รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

เครื่องระเหยแบบฟิล์มบางเพื่อนำสารตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่

Thin film evaporator for recycle washing solvent

นางสาวอัชฌมาภรณ์ ทองเปลว

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงงานสหกิจศึกษา เครื่องระเหยแบบฟิล์มบางเพื่อนำสารตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่

นักศึกษา นางสาวอัชฌมาภรณ์ ทองเปลว

คณะ วิศวกรรมศาสตร์ **ภาควิชา** วิศวกรรมเคมี

อาจารย์นิเทศ ผศ.ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา

ผู้นิเทศงาน นายกำธร ลิมปนพรชัยกุล

สถานประกอบการ บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด

บทคัดย่อ

บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด เป็นผู้ผลิตเรซิ่นสังเคราะห์ชั้นนำของประเทศไทย ซึ่งทางบริษัทมีการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มกำลังการผลิต และคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น อีกทั้งยังคำนึงถึงการลดค่าใช้จ่ายในการผลิตและการประหยัดพลังงาน บริษัทจึงมีโครงการใช้เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง สำหรับกระบวนการระเหยสารทำตัวละลายที่ปนเปื้อนให้บริสุทธิ์ และนำสารทำตัวละลายกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการล้างสารที่ตกค้างอยู่ในถังทำปฏิกิริยา ท่อและอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์ในการผลิตต่อไปมีปนเปื้อน ทางบริษัทจะทำการออกแบบกระบวนการและระบบการทำงานของอุปกรณ์ของโครงการด้วยตนเอง ซึ่งได้มีการประเมินจากการชี้บ่งอันตรายของกระบวนการ และการปฏิบัติงาน (Hazard and Operability Study, HAZOP) เพื่อความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน จากนั้นจะจ้างบริษัทผู้ผลิตสินค้า ให้คำนวณและออกแบบอุปกรณ์ โครงงานสหกิจศึกษานี้จะทำการศึกษาหลักการทำงาน และตรวจสอบการออกแบบของอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการบวนการที่ออกแบบมาใหม่ ซึ่งประกอบด้วย เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง ถังเก็บสารเคมี และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากผลการคำนวณการออกแบบอุปกรณ์ พบว่าที่จัดซื้อนั้น มีความเหมาะสมและสามารถใช้งานได้ จากนั้นจึงจัดทำแม่แบบสำหรับการออกแบบ ในโปรแกรม Microsoft Excel ดังกล่าวเพื่อเป็นประโยชน์แก่บริษัทต่อไป

คำสำคัญ : เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง ถังเก็บสารเคมี เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน แม่แบบสำหรับการออกแบบ ในโปรแกรม Microsoft Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cooperative Title: Thin film evaporator for recycle washing solvent
Student Intern Name: Achamaporn Thongplew
Faculty: Engineering **Department :** Chemical Engineering
Advisor: Amata Anantpinijwatna
Mentor: Kamthorn Limpanapornchaikul
Company: Siam Chemical Industry Co., Ltd.

ABSTRACT

Siam Chemical Industry Co., Ltd. is a leading synthetic resin manufacturer in Thailand. The company is continuously developing the production processes to increase production capacity and improved product quality. It also considers the reduction of production costs and energy savings. The company intended to use thin film evaporator for the purification of contaminated solvents. Thus, the solvent can be reused in the process of washing the residue in the reactor, pipes and equipment to prevent contaminated products in the production. The company design processes and equipment control systems. This design has been evaluated by Hazard and Operability Study (HAZOP) for operator safety. Then, the company was hired to calculate and design of the equipment. This project will study the working principle and calculations to check the design of the devices as follows: thin film evaporator, storage tanks and heat exchangers. The calculation results confirmed that the designs from the manufacturer are suitable for the process. The equipment purchased is suitable and can be used. Lastly, the Microsoft Excel templates for these equipment calculations are created for the company to use in the future.

Keyword : Thin film evaporator, Pressure vessel, Heat exchanger, Microsoft Excel template

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

การฝึกปฏิบัติสหกิจศึกษา ณ บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด ในครั้งนี้ ประสบความสำเร็จได้ด้วยความกรุณาและการอนุเคราะห์อย่างยิ่งจาก บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด ที่ได้มอบทุนการศึกษาและให้โอกาสได้เข้ามาฝึกปฏิบัติสหกิจศึกษา และพนักงานแผนกเทคนิคการผลิต ที่คอยอบรมและสอนงาน และให้คำแนะนำในการเขียนรายงานสหกิจศึกษาฉบับนี้ รวมทั้งพนักงานท่านอื่น ๆ ที่คอยให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการฝึกปฏิบัติสหกิจศึกษาในครั้งนี้ ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.อมตะ อนันต์พินิจวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผศ.ดร.ภัทรานิษฐ์ วงศ์พร้อมรัตน์ ซึ่งได้เสียสละเวลาอันมีค่าในการให้คำปรึกษา ให้ข้อคิดเห็น ความรู้และคำแนะนำตลอดจนการตรวจแก้ไขรายงานให้ถูกต้อง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านของภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่ได้ให้การอบรมสั่งสอนวิชาความรู้ต่าง ๆ ทำให้สามารถนำความรู้ที่ได้รับเหล่านั้นมาใช้พัฒนาโครงงานสหกิจศึกษานี้ได้

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่คอยให้กำลังใจ ให้โอกาสในการศึกษาและให้การสนับสนุนในทุกเรื่องเสมอมา

อัชฌมาภรณ์ ทองเปลว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

บทคัดย่อ I

ABSTRACT II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง VI

สารบัญภาพ VII

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 1

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2

บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 3

2.1 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มบาง ที่มีการกวน (Agitated Thin-Film Evaporator) 3

2.2 ถังรับแรงดัน (Pressure Vessel) 9

2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 27

บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย 43

3.1 การศึกษากระบวนการผลิตและการทำงานของอุปกรณ์ 43

3.2 การคำนวณเพื่อตรวจสอบการออกแบบของอุปกรณ์ 46

3.3 การจัดทำแม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel 47

3.4 การทดสอบและปรับปรุงแม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel 47

บทที่ 4 ผลการวิจัย 48

4.1 ขั้นตอนกระบวนการระเหยและการทำงานของอุปกรณ์ 48

4.2 การคำนวณเพื่อตรวจสอบการออกแบบของอุปกรณ์ 48

4.3 แม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel 51

บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ 57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 สรุปผลการวิจัย 57
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย 57
บรรณานุกรม 58
ภาคผนวก 59
ภาคผนวก ก. 60
ภาคผนวก ข. 75
ภาคผนวก ค. 80
ภาคผนวก ง 87
ภาคผนวก จ 96
ประวัติผู้วิจัย 102

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 ค่าของตัวประกอบ M 15
ตารางที่ 2.2 ผลของการเปรียบเทียบค่าของตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย 39
ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 49
ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบค่าการออกแบบของถังเก็บสารเคมี 50
ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบค่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 50
ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงข้อมูลของแม่แบบสำหรับการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 52
ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงข้อมูลของแม่แบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง 53
ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงข้อมูลของแม่แบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน 55
ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงข้อมูลของแม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 56
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 75
ตารางที่ ข.2 ข้อมูลของถังเก็บสารเคมี 76
ตารางที่ ข. 3 ข้อมูลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น 77
ตารางที่ ข. 4 ตารางแสดงผลการคำนวณของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 78
ตารางที่ ข.5 ตารางแสดงผลการคำนวณหาปริมาตรของถังเก็บสารเคมี 78
ตารางที่ ข.6 ตารางแสดงผลการคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังเก็บสารเคมี .. 79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่ 2.1 เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง ที่มีการกวน 3
ภาพที่ 2.2 สมดุลของมวลและความร้อนของเครื่องระเหยแบบขั้นเดียว 4
ภาพที่ 2.3 ความต้านทานในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 7
ภาพที่ 2.4 ความเค้นในผนังทรงกระบอก..... 10
ภาพที่ 2.5 ความหนาและรัศมีภายในของตัวถังทรงกระบอก (ตะเข็บตามยาว)..... 11
ภาพที่ 2.6 ความหนาและรัศมีภายในของถังทรงกลม และหัวถังครึ่งทรงกลม 12
ภาพที่ 2.7 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหัวถังครึ่งทรงรี 2:1..... 13
ภาพที่ 2.8 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกรวยและส่วนของกรวย..... 13
ภาพที่ 2.9 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหัวถังแบบหน้าแปลนและโค้ง (ASME F&D) (หัวถังทอริสเฟียริคอล)..... 14
ภาพที่ 2.10 ความหนาและรัศมีภายนอกของตัวถังทรงกระบอก (ตะเข็บตามยาว)..... 15
ภาพที่ 2.11 ความหนาและรัศมีภายนอกของถังทรงกลม และหัวถังครึ่งทรงกลม..... 16
ภาพที่ 2.12 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหัวถังครึ่งทรงรี 2:1..... 17
ภาพที่ 2.13 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของกรวยและส่วนของกรวย 17
ภาพที่ 2.14 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหัวถังแบบหน้าแปลนและโค้ง (ASME F&D) (หัวถังทอริสเฟียริคอล)..... 18
ภาพที่ 2.15 ถังทรงกระบอกแบบ (ก) ถังที่ไม่มีแหวนเสริมความแข็งแรง (ข) ถังที่มีแหวนเสริมความแข็งแรง 20
ภาพที่ 2.16 ทรงกลมและหัวถังครึ่งทรงกลมภายใต้ความดันภายนอก..... 21
ภาพที่ 2.17 หัวถังครึ่งทรงรี 2:1 ภายใต้ความดันภายนอก 22
ภาพที่ 2.18 หัวถังแบบ ASME หน้าแปลนและโค้ง (หัวถังทอริสเฟียริคอล) ภายใต้ความดันภายนอก 22
ภาพที่ 2.19 กรวยและส่วนของกรวย ไร้ตะเข็นหรือที่มีรอยต่อชนภายใต้ความดันภายนอก 23
ภาพที่ 2.20 ภาพแสดงตัวแปรในตัวถังทรงกระบอก 24
ภาพที่ 2.21 ภาพแสดงตัวแปรในหัวถังครึ่งทรงกลม 25
ภาพที่ 2.22 ภาพแสดงตัวแปรในหัวถังครึ่งทรงรี..... 25
ภาพที่ 2.23 ภาพแสดงตัวแปรในหัวถังทอริสเฟียริคอล 26
ภาพที่ 2.24 การแลกเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน 28
ภาพที่ 2.25 การแลกเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง 28
ภาพที่ 2.26 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก (ไหลตัดกัน)..... 29
ภาพที่ 2.27 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น..... 31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ 2.28 ส่วนประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ 32
ภาพที่ 2.29 ภาพแสดงการถ่ายเทความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงผ่านผนังท่อหรือผนังกั้นไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ..... 33
ภาพที่ 2.30 การเปรียบเทียบค่าตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย..... 39
ภาพที่ 2.31 ตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย 40
ภาพที่ 2.32 เส้นควบแน่นของไอยิ่งยวด..... 41
ภาพที่ 2.33 เส้นจุดน้ำค้างของไอผสม..... 42
ภาพที่ 3.1 แผนภาพการไหลของกระบวนการ (Process Flow Diagram, PFD)..... 43
ภาพที่ 3.2 แผนภาพการไหลของสารที่ถูกส่งไปยังเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง (PUTF-1) 44
ภาพที่ 3.3 แผนภาพการไหลของของสารที่ถูกส่งไปยังกระบวนการล้าง 44
ภาพที่ 3.4 แผนภาพการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น..... 44
ภาพที่ 3.5 แผนภาพการไหลขาเข้าของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง..... 45
ภาพที่ 3.6 แผนภาพการไหลของไอน้ำของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 45
ภาพที่ 3.7 แผนภาพการไหลของการบรรจุสารที่ไม่ระเหยจากของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง..... 45
ภาพที่ 3.8 แผนภาพแสดงคุณสมบัติของเส้นทางการไหล..... 46
ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับจำนวนใบกวนในเครื่องระเหย..... 49
ภาพที่ 4.2 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 51
ภาพที่ 4.3 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง.... 53
ภาพที่ 4.4 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน..... 54
ภาพที่ 4.5 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน..... 55
ภาพที่ ก.1 แผนภาพสำหรับหัวถังชนิดครึ่งทรงกลม ครึ่งทรงรี หน้าแปลนและโค้ง (F&D) ในการลองสมมติค่าความหนาต่าง ๆ..... 60
ภาพที่ ก.2 แผนภาพสำหรับตัวถังทรงกระบอก ในการลองสมมติค่าความหนาต่าง ๆ 61
ภาพที่ ก.3 ค่าของตัวประกอบ A ที่ในสมการสำหรับถังภายใต้แรงดันภายนอก..... 63
ภาพที่ ก.4 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน 64
ภาพที่ ก.5 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni, ชนิด 364) 65
ภาพที่ ก.6 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni, ชนิด 316) 65
ภาพที่ ก.7 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni-Mo, คาร์บอนสูงสุด 0.03 ชนิด 304L)..... 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ ก.8 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni-Mo,คาร์บอนสูงสุด 0.03, ชนิด 316L) 66
ภาพที่ ค.1 แผนภาพแสดงคุณสมบัติของเส้นทางการไหล 80
ภาพที่ ง.1 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 87
ภาพที่ ง.2 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง 88
ภาพที่ ง.3 แม่แบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง 88
ภาพที่ ง.4 การเลือกชนิดของก้นถัง 89
ภาพที่ ง.5 การเลือกชนิดของหัวถัง 89
ภาพที่ ง.6 การเลือกปริมาตรที่ต้องการทราบ 89
ภาพที่ ง.7 แม่แบบสำหรับการแสดงผลลัพธ์ของปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง 90
ภาพที่ ง.8 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน 90
ภาพที่ ง.9 แม่แบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน 91
ภาพที่ ง.10 การเลือกค่าที่ต้องการคำนวณ 91
ภาพที่ ง.11 การเลือกเทอมของสมการที่ใช้ในการคำนวณ 92
ภาพที่ ง.12 การเลือกชนิดหัวถังของถังรับแรงดัน 92
ภาพที่ ง.13 เลือกเงื่อนไขสำหรับหัวถังแบบหัวถังทอริสเฟียริคอล 92
ภาพที่ ง.14 แม่แบบสำหรับการแสดงผลลัพธ์ของความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน 93
ภาพที่ ง.15 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 93
ภาพที่ ง.16 แม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน . 94
ภาพที่ ง.17 การเลือกทิศทางการไหลของสาร 94
ภาพที่ ง.18 การเลือกอุณหภูมิที่ไม่ทราบค่า 94
ภาพที่ ง.19 การเลือกอัตราการไหลที่ไม่ทราบค่า 95
ภาพที่ ง.20 การเลือกการเปลี่ยนสถานะของผั่งเย็นและร้อน 95
ภาพที่ ง.21 แม่แบบสำหรับการแสดงผลลัพธ์ของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน 95
ภาพที่ จ.1 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของปั๊มสำหรับส่งสารไปยังเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง (PUTF-1) 96
ภาพที่ จ.2 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของปั๊มสำหรับส่งสารในกระบวนการล้าง (PUTF-2) 97

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพที่ จ.3 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของวาล์วควบคุมไอน้ำขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น 98
ภาพที่ จ.4 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของวาล์วควบคุมอัตราการไหลขาเข้าของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 99
ภาพที่ จ.5 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของวาล์วควบคุมไอน้ำขาเข้าของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 100
ภาพที่ จ.6 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของ Load Cell สำหรับการบรรจุสารที่ไม่ระเหยจากของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง 101

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด เป็นผู้ผลิตและจำหน่ายเรซิ่นสังเคราะห์ชั้นนำของประเทศไทย สำหรับอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมสีรถยนต์ สีสำหรับเครื่องใช้ไฟฟ้า เป็นต้น ในกระบวนการผลิตของทางบริษัท ผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีสูตรการผลิตที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงมีการใช้สารละลายที่แตกต่างกัน เช่น Ethyl Acetate, Acetone, Xylene เป็นต้น ในการทำความสะอาดเครื่องปฏิกรณ์ ท่อ และอุปกรณ์ในระบบ หลังการล้างเสร็จสิ้น สารตัวทำละลายจะถูกนำไปบรรจุใส่ถังเพื่อเก็บไว้สำหรับการล้างในการผลิตผลิตภัณฑ์นั้นครั้งต่อไป เมื่อสารทำตัวละลายถูกใช้ในการล้างหลายรอบแล้ว จะถูกส่งไปกำจัด โดยบริษัทอื่น ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายทั้งการจัดเก็บ และการกำจัด ดังนั้นทางบริษัทจึงมีโครงการในการใช้เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง (Thin Film Evaporator) สำหรับกระบวนการระเหยสารทำตัวละลายที่ปนเปื้อนให้บริสุทธิ์ และนำสารทำตัวละลายกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายได้จำนวณมาก และลดการใช้สารทำตัวละลายให้เหลือชนิดเดียวคือ Ethyl Acetate

ซึ่งในการดำเนินการโครงการครั้งนี้จ้างบริษัทผู้ผลิตสินค้า ให้คำนวณและออกแบบอุปกรณ์ โดยไม่ได้มีการคำนวณตรวจสอบซ้ำ จึงอาจเกิดเหตุการณ์ที่อุปกรณ์อาจไม่เหมาะสมกับกระบวนการผลิตของจริง อาจส่งผลให้ทางบริษัทเสียค่าใช้จ่าย เช่น มีการสูญเสียสารเคมีในระหว่างกระบวนการผลิต หรือจำเป็นต้องซื้อเครื่องมือและอุปกรณ์ใหม่เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิต เป็นต้น ดังนั้นในโครงงานสหกิจศึกษานี้จะทำการศึกษาหลักการทำงาน และการคำนวณเพื่อตรวจสอบการออกแบบของอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังนี้ เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง ถังเก็บสาร และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาระบบ และอุปกรณ์ ของกระบวนการนำสารตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ด้วยเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

1.2.2 ตรวจสอบการคำนวณจากบริษัทผู้ผลิต

1.2.3 สร้างแม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 กระบวนการนำสารตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ ด้วยเครื่องระเหยแบบฟิล์มบางของบริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด

1.3.2 อุปกรณ์ที่ศึกษา

1. เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง
2. ถังเก็บสารเคมี
3. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.3.3 แม่แบบสำหรับการคำนวณ ในโปรแกรม Microsoft Excel

1. คำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง
2. คำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง
3. คำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน
4. คำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เข้าใจระบบและการควบคุมกระบวนการนำสารตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ด้วยเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

1.4.2 ได้รับความรู้จากการออกแบบและการคำนวณของอุปกรณ์ต่าง ๆ

1.4.3 สามารถเปรียบเทียบและยืนยันผลการออกแบบอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ

1.4.4 สามารถประยุกต์ใช้แม่แบบการคำนวณที่สร้างขึ้น และสามารถพัฒนาต่อยอดได้ในอนาคต

1.4.5 ได้เรียนรู้ทักษะการทำงาน การคิดวิเคราะห์ และการทำงานร่วมกับผู้อื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

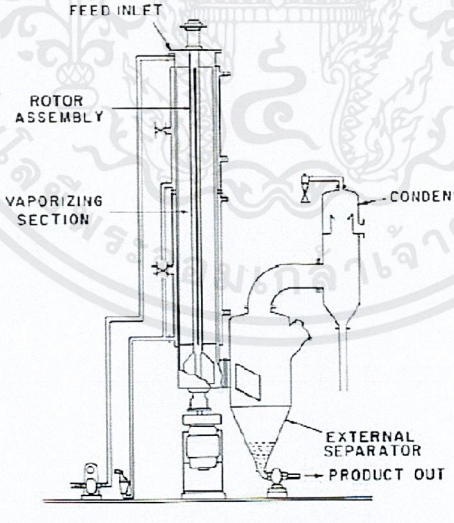
บทที่ 2
แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการทำโครงงานสหกิจศึกษานี้ ได้ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง ถังรับแรงดัน และเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยแบ่งเป็นหัวข้อ ดังนี้

2.1 เครื่องระเหยชนิดฟิล์มบาง ที่มีการกวน (Agitated Thin-Film Evaporator) [1]

เครื่องระเหยชนิดนี้ เหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูงมากโดยที่ของเหลวที่เข้าสู่เครื่องจะถูกเกลี่ยให้อยู่ด้านในของผิวให้ความร้อนทรงกระบอก โดยการใช้ใบมีดป้าย (wiper blades) เนื่องจากมีการกวนในอัตราสูง ทำให้สัมประสิทธิการถ่ายเทความร้อนสูงกว่ามากอย่างไรก็ตาม รูปร่างของเครื่องที่เป็นทรงกระบอกจะทำให้พื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนต่อหน่วยปริมาตร ของผลิตภัณฑ์ต่ำ ไอน้ำความดันสูงจะใช้เป็นตัวให้ความร้อนเพื่อให้อุณหภูมิของผนังสูงเพียงพอที่จะเกิดอัตราการระเหยที่เหมาะสม ข้อเสียที่เห็นได้เด่นชัดคือต้นทุนและค่าบำรุงรักษาสูง

ลักษณะของเครื่องระเหยอาจเป็นแบบแผ่น (plate-type) ก็ได้นอกจากรูปร่างเป็นท่อ (tubular shape) แล้ว ซึ่งเครื่องระเหยแบบแผ่นใช้หลักการของฟิล์มเคลื่อนที่ขึ้นและลง และการหมุนเวียนแบบบังคับ นอกจากนี้ขนาดยังกะทัดรัดกว่า ดังนั้นจึงใช้พื้นที่ติดตั้งน้อยกว่าชนิดท่อ และพื้นที่การถ่ายเทความร้อนจะง่ายต่อการตรวจสอบด้วย



ภาพที่ 2.1 เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง ที่มีการกวน

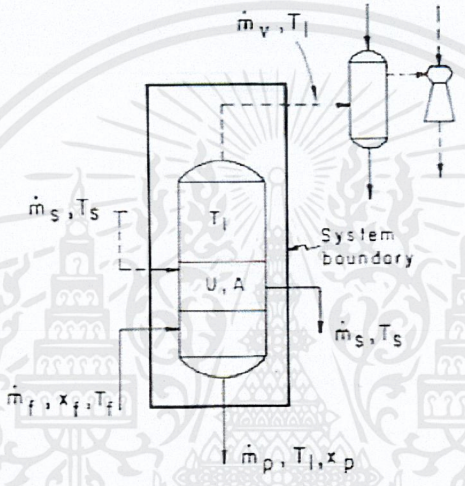
2.1.1 การออกแบบเครื่องระเหยแบบขั้นเดียว

เครื่องระเหยแบบขั้นเดียวในภาพที่ 2.2 นั้นของเหลวเจือจางจะถูกสูบเข้าไปยังห้องที่ให้ความร้อน (heating chamber) ซึ่งจะถูกทำให้ร้อนโดยทางอ้อมด้วยไอน้ำ ส่วนไอน้ำนั้นจะเข้าสู่เครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แลกเปลี่ยนความร้อนแล้วเกิดการควบแน่นปลดปล่อยความร้อนของการกลายเป็นไอแก่ของเหลวที่ป้อนเข้าไป และไอน้ำนี้จะออกจากเครื่องในลักษณะน้ำที่เรียกว่า คอนเดนเซท (condensate)

อุณหภูมิของการระเหย จะควบคุมได้โดยการใช้ระบบสุญญากาศภายในห้องที่ให้ความร้อน ไอที่ได้จากผลิตภัณฑ์จะส่งผ่านไปยังคอนเดนเซอร์เข้าสู่ระบบสุญญากาศ โดยทั่วไปจะใช้ สตีมอิเจ็กเตอร์ (steam ejector) หรือเครื่องสูบสุญญากาศ (vacuum pump) ในระบบที่ไม่ต่อเนื่องนั้น ของเหลวที่ส่งเข้าเครื่องจะได้รับความร้อนจนกระทั่งมีความเข้มข้นตามที่ต้องการ จากนั้นจึงจะสูบของเหลวเข้มข้น นั้นออกแบบระบบเครื่องระเหย



ภาพที่ 2.2 สมดุลของมวลและความร้อนของเครื่องระเหยแบบขั้นเดียว

สมดุลของมวลและความร้อนของระบบเครื่องระเหย สามารถใช้วิเคราะห์ตัวแปรในการทำงาน ของเครื่องแบบต่าง ๆ ได้ ตัวแปรดังกล่าวอาจจะเป็นอัตราการไหลของมวลความเข้มข้นสุดท้ายของผลิตภัณฑ์หรือพื้นที่ผิวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
สมดุลของมวลจะให้สมการต่อไปนี้

$$\dot{m}_f = \dot{m}_v + \dot{m}_p \tag{2.1}$$

เมื่อ $\dot{m}_f$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลวที่ป้อน (Feed), kg/s
$\dot{m}_v$ คือ อัตราการไหลของไอ, kg/s
$\dot{m}_p$ คือ อัตราการไหลของผลิตภัณฑ์เข้มข้น, kg/s

$$x_f \dot{m}_f = x_p \dot{m}_p \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ x_f คือ สัดส่วนของของแข็งในสายที่ป้อน

x_p คือ สัดส่วนของของแข็งในสายผลิตภัณฑ์

สมดุลของเอนทัลปีของระบบเครื่องระเหยจะได้สมการ

$$\dot{m}_f H_f\left(T_f, x_f\right)+\dot{m}_s H_v\left(T_s\right)=\dot{m}_v H_v\left(T_1\right)+\dot{m}_p H_p\left(T_1, x_p\right)+\dot{m}_s H_c\left(T_s\right) \qquad (2.3)$$

เมื่อ $\dot{m}_s$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำ, kg/s

H_f (T_f,x_f) คือ เอนทัลปีของของเหลวที่ป้อน, kJ/kg

H_p (T_1,x_p) คือ เอนทัลปีของผลิตภัณฑ์เข้มข้น, kJ/kg

H_v (T_s) คือ เอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัว ที่อุณหภูมิ T_s, kJ/kg

H_v (T_1) คือ เอนทัลปีของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_1, kJ/kg

H_c (T_s) คือ เอนทัลปีของคอนเดนเซท, kJ/kg

T_s คือ อุณหภูมิของไอน้ำ, °C

T_1 คือ อุณหภูมิของการเดือดที่ควบคุมภายในช่องระเหย, °C

T_f คือ อุณหภูมิของของเหลวที่ป้อน, °C

พจน์แรกในสมการที่ (2.3) เป็นเอนทัลปีของของเหลวที่ป้อนเข้าสู่เครื่องระเหย โดยคำนวณเอนทัลปีได้จาก

$$H_f\left(T_f, x_f\right)=c_{pf}\left(T_f-0\,^{\circ}C\right) \qquad (2.4)$$

พจน์ที่สอง $\dot{m}_s H_v$ (T_s) เป็นปริมาณความร้อนทั้งหมดของไอน้ำ โดยสมมติฐานว่าใช้ไอน้ำอิ่มตัว เอนทัลปีได้จากตารางไอน้ำ ที่อุณหภูมิ T_s

พจน์แรกทางด้านขวาของสมการ (2.3) $\dot{m}_v H_v$ (T_1) เป็นเอนทัลปีทั้งหมดของไอระเหยที่ออกจากระบบ ซึ่งได้จากตารางไอน้ำ โดยเป็นค่าของไอน้ำอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_1

พจน์ที่สองด้านขวา $\dot{m}_p H_p$ (T_1 , x_p) เป็นเอนทัลปีของผลิตภัณฑ์เข้มข้นที่ออกจากเครื่องระเหย เอนทัลปี H_p ได้จากสมการ

$$H_p\left(T_1, x_p\right)=c_{pp}\left(T_1-0\,^{\circ}C\right) \qquad (2.5)$$

เมื่อ c_{pp} คือ ความร้อนจำเพาะของผลิตภัณฑ์เข้มข้น, kJ/kg °C

พจน์สุดท้าย $\dot{m}_s$ H_c (T_s) เป็นเอนทัลปีของคอนเดนเซทที่ออกจากเครื่องระเหย เนื่องจากใช้เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสัมผัสโดยอ้อม ดังนั้นอัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำที่เข้า จึงเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการไหลของคอนเดนเซทที่ออกจากเครื่องระเหย และหาเอนทัลปี H_c (T_s) จากตารางไอน้ำโดยเป็นค่าเอนทัลปีของของเหลวอิ่มตัวที่อุณหภูมิ T_s ถ้าคอนเดนเซทออกจากเครื่องที่อุณหภูมิต่ำกว่า T_s ก็ต้องใช้ค่าอุณหภูมินั้นในการหาค่าเอนทัลปีของของเหลวอิ่มตัว

นอกจากการสมดุลมวลและเอนทัลปีแล้ว จะต้องใช้สมการอีกสองสมการในการคำนวณออกแบบและปัจจัยในการทำงานของระบบเครื่องระเหย

สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน สมการต่อไปนี้ใช้หาอัตราการถ่ายเทความร้อน

$$q = UA\left(T_s - T_1\right) = \dot{m}_s H_v\left(T_s\right) - \dot{m}_s H_c\left(T_s\right) \tag{2.6}$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน, W

U คือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม, $W/m^2.K$

A คือ พื้นที่ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน, m^2

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม จะลดลงเมื่อผลิตภัณฑ์มีความเข้มข้นมากขึ้น เนื่องจากความต้านทานการถ่ายเทความร้อนในส่วนของผลิตภัณฑ์ นอกจากนั้นจุดเดือดของผลิตภัณฑ์จะเพิ่มขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นมากขึ้น ในสมการ (2.6) จะใช้ค่าสัมสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมเพียงค่าเดียว และจะทำให้ผลการคำนวณออกแบบเครื่องมากเกินไป (overdesign)

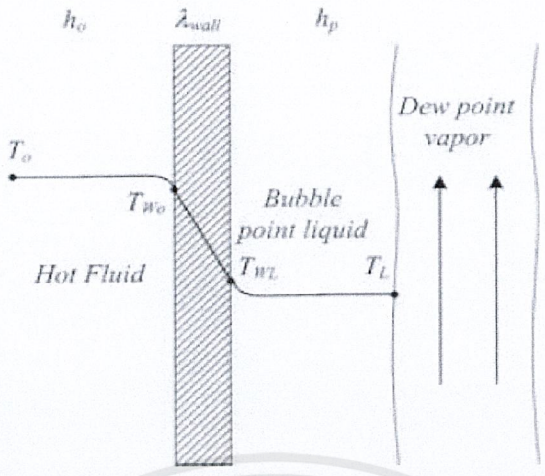
2.1.2 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง [2]

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม U สามารถหาได้จากการทดลองหรือคำนวณด้วยความสัมพันธ์ที่แตกต่างกัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมที่คำนวณได้ สามารถนำไปใช้กับเครื่องระเหยที่มีอยู่เท่านั้น เนื่องจากรูปทรงของเครื่องระเหยมีความแตกต่างกัน Lopez-Toledo (2006) ให้สมการสำหรับการคำนวณ U ดังนี้

$$U = \frac{Q}{A\Delta T_{\ln}} \tag{2.7}$$

การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนนั้น มีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง และ Lopez-Toledo (2006) ได้รวบรวมทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนในเครื่องระเหยฟิล์มบาง และวิธีการคำนวณการถ่ายเทความร้อนในรายงานของเขา การถ่ายเทความร้อนโดยรวมในเครื่องระเหยฟิล์มบางนั้น ขึ้นอยู่กับความต้านทานสามขั้น ขั้นแรกคือความต้านทานภายนอกระหว่างของไหลที่ให้ความร้อนมักจะเป็นไอน้ำหรือน้ำมัน กับพื้นผิวของผนังเครื่องระเหย ขั้นที่สองคือ ความต้านทานในผนัง และขั้นที่สามคือความต้านทานภายในระหว่างของไหลภายในและพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน ความต้านทานเหล่านี้แสดงในภาพที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.3 ความต้านทานในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

