รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

การปรับปรุงระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาในโรงงานผลิต LLDPE

Modification of Catalyst Transfer System in LLDPE Plant

นายศรายุทธ กมลศรี

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

หลักสูตรวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงงานสหกิจศึกษา การปรับปรุงระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการผลิต LLDPE
ชื่อ-สกุล นักศึกษา นายศรายุทธ กมลศรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์ **ภาควิชา** วิศวกรรมเคมี
ชื่อ-สกุล อาจารย์นิเทศ รศ. ดร. อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ
ชื่อ-สกุล ผู้นิเทศงาน นางสาวนริศรา ศรีสุวรรณ และนางสาวอกนิษฐ์ ธรรมพิทักษ์พงษ์
สถานประกอบการ กลุ่มบริษัท ดาว ประเทศไทย

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการออกแบบและปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมคือการใช้งานได้ตามการออกแบบอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพสูงด้วยราคาที่เหมาะสม โครงการนี้ปรับปรุงระบบขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาแบบสเลอรี่ (Slurry) ของโรงงานผลิตเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น การออกแบบที่ใช้อยู่ตัวเร่งปฏิกิริยาถูกเก็บในถัง D-311 และ D-321 ก่อนส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์ แต่ถัง D-321 ไม่สามารถส่งตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าเครื่องปฏิกรณ์ได้โดยตรง ต้องส่งไปที่ถัง D-311 ก่อน ในขณะเดียวกันต้องใช้ปั๊มส่งตัวเร่งปฏิกิริยาวนกลับเข้าถังถัง D-321 อย่างต่อเนื่องเพื่อป้องกันตัวเร่งปฏิกิริยาตกตะกอน ความร้อนสะสมที่เกิดจากการปั๊มวนทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาเสื่อมสภาพแบบชั่วคราวและมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นเพื่อจัดการกับปัญหาดังกล่าวจึงต้องปรับปรุงระบบให้ สามารถป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาจากถัง D-321 เข้าเครื่องปฏิกรณ์ได้โดยตรง และเพิ่มความยาวของท่อส่งตัวเร่งปฏิกิริยาวนกลับเข้าถังเพื่อกระจายความร้อนที่สะสม ระบบที่เสนอปรับปรุงใหม่ในโครงการนี้ใช้ท่อเหล็กคาร์บอนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว ความยาว 120 m และมีเกทวาล์ว 4 ตัว บอลล์วาล์ว 3 ตัว โกลบวาล์ว 1 ตัว และวาล์วควบคุมอัตราการไหล 1 ตัว จากผลการคำนวณไฮดรอลิกและการตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม พบว่าความดันที่ตำแหน่งป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาจากถัง D-321 เมื่อหักความดันลดในระบบขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงมีค่าต่ำกว่าความดันสถิต ทำให้ไม่สามารถปั๊มตัวเร่งปฏิกิริยาจากถัง D-321 เข้าเครื่องปฏิกรณ์ได้ นอกจากนี้พบว่าประสิทธิภาพของปั๊มต่ำกว่าข้อมูลการออกแบบเบื้องต้น จึงเสนอเปลี่ยนใช้ปั๊มหอยโข่งชนิด Vertical In-line เพื่อให้สามารถใช้งานระบบที่ปรับปรุงได้ จากการประเมินความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์พบว่าสามารถลดการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทดแทนตัวเร่งปฏิกิริยาที่เสื่อมสภาพคิดเป็นมูลค่า 2,160,000 THB/yr โดยมีเงินลงทุน 2,332,800 THB ค่าบำรุงรักษาปั๊มและค่าไฟฟ้าประมาณ 130,000 THB/yr มีระยะเวลาคืนทุน 1 ปี 2 เดือน

คำสำคัญ: ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยา โพลีเอทิลีน ความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น LLDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cooperative Title : Modification of Catalyst Piping System in LLDPE Plant

Student Intern Name : Sarayut Kamolsri

Faculty : Engineering **Department :** Chemical engineering

Advisor Name : Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum

Mentor Names : Ms. Narisara Srisuwan and Ms. Akanit Thampitakpong

Company : Dow Thailand Group

ABSTACT

One of the marks of design and modification in manufacturing and production systems is the discipline necessary to meet high performance and safety with the reasonable cost. In this project, the catalyst transfer system in Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE) plant was modified. Prior design of the existing catalyst transfer system, the catalyst was kept in tanks D-311 and D-321 before sending to the reactor. Tank D-321 could not feed the catalyst directly to the reactor. In the meantime, the circulating loop made homogeneous flow of the catalyst from tank D-321 to D-311 as well as prevents the catalyst from precipitation in pipe. Heat generated during catalyst circulation results in catalyst temporary deactivation and low efficiency, which is an important drawback of the prior design. To cope with this constraint and for more reliability, the modification by the installation of new pipeline directly from tank D-321 to the reactor was considered. In addition, the circulating loop was modified longer for heat distribution. The new design pipeline was carbon steel (2-inch nominal pipe size) 120 m in length consisting of 4 gate valves, 3 ball valves, 1 globe valve and 1 flow control valve. Hydraulic calculations were accomplished to check if the modification is viable or not. According to the hydraulic calculations and pump performance test, it was found that the pressure drop in the modified catalyst piping system was too high, and the existing pump is underperformance. Thus, a new vertical in-line centrifugal pump is required. With respect to less catalyst deactivation from the modification, the estimated cost saving from this project is 2,160,000 THB/yr. The investment cost is 2,332,800 THB. The operating and maintenance costs of the new pump are 130,000 THB/yr with 1 year and 2 months pay-back period.

Keywords: Catalyst Piping System, Linear Low-Density Polyethylene, LLDPE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานสหกิจศึกษานี้ได้รับความอนุเคราะห์จากกลุ่มบริษัท ดาว ประเทศไทย ที่อำนวยความสะดวกสถานที่ทำงานและที่พักให้แก่นักศึกษา ขอขอบคุณคุณณัฐยา บุญสมบัติ หัวหน้าฝ่ายการผลิต คุณนริศรา ศรีสุวรรณ และคุณอกนิษฐ์ ธรรมพิทักษ์พงษ์ วิศวกรโครงงาน ที่ให้ข้อมูลและคำปรึกษาตลอดระยะเวลาการทำโครงงานให้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ รศ. ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ ที่ให้คำแนะนำในการจัดทำเนื้อหา แก้ไข ปรับปรุง และตรวจทานความถูกต้องของเนื้อหารายงาน

ศรายุทธ กมลศรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... **I**

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... **II**

กิตติกรรมประกาศ .... **III**

สารบัญ .... **IV**

สารบัญตาราง .... **VII**

สารบัญรูป .... **IX**

บทที่ 1 บทนำ **1**

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ 3

1.3 ขอบเขตของโครงการ 3

1.4 วิธีการดำเนินโครงการ 4

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ 4

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง **5**

2.1 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น 6

2.2 ระบบท่อ 7

2.2.1 รายละเอียดที่จำเป็นต่อการออกแบบระบบท่อ 8

2.2.2 รหัสและมาตรฐาน 8

2.2.3 ตัวอย่างชนิดของท่อในงานอุตสาหกรรม 9

2.2.4 สิ่งประกอบท่อและวาล์ว 11

2.2.5 การจัดวางท่อ 13

2.3 สถิตยศาสตร์ของไหล 13

2.4 ความดันลดภายในระบบท่อ 14

2.4.1 ความดันลดเนื่องจากความยาวท่อ 16

2.4.2 ความดันลดเนื่องจากสิ่งประกอบท่อและวาล์ว 18

2.4.3 ความดันลดเนื่องจากเครื่องมือต่างๆ 21

2.5 ปั๊ม (Pump) 21

2.5.1 ปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump) 22

2.5.2 ชนิดของปั๊มหอยโข่ง 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.3 เฮดปั๊ม (Pump Head)	26
2.5.4 กำลังไฮดรอลิก (Hydraulic Power)	26
2.5.5 กำลังปั๊ม (Pump Power)	26
2.5.6 การเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) และความดันสุทธิด้านท่อดูด (Net Positive Suction Head, NPSH)	27
2.5.7 กราฟสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง	28
2.5.8 กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve)	29
2.5.9 Affinity's Law	30
2.6 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	31
2.6.1 การประเมินต้นทุนของโครงการ	31
2.6.2 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน	33
บทที่ 3 วิธีการดำเนินโครงการ	**34**
3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความดันลด	34
3.2 การตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321)	35
3.3 การตรวจสอบความเป็นไปได้ในการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่	37
3.4 การเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา	38
3.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	39
บทที่ 4 ผลการดำเนินโครงการ	**41**
4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความดันลด	41
4.2 ผลการตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321)	43
4.3 ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้ในการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่	47
4.4 ผลการเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา	50
4.5 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	52
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินโครงการ	**55**
5.1 สรุปผลการดำเนินโครงการ	55
5.2 ข้อเสนอแนะ	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บรรณานุกรม 56
ภาคผนวก 57
ภาคผนวก ก ตัวอย่างการคำนวณความดันลดภายในระบบท่อและรายละเอียดปั๊ม 58
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ 68
ประวัติผู้เขียน 71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 Standard pipe schedule 40 – ASTM A53 Grades A and B	9
2.2 ตัวอย่างรายละเอียดของวาล์วแต่ละชนิด	12
2.3 ข้อแนะนำในการจัดวางท่อ	13
2.4 ค่าความขรุขระของพื้นผิวท่อแต่ละชนิด	18
2.5 ค่าการสูญเสียของสิ่งประกอบท่อและวาล์ว	19
2.6 ค่าความดันลดโดยประมาณของเครื่องมือต่างๆ	21
2.7 ลักษณะเฉพาะของปั๊มหอยโข่งชนิดต่างๆ	24
2.8 ประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งชนิดต่างๆ	25
2.9 ตัวแปรการประมาณต้นทุนการก่อสร้างหน่วยการผลิต	32
2.10 ตัวแปรวัสดุอื่นๆสัมพัทธ์กับวัสดุเหล็กคาร์บอน	32
4.1 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ณ ภาวะปฏิบัติการ	41
4.2 ข้อมูลภาวะปฏิบัติการ	42
4.3 ค่าความขรุขระของท่อเหล็กคาร์บอน (Carbon Steel)	42
4.4 ข้อมูลของท่อขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาจากจุดที่ 1 ถึง 2 (ดังรูปที่ 4.1)	42
4.5 จำนวนสิ่งประกอบท่อและวาล์วจากจุดที่ 1 ถึง 2 (ดังรูปที่ 4.1)	43
4.6 ข้อมูลที่ภาวะปฏิบัติการเพิ่มเติมสำหรับการสร้างกราฟเฮดของระบบปัจจุบัน	44
4.7 รายละเอียดท่อจาก D-321 ถึง PC-321	44
4.8 จำนวนสิ่งประกอบท่อและวาล์วจาก D-321 ถึง PC-321	45
4.9 เฮดที่อัตราการไหลต่างๆจากการทดลองเพื่อสร้างกราฟสมรรถนะที่ภาวะปฏิบัติการ	46
4.10 ข้อมูลภาวะปฏิบัติการเพิ่มเติมสำหรับการคำนวณของระบบท่อที่ปรับปรุง	48
4.11 ความยาวท่อและความแตกต่างความสูงแต่ละเส้นทางการไหล (ดังรูปที่ 4.5)	48
4.12 จำนวนสิ่งประกอบท่อและวาล์วแต่ละเส้นทางการไหลสำหรับระบบที่ถูกปรับปรุง (ดังรูปที่ 4.5)	49
4.13 ความดันลดภายในท่อสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่	49
4.14 ความดัน ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบที่ปรับปรุงใหม่	50
4.15 ความดันสถิต ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

4.16 ข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อการคำนวณรายละเอียดของปั๊มสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่ 51
4.17 รายละเอียดของปั๊มสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่ 51
4.18 ต้นทุนการติดตั้งสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่ 52
4.19 ค่าไฟฟ้าและค่าบำรุงรักษาปั๊มใหม่ 53
4.20 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลดลงและต้นทุนที่ลดลง 53
4.21 ข้อมูลที่ใช้ในการหาระยะเวลาคืนทุน 53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ถึง D-311 ... 1
1.2 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาเดิมจาก D-321 ถึงขนถ่าย (LS-100) ... 2
1.3 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงใหม่ ... 3
2.1 Polyethylene slurry-pipe-loop reactor ... 6
2.2 Polyethylene Chain Branching Simplified ... 7
2.3 Molecular Weight Distribution of LDPE and LLDPE ... 7
2.4 ข้อต่อชนิดต่างๆ ... 11
2.5 วาล์วชนิดต่างๆ ... 12
2.6 Moody diagram ... 18
2.7 การจำแนกประเภทปั๊ม ... 22
2.8 Centrifugal pump ... 23
2.9 กราฟความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ ความจุ และเฮดของปั๊มหอยโข่ง ... 27
2.10 ตัวอย่างกราฟสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง ... 29
2.11 กราฟสมรรถนะของปั๊มและกราฟเฮดของระบบ ... 30
3.1 ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปร ... 34
3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321) ... 36
3.3 ขั้นตอนการประเมินความเป็นไปได้ในการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่ ... 37
4.1 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ไปยัง D-311 และจุดอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปร ... 40
4.2 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ไปยัง D-311 และจุดอ้างอิงสำหรับการสร้างกราฟเฮดของระบบ ... 43
4.3 กราฟเฮดของระบบของระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาปัจจุบัน (D-321 ไปยัง D-311) ... 44
4.4 กราฟสมรรถนะของปั๊ม (PC-321) ที่ภาวะปฏิบัติการและข้อมูลการออกแบบ ... 45
4.5 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงและจุดอ้างอิงสำหรับการคำนวณความดันลด ... 46
4.6 เส้นทางการวางท่อของระบบที่ปรับปรุงใหม่ในมุมมองไอโซเมตริก ... 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

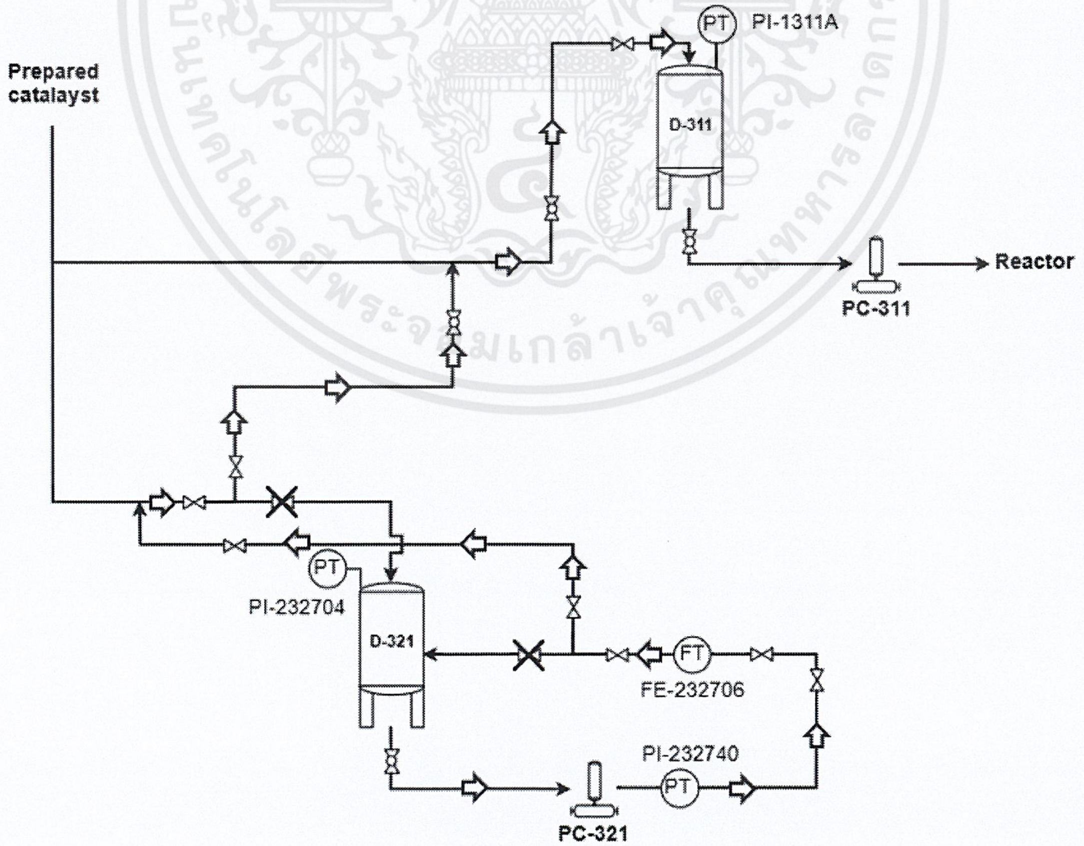
บทที่ 1

บทนำ

กระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมย่อมมีการเปลี่ยนแปลงและพัฒนาระบบเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต การปรับปรุงและพัฒนาระบบใหม่เป็นหนึ่งในทางเลือกที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตได้ ซึ่งระบบที่ปรับปรุงใหม่จำเป็นต้องมีการตรวจสอบเพื่อประเมินความเป็นไปได้ในการใช้งาน รวมทั้งประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการเพื่อพิจารณาความคุ้มค่าในการลงทุน

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

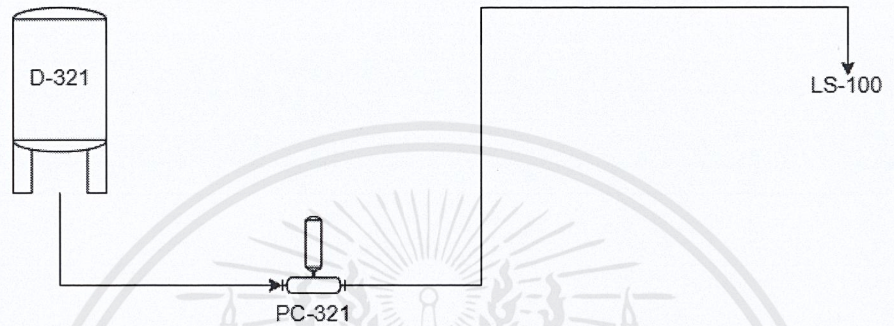
กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกโพลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นจากเอทิลีนโมโนเมอร์ผ่านปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชันในตัวทำละลาย มีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Ziegler-Natta ในรูปของสารละลายแขวนลอยเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยา ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมเสร็จจะนำมาเก็บที่ถัง D-311 และ D-321 ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ถึง D-311

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นจึงป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-311 เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ด้วยปั๊ม PC-311 หากต้องการป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์จำเป็นต้องถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ไปยัง D-311 ก่อน เนื่องจาก D-321 ถูกออกแบบมาเพื่อป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาไปยังพื้นที่ขนถ่าย (LS-100) ดังรูปที่ 1.2



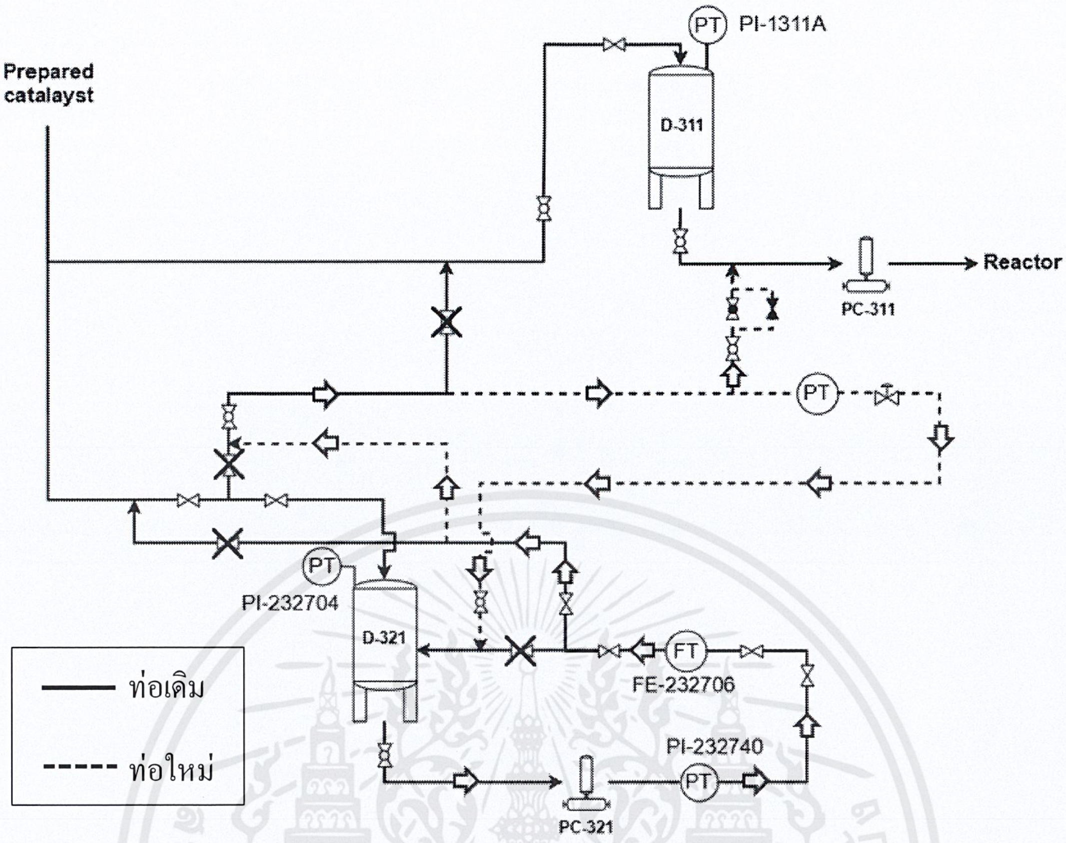
รูปที่ 1.2 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาเดิมจาก D-321 ถึงพื้นที่ขนถ่าย (LS-100)

เมื่อต้องการปรับปรุงระบบให้ D-321 สามารถป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ จึงไม่สามารถดำเนินการได้ เป็นสาเหตุให้ D-321 ต้องถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาไปยัง D-311 ก่อนเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งระบบในปัจจุบันเกิดความร้อนสะสมเนื่องจากการปั๊มตัวเร่งปฏิกิริยาวนเข้าถังตลอดเวลาเพื่อป้องกันการตกตะกอนระหว่างรอระดับตัวเร่งปฏิกิริยาใน D-311 พร้อม ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพลดลง ส่งผลให้ต้องใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในการผลิตเพิ่มขึ้นจากเดิมเพื่อให้เม็ดพลาสติกมีคุณภาพตามที่ต้องการ อีกทั้งการถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ไปยัง D-311 ไม่ใช่ระบบอัตโนมัติ จึงต้องเปิด-ปิดวาล์วในพื้นที่การผลิต ซึ่งลำดับขั้นตอนมีความซับซ้อน เกิดความผิดพลาดบ่อย และเข้าถึงวาล์วค่อนข้างยาก

ดังนั้นจึงได้ออกแบบระบบท่อขนถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ไปยัง D-311 ใหม่ ซึ่งสามารถป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ได้โดยตรง ไม่ต้องนำมาเก็บที่ D-311 ก่อน ดังรูปที่ 1.3 เพื่อลดเวลาในการเก็บตัวเร่งปฏิกิริยาและลดปริมาณความร้อนสะสมที่ส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีประสิทธิภาพลดลง อีกทั้งเปลี่ยนระบบเป็นแบบอัตโนมัติ เพื่อลดภาระงานการเปิด-ปิดวาล์วในพื้นที่การผลิตและสามารถใช้ D-321 แทน D-311 ได้ในกรณีที่ต้องการซ่อมบำรุงหรือระบบขัดข้องโดยไม่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงใหม่

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

เพื่อประเมินความเป็นไปได้ของการใช้งานระบบท่อขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงใหม่

1.3 ขอบเขตของโครงการ

1.3.1 ศึกษาระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาปัจจุบันและระบบที่ปรับปรุงใหม่

