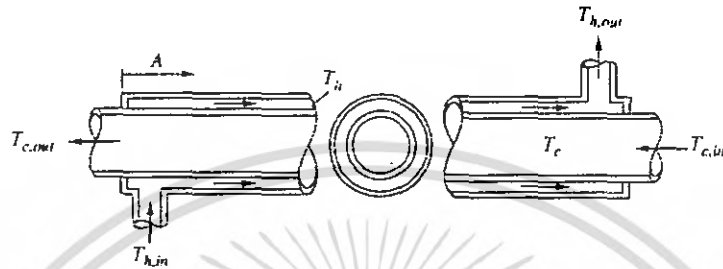
$$R_t = \frac{r_o - r_i}{4\pi k r_o r_i} \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.3 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger)

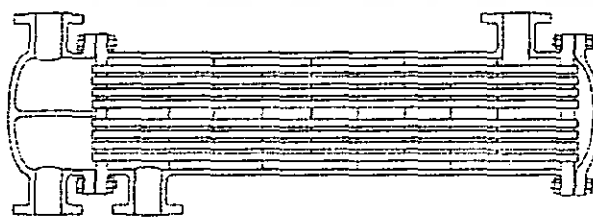
#### 2.8.3.1 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่าย (Basic Types of Heat Exchanger)

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่ายๆที่ประกอบด้วยท่อสองขนาดซ้อนร่วมแกนเดียวกันนั้นมีลักษณะดังรูปที่ 2.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้สามารถใช้งานได้ทั้งในลักษณะที่ให้ของไหลในท่อทั้งสองไหลไปในทางเดียวกัน (parallel flow) และ ไหลสวนทางกัน (counter flow) ทั้งนี้จะให้ของไหลร้อนหรือของไหลเย็นไหลผ่านพื้นที่รูวงแหวนที่อยู่ด้านนอกก็ได้ ส่วนของ ไหลที่เหลือให้ไหลผ่านท่อเล็กที่อยู่ทางด้านใน



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ท่อสองขนาดซ้อนร่วมแกนเดียวกันและของไหลสวนทางกัน

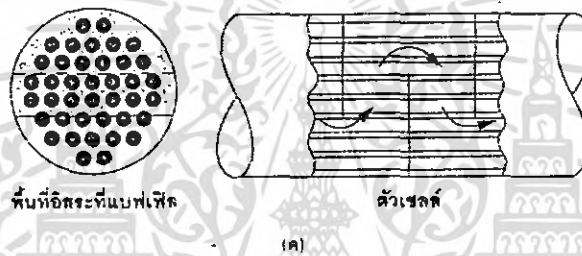
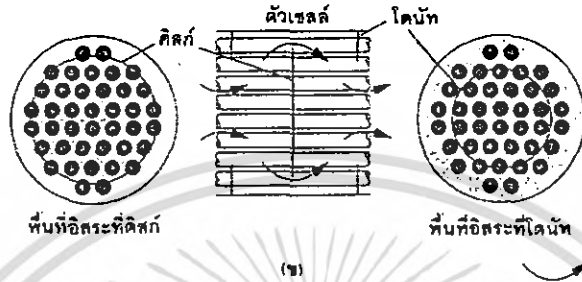
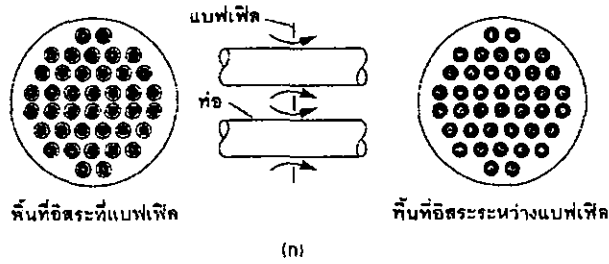
อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบง่ายๆที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเคมีคือ แบบท่อกับเชลล์ที่มีรูปร่างดังรูปที่ 2.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้ ของไหลชนิดหนึ่งจะไหลผ่านกลุ่มท่อ ส่วนอีกชนิดหนึ่งจะถูกบังคับให้ไหลในเชลล์ผ่าน ไปทางด้านนอกของกลุ่มท่อ การบังคับให้ของไหลในเชลล์ไหลผ่านกลุ่มท่อตามแนวตั้งฉากนี้จะทำให้ประสิทธิภาพในการพาความร้อนมีค่าสูงกว่ากรณีที่ไหลไปตามแนวขนาน วิธีที่จะทำให้เกิดการไหลตามแนวตั้งฉากขึ้นได้นั้นก็ต้องใส่แผ่นแบฟเฟิล (baffle) สำหรับบังคับทิศทางการไหลไว้ภายในเชลล์ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนดังรูปที่ 2.8 แผ่นแบฟเฟิลที่ใช้บังคับทิศทางการไหลเหล่านี้จะได้รับการจัดให้แผ่นแรกทำหน้าที่บังคับทิศทางการไหลให้ไหลลง ส่วนแผ่นที่สองจะทำหน้าที่บังคับให้ไหลขึ้นสลับกับไปมาตลอดทั้งเชลล์ สำหรับทิศทางการไหลในท่อหรือในกลุ่มท่อนั้นจะให้ไหลผ่านท่อหรือกลุ่มท่อไปกลับ (tube pass) ก็เที่ยวก็ได้ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการจัดแผ่นยึดปลายท่อ (header) ในกรณีที่เป็นอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่ของไหลในท่อหรือกลุ่มท่อไปผ่านท่อหรือกลุ่มท่อ 2 เที่ยวหรือ 2 กลับนั้น แผ่นยึดปลายท่อจะบังคับให้การไหลในท่อกลุ่มแรกไหลในทิศทางหนึ่ง จากนั้นจึงวกกลับ โดยไหลผ่านท่อกลุ่มหลังในอีกทิศทางหนึ่ง ดังรูปที่ 2.8 ถ้าหากต้องการ ให้ของไหลในท่อหรือกลุ่มท่อไหลผ่านเครื่อง 4 เที่ยวหรือ 4 กลับ (four tube pass) ก็สามารถทำได้โดยการจัดช่องทางการไหลที่หัวท้ายของตัวเครื่องเสียใหม่ แผ่นแบฟเฟิลที่ใช้บังคับทิศทางการไหลของของไหลภายในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรมนั้นมรมาหลายแบบ แต่แบบง่ายๆที่นิยมใช้กันก็คือแบบ ดิสก์แอนด์ไดนาท (disk and doughnut) ที่อยู่ในรูป 2.9 (ข)



รูปที่ 2.8 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับเชลล์ที่มีแผ่นบังคับทิศทางการไหล

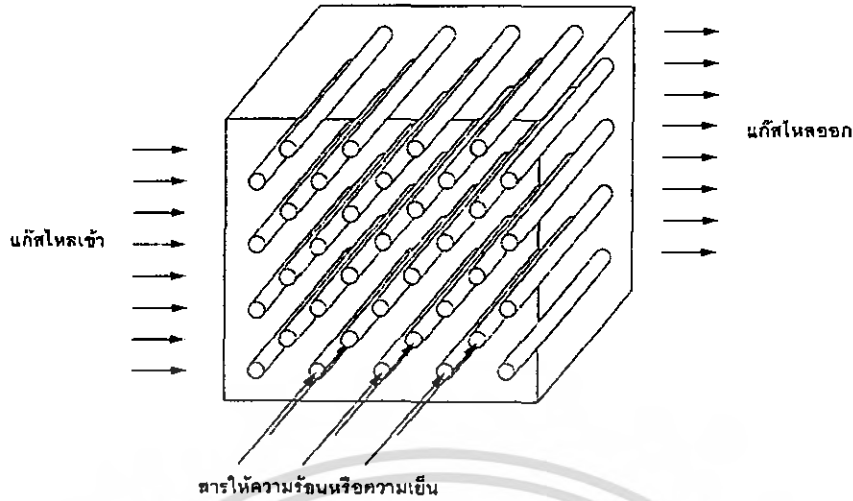
ของไหลในท่อไหลผ่านเครื่อง 2 เที่ยว และในเชลล์ไหลผ่านเครื่องเที่ยวเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



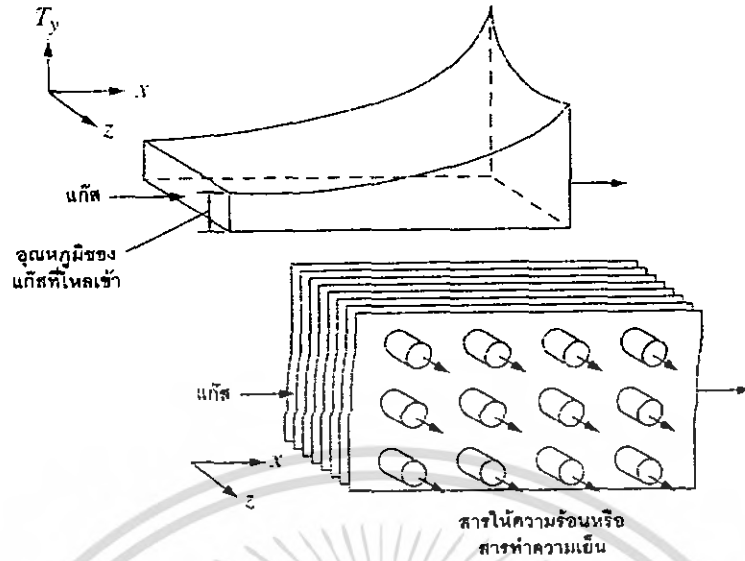
รูปที่ 2.9 การจัดแผ่นบังค้ำทิศทางการไหลทั้งสามแบบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน  
(ก) แบบอริฟิซ (ข) แบบคิลล์แอนด์โคนัท (ค) แบบเซกเมนทอล