สมการสำหรับการคำนวณ U จากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่แตกต่างกัน คือ

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{\delta_{wall}}{\lambda_{wall}} + \frac{1}{h_p} \tag{2.8}$$

หากใช้ไอน้ำเป็นของไหลทำความร้อน สมการสำหรับการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายนอก คือ

$$h_o = \frac{4}{3}\left(\frac{\lambda_s^3 \rho_s^2 g}{3\mu_s \Gamma}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{2.9}$$

โดยที่ Γ = การไหลของมวลไอน้ำต่อความยาวหน่วย (kg/m s)

เมื่อใช้ของไหลทำความร้อนชนิดอื่น จะใช้สมการที่แตกต่างกันสองแบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะการไหล หากเป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) ซึ่งมี Re <2100 Lopez-Toledo แนะนำสมการจาก Sieder (1936)

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 = A_1 U_{c1} \Delta t_1 + A_2 U_{c2} \Delta t_2 + A_3 U_{c3} \Delta t_3 \tag{2.10}$$

$$n_1 = \frac{\pi \lambda L}{4 w C_p} \tag{2.11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ w คือ อัตราการไหลของของเหลวร้อน (kg/s)

Knudsen และคณะ (1997) ให้สมการสำหรับการคำนวณ Nusselt number ในกรณีของช่วงการไหลแบบช่วงต่อและการไหลแบบปั่นป่วน เมื่อการไหลของของไหลร้อนอยู่ในช่วงช่วงการไหลแบบช่วงต่อ (2000 <Re <10,000) ดังนั้นสามารถคำนวณด้วยสมการ Hausen

$$Nu = 0.116\left(Re^{\frac{2}{3}} - 125\right)Pr^{\frac{1}{3}}\left[1+\left(\frac{D}{L}\right)^{\frac{2}{3}}\right]\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \qquad (2.12)$$

ในกรณีที่มีการไหลแบบปั่นป่วน NU สามารถคำนวณด้วยสมการ Dittus-Boelter

$$Nu = 0.0243Re^{0.6}Pr^{0.4}\left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14} \qquad (2.13)$$

2.1.3 การถ่ายเทความร้อนภายใน

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนภายใน h_p มีความสัมพันธ์ที่แตกต่างกันมากมาย การถ่ายเทความร้อนได้รับผลกระทบจากการกวน ดังนั้นจึงต้องใช้สมการต่าง ๆ

Bott และ Romero (1963) ได้ทำการทดสอบด้วยน้ำและกลีเซอรอลผสมในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบางที่มีการกวน และพัฒนาสมการสำหรับคำนวณ Nusselt number Nu

$$Nu = 0.018Re_f^{0.46}Re_N^{0.6}Pr^{0.87}\left(\frac{D}{L}\right)^{0.48}N_b^{0.24} \qquad (2.14)$$

โดยที่ N_b คือ จำนวนของใบกวนในเครื่องระเหย

ภายหลัง Bott และ Sheikh (1966) พัฒนาความสัมพันธ์ของ Nu:

$$Nu = 0.65Re_f^{0.25}Re_N^{0.43}Pr^{0.3}N_b^{0.33} \qquad (2.15)$$

ความสัมพันธ์นี้ได้รับการพัฒนาด้วยสารผสมของกลีเซอรอลในน้ำ Bott และ Sheikh ใช้อัตราส่วนผสมของน้ำกับกลีเซอรอลจำนวนมาก และในการศึกษาของ Lopez-Toledo (2006) สมการที่ (2.25) มีความแม่นยำมากกว่าสมการที่ (2.14)

สมการสำหรับการคำนวณตัวเลขไร้หน่วยคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Nu = \frac{h_p D}{\lambda} \tag{2.16}$$

$$Re_f = \frac{4F}{\pi D \mu} \tag{2.17}$$

$$Re_N = \frac{D^2 N \rho}{\mu} \tag{2.18}$$

โดยที่ N คือ ความเร็วในการหมุนของใบกวน

$$\mathrm{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda} \tag{2.19}$$

2.2 ถังรับแรงดัน (Pressure Vessel) [3]

ถังรับแรงดันเป็นภาชนะรูปทรงต่าง ๆ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการบรรจุหรือเก็บกักของไหลที่มีแรงดันมากกว่าบรรยากาศ (ความดันภายใน) หรือของไหลที่มีแรงดันน้อยกว่าบรรยากาศ (ความดันภายนอก) ทั้งนี้รวมถึงของเหลวที่มีความดันเท่ากับบรรยากาศโดยรวมความดันเนื่องจากแรงดันของของเหลวที่บรรจุเองด้วย

2.2.1 การออกแบบถังรับแรงดัน

ถึงแม้ว่าจะมีปัจจัยมากมายในการเลือกและออกแบบถังรับแรงดันแต่จะมีปัจจัย ความต้องการหลักที่มีผลกระทบต่อการเลือกและออกแบบคือ ความปลอดภัยและประหยัด ซึ่งโดยทั่วไปถังรับแรงดันจะได้รับการออกแบบให้สามารถทนสภาวะที่รุนแรงที่สุดที่เกิดขึ้นผสมผสานกันของความดันใช้งานและอุณหภูมิใช้งานที่คาดไว้ได้

ในการออกแบบถังรับแรงดัน การหาความแข็งแรงของถังจะพิจารณาภาระแรงกระแทก รวมถึงการกระเพื่อมหรือการขึ้นลงอย่างรวดเร็วของความดัน (Fluctuation) น้ำหนักของถังและของที่บรรจุ ภาระแรงที่เพิ่มเข้ามาของอุปกรณ์ต่าง ๆ วัสดุฉนวนความร้อนที่นำมาหุ้มถัง ระบบท่อ ฯลฯ และผลกระทบทางความร้อนในสภาวะใช้งาน (หากต้องการ) เพิ่มเข้ามานอกเหนือจากความดันภายในหรือความดันภายนอกที่กระทำต่อถัง รวมทั้งอาจพิจารณาถึงวัสดุที่สามารถหามาใช้งานและความต้านทานต่อการกัดกร่อนของวัสดุประกอบด้วย

2.2.2 ความเค้นในถังรับแรงดัน

ถังรับแรงดันในขณะใช้งานจะถูกกระทำด้วยภาระแรงจากหลาย ๆ ลักษณะ ซึ่งทำให้เกิดความเค้นขึ้นตามส่วนต่าง ๆ ของถัง สำหรับลักษณะและขนาดของความเค้นที่เกิดขึ้นเป็นไปตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

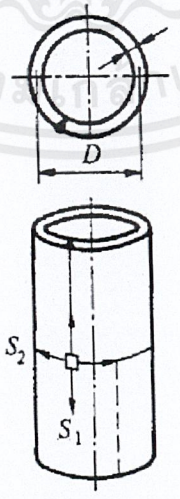
ลักษณะธรรมชาติของภาระแรงนั้น รวมทั้งรูปร่างของถัง และลักษณะโครงสร้างของส่วนประกอบของถัง

โดยทั่วไปภาระแรงที่กระทำต่อถังแบ่งออกได้ดังนี้

1. ความดันภายในหรือภายนอก
2. น้ำหนักของถังและของสารที่บรรจุ
3. แรงปฏิกิริยาแบบสถิตย์ (Static) จากอุปกรณ์ที่นำมาติดกับถังจากระบบท่อจากการบุภายในจากฉนวนจากชิ้นส่วนติดตั้งภายในหรือจากส่วนรองรับถัง
4. แรงปฏิกิริยาแบบวัฏจักร (Cylic) และแบบพลวัต (Dynamic) เนื่องจากความดันหรือจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
5. แรงดันลมและแรงแผ่นดินไหว
6. แรงปฏิกิริยาแบบกระแทกเนื่องจากการกระแทกของของไหล (Fluid shock)
7. ระดับแตกต่างของอุณหภูมิและการขยายตัวทางความร้อน

2.2.3 ความเค้นในผนังทรงกระบอก

ความดันภายในหรือภายนอกที่กระจายอย่างสม่ำเสมอ จะทำให้เกิดความเค้นตามแนวเส้นรอบวงมากกว่าความเค้นตามแนวยาวอยู่ 2 เท่า ทั้งนี้จากลักษณะรูปร่างของทรงกระบอกเอง ดังนั้นสำหรับถังรับแรงดันที่ถูกกระทำภายใต้ความดันภายนอก (ถังสุญญากาศ) เมื่อแรงอื่น ๆ (แรงลม, แผ่นดินไหว, ฯลฯ) ไม่ใช่ปัจจัยที่สำคัญ ต้องออกแบบให้สามารถต้านทานต่อการโก่งเสียหาย (Buckling) ตามแนวรัศมี ส่วนเมื่อภาระแรงอื่นถูกนำมาคิดด้วยภาระแรงเหล่านั้นจะถูกนำมารวมด้วย ซึ่งอาจทำให้ต้องใช้แผ่นทำถังรับแรงดันที่มีความหนามากขึ้น



ภาพที่ 2.4 ความเค้นในผนังทรงกระบอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับความเค้นกดอัดเนื่องจากความดันภายนอก และความเค้นดึงเนื่องจากความดันภายใน สามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

1. ความเค้นตามแนวยาว

$$S_1 = \frac{PD}{4t} \tag{2.20}$$

2. ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง

$$S_2 = \frac{PD}{2t} \tag{2.21}$$

เมื่อ D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของถัง, mm

P คือ ความดันภายในหรือภายนอก, kg/cm^2

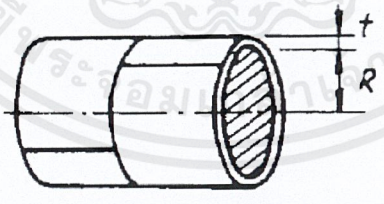
S_1 คือ ความเค้นตามแนวยาว, kg/cm^2

S_2 คือ ความเค้นตามแนวเส้นรอบวง, kg/cm^2

2.2.4 ถังภายใต้ความดันภายใน (Internal Pressure)

1. 2.2.4.1 สมการในเทอมของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน

2. ตัวถังทรงกระบอก (ตะเข็บตามยาว)



ภาพที่ 2.5 ความหนาและรัศมีภายในของตัวถังทรงกระบอก (ตะเข็บตามยาว)

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t} \tag{2.22}$$

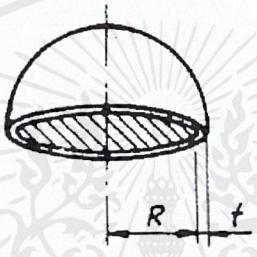
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P} \tag{2.23}$$

ปกติในการคำนวณจะใช้ความเค้นในแนวตะเข็บตามยาว และความหนาผนังไม่เกินกว่าครึ่งหนึ่งของรัศมีภายใน หรือ P ไม่เกินกว่า 0.385SE

3. ถังทรงกลม และหัวถังครึ่งทรงกลม



ภาพที่ 2.6 ความหนาและรัศมีภายในของถังทรงกลม และหัวถังครึ่งทรงกลม

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{2SEt}{R + 0.2t} \tag{2.24}$$

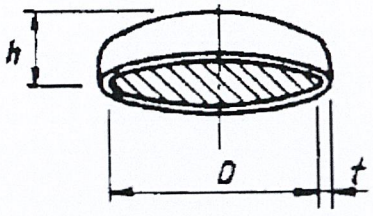
ความหนาผนัง

$$t = \frac{PR}{SE - 0.2P} \tag{2.25}$$

สำหรับหัวถังที่ไม่มีส่วนตรงเผื่อออกมา (Straight flange) ให้ใช้ประสิทธิภาพหัวถังเท่ากับตัวถัง ถ้ามีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพของตะเข็บหัวถัง และความหนาผนังไม่เกินกว่า 0.356R หรือ P ไม่เกินกว่า 0.665 SE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. หัวถังครึ่งทรงรี 2:1



$$h = D/4$$

ภาพที่ 2.7 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหัวถังครึ่งทรงรี 2:1

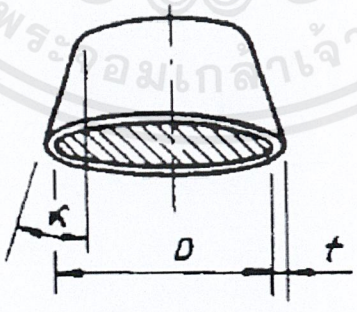
ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t} \tag{2.26}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P} \tag{2.27}$$

5. กรวยและส่วนของกรวย



ภาพที่ 2.8 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของกรวยและส่วนของกรวย

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{2SEt\cos\alpha}{D + 1.2t\cos\alpha} \tag{2.28}$$

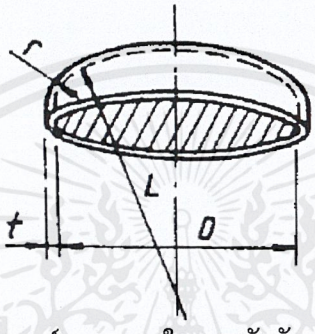
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PD}{2\cos\alpha\left(SE - 0.6P\right)} \tag{2.29}$$

มุมครึ่งยอดกรวย (α) ไม่มากกว่า 30° ถ้า α มีค่ามากกว่า 30° ต้องวิเคราะห์เป็นกรณีเฉพาะ

6. หัวถังแบบหน้าแปลนและโค้ง (ASME F&D) (หัวถังทอริสเฟียริคอล)



ภาพที่ 2.9 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายในของหัวถังแบบหน้าแปลนและโค้ง (ASME F&D) (หัวถังทอริสเฟียริคอล)

เมื่อ L/r = 16⅔

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{SEt}{0.885L + 0.1t} \tag{2.30}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{0.885PL}{SE - 0.1P} \tag{2.31}$$

เมื่อ L/r น้อยกว่า 16⅔

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t} \tag{2.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P} \qquad (2.33)$$

ตารางที่ 2.1 ค่าของตัวประกอบ M

L/r	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	2.75	3.00	3.25	3.50
M	1.00	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.15	1.17	1.18	1.20	1.22
L/r	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00	6.50	7.00	7.50	8.00	8.50	9.00
M	1.25	1.28	1.31	1.34	1.36	1.39	1.41	1.44	1.46	1.48	1.50
L/r	9.50	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00	13.00	14.00	15.00	16.00	16⅔
M	1.52	1.54	1.56	1.58	1.60	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.77

*อัตราส่วนที่ยอมให้ได้สูงสุด: L= D+2t

เมื่อ P คือ ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด, kg/cm^2

S คือ ค่าความเค้นของวัสดุ, kg/cm^2

E คือ ประสิทธิภาพรอยต่อ

R คือ รัศมีภายใน, mm

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน, mm

α คือ ครึ่งหนึ่งของมุมยอดกรวย, องศา

L คือ รัศมีภายในของหัวถังโค้ง, mm

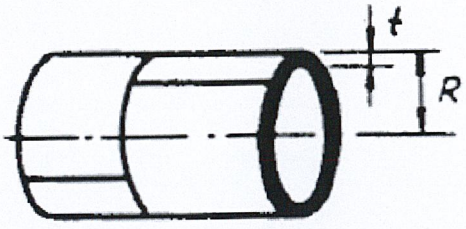
r คือ รัศมีข้อต่อเว้าด้านใน, mm

t คือ ความหนาผนัง, mm

C.A. คือ ค่าเผื่อการกัดกร่อน, mm

2.2.4.2 สมการในเทอมของเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก

1. ตัวถังทรงกระบอก (ตะเข็บตามยาว)



ภาพที่ 2.10 ความหนาและรัศมีภายนอกของตัวถังทรงกระบอก (ตะเข็บตามยาว)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

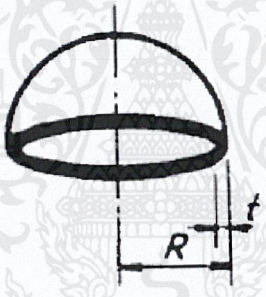
$$P = \frac{SEt}{R - 0.4t} \tag{2.34}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PR}{SE + 0.4P} \tag{2.35}$$

ปกติในการคำนวณจะใช้ความเค้นในแนวตะเข็บตามยาว และความหนาผนังไม่เกินกว่าครึ่งหนึ่งของรัศมีภายใน หรือ P ไม่เกินกว่า 0.385SE

2. ถังทรงกลม และหัวถังครึ่งทรงกลม



ภาพที่ 2.11 ความหนาและรัศมีภายนอกของถังทรงกลม และหัวถังครึ่งทรงกลม

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{2SEt}{R - 0.8t} \tag{2.36}$$

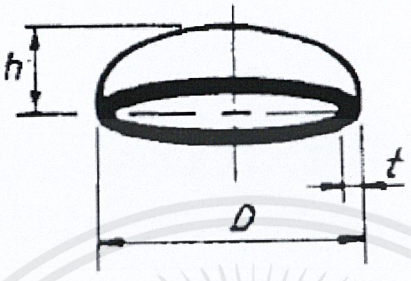
ความหนาผนัง

$$t = \frac{PR}{2SE + 0.8P} \tag{2.37}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับหัวถังที่ไม่มีส่วนตรงเผื่อออกมา (Straight flange) ให้ใช้ประสิทธิภาพหัวถังเท่ากับตัวถัง ถ้ามีค่าน้อยกว่าประสิทธิภาพของตะเข็บหัวถัง และความหนาผนังไม่เกินกว่า 0.356R หรือ P ไม่เกินกว่า 0.665 SE

3. หัวถังครึ่งทรงรี 2:1



$$h = D/4$$

ภาพที่ 2.12 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหัวถังครึ่งทรงรี 2:1

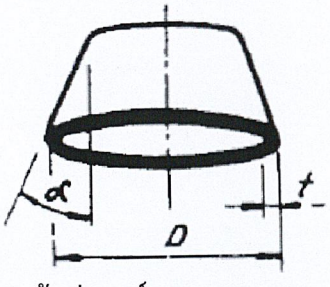
ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{2SEt}{D - 1.8t} \tag{2.38}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PD}{2SE + 1.8P} \tag{2.39}$$

4. กรวยและส่วนของกรวย



ภาพที่ 2.13 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของกรวยและส่วนของกรวย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

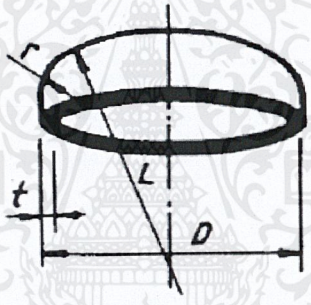
$$P = \frac{2SEt\cos\alpha}{D - 0.8t\cos\alpha} \tag{2.40}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PD}{2\cos\alpha(SE + 0.4P)} \tag{2.41}$$

มุมครึ่งยอดกรวย (α) ไม่มากกว่า 30° ถ้า α มีค่ามากกว่า 30° ต้องวิเคราะห์เป็นกรณีเฉพาะ

5. หัวถังแบบหน้าแปลนและโค้ง (ASME F&D) (หัวถังทอริสเฟียริคอล)



ภาพที่ 2.14 ความหนาและเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหัวถังแบบหน้าแปลนและโค้ง (ASME F&D) (หัวถังทอริสเฟียริคอล)

เมื่อ L/r = 16⅔

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{SEt}{0.885L - 0.8L} \tag{2.42}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{0.885PL}{SE + 0.8P} \tag{2.43}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ L/r น้อยกว่า 16⅔

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{2SEt}{LM + 0.2t} \tag{2.44}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PLM}{2SE - 0.2P} \tag{2.45}$$

เมื่อ P คือ ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด, kg/cm^2

S คือ ค่าความเค้นของวัสดุ, kg/cm^2

E คือ ประสิทธิภาพรอยต่อ

R คือ รัศมีภายนอก, mm

D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก, mm

α คือ ครึ่งหนึ่งของมุมยอดกรวย, องศา

L คือ รัศมีภายในของหัวถังโค้ง, mm

r คือ รัศมีข้อต่อเว้าด้านใน, mm

t คือ ความหนาผนัง, mm

C.A. คือ ค่าเผื่อการกัดกร่อน, mm

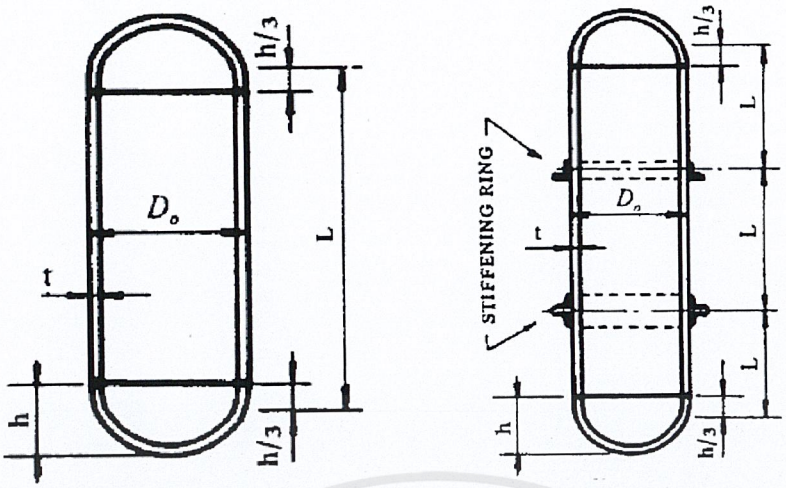
2.2.5 ถังภายใต้ความดันภายนอก (External Pressure)

1. ถังทรงกระบอก ไร้ตะเข็บหรือมีรอยต่อชนตามแนวยาว

เมื่อ D_o/t เท่ากับหรือมากกว่า 10 ความดันที่ยอมให้ได้สูงสุด คือ

$$P_a = \frac{4B}{3(D_o/t)} \tag{2.46}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก) (ข)

ภาพที่ 2.15 ถังทรงกระบอกแบบ (ก) ถังที่ไม่มีแหวนเสริมความแข็งแรง (ข) ถังที่มีแหวนเสริมความแข็งแรง

ค่าของ B หาได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- สมมติค่า t (จากภาพที่ ก.1, ก.2) หา L/D_o และ D_o/t
- ใช้ภาพที่ ก.3 ณ ค่า L/D_o โดยหากค่า L/D_o มากกว่า 50 และหากค่า L/D_o น้อยกว่า 0.05 ให้ดูที่ 0.05
- จากค่า L/D_o ลากไปตามแนวขนานจนกระทั่งพบเส้น D_o/t ที่ต้องการจากจุดตัดนี้ลากลงตามแนวตั้งจะได้ค่าตัวประกอบ A
- ใช้แผนภาพในภาพที่ ก.4 - ก.8 ตามชนิดของวัสดุที่ใช้สร้างถัง ณ ค่า A ที่ได้ ลากขึ้นตามแนวตั้งถึงเส้นอุณหภูมิใช้งานที่ต้องการ
- จากจุดตัดลากไปตามแนวขนานจะได้ตัวประกอบ B คำนวณความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด, P_a

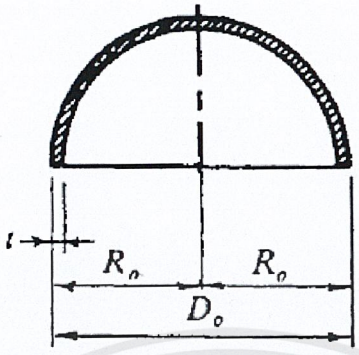
ถ้าความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความดันออกแบบ ต้องทำตามขั้นตอนการออกแบบซ้ำอีกด้วยการเพิ่มค่าความหนาของผนังหรือลดค่า L ด้วยการใช้แหวนเสริมความแข็งแรง

สำหรับค่า A ที่ตกลงด้านซ้ายของเส้นอุณหภูมิใช้งาน ค่าของ P_a สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_o/t)} \tag{2.47}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทรงกลมและหัวถังครึ่งทรงกลม



ภาพที่ 2.16 ทรงกลมและหัวถังครึ่งทรงกลมภายใต้ความดันภายนอก

ความดันที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P_a = \frac{B}{(R_o / t)} \tag{2.48}$$

ค่าของ B หาได้ตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- สมมติค่า t และคำนวณหาค่า A ด้วยการใช้สมการ

$$A = \frac{0.125}{(R_o / t)} \tag{2.49}$$

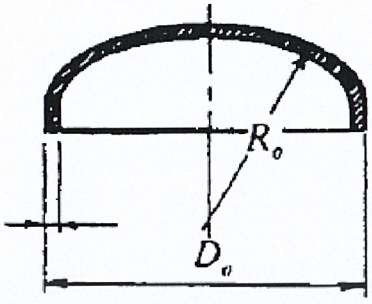
- ใช้แผนภาพในภาพที่ ก.4 - ก.8 ตามชนิดของวัสดุที่ใช้สร้างถัง ณ ค่า A ที่ได้ลากขึ้นตามแนวตั้งถึงเส้นอุณหภูมิใช้งานที่ต้องการ
- จากจุดตัดลากไปตามแนวขนานจะได้ค่าตัวประกอบ B
- สำหรับค่าของ A ที่ตกลงด้านซ้ายมือของเส้นอุณหภูมิใช้งาน ค่าของ P_a สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

$$P_a = \frac{0.0625E}{(R_o / t)^2} \tag{2.50}$$

ถ้าความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด P_a ที่คำนวณด้วยสมการข้างต้นมีค่าน้อยกว่าความดันออกแบบ ต้องเลือกสมมติค่าของ t ใหม่ และทำตามขั้นตอนการออกแบบซ้ำอีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หัวถังครึ่งทรงรี 2:1



ภาพที่ 2.17 หัวถังครึ่งทรงรี 2:1 ภายใต้ความดันภายนอก

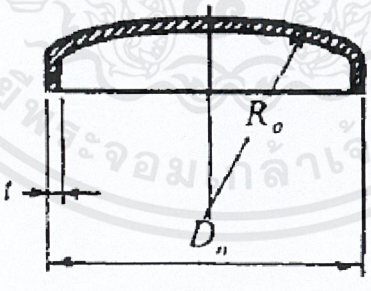
ความหนาที่ต้องการจะเป็นค่าที่มากกว่าของความหนาดังต่อไปนี้

ความหนาที่คำนวณด้วยสมการที่กำหนดให้สำหรับความดันภายในที่ใช้ถังออกแบบ 1.67 เท่าของความดันภายนอกและประสิทธิภาพรอยต่อ E= 1.00 ความหนาที่หาได้ด้วยสมการ

$$P_a = \frac{B}{(R_o / t)} \qquad (2.51)$$

เมื่อ $R_o = 0.9D_o$ และ B หาด้วยวิธีการเดียวกับทรงกลม

4. หัวถังแบบ ASME หน้าแปลนและโค้ง (หัวถังทอริสเฟียริคอล)

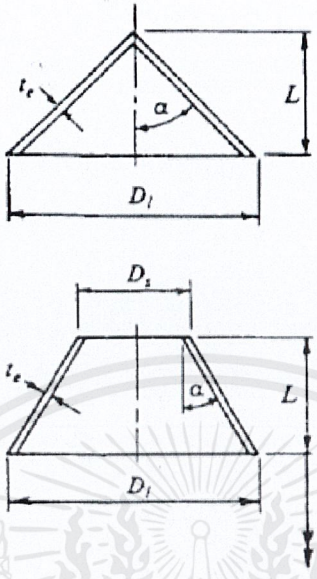


ภาพที่ 2.18 หัวถังแบบ ASME หน้าแปลนและโค้ง (หัวถังทอริสเฟียริคอล) ภายใต้ความดันภายนอก

ความหนาที่ต้องการและความดันที่ยอมให้ได้สูงสุดจะคำนวณด้วยขั้นตอนที่กำหนดให้สำหรับหัวถังครึ่งทรงรี โดย R_o ที่มากที่สุด เท่ากับ D_o

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. กรวยและส่วนของกรวย ไร้ตะเข็นหรือที่มีรอยต่อชน



ภาพที่ 2.19 กรวยและส่วนของกรวย ไร้ตะเข็นหรือที่มีรอยต่อชนภายใต้ความดันภายนอก

เมื่อ α เท่ากับหรือน้อยกว่า 60° และ $D_l/t_e \geq 10$ ความดันที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P_a = \frac{4B}{3(D_l / t_e)} \tag{2.52}$$

สมมติค่าความหนา, t_e

- หาค่า t_e, L_e และอัตราส่วน L_e/D_l และ D_l/t_e
- ใช้แผนภาพในภาพที่ ก.3 ณ ค่าของ L_e/D_l (L/D_o ในภาพใช้ที่ 50 เมื่อ L_e/D_l, มีค่ามากกว่า 50) ลากไปตามแนวขนานถึงใช้เส้น D_o/t (ค่า D_l/t_e ที่หาได้) จากจุดตัดลากลงตามแนวตั้งจะได้ค่าตัวประกอบ A
- ใช้แผนภาพในภาพที่ ก.4 - ก.8 ตามชนิดของวัสดุที่ใช้ ณ ค่า A ที่ได้ลากขึ้นตามแนวตั้งถึงเส้นอุณหภูมิใช้งาน ที่ต้องการ จากจุดตัดลากไปตามแนวขนาน จะได้ค่าตัวประกอบ B
- คำนวณความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด, Pa
- ถ้า P_a มีค่าน้อยกว่าความดันออกแบบ ต้องกระทำขั้นตอนออกแบบซ้ำ ด้วยการออกแบบเพิ่มความหนา หรือลด L โดยการใช้แหวนเสริมความแข็งแรง

สำหรับค่า A ที่ตกลงด้านซ้ายของเส้นอุณหภูมิใช้งาน ค่าของ P สามารถคำนวณได้จาก

สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_l / t_e)} \tag{2.53}$$

เมื่อ α มีค่ามากกว่า 60° ความหนาของกรวยจะมีค่าเท่ากับความหนาที่ต้องการ สำหรับหัวถังแบบราบที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกที่โตที่สุดของกรวย

เมื่อ A คือ ตัวประกอบที่หาได้จากภาพที่ ก.3

B คือ ตัวประกอบที่หาได้จากภาพที่ ก.4 - ก.8

α คือ ครึ่งหนึ่งของมุมยอด, องศา

D_l คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก ณ ปลายด้านใหญ่, mm

D_s คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก ณ ปลายด้านเล็ก, mm

E คือ โมดูลัสความยืดหยุ่นของวัสดุ

L คือ ความยาวของกรวย, mm

L_e คือ ความยาวเทียบเท่าของส่วนของกรวย, mm $(L/2)(1+D_s/D_l)$

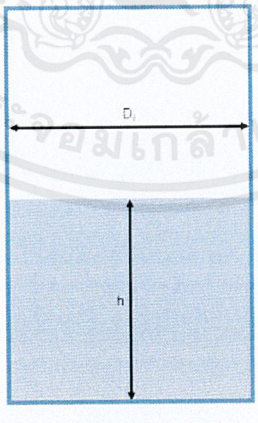
P คือ ความดันออกแบบภายนอก, kg/cm^2

t คือ ความหนาที่ต้องการน้อยที่สุด, mm

t_e คือ ความหนาประสิทธิผล, mm เท่ากับ t cos α

2.2.6 สมการคำนวณปริมาตรของถังแนวตั้ง [4]