1.3.2 ศึกษาและประเมินความเป็นไปได้ของระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงใหม่

1.3.3 ศึกษาและประเมินการใช้งานปั๊มเดิม (PC-321) ร่วมกับระบบที่ปรับปรุงใหม่

1.3.4 ศึกษาและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการติดตั้งระบบที่ปรับปรุงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 วิธีการดำเนินโครงการ

1.4.1 รวบรวมและตรวจสอบความถูกต้องของสมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและค่าความขรุขระของพื้นผิวท่อ

1.4.2 ตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321)

1.4.3 ตรวจสอบความเป็นไปได้ในการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่

1.4.4 เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาหากระบบที่ปรับปรุงใหม่ไม่สามารถใช้งานกับปั๊มเดิมได้ (PC-321)

1.4.5 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.5.1 สามารถลดปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีประสิทธิภาพต่ำ

1.5.2 สามารถลดภาระงานในการเปิด-ปิดวาล์วในพื้นที่การผลิต

1.5.3 สามารถใช้ D-321 แทน D-311 ได้ในกรณีที่ D-311 ต้องการซ่อมบำรุงหรือเกิดเหตุขัดข้องโดยไม่ต้องหยุดกระบวนการผลิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการผลิตเม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น

กระบวนการผลิตโพลีเอทิลีน (Polyethylene) เกิดจากปฏิกิริยาโพลิเมอไรเซชัน (Polymerization) มีสารตั้งต้นหลัก ได้แก่ เอทิลีน (Ethylene) ซึ่งประเภทของโพลีเอทิลีนถูกจำแนกด้วยความแตกต่างของความหนาแน่น ประกอบด้วย (Mayers, R. A. 2018: 14.3-14.7)

- High Density Polyethylene (HDPE)

HDPE เป็นโพลีเอทิลีนโซ่ตรงชนิดแรกซึ่งได้ผลิตในปี ค.ศ. 1956 ในปัจจุบันกระบวนการผลิตใช้ความดันต่ำ ประกอบด้วยเทคโนโลยี 3 ลักษณะ ได้แก่ สารละลายแขวนลอย (Slurry) ก๊าซ และสารละลาย โดยตัวเร่งปฏิกิริยา 2 กลุ่มหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิต ได้แก่ โครเมียมออกไซด์และ Ziegler-Natta มีความหนาแน่น 0.940 – 0.970 g/cm^3

- High Density High Molecular Weight Polyethylene (HMWPE)

HMWPE ถูกจำแนกจาก HDPE โดยมีมวลโมเลกุลสูงกว่า อยู่ในช่วง 200,000 – 500,000 ซึ่งสามารถผลิตผ่านเทคโนโลยีในลักษณะสารละลายแขวนลอยและก๊าซ มีตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ โครเมียมออกไซด์และ Ziegler – Natta ผ่านกระบวนการอัดรีด (Extrusion) ถูกนำมาใช้ผลิตฟิล์มชนิดบาง ท่อแรงดัน และกลอง มีความหนาแน่น 0.944 – 0.955 g/cm^3

- Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE)

UHMWPE เป็นโพลีเอทิลีนความหนาแน่นสูง มีมวลโมเลกุลมากกว่า 3 ล้าน มีลักษณะเป็นโซ่ตรงเหมือน HDPE ซึ่งมีเทคโนโลยีการผลิตผ่านสารละลายแขวนลอยและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ziegler – Natta มักถูกนำมาใช้ผลิตเกียร์ โรลเลอร์ พื้นผิวสไลเดอร์ มีความหนาแน่น 0.930 – 0.935 g/cm^3

- Linear Low-Density Polyethylene (LLDPE)

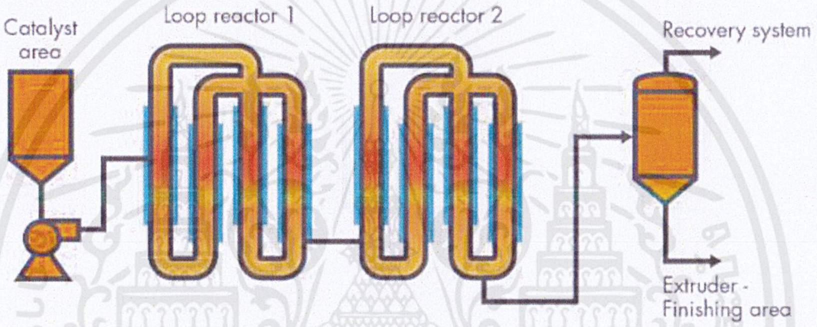
LLDPE เป็นโพลีเอทิลีนที่มีกิ่งสั้นของโคโมโนเมอร์ ถูกผลิตครั้งแรกในปี ค.ศ. 1980 สามารถผลิตผ่านเทคโนโลยีในลักษณะก๊าซและสารละลาย ซึ่งใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มของ Ziegler – Natta หรือฟิลิปส์ (โครเมียม) ถูกนำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตฟิล์มเป็นหลัก มีความหนาแน่น 0.910 – 0.930 g/cm^3

- Very Low-Density Polyethylene (VLDPE)

VLDPE เป็นโพลีเอทิลีนชนิดโคโพลีเมอร์ที่มีกิ่งของโคโมโนเมอร์ ผลิตผ่านกระบวนการโคโพลีเมอไรเซชันของเอทิลีนและอัลฟาโอเลฟินโดยใช้เทคโนโลยีในลักษณะของก๊าซหรือสารละลาย ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา Ziegler – Natta มีความหนาแน่น 0.880 – 0.915 g/cm^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการผลิตโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้น (LLDPE) เป็นกระบวนการผลิตที่อยู่ในรูปของสารละลายแขวนลอย (Slurry) ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบลูปและมีตัวทำละลาย เช่น ไอโซบิวเทน (Isobutane) ทำละลายก๊าซเอทิลีนและโคโมโนเมอร์ซึ่งเป็นสารตั้งต้น โดยจะเกิดปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic) และของเหลวจะถูกขับเคลื่อนให้หมุนวนภายในเครื่องปฏิกรณ์โดยปั๊มขนาดใหญ่ ที่เครื่องปฏิกรณ์จะถ่ายเทความร้อนออกจากระบบเพื่อรักษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีไม่ให้สูงเกินกว่าที่จะควบคุมได้ (Runaway Reaction) เมื่อของผสมออกจากเครื่องปฏิกรณ์จะได้โพลิเมอร์และตัวทำละลายผสมอยู่ จึงต้องระเหยตัวทำละลายออกจากโพลิเมอร์ ที่ถังแยกไอ (Flash Tank) จากนั้นจะเข้าสู่เครื่องอัดรีด (Extruder) เพื่อขึ้นรูปและตัดเม็ดต่อไป (Mayers, R. A. 2018: 14.32-14.34)

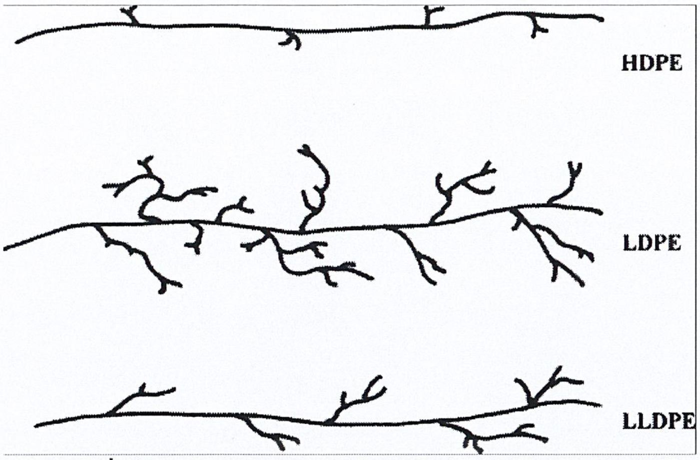


รูปที่ 2.1 Polyethylene slurry-pipe-loop reactor

(Mayers, R. A. 2018: 14.32)

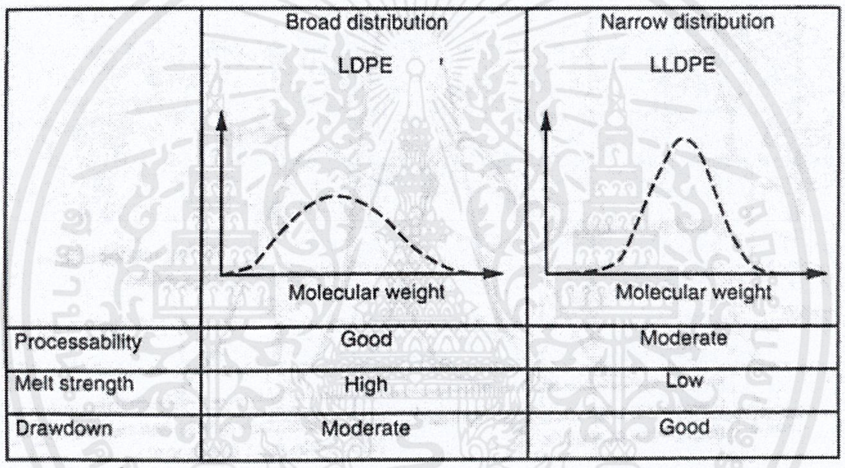
สำหรับกระบวนการผลิตดังกล่าวใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มของ Ziegler-Natta ซึ่งมีข้อดี ได้แก่ ได้ผลผลิตสูง ช่วงน้ำหนักโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ค่อนข้างแน่นอน ไม่มีกลิ่น และไม่มีรสชาติ ตัวเร่งปฏิกิริยาในกลุ่มนี้ประกอบด้วยสารประกอบโลหะ 2 ชนิดคือ สารประกอบเฮไลด์ของโลหะแทรนซิชัน (Transition) เช่น ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ ($TiCl_4$) และสารประกอบอัลคิล (Alkyl) ของโลหะหมู่ที่ 3 ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาร่วม (Cocatalyst) เช่น Triethyl Alumina (TEA) และต้องมีฐานรองรับตัวเร่งปฏิกิริยา เช่น แมกนีเซียมคลอไรด์ ($MgCl_2$) ซึ่งการสังเคราะห์โพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นมีความจำเพาะ ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงลดลง จึงทำให้กิ่งของสายโซ่หลักน้อยและมีความเป็นเส้นตรงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 Polyethylene Chain Branching Simplified

(Mayers, R. A. 2018: 14.3-14.7)



รูปที่ 2.3 Molecular Weight Distribution of LDPE and LLDPE

(Mayers, R. A. 2018: 14.3-14.7)

เม็ดพลาสติกโพลีเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นนิยมนำมาผลิตเป็นฟิล์มชนิดต่างๆ เช่น ฟิล์มคลุมโรงเรือน (Greenhouse Film) ฟิล์มคลุมดิน (Mulch Film) ฟิล์มรองบ่อ (Pond Liners) เป็นต้น และผลิตภัณฑ์ที่นิยมผลิตรองลงมาจากฟิล์มคือสิ่งทอ สามารถนำมาทอเป็นเสื้อผ้า ถุง และกระเป๋า (Mayers, R. A. 2018: 14.10)

2.2 ระบบท่อ

ระบบท่อและสิ่งที่เกี่ยวข้องกับระบบท่อ ได้แก่ วัสดุท่อ ข้อต่อ ระบบขับเคลื่อนของไหล และระบบควบคุมการไหล ทั้งนี้เป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในโรงงานอุตสาหกรรมทุกประเภท ระบบท่อสามารถขนส่งได้ทั้งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งมีสัดส่วนค่าใช้จ่ายสำหรับระบบท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อยู่ในช่วง 15% - 65 % ของค่าใช้จ่ายภายในโรงงานทั้งหมด ขึ้นอยู่กับจำนวนท่อของแต่ละโรงงานที่จำเป็นต้องตรวจสอบการกัดกร่อนภายใต้ฉนวน ซึ่งการตรวจสอบดังกล่าวมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากต้องรื้อฉนวนและใช้แรงงงานค่อนข้างมาก อย่างไรก็ตามการตรวจสอบและบำรุงรักษาระบบท่ออย่างสม่ำเสมอเป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้สามารถใช้งานได้เป็นระยะเวลานานและไม่เกิดอันตรายระหว่างใช้งาน (สุธรรม สุขมณี. 2559: 4-1)

2.2.1 รายละเอียดที่จำเป็นต่อการออกแบบระบบท่อ (สุธรรม สุขมณี. 2559: 4-1)

การออกแบบระบบท่อจำเป็นต้องรู้ข้อมูลที่เกี่ยวข้อง ดังนี้

1) ตำแหน่งที่ตั้งและระยะห่างของแต่ละหน่วยการผลิต
2) พื้นที่ที่สามารถวางระบบท่อ
3) สมบัติของของไหลในท่อ
4) ภาวะการทำงาน ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน อัตราการไหล
5) ที่ตั้งของระบบขับเคลื่อนการไหล เช่น ปั๊ม เครื่องเป่าลม หรือเครื่องอัดลม
6) ความยากง่ายในการวางท่อและการเข้าถึงซ่อมบำรุง
7) ข้อมูลและมาตรฐานของท่อ

2.2.2 รหัสและมาตรฐาน (Codes & Standards) (Nayyar, M. L. 2013: A.179-211)

รหัสและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับระบบท่อและองค์ประกอบของท่อถูกเผยแพร่จากองค์กรกลุ่มหนึ่งซึ่งทำหน้าที่ดูแลรักษา ปรับปรุง และแก้ไขรหัสและมาตรฐานการออกแบบระบบท่อ โดยรหัสและมาตรฐานนี้จำเป็นต่อการออกแบบเพื่อให้ระบบท่อสอดคล้องกับมาตรฐานสากลดังกล่าว ซึ่งครอบคลุมระบบท่อทางวิศวกรรมทั้งหมด มีตัวอย่างดังต่อไปนี้

1) American Society of Mechanical Engineers (ASME)

เป็นหนึ่งในองค์กรชั้นนำที่พัฒนาและเผยแพร่รหัสและมาตรฐาน มีหน้าที่รับผิดชอบเกี่ยวกับหม้อน้ำ (Boiler) ภาชนะรับแรงดัน (Pressure Vessel) และท่อรับแรงดัน (Pressure Piping) ในส่วนของท่อรับแรงดันจะใช้รหัส B.31 ได้แก่

- B31.1 Power Piping
- B31.2 Fuel Gas Piping
- B31.3 Process Piping
- B31.4 Pipeline Transportation Systems for Liquid Hydrocarbons and Other Liquids
- B31.5 Refrigeration Piping
- B31.8 Gas Transmission and Distribution Piping
- B31.9 Building Services Piping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) American National Standards Institute (ANSI)

องค์กรนี้มีชื่อเดิมคือ American Standards Association (ASA) มีหน้าที่พัฒนาและอนุมัติมาตรฐานระดับนานาชาติ และเป็นศูนย์เผยแพร่รหัสและมาตรฐานสู่นานาชาติ รวมถึงการรองรับมาตรฐานจาก ISO (International Organization for Standardization)

3) American Society for Testing and Materials (ASTM)

เป็นองค์กรที่พัฒนาและเผยแพร่มาตรฐานที่เกี่ยวกับลักษณะและประสิทธิภาพของวัสดุ มาตรฐานที่เผยแพร่เกี่ยวของกับการตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมี การวัดผลประสิทธิภาพ เช่น การต้านทานแรงดึง ความแข็ง ความทนทาน เป็นต้น

4) American Petroleum Institute (API)

สถาบันนี้เผยแพร่ข้อมูลจำเพาะ แนวทางปฏิบัติ และมาตรฐาน ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

2.2.3 ตัวอย่างชนิดของท่อในงานอุตสาหกรรม (ดุลยโชติ ชลศึกษ์. 2557: 19-21)

1) ท่อเหล็กเหนียว (Steel Pipe)

นิยมใช้ในงานที่ความดันสูง เป็นท่อที่มีความแข็งแรง ทนทาน และผิวเรียบ แต่ไม่สามารถทนการกัดกร่อนได้ จึงต้องมีการเคลือบสารป้องกันการกัดกร่อน ซึ่งนิยมระบุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางสำหรับการซื้อขายเป็นหน่วยนิ้วหรือมิลลิเมตร (Nominal Pipe Size, NPS) สามารถผลิตได้ด้วยการรีดซึ่งไร้ตะเข็บและการเชื่อมซึ่งมีตะเข็บ แบ่งตามมาตรฐาน ASTM A53 ได้ดังนี้

- Type F – Furnace – Butt - Welded, Continuous Welded Grade A
- Type E – Electric – Resistance – Welded, Grades A and B
- Type S – Seamless, Grade A and B

ตารางที่ 2.1 Standard Pipe Schedule 40 – ASTM A53 Grades A and B (Wheatland Tube. 2019)

NPS (inch)	DN	OD (mm)	ID (mm)	Wall Thickness (mm)	Nominal Weight (Mass) per Unit Length	
					Plain End (kg/m)	Threads & Couplings (kg/m)
1/4	8	13.7	9.2	2.24	0.63	0.63
1/2	15	21.3	15.8	2.77	1.27	1.27
3/4	20	26.7	20.9	2.87	1.69	1.69
1	25	33.4	26.6	3.38	2.50	2.50
1-1/4	32	42.2	35.1	3.56	3.39	3.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NPS (inch)	DN	OD (mm)	ID (mm)	Wall Thickness (mm)	Nominal Weight (Mass) per Unit Length	
					Plain End (kg/m)	Threads & Couplings (kg/m)
1-1/2	40	48.3	40.9	3.68	4.05	4.04
2	50	60.3	52.5	3.91	5.44	5.46
2-1/2	65	73.0	62.7	5.16	8.63	8.67
3	80	88.9	77.9	5.49	11.29	11.35

2) ท่อเหล็กกล้าไร้สนิมหรือท่อสแตนเลส (Stainless Steel Pipe)

มีองค์ประกอบสำคัญได้แก่ โครเมียม (Cr) นิกเกิล (Ni) โมลิบดีนัม (Mo) นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเคมี อาหาร และยา อีกทั้งมีราคาที่สูงมาก เนื่องจากทนการกัดกร่อนได้ดีและมีความแข็งแรงสูง ประกอบด้วย 5 กลุ่มหลักซึ่งจำแนกโดยสัดส่วนขององค์ประกอบสำคัญ ดังนี้

- Ferritic ประกอบด้วย 16-18% โครเมียม 0-4% นิกเกิล และ 0.05-0.25% คาร์บอน มีความยืดหยุ่นสูงและทนการกัดกร่อนสารประเภทคลอไรด์ได้ดี ตัวอย่างรหัส เช่น ASTM grade 430
- Austenitic ประกอบด้วย 17-27% โครเมียม 8-35% นิกเกิล และ 0-6% โมลิบดีนัม ทนการกัดกร่อนได้ดีแต่ไม่ทนการกัดกร่อนของคลอไรด์ ตัวอย่างรหัส เช่น ASTM 304L
- Superaustenitic ประกอบด้วย 19-21% โครเมียม 32-38% นิกเกิล 3-4% ทองแดง และ 2-3% โมลิบดีนัม ถูกสร้างเพื่อให้ทนการกัดกร่อนได้ดีกว่าท่อเหล็กกล้าไร้สนิมทั่วไป มีตัวอย่างรหัสตามระบบ UNS (Unified Numbering System) เช่น N08020 N08024
- Martensitic ประกอบด้วย 11-18% โครเมียม 0-6% นิกเกิล 0.1-1% ทองแดง และ 0-2% โมลิบดีนัม ต้านทานการเกิดออกซิเดชันและทนต่ออุณหภูมิสูง มีตัวอย่างรหัส เช่น ASTM grade 410
- Duplex ประกอบด้วย Ferritic และ Austenitic ในสัดส่วนอย่างละ 40-60% ทนการกัดกร่อนสารประเภทคลอไรด์ ยืดหยุ่นสูง และทนการกระแทกได้ดี

3) ท่อเหล็กหล่อ (Cast Iron Pipe)

เป็นเหล็กที่มีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบเกิน 2% โดยน้ำหนัก มักมีการเคลือบผิวภายในด้วยซีเมนต์ นิยมใช้ในงานระบบน้ำเสียและน้ำทิ้ง เนื่องจากสามารถรองรับแรงกระทำจากภายนอกได้ เช่น แรงอัดจากการฝังท่อใต้ดิน อีกทั้งสามารถทนการกัดกร่อนได้ แต่ไม่ดีเท่ากับท่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สแตนเลส และมีอายุการใช้งานนาน ข้อเสียคือความเปราะ แตกหักง่าย น้ำหนักมาก และราคาสูง มีมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ASTM และ CISPI

2.2.4 สิ่งประกอบท่อและวาล์ว (สุธรรม สุขมณี. 2559: 4-10)

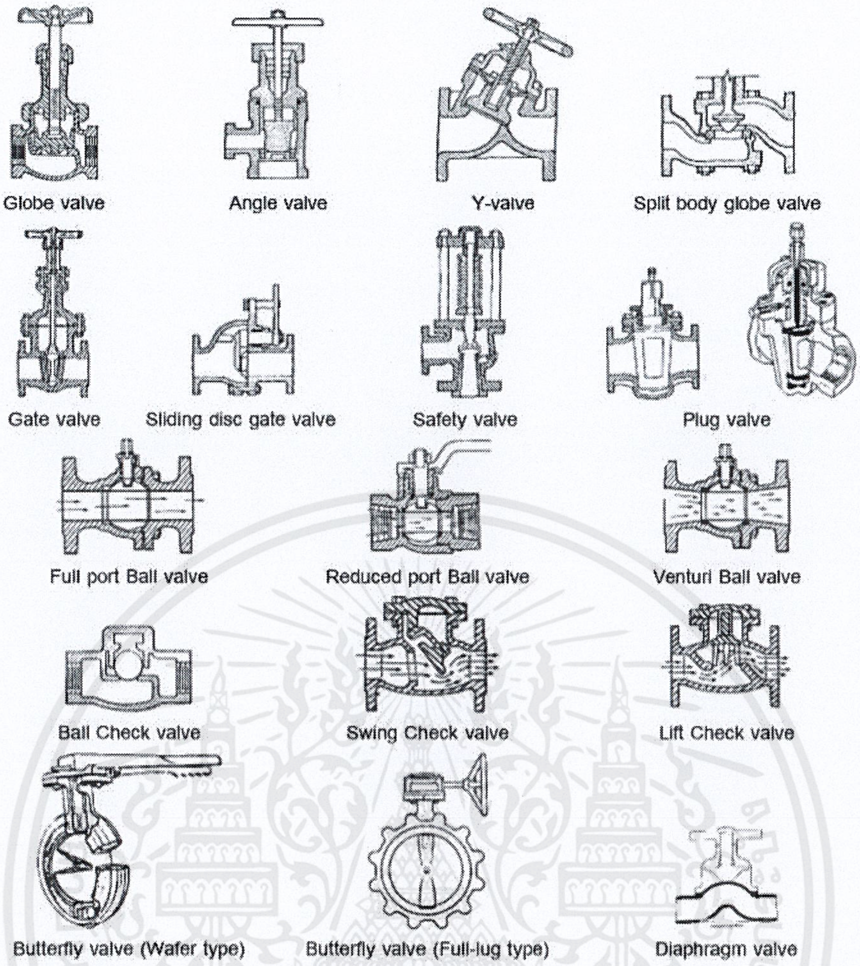
ในระบบท่อมีสิ่งประกอบท่อและวาล์วต่างๆเพื่อให้ระบบท่อสามารถใช้งานได้ตามจุดประสงค์ เช่น ข้องอ (45° และ 90°) ข้อต่อตรง ข้อต่อสามทาง ข้อต่อสี่ทาง ข้อลด วาล์ว ตัวกรอง ยูเนี่ยน หน้าแปลน เป็นต้น

รูปที่ 2.4 ข้อต่อชนิดต่างๆ

(สุธรรม สุขมณี. 2559: 4-11)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 วาล์วชนิดต่างๆ

(สุธรรม สุขมณี. 2559: 4-11)