ในการทำให้เกิดสกรีนขึ้นหรือเป็นตัวลงนั้นมักจะใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก (cross flow heat exchanger) ดังรูปที่ 2.10 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากนี้ ของไหลชนิดแรกจะถูกบังค้ำให้ไหลภายในท่อ ส่วนแก๊สซึ่งเป็นของไหลชนิดที่สองจะไหลผ่านทางด้านนอกของกลุ่มท่อในแนวตั้งฉาก การไหลของของไหลนอกท่อนี้จะเป็นการไหลแบบบังค้ำหรือการไหลแบบอิสระก็ได้ และถือว่าการไหลของแก๊สที่ไหลตั้งฉากกับกลุ่มท่อนี้เป็นการไหลที่มีการคลุกเคล้าผสมกัน (mixed) ส่วนของไหลที่ไหลในท่อนั้นไม่มีการคลุกเคล้าผสมกัน (unmixed) การที่ดีว่าแก๊สที่อยู่นอกท่อนี้มีการคลุกเคล้าผสมกันนั้นก็เพราะว่า ในระหว่างที่กำลังทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกันนั้น แก๊สสามารถที่จะไหลผ่านช่องว่างระหว่างท่อเหล่านั้น ได้อย่างอิสระ ส่วนของไหลที่ไหลในท่อนั้นจะไม่สามารถคลุกเคล้าผสมกับของไหลที่อยู่ในท่ออื่นได้เลย



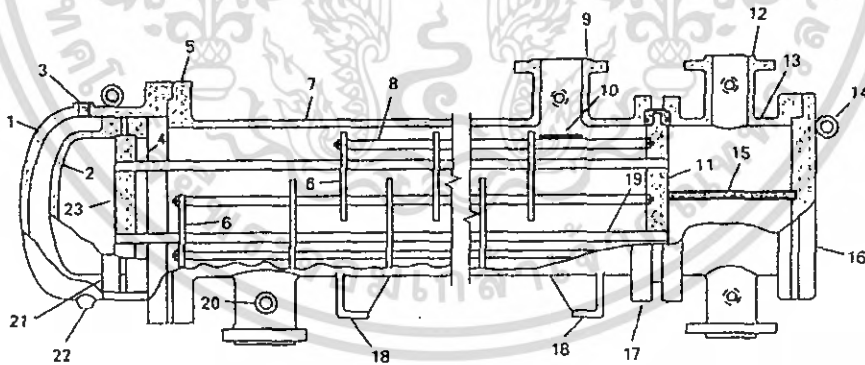
รูปที่ 2.10 การไหลตามแนวตั้งฉากของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก  
 ที่ของไหลชนิดหนึ่งมีการคลุกเคล้ากัน อีกชนิดหนึ่งไม่มีการคลุกเคล้ากัน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากอีกแบบหนึ่งที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอวกาศ และ  
 เครื่องอำนวยความสะดวกที่ใช้กันตามบ้านเรือนนั้นอยู่ในรูปที่ 2.11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้แก๊สร้อนที่  
 ไหลผ่านกลุ่มท่อที่มีครีบบระบายความร้อนอยู่ด้วยนั้นจะ ไม่มีการคลุกเคล้าผสมกัน ทั้งนี้เพราะแก๊สร้อนจะถูกกักตัวอยู่ใน  
 ช่องทางการ ไหลที่แยกขาดออกจากกันสำหรับ โปร ไฟล์อุณหภูมิที่อยู่ทางด้านบนของรูปที่ 2.11 นั้นแสดงให้เห็นความ  
 ลาดชันของอุณหภูมิในทิศทางกร ไหล และในทิศทางที่ตั้งฉากกับการ ไหลของแก๊สร้อนเมื่อการ ไหลภายนอกท่อมัน ไม่  
 มีการคลุกเคล้าผสมกัน ส่วนในกรณีที่มีการคลุกเคล้าผสมกันนั้น อุณหภูมิในแนวที่ตั้งฉากกับทิศทางกร ไหลมี  
 แนวโน้มว่าจะมีค่าคงที่ ส่วนในแนวทิศทางกร ไหลจะมีอุณหภูมิแตกต่างกัน ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความ  
 ร้อนนั้นจะต้องกำหนดด้วยว่าของ ไหลนั้นมีการคลุกเคล้าผสมกันหรือไม่ ของไหลชนิดไหลที่มีการคลุกเคล้าผสมกัน  
 และชนิดไหนที่ไม่มีการคลุกเคล้าผสมกัน นอกจากนี้ยังต้องมีการสมดุลอุณหภูมิที่น้อยลง (temperature drop) ด้วยการ  
 ให้สัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่มีค่าประมาณเท่ากับสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ ถ้าหากไม่ทำ  
 การสมดุลอุณหภูมินี้ก็อาจจะทำให้การต้านทานความร้อนมีค่าสูงมากจนเกินไป ซึ่งจะมีผลทำให้อุณหภูมิต่ำลง  
 น้อยลง (จากอัตราการถ่ายเทความร้อนที่กำหนดให้) นั้นมีค่ามากจนเกินไป ทำให้ต้องใช้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน  
 ที่มีขนาดโตขึ้นกว่าเดิม และส่งผลให้ไม่ประหยัด



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย  
ในอาคารและเครื่องอำนวยความสะดวกที่ใช้กันตามบ้าน

อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบตั้งฉากที่อยู่ในรูป 2.8 เป็นแบบที่มีแผ่นยึดปลายท่อยึดติดอยู่กับที่ ส่วนตัวท่อนั้นจะใช้วิธีเชื่อมหรือขยายปลายท่อให้บาน โตขึ้นเพื่อให้ยึดติดอยู่กับแผ่นยึดปลายท่ออีกท่อนึง อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบนี้จะมีราคาถูก แต่ใช้งานได้เฉพาะในกรณีที่อุณหภูมิของของไหลร้อนกับของไหลเย็นมีค่าแตกต่างกันไม่มาก ทั้งนี้เพราะถ้าแตกต่างกันมากและก็จะทำให้มีความเค้นเกิดขึ้นจากการขยายตัวของท่อกับเซลล์ ข้อเสียอีกข้อหนึ่งก็คือถอดท่อออกมาทำความสะอาดไม่ได้ แต่ข้อเสียเหล่านี้ก็สามารถกำจัดทิ้งได้ด้วยการดัดแปลงรูปแบบให้มีลักษณะดังรูปที่ 2.12



- |  |                           |                              |
|--|---------------------------|------------------------------|
| 1. shell cover                         | 8. tie rods and spacers   | 17. shell channel-end flange |
| 2. floating head                       | 9. shell nozzle           | 18. support saddles          |
| 3. vent connection                     | 10. impingement baffle    | 19. heat-transfer tube       |
| 4. floating-head backing device        | 11. stationary tube sheet | 20. test connection          |
| 5. shell cover-end flange              | 12. channel nozzle        | 21. floating-head flange     |
| 6. transverse baffles or support plate | 13. channel               | 22. drain connection plates  |
| 7. shell                               | 14. lifting ring          | 23. floating tube sheet      |
|  | 15. pass partition        |                              |
|  | 16. channel cover         |                              |

รูปที่ 2.12 อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อกับเซลล์ที่มี floating head

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.3.2 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (The Overall Heat Transfer Coefficient)

เรื่องที่สำคัญเป็นอันดับแรกในการวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อท่กับเซลล์ในเชิงความร้อนก็คือ การหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหล 2 ชนิด โดยนิยามความหมายของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมระหว่างของไหลร้อนที่มีอุณหภูมิเป็น  $T_h$  กับของไหลเย็นที่มีอุณหภูมิเป็น  $T_c$  ที่กันโดยผนังที่บดด้วยสมการ

$$q = UA(T_h - T_c) \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$UA = \frac{1}{\sum_{n=1}^{n=3} R_n}$$