1. ตัวถังทรงกระบอก

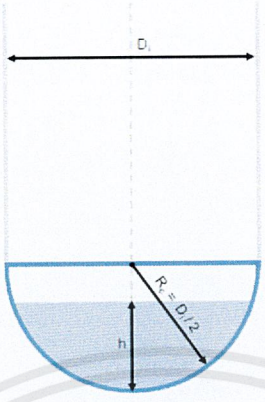


ภาพที่ 2.20 ภาพแสดงตัวแปรในตัวถังทรงกระบอก

$$V = \frac{\pi}{4} D_i^2 h \tag{2.54}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. หัวถังครึ่งทรงกลม



ภาพที่ 2.21 ภาพแสดงตัวแปรในหัวถังครึ่งทรงกลม

สำหรับก้นถัง

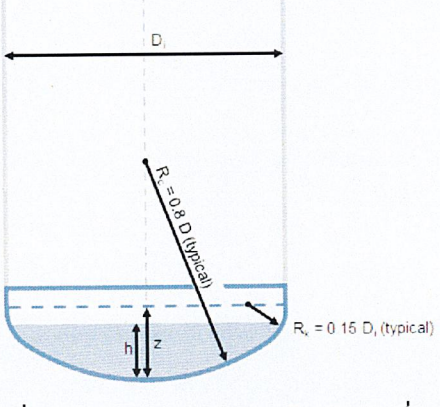
$$V = \frac{\pi h^2}{3}(3R_c - h) \tag{2.55}$$

สำหรับหัวถัง

$$V = \frac{\pi}{3}\left(2R_c^3 - h^2\left(3R_c - h\right)\right) \tag{2.56}$$

เมื่อ h หมายถึง พื้นที่ว่างระหว่างพื้นผิวของเหลวและส่วนบนของหัว

3. หัวถังครึ่งทรงรี



ภาพที่ 2.22 ภาพแสดงตัวแปรในหัวถังครึ่งทรงรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับก้นถัง

$$V = D_i^3 C \frac{\pi}{24}\left(3\left(\frac{h}{z}\right)^2 - \left(\frac{h}{z}\right)^3\right) \tag{2.57}$$

สำหรับหัวถัง

$$V = D_i^3 C \frac{\pi}{24}\left(3\left(\frac{h}{z}\right) - \left(\frac{h}{z}\right)^3\right) \tag{2.58}$$

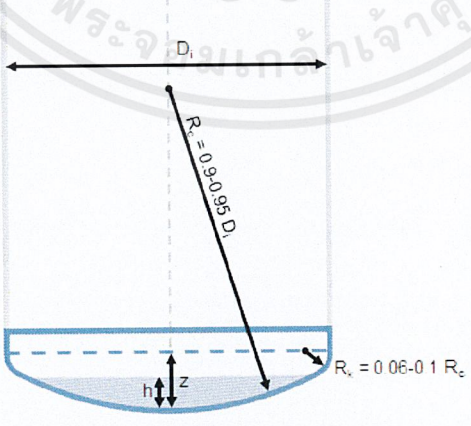
- สำหรับ หัวถังครึ่งวงรีแบบ 2:1

$$C = \frac{1}{2} \tag{2.59}$$

- สำหรับหัวถังครึ่งทรงรีแบบ DIN 28013

$$C = 0.49951 + 0.10462\frac{t}{D_o} + 2.3227\left(\frac{t}{D_o}\right)^2 \tag{2.60}$$

4. หัวถังทอริสเฟียริคอล



ภาพที่ 2.23 ภาพแสดงตัวแปรในหัวถังทอริสเฟียริคอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับก้นถัง

$$V = D_i^3 C \frac{\pi}{24}\left(3\left(\frac{h}{z}\right)^2 - \left(\frac{h}{z}\right)^3\right) \tag{2.61}$$

สำหรับหัวถัง

$$V = D_i^3 C \frac{\pi}{24}\left(3\left(\frac{h}{z}\right) - \left(\frac{h}{z}\right)^3\right) \tag{2.62}$$

- สำหรับหัวถังทอริสเฟียริคอลแบบ ASME

$$C = 0.30939 + 1.7197\frac{R_k - 0.06D_o}{D_i} - 0.16116\frac{t}{D_o} + 0.98997\left(\frac{t}{D_o}\right)^2 \tag{2.63}$$

- สำหรับหัวถังทอริสเฟียริคอลแบบ DIN 28011

$$C = 0.37802 + 0.05073\frac{t}{D_o} + 1.3762\left(\frac{t}{D_o}\right)^2 \tag{2.64}$$

2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน [5]

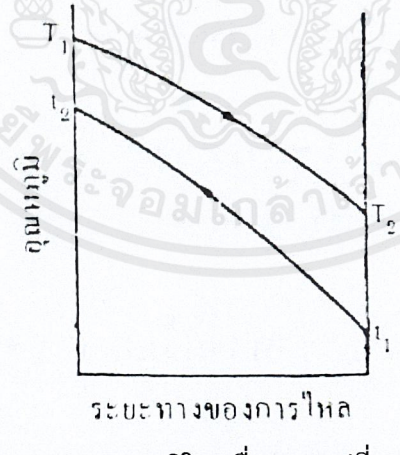
2.3.1 การถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบ่งออกได้เป็น 2 จำพวกใหญ่ ๆ คือแบบไหลผ่าน (Flow-Through Type) และแบบสะสมความร้อน (Heat Accumulation Type) ในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลผ่าน การถ่ายเทความร้อนจากของไหลชนิดหนึ่งไปยังของไหลอีกชนิดหนึ่งจะเกิดผ่านผนังกั้นโดยตรง ด้วยเหตุนี้ของไหลทั้ง 2 ชนิด จะต้องไหลอยู่ผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในเวลาเดียวกัน ส่วนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสะสมความร้อนของไหลที่มีหน้าที่ให้และรับความร้อนจะผลัดกันไหลผ่านเครื่อง ในการไหลสลับกันนี้ ของไหลที่รับความร้อนจะรับความร้อนที่ได้เก็บสะสมไว้ในเครื่องหลังจากของไหลที่ให้ความร้อนได้ไหลผ่านเครื่อง ดังนั้น ต้องสับเปลี่ยนการไหลของของไหลทั้งสองชนิดผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีเกือบทั้งหมดเป็นแบบไหลผ่าน จะไม่กล่าวถึงเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบสะสมความร้อนในที่นี้อีกต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลผ่านอาจแบ่งได้ตามทิศทางการไหลของของไหลเป็น 3 ประเภทคือแบบไหลขนาน (Parallel Flow), แบบไหลสวนทาง (Counter Flow) และแบบไหลตั้งฉาก (Cross Flow) ในเครื่องแบบไหลขนานของไหลร้อนกับของไหลเย็นจะไหลในทิศทางเดียวกัน ในขณะที่เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกั้น อุณหภูมิของของไหลร้อนจะค่อย ๆ ลดลง ในขณะเดียวกับที่อุณหภูมิของของไหลเย็นเพิ่มขึ้นตามลำดับ ส่วนในเครื่องแบบไหลสวนทางของไหลร้อนและของไหลเย็นมีทิศทางการไหลตรงกันข้าม อุณหภูมิของของไหลร้อนจะค่อย ๆ ลดลงในทิศทางหนึ่ง ในขณะที่อุณหภูมิของของไหลเย็นจะเพิ่มขึ้นในทิศทางตรงกันข้าม

ภาพที่ 2.24 การแลกเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน



ภาพที่ 2.25 การแลกเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง

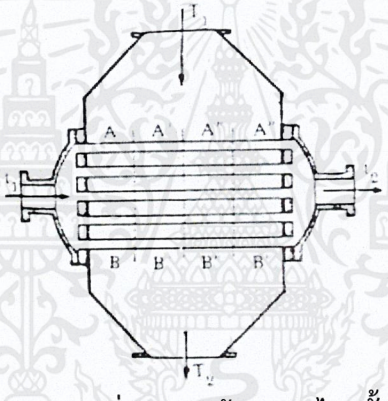
ภาพที่ 2.24 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของของไหลตามระยะทางของการไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน ของไหลที่ให้ความร้อนไหลเข้าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่อุณหภูมิ T_1 และไหลออกจากเครื่องที่อุณหภูมิ T_2 หลังจากถ่ายเทความร้อนให้กับของไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เย็น ในขณะเดียวกัน ของไหลที่รับความร้อนไหลเข้าเครื่องที่อุณหภูมิ t_1 และไหลออกจากเครื่องที่อุณหภูมิ t_2 ในกรณีนี้ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหล (T_1 - t_1) ที่ทางเข้าจะใหญ่กว่าผลต่าง (T_2 – t_2) ที่ไหลออกมาก

ภาพที่ 2.25 แสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามระยะทางของการไหลสำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งการไหลเป็นแบบสวนทาง ในกรณีนี้ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลที่ปลายด้านอุณหภูมิสูงคือ (T_1 – t_2) และผลต่างที่ปลายด้านอุณหภูมิต่ำคือ (T_2 – t_1)

ในกรณีที่ใช้ไอน้ำอิ่มตัว (saturated steam) เพิ่มความร้อนให้กับของไหลชนิดอื่น อุณหภูมิของของไหลที่ให้ความร้อนจะมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับระยะทางของการไหล ในทำนองเดียวกัน ในกรณีที่ใช้ของไหลเดือดระบายความร้อนจากของไหลชนิดอื่น ยกตัวอย่างเช่น เครื่องแช่เย็นโดยใช้แอมโมเนีย (Ammonia Refrigerant) อุณหภูมิของของไหลที่รับความร้อนจะคงที่ และเป็นเส้นตรงในแนวระดับเมื่อเขียนกราฟของอุณหภูมิกับระยะทางของการไหล



ภาพที่ 2.26 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก (ไหลตัดกัน)

ภาพที่ 2.26 แสดงตัวอย่างของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก ในกรณีนี้ การถ่ายเทความร้อนที่จุด A จะเกิดขึ้นระหว่างของไหลร้อนที่อุณหภูมิทางเข้า T_1 และของไหลเย็นที่อุณหภูมิทางเข้า t_1 เนื่องจากการถ่ายเทความร้อนที่จุด A อุณหภูมิของของไหลเย็นที่จุด A' จะสูงกว่าที่จุด A ด้วยปริมาณ dt แม้ว่าอุณหภูมิของของไหลเย็นที่จุด B จะเป็น t_1 เท่ากับที่จุด A แต่อุณหภูมิ

ของของไหลร้อนที่จุด B จะต่ำกว่าที่จุด A ด้วยปริมาณ dT สรุปแล้วอุณหภูมิของของไหลเย็นที่จุด A กับจุดที่ B ย่อมไม่เท่ากัน ด้วยเหตุนี้การคำนวณการถ่ายเทความร้อนอย่างละเอียดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลตั้งฉาก จึงสลับซับซ้อนกว่าของเครื่องแบบไหลสวนทางหรือไหลขนาน

โดยทั่วไปแล้ว ลักษณะการไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีจะไม่เป็นแบบไหลสวนทาง, ไหลขนานหรือไหลตั้งฉากอย่างหนึ่งอย่างใดแต่เพียงอย่างเดียว แต่จะเป็นการไหลหลายแบบปะปนกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

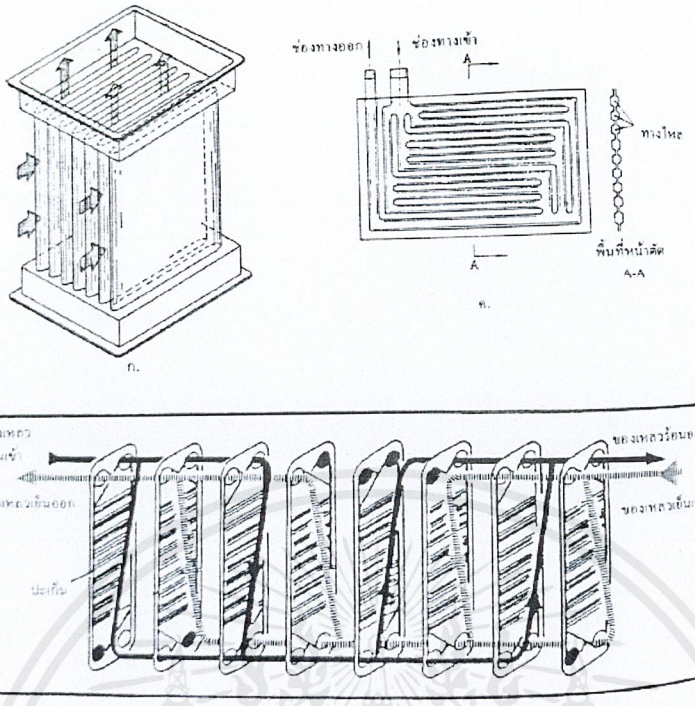
2.3.2 ประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น (Plate Type Exchanger)

คุณลักษณะพิเศษของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น คือการเอาแผ่นถ่ายเทความร้อนหลาย ๆ แผ่นมาวางเรียงกันในระยะที่ห่างคงที่ แล้วให้ของเหลวแต่ละชนิดไหลผ่านช่องว่างระหว่างแผ่นในลักษณะสลับกัน ซ่องเว้นช่อง มักใช้กับการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศก่อนเข้าหม้อไอน้ำ (boiler) ในกรณีนี้ค่าความดันสูญเสียจะมีน้อย แต่ประสิทธิภาพก็ไม่สู้ดีนัก ในการปรับปรุงเครื่องแบบนี้ปัจจุบันมีเครื่องแบบที่แสดงอยู่ในภาพที่ 2.27 (ข.) วางจำหน่ายในท้องตลาดเครื่องที่ปรับปรุงแล้วนี้ทำด้วยแผ่นเหล็กสเตนเลส (Stainless Steel) บาง ๆ หรือแผ่นไทเทเนียม (Titanium) ซึ่งทนต่อสนิมได้อย่างดีเอามาอัดให้เกิดส่วนนูน ส่วนเว้า และวางประกบกันหลาย ๆ แผ่นของไหลแต่ละชนิดจะไหลสลับกันไปตามช่องว่างที่เกิดจากการประกบเพื่อแลกเปลี่ยนความร้อน เพื่อเพิ่มความแข็งแกร่งป้องกันการรั่วและ และให้มีช่องว่างสำหรับการไหล ผิวของแผ่นนำความร้อนจะมีทั้งส่วนนูนและส่วนเว้าปะเก็น (Gasket) จะถูกติดตั้งไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมเพื่อป้องกันไม่ให้ของไหลรั่ว และรักษาระยะห่างระหว่างแผ่นที่ต้องการ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบปรับปรุงใหม่นี้มีค่าสูง ส่วนคุณลักษณะดีเด่นอย่างอื่นคือ สามารถถอดเป็นแผ่น ๆ ออกมาทำความสะอาดได้ทั่วถึง การบำรุงรักษาก็ง่าย และสามารถปรับปริมาณการถ่ายเทความร้อนได้ โดยการเพิ่มหรือลดจำนวนแผ่นถ่ายเทความร้อน เนื่องจากปะเก็นที่ใช้โดยปรกติทำจากยางหรือยางสังเคราะห์จึงไม่เหมาะที่จะใช้กับอุณหภูมิสูงหรือความดันสูง เครื่องแบบนี้นิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมเวชภัณฑ์ และอุตสาหกรรมอาหาร ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม สูงประมาณ 1300-3500 kcal / m^2 hr °C ส่วนความดันและอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ได้ประมาณ 5 kg/cm^2 และ 150 °C ตามลำดับ

ภาพที่ 2.27 (ค.) แสดงลักษณะของขดท่อที่ผลิตจากแผ่นถ่ายเทความร้อน (Plate Coil) โดยการเอาแผ่นถ่ายเทความร้อน 2 แผ่นมาประกบกันให้เกิดช่องทางไหลเหมือนกับขดท่อ ลักษณะการใช้มีตั้งแต่การเอามาวางประกบกันหลาย ๆ แผ่น ให้เป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น การวางใช้ในภาชนะบรรจุแทนขดต่อถ่ายเทความร้อน (coil) ตลอดจนการวางติดกับผนังถังแทนปลอกหุ้ม (jacket)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.27 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบแผ่น

2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

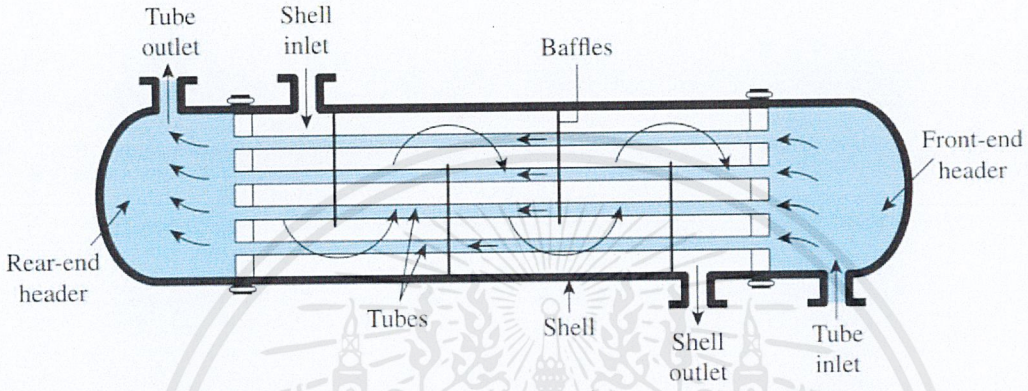
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อเป็นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้กันกว้างขวางที่สุดในกระบวนการอุตสาหกรรมเคมีเพราะไม่ถูกจำกัดโดยอุณหภูมิและความดันที่จำต้องใช้ในอุตสาหกรรมและสามารถใช้กับงานทุกชนิดตั้งแต่การระเหย (Evaporation) การเพิ่มความร้อน การระบายความร้อนจนกระทั่งการควบแน่น (Condensation) ยิ่งกว่านั้นยังมีคุณสมบัติโดยเฉลี่ยดีเยี่ยมในแง่ของการผลิต การบำรุงรักษาและราคา

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อมีชื่อเรียกเช่นนี้เพราะมีท่อถ่ายเทความร้อนจำนวนมากติดตั้งไว้ภายในเชลล์ (Shell = เปลือก, ปลอก) ของเครื่อง ของไหลในท่อและของไหลด้านเชลล์จะทำการแลกเปลี่ยนร้อนผ่านผนังท่อซึ่งกันระหว่างของไหลทั้งสองประเภท

จากภาพที่ 2.28 ของไหลด้านเชลล์จะถูกปิดกั้นจากบรรยากาศโดยตัวเชลล์และฝาปิดตัวเชลล์ ของไหลด้านเชลล์นี้จะถูกนำให้ไหลจากปากทางเข้าไปยังปากทางออกโดยแผ่นกั้น (Baffle) และทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับของไหลในท่อ โดยการสัมผัสกับท่อถ่ายเทความร้อนในระหว่างนั้น แผ่นกั้นการปะทะ (Im-pingerment Baffle) จำเป็นต้องมีเฉพาะเมื่อความเร็วที่ทางเข้าของของไหลด้านเชลล์มีค่าสูง ซึ่งเกรงว่าอาจก่อความเสียหายให้กับท่อถ่ายเทความร้อนได้ ท่อถ่ายเทความร้อนจะถูกยึดไว้ระหว่างแผ่นยึดท่อที่อยู่กับที่ (Stationary Tubesheet) ซึ่งจับแน่นกับตัวเชลล์กับแผ่นยึดท่อลอย (Floating Tubesheet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของไหลในท่อจะไหลเข้าทางพวยของแชนเนล (Channel Nozzle) ในที่นี้ของไหลจะพบกับแผ่นแบ่งเที่ยวการไหล (Pass Partition) ซึ่งติดตั้งไว้สำหรับควบคุมจำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในท่อ แล้วไหลผ่านท่อถ่ายเทความร้อนไปออกที่หัวลอย (Floating Head) จากนั้นของไหลในท่อจะกลับทิศและไหลกลับไปแชนเนล (Channel) หลังจากวิ่งไปกลับภายในท่อถ่ายเทความร้อนจนได้จำนวนเที่ยวดังที่ต้องการ ของไหลจะไหลออกจากพวยทางออกของแชนเนล



ภาพที่ 2.28 ส่วนประกอบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อแบ่งออกได้เป็น 2 จำพวกใหญ่ ๆ คือจำพวกท่อในแนวระดับ และจำพวกท่อในแนวดิ่ง เครื่องจำพวกท่อในแนวระดับเป็นแบบธรรมดาที่สุด ในกรณีที่บริเวณติดตั้งมีจำกัด หรือในกรณีที่ระบบท่อหรือมาตรการติดตั้งบีบบังคับให้ท่อถ่ายเทความร้อนตั้งอยู่ในแนวดิ่งเท่านั้น จึงจะใช้เครื่องจำพวกท่อในแนวดิ่ง เนื่องจากค่าความดันสูญเสียของเครื่องจำพวกท่อในแนวดิ่งที่ของไหลไหลผ่านเพียงเที่ยวเดียว (single pass) มีน้อย เครื่องจำพวกนี้จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นเครื่องระเหย (Evaporator), เครื่องควบแน่น (Condenser) และเครื่องต้มซ้ำแบบกาลักน้ำเชิงความร้อน (Thermosyphon Type Reboiler)

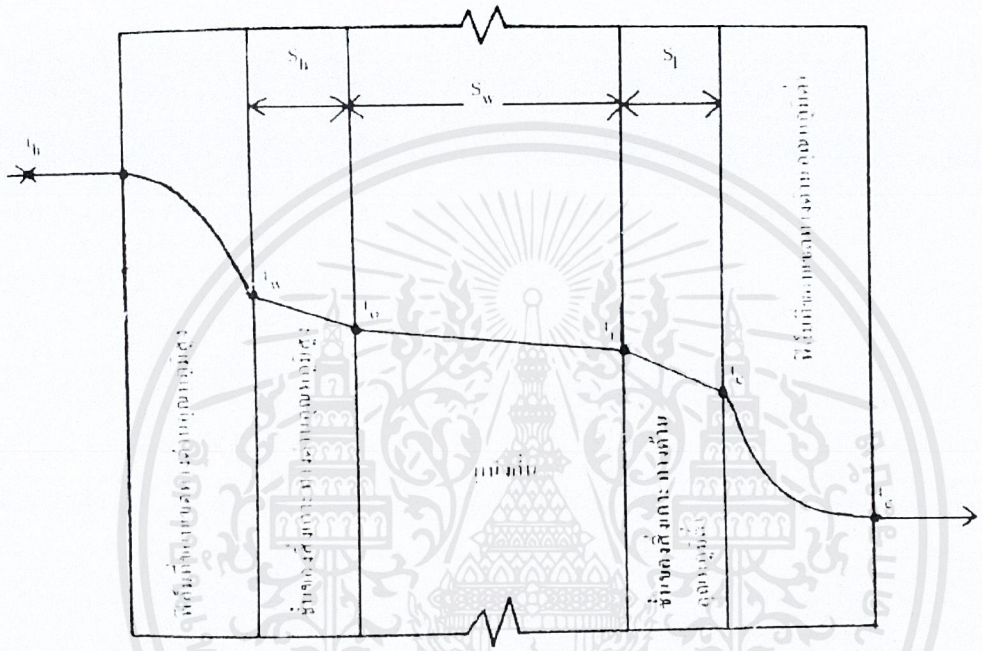
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อยังแบ่งตามโครงสร้างออกได้เป็นชนิดใหญ่ ๆ 3 ชนิดคือ ชนิดยึดท่ออยู่กับที่, ชนิดท่อรูปตัว U และชนิดหัวลอย

2.3.3 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient)

ความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะถ่ายเทจากของไหลอุณหภูมิสูงผ่านผนังท่อหรือผนังกั้นไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ ภาพที่ 2.29 แสดงลักษณะการไหลของความร้อนจากของไหลร้อนผ่านผนังกั้นไปยังของไหลเย็น ความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงถ่ายเทมาถึงบริเวณใกล้กับผนังกั้นโดยการพาความร้อน (heat convection) ที่จุดนี้ การถ่ายเทความร้อนจะถูกต้านทานโดยฟิล์มที่ขอบเขต (boundary film) ซึ่งคลุมผิวของผนังกั้น โดยทั่วไปแล้ว ความนำความร้อน (thermal conductivity) ของของไหลจะมีค่าต่ำมาก ดังนั้นผลต่างระหว่างอุณหภูมิที่ผิวของฟิล์ม (t_h) กับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุณหภูมิที่ผิวของชั้นหินปูน หรือสิ่งเกาะติดอื่น ๆ บนผนังกั้น (t_w) จะมีค่าสูง หลังจากถึงจุดนี้ ความร้อนจะถ่ายเหผ่านชั้นของสิ่งเกาะติดไปยังผิวของผนังกั้นซึ่งมีอุณหภูมิ t_o หลังจากถ่ายเทผ่านผนังกั้น ความร้อนจะถ่ายเทผ่านชั้นของสิ่งเกาะติดทางด้านอุณหภูมิต่ำแล้วผ่านฟิล์มที่ขอบเขตไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ (t_c) ความหนาของชั้นของสิ่งเกาะติดและค่าความนำความร้อนจะขึ้นกับคุณสมบัติของของไหล และเงื่อนไขการใช้งาน ดังนั้นทั้งสองอย่างนี้มีผลต่ออัตราการถ่ายเทความร้อนอย่างมาก



ภาพที่ 2.29 ภาพแสดงการถ่ายเทความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงผ่านผนังท่อหรือผนังกั้นไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำ

ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการถ่ายเทความร้อนกับอุณหภูมิของชั้นต่าง ๆ คำนวณได้ดังต่อไปนี้

1. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มที่ขอบเขตทางด้านอุณหภูมิสูง

$$q_1 = h_o A\left(t_h - t_w\right) \tag{2.65}$$

2. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นของสิ่งเกาะติดทางด้านอุณหภูมิสูง

$$q_2 = \frac{A\Delta t_h}{r_h} = \frac{A\left(t_w - t_o\right)}{\left(s_h / \lambda_h\right)} \tag{2.66}$$

3. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังกั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q_3 = \frac{A\Delta t_w}{r_w} = \frac{A\left(t_o - t_i\right)}{\left(s_w / \lambda_w\right)} \tag{2.67}$$

4. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นของสิ่งเกาะติดทางด้านอุณหภูมิต่ำ

$$q_4 = \frac{A\Delta t_e}{r_e} = \frac{A\left(t_i - t_e\right)}{\left(s_l / \lambda_e\right)} \tag{2.68}$$

5. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มที่ขอบเขตทางด้านอุณหภูมิต่ำ

$$q_5 = h_i A\left(t_e - t_c\right) \tag{2.69}$$

ที่สถานภาพคงที่ (steady state) อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านชั้นความต้านทานแต่ละชั้นย่อมเท่ากันหมด นั่นคือ

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q_5 = Q \tag{2.70}$$

ในกรณีนี้ อัตราการถ่ายเทความร้อน Q คำนวณได้จาก

$$Q = UA\left(t_h - t_c\right) = UA\Delta T \tag{2.71}$$

ในที่นี้

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + r_h + r_w + r_e + \frac{1}{h_i}} \tag{2.72}$$

$$\Delta T = t_h - t_c \tag{2.73}$$

สัมประสิทธิ์ h_o และ h_i ในสมการที่ (2.72) มีชื่อเรียกว่า สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์ม (Film Heat Transfer Coefficient) ทางด้านอุณหภูมิสูง และสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มทางด้านอุณหภูมิต่ำตามลำดับ หน่วยของ h_o และ h_i คือปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่หนึ่งหน่วยต่อเวลาหนึ่งหน่วยต่อผลต่างของอุณหภูมิหนึ่งหน่วยเช่น W/m^2 K, Btu/ft^2 hr°F หรือ $kcal/m^2$ hr °C

ส่วน U มีชื่อเรียกว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (Overall Heat Transfer Coefficient) และมีหน่วยเหมือนกับ h_o, h_i อนึ่ง r_h, r_w และ r_e คือ ความต้านทานการถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer Resistance) ของชั้นของสิ่งเกาะทางด้านอุณหภูมิสูง, ของผนังกั้น และของชั้นของสิ่งเกาะทางด้านอุณหภูมิต่ำตามลำดับ

ที่กล่าวมานี้คือสภาพการไหลของความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้งานอยู่ ในกรณีของเครื่องที่เพิ่งสร้างเสร็จใหม่ ๆ หรือในกรณีของเครื่องที่เพิ่งทำความสะอาดเอาสิ่งเกาะติดออกไปหมด ความต้านทานการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากชั้นของสิ่งเกาะติดจะหมดไปดังนั้นอัตราการถ่ายเทความร้อนจะสูงขึ้น ในกรณีเช่นนี้อัตราการถ่ายเทความร้อนและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมจะเป็นดังนี้

$$Q = U_c A\left(t_h - t_c\right) = U_c A \Delta T \tag{2.74}$$

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + r_w + \frac{1}{h_i}} \tag{2.75}$$

โดยปกติแล้ว การคำนวณการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อจะใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อถ่ายเทความร้อนเป็นมาตรฐานสำหรับการคำนวณ ดังนั้นอาจมีความจำเป็นต้องแก้ไขค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มของผิวในของท่อและค่าความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของชั้นของสิ่งเกาะติดบนผิวในของท่อโดยใช้เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อเป็นมาตรฐานให้ A_o และ A_i เป็นพื้นที่ถ่ายเทความร้อนที่คำนวณจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกและจากเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อ ให้ h_o และ h_i เป็นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านฟิล์มของผิวนอกและฟิล์มของผิวในของท่อให้ r_o และ r_i เป็นความต้านทานการถ่ายเทความร้อนของชั้นของสิ่งเกาะติดบนผิวนอกและผิวในของท่อตามลำดับ

อัตราการถ่ายเทความร้อนในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อ คำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Q = A_o U_d \Delta T \tag{2.76}$$

$$U_d = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + r_o\left(\frac{A_o}{A_{aw}}\right) + r_w + r_i\left(\frac{A_o}{A_i}\right) + \frac{1}{h_i\left(\frac{A_o}{A_i}\right)}} \tag{2.77}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทำนองเดียวกัน สมการสำหรับคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบเชลล์และท่อที่สะอาดเป็นดังนี้

$$Q = A_o U_c \Delta T \tag{2.78}$$

$$U_c = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + r_w\left(\frac{A_o}{A_{aw}}\right) + \frac{1}{h_i\left(\frac{A_o}{A_i}\right)}} \tag{2.79}$$

2.3.4 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย (Mean Temperature Difference)

โดยทั่วไปแล้ว ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลร้อนกับอุณหภูมิของของไหลเย็นที่ปากทางเข้าและที่ปากทางออกของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลขนาน, แบบไหลสวนทาง และแบบไหลตั้งฉาก ย่อมแตกต่างกัน ดังนั้น ในการคำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จำเป็นที่จะต้องรู้ค่าเฉลี่ยของผลต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลร้อนกับของของไหลเย็นที่จุดทุกจุด จากสมมุติฐานที่ว่า

1. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมมีค่าคงที่ตลอดระยะทางของการไหลของของไหลในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
2. ความจุความร้อนจำเพาะของของไหลมีค่าคงที่ตลอดระยะทางของการไหล
3. ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสภาวะของของไหล (จากของเหลวเป็นก๊าซ หรือก๊าซเป็นของเหลว) เกิดขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน
4. ไม่มีการสูญหนีความร้อนออกนอกเครื่อง

ถ้าสมมติฐานข้างต้นเป็นความจริง อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองต้องเท่ากัน ดังนั้นสมการต่อไปนี้มีผลใช้ได้

ในที่นี้ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของของไหลร้อน

ส่วน t_1 และ t_2 คืออุณหภูมิที่ทางเข้าและทางออกของของไหลเย็นตามลำดับ

สมการต่อไปนี้สำหรับคำนวณผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1}} \tag{2.80}$$

Δt_m มีชื่อเรียกว่าผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิธัม (Logarithmic Mean Temperature Difference) ซึ่งใช้แทนด้วยสัญลักษณ์ LMTD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Δt_2 และ Δt_1 คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิของของไหลทั้งสองที่ปลายอุณหภูมิสูง และที่ปลายอุณหภูมิต่ำของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามลำดับ) สำหรับการไหลแบบขนานและการไหลแบบสวนทาง ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

การไหลแบบขนาน

$$\Delta t_m = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}\right)} \tag{2.81}$$

การไหลแบบสวนทาง

$$\Delta t_m = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \tag{2.82}$$

ในกรณีที่ $\Delta t_2/\Delta t_1$ มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 2.0 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประมาณได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\Delta t_m = \frac{(T_1 - T_2) - (t_2 - t_1)}{2} \tag{2.83}$$

Δt_m ที่คำนวณจากสมการที่ (2.83) มีชื่อเรียกว่า ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงเลขคณิต (Arithmetic Temperature Difference)

โดยทั่วไป เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ต้องเลือกจำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในเชลล์ และจำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในท่อให้เหมาะสมกับประเภทและความเร็วของของไหลที่ใช้ ผลก็คือ การไหลแบบสวนทางอย่างสมบูรณ์แทบจะไม่เกิดขึ้นเลย ด้วยเหตุนี้จึงมีความจำเป็นต้องคูณผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิธึมที่คำนวณได้ด้วยตัวคูณขดเชยค่าที่เหมาะสม เพื่อให้ได้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยที่ถูกต้องสำหรับใช้คำนวณอัตราการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ตัวคูณชดเชยนี้มีชื่อเรียกเต็มว่า ตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย และมีค่าขึ้นกับจำนวนเที่ยวของการไหลในเชลล์และจำนวนเที่ยวการไหลในท่อ ตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย และมีค่าขึ้นกับจำนวนเที่ยวของการไหลในเชลล์และจำนวนเที่ยวการไหลในท่อ ตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยนี้สามารถเขียนเป็นฟังก์ชั่นของอัตราส่วนระหว่างผลต่างของอุณหภูมิของของไหลในท่อที่ทางออกและทางเข้ากับผลต่างของอุณหภูมิของของไหลทั้งสองที่ปากทางเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \tag{2.84}$$

และอัตราส่วนระหว่างผลต่างของอุณหภูมิที่ปากทางเข้าออกของของไหลทั้งสองชนิด

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \tag{2.85}$$

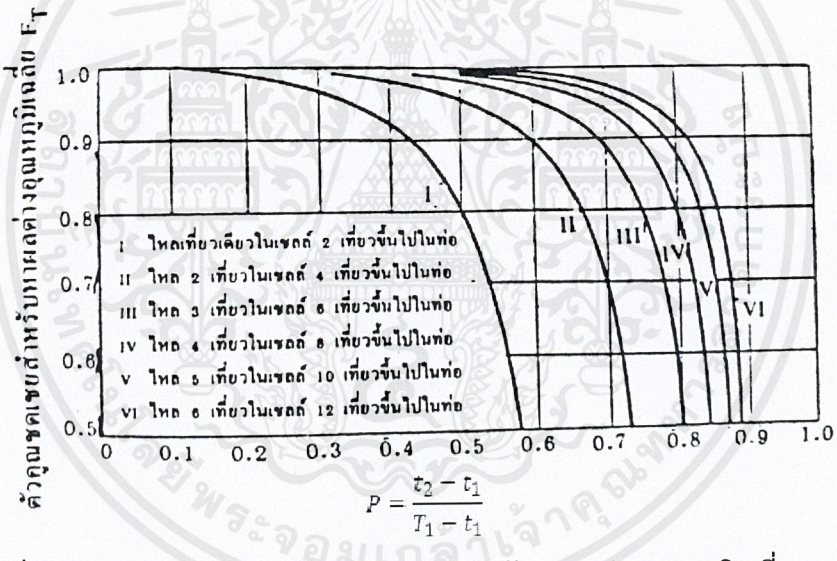
ภาพที่ 2.30 แสดงตัวอย่างของค่าตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนประเภทต่าง ๆ รูป 5.4.1 (A) และ (B) ใช้สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดดเดี่ยวเครื่องเดียว ส่วนรูป 5. 4. 1 (C)-(F) ใช้สำหรับกรณีที่เอาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในรูป (A) มาต่อกับแบบอนุกรมหลาย ๆ เครื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนโดยการเพิ่มจำนวนเที่ยวการไหลของของไหลในเชลล์ ภาพที่ 2.31 ยกตัวอย่างของกรณี R = 1.0 มาแสดงให้เห็นว่าการเอาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมาเรียงกันมีผลต่อค่าของตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยอย่างไรบ้าง ดังที่เห็นได้จากรูปนี้ ในกรณีที่เงื่อนไขเกี่ยวกับอุณหภูมิเหมือนกัน ยิ่งจำนวนเที่ยวการไหลเพิ่มขึ้นเท่าไร ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยก็ยิ่งเพิ่มขึ้นเท่านั้น และมีค่าใกล้เคียงกับกรณีของการไหลสวนทางแบบสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

เพื่อให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างประเภทของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนกับค่าของตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย ตารางที่ 2.2 แสดงตัวอย่างของความสัมพันธ์นี้สำหรับกรณีที่อุณหภูมิของของไหลร้อนลดจาก 473 K เหลือ 373 K และอุณหภูมิของของไหลเย็นเพิ่มจาก 323 K เป็น 373 K ดังที่เห็นได้จากตาราง 5.4.1 การไหลสวนทางแบบสมบูรณ์ไม่จำเป็นต้องชดเชยค่าของผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย ในทำนองเดียวกัน ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนจะลดลงเมื่อการไหลใกล้แบบไหลขนานมากขึ้น อนึ่ง ในกรณีของการไหลแบบตั้งฉาก การแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับกรณีที่เกิดการผสมตัวของของไหลชนิดใดชนิดหนึ่งในขณะที่แลกเปลี่ยนความร้อน จะมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการแลกเปลี่ยนความร้อนสำหรับกรณีที่ไม่เกิดการผสมตัวของของไหลขึ้น สรุปแล้ว จะต้องคำนึงถึงผลที่เกิดจากค่าของตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยไว้ล่วงหน้าในเวลาเลือกแบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

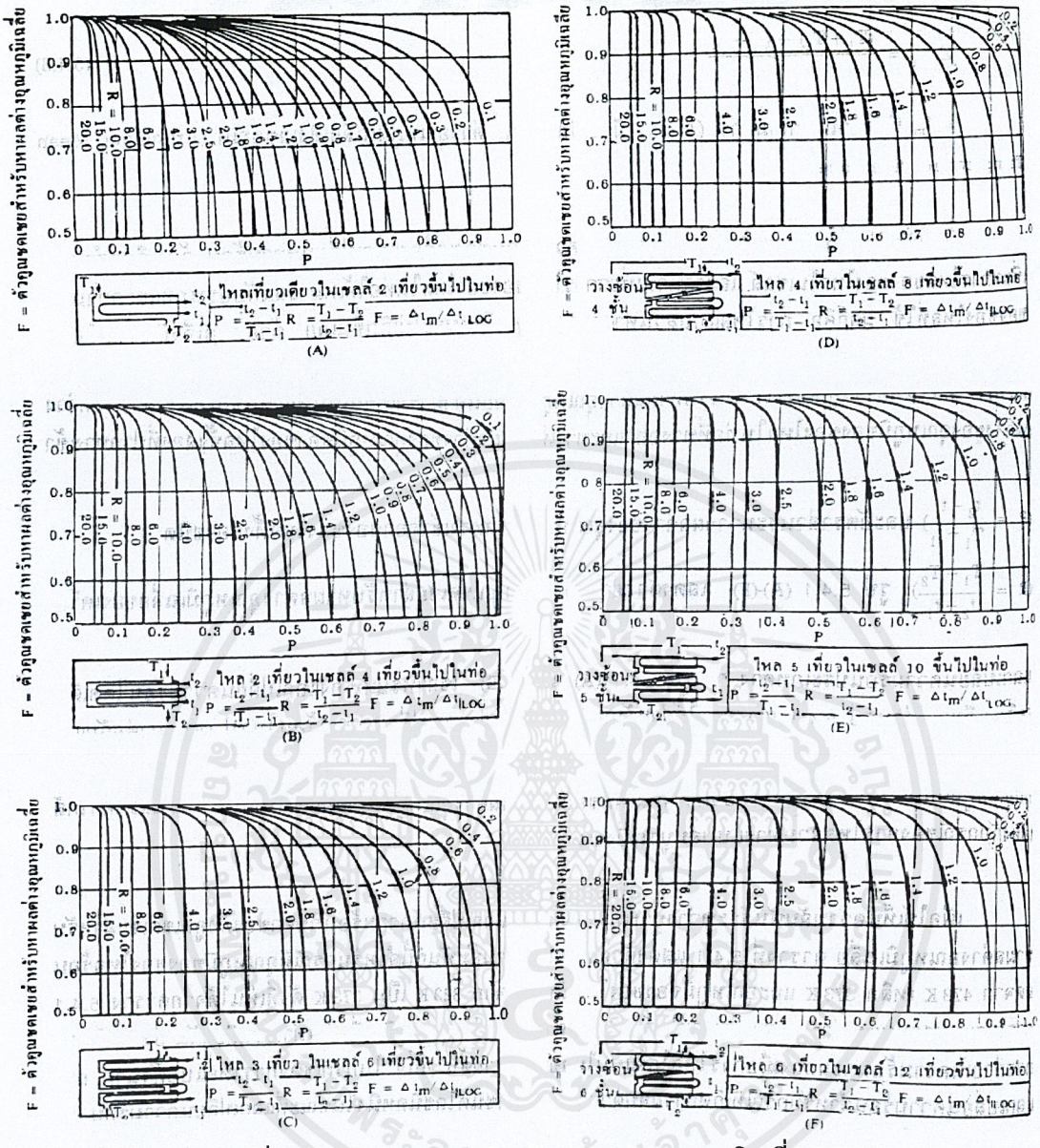
ตารางที่ 2.2 ผลของการเปรียบเทียบค่าของตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย

แบบของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	ตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย
แบบไหลสวนทาง (การไหลในเชลล์เที่ยวเดียว, การไหลในท่อเที่ยวเดียว)	1.00
แบบไหลขนานปนไหลสวนทาง (การไหลในเชลล์ 2 เที่ยว, ในท่อ 4 เที่ยว)	0.95
แบบไหลตั้งฉาก	0.87
แบบไหลขนานปนไหลสวนทาง (การไหลในเชลล์ 1 เที่ยว, ในท่อ 2 เที่ยว)	0.81



ภาพที่ 2.30 การเปรียบเทียบค่าตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



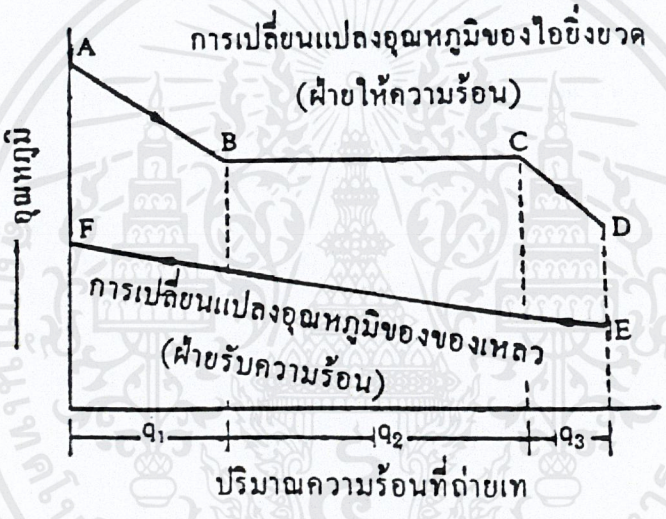
ภาพที่ 2.31 ตัวคูณชดเชยสำหรับหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย [5]

2.3.5 ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยโดยน้ำหนัก (Weighted Temperature Difference)

ในกรณีที่ทำให้ไอผสมของสารหลายชนิดเย็นลงจนเปลี่ยนสภาวะเป็นของเหลว หรือในกรณีที่ใช้ไอร้อนยิ่งยวด (Superheated Vapor) เป็นตัวให้ความร้อน จะเกิดการเปลี่ยนสภาวะของของไหล (Phase Change) ขึ้นในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ผลก็คือลักษณะการถ่ายเทความร้อนจะกลับซับซ้อนมากขึ้น ภาพที่ 2.32 แสดงตัวอย่างของกรณีที่เพิ่มอุณหภูมิของของเหลวโดยใช้ไอร้อนยิ่งยวด แกนนอนในรูปคือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทจากไอยิ่งยวดไปยังของเหลว ส่วนแกนตั้งคือ อุณหภูมิที่การถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น เส้น ABCD ในรูปคือ เส้นควบแน่น (Condensation Curve) ของไอยิ่งยวด จากจุด A ไอยิ่งยวดจะคายความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) จนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

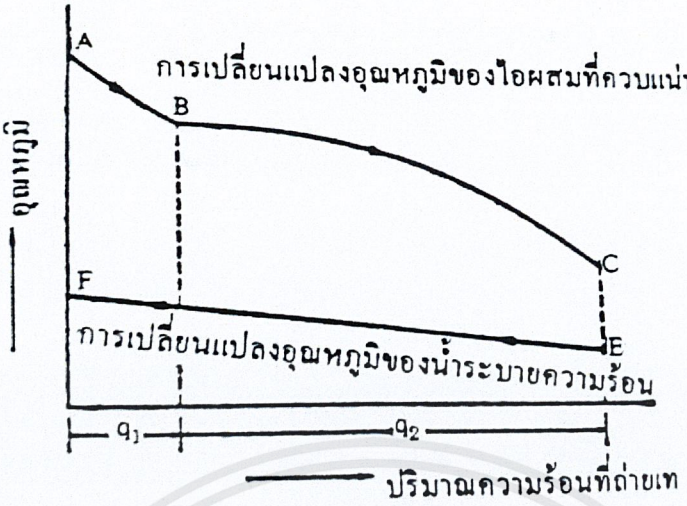
(Saturated Point) ของไอนี้ที่ B ในช่วงจาก A ถึง B ไอยิ่งยวดจะอยู่ในสภาวะก๊าซ ดังนั้น การแลกเปลี่ยนความร้อน จึงเกิดขึ้นระหว่างก๊าซและของเหลว จากจุดอิ่มตัว B จนถึงจุด C ไออิ่มตัว (Saturated Vapor) จะค่อย ๆ คายความร้อนแฝง (Latent Heat) ในขณะที่ควบแน่นเปลี่ยนสภาวะจากไอเป็นของเหลว ดังนั้นในช่วง BC การแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเกิดขึ้นระหว่างไอที่กำลังควบแน่นกับของเหลว โดยทั่วไปแล้ว กระบวนการถ่ายเทความร้อนนี้จะเป็นช่วงที่สำคัญที่สุด จากจุด C ถึง D ของไหลที่เกิดจากการควบแน่นจะค่อย ๆ คายความร้อนสัมผัสออกในขณะที่เย็นตัวลงเรื่อย ๆ ดังนั้น การแลกเปลี่ยนความร้อนจึงเกิดขึ้นระหว่างของเหลวและของเหลว ในกรณีที่ใช้ไอน้ำอิ่มตัวแทนไอยิ่งยวด การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในช่วง AB จะไม่เกิดขึ้น ส่วนในกรณีที่ใช้กับดักไอน้ำ (Steam Trap) ปล่อยน้ำที่เกิดจากการควบแน่นทิ้งออกจากเครื่อง การลดอุณหภูมิในช่วง CD จะแทบไม่เกิดขึ้นเลย



ภาพที่ 2.32 เส้นควบแน่นของไอยิ่งยวด

ภาพที่ 2.33 แสดงตัวอย่างเส้นจุดน้ำค้าง (Dew Point Curve) ของไอผสมของสารหลายชนิด (Multi-component Vapor) ในกรณีนี้ ไอผสมซึ่งอยู่ในสภาวะก๊าซที่อุณหภูมิที่จุดป้อน A จะค่อย ๆ คายความร้อนสัมผัสให้กับน้ำระบายความร้อน จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงถึงจุด B หลังจากจุดนี้ การควบแน่นของไอผสมจะเริ่มเกิดขึ้นเนื่องจากการควบแน่น (การกลั่นตัว) จะเกิดขึ้นกับองค์ประกอบ (Component) ของไอผสมที่หนักกว่าก่อน ในกรณีเช่นนี้ เส้นจุดน้ำค้างจะเป็นเหมือนเส้นโค้ง BC ในภาพที่ 2.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 2.33 เส้นจุดน้ำค้างของไอผสม

ดังที่ได้อธิบายไว้ข้างต้น ลักษณะการถ่ายเทความร้อนภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเปลี่ยนตามการเปลี่ยนสภาวะ (Phase) ของของไหล ด้วยเหตุนี้ การที่จะใช้ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิธัม ในการคำนวณผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยด้วยวิธีเดียวกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั่ว ๆ ไปที่ไม่มีการเปลี่ยนสภาวะของของไหลนี เครื่องจึงไม่ถูกต้อง ในกรณีเช่นนี้ ควรใช้สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยน้ำหนัก และผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยโดยน้ำหนักแทนสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวมและผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามลำดับ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ยโดยน้ำหนัก และผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยโดยน้ำหนัก คำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$U_{wt} = \frac{\Sigma U_{ci} A_i}{\Sigma A_i} = \frac{U_{c1}A_1 + U_{c2}A_2 + U_{c3}A_3}{A_1 + A_2 + A_3} \tag{2.86}$$

$$\Delta t_{mwt} = \frac{Q}{\frac{q_1}{\Delta t_1} + \frac{q_2}{\Delta t_2} + \frac{q_3}{\Delta t_3}} \tag{2.87}$$

ในที่นี้

$$Q = q_1 + q_2 + q_3 = A_1 U_{c1} \Delta t_1 + A_2 U_{c2} \Delta t_2 + A_3 U_{c3} \Delta t_3 \tag{2.88}$$

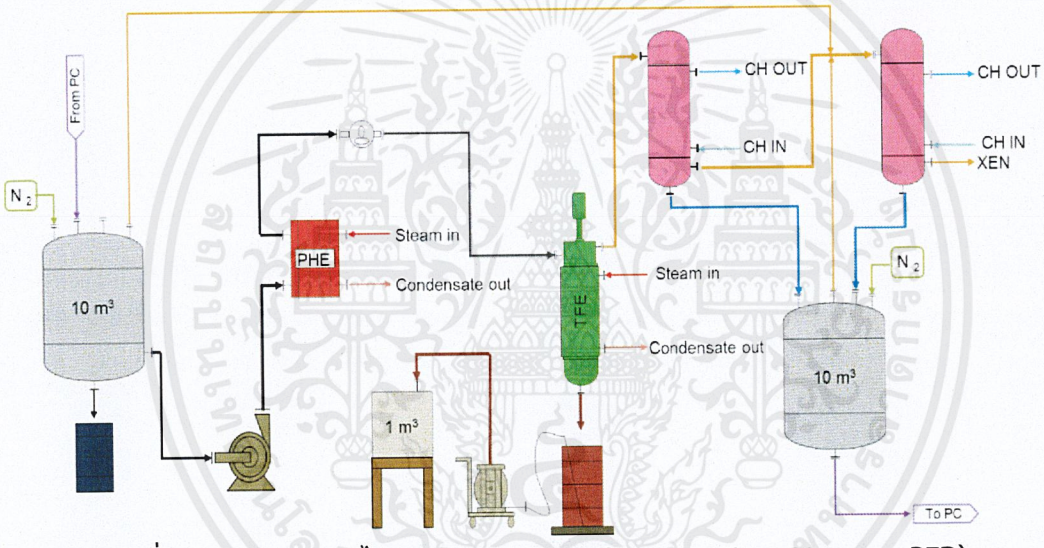
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

โครงงานสหกิจศึกษานี้ ได้ทำการศึกษาหลักการทำงาน การคำนวณเพื่อตรวจสอบการออกแบบของอุปกรณ์ต่าง ๆ และจัดทำแม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel ดังนี้

3.1 การศึกษากระบวนการผลิตและการทำงานของอุปกรณ์

ศึกษากระบวนการผลิต ทิศทางการไหลของสาร จากแผนภาพกระบวนการผลิต (Piping and Instrumentation Diagram, P&ID) เพื่อนำมาเขียนเป็นแผนภาพการไหลของกระบวนการ (Process Flow Diagram, PFD) เพื่อให้มีความเข้าใจง่าย ไม่ซับซ้อน ดังแสดงในภาพที่ 3.1

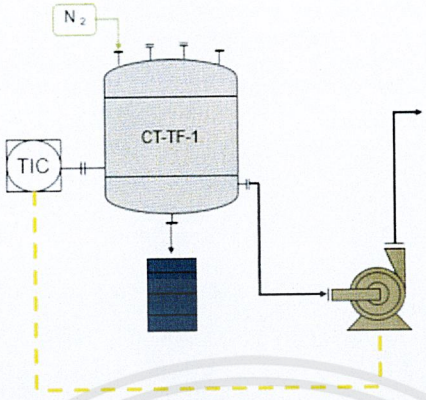


ภาพที่ 3.1 แผนภาพการไหลของกระบวนการ (Process Flow Diagram, PFD)

ศึกษาระบบการทำงานของอุปกรณ์ เพื่อนำมาเขียนเป็นผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของอุปกรณ์ ดังนี้

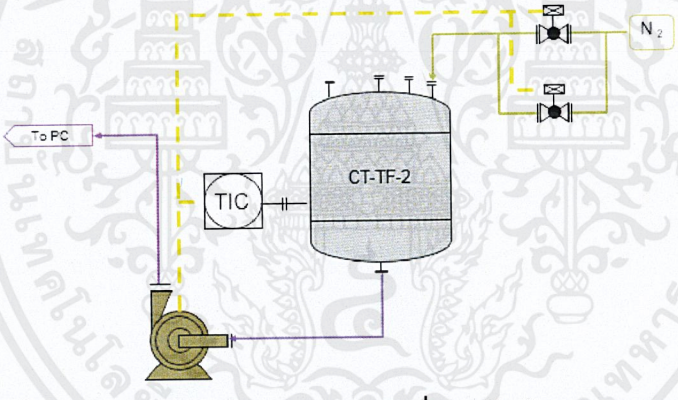
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปั๊มสำหรับส่งสารไปยังเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง (PUTF-1)



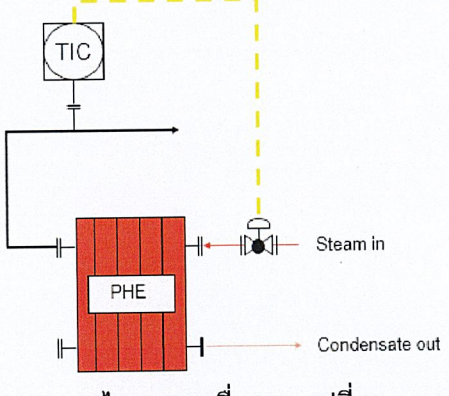
ภาพที่ 3.2 แผนภาพการไหลของสารที่ถูกส่งไปยังเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง (PUTF-1)

2. ปั๊มสำหรับส่งสารในกระบวนการล้าง (PUTF-2)



ภาพที่ 3.3 แผนภาพการไหลของของสารที่ถูกส่งไปยังกระบวนการล้าง

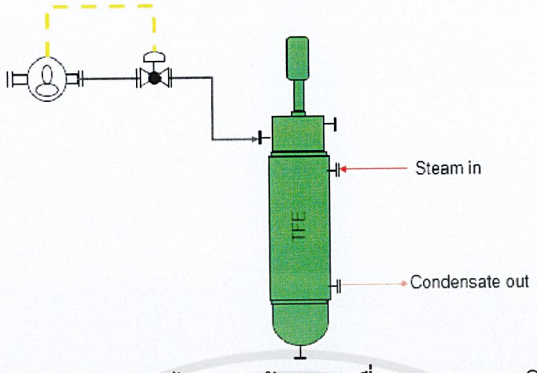
3. วาล์วควบคุมไอน้ำขาข้าวของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น



ภาพที่ 3.4 แผนภาพการไหลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น

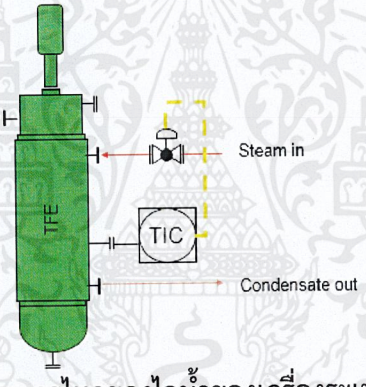
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วาล์วควบคุมอัตราการไหลขาข้าวของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง



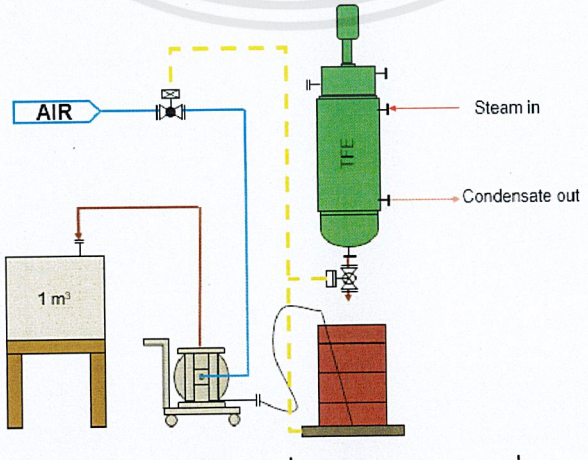
ภาพที่ 3.5 แผนภาพการไหลขาเข้าของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

5. วาล์วควบคุมไอน้ำขาข้าวของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง



ภาพที่ 3.6 แผนภาพการไหลของไอน้ำของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

6. Load Cell สำหรับการบรรจุสารที่ไม่ระเหยจากของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง



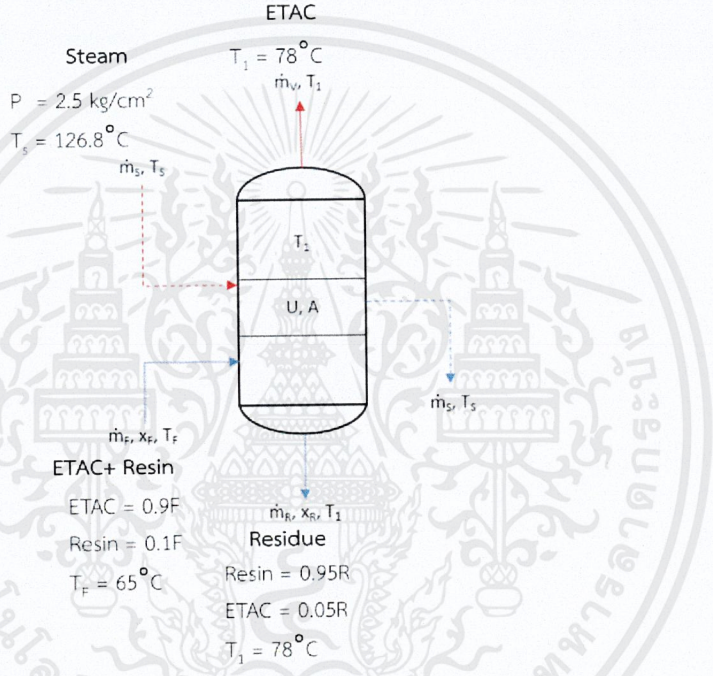
ภาพที่ 3.7 แผนภาพการไหลของการบรรจุสารที่ไม่ระเหยจากของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การคำนวณเพื่อตรวจสอบการออกแบบของอุปกรณ์

3.2.1 เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

คำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง โดยในการคำนวณกำหนดให้ Ethyl Acetate ที่ต้องการระเหยมีปริมาณเรซิ่นทั้งหมด 10% โดยมีอัตราการป้อนเข้าสู่เครื่อง (Q) 15 L/min และมีอุณหภูมิ 65 °C เครื่องระเหยทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่ทำให้ Ethyl Acetate ระเหยออกไปที่อุณหภูมิ 78 °C ขณะที่ใช้ไอน้ำที่ความดัน 2.5 kg/cm^2 ต้องการให้ความเข้มข้นสุดท้ายของเรซิ่นเป็น 95% ดังภาพที่ 3.8



ภาพที่ 3.8 แผนภาพแสดงคุณสมบัติของเส้นทางการไหล

3.2.2 ถังเก็บสารเคมี

คำนวณหาปริมาตร ความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังเก็บสารเคมีในโครงการเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง ซึ่งมีลักษณะเป็นถังรับแรงดันแนวตั้ง และมีหัวถังแบบครึ่งทรงรี 2:1

3.2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

คำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยแบ่งการคำนวณเป็น 2 กรณี ได้แก่

1. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเชลล์และท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การจัดทำแม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel

จัดทำแม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel ที่ใช้สำหรับการคำนวณ ซึ่งภายในไฟล์การคำนวณจะมีข้อมูลสำคัญ เช่น วิธีการใช้งาน ข้อจำกัดการใช้งาน และค่าที่ใช้ในการคำนวณ เป็นต้น ดังนี้

1. แม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง
2. แม่แบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง
3. แม่แบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน
4. แม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

3.4 การทดสอบและปรับปรุงแม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel

ทดสอบการใช้งานแม่แบบการคำนวณ โดยใช้ตัวอย่างในหนังสือหรือเปรียบเทียบการคำนวณกับโปรแกรมการคำนวณอื่น ที่เชื่อถือได้ เช่น Aspen plus เพื่อเป็นการเปรียบเทียบผลการคำนวณและปรับปรุงไฟล์การคำนวณให้มีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายกรณี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการวิจัย

4.1 ขั้นตอนกระบวนการระเหยและการทำงานของอุปกรณ์

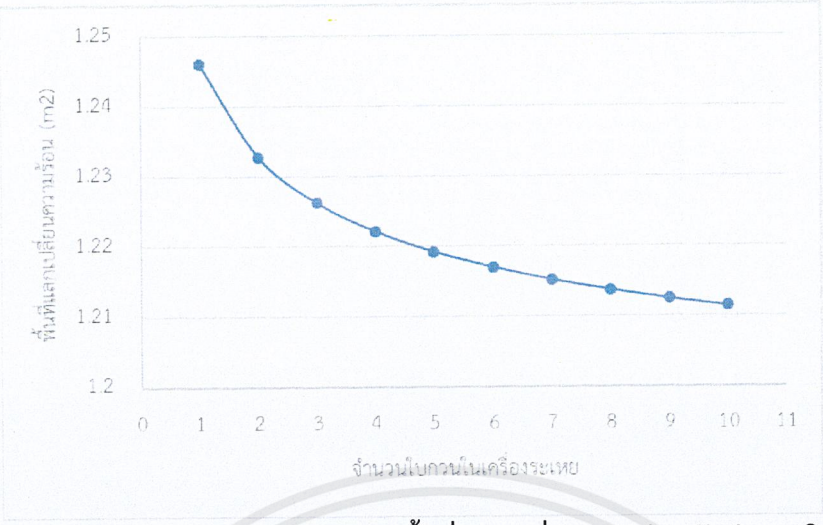
หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการล้างถังทำปฏิกิริยา และท่อ ด้วยสารตัวทำละลายหรือ Ethyl Acetate สารที่ปนเปื้อนจะถูกส่งจากส่วนการผลิต มาเก็บไว้ในถังเก็บสารเคมี เพื่อรอการนำไประเหยที่เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง เมื่อเริ่มกระบวนการระเหย สารจะถูกปั๊มดูด เพื่อส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น เพื่อให้ความร้อนแก่สาร จนกระทั่งมีอุณหภูมิขาออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่นเท่ากับ 65°C จากนั้นสารจะส่งผ่านเครื่องมือวัดการไหลและวาล์วควบคุม เพื่อควบคุมอัตราการไหลของสารให้เท่ากับ 9 L/min (อัตราการไหลจะอยู่ในช่วง 2-15 L/min) เมื่อสารเข้าไปที่เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง สารจะถูกใบกวนปาดไปที่ผนังของเครื่องระเหยให้เป็นฟิล์มบาง ๆ สารจะได้รับความร้อนจากไอน้ำที่ถูกควบคุมอุณหภูมิที่ 105°C ซึ่งสารที่ไม่ระเหยจะออกจากเครื่องระเหยทางด้านล่าง ลงสู่ถังใต้เครื่องระเหย ซึ่งมี Load Cell สำหรับชั่งน้ำหนักของถัง เมื่อ Load Cell ชั่งน้ำหนักได้เท่ากับ 150 kg Load Cell จะสั่งให้วาล์วใต้เครื่องระเหยปิด และวาล์วลมของปั๊มไดอะแฟรมเปิด เพื่อให้ปั๊มไดอะแฟรมดูดสารจากถังใต้เครื่องระเหย ไปเก็บไว้ที่ถังขนาด 1 m^3 เพื่อรอการนำไปกำจัด และเมื่อ Load Cell ชั่งน้ำหนักได้เท่ากับ 50 kg Load Cell จะสั่งให้วาล์วใต้เครื่องระเหยเปิด และวาล์วลมของปั๊มไดอะแฟรมปิด โดยการทำงานนี้จะทำงานวนไปเรื่อย ๆ จนหยุดกระบวนการระเหย ส่วนไอของสารตัวทำละลายจะออกทางด้านบนของเครื่องระเหยและเข้าไปสู่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทั้งสองเครื่อง เพื่อทำการควบแน่นจากไอเป็นของเหลว และเก็บไว้ในถังเก็บสารเคมีสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการล้างครั้งต่อไป

4.2 การคำนวณเพื่อตรวจสอบการออกแบบของอุปกรณ์

4.2.1 เครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

ในการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง เนื่องจากความลับทางการค้า ทำให้ไม่ทราบค่าจำนวนใบกวนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง ดังนั้นจึงคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับจำนวนใบกวนในเครื่องระเหย จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ดังภาพที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับจำนวนใบกวนในเครื่องระเหย

จากภาพที่ 4.1 จะเห็นได้ว่ายิ่งใบกวนเพิ่มขึ้น พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนจะน้อยลง เนื่องจากใบกวนมากขึ้น จะปาดสารให้เป็นฟิล์มที่ผนังได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการระเหยดีขึ้นเช่นเดียวกัน ดังนั้นจึงใช้จำนวนใบกวนเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าที่มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากที่สุด ในการคำนวนเพื่อหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตารางเปรียบเทียบค่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

ข้อมูล	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)
จากบริษัทผู้ผลิต	3
จากการคำนวณ	1.25

จากผลการคำนวนจะได้ค่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการจากการคำนวณเท่ากับ 1.25 m^2 เมื่อเทียบกับข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต ซึ่งมีค่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนเท่ากับ 3 m^2 ค่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่า ดังนั้นเครื่องระเหยแบบฟิล์มบางที่จัดซื้อจึงสามารถใช้งานได้

4.2.2 ถังเก็บสารเคมี

การคำนวณหาปริมาตร ของถังเก็บสารเคมีจากแบบ จากผลการคำนวณที่แสดงในตารางที่ 4.2 ปริมาตรทั้งหมดของถังเท่ากับ 10.50 m^3 ซึ่งในกระบวนการผลิตต้องการถังเก็บสารเคมีปริมาตร 10 m^3 และจากการคำนวณหาความหนาและความดันทำงานที่ยอมรับได้ของถังเก็บสารเคมี ซึ่งในกระบวนการผลิตต้องการถังที่สามารถรับแรงดันภายในได้เท่ากับ 4 kg/cm^2 จากผลการคำนวณใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ถ้าถังรับแรงดันเท่ากับ 4 kg/cm^2 ถังเก็บสารเคมีต้องการความหนาเท่ากับ 4.77 mm ซึ่งทางบริษัทผู้ผลิตสินค้าได้ออกแบบถังที่ความหนา 5 mm ดังนั้นจึงคำนวณหาค่าความดันสูงสุดที่ยอมรับได้ที่ความหนาถัง 5 mm จะได้ค่าความดันทำงานสูงสุดที่ยอมรับได้ในกรณีที่ถังภายใต้ความดันภายในเท่ากับ 4.19 kg/cm^2 และค่าความดันทำงานสูงสุดที่ยอมรับได้ในกรณีที่ถังภายใต้ความดันภายนอกเท่ากับ 1.34 kg/cm^2 ดังนั้นถังเก็บสารเคมีที่จัดซื้อจึงสามารถใช้งานได้กับกระบวนการระเหยนี้

ตารางที่ 4.2 ตารางเปรียบเทียบค่าการออกแบบของถังเก็บสารเคมี

ข้อมูล		จากบริษัทผู้ผลิต	จากการคำนวณ
ปริมาตร	m^3	10	10.5
ความหนาที่ต้องการ	mm	5	4.77
ความดันภายในที่รับได้	kg/cm^2	4	4.19
ความดันภายนอกที่รับได้	kg/cm^2	1	1.34

4.2.3 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

จากการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต ดังตารางที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าค่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนที่ต้องการที่ได้จากการคำนวณมีค่าน้อยกว่าค่าจากบริษัทผู้ผลิต ดังนั้นเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่จัดซื้อจึงสามารถใช้งานได้ในกระบวนการนี้

ตารางที่ 4.3 ตารางเปรียบเทียบค่าพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ชนิดของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน	พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน (m^2)	
	จากการคำนวณ	จากบริษัทผู้ผลิต
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น	0.5	0.21
เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเชลล์และท่อ	30	7.49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 แม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel

การจัดทำแม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel ที่ใช้สำหรับการคำนวณ ได้ทำการทดสอบการใช้งาน เพื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณ ซึ่งผลการคำนวณที่ได้เท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยตัวเอง และมีค่าที่ใกล้เคียงหรือเท่ากับโปรแกรมการคำนวณที่น่าเชื่อถืออีกด้วย อีกทั้งได้ทำการล็อคเซลล์ไว้ เพื่อป้องกันไม่ให้บุคคลอื่นมาแก้ไขหรือทำให้สูตรการคำนวณเสียหาย

4.3.1 แม่แบบสำหรับการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

ภาพที่ 4.2 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

ภายในไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel จะประกอบด้วย แผ่นงานการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง และแผ่นงานข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง โดยการใช้แม่แบบการคำนวณจำเป็นต้องใส่ข้อมูลให้ครบถ้วน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ ดังตารางที่ 4.4

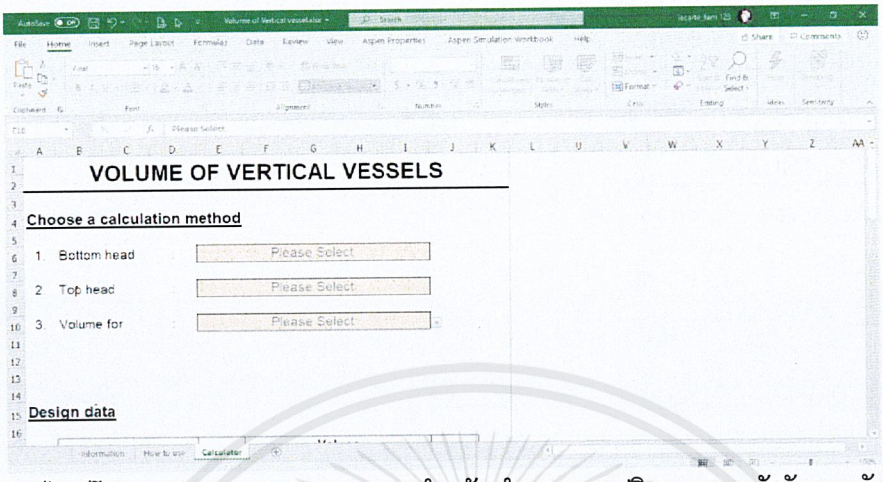
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ตารางแสดงข้อมูลของแม่แบบสำหรับการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

ข้อมูลที่ป้อน	ผลลัพท์
1. สัดส่วนโดยมวลของขาเข้าและขาออก 2. ความหนาแน่น - สารตัวทำละลาย - สารที่ปนเปื้อน - ไอน้ำ 3. อัตราการไหลของสายป้อน 4. ความจุความร้อนจำเพาะ - สารตัวทำละลาย - สารที่ปนเปื้อน - ไอน้ำ 5. อุณหภูมิของขาเข้าและขาออก 6. เอนทัลปีของไอน้ำ 7. ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน 8. ความหนืดพลวัตร 9. อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำต่อหน่วยความยาว 10. เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องระเหย 11. ความยาวของเครื่องระเหย 12. ความหนาของผนังเครื่องระเหย 13. จำนวนใบกวนในเครื่องระเหย 14. ความเร็วในการหมุนของใบกวน	1. อัตราการไหลเชิงมวลของไอระเหย 2. อัตราการไหลเชิงมวลของสารที่ไม่ระเหย 3. อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำขาเข้า 4. พลังงานความร้อนในการระเหย 5. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม 6. พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 แม่แบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง



ภาพที่ 4.3 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง

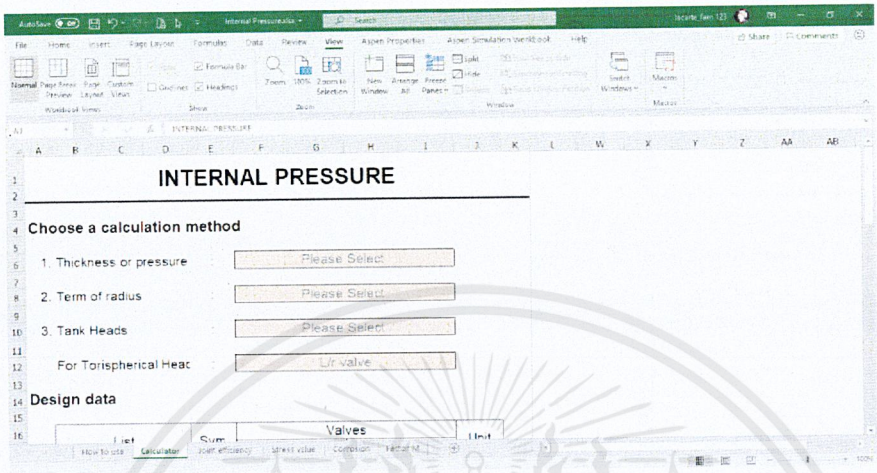
ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel จะประกอบด้วย วิธีการคำนวณ วิธีการใช้งาน และรูปแบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง โดยการคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง โดยใช้แม่แบบการคำนวณ จำเป็นต้องเลือกเงื่อนไขการคำนวณ และใส่ข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณให้ครบถ้วน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ต้องการ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ตารางแสดงข้อมูลของแม่แบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง

ข้อมูลที่ป้อน	ผลลัพท์
1. ชนิดของหัวถัง 2. ช่วงที่ต้องการคำนวณหาปริมาตร - ตัวถังทรงกระบอก - ก้นถัง - หัวถัง - ตัวถังทรงกระบอกกับก้นถัง - ปริมาตรทั้งหมด 3. เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 4. ระดับของเหลว	1. ปริมาตรของถังในช่วงที่ต้องการ - ตัวถังทรงกระบอก - ก้นถัง - หัวถัง - ตัวถังทรงกระบอกกับก้นถัง - ปริมาตรทั้งหมด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.3 แม่แบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังภายใต้ความดันภายใน



ภาพที่ 4.4 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน

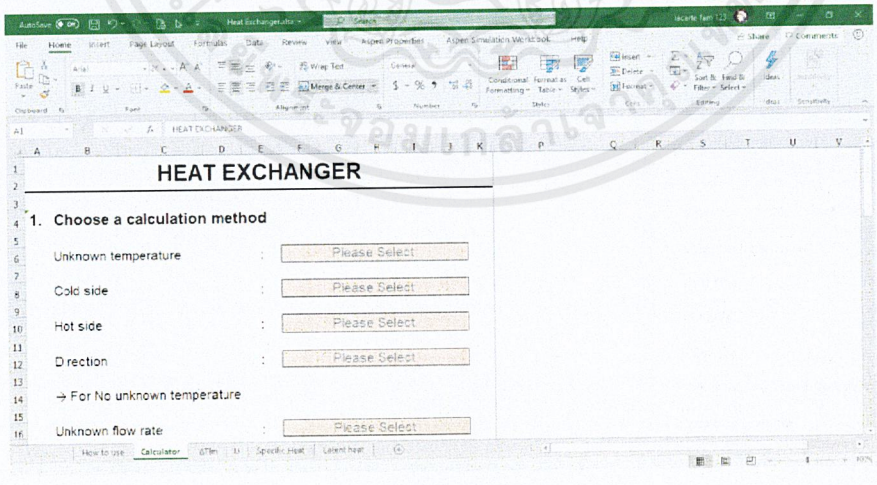
ภายในไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel จะประกอบด้วย วิธีการใช้และข้อจัดกัดของแต่ละหัวถัง รูปแบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน และค่าสำหรับใช้ในการคำนวณ โดยแยกเป็นแต่ละแผ่นงาน และการคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน โดยใช้แม่แบบการคำนวณ จำเป็นต้องเลือกเงื่อนไขการคำนวณ และใส่ข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณให้ครบถ้วน ดังตารางที่ 4.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 ตารางแสดงข้อมูลของแม่แบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน

ข้อมูลที่ป้อน	ผลลัพท์
1. ค่าที่ต้องการทราบ - ความหนาของผนัง - ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด 2. เทอมของสมการ 3. ชนิดของหัวถัง 4. ความดันออกแบบ 5. ความหนาผนัง 6. ค่าความเค้นของวัสดุ 7. ประสิทธิภาพรอยต่อ 8. รัศมีของถัง 9. เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง 10. ค่าเผื่อการกัดกร่อน	1. ความหนาผนังที่ต้องการ 2. ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

4.3.4 แม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ 4.5 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel จะประกอบด้วย วิธีการใช้และข้อจัดกัด แม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และค่าสำหรับใช้ในการคำนวณ โดยแยกเป็นแต่ละแผ่นงาน โดยการพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน โดยใช้แม่แบบการคำนวณ จำเป็นต้องเลือกเงื่อนไขการคำนวณ และใส่ข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณให้ครบถ้วน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางแสดงข้อมูลของแม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ข้อมูลที่ป้อน	ผลลัพท์
1. สถานะของฝั่งร้อนและเย็น	1. พลังงานความร้อนที่ต้องการ
2. ทิศทางการไหล	2. อุณหภูมิขาออกที่ไม่ทราบค่า
3. อัตราการไหลเชิงมวล	3. อัตราการไหลเชิงมวลขาออกที่ไม่ทราบค่า
4. อุณหภูมิขาเข้าและขาออกที่ทราบค่า	4. ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเชิงล็อกการิธัม
5. จุดเดือดของสาร	5. พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน
6. ความจุความร้อนจำเพาะ	
7. ความร้อนแฝง	
8. สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

กระบวนการผลิตและระบบการทำงานของอุปกรณ์ที่ได้กล่าวไปข้างต้น ได้มีการประเมินจากการชี้บ่งอันตรายของกระบวนการ และการปฏิบัติงาน (Hazard and Operability Study, HAZOP) เป็นที่เรียบร้อย และจากการคำนวณเพื่อตรวจสอบการออกแบบของอุปกรณ์ เมื่อเปรียบเทียบผลการคำนวณกับค่าที่ได้จากบริษัทผู้ผลิตแล้ว จะเห็นได้ว่าอุปกรณ์ที่จัดซื้อนั้น สามารถใช้งานได้ แม่แบบการคำนวณที่พัฒนาบนโปรแกรม Microsoft Excel สามารถใช้ในการคำนวณในโครงงานนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดเวลาและความยุ่งยากในการทำงานในอนาคต อย่างไรก็ดีแม่แบบการคำนวณเหล่านี้มีสิ่งที่ต้องทำการพัฒนาและแก้ไข ให้สามารถนำไปใช้ได้หลากหลายยิ่งขึ้น เพื่อเป็นประโยชน์แก่บริษัทต่อไป

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 กระบวนการผลิตและระบบการทำงานของอุปกรณ์อาจมีการเปลี่ยนแปลง เพื่อปรับให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง

5.2.2 ในการคำนวณอาจมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากเงื่อนไขที่กำหนดกับเงื่อนไขที่เกิดขึ้นจริงอาจมีความแตกต่างกัน ส่งผลให้สมการที่ใช้ในการคำนวณไม่เหมาะสม

5.2.3 ในการคำนวณค่าของตัวแปรต่าง ๆ อาจมีความคลาดเคลื่อนจากคุณสมบัติของสารและสมมติฐานที่ใช้ เพื่อความเหมาะสมกับสมการที่นำมาใช้ในการคำนวณ เนื่องจากยังไม่มีการติดตั้งอุปกรณ์และท่อ ทำให้มีข้อมูลที่ไม่ทราบ เช่น อัตราการไหลขาเข้าของไอน้ำ จำนวนใบพัดของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง อุณหภูมิขาออกของน้ำเย็น เป็นต้น

5.2.4 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ คิดจากประสิทธิภาพของอุปกรณ์ 100% หรือไม่มีการสูญเสียพลังงาน จึงควรมีการคูณค่าความปลอดภัยก่อนการจัดซื้ออุปกรณ์

5.2.5 แม่แบบการคำนวณในโปรแกรม Microsoft Excel มีข้อจำกัดในการใช้งาน ทำให้บางกรณีไม่สามารถใช้งานได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] เจริญ เจริญชัย, "หน่วยที่ 7 การระเหย," [Online]. Available: https://ajarncharoen.wordpress.com/food-eng2/. [Accessed 9 สิงหาคม 2562].

[2] P. Ilmanen, "MODELING OF THIN FILM EVAPORATOR FOR IONIC LIQUID RECYCLING," 21 May 2017. [Online]. Available: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/27055/master_Ilmanen_Paulus_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Accessed 6 September 2019].

[3] ยูจีน เอฟ แม็กกีส, คู่มือถังรับแรงดัน, กรุงเทพฯ: บริษัท เอ็มแอนด์อี จำกัด, 2540.

[4] "VOLUME AND WETTED AREA OF PARTIALLY FILLED HORIZONTAL VESSELS," Neutrium, [Online]. Available: https://neutrium.net/equipment/volume-and-wetted-area-of-partially-filled-vessels/. [Accessed 6 September 2019].

[5] วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล, อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนในอุตสาหกรรม ฉบับปรับปรุงใหม่ (หน่วย SI), กรุงเทพฯ: คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2536.

[6] "Chemical Properties of Ethyl acetate," Cheméo, [Online]. Available: https://www.chemeo.com/cid/57-231-2/Ethyl%20acetate. [Accessed 17 September 2019].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

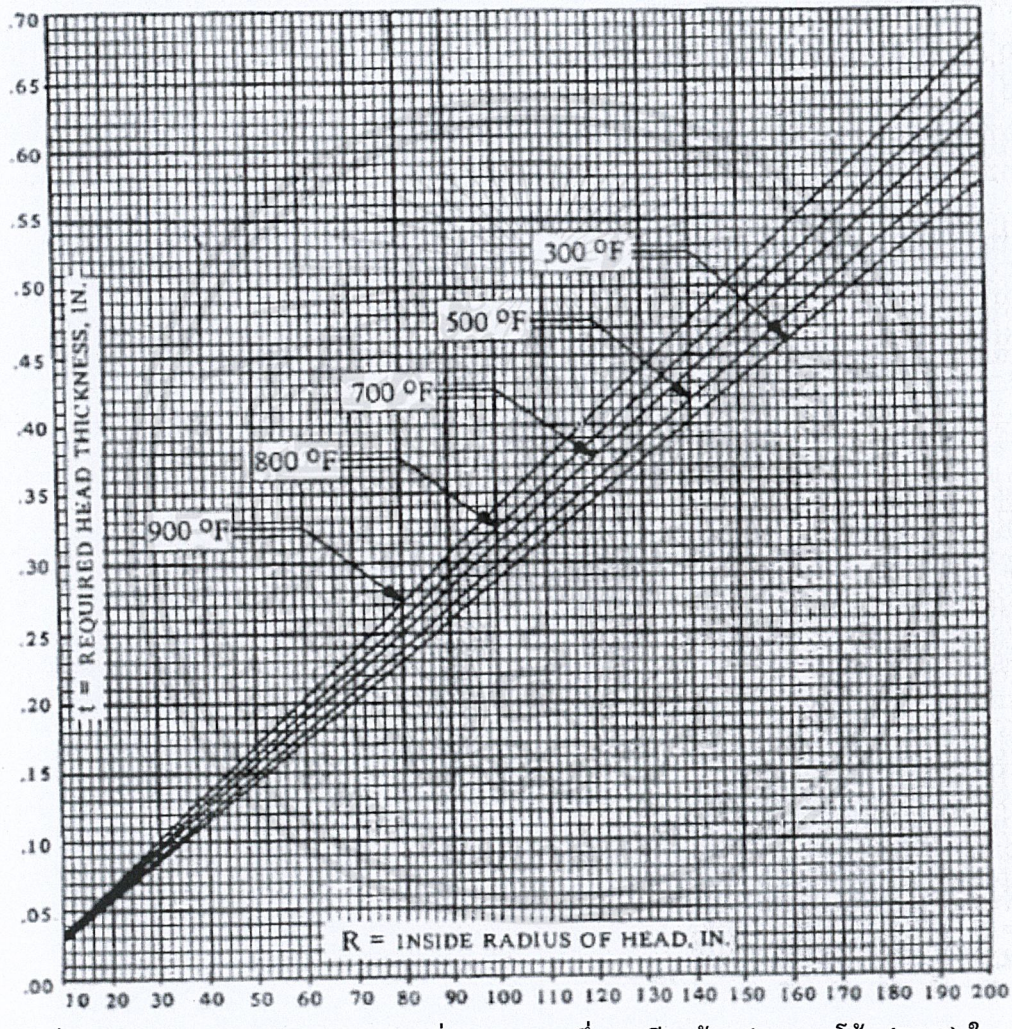
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
ข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

ก.1 แผนภาพสำหรับใช้หาความหนาผนังสำหรับถังที่อยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศสมบูรณ์แบบ [3]

แผนภาพสำหรับหัวถังชนิดครึ่งทรงกลม ครึ่งทรงรี หน้าแปลนและโค้ง (F&D) โดยความดันที่ยอมให้ได้กำหนดเท่ากับ 2,100 ถึง 2,660 kg/cm^2



ภาพที่ ก.1 แผนภาพสำหรับหัวถังชนิดครึ่งทรงกลม ครึ่งทรงรี หน้าแปลนและโค้ง (F&D) ในการลองสมมติค่าความหนาต่าง ๆ

1. หาค่า R
2. ใช้แผนภาพ ณ ค่า R
3. ลากขึ้นตามแนวตั้งถึงเส้นอุณหภูมิ
4. ลากตามแนวแกนและอ่านค่า t

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t คือ ความหนาหัวถังที่ต้องการ, mm

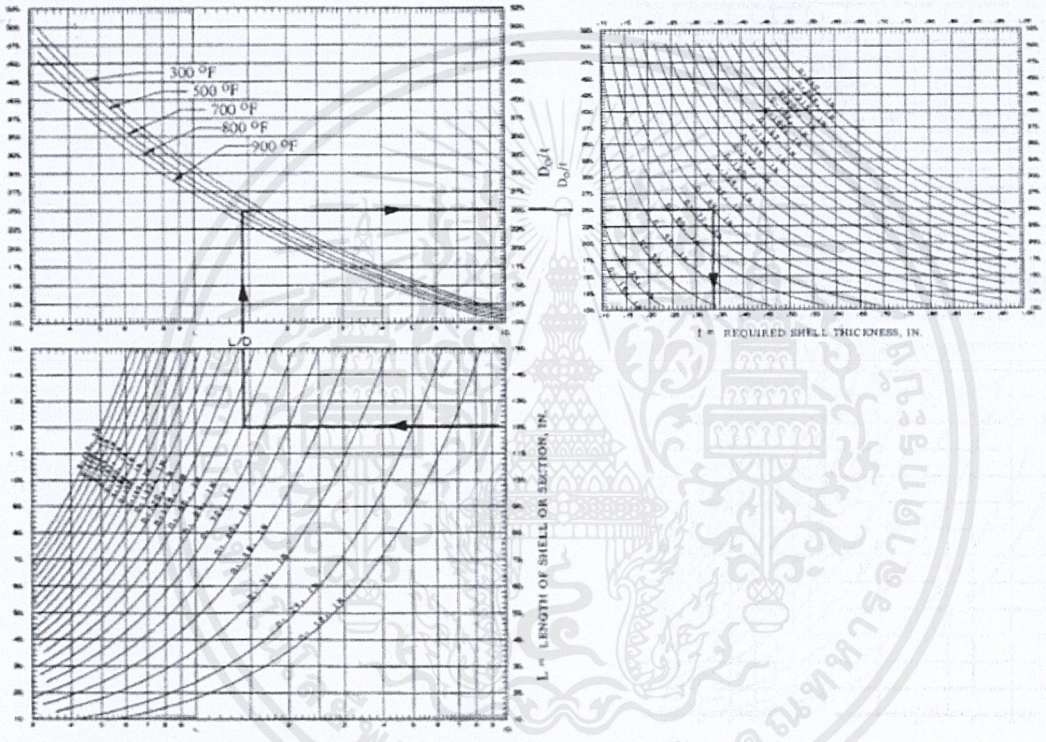
R สำหรับหัวถังครึ่งทรงกลม คือ รัศมีภายใน, mm

สำหรับหัวถังครึ่งทรงรี 2 : 1 คือ 0.9D

สำหรับหัวถังหน้าแปลนและโค้ง (F & D) คือ รัศมีครอบถังด้านใน, $R_{max} = D_o$

D_o คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของหัวถัง, mm

แผนภาพสำหรับตัวถังทรงกระบอก โดยความเค้นที่ยอมให้ได้กำหนดเท่ากับ 2,100 ถึง 2,660 kg/cm^2



ภาพที่ ก.2 แผนภาพสำหรับตัวถังทรงกระบอก ในการลองสมมติค่าความหนาต่าง ๆ

เพื่อที่จะหาความหนาตัวถังที่ต้องการ

1. ใช้แผนภูมิอันล่าง (หน้าคู่กัน) ณ ค่าของ L
2. ลากไปตามแนวขนานถึงเส้นกราฟค่า D_o
3. ลากขึ้นตามแนวตั้งถึงเส้นอุณหภูมิ
4. ลากไปตามแนวขนานและอ่านค่า D_o/t
5. ใช้แผนภาพข้างบน ณ ค่า D_o/t
6. ลากไปตามแนวขนานถึงเส้นกราฟ D_o
7. ลากลงตามแนวตั้งและอ่านค่าของ t

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t คือ ความหนาของตัวถังที่ต้องการ, mm

D คือ เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกของถัง, mm

L คือ ความยาวของถังหรือส่วนของถังโดยคิดค่าที่มากที่สุดของค่าต่อไปนี้:

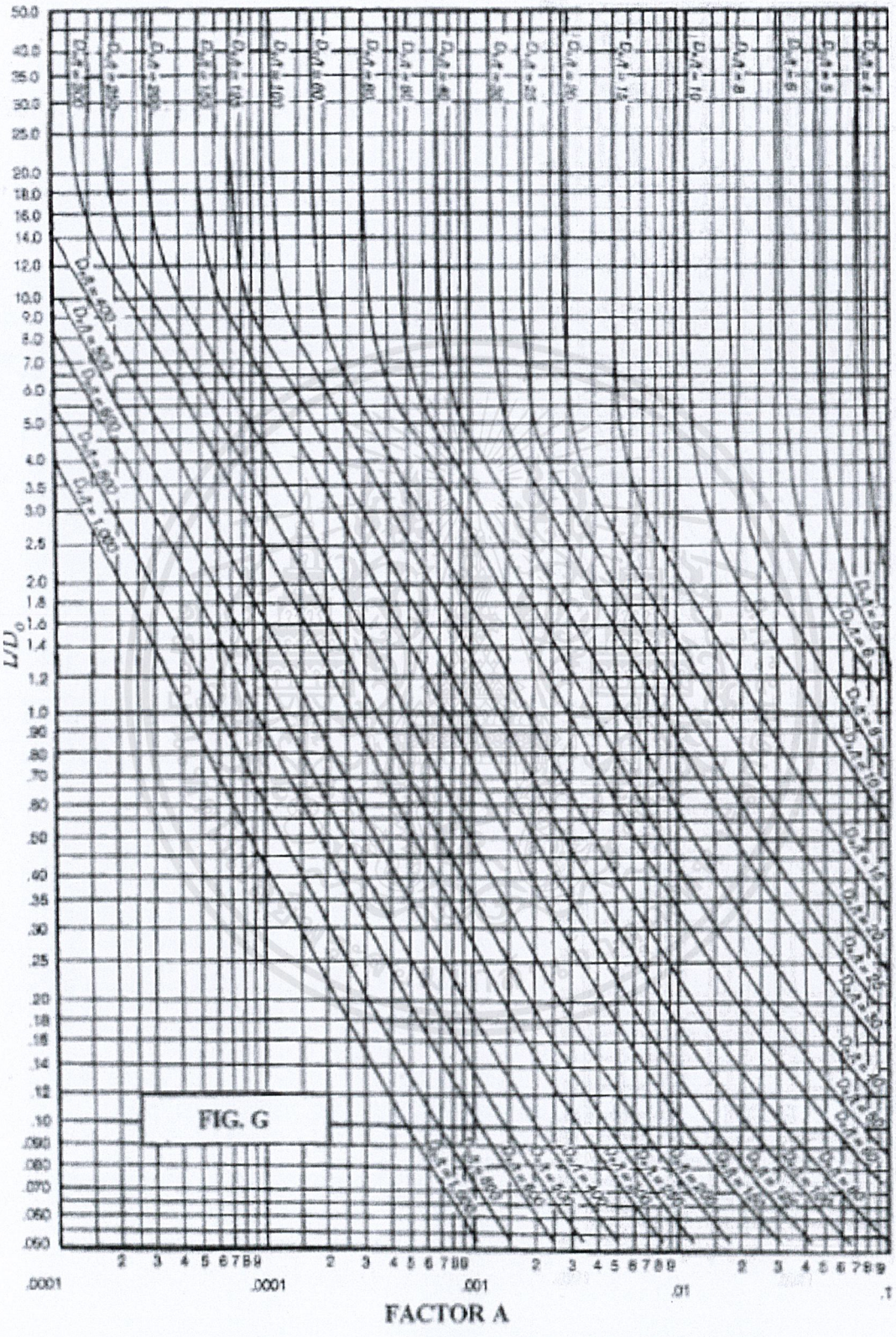
1. ระยะระหว่างเส้นสัมผัสของหัวถังบวก, ของความสูงของหัวตั้งถ้าไม่มีการใช้แหวนเสริมความแข็งแรง, mm