ตารางที่ 2.2 ตัวอย่างรายละเอียดของวาล์วแต่ละชนิด (Smith, P. and Zappe, R. W. 2004: 54-153)

วาล์ว	รายละเอียด
โกลบวาล์ว (Globe Valve)	ควบคุมอัตราการไหลได้ดี ความดันลดระหว่างวาล์วสูง ปิดสนิท
เกทวาล์ว (Gate Valve)	ใช้เปิด-ปิดสุดเท่านั้น ความดันลดระหว่างวาล์วต่ำ ควบคุมอัตราการไหลไม่ดี
บอลล์วาล์ว (Ball Valve)	ควบคุมอัตราการไหลได้ ใช้งานง่าย เปิด-ปิดได้ 90°
วาล์วปีกผีเสื้อ (Butterfly Valve)	เป็นได้ทั้งวาล์วเปิด-ปิดและควบคุมอัตราการไหล เปิด-ปิดได้ 90° ความดันลดระหว่างวาล์วต่ำ
ไดอะแฟรมวาล์ว (Diaphragm Valve)	สามารถใช้กับของเหลวแขวนลอยสูงได้
เช็ควาล์ว (Check Valve)	ป้องกันการไหลย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 การจัดวางท่อ (สุธรรม สุขมณี. 2559: 4-12)

การจัดวางท่ออาศัยประสบการณ์ของผู้ออกแบบ ขึ้นกับตำแหน่งที่ตั้งและระยะห่างระหว่างหน่วยการผลิต ในเบื้องต้นผู้ออกแบบจะใช้สายตาประเมินแนวการวางท่อ จากนั้นผู้ออกแบบจะวาดแนวท่อโดยใช้โปรแกรมแบบจำลองสามมิติเพื่อเพิ่มรายละเอียดและความชัดเจนให้มากยิ่งขึ้น

ตารางที่ 2.3 ข้อแนะนำในการจัดวางท่อ (สุธรรม สุขมณี. 2559: 4-11)

ข้อควรกระทำ	ข้อควรหลีกเลี่ยง
1) มีความสะดวกต่อการบำรุงรักษา 2) ที่ตั้งของวาล์วหรือตัวกรองมีความสะดวกต่อการใช้งานและซ่อมบำรุง 3) มีระบบยึดท่อ 4) มี by-pass เพื่อเพิ่มอัตราการไหลหรือใช้งานแทนเมื่อระบบท่อจุดนั้นมีโอกาสซ่อมแซมหรือหยุดทำงานบ่อย 5) ใช้ข้อต่อสามทางหรือสี่ทางกับหัวอุดเพื่อรองรับการต่อเติมท่อ	1) ใช้วาล์วเป็นตัวรับน้ำหนักท่อ 2) ติดตั้งวาล์วบนท่อในแนวดิ่ง 3) วางท่อในแนวระดับเหนือปั๊มหรืออุปกรณ์ที่อาจมีการซ่อมบำรุงบ่อย

2.3 สถิตยศาสตร์ของไหล (Fluid Statics) (Perry, R. H. et al. 2018: 6-8)

สำหรับส่วนนี้จะกล่าวถึงการวัดความดันของของไหลสถิต หรือของไหลหยุดนิ่ง ซึ่งไม่มีความเค้นเฉือนมากระทำ เนื่องจากความเร็วของของไหลเป็นศูนย์ทำให้การเปลี่ยนแปลงความดัน แสดงดังสมการที่ 2.1

$$dp / dz = -\rho g \tag{2.1}$$

และสำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) ซึ่งมีความหนาแน่นคงที่และไม่แปรผันตามความดัน ความดันของของไหลจะแปรผันตามความสูงของของไหล แสดงดังสมการที่ 2.2

$$P = \rho g z \tag{2.2}$$

เมื่อ P = ความดัน, Pa

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

z = ระดับความสูงจากจุดอ้างอิง, m

2.4 ความดันลดภายในท่อ (Pressure Drop in Pipeline)

ท่อสามารถใช้ขนส่งของแข็ง ของเหลว และก๊าซ โดยระบบท่อในโครงการที่ศึกษาเกี่ยวข้องกับการขนส่งของเหลว ซึ่งของเหลวภายในท่อถูกขับเคลื่อนด้วยแรงดันจากปั๊มและเกี่ยวข้องกับพลังงานหลายรูปแบบ ได้แก่

1) พลังงานภายใน (Internal Energy) เนื่องจากอุณหภูมิของของไหล
2) พลังงานจลน์ (Kinetics Energy) เนื่องจากความเร็วของของไหล
3) พลังงานศักย์ (Potential Energy) เนื่องจากแรงโน้มถ่วง
4) ความดัน (Pressure) เนื่องจากงานหรือพลังงานที่ใช้ในการไหล
5) งานเนื่องจากการหมุน (Shaft Work) เนื่องจากการทำงานผ่านระบบแกนหมุนของอุปกรณ์ เช่น ปั๊ม (Pump) คอมเพรสเซอร์ (Compressor) กังหัน (Turbine) เป็นต้น

การไหลภายในท่อจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุด ทั้งสองจุดต้องมีพลังงานรวมเท่ากัน แต่เทอมของพลังงานแต่ละรูปแบบไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน เนื่องจากพลังงานสามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ สมการที่ใช้อธิบายเรียกว่าสมการเบอร์นูลลี แสดงดังสมการที่ 2.3 (Perry, R. H. et al. 2018: 6-7)

$$\int_{P_{in}}^{P_{out}} \frac{dP}{\rho} + g(z_{out} - z_{in}) + \frac{1}{2}(v_{out}^2 - v_{in}^2) + e_f + w = 0 \tag{2.3}$$

โดยความเร็วของของไหล (v) แสดงดังสมการที่ 2.4 (Perry, R. H. et al. 2018: 6-6)

$$v = \frac{Q}{A} \tag{2.4}$$

เมื่อ v = ความเร็วของของไหล, m/s

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m^3/s

A = พื้นที่หน้าตัดของท่อ, m^2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid) จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นตามความดันและสามารถเขียนสมการใหม่ได้ แสดงดังสมการที่ 2.5 (Perry, R. H. et al. 2018: 6-7)

$$\frac{P_{out}-P_{in}}{\rho}+g(z_{out}-z_{in})+\frac{1}{2}(v_{out}^2-v_{in}^2)+e_f+w=0 \quad (2.5)$$

หากสมการที่ 2.5 ถูกหารตลอดด้วยค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) จะทำให้อยู่ในหน่วยของความยาว เรียกว่า สมการเบอร์นูลลีในรูปแบบของเฮด (Head) ซึ่งเป็นหน่วยที่นิยมใช้ในการคำนวณ แสดงดังสมการที่ 2.6

$$\frac{P_{out}-P_{in}}{\rho g}+(z_{out}-z_{in})+\frac{1}{2g}(v_{out}^2-v_{in}^2)+h_f+h_p=0 \quad (2.6)$$

เมื่อ P = ความดัน, Pa

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

z = ระดับความสูงจากจุดอ้างอิง, m

v = ความเร็วของของไหล, m/s

e_f = พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน, J

w = งานเนื่องจากการหมุน (Shaft Work), J

h_f = เฮดที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน, m

h_p = เฮดของปั๊ม, m

สมการเบอร์นูลลีสามารถใช้คำนวณพลังงาน ณ จุดต่างๆของของไหลได้ รวมทั้งสามารถคำนวณความดันลดระหว่างจุดอ้างอิงทั้งสองจุดภายในท่อได้อย่างแม่นยำ ซึ่งความแม่นยำขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลที่ส่งผลต่อการคำนวณความดันลด เช่น สมบัติทางกายภาพของของไหล ความแตกต่างของความสูงระหว่างจุดอ้างอิง สัมประสิทธิ์ความเสียดทานของความยาวท่อ สิ่งประกอบท่อและวาล์ว ดังนั้นความดันลดเกิดจาก 2 สาเหตุหลัก ได้แก่ ความดันลดเนื่องจากความยาวท่อ และความดันลดเนื่องจากสิ่งประกอบท่อและวาล์ว (Towler and Sinnott. 2013: 1213-1214; Perry, R. H. et al. 2018: 6-7 6-16)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 ความดันลดเนื่องจากความยาวท่อ

เมื่อของไหลเคลื่อนที่ภายในท่อจะสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานกับพื้นผิวของท่อตลอดการไหล ส่งผลให้เกิดความดันลด โดยความดันลดเนื่องจากความยาวท่อเป็นฟังก์ชันของอัตราการไหล ความหนาแน่น ความหนืด เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความขรุขระของพื้นผิวท่อ และความยาวท่อ ซึ่งเฮดสูญเสียเนื่องจากความยาวท่อเป็นเทอมในสมการ สมการเบอร์นูลลีในรูปแบบเฮด (สมการที่ 2.6) ดังนั้นการคำนวณเฮดสูญเสียเนื่องจากความยาวท่อสามารถแสดงดังสมการที่ 2.7 (Perry, R. H. et al. 2008: 6-16; Towler and Sinnott. 2013: 1216-1217)

$$h_{f,major} = \sum 4f\frac{L}{D}\left(\frac{v^2}{2g}\right) \tag{2.7}$$

เมื่อ $h_{f,major}$ = เฮดที่สูญเสียเนื่องจากความยาวท่อ, m

f = Fanning Friction

L = ความยาวท่อ, m

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ, m

v = ความเร็วของของไหลภายในท่อ, m/s

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก, m/s^2

Fanning Friction (f) มีค่าขึ้นกับตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number, Re) และความขรุขระของพื้นผิวท่อ (Pipe Roughness, ε) ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถบ่งบอกลักษณะการไหลภายในท่อโดยแบ่งเป็น 3 ลักษณะ ได้แก่ (Perry, R. H. et al. 2018: 6-10)

- $\mathrm{Re} \leq 2{,}100$ เป็นการไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)
- $2{,}100 < \mathrm{Re} \leq 4000$ เป็นการไหลแบบทรานซิชัน (Transition Flow)
- $\mathrm{Re} > 4{,}000$ เป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์สามารถแสดงดังสมการที่ 2.8 (Perry, R. H. et al. 2018: 6-10)

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{2.8}$$

เมื่อ Re = Reynolds Number

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

v = ความเร็วของของไหล, m/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ, m

μ = ความหนืดของของไหล, Pa.s

Fanning Friction สำหรับการไหลแบบราบเรียบจะขึ้นกับค่าเรย์โนลด์เท่านั้น แสดงดังสมการที่ 2.9 (Perry, R. H. et al. 2018: 6-10 - 6-11)

$$f = \frac{16}{\text{Re}} \tag{2.9}$$

และสำหรับการไหลแบบทรานซิชันและปั่นป่วนค่า Fanning Friction เป็นฟังก์ชันกับค่าความขรุขระของท่อและค่าเรย์โนลด์ สามารถหาจาก Moody Diagram (รูปที่ 2.6) หรือการคำนวณ แสดงดังสมการที่ 2.10 โดยค่าความขรุขระของพื้นผิวท่อบางชนิดแสดงดังตารางที่ 2.4

$$f = 2\left[\left(\frac{8}{\text{Re}}\right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}}\right]^{1/12} \tag{2.10}$$

เมื่อ

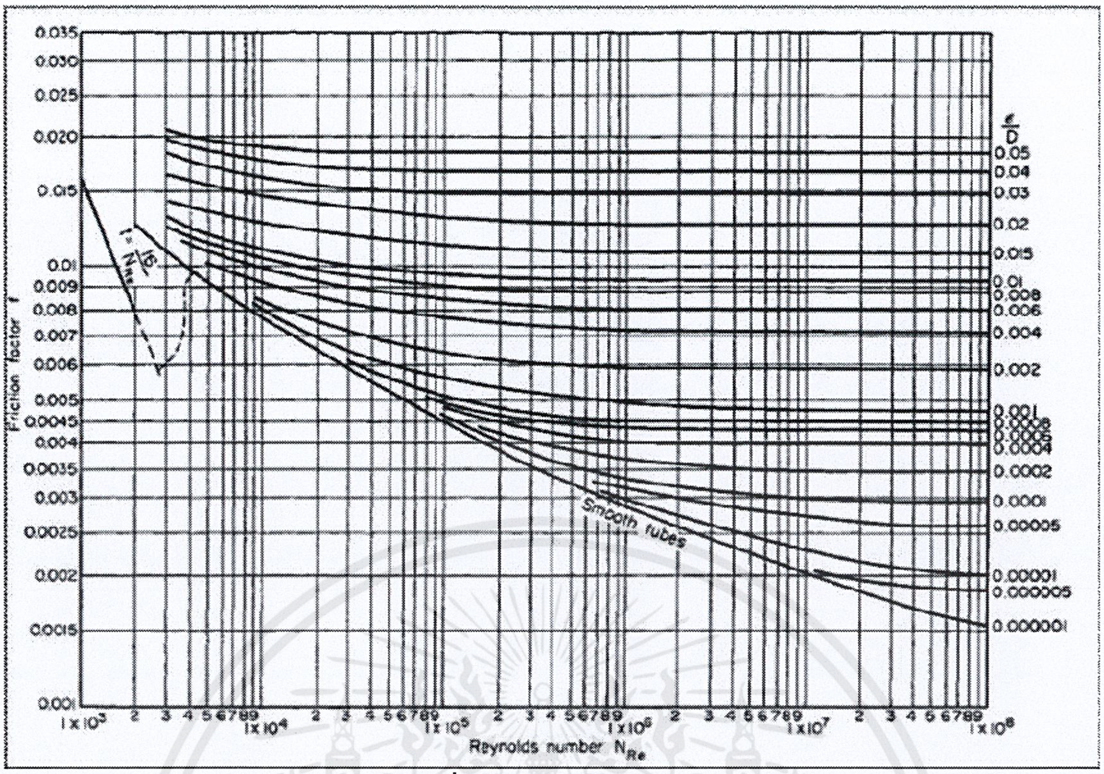
$$A = \left\{2.457\ln\left[\frac{1}{(7/\text{Re})^{0.9} + 0.27\varepsilon/D}\right]\right\}^{16}$$

$$B = \left(\frac{37,530}{\text{Re}}\right)^{16}$$

เมื่อ ε = ค่าความขรุขระของท่อ, m

โดยสมการที่ 2.10 สามารถใช้ได้กับตัวเลขเรย์โนลด์และ ε / D ทุกช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 Moody Diagram

(Perry, R. H. et al. 2018: 6-10)

ตารางที่ 2.4 ค่าความขรุขระของพื้นผิวท่อแต่ละชนิด (Towler and Sinnott. 2013: 1216)

Material	Absolute Roughness (mm)
Drawn Tubing	0.0015
Commercial Steel Pipe	0.046
Cast Iron Pipe	0.26
Concrete Pipe	0.3 to 3.0

2.4.2 ความดันลดเนื่องจากสิ่งประกอบท่อและวาล์ว

สิ่งกีดขวางการไหลภายในท่อส่งผลให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนและเป็นสาเหตุการเกิดความดันลด ได้แก่ สิ่งประกอบท่อและวาล์ว เช่น ข้องอ ข้อต่อสามทาง ข้อต่อเพิ่มหรือลดขนาดของท่อ วาล์วควบคุมการไหล วาล์วเปิด-ปิด เป็นต้น อุปกรณ์ข้างต้นเป็นสิ่งกีดขวางการไหลภายในท่อที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เนื่องจากเป็นสิ่งจำเป็นในการออกแบบระบบท่อให้สมบูรณ์ การคำนวณเฮดสูญเสียเนื่องจากสิ่งประกอบท่อและวาล์ว ซึ่งเป็นเทอมในสมการที่ 2.6 สามารถแสดงดังสมการที่ 2.11 (Perry, R. H. et al. 2018: 6-16; Towler and Sinnott. 2013: 1216-1217)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_{f,\text{minor}} = \sum K_f \left(\frac{v^2}{2g} \right) \tag{2.11}$$

เมื่อ $h_{f,\text{minor}}$ = เฮดสูญเสียเนื่องจากสิ่งประกอบท่อและวาล์ว, m

K_f = ค่าคงที่ของการสูญเสียสำหรับสิ่งประกอบท่อและวาล์ว

v = ความเร็วของของไหลภายในท่อ, m/s

g = ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2

ค่าคงที่ของการสูญเสียสำหรับสิ่งประกอบท่อและวาล์ว (K_f) มีค่าแตกต่างกันในแต่ละอุปกรณ์ แสดงดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 ค่าการสูญเสียของสิ่งประกอบท่อและวาล์ว (Perry, R. H. et al. 2018: 6-18)

Type of Fitting or Valve	**Additional Friction Loss, Equivalent No. of Velocity Heads, K_f**
45° ell, Standard	0.35
45° ell, Long Radius	0.2
90° ell, Standard	0.75
Long Radius	0.45
Square or Miter	1.3
180° Bend, Close Return	1.5
Tee, Standard, Along Run, Branch Blanked Off	0.4
Used as ell, Entering Run	1.0
Used as ell, Entering Branch	1.0
Branch Flow	1.0
Union	0.04
Gate valve, open	0.17
¾ open	0.9
½ open	4.5
¼ open	24
Angle Valve, Open	2.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type of Fitting or Valve	Additional Friction Loss, Equivalent No. of Velocity Heads, K_f
Diaphragm Valve, Open	24
¾ Open	2.3
½ Open	2.6
¼ Open	4.3
Globe Valve	
Composition Seat, Open	6.0
½ Open	8.5
Plug Disk	9.0
¾ Open	13.0
½ Open	36.0
¼ Open	112.0
Y or Blowoff Valve, Open	3.0
Plug Cock	
$\theta = 5°$	0.05
$\theta = 10°$	0.29
$\theta = 20°$	1.56
$\theta = 40°$	17.3
$\theta = 60°$	206.0
Butterfly Valve	
$\theta = 5°$	0.24
$\theta = 10°$	0.52
$\theta = 20°$	1.54
$\theta = 40°$	10.8
$\theta = 60°$	118.0
Check Valve, Swing	2.00
Disk	10.0
Ball	70.0
Foot Valve	15.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Type of Fitting or Valve	Additional Friction Loss, Equivalent No. of Velocity Heads, K_f
Water Meter, Disk	7.0
Piston	15.0
Rotary (Star-Shape Disk)	10.0
Turbine -wheel	6.0

2.4.3 ความดันลดเนื่องจากเครื่องมือต่างๆ

นอกเหนือจากแรงเสียดทานที่เกิดจากความยาวท่อ สิ่งประกอบท่อ และวาล์ว อุปกรณ์อื่นๆที่อยู่ในระบบสามารถก่อให้เกิดความดันลดได้เช่นเดียวกัน แสดงดังตารางที่ 2.6 (สุธรรม สุขมณี. 2559: 6-18)

ตารางที่ 2.6 ค่าความดันลดโดยประมาณของเครื่องมือต่างๆ (สุธรรม สุขมณี. 2559: 6-15)

Unit	Pressure Drop/Unit (kPa)
Control Valve	70 kPa or 1/3 of Line Pressure Drop
Heat Exchanger	70 kPa
Bank of 3 Shells (Exchanger)	140 kPa
Furnace	175-250 kPa
Miscellaneous Equipment	35 kPa
Storage Tank	26.8 × Height of Tank (in m. of Liquid)
Bank of 4 Shells (Exchanger)	170 kPa (Add 35 kPa for Each Additional Shell in Bank)

2.5 ปั๊ม (Pump)

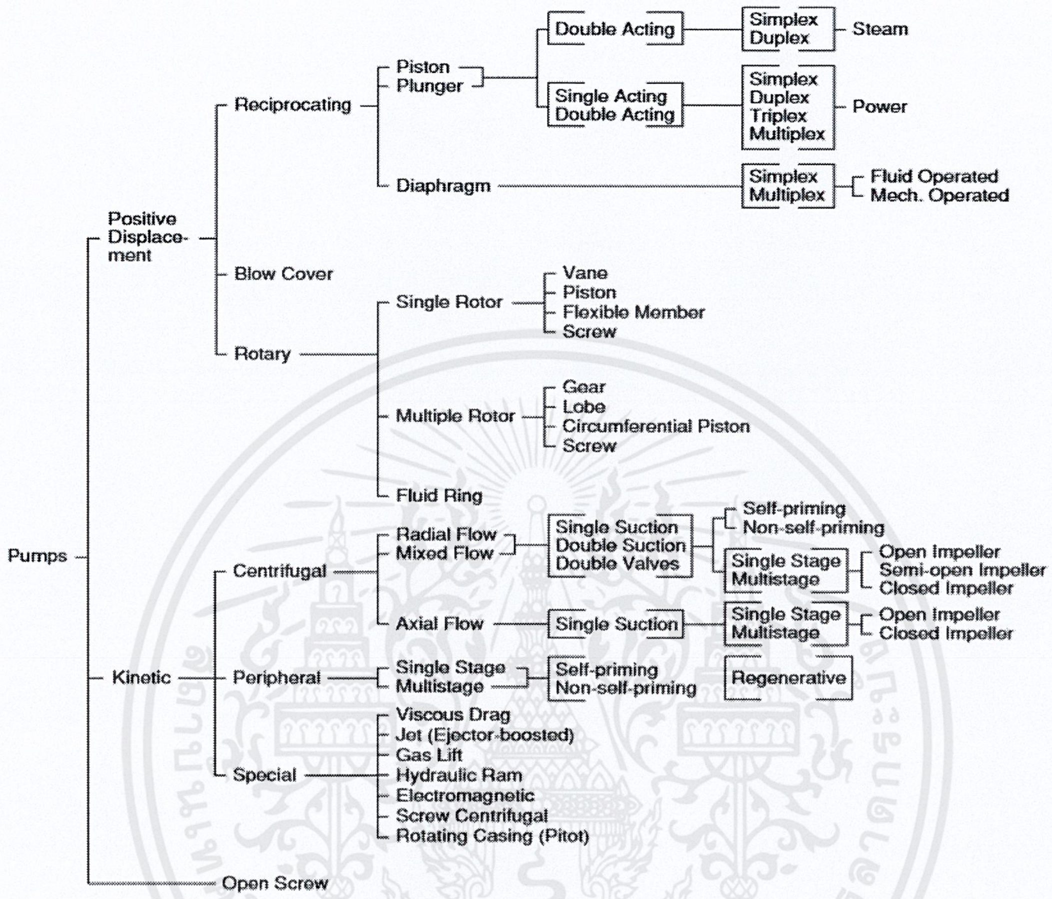
ปั๊มเป็นอุปกรณ์ส่งพลังงานให้ของเหลวภายในท่อเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุด ซึ่งในอุตสาหกรรมมีปั๊มหลายชนิด สามารถจำแนกชนิดได้ตามการใช้งาน วัสดุของปั๊ม ของเหลวที่ใช้งาน หรือทิศทางการติดตั้ง อย่างไรก็ตามการจำแนกในหัวข้อนี้จะจำแนกเป็น 2 หัวข้อใหญ่ ได้แก่ (Karassik, I. J. et. Al. 2008: 1.2-1.3)

- Dynamic (Kinetic) Pump เปลี่ยนพลังงานจลน์จากการหมุนของใบพัดเป็นความดันให้กับของไหลอย่างต่อเนื่อง พลังงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใบพัดหมุนเร็วขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Displacement Pump พลังงานจากปั๊มชนิดนี้จะถูกส่งให้ของไหลเป็นจังหวะ โดยปริมาตรของของไหลในพื้นที่ปิดจะถูกอัดเพิ่มความดันเพื่อส่งเข้าระบบ



รูปที่ 2.7 การจำแนกประเภทปั๊ม

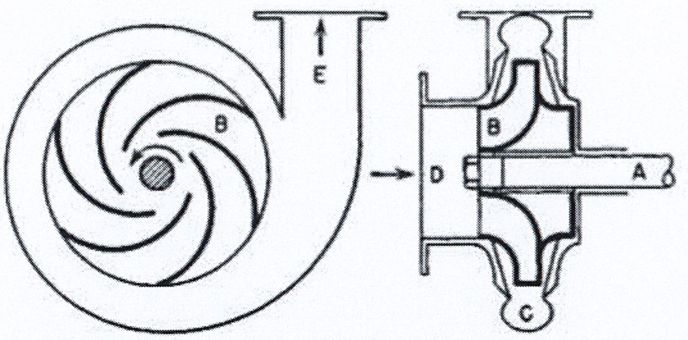
(Perry, R. H. et al. 2018: 10-26)