### 2.8.3.3 ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน (Heat Exchanger Effectiveness)

การวิเคราะห์อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบต่างๆ นั้นวิเคราะห์หามาจากสมการดังนี้

$$q = UA\Delta\bar{T} \quad (2.25)$$

สมการ 2.25 นี้เป็นสมการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จะเห็นได้ว่าสมการดังกล่าวนี้จะใช้งานได้สะดวกก็ต่อเมื่อทราบอุณหภูมิต่างๆ ที่จะใช้ในการหาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยแล้วเท่านั้น อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าจะไม่ทราบอุณหภูมิต่างๆ ของของไหล แต่ถ้าหากรู้สมรรถนะ (รู้ค่า  $U$ ) ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน หรือหาสมรรถนะของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนได้แล้ว ก็จะสามารถนำสมการ 2.25 มาใช้งานได้เช่นเดียวกัน หรือในกรณีที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นได้รับการทดสอบหาสมรรถนะที่อัตราการไหลค่าหนึ่ง แต่เวลาใช้งานจริงกลับนำไปใช้งานที่อัตราการไหลอีกค่าหนึ่งก็สามารถที่จะคำนวณได้ สำหรับอุณหภูมิของของไหลที่ไหลออกจากเครื่องและอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้น ถ้าหากจะหาโดยวิธีการที่ใช้กราฟในหัวข้อที่ผ่านมาก็จะต้องคำนวณโดยวิธีลองผิดลองถูก ในกรณีดังกล่าวจะต้องใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกหรือความแตกต่างของอุณหภูมิเฉลี่ยอื่นๆ

ในการสร้างสมการที่ใช้สำหรับหาอัตราการถ่ายเทความร้อนของกรณีที่ยังไม่ทราบอุณหภูมิของของไหลที่ไหลออกจากเครื่องนั้นจะต้องนำเอาค่าประสิทธิผล  $\epsilon$  ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมาใช้งาน ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นอัตราส่วนของอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดที่เป็นไปได้ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุดนี้หาได้จากอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบของไหลไหลสวนทางกันที่มีพื้นที่สำหรับการถ่ายเทความร้อนไม่จำกัดขนาด (อินฟินิตี) อุปกรณ์ความร้อนดังกล่าวนี้หาก  $\dot{m}_c p_{p,c} < \dot{m}_h p_{p,h}$  และไม่มีการสูญเสียความร้อนให้แก่สิ่งแวดล้อมแล้ว อุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลออกจากเครื่องก็จะต้องเท่ากับอุณหภูมิของของไหลร้อนที่ไหลเข้าเครื่อง แต่ถ้าหาก  $\dot{m}_c p_{p,c} > \dot{m}_h p_{p,h}$  แล้ว อุณหภูมิของของไหลร้อนที่ไหลออกจากเครื่องก็จะเท่ากับอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ไหลเข้าเครื่อง หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนเป็นตัวเปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงกับอัตรา

การถ่ายเทความร้อนสูงสุดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่อยู่ในขอบเขตของกฎข้อที่ 2 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าเป็น

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}} = \frac{C_h (T_{h,m} - T_{h,out})}{C_{min} (T_{h,m} - T_{c,m})} \quad (2.26)$$

ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราความจุความร้อน  $C$  ของของไหลร้อนกับของไหลเย็นเองว่าตัวไหนจะมีค่าน้อยกว่ากัน หรือ

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}} = \frac{C_c (T_{c,out} - T_{c,m})}{C_{min} (T_{h,m} - T_{c,m})} \quad (2.27)$$

เมื่อ  $C_{min} \equiv$  อัตราความจุความร้อนตัวที่มีค่าน้อย (ระหว่าง  $\dot{m}_c C_{p,c}$  กับ  $\dot{m}_h C_{p,h}$ )

ดังนั้น ในทันทีที่ทราบค่าประสิทธิภาพ  $\varepsilon$  ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็จะสามารถหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจริงได้จากสมการ

$$q_{act} = \varepsilon \cdot C_{min} (T_{h,m} - T_{c,m}) \quad (2.28)$$

ทั้งนี้เพราะ

$$\varepsilon \cdot C_{min} (T_{h,m} - T_{c,m}) = C_h (T_{h,m} - T_{h,out}) = C_c (T_{c,out} - T_{c,m})$$

สมการ 2.28 เป็นสมการหลักที่ใช้ในการวิเคราะห์อัตราการถ่ายเทความร้อนของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ทั้งนี้เพราะอัตราการถ่ายเทความร้อนนั้นขึ้นอยู่กับค่าประสิทธิภาพ, อัตราความจุความร้อนตัวที่มีค่าน้อย และความแตกต่างของอุณหภูมิที่ไหลเข้าของของไหลทั้งสอง สมการนี้เป็นสมการที่นำมาใช้แทนสมการ  $q = UA\Delta T$  ที่วิเคราะห์อยู่ในเทอมของ LMTD แต่สำหรับสมการนี้ไม่ต้องใช้อุณหภูมิที่ไหลออกของของไหลทั้งสองเลย ดังนั้นสมการนี้จึงเป็นสมการที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมากกว่า

ในช่วงต่อจากนี้ไปจะเป็นการหาค่าประสิทธิภาพ ของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบที่ไหลทางเดียวกัน โดยการแทนค่าสมการต่างๆ จะได้เป็น

$$\ln \left[ 1 - \varepsilon \left( \frac{C_{min}}{C_h} + \frac{C_{min}}{C_c} \right) \right] = - \left( \frac{1}{C_c} + \frac{1}{C_h} \right) UA$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[ 1 - \varepsilon \left( \frac{C_{\min}}{C_h} + \frac{C_{\min}}{C_c} \right) \right] = e^{-[(1/C_c) + (1/C_h)]UA}$$

เมื่อแก้สมการแล้วจะได้

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-[(1/C_c) + (1/C_h)]UA/C_h}}{(C_{\min}/C_h) + (C_{\min}/C_c)}$$

ถ้าหาก  $C_h < C_c$  แล้ว  $C_h$  ก็จะทำหน้าที่เป็น  $C_{\min}$  ดังนั้นค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการข้างบนนั้นจะมีค่าเป็น

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{1 - e^{-[(1/C_c) + (1/C_h)]UA/C_h}}{(C_{\min}/C_{\min}) + (C_h/C_c)} \\ &= \frac{1 - e^{-[(1/C_c) + (1/C_h)]UA/C_h}}{1 + (C_h/C_c)} \end{aligned} \quad (2.29)$$

แต่ถ้าหาก  $C_c < C_h$  แล้ว  $C_c$  ก็จะทำหน้าที่เป็น  $C_{\min}$  ดังนั้นค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจากสมการข้างบนนั้นจะมีค่าเป็น

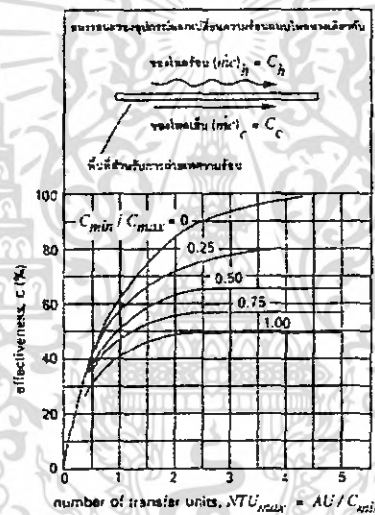
$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{1 - e^{-[(1/C_c) + (1/C_h)]UA/C_c}}{(C_{\min}/C_{\min}) + (C_c/C_h)} \\ &= \frac{1 - e^{-[(1/C_c) + (1/C_h)]UA/C_c}}{1 + (C_c/C_h)} \end{aligned} \quad (2.30)$$

ดังนั้นสามารถเขียนค่าประสิทธิผลของทั้งสองกรณีเป็น

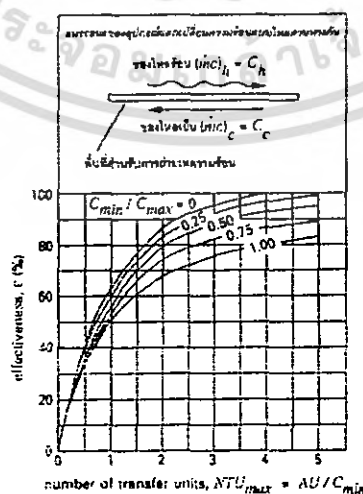
$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-[(1/C_{\min}/C_{\max})]UA/C_{\min c}}}{1 + (C_{\min}/C_{\max})} \quad (2.31)$$