2. ระยะที่มากที่สุดระหว่างแหวนเสริมความแข็งแรงคู่ที่ใกล้กันคู่ใด ๆ . mm

3. ระยะจากศูนย์กลางของแหวนเสริมความแข็งแรงอันแรกกับเส้นสัมผัสหัวถังบวก / ของความสูงหัวตั้ง, mm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.2 ค่าของตัวประกอบ A ที่ในสมการสำหรับถังภายใต้แรงดันภายนอก [3]



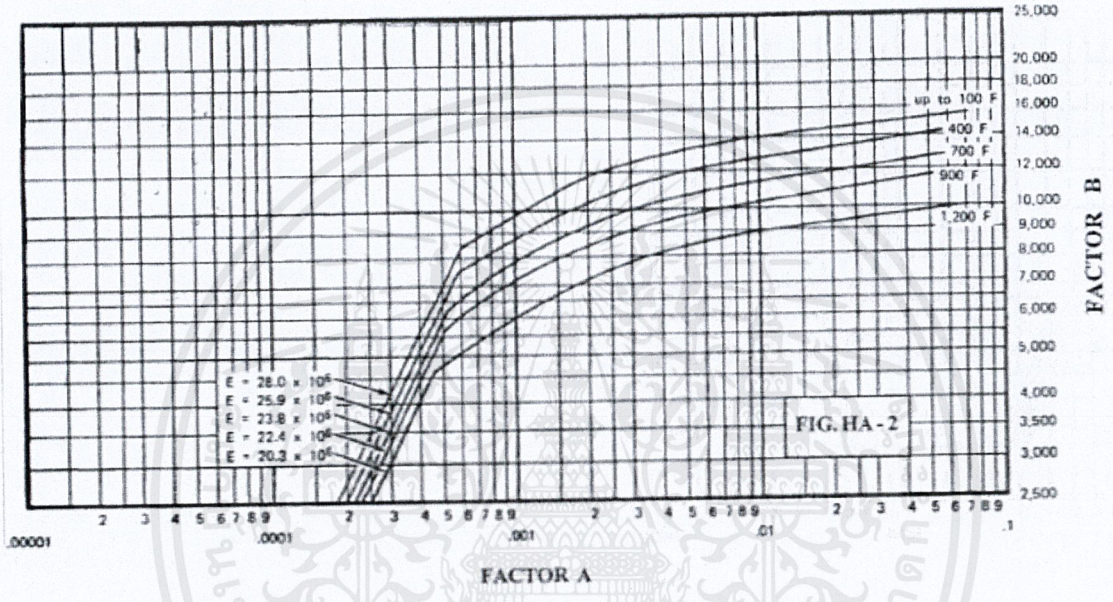
ภาพที่ ก.3 ค่าของตัวประกอบ A ที่ในสมการสำหรับถังภายใต้แรงดันภายนอก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.3 ค่าของตัวประกอบ B ที่ใช้ในสมการสำหรับถังภายใต้แรงดันภายนอก [3]

1. แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน

2. ค่าของแผนภาพใช้งานได้เมื่อถึงสร้างขึ้นจากเหล็กกล้าคาร์บอนและค่าความเค้นที่ยอมให้ได้กำหนดไว้เท่ากับ 2,100 kg/cm^2 และมากกว่าสำหรับรายการวัสดุที่มักใช้บ่อยตามแผนภาพนี้คือ: SA-283 C, SA-285 C, SA-515, SA-516 ทุกเกรด และเหล็กกล้าไร้สนิม SA-53-B ชนิด 405, SA-106-B ชนิด 410

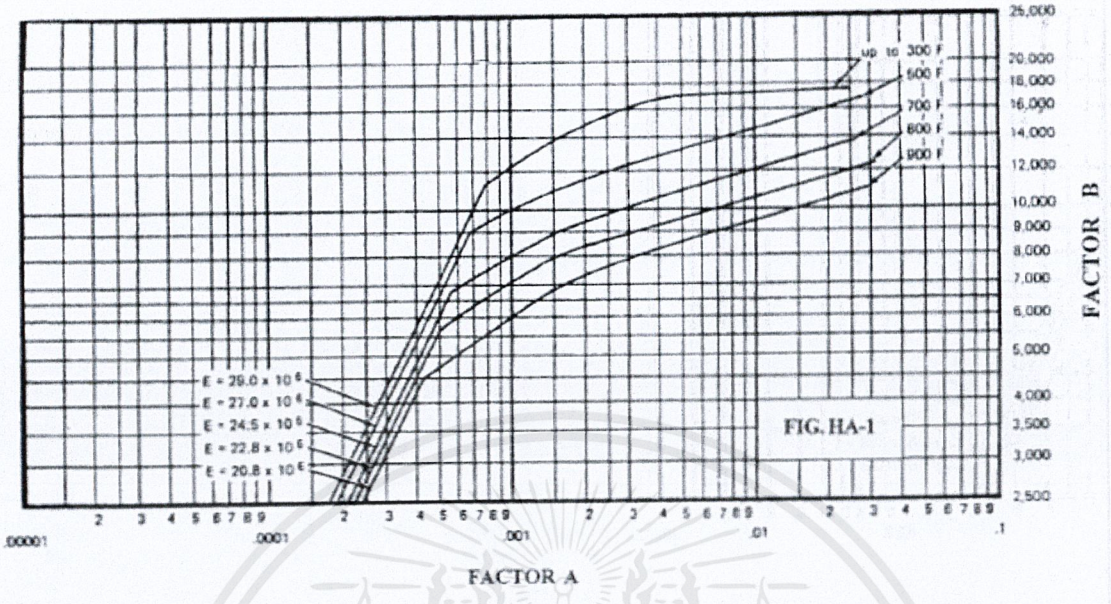


ภาพที่ ก.4 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าคาร์บอน

หมายเหตุ: ในกรณีซึ่งค่าของ A ตกอยู่ด้านขวาของปลายของเส้นอุณหภูมิให้สมมติจุดตัดกัน ณ เส้นขนานที่ยื่นต่อออกมาจากปลายด้านบนของเส้นอุณหภูมิ

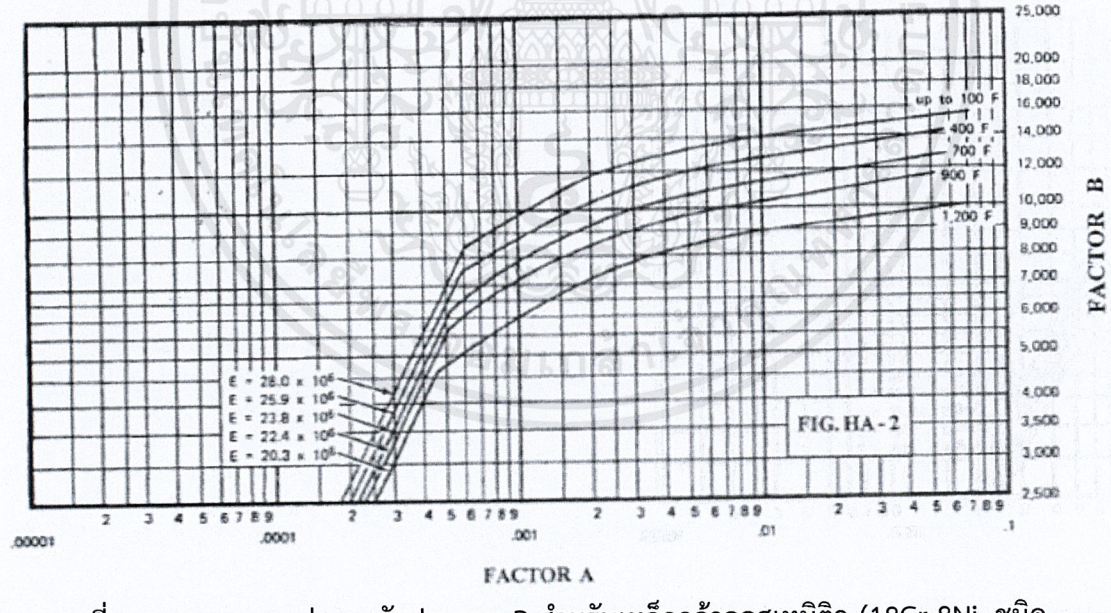
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni, ชนิด 364)



ภาพที่ ก.5 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni, ชนิด 364)

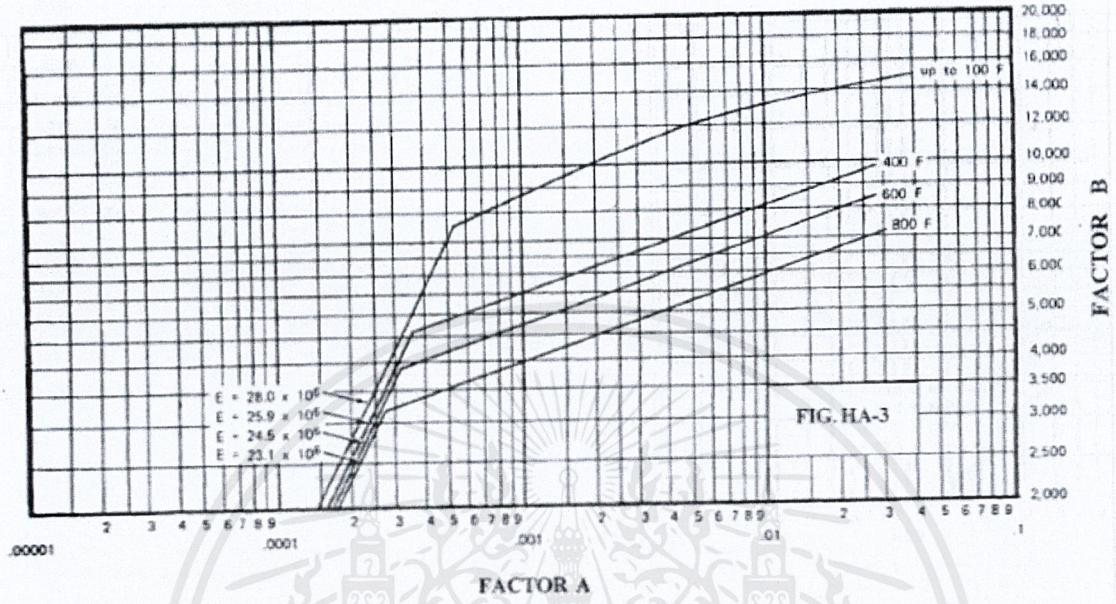
4. แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni, ชนิด 316)



ภาพที่ ก.6 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni, ชนิด 316)

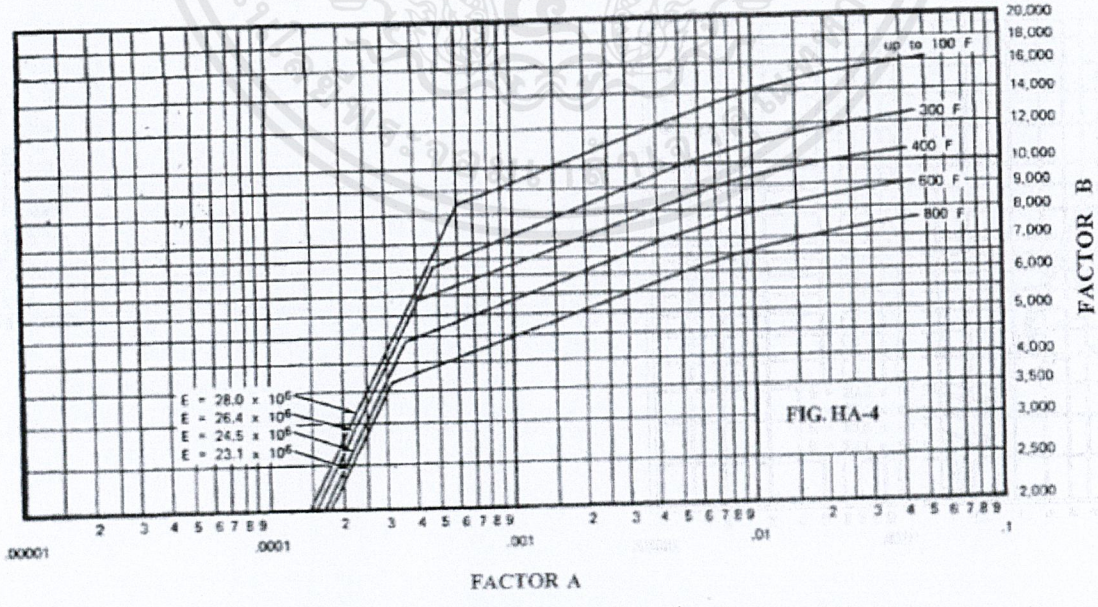
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni-Mo, คาร์บอนสูงสุด 0.03 ชนิด 304L)



ภาพที่ ก.7 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni-Mo, คาร์บอนสูงสุด 0.03 ชนิด 304L)

6. แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni-Mo,คาร์บอนสูงสุด 0.03, ชนิด 316L)



ภาพที่ ก.8 แผนภาพหาค่าของตัวประกอบ B สำหรับเหล็กกล้าออสเทนิติก (18Cr-8Ni-Mo,คาร์บอนสูงสุด 0.03, ชนิด 316L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก.4 คุณสมบัติของ Ethyl Acetate [6]

ชื่อเคมีทั่วไป Ethyl acetate

ชื่อพ้องอื่น ๆ Ethyl acetic ester; Acetoxyethane; Acetic ether; Vinegar naphtha; Acetidin; Acetic ester

สูตรโมเลกุล $C_4H_8O_2$

น้ำหนักโมเลกุล 88.11

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย
PAff	835.7	kJ/mol
BasG	804.7	kJ/mol
BasG	799.90 ± 0.20	kJ/mol
$\Delta_c H°_{liquid}$	-2238.54 ± 0.48	kJ/mol
$\Delta_c H°_{liquid}$	-2235.40 ± 3.90	kJ/mol
$\Delta_c H°_{liquid}$	-2256	kJ/mol
$\Delta_c H°_{liquid}$	-2246	kJ/mol
$\Delta_f G°$	-251.12	kJ/mol
$\Delta_f H°_{gas}$	-445.43 ± 0.84	kJ/mol
$\Delta_f H°_{gas}$	-444.80 ± 0.40	kJ/mol
$\Delta_f H°_{gas}$	-443.8	kJ/mol
$\Delta_f H°_{gas}$	-446.9	kJ/mol
$\Delta_f H°_{liquid}$	-480.57 ± 0.79	kJ/mol
$\Delta_f H°_{liquid}$	-479.86 ± 0.46	kJ/mol
$\Delta_f H°_{liquid}$	-478.82 ± 0.73	kJ/mol
$\Delta_f H°_{liquid}$	-482.00 ± 4.00	kJ/mol
$\Delta_{fus} H°$	8.9	kJ/mol
$\Delta_{vap} H°$	35.69	kJ/mol
$\Delta_{vap} H°$	35	kJ/mol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta_{vap}H°$	35.1	kJ/mol
$\Delta_{vap}H°$	35.10 ± 0.20	kJ/mol
$\Delta_{vap}H°$	35.1	kJ/mol
$\Delta_{vap}H°$	35.60 ± 0.10	kJ/mol
$\Delta_{vap}H°$	35.10 ± 0.20	kJ/mol
$\Delta_{vap}H°$	35.10 ± 0.20	kJ/mol
$\Delta_{vap}H°$	32.30 ± 0.42	kJ/mol
IE	10.01 ± 0.05	eV
IE	10.01 ± 0.05	eV
IE	10.00 ± 0.10	eV
IE	10.16	eV
IE	9.90 ± 0.05	eV
IE	10.24	eV
IE	10.11 ± 0.02	eV
IE	10.09 ± 0.02	eV
IE	10.45	eV
IE	9.9	eV
$logP_{oct/wat}$	0.57	
P_c	3882.00 ± 3.87	kPa
P_c	3830.00 ± 81.06	kPa
P_c	3851.70 ± 40.00	kPa
P_c	4018.00 ± 202.65	kPa
P_c	4280.00 ± 405.30	kPa
$S°_{gas}$	362.75	J/mol×K
$S°_{liquid}$	259.4	J/mol×K
T_{boil}	350.13 ± 0.30	K
T_{boil}	350.2	K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{boil}	350	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K
T_{boil}	349.25 ± 0.30	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K
T_{boil}	350.30 ± 0.20	K
T_{boil}	350.3	K
T_{boil}	350.30 ± 0.50	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K
T_{boil}	350.19 ± 0.50	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K
T_{boil}	350.30 ± 0.20	K
T_{boil}	350.30 ± 0.30	K
T_{boil}	375.00 ± 2.00	K
T_{boil}	350.35	K
T_{boil}	350.05 ± 0.30	K
T_{boil}	350.21 ± 0.50	K
T_{boil}	350.25 ± 0.50	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K
T_{boil}	350.00 ± 2.00	K
T_{boil}	350.29 ± 0.15	K
T_{boil}	350.15 ± 2.00	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K
T_{boil}	350.25 ± 0.50	K
T_{boil}	350.25 ± 0.30	K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{boil}	350.65 ± 2.00	K
T_{boil}	349.65 ± 2.00	K
T_{boil}	352.15 ± 2.00	K
T_{boil}	350.25 ± 1.00	K
T_{boil}	350.30 ± 1.00	K
T_{boil}	350.30 ± 1.00	K
T_{boil}	349.97 ± 2.00	K
T_{boil}	351.15 ± 2.00	K
T_{boil}	350.45 ± 1.00	K
T_{boil}	350.25 ± 1.00	K
T_{boil}	350.30 ± 0.40	K
T_{boil}	349.15 ± 2.00	K
T_{boil}	349.65 ± 2.50	K
T_{boil}	350.26 ± 0.06	K
T_{boil}	350.30 ± 0.15	K
T_{boil}	350.00 ± 2.00	K
T_{boil}	350.30 ± 0.50	K
T_{boil}	350.15 ± 2.00	K
T_{boil}	349.95 ± 2.00	K
T_{boil}	350.20 ± 0.50	K
T_{boil}	350.30 ± 0.20	K
T_{boil}	350.25 ± 0.50	K
T_{boil}	350.21 ± 0.50	K
T_{boil}	349.65 ± 2.00	K
T_{boil}	350.30 ± 0.50	K
T_{boil}	350.30 ± 0.50	K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{boil}	350.30 ± 0.50	K
T_{boil}	350.45 ± 0.60	K
T_{boil}	350.30 ± 0.30	K
T_{boil}	350.25 ± 1.00	K
T_{boil}	350.30 ± 0.20	K
T_{boil}	350.25 ± 1.00	K
T_{boil}	349.90 ± 0.20	K
T_{boil}	350.30 ± 0.50	K
T_{boil}	350.30 ± 0.20	K
T_{boil}	350.30 ± 0.50	K
T_{boil}	350.30 ± 2.00	K
T_{boil}	350.20 ± 2.00	K
T_{boil}	350.30 ± 2.00	K
T_{boil}	350.10 ± 2.00	K
T_{boil}	350.70 ± 2.00	K
T_{boil}	350.65 ± 2.00	K
T_{boil}	346.65 ± 3.00	K
T_{boil}	347.45 ± 2.00	K
T_{boil}	347.45 ± 2.00	K
T_c	523.2	K
T_c	523.30 ± 0.05	K
T_c	523.30 ± 1.00	K
T_c	523.30 ± 1.00	K
T_c	548.90 ± 20.00	K
T_c	522.70 ± 2.00	K
T_c	513.00 ± 6.00	K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{fus}	189.55	K
T_{fus}	189.18 ± 0.05	K
T_{fus}	189.35 ± 0.30	K
T_{fus}	189.55 ± 0.10	K
T_{fus}	189.77 ± 0.30	K
T_{fus}	190.77 ± 0.20	K
T_{fus}	190.00 ± 2.00	K
T_{triple}	189.30 ± 0.05	K
T_{triple}	189.30 ± 0.20	K
V_c	0.28	m^3/kg-mol

ตารางที่ ก. 2 คุณสมบัติที่ขึ้นกับอุณหภูมิ [6]

คุณสมบัติ	ค่า	หน่วย	อุณหภูมิ (K)
$C_{p,gas}$	125.82	J/mol×K	360
$C_{p,gas}$	131.06	J/mol×K	380
$C_{p,gas}$	136.22	J/mol×K	400
$C_{p,gas}$	142.8	J/mol×K	425
$C_{p,gas}$	149.47	J/mol×K	450
η	0	Pa×s	367.21
$\Delta_{fus}H$	10.48	kJ/mol	189.3
$\Delta_{fus}H$	10.48	kJ/mol	189.3
$\Delta_{fus}H$	10.48	kJ/mol	189.3
$\Delta_{vap}H$	34.60 ± 0.10	kJ/mol	313
$\Delta_{vap}H$	35.7	kJ/mol	319.5
$\Delta_{vap}H$	34	kJ/mol	320
$\Delta_{vap}H$	36.7	kJ/mol	322
$\Delta_{vap}H$	33.80 ± 0.10	kJ/mol	326

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$\Delta_{vap}H$	33.40 ± 0.10	kJ/mol	331
$\Delta_{vap}H$	31.40 ± 0.10	kJ/mol	343
$\Delta_{vap}H$	32.40 ± 0.10	kJ/mol	344
$\Delta_{vap}H$	34.1	kJ/mol	345
$\Delta_{vap}H$	31.9	kJ/mol	350
$\Delta_{vap}H$	31.94	kJ/mol	350.3
$\Delta_{vap}H$	31.90 ± 0.10	kJ/mol	351
$\Delta_{vap}H$	31.00 ± 0.10	kJ/mol	363
$\Delta_{fus}S$	55.27	J/mol×K	189.3

เมื่อ PAff คือ Proton affinity (kJ/mol).

BasG คือ Gas basicity (kJ/mol).

$\Delta_cH°_{liquid}$ คือ Standard liquid enthalpy of combustion (kJ/mol).

$C_{p,gas}$ คือ Ideal gas heat capacity (J/mol×K).

$C_{p,liquid}$ คือ Liquid phase heat capacity (J/mol×K).

η คือ Dynamic viscosity (Pa×s).

$\Delta_fG°$ คือ Standard Gibbs free energy of formation (kJ/mol).

$\Delta_fH°_{gas}$ คือ Enthalpy of formation at standard conditions (kJ/mol).

$\Delta_fH°_{liquid}$ คือ Liquid phase enthalpy of formation at standard conditions (kJ/mol).

$\Delta_{fus}H°$ คือ Enthalpy of fusion at standard conditions (kJ/mol).

$\Delta_{fus}H$ คือ Enthalpy of fusion at a given temperature (kJ/mol).

$\Delta_{vap}H°$ คือ Enthalpy of vaporization at standard conditions (kJ/mol).

$\Delta_{vap}H$ คือ Enthalpy of vaporization at a given temperature (kJ/mol).

IE คือ Ionization energy (eV).

$logP_{oct/wat}$ คือ Octanol/Water partition coefficient.

P_c คือ Critical Pressure (kPa).

$\Delta_{fus}S$ คือ Entropy of fusion at a given temperature (J/mol×K).

$S°_{gas}$ คือ Molar entropy at standard conditions (J/mol×K).

$S°_{liquid}$ คือ Liquid phase molar entropy at standard conditions (J/mol×K).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

T_{boil} คือ Normal Boiling Point Temperature (K).

T_c คือ Critical Temperature (K).

T_{fus} คือ Normal melting (fusion) point (K).

Ttriple คือ Triple Point Temperature (K).

V_c คือ Critical Volume (m^3/kg-mol).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.
ข้อมูลการออกแบบของอุปกรณ์

ข.1 ข้อมูลจากบริษัทผู้ผลิต

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

VESSEL CATEGORY		CLASS I	
PARAMETER NAME		VESSEL	JACKET (COIL)
OP. PRESS.	MPa	-0.1~0.2	0.5
DESIGN PRESS.	MPa	-0.1/0.25	0.6
OP. TEMP.	℃	100	158
DESIGN TEMP.	℃	150	164
FLUID NAME		SOLVENT	STEAM
MAIN P.B.P. MATERIAL		S31603 (SUS316L)	S31603 (SUS316L)
CORROSION ALLOWANCE	mm	0	1.0
JOINT EFFICIENCY SHELL/HEAD		0.85	0.85
INSUL. THICKNESS	mm	/	100
TOTAL VOLLUME	m^3	0.62	0.85
HEATING AREA	m^2	3.0	
MOTER TYPE & POWER	kW	YB132S-4 4.0 kW	
STIRRING REV	r/min	82	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลของถังเก็บสารเคมี

CODE		ASME SEC,VIII DIV.1
TYPE OF HEADS		ELLIPSE HEAD 2-2:1
CORROSION ALLOWANCE	mm	0
RADIOGRAPHED (SHELL/HEAD)		NONE
LONG JOINT EFF.		0.7
OPERATING TEMPERATURE	°C	100
DESIGN TEMPERATURE	°C	130
OPERATING PRESSURE	BAR G.	NORMAL
DESIGN PRESSURE	BAR G.	-
FLUID NAME		ACTON/EAC
S.G	g/cm^3	0.7899/0.901
INSULATION	mm	NONE
INSULATION SURFACE FINISHING		BUFF # 200
HYDRO. TEST PRESSURE	BAR G.	3
CAPASITY	m^3	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข. 3 ข้อมูลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น

PHE-Type S4A-IG16-14-TLA-STEAM		Hot side	Cold side
Flowrate	kg/s / m^3/h	0.01	0.90
Inlet temperature	°C	120.23	35.00
Outlet Temp. cond./Fluid	°C	120.23	65.00
Velocity connection	m/s	6.25	0.31
Pressure drop	bar	0.00	0.04
Heat exchanged	kW	13	
Thermodynamic properties :		**Steam**	**Ethyl Acetate**
Density	kg/m^3		902.00
Specific heat	kJ/kg K		1.90
Thermal conductivity	W/m K		0.14
Mean viscosity	mPa.s		0.40
Wall viscosity	mPa.s		0.40
Fouling factors	m^2 K/kW		0,9077
Dimensioning factor	%	203.9	
Inlet Branch		F1	F3
Outlet branch		F4	F2
Design of Frame / Plates :			
Plate arrangement (passes*channel)		1 × 6 + 0 × 0	
Plate arrangement (passes*channel)		1 × 7 + 0 × 0	
Number of plates		14	
Effective heat surface	m^2	0.50	
Overall K-value Duty/Clean	W/m^2 K	370 / 1123	
Plate material		0.5 mm AISI 316	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Gasket material/max. temp.	°C	EPDM HT HANG ON (H)
Max. design temperature	°C	150.00
Max. Working/test pressure	bar	10,00 / 13,00
Max. Differential pressure	bar	10.00
Frame type / Paint Specification		IG No 1 Category C2L BLUE RAL 5010
Connections HOT side	(F1->F4)	1 INCH Threaded pipe BSP, AISI 316
Connections COLD side	(F3->F2)	2 INCH Threaded pipe BSP, AISI 316
Liquid volume	liter	2
Frame length	mm	270 Max. No. of Plates 34
Net weight	kg	38

ข.2 ผลการคำนวณของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

ตารางที่ ข. 4 ตารางแสดงผลการคำนวณของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

		ผลการคำนวณ
อัตราการไหลเชิงมวลของไอระเหย	kg/s	0.2055
อัตราการไหลเชิงมวลของสารที่ไม่ระเหย	kg/s	0.0242
อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำขาเข้า	kg/s	0.0029
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม	$W/m^2 K$	103.7
พื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน	m^2	1.25

ข.3 ผลการคำนวณของถังเก็บสารเคมี

ตารางที่ ข.5 ตารางแสดงผลการคำนวณหาปริมาตรของถังเก็บสารเคมี

ส่วนประกอบของถัง	ปริมาตร (m^3)
ตัวถังทรงกระบอก	8.37
ก้นถัง	1.06
หัวถัง	1.06
ปริมาตรทั้งหมด	10.50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.6 ตารางแสดงผลการคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังเก็บสารเคมี

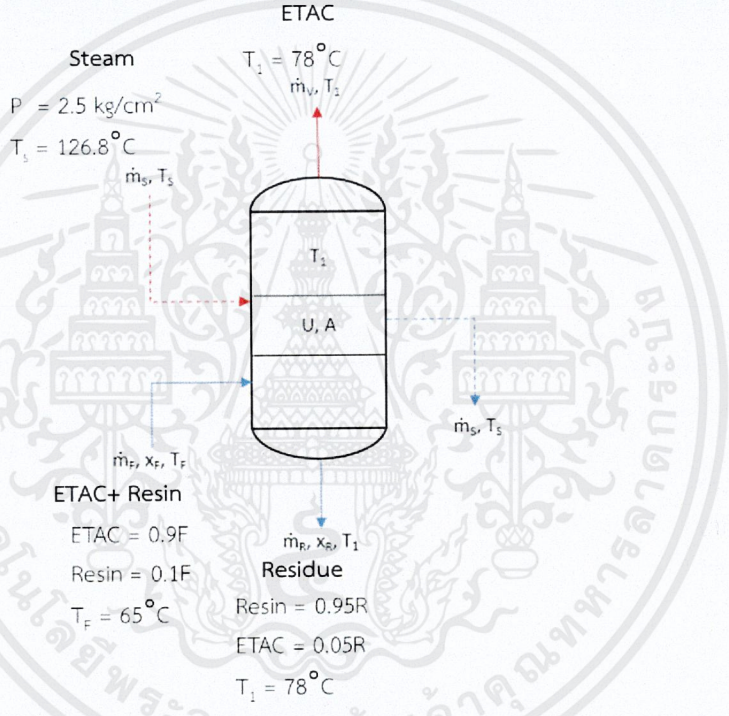
		ตัวถัง	หัวถัง
ถังภายใต้ความดันภายใน			
ความหนาที่ต้องการ	mm	4.77	4.76
ความดันสูงสุดที่ยอมรับได้	kg/cm^2	4.19	4.19
ถังภายใต้ความดันภายนอก			
ความดันสูงสุดที่ยอมรับได้	kg/cm^2	1.34	1.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค.
วิธีการคำนวณ