2.5.1 ปั๊มหอยโข่ง (Centrifugal Pump)

ปั๊มหอยโข่งเป็นปั๊มประเภทเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นความดันให้ของเหลว ท่อดูดและท่อปล่อยของปั๊มไม่ได้ถูกปิดกั้นเหมือนปั๊มประเภท Displacement มีส่วนประกอบหลักคือใบพัดในตัวปั๊มและเพลาหมุนที่ต่อกับมอเตอร์ ใบพัดจะหมุนเพื่อสร้างแรงดันให้กับของเหลว ซึ่งลักษณะของใบพัดและทิศทางของเพลาหมุนขึ้นอยู่กับการใช้งาน (Karassik, I. J. et. Al. 2008: 2.3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 Centrifugal Pump

(Perry, R. H. et al. 2018: 10-33)

2.5.2 ชนิดของปั๊มหอยโข่ง

ชนิดของปั๊มหอยโข่งที่เลือกใช้ขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบและสมบัติของเหลว ซึ่งแต่ละชนิดมีลักษณะและประสิทธิภาพที่ต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2.7 และ 2.8 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.7 ลักษณะเฉพาะของปั๊มหอยโข่งชนิดต่างๆ (Couper, J. M. et. al. 2012: 136)

ชนิดปั๊ม	รูปแบบ	ลักษณะ	หมายเหตุ
ปั๊มหอยโข่ง (แนวนอน)	Single-stage Overhung, Process Type Two-stage Overhung	ใบพัดอยู่ถัดจากแบริ่ง ใบพัดทั้งสองอยู่ถัดจากแบริ่ง	ความจุแปรผันตามเฮด เพิ่มเฮดได้มากกว่าแบบ Single Stage
	Single-stage Impeller Between Bearings	ใบพัดอยู่ระหว่างแบริ่ง	มีความจุสูง
	Slurry	มีท่อผ่านขนาดใหญ่	ความเร็วรอบใบพัดต่ำ
	Canned	ปั๊มและมอเตอร์อยู่ในเคส	ความจุต่อเฮดสูงสุดต่ำ ใช้กับสารเคมี
	Multistage, Barrel Type	เคสชั้นนอกประกอบด้วยชั้นไดอะแฟรม	ใช้กับอุณหภูมิและความดันสูง
ปั๊มหอยโข่ง (แนวตั้ง)	Single-stage, Process Type	อยู่ในแนวตั้ง	ต้องการ NPSH ต่ำ
	Multistage	เฮดต่อสเตจต่ำ มีหลายสเตจ	ราคาติดตั้งถูก
	In-line	ติดตั้งในตำแหน่งคล้ายวาล์ว	ราคาติดตั้งถูก
	High Speed	ความเร็วรอบใบพัดและเฮดสูง	เฮดสูง อัตราการไหลต่ำ
	Slump	บางส่วนของเคสอยู่ใต้น้ำ	ราคาถูก
	Multistage, Deep Well	เพลายาว	เหมาะใช้กับบ่อน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.8 ประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งชนิดต่างๆ (Couper, J. M. et. al. 2012: 136)

ชนิดปั๊ม	รูปแบบ	ความจุ (m^3/min)	เฮดสูงสุด (m)	ความดันสูงสุด (bar)	NPSH (m)	อุณหภูมิสูงสุด (°C)	ประสิทธิภาพ (%)
ปั๊มหอยโข่ง (แนวนอน)	Single-stage Overhung	0.06-19	150	41	2-6	455	20-80
	Two- stage Overhung	0.06-5	425	41	2-6.7	455	20-75
	Single-stage Impeller Between Bearings	0.06-152	335	68	2-7.6	205-455	30-90
	Chemical	3.8	73	14	1.2-6	205	20-75
	Slurry	3.8	120	41	1.5-7.6	455	20-80
	Canned	76	1,500	690	2-6	540	20-70
	Multistage, Horizontal Split	0.08-42	1,675	207	2-6	205-260	65-90
	Multistage, Barel Type	0.08-34	1,675	415	2-6	455	40-75
ปั๊มหอยโข่ง (แนวตั้ง)	Single-stage, Process Type	0.08-38	245	41	0.3-6	345	20-85
	Multistage	0.08-303	1,830	48	0.3-6	260	25-90
	In-line	0.08-45	215	34	2-6	260	20-80
	High Speed	1.5	1,770	138	2.4-12	260	10-50
	Slump	2.7	60	14	0.3-6.7	205	45-75
	Multistage, Deep Well	1.5	1,830	138	0.3-6	65	30-75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 เฮดปั๊ม (Pump Head, h_p)

การขนส่งของเหลวภายในท่อจำเป็นต้องใช้พลังงานจากปั๊มเพื่อทำให้ของเหลวเคลื่อนที่ภายในท่อ ซึ่งพลังงานของปั๊มหรือเฮดปั๊มที่ต้องการต้องมากกว่าพลังงานต่อไปนี้รวมกันเพื่อขับเคลื่อนของไหล (Towler and Sinnott. 2013: 1232)

1) พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานภายในท่อ
2) พลังงานที่สูญเสียเนื่องจากส่วนประกอบท่อและวาล์ว
3) พลังงานที่สูญเสียให้กับอุปกรณ์ต่างๆ (เช่น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน เบด เตาเผา)
4) ความแตกต่างความสูงระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้าย
5) ความแตกต่างของความดันระหว่างจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้าย

โดยเฮดของปั๊มเป็นเทอมในสมการที่ 2.6 และสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการดังกล่าว

2.5.4 กำลังไฮดรอลิก (Hydraulic Power, HP)

เป็นกำลังที่ส่งให้ของเหลวผ่านการหมุนของใบพัด ซึ่งเป็นกำลังทางทฤษฎีที่ต้องการเพื่อขับเคลื่อนของเหลวจากปลายท่อดูดไปยังปลายท่อส่งตามอัตราการไหลที่ออกแบบ แสดงดังสมการที่ 2.12 (Karassik, I. J. et. Al. 2008: 2.11)

$$HP = h_P \rho g Q \tag{2.12}$$

เมื่อ HP = กำลังของเหลว, W

h_P = เฮดของปั๊ม, m

ρ = ความหนาแน่นของของไหล, kg/m^3

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก, m/s^2

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร, m^3/s

2.5.5 กำลัง (Power)

เป็นกำลังเชิงกลเนื่องจากการหมุนของมอเตอร์และถูกเปลี่ยนเป็นกำลังไฮดรอลิก ซึ่งกำลังเชิงกลที่ต้องการขึ้นกับประสิทธิภาพปั๊ม เพื่อชดเชยพลังงานที่สูญเสียจากการหมุนของเพลาและมอเตอร์ แสดงดังสมการที่ 2.13 (Karassik, I. J. et. Al. 2001: 2.10-2.11)

$$Power = \frac{HP}{\eta_P} \tag{2.13}$$

เมื่อ $Power$ = กำลัง, W

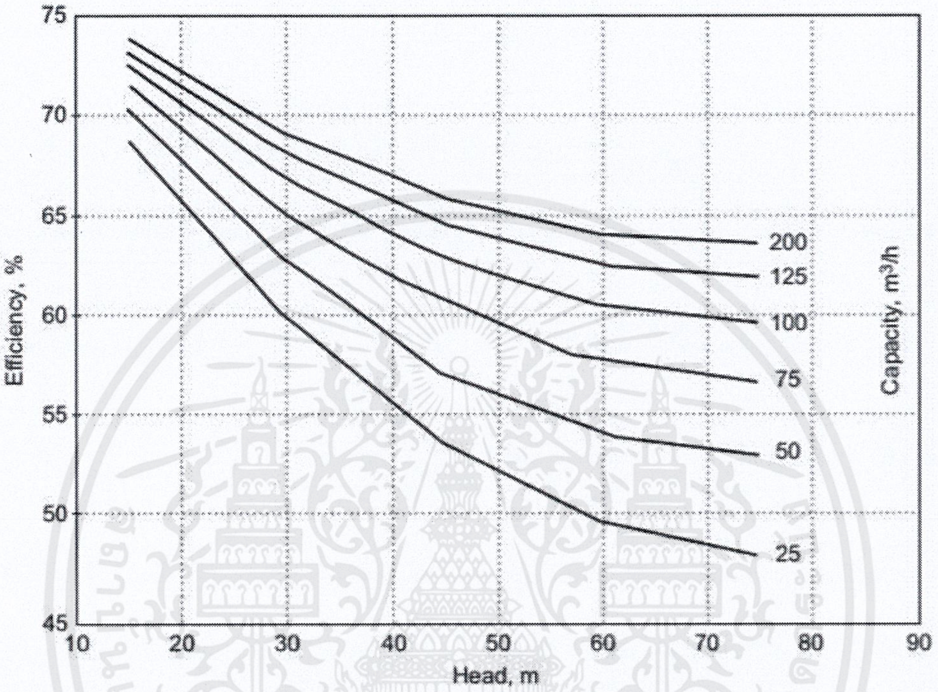
HP = กำลังของของเหลว, W

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

η_p = ประสิทธิภาพของปั๊ม

ประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งจะแตกต่างกันตามขนาดและชนิดของปั๊ม รวมถึงภาวะปฏิบัติการ ซึ่งรูปที่ 2.9 สามารถใช้ประมาณประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งได้



รูปที่ 2.9 กราฟความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพ ความจุ และเฮดของปั๊มหอยโข่ง

(Towler and Sinnott. 2013: 1233)

2.5.6 การเกิดโพรงอากาศ (Cavitation) และความดันสุทธิด้านท่อดูด (Net Positive Suction Head, NPSH)

ความดันหรือเฮดด้านท่อดูดของปั๊มต้องสูงพอเพื่อป้องกันการเกิดโพรงอากาศภายในปั๊ม ซึ่งโพรงอากาศเกิดขึ้นเมื่อมีฟองอากาศจากไอหรือก๊าซ ฟองอากาศจะเริ่มก่อตัวเมื่อความดันต่ำกว่าความดันไอของของเพลว เมื่อมีฟองอากาศภายในปั๊มจะส่งผลให้เกิดการกัดกร่อน เนื่องจากการชนของฟองอากาศและใบพัด รวมทั้งเกิดเสียงดัง (Towler and Sinnott. 2013: 1236)

เฮดสุทธิด้านท่อดูดที่สามารถใช้งานได้ (Net Positive Suction Head Available, $NPSH_A$) คือความดันที่ท่อดูดของปั๊มในภาวะปฏิบัติการจริง แสดงดังสมการที่ 2.14 (Towler and Sinnott. 2013: 1237)

$$NPSH_A = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp} \qquad (2.14)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ h_{sp} = ความดันสถิตสัมบูรณ์ที่อยู่เหนือแหล่งเก็บน้ำ, m

h_s = ความแตกต่างระหว่างระดับของไหลกับท่อดูดขาเข้าของปั๊ม, m
ค่าเป็นบวก เมื่อปั๊มอยู่ใต้แหล่งน้ำ
ค่าเป็นลบ เมื่อปั๊มอยู่เหนือแหล่งน้ำ

h_f = เฮดสูญเสียเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อดูด, m

h_{vp} = เฮดความดันไอของของเหลว ณ อุณหภูมิที่ปั๊มทำงาน, m

เฮดสุทธิด้านท่อดูดที่ต้องการ (Net Positive Suction Head Required, $NPSH_R$) คือความดันที่ท่อดูดของปั๊มต้องการตามค่าการออกแบบเพื่อให้ปั๊มทำสามารถใช้งานได้ โดยทั่วไปเป็นค่ามาจากการทดลองของผู้ผลิต แต่ในกรณีของปั๊มหอยโข่งหากไม่มีข้อมูลจากผู้ผลิตจะสามารถประมาณ $NPSH_R$ แสดงดังสมการที่ 2.15 และควรออกแบบให้ $NPSH_A$ มีค่ามากกว่า $NPSH_R$ 3-6 m (สุธรรม สุขมณี, 2559: 6-7)

$$NPSH_R = 4.9\times10^{-6} N^{1.33} Q_P^{0.67} \tag{2.15}$$

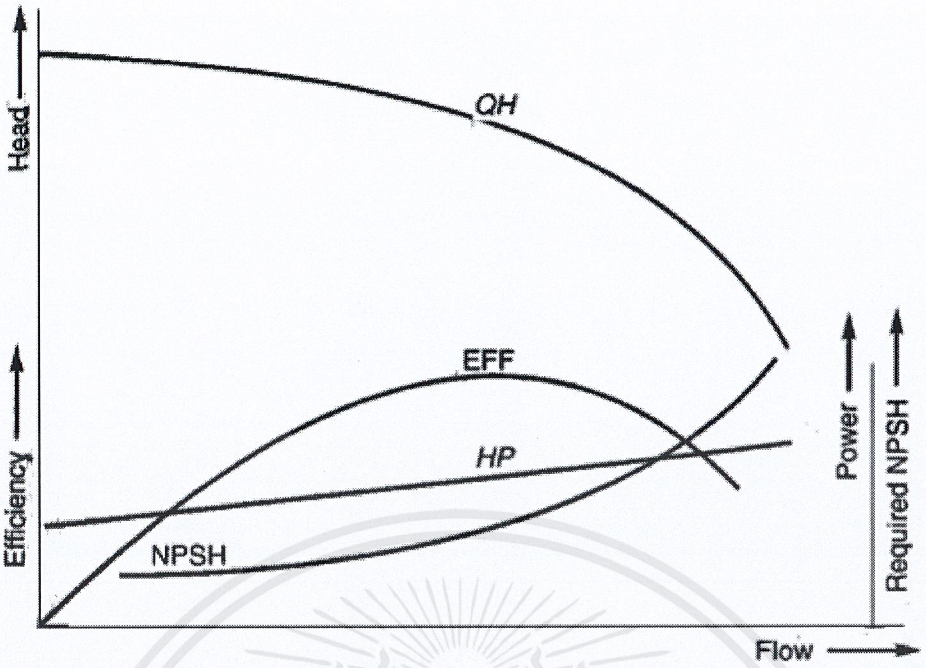
เมื่อ N = ความเร็วรอบของใบพัด, rpm

Q_p = ความจุของปั๊ม, m^3/h

2.5.7 กราฟสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง (Characteristic Curves for Centrifugal Pumps)

ประสิทธิภาพของปั๊มหอยโข่งสามารถระบุโดยการเขียนกราฟสมรรถนะ ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ของเฮดปั๊ม (h_P) และอัตราการไหล (Q) สามารถแสดงค่าประสิทธิภาพ ขนาดใบพัด (Q_H) และเฮดสุทธิด้านท่อดูดที่ต้องการ ($NPSH_R$) ที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลได้ แสดงดังรูปที่ 2.10 (Towler and Sinnott. 2013: 1235)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างกราฟสมรรถนะของปั๊มหอยโข่ง

(สุธรรม สุขมณี. 2559: 6-11)

2.5.8 กราฟเฮดของระบบ (System Head Curve)

เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฮดรวมและอัตราการไหล โดยเฮดรวมมีองค์ประกอบ 2 ส่วนที่ต้องการเพื่อขับเคลื่อนของไหลภายในท่อ ได้แก่

1) เฮดความดันสถิต (Static Pressure) คือความแตกต่างของระดับความสูงและเฮดของความดันในระบบ

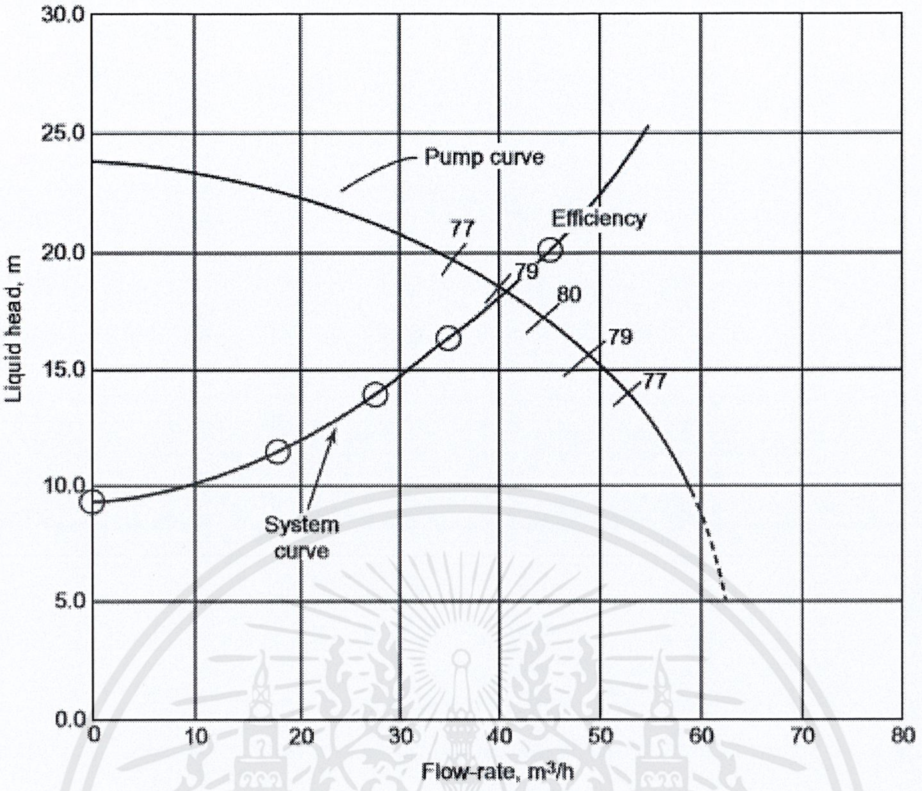
2) เฮดของความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทาน สิ่งประกอบท่อ วาล์ว และอุปกรณ์ต่างๆ

ความแตกต่างของความดันสถิตไม่ขึ้นกับอัตราการไหล แต่ความสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานแปรผันตามอัตราการไหล และจุดทำงานของปั๊มหอยโข่งสามารถหาจากจุดตัดของกราฟสมรรถนะของปั๊มและกราฟเฮดของระบบ

เมื่อต้องการเลือกปั๊มหอยโข่งจำเป็นต้องเลือกปั๊มที่มีกราฟสมรรถนะให้เหมาะกับ กราฟเฮดของระบบ และจุดทำงานของปั๊มควรอยู่ใกล้จุดที่ปั๊มมีประสิทธิภาพสูงสุด หากในระบบมีวาล์วควบคุมอยู่ควรพิจารณาความดันคร่อมวาล์วด้วย การสร้างกราฟเฮดของระบบนั้นควรสร้างในกรณีที่วาล์วเปิดเต็มที่และเกือบปิด เพื่อหาช่วงของอัตราการไหลที่สามารถควบคุมได้ (Towler and Sinnott. 2013: 1238-1239)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กราฟสมรรถนะของปั๊มและกราฟเฮดของระบบ

(Towler and Sinnott. 2013: 1240)

2.5.9 Affinity's Law

ในการกำหนดรายละเอียดของปั๊มชนิดหอยโข่งมีโอกาสที่ผู้ออกแบบจะกำหนดขนาดของปั๊มไม่ตรงตามความต้องการ เนื่องจากข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบมีความไม่แน่นอนสูง เช่น สมบัติของของเหลว ประสิทธิภาพของเครื่องมือ เป็นต้น จึงนิยมใช้ปั๊มที่สามารถเปลี่ยนขนาดใบพัดหรือความเร็วรอบได้ เพื่อให้สามารถปรับเปลี่ยนให้ตรงกับความต้องการ ซึ่งขนาดใบพัดและความเร็วรอบมีความสัมพันธ์กับเฮดและกำลัง แสดงดังสมการที่ 2.16 (สุธรรม สุขมณี. 2559: 6-30)

$$\frac{N_2 D_{imp2}}{N_1 D_{imp1}} = \frac{Q_{P2}}{Q_{P1}} = \sqrt{\frac{h_{P2}}{h_{P1}}} = \left(\frac{HP_2}{HP_1}\right)^{1/3} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{1/3} \tag{2.16}$$

เมื่อ N = ความเร็วรอบใบพัด

D = เส้นผ่านศูนย์กลางใบพัด

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร

h_p = เฮดปั๊ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HP = กำลังไฮดรอลิก

P = กำลัง

2.6 การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สามารถประเมินได้จากจำนวนเงินลงทุนและกระแสเงินสด ซึ่งใช้เป็นข้อมูลเพื่อตัดสินใจก่อนการลงทุนทำโครงการ (Towler and Sinnott. 2013: 403)

2.6.1 การประมาณต้นทุนของโครงการ

การประมาณเงินลงทุนของโครงการทั้งหมดสำหรับการออกแบบ การก่อสร้าง และการติดตั้งประกอบด้วย

1) ต้นทุนการก่อสร้างกระบวนการผลิต (Inside Battery Limits (ISBL) Investment)

ส่วนนี้ประกอบด้วยค่าจัดซื้อและติดตั้งของหน่วยการผลิตหลัก เช่น เครื่องปฏิกรณ์ เตาเผา หอกลั่น ปั๊ม ท่อ วาล์ว สี ค่าแรง เป็นต้น แสดงดังสมการที่ 2.17 (Towler and Sinnott. 2013: 308, 331)

$$C=\sum_{i=1}^{i=M} C_{e,i}\left[(1+f_p)+(f_{er}+f_{el}+f_i+f_c+f_s+f_l)/f_m\right] \quad (2.17)$$

เมื่อ C = ต้นทุนการก่อสร้างกระบวนการผลิต

$C_{e,i}$ = ต้นทุนของหน่วยการผลิตเครื่องที่ i

M = จำนวนอุปกรณ์ทั้งหมด

f_p = แฟกเตอร์สำหรับการติดตั้งระบบท่อ

f_{er} = แฟกเตอร์สำหรับกรติดตั้งอุปกรณ์

f_{el} = แฟกเตอร์สำหรับระบบไฟฟ้า

f_i = แฟกเตอร์สำหรับอุปกรณ์วัดคุมและระบบควบคุม

f_c = แฟกเตอร์สำหรับงานก่อสร้าง

f_s = แฟกเตอร์สำหรับงานโครงสร้างและอาคาร

f_l = แฟกเตอร์สำหรับความล่าช้าและงานสี

f_m = แฟกเตอร์สำหรับราคาวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.9 ตัวแปรการประมาณต้นทุนการก่อสร้างหน่วยการผลิต (Towler and Sinnott. 2013: 331)

ตัวแปร	ชนิดของกระบวนการ		
	ของไหล	**ของไหล-ของแข็ง**	**ของแข็ง**
f_p	0.3	0.5	0.6
f_{er}	0.8	0.6	0.2
f_{el}	0.3	0.3	0.2
f_i	0.2	0.2	0.15
f_c	0.3	0.3	0.2
f_s	0.2	0.2	0.1
f_l	0.1	0.1	0.05

ตารางที่ 2.10 ตัวแปรวัสดุอื่นๆสัมพัทธ์กับเหล็กคาร์บอน (f_m) (Towler and Sinnott. 2013: 332)

ชนิดของวัสดุ	f_m
Carbon Steel	1.0
Aluminum and Bronze	1.07
Cast Steel	1.1
304 Stainless Steel	1.3
316 Stainless Steel	1.3
321 Stainless Steel	1.5
Hastelloy C	1.55
Monel	1.65
Nickel and Inconel	1.7

2) ต้นทุนการก่อสร้างนอกเหนือจากกระบวนการผลิต (Outside Battery Limits (OSBL) Investment)

เป็นค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมจากต้นทุนการก่อสร้างกระบวนการผลิต เช่น การรักษาความปลอดภัย หน่วยตอบโต้ฉุกเฉิน หน่วยรักษาพยาบาล โรงอาหาร แลป เป็นต้น สำหรับโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกี่ยวกับสารเคมีจะมีค่าอยู่ระหว่าง 20% - 50% ขึ้นอยู่กับขอบเขตของโครงการ (Towler and Sinnott. 2013: 309)