จากรายละเอียดที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้นเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ไร้มิติสองกลุ่ม กลุ่มแรกคือ ค่า  $(C_{\min}/C_{\max})$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของอัตราความจุความร้อนส่วนกลุ่มที่สองคือ  $UA/C_{\min}$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนของค่าการนำความร้อนรวมกับอัตราความจุความร้อนตัวที่มีค่าน้อย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับพารามิเตอร์ตัวหลังนี้มีชื่อว่า “จำนวนหน่วยของการถ่ายเทความร้อน” ซึ่งเรียกเป็นภาษาอังกฤษว่า number of heat transfer units และมักจะเขียนเป็นตัวย่อว่า NTU จำนวนหน่วยของการถ่ายเทความร้อน หรือ NTU นี้จะเป็นตัวที่จะบอกให้ทราบถึงขนาดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนนั้น อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบอื่น ๆ ก็มีหลักการวิเคราะห์ที่ก็มีหลักการวิเคราะห์เช่นเดียวกับอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลทางเดียวกันที่ให้อัตรา ซึ่งในทางปฏิบัติมันไม่ว่าจะจัดให้มีการไหลลักษณะไหนก็ตาม ส่วนใหญ่แล้วก็จะสามารถหาค่าประสิทธิภาพได้ทั้งสิ้น และเพื่อความสะดวกในการใช้งาน Kays และ London จึงได้นำเอาค่าประสิทธิภาพกับค่า NTU ของค่า  $C_{min} / C_{max}$  ต่างๆมาเขียนเป็นเส้นกราฟ ตัวอย่างกราฟของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีลักษณะการไหลแบบต่างๆนั้นจะอยู่ในรูปที่ 2.13 ถึง 2.17 จะเห็นได้ว่าอีแวพอเรเตอร์ (evaporator) และเครื่องควบแน่น (condenser) นั้นก็ต่างมีค่า  $C_{min} / C_{max} = 0$  ทั้งนี้เพราะหากของไหลชนิดหนึ่งชนิดใดของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีอุณหภูมิคงที่ตลอดทั้งเครื่องแล้ว ความร้อนจำเพาะ ประสิทธิภาพ และอัตราความจุความร้อนของของไหลนั้นก็จะมีค่าเป็นอินฟินิตีตามค่านิยาม

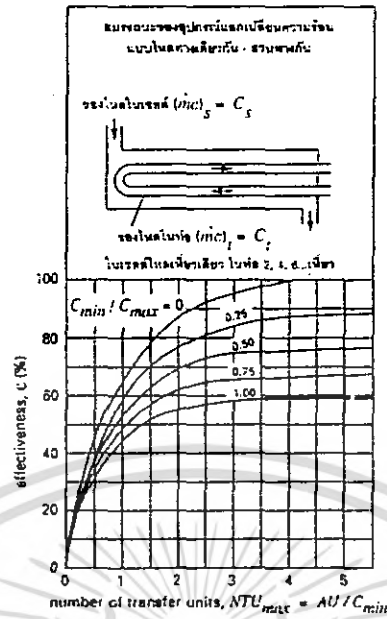


รูปที่ 2.13 ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่ของไหลไหลทางเดียวกัน

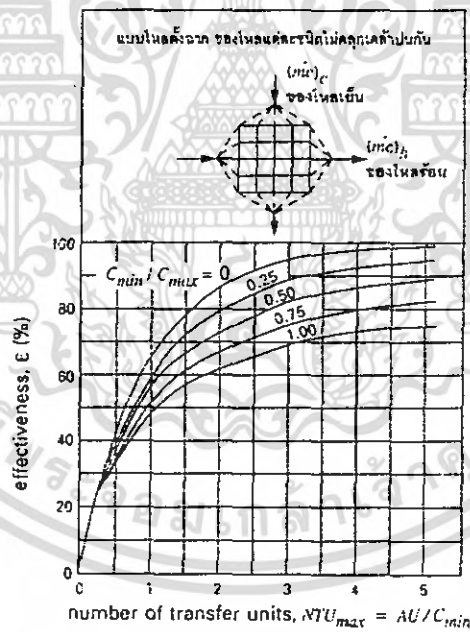


รูปที่ 2.14 ค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนชนิดที่ของไหลไหลสวนทางกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

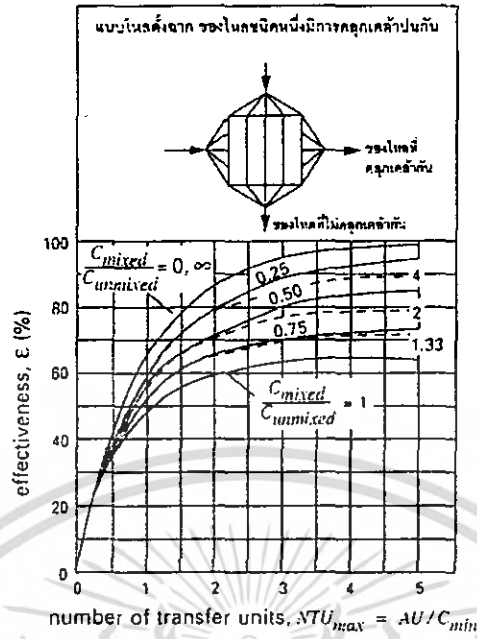


รูปที่ 2.15 ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบท่อคู่กับเซลล์ที่ของไหลในเซลล์ไหลผ่านเครื่องที่ขวเดียว (1 กลับ) และในท่อไหลผ่านเครื่อง 2, 4, 6, 8 ... เท่ขว (กลับ)



รูปที่ 2.16 ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลทั้งสองไม่ค้ลลู่เคล้าปนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ค่าประสิทธิผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉากที่ของไหลชนิดหนึ่งมีการคลุกเคล้าปนกัน อีกชนิดหนึ่งไม่มีการคลุกเคล้าปนกัน เมื่อ  $C_{mixed}/C_{unmixed} > 1$  ค่า  $NTU_{max}$  คัดจาก  $C_{unmixed}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 3

## ขั้นตอนการดำเนินงาน

### 3.1 แผนการดำเนินการ

รายละเอียดของแผนการดำเนินการ สามารถแสดงได้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินการ

รายละเอียดกิจกรรม	ม.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.
เสนอหัวข้อโครงการ	■								
ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสีย									
ติดต่อหาโรงงาน	■								
นำตัวอย่างน้ำมาตรวจสอบและวิเคราะห์									
ออกแบบอุปกรณ์บำบัดน้ำ									
สร้างอุปกรณ์บำบัดน้ำ									
ทดสอบระบบการทำงานของเครื่อง									
ปรับปรุงระบบให้สมบูรณ์มากขึ้น									
ทำรูปเล่มปฏิญานินทร์									

### 3.2 ขั้นตอนการดำเนินการ

#### 3.2.1 การศึกษาทฤษฎีต่างๆ

- การบำบัดน้ำเสีย
- ตัวกรอง
- การถ่ายเทความร้อน
- การวิเคราะห์น้ำ

#### 3.2.2 การหาหน่วยงานตรวจสอบน้ำ

- คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาสิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- คณะวิทยาศาสตร์ สาขาเคมีสิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- ศูนย์ห้องปฏิบัติการกรมอนามัย ศูนย์ห้องปฏิบัติการกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข ถนนติวานนท์

#### นนทบุรี

- สภาอุตสาหกรรมแห่งประเทศไทย ศูนย์การประชุมแห่งชาติสิริกิติ์ กทม.
- การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โรงไฟฟ้าบางปะกง อ.บางปะกง ฉะเชิงเทรา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

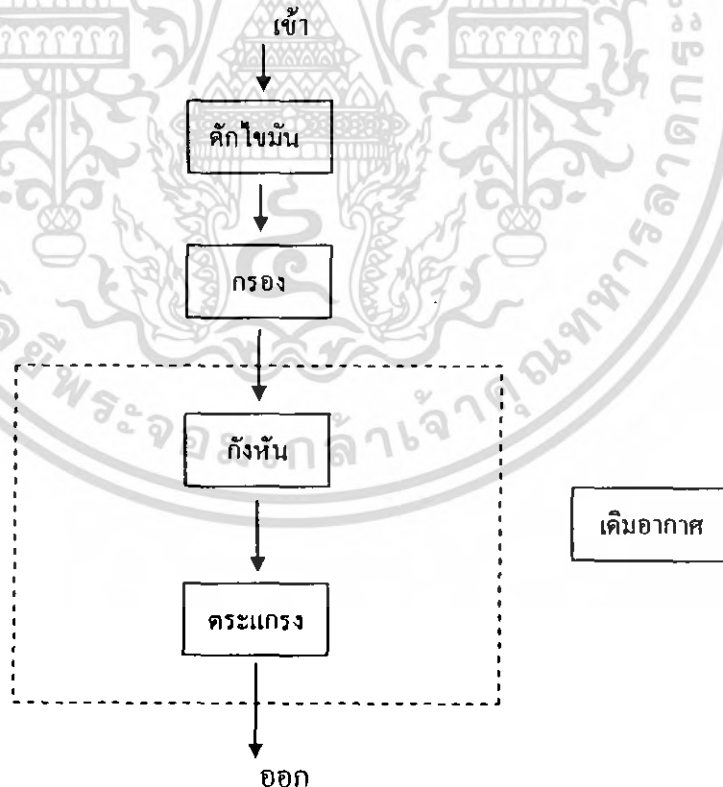
- บ.วิศวกรรมเคมี จก. เขตพระโขนง กทม.
- บ.ไอคิวเอน-นอร์เวส แล็บส์ จก. เขตบางกะปิ กทม.
- บ.ซีวิคและสิ่งแวดล้อม จก. เขตสวนหลวง กทม.
- บ. แอร์ แอนด์ เวสต์ เทคโนโลยี จก. ถ.สุขุมวิท 68 เขตบางนา กทม.
- บ. โกลู โคชัน จก. ถ.กิ่งแก้ว อ.บางพลี สมุทรปราการ
- บ. คูริตะ-จีเค เคมีคอล จก. นิคมอุตสาหกรรมบางพลี สมุทรปราการ
- บ.เวลโกรว์ อินคัสทรีส์ จก. นิคมอุตสาหกรรมเวลโกรว์ อ.บางพระ กง ฉะเชิงเทรา