ค.1 วิธีการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

กำหนดให้ Ethyl Acetate ที่ต้องการระเหยมีปริมาณเรซิ่นทั้งหมด 10% โดยมีอัตราการป้อนเข้าสู่เครื่อง (Q) 15 L/min และมีอุณหภูมิ 65 °C เครื่องระเหยทำงานภายใต้ความดันบรรยากาศ ที่ทำให้ Ethyl Acetate ระเหยออกไปที่อุณหภูมิ 78 °C ขณะที่ใช้ไอน้ำที่ความดัน 2.5 kg/cm2 ต้องการให้ความเข้มข้นสุดท้ายของเรซิ่นเป็น 95%



ภาพที่ ค.1 แผนภาพแสดงคุณสมบัติของเส้นทางการไหล

1. คำนวณหาความหนาแน่นของ Feed

กำหนดให้เรซิ่นที่ผสมกับตัวทำละลาย (Ethyl Acetate) คือ Polyester ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1.1 kg/L และ Ethyl Acetate มีความหนาแน่นเท่ากับ 0.902 kg/L จากสมการ

$$\rho = \frac{M_1 + M_2 + M_3 + \ldots}{\frac{M_1}{\rho_1} + \frac{M_2}{\rho_2} + \frac{M_3}{\rho_3} + \ldots}$$

$$\rho = \frac{M_T}{\frac{M_1}{\rho_1} + \frac{M_2}{\rho_2}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\rho = \frac{1}{\frac{1}{M_T}\left(\frac{M_1}{\rho_1} + \frac{M_2}{\rho_2}\right)}$$

จะได้

$$\rho = \frac{1}{\left(\frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2}\right)}$$

2. คำนวณหาอัตราการไหลเชิงมวลของสารป้อน

3. การดุลมวล

มวลรวม : F = V + R

เรซิ่น : 0.1F = 0.95R

4. คำนวณหา Specific heat

กำหนดให้ ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) ของ Ethyl Acetate ($c_{p,ETAC}$) เท่ากับ 1.925 kJ/kg K และความร้อนจำเพาะของ Polyester ($c_{p,Polyester}$) เท่ากับ 3.8 kJ/kg K จากสมการ

$$c_{p,F} = c_{p,ETAC}x_{ETAC} + c_{p,Polyester}x_{Polyester}$$

$$c_{p,R} = c_{p,ETAC}x_{ETAC} + c_{p,Polyester}x_{Polyester}$$

5. คำนวณหาปริมาณไอน้ำที่ต้องการใช้ จากสมดุลของเอนทัลปี ของระบบเครื่องระเหย สมดุลของเอนทัลปีของระบบเครื่องระเหยจะได้สมการ

$$\dot{m}_F H_F\left(T_F, x_F\right) + \dot{m}_s H_v\left(T_s\right) = \dot{m}_v H_v\left(T_1\right) + \dot{m}_R H_R\left(T_1, x_R\right) + \dot{m}_s H_c\left(T_s\right)$$

คำนวณเอนทัลปีจาก

$$H_F\left(T_F, x_F\right) = c_{pf}\left(T_f - 0\,^{\circ}C\right)$$

$$H_R\left(T_1, x_R\right) = c_{pR}\left(T_1 - 0\,^{\circ}C\right)$$

$$H_v\left(T_1\right) = c_{pv}\left(T_1 - 0\,^{\circ}C\right)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และหา H_v (T_s), H_c (T_s) จากตารางไอน้ำ

6. คำนวณหาพลังงานความร้อนในการระเหย

จาก

$$q = \dot{m}_s H_v(T_s) - \dot{m}_s H_c(T_s)$$

7. คำนวณหา Heat Transfer coefficient

สำหรับเครื่องระเหยแบบฟิล์มบางใช้ไอน้ำในการให้ความร้อน ดังนั้น

$$h_o = \frac{4}{3}\left(\frac{\lambda_s^3 \rho_s^2 g}{3\mu_s \Gamma}\right)^{\frac{1}{3}}$$

การถ่ายเทความร้อนภายใน คำนวณจาก

$$Nu = 0.018 Re_f^{0.46} Re_N^{0.6} Pr^{0.87} \left(\frac{D}{L}\right)^{0.48} N_b^{0.24}$$

และ

$$Nu = \frac{h_p D}{\lambda}$$

$$Re_f = \frac{4F}{\pi D \mu}$$

$$Re_N = \frac{D^2 N \rho}{\mu}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{c_p \mu}{\lambda}$$

8. คำนวณหา Overall Heat Transfer Coefficient (U)

จากสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{U}=\frac{1}{h_o}+\frac{\delta_{wall}}{\lambda_{wall}}+\frac{1}{h_p}$$

9. คำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง จากสมการ

$$q=UA\left(T_s-T_1\right)=\dot{m}_s H_v\left(T_s\right)-\dot{m}_s H_c\left(T_s\right)$$

ค.2 วิธีการคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง

ถังเก็บสารเคมีในโครงการเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง มีลักษณะเป็นถังรับแรงดันแนวตั้ง มีหัวถังแบบครึ่งทรงรี 2:1 ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาตรได้จากสมการ ดังนี้

1. สำหรับตัวถังทรงกระบอก

$$V=\frac{\pi}{4}D_i^2 h$$

สำหรับก้นถัง

$$V=D_i^3 C\frac{\pi}{24}\left(3\left(\frac{h}{z}\right)^2-\left(\frac{h}{z}\right)^3\right)$$

สำหรับหัวถัง

$$V=D_i^3 C\frac{\pi}{24}\left(3\left(\frac{h}{z}\right)-\left(\frac{h}{z}\right)^3\right)$$

เมื่อ

$$C=\frac{1}{2}$$

ค.3 วิธีการคำนวณเพื่อหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน

คำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ สำหรับถังภายใต้ความดันภายใน โดยใช้สมการในเทอมของเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สำหรับตัวถังทรงกระบอก (ตะเข็บตามยาว)

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{SEt}{R + 0.6t}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PR}{SE - 0.6P}$$

2. สำหรับหัวถังครึ่งทรงรี 2:1

ความดันออกแบบ หรือ ความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด

$$P = \frac{2SEt}{D + 0.2t}$$

ความหนาผนัง

$$t = \frac{PD}{2SE - 0.2P}$$

คำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ สำหรับถังภายใต้ความดันภายนอก ดังนี้

1. สำหรับถังทรงกระบอก ไร้ตะเข็บหรือมีรอยต่อชนตามแนวยาว

ความดันที่ยอมให้ได้สูงสุด คือ

$$P_a = \frac{4B}{3(D_o/t)}$$

ถ้าความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุดมีค่าน้อยกว่าค่าความดันออกแบบ ต้องทำตามขั้นตอนการออกแบบซ้ำอีกด้วยการเพิ่มค่าความหนาของผนัง

สำหรับค่า A ที่ตกลงด้านซ้ายของเส้นอุณหภูมิใช้งาน ค่าของ P_a สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ :

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_a = \frac{2AE}{3(D_o / t)}$$

2. สำหรับหัวถังครึ่งทรงรี 2:1

ความหนาที่ต้องการจะเป็นค่าที่มากกว่าของความหนาดังต่อไปนี้

$$P_a = \frac{B}{(R_o / t)}$$

เมื่อ $R_o = 0.9D_o$

สำหรับค่าของ A ที่ตกลงด้านซ้ายมือของเส้นอุณหภูมิใช้งาน ค่าของ P_a สามารถคำนวณได้ด้วยสมการ

$$P_a = \frac{0.0625E}{(R_o / t)^2}$$

ถ้าความดันทำงานที่ยอมให้ได้สูงสุด P_a ที่คำนวณด้วยสมการข้างต้นมีค่าน้อยกว่าความดันออกแบบ ต้องเลือกสมมติค่าของ t ใหม่ และทำตามขั้นตอนการออกแบบซ้ำอีก

ค.4 วิธีการคำนวณเพื่อหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

1. คำนวณหาพลังงานความร้อนที่ต้องการใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน

ซึ่งสมการแบ่งเป็น 2 กรณี ดังนี้

สำหรับกรณีที่ไม่มีการเปลี่ยนสถานะ

$$Q = mL \; Q = mc_p \Delta T$$

สำหรับกรณีที่มีการเปลี่ยนสถานะ

$$Q = mL$$

2. คำนวณหาผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ศึกษามีการไหลแบบสวนทางเท่านั้น ผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจึงคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)}$$

3. คำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากสมการ

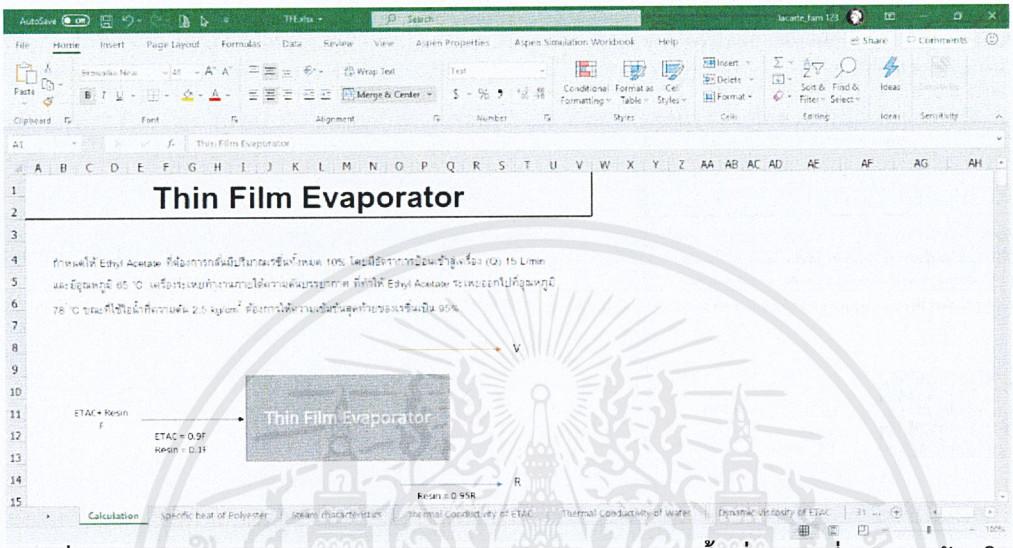
$$A = \frac{Q}{U\Delta T_{lm}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อรศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง.

แม่แบบสำหรับการออกแบบ ในโปรแกรม Microsoft Excel

ง.1 แม่แบบสำหรับการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง



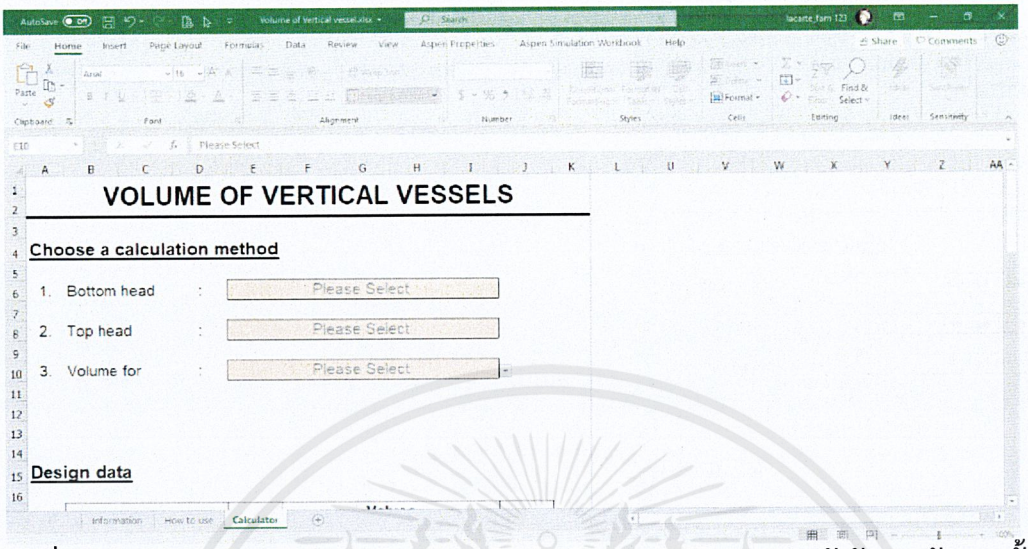
ภาพที่ ง.1 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

ภายในไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel จะประกอบด้วย แผ่นงานการคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนในเครื่องระเหยแบบฟิล์มบางดังภาพที่ ง.1 และแผ่นงานข้อมูลที่ใช้สำหรับการคำนวณ ดังนี้

1. Specific heat of Polyester
2. Steam characteristics
3. Thermal Conductivity of ETAC
4. Thermal Conductivity of Water
5. Dynamic Viscosity of ETAC
6. AISI Type 316 Stainless Steel, annealed sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ง.2 แม่แบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง



ภาพที่ ง.2 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง

ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel จะประกอบด้วย วิธีการคำนวณ วิธีการใช้งาน และรูปแบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง

VOLUME OF VERTICAL VESSELS

Choose a calculation method

1. Bottom head : Please Select
2. Top head : Please Select
3. Volume for : Please Select

Design data

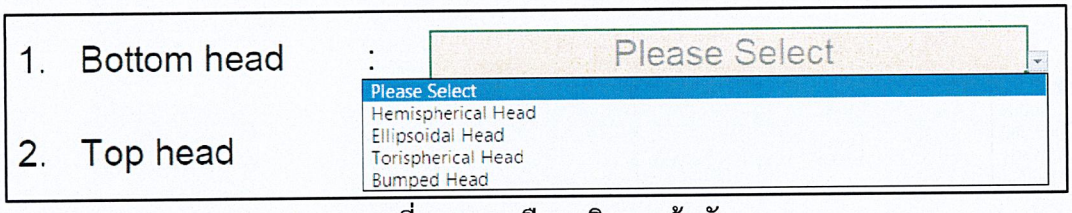
List	Sym.	Valves		Unit
		Cylindrical	Head	
Inside Diameter	D_i			m
Liquid level	h			m
For Ellipsoidal Head				
Inside Dish Depth	z			m
*For 2:1 Elliptical Head	a =	0		m
For Torispherical Head				
Inside Dish Depth	z			m
Outside Diameter	D_o			m
Wall Thickness	t			m

ภาพที่ ง.3 แม่แบบสำหรับคำนวณหาปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

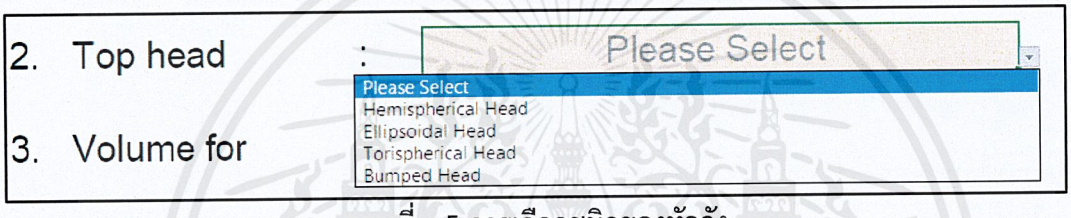
โดยการคำนวณจะต้องเลือกเงื่อนไขที่ต้องการคำนวณดังต่อไปนี้

7. เลือกชนิดของก้นถัง



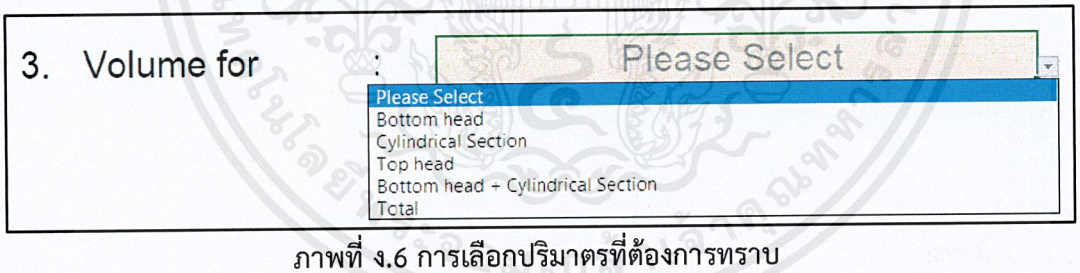
ภาพที่ ง.4 การเลือกชนิดของก้นถัง

8. เลือกชนิดของหัวถัง



ภาพที่ ง.5 การเลือกชนิดของหัวถัง

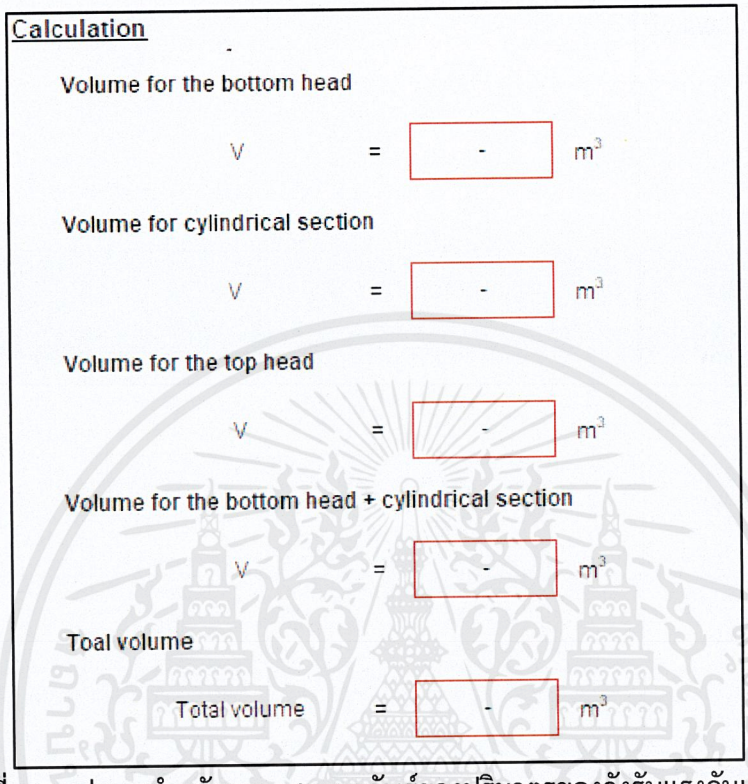
9. เลือกปริมาตรที่ต้องการทราบ



ภาพที่ ง.6 การเลือกปริมาตรที่ต้องการทราบ

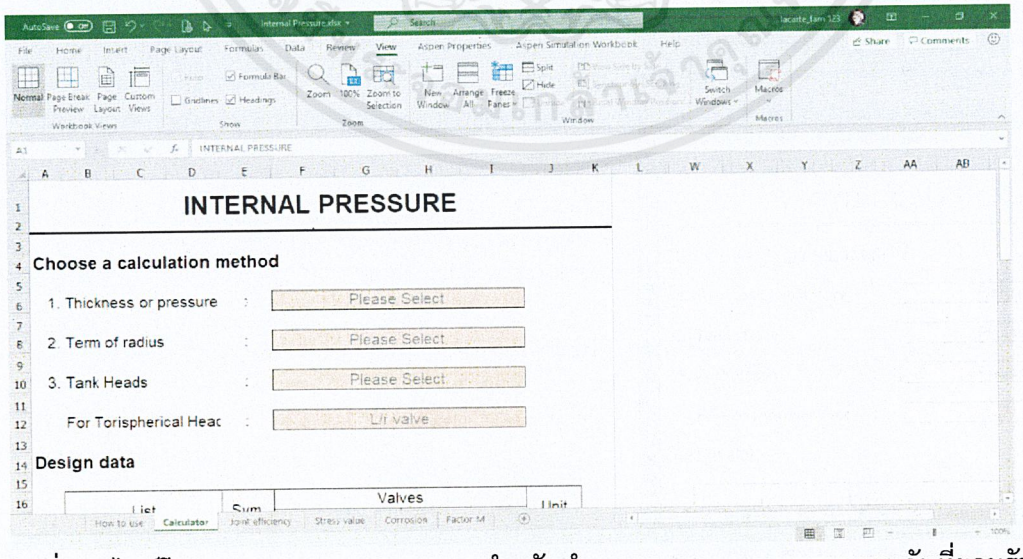
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งหลังจากเลือกกรณีและ ใส่ค่าตัวแปรตามที่กำหนดแล้ว ผลลัพธ์ของปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้งจะปรากฏในรูปแบบ ตามดังภาพที่ ง.7



ภาพที่ ง.7 แม่แบบสำหรับการแสดงผลลัพธ์ของปริมาตรของถังรับแรงดันแนวตั้ง

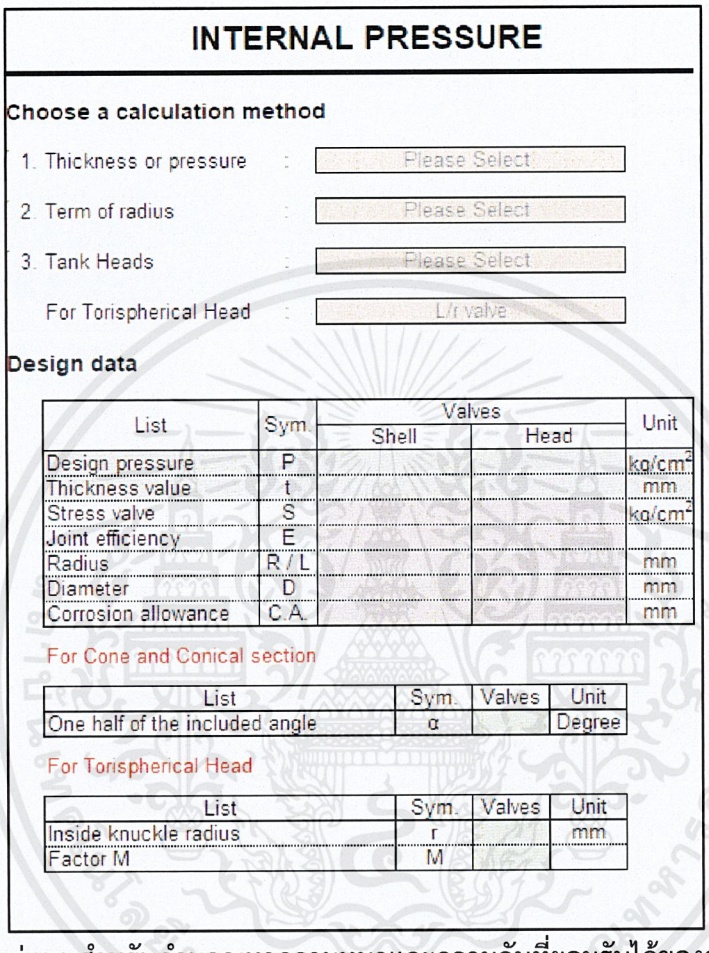
ง.3 แม่แบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน



ภาพที่ ง.8 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel จะประกอบด้วย วิธีการใช้และข้อจัดกัดของแต่ละหัวถัง รูปแบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน และค่าสำหรับใช้ในการคำนวณ โดยแยกเป็นแต่ละแผ่นงาน



INTERNAL PRESSURE

Choose a calculation method

1. Thickness or pressure : Please Select
2. Term of radius : Please Select
3. Tank Heads : Please Select

For Torispherical Head : L/r valve

Design data

List	Sym.	Valves		Unit
		Shell	Head	
Design pressure	P			kg/cm^2
Thickness value	t			mm
Stress valve	S			kg/cm^2
Joint efficiency	E			
Radius	R / L			mm
Diameter	D			mm
Corrosion allowance	C.A.			mm

For Cone and Conical section

List	Sym.	Valves	Unit
One half of the included angle	α		Degree

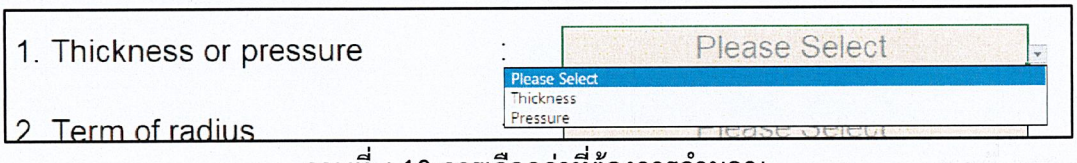
For Torispherical Head

List	Sym.	Valves	Unit
Inside knuckle radius	r		mm
Factor M	M		

ภาพที่ ง.9 แม่แบบสำหรับคำนวณหาความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน

โดยการคำนวณต้องเลือกเงื่อนไขที่ต้องการคำนวณดังต่อไปนี้

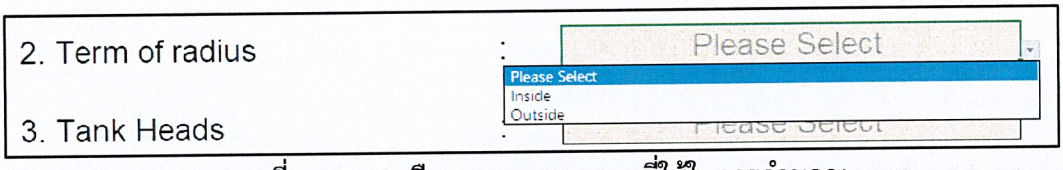
10. เลือกค่าที่ต้องการคำนวณระหว่างความหนาที่ต้องการหรือความดันที่ยอมรับได้



ภาพที่ ง.10 การเลือกค่าที่ต้องการคำนวณ

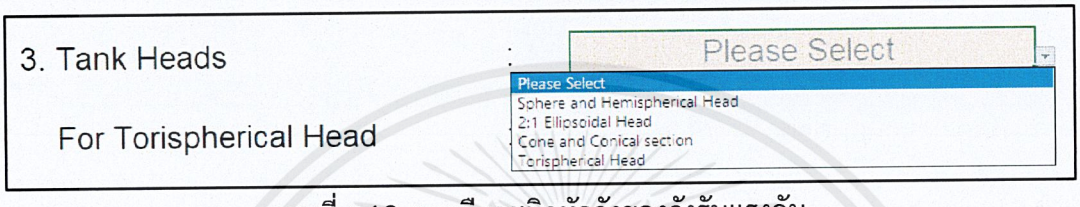
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

11. เลือกเทอมของสมการที่ใช้ในการคำนวณ



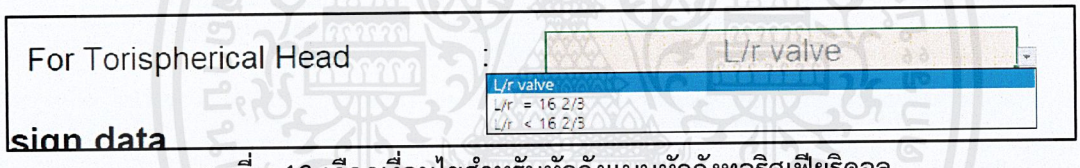
ภาพที่ ง.11 การเลือกเทอมของสมการที่ใช้ในการคำนวณ

12. เลือกชนิดหัวถังของถังรับแรงดันที่ต้องการคำนวณ



ภาพที่ ง.12 การเลือกชนิดหัวถังของถังรับแรงดัน

13. เลือกเงื่อนไขสำหรับหัวถังแบบหัวถังทอริสเฟียริคอล



ภาพที่ ง.13 เลือกเงื่อนไขสำหรับหัวถังแบบหัวถังทอริสเฟียริคอล

ซึ่งหลังจากเลือกกรณีและ ใส่ค่าตัวแปรตามที่กำหนดแล้ว ผลลัพธ์ของความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดันจะปรากฏในรูปแบบ ตามดังภาพที่ ง.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Calculation

Shell

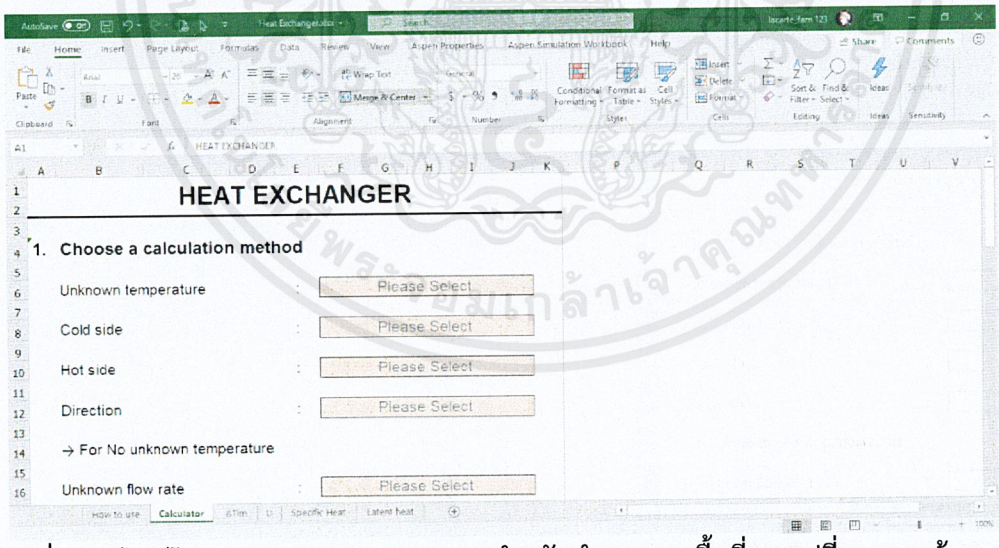
Required thickness	=	-	mm
Maximum allowable working pressure	=	-	kg/cm^2

Head

Required thickness	=	-	mm
Maximum allowable working pressure	=	-	kg/cm^2

ภาพที่ ง.14 แม่แบบสำหรับการแสดงผลลัพธ์ของความหนาและความดันที่ยอมรับได้ของถังรับแรงดัน

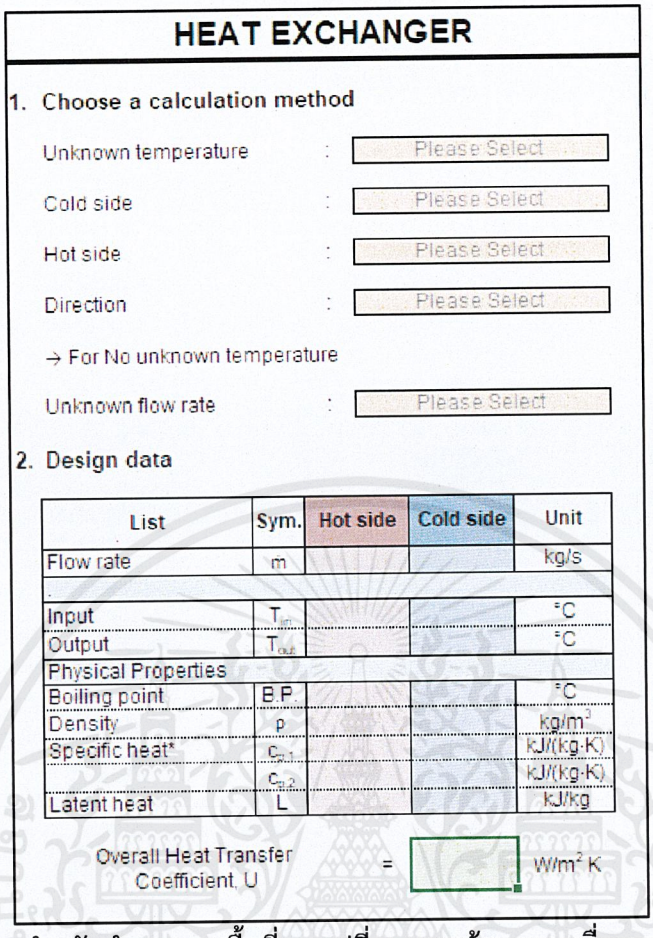
ง.4 แม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน



ภาพที่ ง.15 ไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel สำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