3) ต้นทุนงานวิศวกรรม (Engineering Costs)

เป็นต้นทุนการออกแบบและค่าใช้จ่ายอื่นๆที่ต้องการสำหรับโครงการ เช่น การออกแบบอุปกรณ์ การออกแบบระบบท่อ การก่อสร้าง ค่าการเดินทาง ค่าที่พัก เป็นต้น โดยทั่วไปค่าใช้จ่ายส่วนนี้จะประมาณเป็น 10% - 30% ของค่าใช้จ่ายการก่อสร้างกระบวนการผลิตและการก่อสร้างนอกเหนือกระบวนการผลิตรวมกัน (Towler and Sinnott. 2013: 309 - 310)

4) ค่าใช้จ่ายฉุกเฉิน (Contingency Charges)

ค่าใช้จ่ายฉุกเฉินมีเพื่อรองรับความเสี่ยงและความไม่แน่นอนต่างๆที่อาจเกิดขึ้นเมื่อพบเจอปัญหาในการทำงาน มีการเปลี่ยนแปลงขอบเขตของโครงการ และการเปลี่ยนแปลงของค่าสกุลเงิน ซึ่งจะประมาณเป็น 10% - 50% ของค่าใช้จ่ายการก่อสร้างกระบวนการผลิตและการก่อสร้างนอกเหนือกระบวนการผลิตรวมกัน (Towler and Sinnott. 2013: 310)

5) เงินทุนหมุนเวียน (Working Capital)

เป็นเงินทุนเพื่อสำรองวัตถุดิบและผลิตภัณฑ์อะไหล่สำรอง เงินสดหมุนเวียน ซึ่งมีค่าใช้จ่ายตลอดระยะเวลาการผลิตและได้คืนเมื่อหยุดการผลิต โดยทั่วไปจะประมาณเป็นสัดส่วนของค่าใช้จ่ายการก่อสร้างกระบวนการผลิตและการก่อสร้างนอกเหนือกระบวนการผลิตรวมกัน (Towler and Sinnott. 2013: 310, 391-392)

ดังนั้นต้นทุนของโครงการทั้งหมดสามารถประมาณจากผลรวมของจำนวนเงินลงทุนในข้อที่ 1 ถึง 5

2.6.2 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Pay-back Period)

การคำนวณระยะเวลาคืนทุนคำนวณจากจำนวนเงินลงทุนทั้งหมดหารกระแสเงินสดเฉลี่ยต่อปี ซึ่งเป็นตัวชี้วัดความน่าสนใจของโครงการ แสดงดังสมการที่ 2.18 (Towler and Sinnott. 2013: 403)

$$\text{Pay-back Period} = \frac{\text{Total Investment}}{\text{Average Annual Cash Flow}} \tag{2.18}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

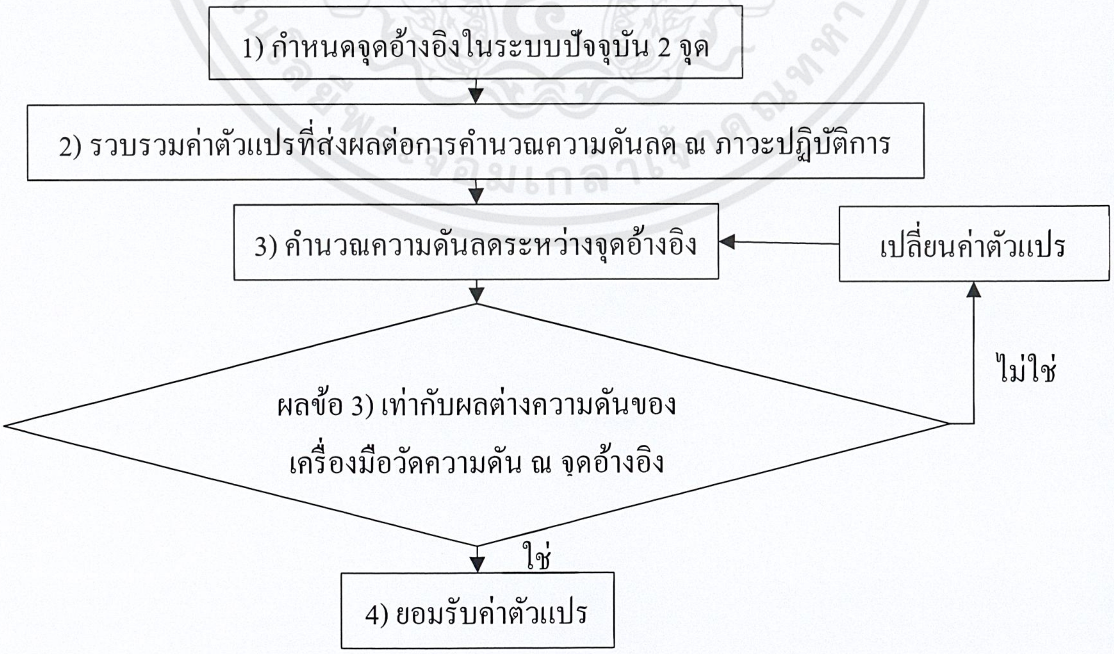
วิธีดำเนินโครงการ

โครงการนี้ต้องการตรวจสอบระบบการป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงใหม่เข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ โดยปฏิบัติการร่วมกับปั๊มเดิม (PC-321) รวมทั้งเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาหากระบบที่ปรับปรุงใหม่ไม่สามารถปฏิบัติการได้ตามการออกแบบและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของโครงการ ซึ่งมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความดันลด
2) การตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321)
3) การตรวจสอบความเป็นไปได้ในการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่
4) การเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา
5) การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

3.1 การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความดันลด

ข้อมูลของตัวแปรที่ต้องตรวจสอบ ได้แก่ สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและความขรุขระของพื้นผิวท่อ เนื่องจากข้อมูลดังกล่าวอาจไม่ได้รับการปรับปรุงค่า ซึ่งจะตรวจสอบโดยคำนวณความดันลดภายในท่อของระบบปัจจุบัน มีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 กำหนดจุดอ้างอิงในระบบปัจจุบัน 2 จุด

กำหนดจุด 2 จุดเป็นจุดอ้างอิงเพื่อคำนวณความดันลดระหว่างจุดอ้างอิง โดยตำแหน่งของจุดอ้างอิงควรมีเครื่องมือวัดความดันเพื่อให้สามารถใช้เปรียบเทียบได้

3.1.2 รวบรวมค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการคำนวณความดันลด ณ ภาวะปฏิบัติการ

รวบรวมค่าตัวแปรและข้อมูลที่ภาวะปฏิบัติการเพื่อใช้คำนวณความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อสำหรับตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปร ได้แก่

1) สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ ความหนาแน่นและความหนืด

2) ภาวะปฏิบัติการ ได้แก่ ความดัน (PI-232740 และ PI-1311A) อุณหภูมิ และอัตราการไหล (FE-232706)

3) ข้อมูลของระบบท่อ ได้แก่ ค่าความขรุขระของพื้นผิว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ความยาว จำนวนวาล์วและสิ่งประกอบท่อ

3.1.3 คำนวณความดันลดภายในท่อ

คำนวณความดันลดระหว่างจุดอ้างอิง 2 จุด จากสมการที่ 2.6 และมีสมมติฐานดังนี้

1) ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของเหลวไม่สามารถอัดตัวได้

2) ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นของเหลวนิวโตเนียน

3) การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว (Steady State)

4) การไหลทิศทางเดียว

3.1.4 ตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล

นำค่าความดันลดจากการคำนวณในขั้นตอน 3.1.3 เปรียบเทียบกับผลต่างความดันของเครื่องมือวัดความดัน PI-232740 และ PI-1311A

1) หากความแตกต่างของการเปรียบเทียบอยู่ในช่วงความเบี่ยงเบนของความแม่นยำของเครื่องมือวัดความดัน (6%) จะยอมรับค่าของตัวแปรที่ใช้คำนวณ

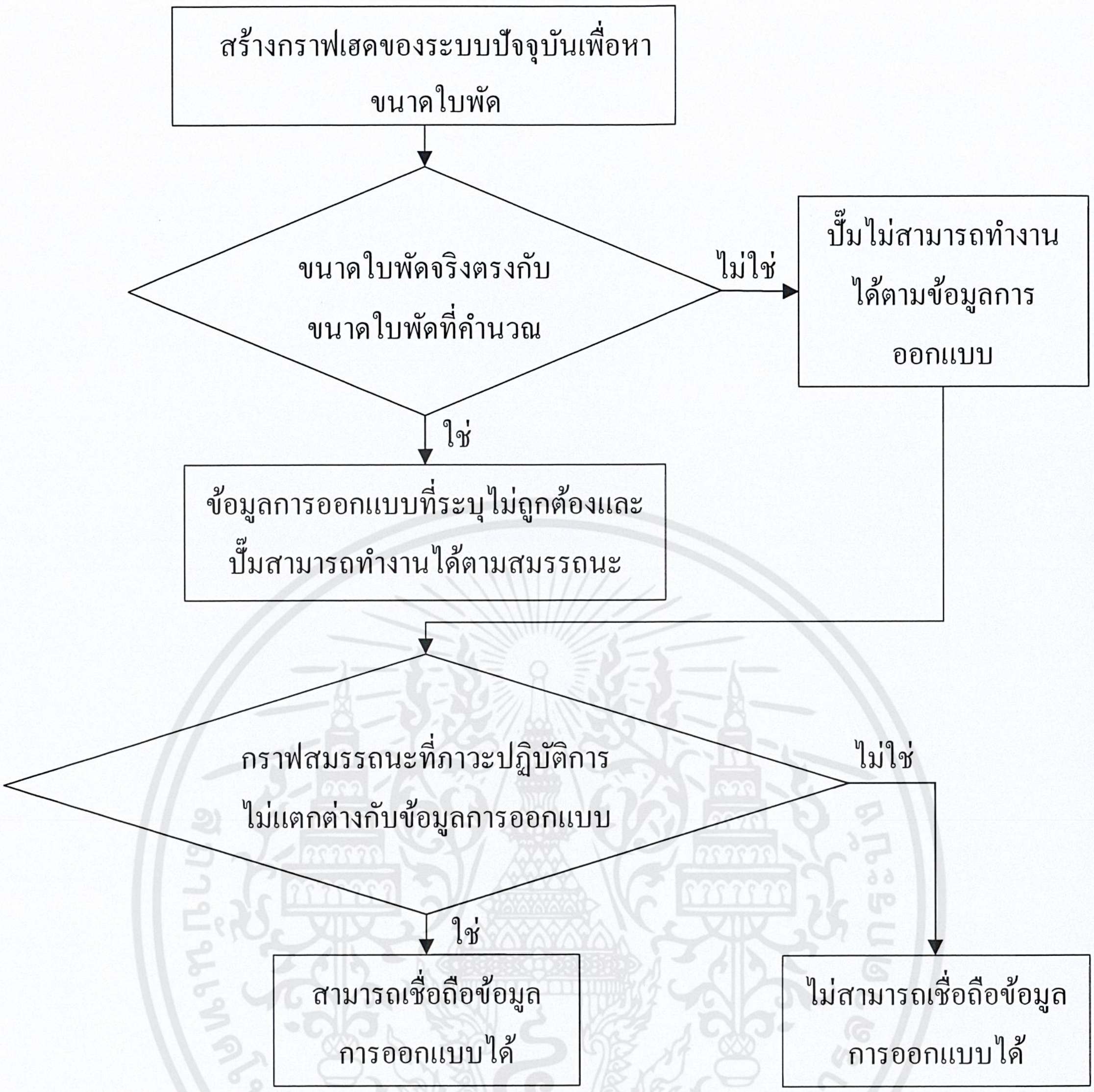
2) หากความแตกต่างของการเปรียบเทียบไม่อยู่ในช่วงความเบี่ยงเบนของความแม่นยำของเครื่องมือวัดความดัน (6%) จะไม่ยอมรับค่าของตัวแปรที่ใช้คำนวณ และเปลี่ยนค่าตัวแปรใหม่

3.2 การตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321)

เนื่องจากต้องการพิจารณาว่าสามารถใช้ปั๊มเดิมสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่ได้หรือไม่ จึงต้องตรวจสอบสมรรถนะของปั๊มตามขั้นตอน แสดงดังรูปที่ 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321)

3.2.1 สร้างกราฟเฮดของระบบปัจจุบัน (System Head Curve) เพื่อหาขนาดใบพัด

รวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อสร้างกราฟเฮดของระบบปัจจุบันและหาจุดตัดของกราฟเฮดของระบบและกราฟสมรรถนะของปั๊มเพื่อระบุขนาดใบพัด

3.2.2 เปรียบเทียบขนาดใบพัดจริงและขนาดใบพัดที่คำนวณ

ขนาดใบพัดจริงสามารถระบุจากการถอดประกอบปั๊มซึ่งต้องแจ้งช่างซ่อมบำรุงเพื่อดำเนินการ หากขนาดใบพัดจริงมีขนาดตรงกับขนาดใบพัดที่คำนวณในข้อแรก แสดงว่าข้อมูลการออกแบบระบุผิดและปั๊มสามารถทำงานได้ตามสมรรถนะ หากขนาดใบพัดจริงใหญ่กว่าขนาดใบพัดที่คำนวณ แสดงว่าปั๊มไม่สามารถทำงานได้ตามข้อมูลการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

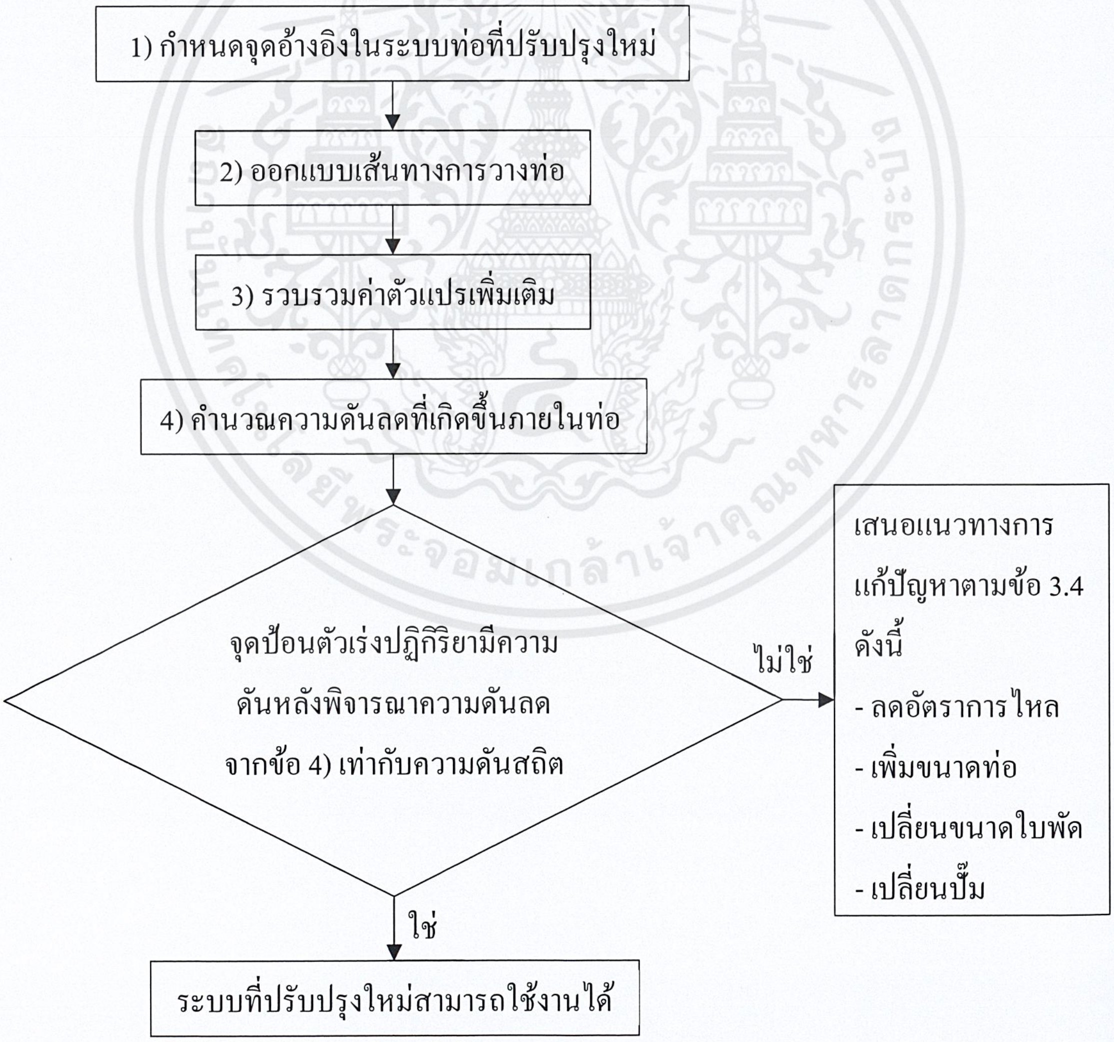
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 สร้างกราฟสมรรถนะที่ภาวะปฏิบัติการของปั๊มและเปรียบเทียบกับข้อมูลการออกแบบ

หากปั๊มไม่สามรถทำงานได้ตามข้อมูลการออกแบบ จะสร้างกราฟสมรรถนะโดยทำการทดลองโดยการปรับตำแหน่งวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหลและคำนวณเฮดที่อัตราการไหลนั้นจากสมการที่ 2.6 จากนั้นนำเฮดที่สัมพันธ์กับอัตราการไหลนั้นมาสร้างกราฟสมรรถนะที่ภาวะปฏิบัติการและเปรียบเทียบกับกราฟสมรรถนะของปั๊มในข้อมูลการออกแบบ หากกราฟทั้งสองใกล้เคียงแสดงว่าสามารถใช้กราฟที่สร้างขึ้นเพื่ออ้างอิงแทนได้ ในทางกลับกันหากไม่ใกล้เคียงกันแสดงว่าไม่สามารถเชื่อถือข้อมูลการออกแบบได้

3.3 การตรวจสอบความเป็นไปได้ในการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่

เมื่อได้ค่าตัวแปรที่ถูกต้องแล้วจะนำมาคำนวณค่าความดันลดที่เกิดขึ้นภายในระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่และประเมินความเป็นไปได้ในการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่อใช้ปั๊มเดิม (PC-321)



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการประเมินความเป็นไปได้การขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 กำหนดจุดอ้างอิงในระบบขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงใหม่

กำหนดจุดอ้างอิงในรูปที่ 1.3 สำหรับคำนวณความดันลดระหว่างจุดอ้างอิง เพื่อทราบความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อและสามารถพิจารณาความดัน ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.2 ออกแบบเส้นทางการวางท่อขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงใหม่

เนื่องจากการคำนวณความดันลดภายในท่อจำเป็นต้องทราบความยาวและขนาดของท่อ รวมทั้งจำนวนตัวประกอบและข้อต่อตามแนวท่อ จึงต้องออกแบบเส้นทางการวางท่อดังข้อ 2.4.4 โดยคำนึงถึงภาวะพื้นที่จริงภายในโรงงาน

3.3.3 รวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการคำนวณความดันลดของระบบที่ปรับปรุงใหม่

เนื่องจากเป็นระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่จึงต้องรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อที่จะคำนวณความดันลดภายในท่อ ได้แก่

1) ภาวะปฏิบัติการ ได้แก่ อัตราการไหลที่ต้องการและความดัน (PI-232704)
2) ข้อมูลของระบบท่อ ได้แก่ ความยาว จำนวนวาล์วและสิ่งประกอบท่อ

3.3.4 คำนวณความดันลดของระบบที่ปรับปรุงใหม่

คำนวณความดันลดภายในท่อโดยใช้สมการและสมมติฐานดังข้อที่ 3.1.3 เพื่อพิจารณาความดัน ณ จุดที่ต้องการป้อนตัวเร่งปฏิกิริยา

3.3.5 คำนวณความดันสถิต ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยา

เนื่องจากผลของระดับความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เก็บใน D-311 และ D-321 ก่อให้เกิดความดันสถิต ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาทั้ง 2 จุด ซึ่งความสูงของระดับตัวเร่งปฏิกิริยาเฉลี่ย สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.2

3.3.6 เปรียบเทียบข้อมูลความดันสถิตที่ภาวะปฏิบัติการและความดัน ณ จุดป้อน

เปรียบเทียบความดัน ณ จุดป้อนที่คำนวณจากข้อ 3.2.4 และ 3.2.5 หากมีค่า

1) ความดันจากข้อ 3.2.4 มากกว่าข้อ 3.2.5 แสดงว่า สามารถป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาได้ตามการออกแบบ
2) ความดันจากข้อ 3.2.4 น้อยกว่าข้อ 3.2.5 แสดงว่า ไม่สามารถป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาได้ตามการออกแบบด้วยปั๊มที่มีอยู่ (PC-321) จึงต้องหาแนวทางการแก้ไขปัญหาในหัวข้อ 3.4

3.4 การเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา

เสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาที่เป็นไปได้เพื่อให้สามารถป้อนตัวเร่งปฏิกิริยา ณ จุดที่ต้องการได้ตามการออกแบบ ซึ่งเรียงลำดับขั้นตอนโดยพิจารณาจากมูลค่าการลงทุน มีแนวทางการแก้ไขปัญหา ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การลดอัตราการไหล

การลดอัตราการไหลมีจุดประสงค์เพื่อลดค่าความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อเพื่อให้มีความดัน ณ จุดที่ต้องการป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาเหลือมากกว่าค่าความดันสถิตที่คำนวณได้ในข้อ 3.3.5 เนื่องจากความดันลดแปรผันตามอัตราการไหล

3.4.2 การเพิ่มขนาดของท่อ

การเพิ่มขนาดของท่อมีจุดประสงค์เดียวกับการเพิ่มอัตราการไหลคือลดความดันลดที่เกิดขึ้น แต่ความเร็วของของไหลภายในท่อจะลดลงด้วย ดังนั้นต้องพิจารณาความเร็วของการไหลที่ตัวเร่งปฏิกิริยาจะตกตะกอน

3.4.3 การเปลี่ยนขนาดใบพัดของปั๊ม (PC-321)

การเพิ่มขนาดใบพัดของปั๊มส่งผลให้มีความดันท่อปล่อยของปั๊มมากขึ้น ดังสมการที่ 2.16 ในขณะที่ความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อมีค่าเท่าเดิม ทำให้มีความดันที่เหลือจากความดันลด ณ จุดที่ต้องการป้อนตัวเร่งปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นและอาจมากกว่าความดันสถิต ซึ่งต้องสร้างกราฟเฮดของระบบสำหรับระบบที่ถูกปรับปรุงใหม่เพื่อเลือกขนาดใบพัดที่เหมาะสม

3.4.4 การเปลี่ยนปั๊ม (PC-321)

หากไม่สามารถเปลี่ยนขนาดใบพัดได้และปั๊มไม่สามารถทำงานได้ตามการออกแบบ จึงต้องเปลี่ยนปั๊มเพื่อให้ระบบที่ถูกปรับปรุงใหม่สามารถใช้งานได้ โดยต้องพิจารณาชนิดของปั๊มที่ใช้และรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับกำหนดรายละเอียดของปั๊มดังนี้

1) กำหนดอัตราการไหล
2) สร้างกราฟเฮดของระบบ
3) คำนวณกำลังไฮดรอลิก (HP) จากสมการที่ 2.12
4) คำนวณกำลังจากสมการที่ 2.13
5) คำนวณเฮดสุทธิด้านท่อดูดที่สามารถใช้งานได้ ($NPSH_A$) จากสมการที่ 2.14