ในการศึกษาครั้งนี้ได้คัดเลือกวิเคราะห์น้ำที่ ภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เนื่องจาก มีราคาถูก โดยเพียงคิดราคาค่าสารเคมี ตัวอย่างละ 1000 บาทเท่านั้น ค่าการวิเคราะห์ทุกตัวแปร และจะต้องเข้าไปปฏิบัติการด้วยตนเอง ซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มความรู้และประสบการณ์ในการตรวจวิเคราะห์น้ำ

### 3.2.3 การหาโรงงานที่จะเข้าไปทำการทำสอบ

เป็นโรงผลิตน้ำมันไบโอดีเซลสำหรับชุมชนใน อ. บางพลี จ.สมุทรปราการ โดยติดต่อผ่านทางบริษัท บีเอ็นบี อินเดอร์ กรุ๊ป จำกัด ซึ่งเป็นบริษัทเกี่ยวกับการสร้างระบบควบคุมที่อนุรักษ์พลังงาน

### 3.2.4 การออกแบบระบบ



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในระบบบำบัดน้ำเสีย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4.1 กระบวนการดักไขมัน

เป็นระบบปิดซึ่งใช้แนวคิดการแยกชั้นของน้ำกับน้ำมัน โดยใช้น้ำที่จากเครื่องปรับอากาศผ่านระบบเพื่อให้น้ำตัวอย่างเย็นตัวลงและทำให้ชั้นไขมันแข็งตัวลอยอยู่บนชั้นของน้ำ

เนื่องจากกระบวนการนี้เป็นระบบปิด อาจทำให้มีก๊าซเกิดขึ้นในระบบจึงจำเป็นต้องมีระบายอากาศเพื่อลดความดันภายในระบบ และต้องกรองกลิ่นก่อนปล่อยออกสู่ภายนอก

สาเหตุที่นำกระบวนการดักไขมันมาทำเป็นกระบวนการแรก เพราะการทำให้ไขมันแข็งตัวอาจมีเศษตะกอนติดชั้นไขมันที่แข็งตัวออกมาด้วย

### 3.2.4.2 กระบวนการกรอง

เพื่อกรองสิ่งสกปรกที่ปะปนอยู่ออกจากน้ำ โดยใช้

แนวคิดที่ 1 ใช้ฟิวเตอร์ เนื่องจากมีประสิทธิภาพที่แน่นอน

แนวคิดที่ 2 ใช้วัสดุธรรมชาติ เช่น กรวด ทราย ต่ำลิ ถ่าน เนื่องจากเป็นของที่หาได้ง่ายใน

ท้องถิ่นและต้นทุนต่ำ

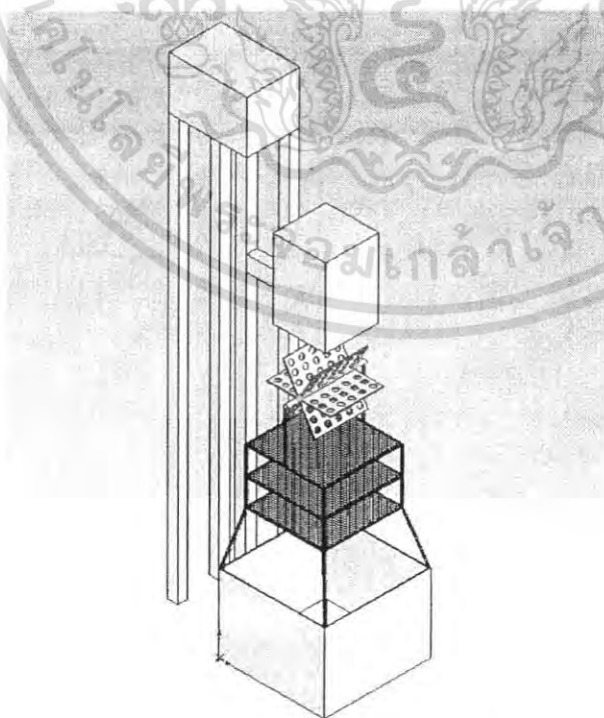
### 3.2.4.3 กระบวนการเติมอากาศ

- กังหัน โดยให้น้ำไหลผ่านกังหันที่มีรูพรุน

- ตะแกรง โดยให้น้ำไหลผ่านตะแกรงที่มีรูขนาดเล็กหลายๆชั้น โดยที่แต่ละชั้นมีตำแหน่งของรูไม่ตรงกัน

เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการให้น้ำสัมผัสกับอากาศ

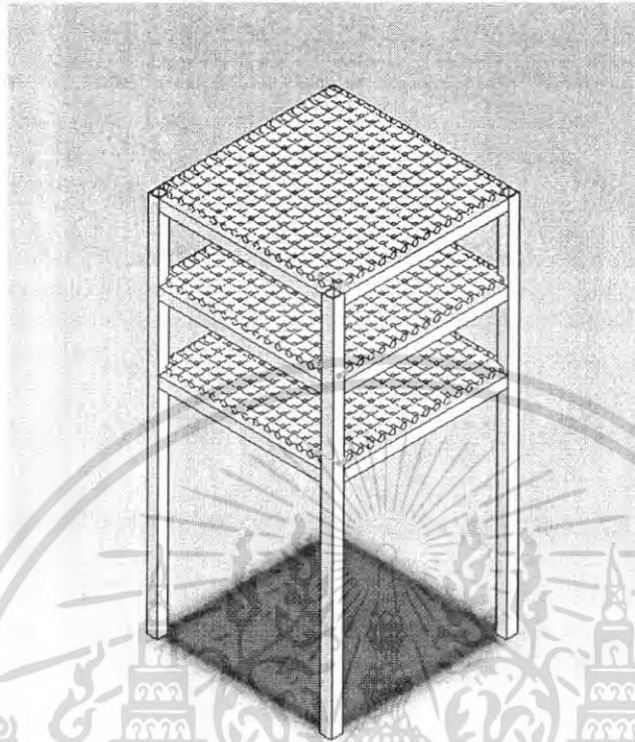
### 3.2.5 การออกแบบตัวเครื่อง



รูปที่ 3.2 การออกแบบอุปกรณ์เบื้องต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.6 การปรับปรุงแบบให้เหมาะสม



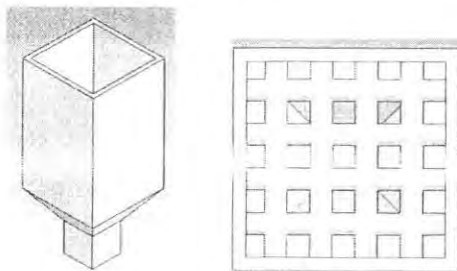
รูปที่ 3.3 ตะแกรงเติมอากาศที่ปรับปรุงแล้ว

### 3.2.7 การวิเคราะห์คุณภาพน้ำตัวอย่าง

นำน้ำตัวอย่างไปตรวจวิเคราะห์ที่ ภาควิชาสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยใช้งบประมาณทั้งหมดในการตรวจสอบ 1,000 บาท (ค่าสารเคมี) ได้ผลการทดสอบดังนี้

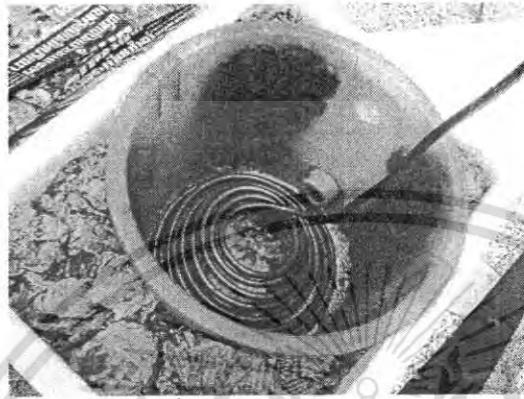
pH	9.18
BOD	38,000 mg/L
COD	72,960 mg/L
Grease/Oil	3,697 mg/L
Conductivity	233 $\mu$ s/cm

### 3.2.8 การออกแบบและสร้างตัวกรอง โดยอะคริลิกเป็นวัสดุที่ใช้ทำโครงตัวกรอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.4 แบบส่วนกรองของเสีย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.9 การประกอบส่วนดักไขมันและหุ้มฉนวน โดยใช้ถังพลาสติก และลวดทองแดงประกอบอุปกรณ์ทั้งหมดในส่วนนี้เข้าด้วยกันและนำถังดักไขมันที่เสร็จสมบูรณ์แล้วมาหุ้มฉนวน ในที่นี้ฉนวนที่ใช้เป็นกลองโพนและ กระดาษหนังสือพิมพ์ชุบน้ำ ดังภาพ