ภายในไฟล์โปรแกรม Microsoft Excel จะประกอบด้วย วิธีการใช้และข้อจัดกัด แม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และค่าสำหรับใช้ในการคำนวณ โดยแยกเป็นแต่ละแผ่นงาน

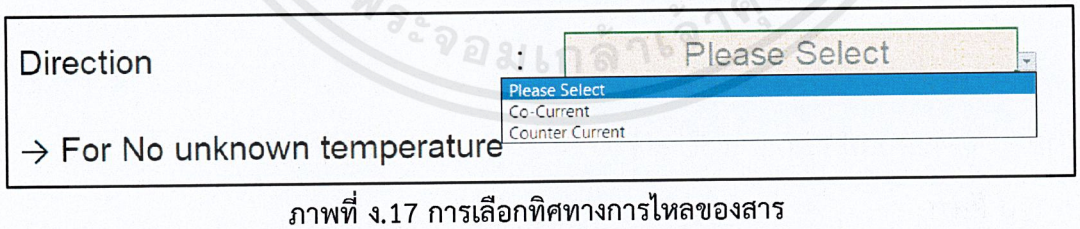
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ ง.16 แม่แบบสำหรับคำนวณหาพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

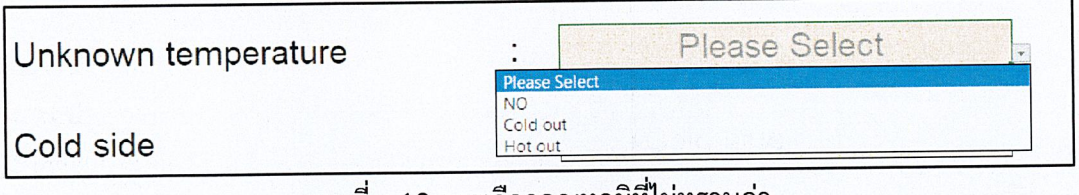
โดยการคำนวณต้องเลือกเงื่อนไขที่ต้องการคำนวณดังต่อไปนี้

14. เลือกทิศทางการไหลของสาร



ภาพที่ ง.17 การเลือกทิศทางการไหลของสาร

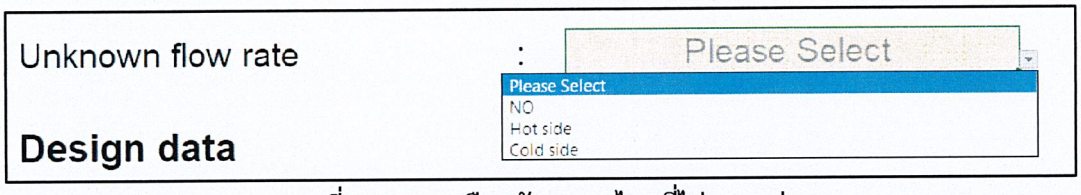
15. เลือกอุณหภูมิที่ไม่ทราบค่า



ภาพที่ ง.18 การเลือกอุณหภูมิที่ไม่ทราบค่า

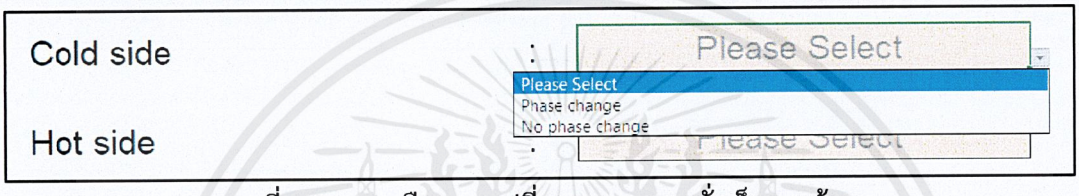
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. เลือกอัตราการไหลที่ไม่ทราบค่า



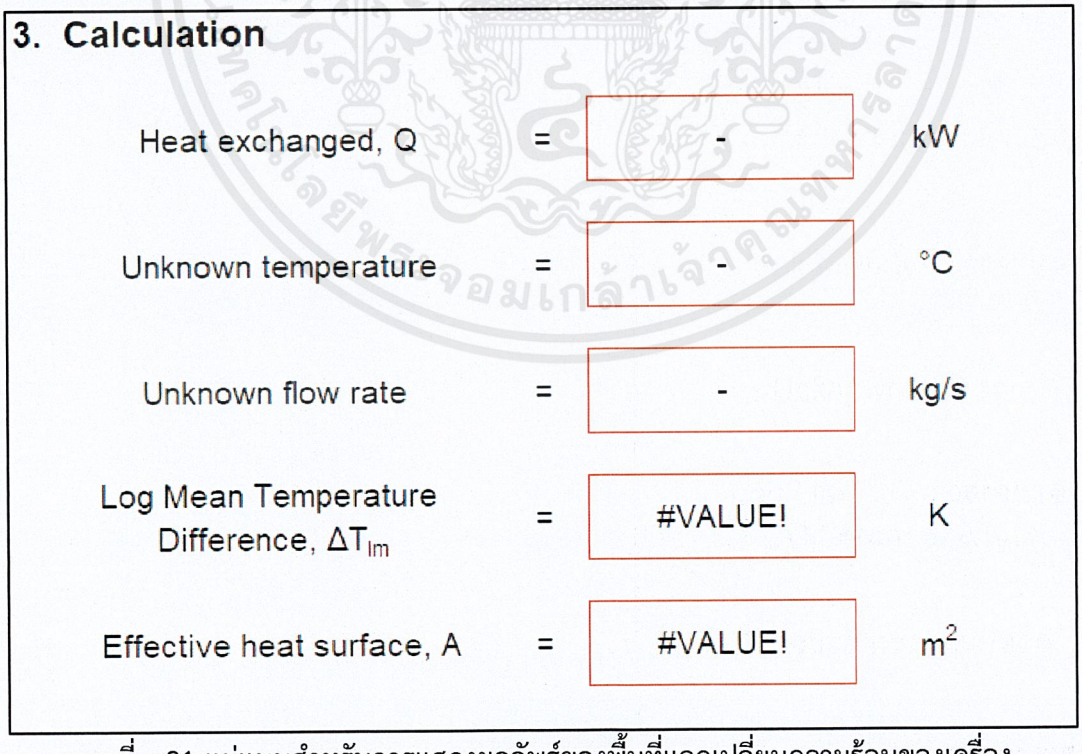
ภาพที่ ง.19 การเลือกอัตราการไหลที่ไม่ทราบค่า

17. เลือกการเปลี่ยนสถานะของผั่งเย็นและร้อน



ภาพที่ ง.20 การเลือกการเปลี่ยนสถานะของผั่งเย็นและร้อน

ซึ่งหลังจากเลือกกรณีและ ใส่ค่าตัวแปรตามที่กำหนดแล้ว ผลลัพธ์ของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จะปรากฏในรูปแบบ ตามดังภาพที่ ง.21

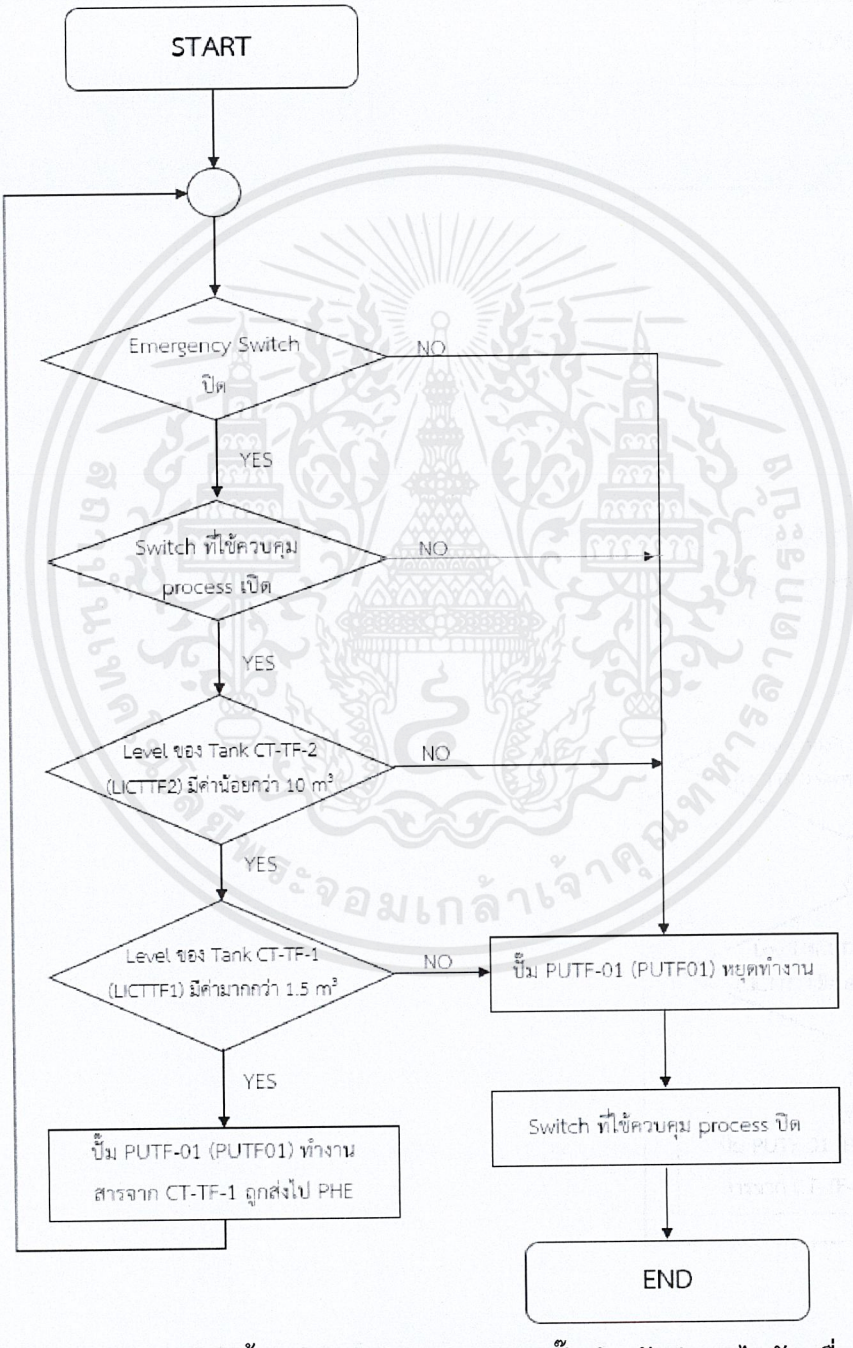


ภาพที่ ง.21 แม่แบบสำหรับการแสดงผลลัพธ์ของพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก จ
ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของอุปกรณ์

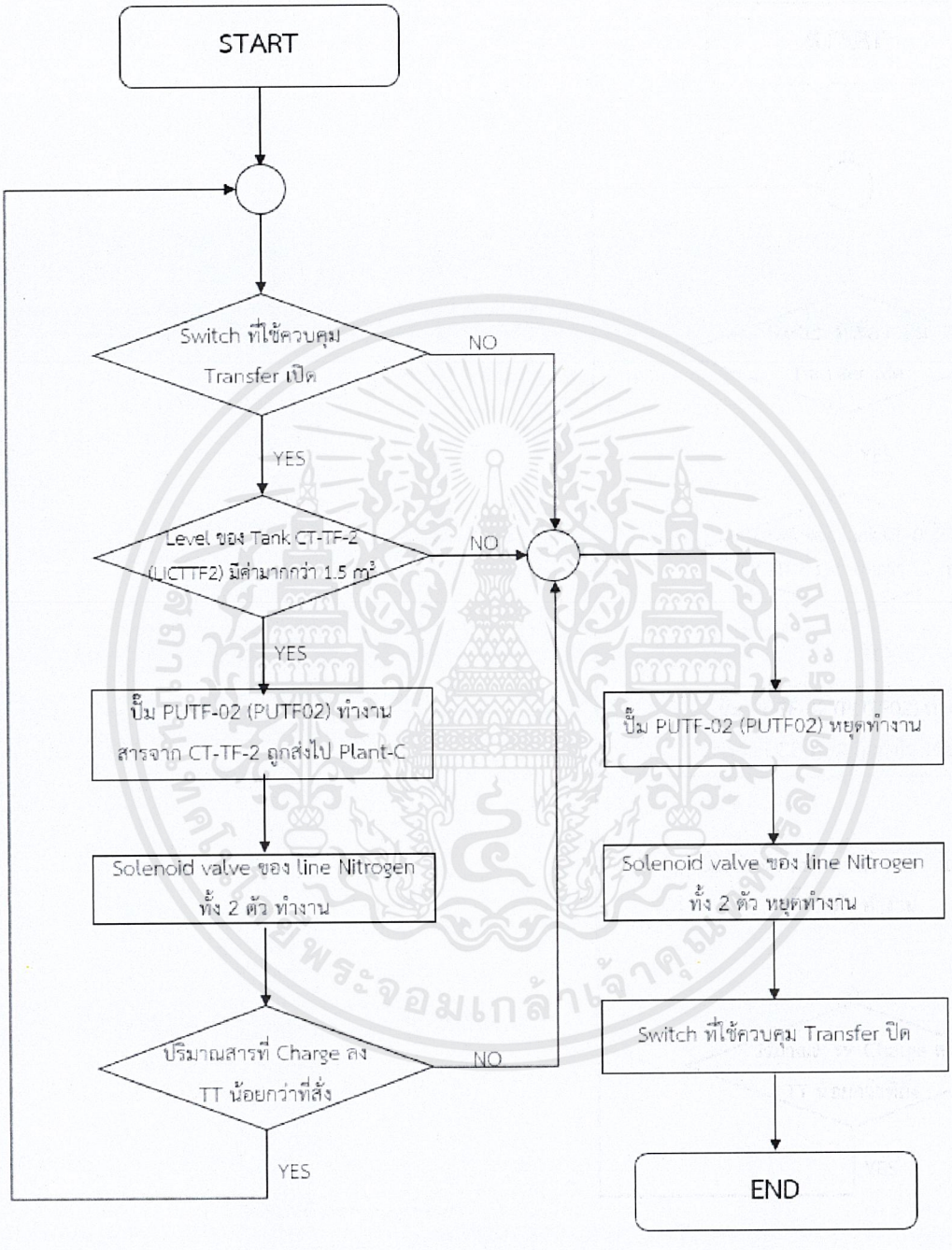
1. ปั๊มสำหรับส่งสารไปยังเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง (PUTF-1)



ภาพที่ จ.1 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของปั๊มสำหรับส่งสารไปยังเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง (PUTF-1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

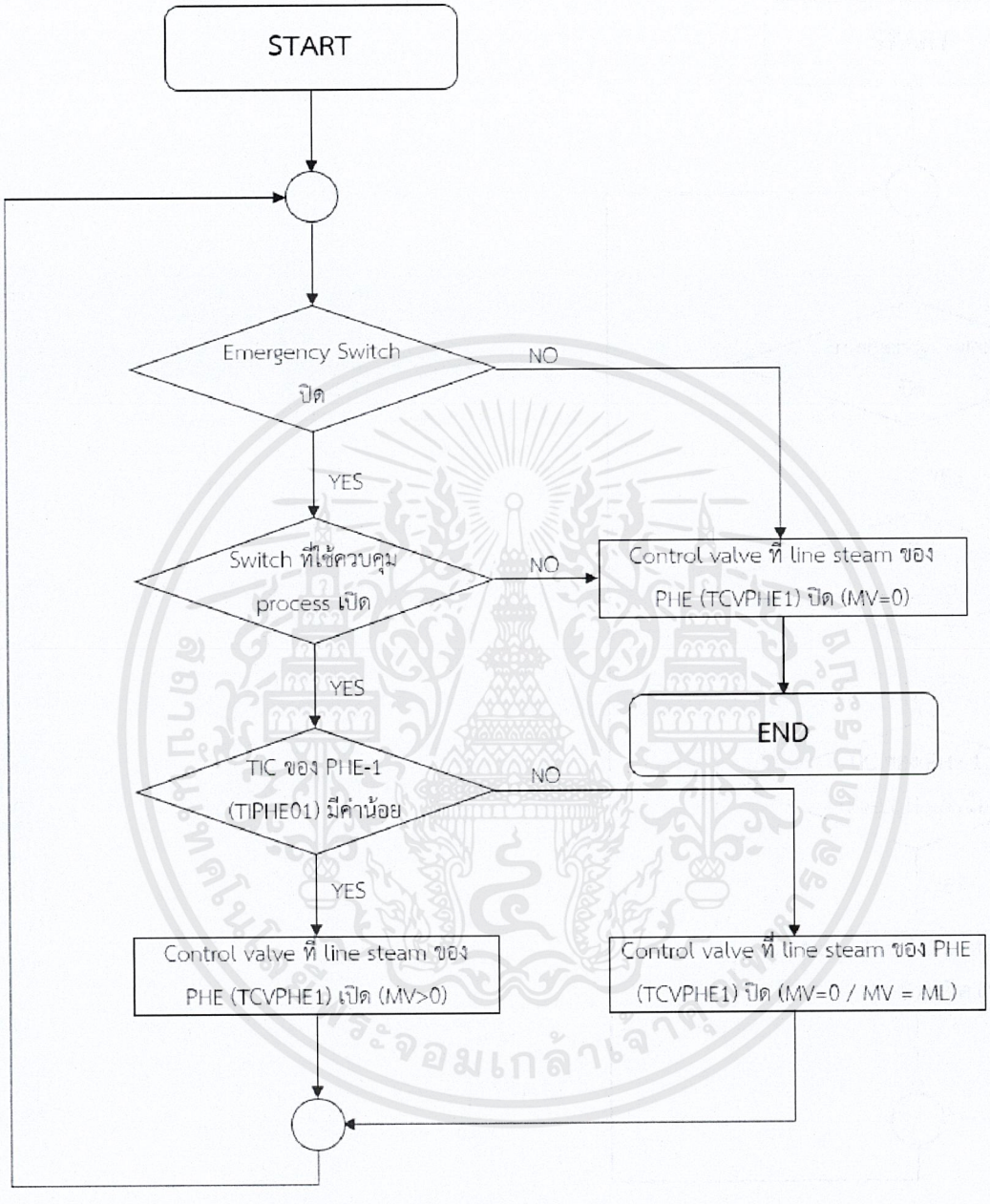
2. ปั๊มสำหรับส่งสารในกระบวนการล้าง (PUTF-2)



ภาพที่ จ.2 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของปั๊มสำหรับส่งสารในกระบวนการล้าง (PUTF-2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

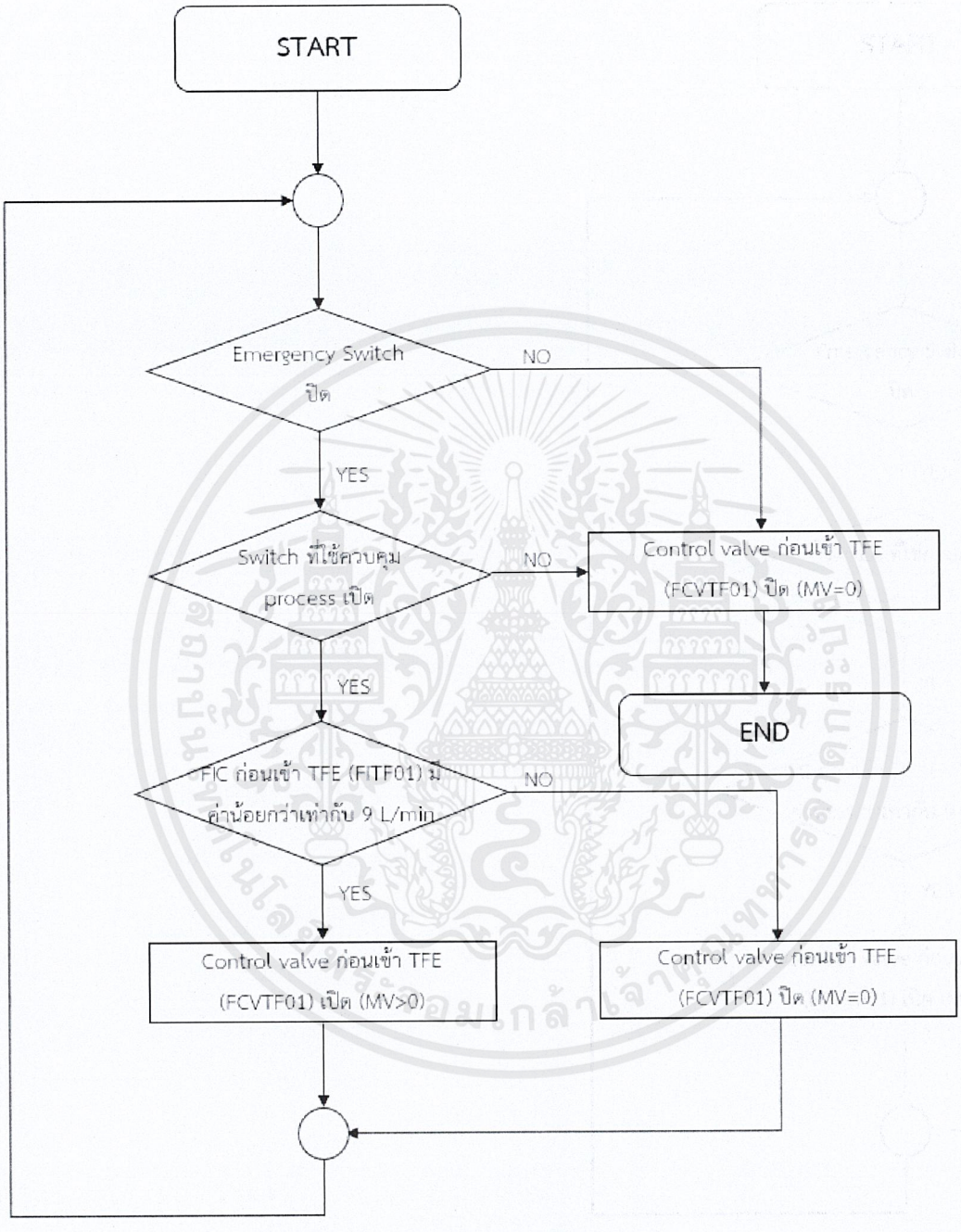
3. วาล์วควบคุมไอน้ำขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น



ภาพที่ จ.3 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของวาล์วควบคุมไอน้ำขาเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

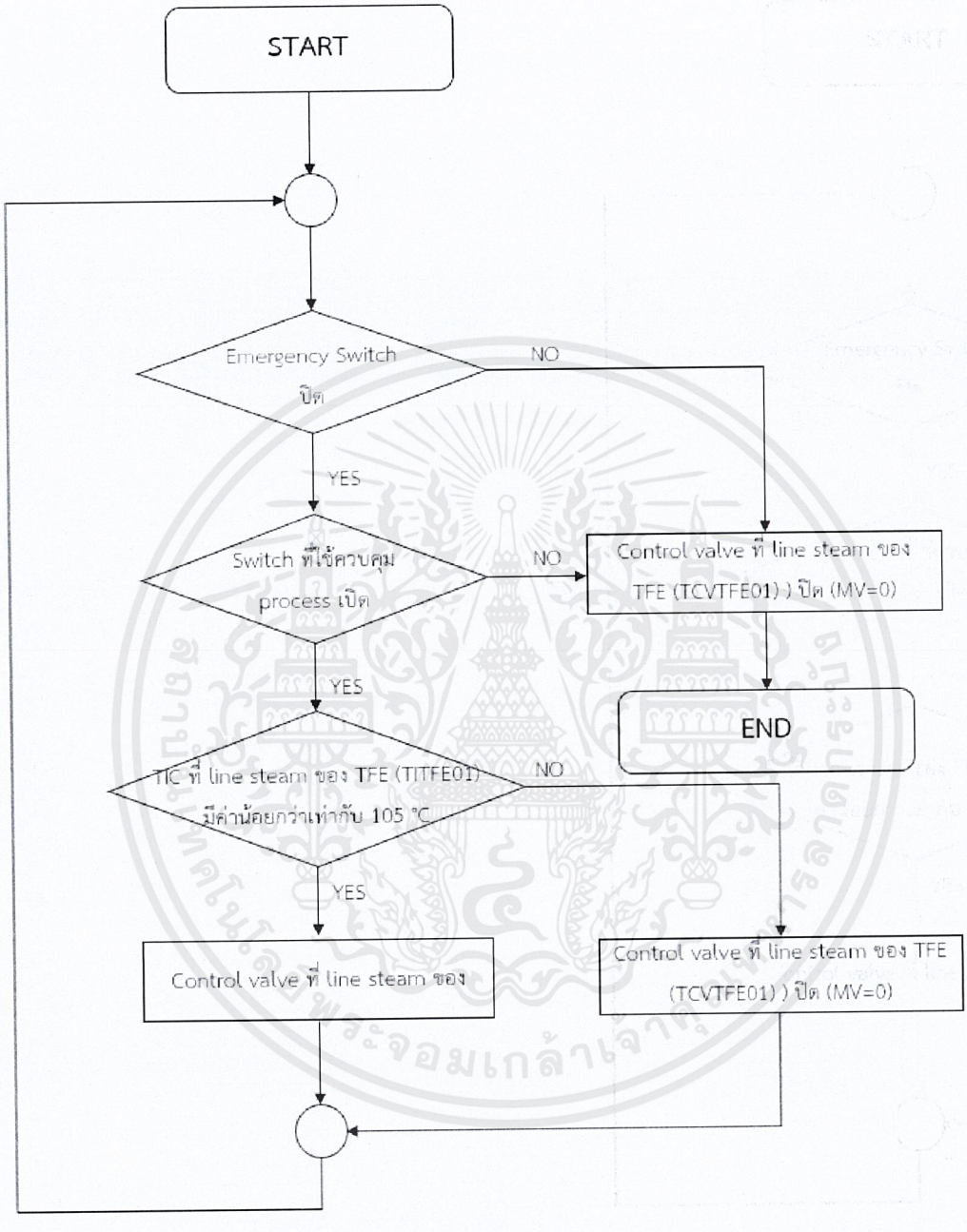
4. วาล์วควบคุมอัตราการไหลขาเข้าของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง



ภาพที่ จ.4 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของวาล์วควบคุมอัตราการไหลขาเข้าของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

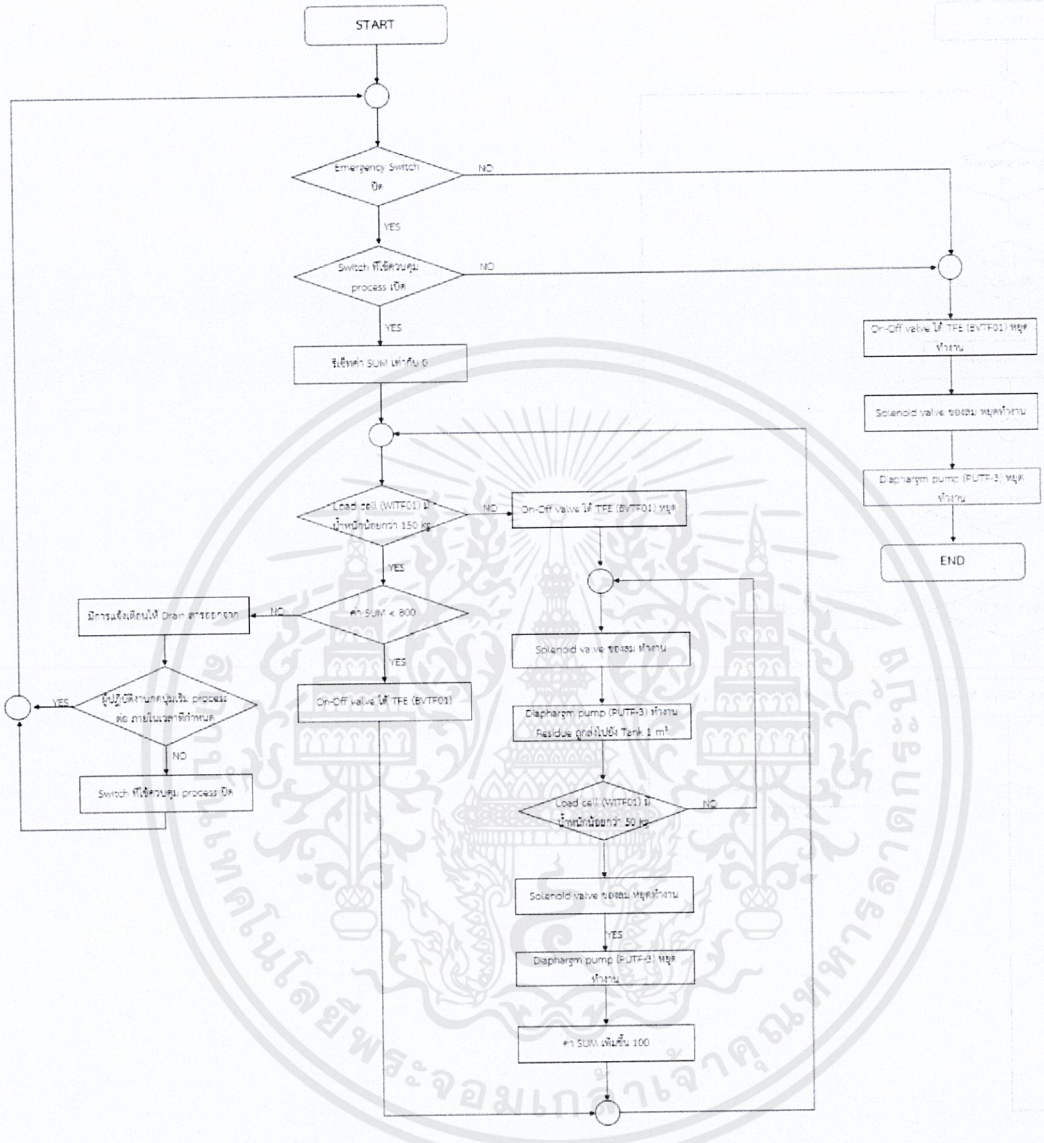
5. วาล์วควบคุมไอน้ำขาเข้าของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง



ภาพที่ จ.5 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของวาล์วควบคุมไอน้ำขาเข้าของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. Load Cell สำหรับการบรรจุสารที่ไม่ระเหยจากของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง



ภาพที่ จ.6 ผังงานแสดงลำดับขั้นตอนระบบการทำงานของ Load Cell สำหรับการบรรจุสารที่ไม่ระเหยจากของเครื่องระเหยแบบฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล อัชฌมาภรณ์ ทองเปลว

วัน เดือน ปีเกิด 02 กรกฎาคม 2541

ที่อยู่ 72/67 หมู่ที่ 4 ถนนบ้านกล้วย-ไทรน้อย ตำบล พิมลราช
อำเภอ บางบัวทอง จังหวัดนนทบุรี 11110

E-mail 59011540@kmitl.ac.th

โทรศัพท์ 089-7761774

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2553 – 2558 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย ปทุมธานี
- พ.ศ.2559 – ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิศวกรรมเคมี
  คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนกเทคนิคการผลิต
  บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด
  ตั้งแต่วันที่ 4 มิถุนายน 2562 ถึงวันที่ 31 กรกฎาคม 2562
- นักศึกษาโครงการสหกิจศึกษา แผนกเทคนิคการผลิต
  บริษัท สยามเคมีคอลอินดัสตรี้ จำกัด
  ตั้งแต่วันที่ 5 สิงหาคม 2562 ถึงวันที่ 29 พฤศจิกายน 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้