3.5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

3.5.1 การประมาณต้นทุนการติดตั้งสำหรับระบบที่ถูกปรับปรุงใหม่

ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งทั้งหมดไม่สามารถระบุได้อย่างชัดเจน เนื่องจากการติดตั้งอุปกรณ์หลักมีค่าใช้จ่ายอื่นๆนอกเหนือจากค่าอุปกรณ์ เช่น ค่าแรงงาน ค่าการออกแบบทางวิศวกรรม เป็นต้น ดังนั้นจะใช้การประมาณต้นทุนของโครงการตามข้อ 2.6.1

3.5.2 การคำนวณต้นทุนการผลิตของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลดลงหลังปรับปรุงระบบใหม่

คำนวณปริมาณของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เพิ่มขึ้นจากสูตรการผลิตปกติ เนื่องจากประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาลดลงทำให้ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ซึ่งปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเก็บข้อมูลจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติโรงงาน จากนั้นคำนวณผลต่างของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้น้อยลงหลังปรับปรุงระบบใหม่ และคิดเป็นจำนวนเงินที่ลดลง

3.5.3 การหาระยะเวลาคืนทุน (Pay-back Period)

สามารถคำนวณระยะเวลาคืนทุนจากสมการที่ 2.18 โดยใช้ข้อมูลจากข้อ 3.5.1 และ 3.5.2 เพื่อแทนค่าในสมการ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

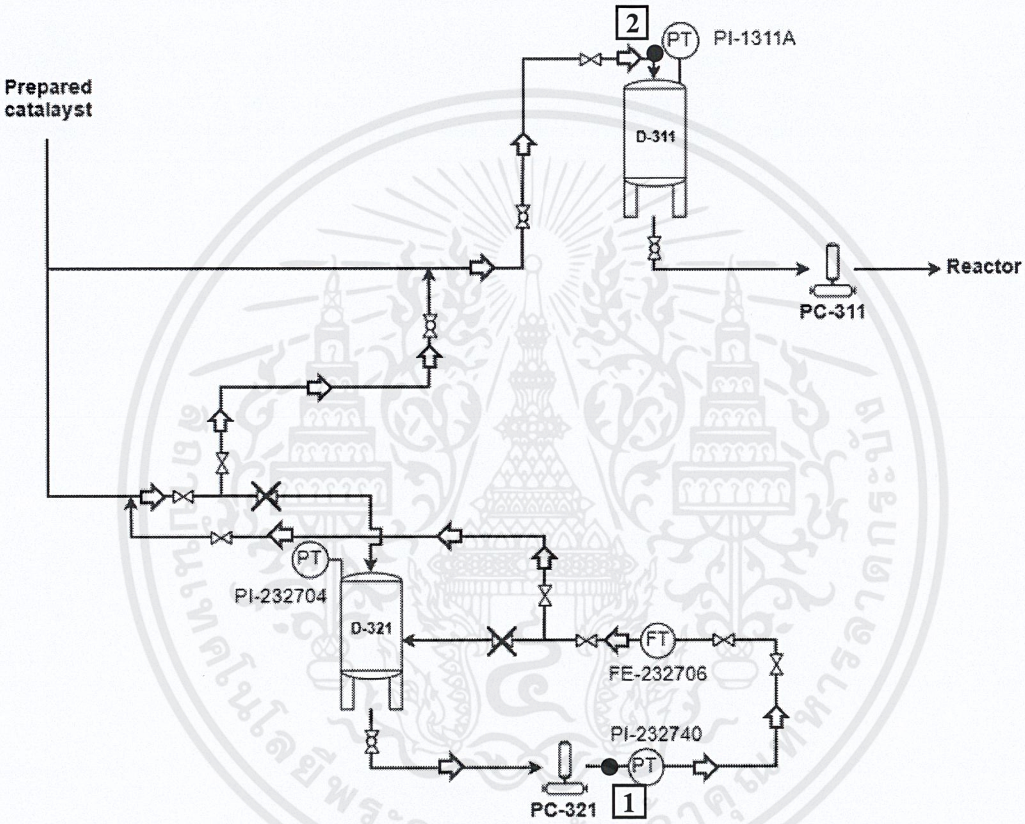
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการดำเนินโครงการ

4.1 ผลการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อความดันลด

4.1.1 ผลการกำหนดจุดอ้างอิงในระบบปัจจุบัน (D-321 ถึง D-311)



รูปที่ 4.1 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ถึง D-311 และจุดอ้างอิงสำหรับการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปร

4.1.2 ผลการรวบรวมค่าตัวแปรที่ส่งผลต่อการคำนวณความดันลด ณ ภาวะปฏิบัติการ

ตารางที่ 4.1 สมบัติทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา ณ ภาวะปฏิบัติการ

รายละเอียด	ค่าการรวบรวมข้อมูล
ความหนาแน่น (kg/m^3)	698
ความหนืด (Pa.s)	0.02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลภาวะปฏิบัติการ

รายละเอียด	ค่าการรวบรวมข้อมูล
ความดันที่ PI-232740 (barg)	2.4
ความดันที่ PI-1311A (barg)	1.4
อุณหภูมิ (°C)	35
อัตราการไหลที่ FE-232706 (MT/h)	7.1

รายละเอียดของระบบท่อได้เก็บรวบรวมข้อมูลจากหลากหลายแหล่งที่มา ดังนี้

- วัสดุและขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อรวบรวมจากแผนผังระบบท่อและอุปกรณ์วัดคุม (P&IDs)
- ความยาวท่อและความแตกต่างความสูงเป็นค่าประมาณจากการสำรวจในพื้นที่การผลิต
- ข้อมูลสิ่งประกอบท่อและวาล์วรวบรวมจากแผนผังระบบท่อและอุปกรณ์วัดคุม (P&IDs)
- ความขรุขระท่อเลือกจากตารางที่ 4.3 ซึ่งได้เลือกค่าเท่ากับ 1 mm เนื่องจากจากท่อผ่านการใช้งานเป็นเวลานานแต่ตัวเร่งปฏิกิริยาไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน

ตารางที่ 4.3 ค่าความขรุขระของท่อเหล็กคาร์บอน (Carbon Steel)

วัสดุ	ความขรุขระ (mm)
เหล็กคาร์บอน (ใหม่)	0.02-0.05
เหล็กคาร์บอน (ถูกกัดกร่อนเล็กน้อย)	0.05-0.15
เหล็กคาร์บอน (ถูกกัดกร่อนปานกลาง)	0.15-1
เหล็กคาร์บอน (ถูกกัดกร่อนมาก)	1-3

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลของท่อขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาจากจุดที่ 1 ถึง 2 (ดังรูปที่ 4.1)

รายละเอียด	ค่าการรวบรวมข้อมูล
วัสดุ	Carbon Steel Pipe, Standard Weight, Welded, ASTM A53 Type E Grade B
ค่าความขรุขระท่อ (mm)	0.1
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (m)	0.0525
ความยาว (m)	77.61
ความแตกต่างความสูง (m)	9.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 จำนวนสิ่งประกอบท่อและวาล์วจากจุดที่ 1 ถึง 2 (ดังรูปที่ 4.1)

สิ่งประกอบท่อและวาล์ว	จำนวน
ข้อต่อ 90°	37
ข้อต่อ 45°	1
ข้อต่อ 3 ทาง	5
เกทวาล์ว	10
บอลล์วาล์ว	1

4.1.3 ผลการคำนวณความดันลดภายในท่อ

คำนวณความดันลดภายในท่อระหว่างจุดที่ 1 และ 2 แสดงดังรูปที่ 4.1 จากสมการที่ 2.6 พบว่ามีค่าความดันลดเท่ากับ 1.0025 barg

4.1.4 ผลความแตกต่างของเครื่องมือวัดความดัน ณ จุดอ้างอิง (PI-1311A และ PI-232740)

ความแตกต่างของค่าความดันระหว่างเครื่องมือวัดความดัน PI-1311A และ PI-232740 มีค่าเท่ากับ 1.0 barg

4.1.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความดันลด

ค่าความดันลดภายในท่อจากผลการคำนวณข้อ 4.1.3 มีค่าแตกต่างกับเครื่องมือวัดความดันเท่ากับ 0.25% ซึ่งน้อยกว่าความเบี่ยงเบนของเครื่องมือวัดความดันที่ 6% แสดงว่าความหนาแน่นและความหนืดของตัวเร่งปฏิกิริยา รวมทั้งความขรุขระของท่อมีความถูกต้องและสามารถยอมรับได้

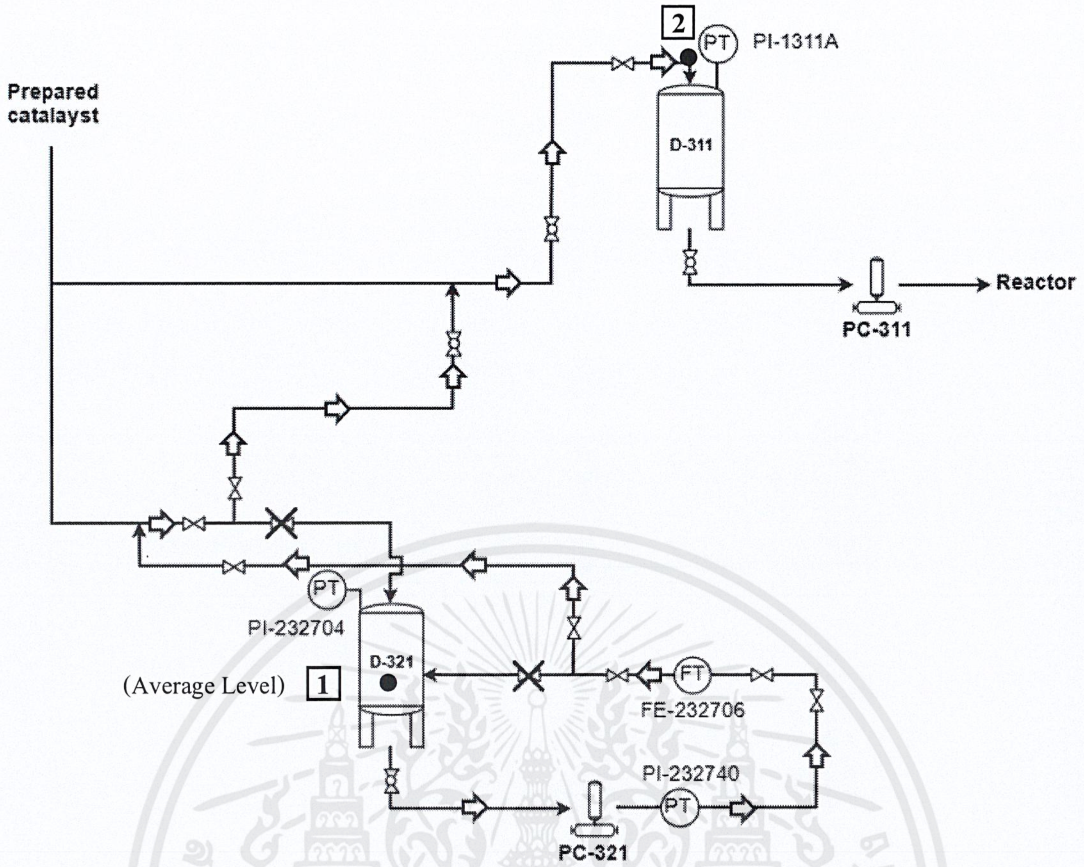
4.2 ผลการตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321)

4.2.1 ผลการสร้างกราฟเฮดของระบบปัจจุบันและขนาดใบพัด

สร้างกราฟเฮดของระบบปัจจุบันโดยกำหนดจุดอ้างอิง 2 จุดดังรูปที่ 4.2 เพื่อคำนวณเฮดของระบบโดยใช้สมการที่ 2.6 ที่อัตราการไหลต่างๆ และรวบรวมข้อมูลที่ภาวะปฏิบัติการและรายละเอียดท่อเพิ่มเติมดังตารางที่ 4.6 4.7 และ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ถึง D-311 และจุดอ้างอิงสำหรับการสร้างกราฟเฮดของระบบ

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลที่ภาวะปฏิบัติการเพิ่มเติมสำหรับการสร้างกราฟเฮดของระบบปัจจุบัน

รายละเอียด	ค่าการรวบรวมข้อมูล
ผลต่างความสูงระหว่างจุด 1 และ 2 (m)	7.5
ความดันที่ PI-232704 (barg)	1.1

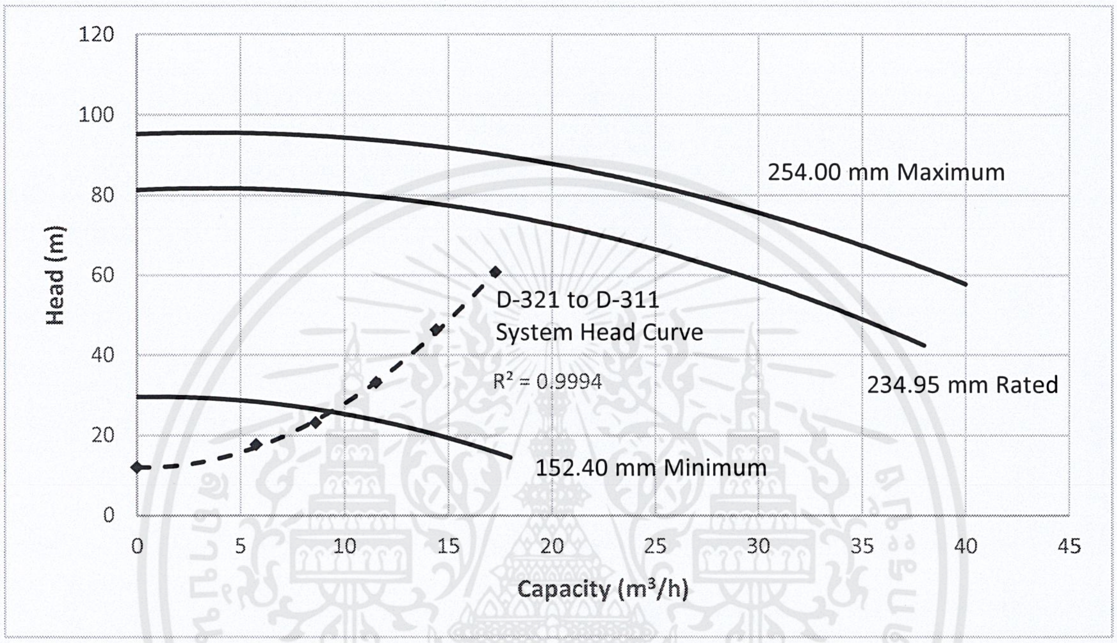
ตารางที่ 4.7 รายละเอียดของท่อจาก D-321 ถึง PC-321

รายละเอียด	ค่าการรวบรวมข้อมูล
เส้นผ่านศูนย์กลาง (inch)	3
ความยาว (m)	7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 จำนวนสิ่งประกอบท่อและวาล์วจาก D-321 ถึง PC-321

สิ่งประกอบท่อและวาล์ว	**จำนวน**
ข้อต่อ 90°	6
ข้อต่อ 3 ทาง	3
เกทวาล์ว	7



รูปที่ 4.3 กราฟเฮดของระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาปัจจุบัน (D-321 ไป D-311)

จากรูปที่ 4.3 พบว่ากราฟเฮดของระบบตัดกราฟสมรรถนะของปั๊มที่ใบเล็ก แสดงว่าระบบปัจจุบันใบพัดของปั๊มควรมีขนาดเล็ก

4.2.2 ผลการยืนยันขนาดใบพัดจริงและเปรียบเทียบกับขนาดใบพัดที่คำนวณได้

ในส่วนนี้ต้องแจ้งช่างเพื่อถอดประกอบปั๊มและพบว่าใบพัดจริงมีขนาดกลาง ซึ่งใหญ่กว่าขนาดใบพัดที่คำนวณไว้ ดังนั้นสามารถสรุปว่าปั๊มไม่สามารถทำงานได้ตามข้อมูลการออกแบบ

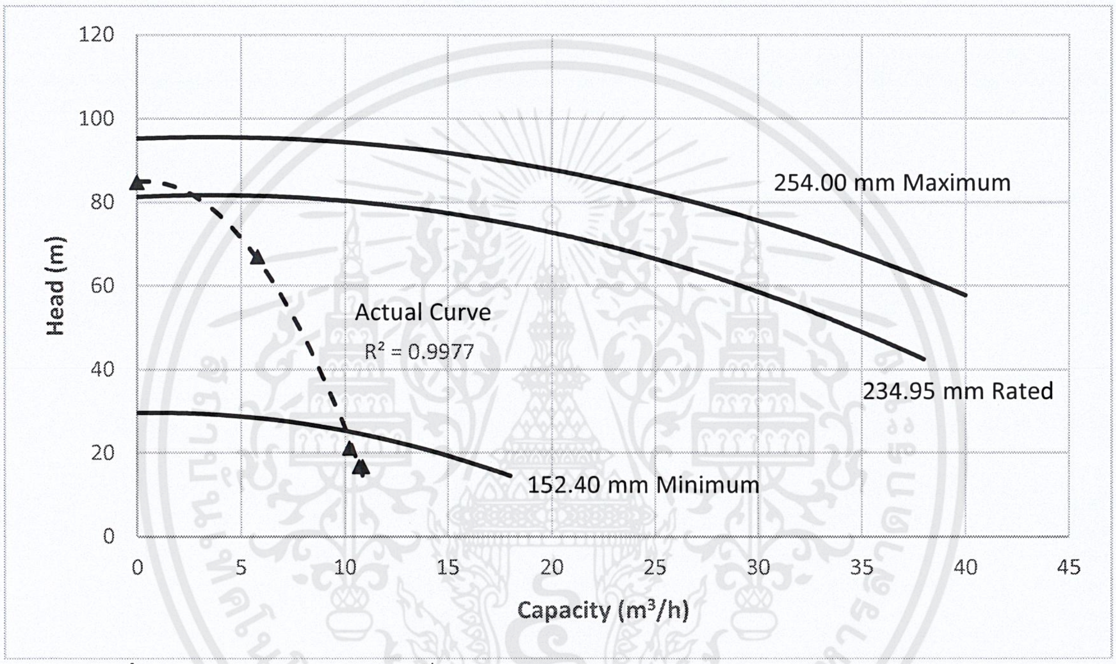
4.2.3 ผลการเปรียบเทียบกราฟสมรรถนะที่ภาวะปฏิบัติการกับข้อมูลการออกแบบ

ทำการทดลองปรับเปอร์เซ็นต์การเปิดวาล์วเพื่อปรับอัตราการไหล โดยเก็บข้อมูลอัตราการไหลและความดันท่อปล่อยของปั๊มเพื่อคำนวณเฮดที่อัตราการไหลนั้น คำนวณเฮดจากสมการที่ 2.6 และสร้างกราฟเปรียบเทียบกับกราฟสมรรถนะจากข้อมูลการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 เฮดที่อัตราการไหลต่างๆจากการทดลองเพื่อสร้างกราฟสมรรถนะที่ภาวะปฏิบัติการ

% การเปิดวาล์ว	อัตราการไหล (kg/h)	ความดันท่อปล่อย (barg)	เฮด (m)
0	0	7.0	84.00
25	4,040	5.8	67.03
50	7,130	2.7	21.15
75	7,478	2.4	16.71
100	7,600	2.4	16.71



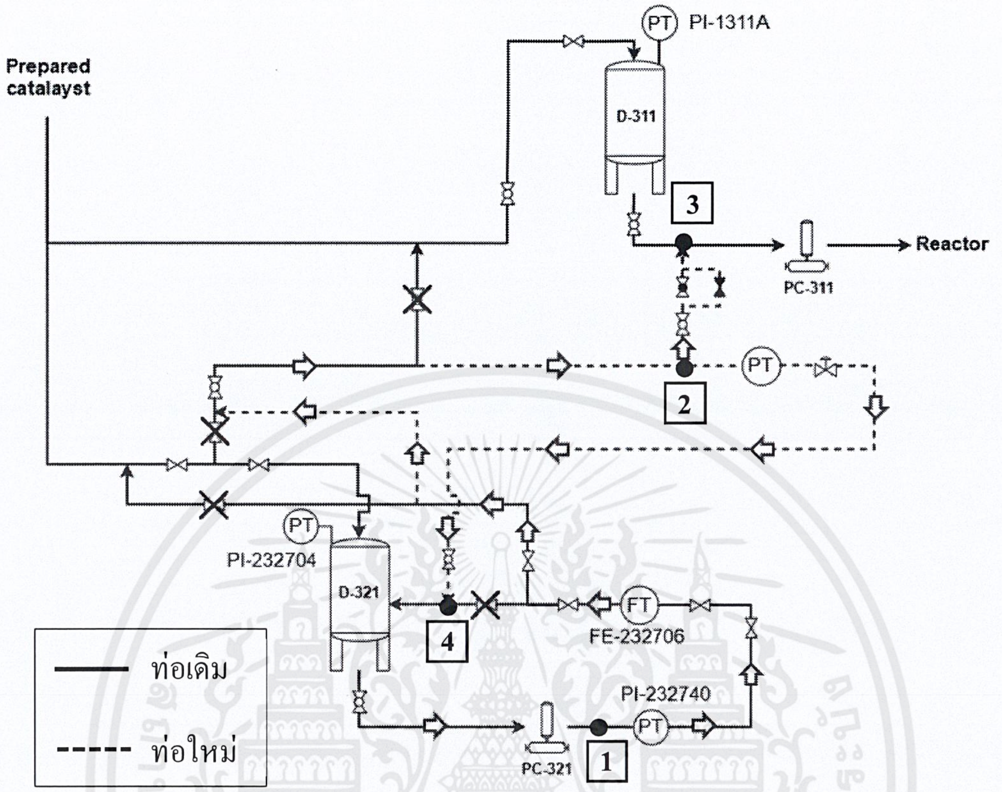
รูปที่ 4.4 กราฟสมรรถนะของปั๊ม (PC-321) ที่ภาวะปฏิบัติการและข้อมูลการออกแบบ

จากรูปที่ 4.4 เมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกับกราฟสมรรถนะที่ใบพัดขนาดกลางในข้อมูลการออกแบบ พบว่ากราฟทั้ง 2 เส้นมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน แสดงว่าไม่สามารถเชื่อถือข้อมูลการออกแบบของปั๊มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

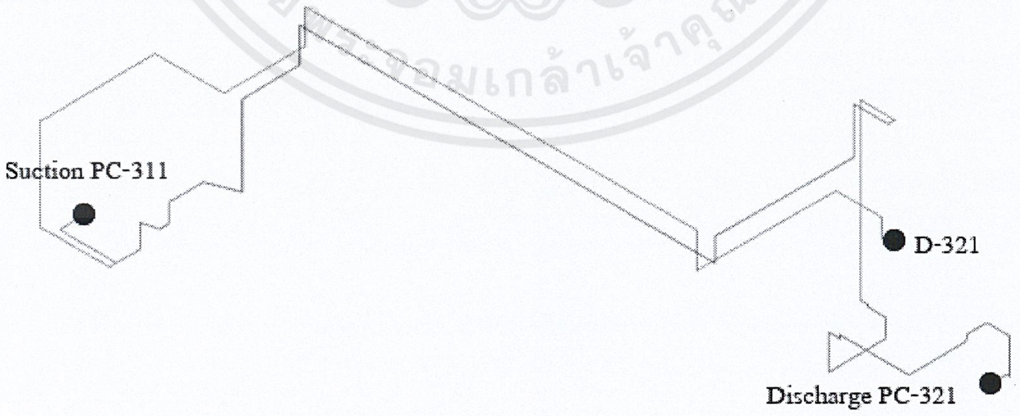
4.3 ผลการตรวจสอบความเป็นไปได้ในการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่

4.3.1 ผลการกำหนดจุดอ้างอิงในระบบท่อที่ปรับปรุงใหม่



รูปที่ 4.5 ระบบการขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงและจุดอ้างอิงสำหรับการคำนวณความดันลด

4.3.2 ผลการออกแบบเส้นทางการวางท่อขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ปรับปรุงใหม่