รูปที่ 3.5 ส่วนดักไขมันเดิม

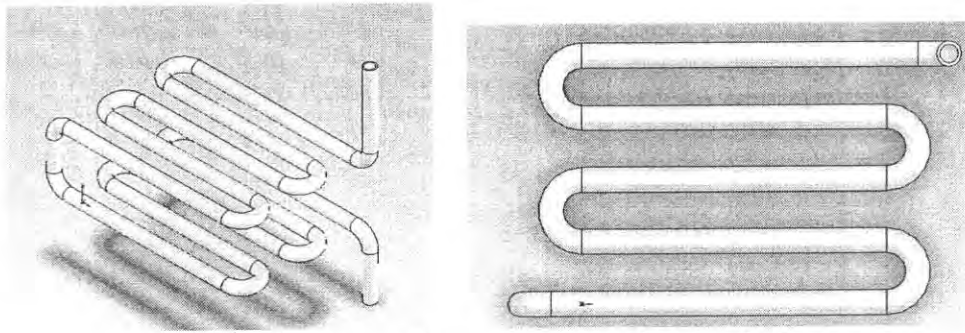


รูปที่ 3.6 ส่วนดักไขมันเดิมพร้อมฉนวนหุ้ม

3.2.10 การทดสอบส่วนดักไขมัน นำน้ำที่ได้จากการล้างใบ โอ๊คเชล ณ สถานที่จริง มาทำการทดลอง โดยใช้ น้ำเย็นที่อุณหภูมิ 2-5 องศาเซลเซียส ผ่านท่อทองแดง เพื่อให้ไขมันแข็งตัว

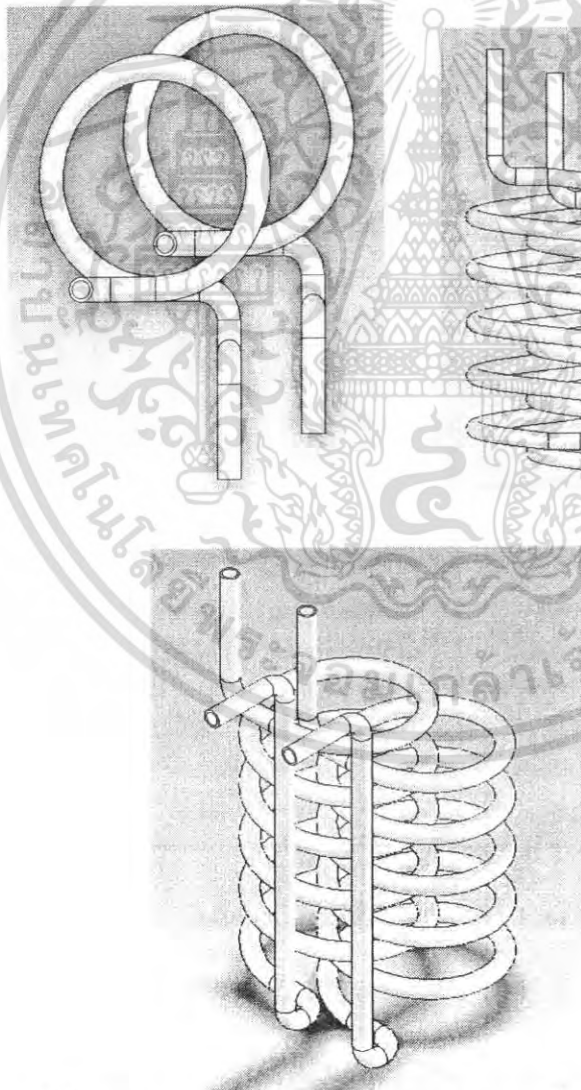
3.2.11 การออกแบบลักษณะการขดของท่อทองแดงใหม่ เนื่องจากท่อทองแดงในลักษณะเดิม ทำให้ใช้เวลาค่อนข้างช้าในการทำให้ไขมันแข็งตัว จึงมีแนวคิดในการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างท่อทองแดงกับน้ำเพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนได้ดีขึ้น ดังภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การออกแบบลักษณะการขดตัวของท่อทองแดงใหม่

แต่เนื่องจากถังกึ่งที่ทำนั้นมีขนาดเล็ก เพราะเป็นถังกึ่งแบบและท่อทองแดงมีขนาดที่เฉพาะ ทำให้ไม่สามารถขดให้เล็กมากได้ จึงได้ทำการออกแบบปรับปรุงลักษณะการขดของท่อทองแดงใหม่ ดังภาพ



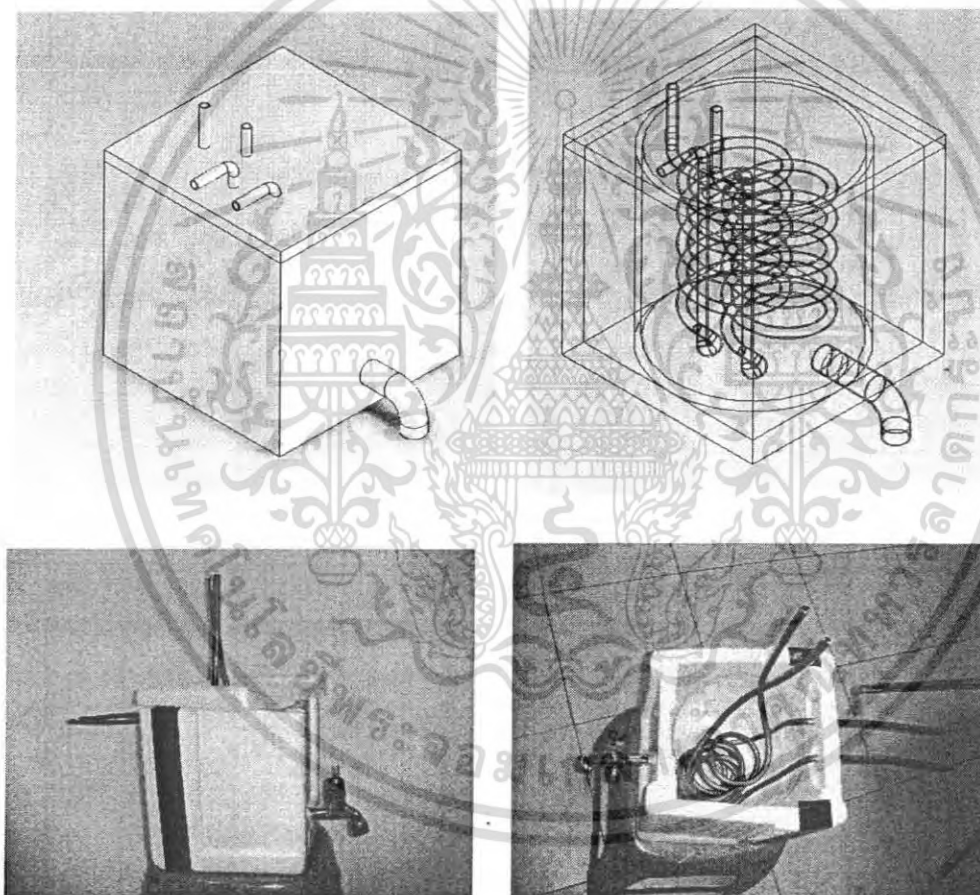
รูปที่ 3.8 การออกแบบลักษณะการขดของท่อทองแดงที่จะใช้ในระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.12 การจัดทำส่วนดักไขมันใหม่ เนื่องจากความไม่เหมาะสมหลายประการของถังเดิม เช่น

- ขนาดของถังที่ไม่สามารถหาฉนวนในขนาดที่พอดีได้
- ถังเดิมมีฐานขนาดกว้างเกินไป ไม่เหมาะสมกับปริมาณน้ำที่ใช้
- ด้วยปริมาณน้ำที่น้อย เมื่อไขมันแข็งตัวจะไปติดที่ท่อทองแดง ทำให้ดักออกยาก
- ท่อทองแดงที่ต้องเปลี่ยนแบบใหม่
- ปัญหาการรั่วซึมเนื่องจากขนาดที่ไม่พอดี

จึงทำการจัดทำส่วนดักไขมันใหม่ โดยใช้รูปแบบเดิม แต่ปรับขนาดให้สูงขึ้นและฐานแคบลง โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 13 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร และได้ลงในกล่องโพลีเอทิลีนซึ่งทำหน้าที่เป็นฉนวน ดังภาพ