รูปที่ 4.6 เส้นทางการวางท่อของระบบที่ปรับปรุงใหม่ในมุมมองไอโซเมตริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวางท่อในเบื้องต้นได้พิจารณาข้อแนะนำในการจัดวางท่อในตารางที่ 2.3 โดยมีปัจจัยหลัก ได้แก่ มีระบบยึดและรองรับท่อเดิม ไม่กีดขวางต่อการซ่อมบำรุงอุปกรณ์สำคัญในพื้นที่การผลิต และตำแหน่งวาล์วสะดวกต่อการใช้งาน

4.3.3 ผลการรวบรวมข้อมูลเพิ่มเติมสำหรับการคำนวณความดันลดของระบบที่ปรับปรุงใหม่

เนื่องจากเป็นระบบท่อถูกออกแบบใหม่จึงต้องการข้อมูลที่จำเป็นต่อการคำนวณความดันลดเพิ่มเติม โดยอัตราการไหลที่ต้องการอยู่ในช่วงเดียวกับภาวะปฏิบัติการซึ่งอ่านจากเครื่องมือวัดอัตราการไหล (FE-232706) และอ่านค่าความดันจากเครื่องมือวัดความดัน (PI-232704) ในพื้นที่การผลิต แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ข้อมูลภาวะปฏิบัติการเพิ่มเติมสำหรับการคำนวณของระบบท่อที่ปรับปรุง

รายละเอียด	ค่าการรวบรวมข้อมูล
อัตราการไหลที่ต้องการ (MT/h)	7 - 8
ความดันที่ PI-232704 (barg)	1.1
ความสูงของระดับตัวเร่งปฏิกิริยาเฉลี่ยใน D-311 และ D-321 อ้างอิงแนวระดับท่อที่ต่ำสุด (m)	5.475

ความยาวท่อในแต่ละเส้นทางการไหล แสดงดังรูปที่ 4.5 ได้รวบรวมข้อมูลจากแผนภาพไอโซเมตริกในส่วนของท่อที่มีอยู่ และประมาณความยาวของท่อที่ออกแบบใหม่ รวมทั้งความแตกต่างความสูงแต่ละจุดโดยการประมาณในพื้นที่การผลิต แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 ความยาวท่อและความแตกต่างความสูงแต่ละเส้นทางการไหล (ดังรูปที่ 4.5)

เส้นทางการไหล	ความยาวท่อ (m)	ความแตกต่างความสูง (m)
1 ถึง 2	70	0.3
2 ถึง 3	3.5	0.0
2 ถึง 4	46	3.0

จำนวนสิ่งประกอบท่อและวาล์วรวบรวมข้อมูลจากแผนผังระบบท่อและอุปกรณ์วัดคุม (P&IDs) และแผนภาพไอโซเมตริก แสดงดังตารางที่ 4.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 จำนวนสิ่งประกอบท่อและวาล์วแต่ละเส้นทางการไหลสำหรับระบบที่ถูกปรับปรุง (ดังรูปที่ 4.5)

สิ่งประกอบท่อและวาล์ว	**เส้นทางการไหล**		
	1 ถึง 2	**2 ถึง 3**	**2 ถึง 4**
ข้อต่อ 90°	27	0	11
ข้อต่อ 45°	4	0	0
ข้อต่อ 3 ทาง	5	1	3
เกทวาล์ว	4	0	0
บอลล์วาล์ว	1	0	2
โกลบวาล์ว	0	1	0
วาล์วควบคุมการไหล	0	0	1

4.3.4 ผลการคำนวณความดันลดของระบบที่ปรับปรุงใหม่

การคำนวณความดันลดภายในระบบท่อที่ปรับปรุงบใหม่แบ่งเป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 4.5 โดยเลือกคำนวณที่อัตราการไหลที่ 8 MT/h เนื่องจากความดันลดที่คำนวณต้องเป็นความดันลดที่มากที่สุดที่เป็นไปได้เพราะต้องการพิจารณาความดันที่เหลือ ณ จุดที่ต้องการป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำที่สุดว่าจะสามารถป้อนได้หรือไม่ ซึ่งความดันลดที่คำนวณได้จะรวมค่าความปลอดภัย (Safety Factor) เท่ากับ 20% ตามความต้องการของบริษัท ซึ่งเป็นการรองรับความไม่แน่นอนในกรณีใช้งานจริง แสดงดังตารางที่ 4.13

ตารางที่ 4.13 ความดันลดภายในท่อสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่

เส้นทางการไหล	**ความดันลด (barg)**
1 ถึง 2	0.74
2 ถึง 3	0.00
2 ถึง 4	1.41

เมื่อคำนวณความดันลดในแต่ละส่วนแล้ว สามารถหาความดัน ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยา (จุดที่ 3 และ 4) โดยใช้ความดันท่อปล่อยของปั๊ม PC-321 อ้างอิง (จุดที่ 1) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับความดันสถิตของจุดนั้น แสดงดังตารางที่ 4.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.14 ความดัน ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาในระบบที่ปรับปรุงใหม่

จุด	**ความดัน (barg)**
3	1.66
4	0.25

4.3.5 ผลการคำนวณความดันสถิต ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยา

คำนวณความดันสถิตจากสมการที่ 2.2 ซึ่งอ้างอิงระดับเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาในถังเก็บ D-311 และ D-321 แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.15 ความดันสถิต ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่

จุด	**ความดันสถิต (barg)**
3	1.77
4	1.30

เมื่อเปรียบเทียบความดันสถิตและความดันหลังพิจารณาความดันลด แสดงดังตารางที่ 4.14 พบว่าความดันสถิตมีค่ามากกว่า ส่งผลให้ไม่สามารถป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาได้ตามการออกแบบด้วยปั๊มที่มีอยู่ (PC-321) จึงได้เสนอวิธีการแก้ไขปัญหาในข้อที่ 4.4

4.4 ผลการเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหา

4.4.1 ผลการลดอัตราการไหล

เนื่องจากอัตราการไหลแปรผันตามความดันลดภายในท่อ จึงควรลดอัตราการไหลเพื่อลดความดันลดภายในท่อที่เกิดขึ้น แต่จากประวัติข้อมูลของโรงงานพบว่าอัตราการไหลที่ใช้อยู่ในปัจจุบันเป็นอัตราการไหลที่ต่ำสุดที่ไม่เคยเกิดการตกตะกอนภายในท่อ ดังนั้นไม่สามารถปรับลดอัตราการไหลได้ เนื่องจากอาจก่อให้เกิดการตกตะกอนภายในท่อและส่งผลให้ท่อมีโอกาสอุดตัน

4.4.2 ผลการเพิ่มขนาดของท่อ

หากเพิ่มขนาดของท่อจะส่งผลให้ความดันลดมีค่าน้อยลงเนื่องจากความเร็วของของไหลลดลง ซึ่งความเร็วของของไหลที่ลดลงจะทำให้เกิดการตกตะกอนภายในท่อเช่นเดียวกับข้อ 4.4.1 ดังนั้นจึงไม่สามารถเพิ่มขนาดท่อได้

4.4.3 ผลการเปลี่ยนขนาดใบพัดของปั๊ม (PC-321)

เนื่องจากปั๊มไม่สามารถทำงานได้ตามข้อมูลการออกแบบที่ระบุและไม่สามารถเชื่อถือข้อมูลการออกแบบที่ระบุได้ ทำให้การเปลี่ยนขนาดของใบพัดให้ใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มเฮดจึงไม่สามารถระบุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฮดที่จะเพิ่มขึ้นได้ตามข้อมูลการออกแบบ ดังนั้นการเปลี่ยนขนาดใบพัดไม่ใช่ทางเลือกที่สามารถยอมรับได้

4.4.4 ผลการเปลี่ยนปั๊ม (PC-321)

การเปลี่ยนปั๊มแทนที่ปั๊มตัวเดิมต้องคำนึงถึงชนิดของปั๊มและพื้นที่การติดตั้ง เพื่อให้สามารถทำงานกับระบบเดิมได้ ดังนั้นต้องเป็นปั๊มเป็นชนิดเดิมคือ ปั๊มหอยโข่งแนวตั้งแบบ In-Line และต้องคำนวณความต้องการของระบบที่ปรับปรุงใหม่โดยใช้ข้อมูลเพิ่มเติมในตารางที่ 4.16 ดังนี้

- เฮดที่ต้องการสำหรับระบบที่ถูกปรับปรุงใหม่คำนวณจากสมการที่ 2.6 ซึ่งจุดอ้างอิงที่ใช้ได้แก่ระดับตัวเร่งปฏิกิริยาในถัง D-321 (0%) และจุดที่ 4 แสดงดังรูปที่ 4.5
- กำลังไฮดรอลิก (HP) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.12
- กำลัง (P) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.3 โดยประสิทธิภาพของปั๊มอ้างอิงจากปั๊มเดิมเท่ากับ 25%
- เฮดสุทธิด้านท่อดูดที่สามารถใช้งานได้ ($NPSH_A$) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.14

ตารางที่ 4.16 ข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อการคำนวณรายละเอียดของปั๊มสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่

รายละเอียด	ค่าการรวบรวมข้อมูล
ความแตกต่างความสูงระหว่างระดับตัวเร่งปฏิกิริยาในถัง D-321 (0 %) และจุดที่ 4 (m)	0.155
ความแตกต่างความสูงระหว่างระดับตัวเร่งปฏิกิริยาในถัง D-321 (0 %) และท่อดูดของปั๊ม (m)	1.35
ความดันไอของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียมเสร็จในรูปของเหลว (barg)	0.14

ตารางที่ 4.17 รายละเอียดของปั๊มสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่

รายละเอียด	ค่าการคำนวณ
อัตราการไหลที่ต้องการ (MT/h)	8.00
เฮด (รวมค่าความปลอดภัย = 20%) (m)	45.70
กำลังไฮดรอลิก (HP) (W)	995.26
กำลัง (P) (kW)	3.98
$NPSH_A$ (m)	15.28

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

4.5.1 ผลการประมาณต้นทุนการติดตั้งสำหรับระบบที่ถูกปรับปรุงใหม่

การประมาณต้นทุนการติดตั้งปั๊มสามารถคำนวณได้ตามข้อ 2.6.1 ซึ่งประมาณตามแนวทางของบริษัท (Dow Chemical. 2019) ดังนี้

1) ต้นทุนการก่อสร้างกระบวนการผลิต (ISBL Investment) คิดเฉพาะค่าจัดซื้อและติดตั้งปั๊ม โดยใช้สมการที่ 2.17 ซึ่งใช้ตัวแปรในตารางที่ 2.9 ในคอลัมน์ชนิดของกระบวนการผลิตแบบของไหล-ของแข็ง และตารางที่ 2.10

2) ต้นทุนการก่อสร้างนอกเหนือจากต้นทุนการก่อสร้างกระบวนการผลิต (OSBL Investment) คิดเป็น 20% จากข้อที่ 1

3) ต้นทุนงานวิศวกรรม (Engineering Costs) ประมาณเป็น 10% ของค่าใช้จ่ายข้อที่ 1 และ 2 รวมกัน

4) ค่าใช้จ่ายฉุกเฉิน (Contingency Charges) คิดเป็น 10% ของค่าใช้จ่ายข้อที่ 1 และ 2 รวมกัน

5) เงินทุนหมุนเวียน (Working Capital) โดยทั่วไปสำหรับโรงงานเคมีคิดเป็น 15% ของค่าใช้จ่ายข้อที่ 1 และ 2 รวมกัน

ตารางที่ 4.18 ต้นทุนการติดตั้งสำหรับระบบที่ปรับปรุงใหม่

ต้นทุน	**หน่วย (THB)**
1. ปั๊ม	450,000
2. ISBL Investment	1,440,000
3. OSBL Investment (20% of ISBL)	288,000
4. Engineering Costs (10% of ISBL + OSBL)	172,800
5. Contingency Charges (10% of ISBL + OSBL)	172,800
6. Working Capital (15% of ISBL + OSBL)	259,200
รวม (2 + 3 + 4+ 5+ 6)	**2,332,800**

4.5.2 ผลการคำนวณค่าไฟฟ้าและค่าบำรุงรักษาของปั๊มใหม่

เมื่อติดตั้งปั๊มใหม่จะมีค่าใช้จ่ายทำให้ผลกำไรลดลง ได้แก่ ค่าไฟฟ้าและค่าบำรุงรักษา ซึ่ง อัตราค่าไฟฟ้าอ้างอิงจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคสำหรับกิจการขนาดใหญ่ (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. 2019) และมีผลการคำนวณ แสดงดังตารางที่ 4.19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.19 ค่าไฟฟ้าและค่าบำรุงรักษาปั๊มใหม่

รายละเอียด	ค่าการคำนวณ
จำนวนการใช้งาน (day/yr)	365
ยูนิต (Unit)	35,040
อัตราค่าไฟฟ้า (THB/Unit)	3.1355
ค่าไฟฟ้า (THB/yr)	109,867.92
ค่าบำรุงรักษา (THB/yr)	20,000 (Dow Chemical. 2019)
รวม (ค่าไฟฟ้า + ค่าบำรุงรักษา) (THB/yr)	**129,867.92**

4.5.3 ผลการคำนวณต้นทุนการผลิตจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลดลงหลังการปรับปรุงระบบใหม่

ข้อมูลในส่วนนี้เป็นความลับของบริษัทไม่สามารถชี้แจงเป็นตัวเลขได้ แต่สามารถแสดงข้อมูลร้อยละของปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลดลงและต้นทุนที่ลดลง แสดงดังตารางที่ 4.20 ซึ่งคำนวณจากผลรวมของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เพิ่มขึ้นเมื่อถ่ายตัวเร่งปฏิกิริยาจาก D-321 ไป D-311 และเปรียบเทียบเป็นร้อยละของปริมาณที่เพิ่มขึ้นต่อปี

ตารางที่ 4.20 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลดลงและต้นทุนที่ลดลง

รายละเอียด	ค่าการรวบรวมข้อมูล
ร้อยละของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ลดลงต่อปี	5.5
ต้นทุนที่ลดลง (THB/yr)	2,160,000

4.5.4 การคำนวณระยะเวลาคืนทุน (Pay-back Period)

ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.18 โดยใช้ข้อมูลในตารางที่ 4.21

ตารางที่ 4.21 ข้อมูลการคำนวณระยะเวลาคืนทุน

ค่าใช้จ่าย	หน่วย (THB)
ต้นทุนการติดตั้งระบบที่ปรับปรุงใหม่	2,332,800
ต้นทุนค่าไฟฟ้าและบำรุงรักษาปั๊มใหม่	130,000
ต้นทุนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ลดลง	2,160,000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลในตารางที่ 4.21 สามารถคำนวณหาระยะเวลาคืนทุนประมาณ 1 ปี 2 เดือน จะสามารถคืนทุนการติดตั้งได้ทั้งหมดและเริ่มได้กำไร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินโครงการ

5.1 สรุปผลการดำเนินการ

- จากผลการประเมินความเป็นไปได้ของการใช้งานระบบท่อขนส่งตัวเร่งปฏิกิริยาที่ถูกปรับปรุงใหม่โดยใช้ปั๊มเดิม (PC-321) พบว่าความดัน ณ จุดที่ต้องการป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาหลังพิจารณาความดันลดมีค่าน้อยกว่าความดันสถิต ทำให้ระบบที่ถูกปรับปรุงใหม่ไม่สามารถใช้ร่วมกับปั๊มเดิม (PC-321) ได้
- วิธีการแก้ไขปัญหาที่ดีที่สุดหลังได้พิจารณาวิธีการอื่นๆที่มีความเป็นไปได้คือการเปลี่ยนปั๊ม (PC-321) เนื่องจากวิธีการอื่นๆที่ได้พิจารณาไม่สามารถทำได้ การเปลี่ยนปั๊มอาจมีค่าใช้จ่ายสูงที่สุดแต่สามารถทำให้ระบบที่ปรับปรุงใช้งานได้ตามการออกแบบ ดังนั้นจึงคำนวณความต้องการของระบบที่ปรับปรุงใหม่เพื่อใช้เลือกปั๊มที่เหมาะสม ดังนี้
    - อัตราการไหลที่ต้องการ เท่ากับ 8 MT/h
    - เฮด (TDH) เท่ากับ 45.70 m
    - กำลังไฮดรอลิก (HP) เท่ากับ 995.26 W
    - กำลัง เท่ากับ 4 kW
    - ความดันสุทธิด้านท่อดูดที่สามารถใช้งานได้ ($NPSH_A$) เท่ากับ 15.28 m
- ผลการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่ามีต้นทุนการติดตั้งระบบใหม่เท่ากับ 2,332,800.00 THB และมีระยะเวลาคืนทุนประมาณ 1 ปี 2 เดือน

5.2 ข้อเสนอแนะ

ต้นทุนของปั๊มเป็นค่าประมาณจากการสอบถามข้อมูลจากวิศวกรผู้ดูแลโครงการ และใช้การประมาณจาก Factorial Method ซึ่งข้อมูลทั้งสองส่วนอาจมีการเปลี่ยนแปลงตามแนวทางของบริษัทได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

ดุลยโชติ ชลศึกษ์. 2557. **Engineering Piping System Design.** กรุงเทพ : มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

สุธรรม สุขมณี. 2559. **การออกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรมเคมี.** พิมพ์ครั้งที่ 10. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Couper, J. R. et. al. 2012. **Chemical Process Equipment.** 3rd ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann.

Churchill S. W. 1997. **Friction-factor Equation Spans All Fluid-flow Regimes.** Chemical Engineering Journal: 94-95.

Darby, R. 2017. **Chemical Engineering Fluid Mechanics.** 3rd ed. New York: MarcelDekker.

Karassik, I. J. et. al. 2008. **Pump Handbook.** 4th ed. New York: McGraw-Hill.

Mayers, R. A. 2018. **Handbook of Petrochemicals Production Processes.** 2nd ed. New York: McGraw-Hill.

Nayyar, M. L. 2013. **Piping Handbook.** 8th ed. New York: McGraw-Hill.

Perry, R. H. et. al. 2018. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 9th ed. New York: McGraw-Hill.

Smith, P. and Zappe, R. W. 2004. **Valve Selection Handbook.** 5th ed. Massachusetts: Gulf Professional Publishing.

Towler, G. and Sinnott, R. 2013. **Chemical Engineering Design: Principles, Practice and Economics of Plant and Process Design.** 2nd ed. Massachusetts: Butterworth-Heinemann.

Walas, S. M. 1990. **Chemical Process Equipment Selection and Design.** Massachusetts: Butterworth-Heinemann.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ตัวอย่างการคำนวณความดันลดภายในระบบท่อและรายละเอียดปั๊ม

1) การตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปร

ตัวอย่างการคำนวณความดันลดเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวแปรในหัวข้อที่ 3.1 ระหว่างจุดอ้างอิงดังรูปที่ 4.1 สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.6 และใช้ข้อมูลการคำนวณในตารางที่ 4.1 ถึง 4.5 ซึ่งต้องแทนค่าตัวแปรที่อยู่ในสมการที่มีหน่วยที่สอดคล้องกัน โดยการคำนวณต่อไปนี้จะใช้หน่วยสากล (The International System of Units, SI Units) และมีขั้นตอนการคำนวณดังนี้

1.1 การแปลงหน่วยความดัน (P) ยกตัวอย่างการแปลงหน่วยความดันที่ PI-232740

$$P = (2.4\ \text{barg})(100{,}000\ \text{Pa/barg})$$
$$= 240{,}000\ \text{Pa}$$

1.2 การแปลงหน่วยอัตราการไหล (Q)

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho}$$
$$= \frac{(7.1\ \text{MT/h})(1{,}000\ \text{kg/MT})(1\ \text{hr/3600 s})}{(698\ \text{kg/m}^3)}$$
$$= 0.0028\ \text{m}^3/\text{s}$$

1.3 การคำนวณพื้นที่หน้าตัดของท่อ (A)

จากตารางที่ 4.4 เป็นท่อประเภท Carbon Steel Pipe, Standard Weight, Welded, ASTM A53 Type E Grade B มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเท่ากับ 52.5 mm ดังข้อมูลในตารางที่ 2.1 ซึ่งสามารถคำนวณพื้นที่หน้าตัดท่อได้ดังนี้

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$
$$= \frac{\pi \times (0.0525\ \text{m})^2}{4}$$
$$= 0.0022\ \text{m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 การคำนวณความเร็วของการไหลภายในท่อ (v)

ความเร็วของการไหลภายในท่อคำนวณจากสมการที่ 2.4

$$Q = A \times v$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

$$= \frac{0.0028\ m^3/s}{0.0022\ m^2}$$

$$= 1.31\ m/s$$

1.5 การคำนวณตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynold's Number, Re)

ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถระบุลักษณะการไหลภายในท่อได้ คำนวณจากสมการที่ 2.8

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$$= \frac{\left(698\ kg/m^3\right)\times\left(1.31\ m/s\right)\times\left(0.0525\ m\right)}{0.02\ Pa.s}$$

$$= 2400.25$$

จากผลการคำนวณพบว่าการไหลอยู่ในช่วงทรานซิชัน (Transition)

1.6 การคำนวณสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Fanning Friction, f)

สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.10

$$f = 2\left[\left(\frac{8}{Re}\right)^{12} + \frac{1}{\left(A+B\right)^{3/2}}\right]^{1/12}$$

จากสมการที่ 2.10 ต้องหาค่าตัวแปร A และ B ซึ่งเป็นค่าตัวแปรเฉพาะของสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A = \left\{ 2.457 \ln \left[\frac{1}{(7/\mathrm{Re})^{0.9} + 0.27\varepsilon / D} \right] \right\}^{16}$$

$$= \left\{ 2.457 \ln \left[\frac{1}{(7/2400.25)^{0.9} + 0.27\left(0.0001\ \mathrm{m}\right)/\left(0.0525\ \mathrm{m}\right)} \right] \right\}^{16}$$

$$= 4.45 \times 10^{17}$$

$$B = \left(\frac{37530}{\mathrm{Re}} \right)^{16}$$

$$= \left(\frac{37530}{2400.25} \right)^{16}$$

$$= 1.35 \times 10^{19}$$

ดังนั้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน เท่ากับ

$$f = 2\left[\left(\frac{8}{2400.25} \right)^{12} + \frac{1}{\left(4.45\times10^{17} + 1.35\times10^{19}\right)^{3/2}} \right]^{1/12}$$

$$= 0.0082$$

1.7 การคำนวณเฮดที่สูญเสีย

- เฮดที่สูญเสียเนื่องจากความยาวท่อคำนวณจากสมการที่ 2.7

$$h_f = \sum 4f \frac{L}{D}\left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

$$= 4\left(0.0082\right)\frac{78\ \mathrm{m}}{0.0525\ \mathrm{m}}\left(\frac{\left(1.31\ \mathrm{m/s}\right)^2}{2\left(9.81\ \mathrm{m/s^2}\right)} \right)$$

$$= 4.26\ \mathrm{m}$$

- เฮดที่สูญเสียเนื่องจากสิ่งประกอบท่อและวาล์วทั้งหมดสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.11 ซึ่งจะยกตัวอย่างเฮดที่สูญเสียเนื่องจากเกทวาล์ว จำนวน 8 ตัวโดยสัมประสิทธิ์ค่าการสูญเสียของเกทวาล์วเท่ากับ 0.17 แสดงดังตารางที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$h_f = K_{f,\text{Gate Valve}}\left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

$$= 8 \times 0.17 \times \left(\frac{(1.31\ \text{m/s})^2}{2(9.81\ \text{m/s}^2)}\right)$$

$$= 0.12\ \text{m}$$

ในทำนองเดียวกันสามารถคำนวณเฮดที่สูญเสียจากสิ่งประกอบท่อและวาล์วอื่นๆรวมกันได้เท่ากับ 1.50 m ดังนั้นเฮดการสูญเสียเนื่องจากความยาวท่อ สิ่งประกอบท่อและวาล์วรวมเท่ากับ 5.76 m

1.8 การคำนวณความดันลด

ความดันลดสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.6 ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

- Incompressible Fluid ส่งผลให้ความหนาแน่นไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน
- Steady State ส่งผลให้ค่าของตัวแปรคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
- Newtonian Fluid ส่งผลให้ความหนืดมีค่าคงที่ ไม่ขึ้นกับแรงเฉือน
- การไหลภายในท่อมีทิศทางเดียว ได้แก่ ทิศการไหลตามแนวท่อ ส่งผลให้ความเร็วของการไหลจึงเป็นฟังก์ชันของทิศทางนั้น ไม่ต้องพิจารณาทิศทางอื่น

จากนั้นแทนค่าตัวแปรในสมการที่ 2.6

$$\frac{P_{out} - P_{in}}{\rho g} + (z_{out} - z_{in}) + \frac{1}{2g}(v_{out}^2 - v_{in}^2) + h_f + h_p = 0$$

$$\frac{P_{out} - P_{in}}{(698\ \text{kg/m}^3)(9.81\ \text{m/s}^2)} + (5.475\ \text{m}) + 0 + 5.76\ \text{m} + 0 = 0$$

$$\Delta P = 1.0025\ \text{barg}$$

เนื่องจากระหว่างจุดอ้างอิงดังรูปที่ 4.1 ความเร็วภายในท่อเท่ากันและไม่มีปั๊มในระบบ ดังนั้นพจน์ของความเร็วของการไหลภายในท่อ (v) และเฮดปั๊ม (h_p) มีค่าเท่ากับศูนย์

1.9 ความแตกต่างความดันของเครื่องมือวัดความดัน ณ จุดอ้างอิง (PI-1311A และ PI-232740)

$$\Delta P = 2.4 - 1.4$$

$$= 1.00\ \text{barg}$$

เมื่อเปรียบเทียบความดันลดจากข้อ 1.8 และ 1.9 พบว่ามีค่าความแตกต่างที่ 0.25% ซึ่งสามารถยอมรับค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณได้ เนื่องจากมีเปอร์เซ็นต์แตกต่างต่ำกว่าเปอร์เซ็นต์ความเบี่ยงเบนของความแม่นยำของเครื่องวัดความดันที่ 6%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) การตรวจสอบสมรรถนะของปั๊ม (PC-321)

2.1 การสร้างกราฟเฮดของระบบปัจจุบัน (D-321 ถึง D-311)

กราฟเฮดของระบบเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลและเฮด ซึ่งสามารถคำนวณเฮดจากสมการที่ 2.6 และใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับข้อ 1.1 ถึง 1.8 เพียงแต่เปลี่ยนเป็นการหาเฮดปั๊ม ซึ่งใช้จุดอ้างอิงดังรูปที่ 4.2 และรวบรวมข้อมูลการคำนวณเพิ่มเติมดังตารางที่ 4.6 4.7 และ 4.8 โดยยกตัวอย่างการแทนค่าในสมการที่ 2.6 ที่อัตราการไหล 8 MT/h

$$\frac{P_{out}-P_{in}}{\rho g}+(z_{out}-z_{in})+\frac{1}{2g}(v_{out}^2-v_{in}^2)+h_f+h_p=0$$

$$\frac{140{,}000\text{ Pa}-110{,}000\text{ Pa}}{\left(698\text{ kg/m}^3\right)\left(9.81\text{ m/s}^2\right)}+(7.5\text{ m})+0+21.25\text{ m}+h_p=0$$

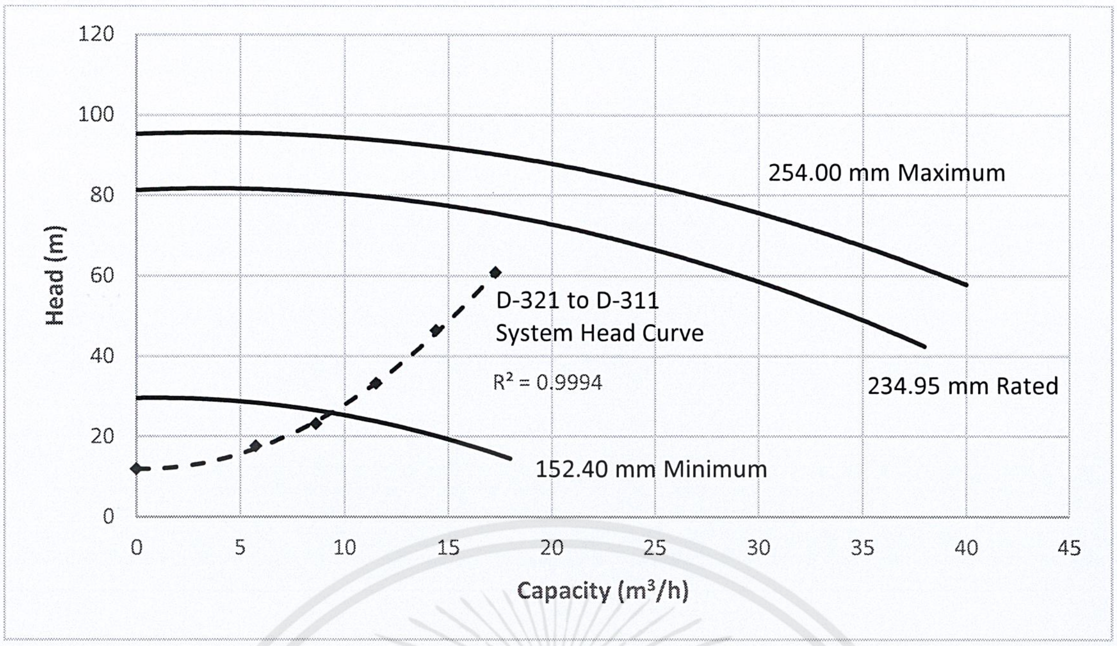
$$h_p=33.16\text{ m}$$

เนื่องจากความเร็วในการไหล ณ ตำแหน่งที่ 1 และ 2 มีความใกล้เคียงกันจึงประมาณผลต่างได้เท่ากับศูนย์ จากนั้นจึงคำนวณเฮดที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงดังตารางต่อไปนี้

อัตราการไหล (MT/h)	**อัตราการไหล (m^3/h)**	**เฮด (m)**
0	0	11.92
4	5.76	17.56
6	8.64	23.13
8	11.52	33.16
10	14.40	46.29
12	17.28	60.73

และสามารถสร้างกราฟได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



2.2 การสร้างกราฟสมรรถนะที่ภาวะปฏิบัติการ

จากการทดลองที่รวบรวมข้อมูลเพื่อคำนวณเฮดที่อัตราการไหลต่างๆและนำไปเขียนกราฟของสมรรถนะที่ภาวะปฏิบัติการ ซึ่งรวบรวมข้อมูลของอัตราการไหลและความดันท่อปล่อยของปั๊ม

อัตราการไหล (kg/h)	ความดันท่อปล่อยของปั๊ม (PC-321) (barg)
0	7
4040	5.8
7130	2.7
7478	2.4
7600	2.4

การคำนวณเฮดจากสมการที่ 2.6 ซึ่งมีจุดอ้างอิง 2 จุด ได้แก่ ท่อดูดและท่อปล่อยของปั๊ม ความดันท่อดูดสามารถคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.2 และข้อมูลจากตารางที่ 4.2 ซึ่งมีระดับความสูงของตัวเร่งปฏิกิริยาใน D-321 ณ ตอนทดลองเท่ากับ 2.525 m

$$\begin{aligned} P_{suction,PC-321} &= P_{D-321} + \rho gh \\ &= 110,000 \text{ Pa} + (698 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(2.525 \text{ m}) \\ &= 127,289 \text{ Pa} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ยกตัวอย่างการคำนวณเฮดที่อัตราการไหล 4040 kg/h ซึ่งสามารถคำนวณเฮดโดยใช้สมการที่ 2.6 ได้ดังนี้

$$\frac{P_{out}-P_{in}}{\rho g}+(z_{out}-z_{in})+\frac{1}{2g}(v_{out}^2-v_{in}^2)+h_f+h_p=0$$

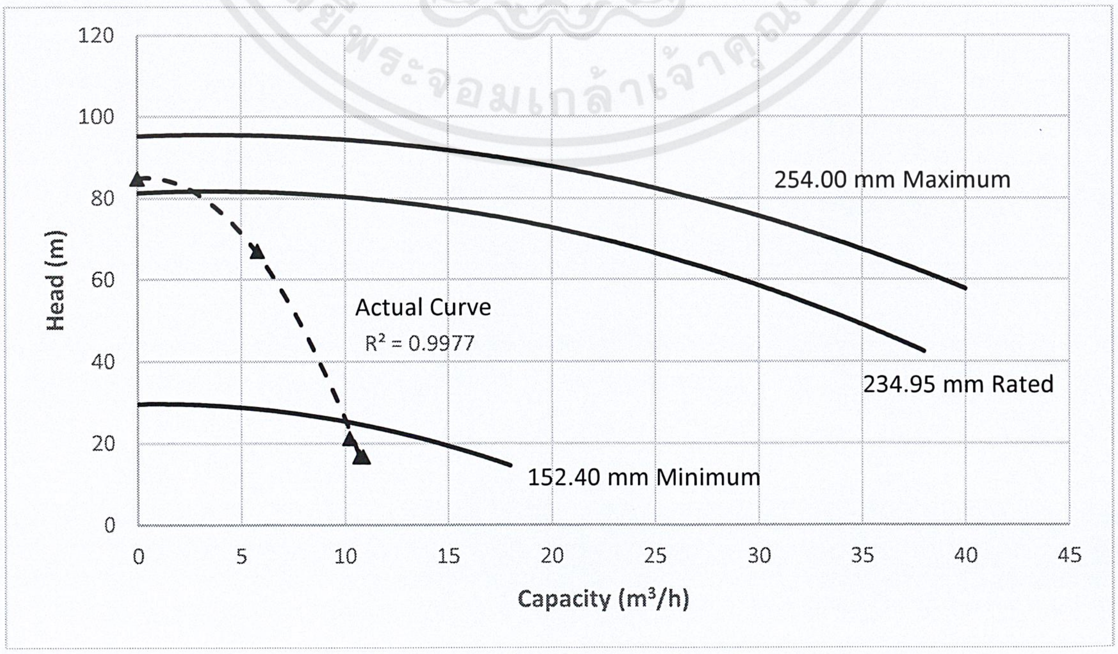
$$\frac{580{,}000\text{ Pa}-127{,}289\text{ Pa}}{\left(698\text{ kg/m}^3\right)\left(9.81\text{ m/s}^2\right)}+0+0+0+h_p=0$$

$$h_p=67.02\text{ m}$$

สามารถคำนวณเฮดได้ที่อัตราการไหลต่างๆ แสดงดังตารางต่อไปนี้

อัตราการไหล (kg/h)	**อัตราการไหล (m^3/h)**	**ความดันท่อปล่อยของปั๊ม (PC-321) (barg)**	**เฮด (m)**
0	0	7	84.78
4040	5.79	5.8	67.02
7130	10.21	2.7	21.15
7478	10.71	2.4	16.71
7600	10.89	2.4	16.71

และนำข้อมูลมาสร้างกราฟได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3) การคำนวณความดันลดสำหรับระบบท่อที่ถูกปรับปรุง

จากรูปที่ 4.5 พบว่ามีจุดทั้งหมด 4 จุด แบ่งเป็น 3 เส้นทาง ได้แก่ 1 ถึง 2 2 ถึง 3 และ 2 ถึง 4 ซึ่งจะใช้สมการที่ 2.6 คำนวณความดันลดในแต่ละเส้นทาง โดยการคำนวณความดันลดมีขั้นตอนเช่นเดียวกับข้อ 1.1 ถึง 1.8 และใช้ข้อมูลที่รวบรวมเพิ่มเติมในตารางที่ 4.10 4.11 และ 4.12 ในการคำนวณเฮดได้เลือกคำนวณที่อัตราการไหล 8 MT/h เนื่องจากจะเกิดความดันลดมากที่สุดเพราะต้องการพิจารณาความดันลดที่เหลือ ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่ำที่สุดว่าสามารถป้อนได้หรือไม่ โดยยกตัวอย่างการแทนค่าในสมการที่ 2.6 และคำนวณความดันลดของเส้นทางจากจุดที่ 1 ถึง 2

$$\frac{P_{out}-P_{in}}{\rho g}+(z_{out}-z_{in})+\frac{1}{2g}(v_{out}^2-v_{in}^2)+h_f+h_p=0$$

$$\frac{P_{out}-P_{in}}{\left(698\ \text{kg/m}^3\right)\left(9.81\ \text{m/s}^2\right)}+(0.3\ \text{m})+0+8.89\ \text{m}+0=0$$

$$\Delta P=0.62\ \text{barg}$$

เนื่องจากความเร็วของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในท่อเท่ากันและไม่มีปั๊มอยู่ระหว่างจุดอ้างอิงทำให้ทั้งสองพจน์มีค่าเท่ากับศูนย์ เมื่อรวมค่าความปลอดภัย (Safety Factor) ที่ 20% เพื่อรองรับความไม่แน่นอนสำหรับการใช้งานจริง พบว่ามีความดันลดเท่ากับ 0.74 barg ซึ่งความดันลดแต่ละเส้นทางการไหล แสดงดังตารางต่อนี้

เส้นทางการไหล	**ความดันลด (barg)**
1 ถึง 2	0.74
2 ถึง 3	0.00
2 ถึง 4	1.41

การคำนวณความดัน ณ จุดที่ต้องการป้อนตัวเร่งปฏิกิริยาหลังพิจารณาความดันลด จะยกตัวอย่างการคำนวณ ณ จุดที่ 3 ซึ่งเป็นผลจากความดันลดจากจุดที่ 1 ถึง 2 และ 2 ถึง 3

$$\begin{aligned}P_3&=P_1-\Delta P_{1-2}-\Delta P_{2-3}\\&=2.4\ \text{barg}\ -\ 0.74\ \text{barg}-0\ \text{barg}\\&=1.66\ \text{barg}\end{aligned}$$

ความดันหลังพิจารณาความดันลด ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยา ได้แก่ จุดที่ 3 และ 4 แสดงดังตารางต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุด	ความดัน (barg)
3	1.66
4	0.25

ความดันสถิตคำนวณโดยใช้สมการที่ 2.2 และใช้ระดับความสูงเฉลี่ยของตัวเร่งปฏิกิริยาในตารางที่ 4.10 ซึ่งจะยกตัวอย่างการคำนวณความดันสถิต ณ จุดที่ 3

$$P_3 = P_{D-311} + \rho g h$$
$$= 140,000 \text{ Pa} + (698 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(5.475 \text{ m})$$
$$= 177,489 \text{ Pa}$$

ความดันสถิต ณ จุดป้อนตัวเร่งปฏิกิริยา แสดงดังตารางต่อไปนี้

จุด	ความดันสถิต (barg)
3	1.77
4	1.30

4) การคำนวณรายละเอียดของปั๊มสำหรับระบบที่ถูกปรับปรุงใหม่

สำหรับการคำนวณเฮดของระบบที่ถูกปรับปรุงใหม่จะใช้จุดอ้างอิง 2 จุดดังรูปที่ 4.5 ได้แก่ระดับตัวเร่งปฏิกิริยาในถัง D-321 ที่ 0% และจุดที่ 4 ใช้ข้อมูลเพิ่มเติมจากตารางที่ 4.16 ซึ่งคำนวณเฮดของระบบจากสมการที่ 2.6 กำลังไฮดรอลิก (HP) จากสมการที่ 2.12 กำลังของปั๊ม (P) จากสมการที่ 2.13 และเฮดสุทธิด้านท่อดูดที่สามารถใช้งานได้ ($NPSH_A$) จากสมการที่ 2.14

$$\frac{P_{out} - P_{in}}{\rho g} + (z_{out} - z_{in}) + \frac{1}{2g}(v_{out}^2 - v_{in}^2) + h_f + h_p = 0$$
$$0 + (0.155 \text{ m}) + 0 + 34.99 \text{ m} + h_p = 0$$
$$h_p = 35.15 \text{ m}$$

เนื่องจากจุดอ้างอิงทั้งสองมีความดันเท่ากันและความแตกต่างของความเร็วในการไหลมีค่าน้อยมาก ส่งผลให้พจน์ของความดันและความเร็วในสมการที่ 2.6 เท่ากับศูนย์ จากนั้นคำนวณกำลังไฮดรอลิกจากสมการที่ 2.12

$$HP = h_P \rho g Q$$
$$= (35.15 \text{ m})(698 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.0032 \text{ m}^3/\text{s})$$
$$= 995.26 \text{ W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำนวณกำลังของปั๊มคำนวณจากสมการที่ 2.13 โดยอ้างอิงค่าประสิทธิภาพจากปั๊มเดิม

$$\begin{aligned} Power &= \frac{HP}{\eta_P} \\ &= \frac{995.26\ \text{W}}{0.25} \\ &\approx 4\ \text{kW} \end{aligned}$$

เฮดสุทธิด้านท่อดูดที่สามารถใช้งานได้ ($NPSH_A$) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.14

$$\begin{aligned} NPSH_A &= h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp} \\ &= \frac{(110{,}000\ \text{Pa})}{(698\ \text{kg/m}^3)(9.81\ \text{m/s}^2)} + 1.35\ \text{m} - 0.27\ \text{m} - \frac{(14{,}000\ \text{Pa})}{(698\ \text{kg/m}^3)(9.81\ \text{m/s}^2)} \\ &= 15.28\ \text{m} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

1) การประมาณต้นทุนการติดตั้งสำหรับระบบที่ถูกออกแบบใหม่

การประมาณต้นทุนได้ประมาณตามแนวทางของบริษัท ดังนี้

- ต้นทุนการก่อสร้างกระบวนการผลิต (ISBL Investment) สามารถคำนวณจากสมการที่ 2.18 โดยคิดเฉพาะอุปกรณ์หลัก ได้แก่ ปั๊ม ซึ่งมีราคาประมาณ 450,000 THB และใช้ตัวแปรจากตารางที่ 2.9 ในคอลัมน์ของกระบวนการผลิตแบบของไหล-ของแข็ง และตารางที่ 2.10

$$
\begin{aligned}
C &= \sum_{i=1}^{i=M} C_{e,i}\left[(1+f_p)+(f_{er}+f_{el}+f_i+f_c+f_s+f_l)/f_m\right] \\
&= \sum_{i=1}^{i=1} 450,000\left[(1+0.5)+(0.6+0.3+0.2+0.3+0.2+0.1)/1\right] \\
&= 1,440,000 \text{ THB}
\end{aligned}
$$

- ต้นทุนการก่อสร้างนอกเหนือจากต้นทุนการก่อสร้างกระบวนการผลิต (OSBL Investment) ได้แก่ ค่าไฟฟ้าและค่าอาหาร ประมาณเป็น 20% ของต้นทุนการก่อสร้างกระบวนการผลิต

$$
\begin{aligned}
OSBL\ Investment &= 0.2(ISBL\ Investment) \\
&= 0.2(1,440,000) \\
&= 288,000 \text{ THB}
\end{aligned}
$$

- ต้นทุนงานวิศวกรรม (Engineering Costs) ได้แก่ ค่าการออกแบบระบบท่อ 3 มิติ และค่าบริการ ประมาณเป็น 10% ของต้นทุนก่อสร้างกระบวนการผลิตและนอกเหนือกระบวนการผลิตรวมกัน

$$
\begin{aligned}
Engineering\ Costs &= 0.1(ISBL + OSBL \text{ Investment}) \\
&= 0.1(1,440,000+288,000) \\
&= 172,800 \text{ THB}
\end{aligned}
$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ค่าใช้จ่ายฉุกเฉิน (Contingency Charges) ประมาณเป็น 10% ของต้นทุนก่อสร้างกระบวนการผลิตและนอกเหนือกระบวนการผลิตรวมกัน

$$\begin{aligned} Contingency\ Charges &= 0.1(ISBL + OSBL \text{ Investment}) \\ &= 0.1(1,440,000 + 288,000) \\ &= 172,800 \text{ THB} \end{aligned}$$

- เงินทุนหมุนเวียน (Working Capital) ได้แก่ อะไหล่สำรองปั๊ม ประมาณเป็น 15% ของต้นทุนก่อสร้างกระบวนการผลิตและนอกเหนือกระบวนการผลิตรวมกัน

$$\begin{aligned} Working\ Capital &= 0.15(ISBL + OSBL \text{ Investment}) \\ &= 0.15(1,440,000 + 288,000) \\ &= 259,200 \text{ THB} \end{aligned}$$

ดังนั้นเมื่อรวมต้นทุนทั้งหมดเท่ากับ 2,160,000 THB

2) การคำนวณค่าไฟฟ้าของปั๊มใหม่

การคำนวณค่าไฟฟ้าของการใช้งานปั๊มใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.19 ซึ่งปั๊มมีกำลังประมาณ 4 kW จากการคำนวณดังตารางที่ 4.17 โดยขั้นแรกจะคำนวณจำนวนยูนิต ดังนี้

$$\begin{aligned} Unit &= Power \text{ (kW)} \times Operating\ Time \text{ (hr/yr)} \\ &= 4 \text{ kW} \times 365 \text{ days} \times 24 \text{ hr/day} \\ &= 35,040 \end{aligned}$$

จากนั้นคิดค่าไฟฟ้าด้วยอัตราค่าไฟฟ้า 3.1355 THB/Unit เท่ากับ 109,867.92 THB

3) ปริมาณและต้นทุนของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ลดลง

การคำนวณส่วนนี้ไม่สามารถแสดงตัวเลขได้ แต่สามารถแสดงวิธีคำนวณได้ โดยปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ลดลงคำนวณจากปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้เพิ่มขึ้นต่อการขนถ่าย 1 ครั้ง (A) ซึ่ง 1 ปีจะมีการขนถ่ายประมาณ 26 ครั้ง จากนั้นนำมาเทียบกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ปกติ (B)

$$\begin{aligned} Quantity\ of\ reduced\ catalyst &= \frac{26 \times A}{B} \\ &= 5.5\% / \text{yr} \end{aligned}$$

คิดเป็นต้นทุนที่ลดลงเท่ากับ 2,160,000 THB/yr

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) การคำนวณระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุนสามารถคำนวณจากสมการที่ 2.18 และใช้ข้อมูลจากตารางที่ 4.21 ซึ่งเป็นผลการคำนวณในข้อ 5.1 5.2 และ 5.3

$$\text{Pay-back Period} = \frac{\text{Total Investment}}{\text{Average Annual Cash Flow}}$$

$$= \frac{2{,}332{,}800 \text{ THB}}{2{,}160{,}000 \text{ THB/yr} - 129{,}867.92 \text{ THB/yr}}$$

$$= 1 \text{ yr } 2 \text{ m}$$

ผลการคำนวณพบว่ามีระยะเวลาคืนทุนของโครงการประมาณ 1 ปี 2 เดือน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายศรายุทธ กมลศรี

วัน เดือน ปีเกิด 28 พฤศจิกายน 2540

ที่อยู่ 20 ซ.6 ถ.กาญจนวณิช อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

E-mail 59011272@kmitl.ac.th

โทรศัพท์ 09-3629-1492

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2553 - 2559 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย
- พ.ศ. 2559 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง GPA 3.79

ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนกการผลิตโพลีสไตรีน
กลุ่มบริษัท ดาว ประเทศไทย
ตั้งแต่วันที่ 3 มิถุนายน 2562 ถึง 2 สิงหาคม 2562
- นักศึกษาโครงการสหกิจศึกษา แผนกการผลิตโพลีเอทิลีน
กลุ่มบริษัท ดาว ประเทศไทย
ตั้งแต่วันที่ 5 สิงหาคม 2562 ถึง 22 พฤศจิกายน 2562
- ค่ายโครงการแนะแนววิชาชีพทางวิศวกรรมเคมีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง ครั้งที่ 7 วันที่ 17 - 20 ธันวาคม 2560
- ค่ายโครงการแนะแนววิชาชีพทางวิศวกรรมเคมีพระจอมเกล้าฯ ลาดกระบัง ครั้งที่ 8 วันที่ 5 - 8 มกราคม 2562

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้