รูปที่ 3.9 ส่วนดักไขมันใหม่

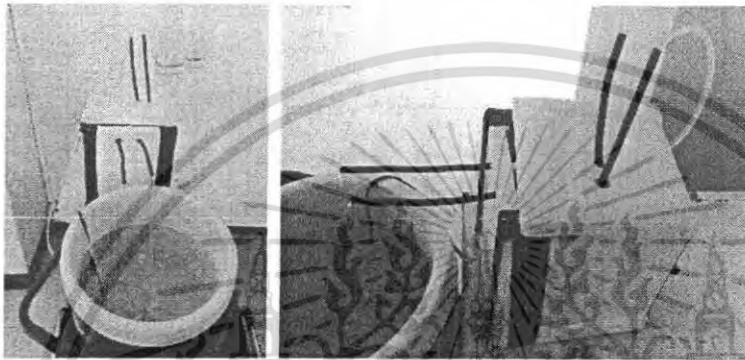
### 3.2.13 การปรับปรุงวิธีการนำน้ำเย็นผ่านท่อทองแดง โดยวิธีเดิมคือการดักน้ำใส่ท่อผ่านกรวย ซึ่งวิธีนี้มีข้อเสียคือ

- อัตราการไหลไม่คงที่
- น้ำไหลไม่ต่อเนื่อง
- ต้องเปลี่ยนถ่านน้ำเย็นบ่อยเนื่องจากน้ำทิ้งลงคนละจุดซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิของน้ำไม่คงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

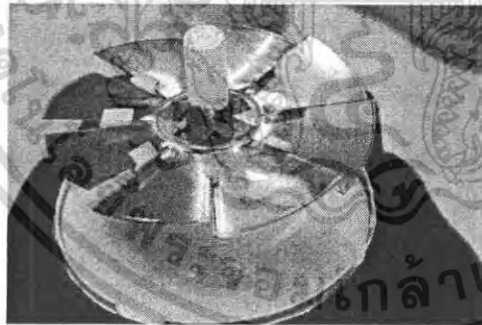
ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะเป็นปัจจัยทำให้ไขมันแข็งตัวช้าลง ทางกลุ่มจึงปรับปรุงวิธีโดยการใช้น้ำหมุนเวียนน้ำ ซึ่งจะสามารถช่วยแก้ปัญหาได้ (ซึ่งการใช้น้ำเป็นการช่วยให้ผลการทดลองแม่นยำขึ้นเท่านั้น ถ้าทำอุปกรณ์นี้ไปจริง และมีอัตราน้ำเย็นมากเพียงพอ ก็ไม่จำเป็นต้องใช้น้ำ)

3.2.14 การทดลองส่วนดักไขมันใหม่ หลังจากที่ได้พัฒนาส่วนดักไขมันให้ดีขึ้น จึงได้มีการทดสอบส่วนดักไขมันที่ประกอบขึ้นใหม่ โดยยังคงใช้น้ำที่อุณหภูมิ 2-5 องศาเซลเซียสเช่นเดิม



รูปที่ 3.10 ขณะทำการทดลองส่วนดักไขมันใหม่

3.2.15 การประกอบกังหัน โดยจัดทำขึ้นเพิ่มเติมเพื่อเพิ่มส่วนเติมอากาศให้มากขึ้น โดยได้ดัดแปลงจากแบบที่ออกแบบไว้ในตอนต้น ดังภาพ



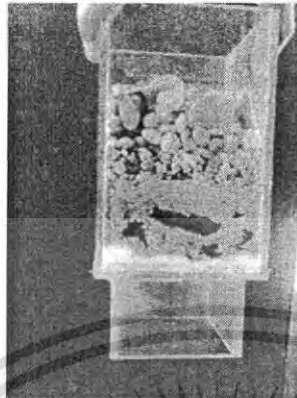
รูปที่ 3.11 กังหันก่อนการปรับปรุง

โดยมีแนวคิดสองแนวคิดคือ

- จัดทำกลไกให้กังหันหมุนโดยใช้แรงคน โดยวิธีนี้จะไม่เปลืองพลังงาน แต่ต้องใช้แรงคน อาจจะไม่สะดวกสบาย
- ใช้มอเตอร์ทำให้กังหันหมุน สะดวก แต่ต้องใช้พลังงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.16 การทดสอบทิศทางการไหลของน้ำผ่านตัวกรองธรรมชาติ โดยตัวกรองธรรมชาติดังกล่าวประกอบด้วย ลำต้น ถ่านทราย กรวดละเอียด กรวดหยาบ และ หิน



รูปที่ 3.12 ตัวกรอง

3.2.17 การปรับปรุงแบบกั้งหัน และ ติดตั้ง โดยเลือกวิธี ใช้แรงคนในการทำให้กั้งหันหมุน พร้อมทั้งปรับรูปแบบของกั้งหันให้มีขนาดหน้ากว้างขึ้นและรูปร่างสัมพันธ์กับทิศทางการไหลของน้ำ



รูปที่ 3.13 แบบกั้งหันที่ปรับปรุงแล้ว

3.2.18 การทดสอบความทนทานของตัวกรอง โดยการนำน้ำที่ผ่านกระบวนการดักไขมันแล้ว มาผ่านตัวกรองเดิมทีละ 1 ลิตร ไปเรื่อยๆ โดยสังเกตน้ำตัวอย่างที่ผ่านตัวกรองในแต่ละครั้งว่ามีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันอย่างไร และสังเกตว่าลักษณะน้ำในชั้นใดที่ถือว่าตัวกรองไม่สามารถกรองได้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.19 การนำน้ำตัวอย่างมาผ่านอุปกรณ์ และนำไปวิเคราะห์หาค่าตัวแปรต่างๆ โดยนำน้ำปริมาตร 1500 มิลลิลิตร ผ่านอุปกรณ์ดังกล่าว



รูปที่ 3.14 อุปกรณ์ทั้งระบบระหว่างนำน้ำผ่าน

จากนั้นนำน้ำที่ผ่านกระบวนการมาวัดปริมาตรเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนหลัง



รูปที่ 3.15 น้ำที่ผ่านอุปกรณ์มาวัดปริมาตร

3.2.20 การเปรียบเทียบตัวแปรที่ได้ กับ มาตรฐานน้ำ นำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับมาตรฐานน้ำทั้ง

3.2.21 การคำนวณหาค่าต่างๆ โดยผลที่วัดได้ แสดงไว้ในบทที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

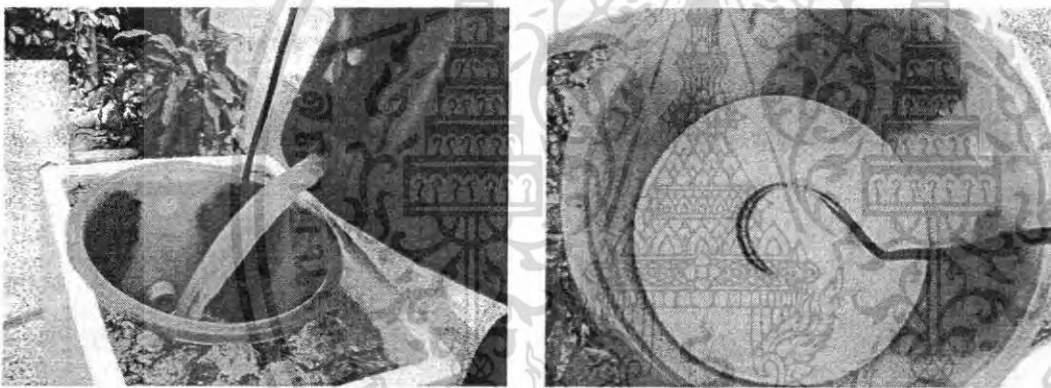
### ผลการดำเนินงาน

ผลจากการออกแบบและจัดสร้างอุปกรณ์สำหรับบำบัดน้ำเสียจากการทำความสะอาดในกระบวนการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ สามารถสรุปได้ดังนี้

#### 4.1 ส่วนดักไขมัน

##### 4.1.1 ส่วนดักไขมันเดิม

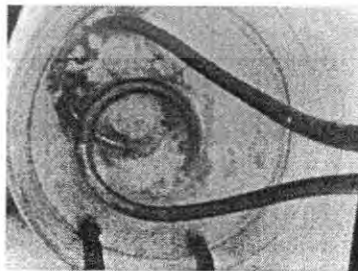
ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง ไขมันจะจับตัวเป็นก้อนพอที่จะตักออกไปได้



รูปที่ 4.1 ผลการทดลองส่วนดักไขมันเดิม

##### 4.1.2 ส่วนดักไขมันใหม่

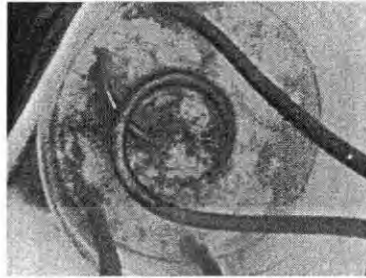
หลังจากการปรับปรุงให้ดีขึ้นผลการทดสอบเป็นดังนี้  
ที่เวลา 20-45 นาที ไขมันจับตัวเป็นก้อนพอที่จะตักทิ้งได้



รูปที่ 4.2 ผลการทดลองส่วนดักไขมันใหม่ ที่ 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเวลา 60 นาที น้ำเริ่มกลายเป็นน้ำแข็ง และเกาะตัวบริเวณท่อทองแดง



รูปที่ 4.3 ผลการทดลองส่วนดักไขมันใหม่ที่ 60 นาที

โดยจะเลือกใช้เวลาที่ 30 นาทีในการปฏิบัติงานจริง ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถสรุปได้ว่า ส่วนดักไขมันที่จัดทำขึ้นใหม่ สามารถลดเวลาการแข็งตัวของไขมันได้มากถึง 2 ชั่วโมง 30 นาที

ในส่วนของปริมาณน้ำ น้ำเข้ามีปริมาตร 1.5 ลิตร หลังจากผ่านอุปกรณ์ น้ำที่ออกมา วัดปริมาตรโดยน้ำที่ออกมามีปริมาตร 1.35 ลิตร

เวลาที่น้ำ 1.5 ลิตร ใช้ในการผ่านอุปกรณ์ทั้งระบบ คือ 37 นาที

#### 4.2 ตัวกรอง

น้ำที่ผ่านกระบวนการดักไขมันแล้ว มาผ่านตัวกรองเดิมทีละ 1 ลิตร หลังจากให้น้ำผ่านไป แล้ว 50 ลิตร น้ำที่ผ่านยังคงมีลักษณะทางกายภาพเหมือนกับการนำน้ำมาผ่านในครั้งแรก จึงสามารถสรุปได้ว่า ที่น้ำ 50 ลิตร ตัวกรองยังมีประสิทธิภาพกรองได้ 100%



รูปที่ 4.4 การวัดประสิทธิภาพตัวกรอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 คุณภาพน้ำหลังจากผ่านอุปกรณ์

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่ามาตรฐานน้ำ

คุณสมบัติ	มาตรฐาน	คุณภาพน้ำก่อนผ่านอุปกรณ์	คุณภาพน้ำหลังการผ่านอุปกรณ์
ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	9.18	8.8
ค่า TDS (Total Dissolve Solids)	3,000-5,000 mg/L	206 mg/L	70 mg/L
BOD5	20-60 mg/L	38,000 mg/L	1767 mg/L
COD	120-400 mg/L	72,960 mg/L	8340 mg/L
ไขมัน และ น้ำมัน	5-15 mg/L	3,697 mg/L	22 mg/L
อุณหภูมิ	ไม่เกิน 40 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิห้อง	อุณหภูมิห้อง
สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงประสงค์	มีกลิ่นฉุน	กลิ่นเบาบาง

จะเห็นว่าค่าคุณภาพน้ำหลังผ่านอุปกรณ์มีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับค่าคุณภาพน้ำก่อนผ่านอุปกรณ์ แต่ก็ยังไม่ได้มาตรฐาน โดยสาเหตุที่น้ำไม่ได้มาตรฐาน ส่วนหนึ่งอาจเป็นเพราะ ในช่วงที่จะทำการทดสอบก่อนส่งน้ำไปวิเคราะห์ ทางบริษัทไม่ได้ทำการผลิตน้ำมันไบโอดีเซล ทำให้ต้องใช้ถังใช้น้ำจากครั้งที่แล้วที่ค้างอยู่ในถังเป็นระยะเวลาประมาณหนึ่ง ทำให้ปริมาณจุลินทรีย์เพิ่มมากขึ้น ค่าบีโอดี และ ซีโอดี จึงสูงมากขึ้นกว่าตอนที่นำไปทดสอบก่อนผ่านอุปกรณ์

### 4.4 การคำนวณค่าต่างๆ

#### 4.4.1 ค่าคงที่

$$k_{25^{\circ}c} = 399.23(W / m \cdot K)$$

$$c_{H_2O} = 4.186(kJ / kg \cdot K)$$

$$\rho_{H_2O} = 1000(kg / m^3)$$

#### 4.4.2 อัตราการถ่ายเทความร้อนที่คำนวณได้จากการทดสอบ

$$q = \frac{mc\Delta T}{t}$$

$$q = \frac{\rho V c \Delta T}{t}$$

$$q = \frac{(1,000)(0.0015)(4.186 \times 1000)(298 - 277)}{30 \times 60}$$

$$q = \frac{131,859}{1,800}$$

$$q = 73.255(W)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4.3 ค่าสัมประสิทธิ์ผลของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}} = \frac{c_c (T_{c,out} - T_{c,m})}{c_{min} (T_{h,m} - T_{c,m})}$$

$$\varepsilon = \frac{4 - 2}{25 - 2}$$

$$\varepsilon = \frac{2}{23}$$

$$\varepsilon = 0.08696$$

$$\varepsilon \approx 8.7\%$$

เนื่องจาก  $c_c = c_h = c_{H_2O}$

#### 4.4.4 ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด

$$\varepsilon = \frac{q_{act}}{q_{max}}$$

$$8.7\% = \frac{73.255}{q_{max}}$$

$$q_{max} = \frac{73.255}{8.7\%}$$

$$q_{max} = 842.01(W)$$

#### 4.4.5 ประสิทธิภาพของอุปกรณ์

$$efficiency = \frac{1.35(L)}{1.5(L)} \times 100\%$$

$$efficiency = 90\%$$

#### 4.4.6 ความสามารถของอุปกรณ์

$$ความสามารถ = \frac{15(L)}{37(\text{min})}$$

$$ความสามารถ = 0.405 L / \text{min}$$

#### 4.4.7 อัตราการไหลของน้ำเย็น (จากปั๊มน้ำ)

$$\dot{m} = 2000(L/hr)$$

$$\dot{m} = 2(m^3/hr)$$

$$\dot{m} = 5.55 \times 10^{-4} (m^3/s)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการดำเนินงานและอภิปรายผล

#### 5.1 สรุปและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน

จากผลการทดลอง จะเห็นได้ว่า ค่าคุณภาพน้ำหลังผ่านอุปกรณ์มีค่าลดลงมากเมื่อเทียบกับค่าคุณภาพน้ำก่อนผ่านอุปกรณ์ แต่ก็ยังไม่ได้ค่าตามมาตรฐานน้ำทิ้งทั้งนี้อาจเป็นผลมาจาก

1. ในส่วนดักไขมัน เนื่องจากอุปกรณ์มีข้อจำกัดด้านขนาด จึงทำให้ใช้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์ได้ไม่เต็มที่ซึ่งเห็นได้จากการคำนวณ แต่จากทฤษฎีแล้ว ถ้านำอุปกรณ์ต้นแบบนี้ไปปรับปรุงแบบสำหรับใช้งานจริงในกำลังการผลิตที่สูง น่าจะทำให้สามารถใช้อุปกรณ์ได้เต็มประสิทธิภาพ
2. อุปกรณ์ต้นแบบนี้ถูกออกแบบมาโดยมีข้อจำกัดคือ ไม่ใช้สารเคมี และประหยัดพลังงาน ซึ่งผลออกมาแล้วสามารถเพิ่มคุณภาพน้ำได้มาก แต่ยังไม่ได้มาตรฐาน ซึ่งถ้าเพิ่มการใช้พลังงาน และสารเคมีเพิ่มเติมโดยไม่กระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากนัก แล้วทำให้น้ำได้มาตรฐาน ก็เป็นสิ่งที่ควรกระทำ
3. อุปกรณ์นี้ถูกออกแบบเพื่อไปใช้งาน ณ สถานที่ผลิตจริง แต่ในการนี้ น้ำตัวอย่างมีการเก็บไว้เป็นระยะเวลาหนึ่ง เพื่อสะดวกในการทำงาน จึงทำให้ค่ามาตรฐานที่ได้อาจจะคลาดเคลื่อนจากความจริงเล็กน้อย

#### 5.2 แนวทางในการพัฒนาและปรับปรุง

1. กังหันในระบบนั้น การทดสอบมีการใช้แรงคนช่วยให้กังหันหมุน แต่ถ้านำไปใช้งานจริง น้ำจะมีปริมาณมาก แรงน้ำจะช่วยให้กังหันสามารถหมุนได้เอง
2. ในส่วนดักไขมัน จากการทดลองเมื่อไขมันแข็งตัว จะทำการดักไขมันออกโดยใช้ช้อน ถ้ามีการติดตั้งที่ดักไขมันไว้บริเวณส่วนบนของส่วนดักไขมัน จะเป็นการเพิ่มความสะดวกสบายมากขึ้น

## หนังสืออ้างอิง

1. กรองแก้ว ทิพย์ศักดิ์, พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย,ปฏิบัติการเคมีสิ่งแวดล้อม1 ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ผศ. ดร. สรรพสิทธิ์ ลิ้มนรรรัตน์, เอกสารประกอบการเรียน วิชา Pollution control and waste treatment ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. ร.ศ. สุรินทร์ ศรีชัยนิตย์, การถ่ายเทความร้อน, สำนักพิมพ์ ส.ส.ท.
4. เอกสารจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
5. เอกสารจาก บริษัท บีเอ็นบี อินเตอร์ กรุ๊ป จำกัด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้