



รายงานสหกิจศึกษาฉบับสมบูรณ์

**การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา
และการคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง**

**Design of Piping System for Relieving Liquefied Petroleum Gas to Flare System
and Calculation of Insulation Thickness for High Pressure Steam Line**

นางสาวพรหมยมล เจริญครองสกุล

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559



รายงานสหกิจศึกษาระดับสมบูรณ

การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา
และการคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง
Design of Piping System for Relieving Liquefied Petroleum Gas to Flare System
and Calculation of Insulation Thickness for High Pressure Steam Line

นางสาวพรชยมด เจริญครองสกุล

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน **148498**
วันเดือนปี **30 ต.ค. 2560**

b. 1287050X
i.

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

ปริญญานิพนธ์เรื่อง	การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา และการคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง
โดย	นางสาวพรระยมล เจริญครองสกุล
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ
ผู้นิเทศงาน	คุณพีรพจน์ เพทายพนากิจ วิศวกรส่วนเทคนิคโรงกลั่น คุณธาริณี เกตุสุวรรณ วิศวกรส่วนเทคนิคโรงกลั่น บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

บทคัดย่อ

โครงการสหกิจศึกษานี้ศึกษาการออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผาที่บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ค้างในระบบเมื่อต้องการปิดซ่อมบำรุงระบบท่อขนส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวและระบบจัดเก็บผลิตภัณฑ์ ในปัจจุบันการกำจัดแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ค้างในระบบนั้น บริษัทต้องจ้างบริษัทภายนอกและเสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง นอกจากการออกแบบระบบท่อแล้ว ยังออกแบบ Knockout Drum ตามมาตรฐาน API 521 เพื่อแยกแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะของเหลวออกจากแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะแก๊สก่อนส่งไปยังหอเผา ผลการออกแบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะแก๊สมิขนาด 3 นิ้ว และท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะของเหลวมีขนาด 1 นิ้ว ส่วน Knockout Drum มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร และมีความยาว 3 เมตร นอกจากนี้ยังคำนวณความหนาของฉนวนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูงเพื่อการประหยัดพลังงาน พบว่าเมื่อความหนาของฉนวนความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 200 มิลลิเมตร เป็น 250 และ 300 มิลลิเมตร สามารถลดความร้อนสูญเสียในระบบได้ 25 และ 60 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ตามลำดับ ทั้งนี้พิจารณาเลือกความหนาของฉนวนที่ 250 มิลลิเมตร เนื่องจากได้อุณหภูมิของไอน้ำตามที่ต้องการโดยไม่ต้องเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นวางท่อส่งไอน้ำจากน้ำหนักของฉนวนความร้อนที่เพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : การออกแบบระบบท่อ แก๊สปิโตรเลียมเหลว หอเผา Knockout Drum ฉนวนความร้อน ท่อส่งไอน้ำ

Report Title	Design of Piping System for Relieving Liquefied Petroleum Gas to Flare System and Calculation of Insulation Thickness for High Pressure Steam Line	
By	Miss Padsayamol Charoenkrongsakul	
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Chemical Engineering	
Year	2016	
Advisor	Assoc. Prof. Dr. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum	
Mentor:	Mr. Peerapot Pataypanakit	Technical Engineer
	Ms. Tharinee Ketsuwan	Technical Engineer
	Bangchak Petroleum Public Company Limited	

ABSTRACT

This co-operative project at Bangchak Petroleum Public Company Limited involved the design of piping system for releasing liquefied petroleum gas or LPG to flare system during the general maintenance of LPG piping system and LPG storage system. Currently, the company employs the outsource company to discharge the remaining LPG in the system before running of the maintenance leading to high operating cost. Besides the design of the piping system, the knockout drum, which is used to separate liquid-phase LPG before sending the LPG to flare system, was designed based on API 521. According to the pipe sizing, the pipe size for LPG in liquid phase is 1 mm and that of gas phase LPG is 3 mm. The designed knockout drum is 1-m diameter and 3-m length. Moreover, for energy saving, the optimum insulation thickness for high pressure steam line was calculated in this project. It was found that by increasing the insulation thickness from 200 mm to 250 and 300 mm can reduce heat loss about 25 and 60 kW/h, respectively. The insulation thickness of 250 mm will be selected because the target steam temperature can be achieved and no additional design load of the structural pipe racks due to the increased insulation weight is required.

Keywords : Piping Design, Liquefied Petroleum Gas, Flare, Knockout Drum, Thermal Insulation, Steam Line

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณคณะผู้บริหารบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าทำโครงการสหกิจศึกษาภายใต้การดูแลจากทีมงานของบริษัท คุณนฤพรธณ สุธรรมเกษม ผู้จัดการส่วนเทคนิคโรงกลั่น และคุณกิตติ บุญเจริญ ผู้ช่วยผู้จัดการส่วนเทคนิคโรงกลั่น ที่ให้คำแนะนำในการทำงานและการวิเคราะห์ปัญหา คุณพีรพจน์ เพทายพนากิจ และ คุณชาริณี เกตุสุวรรณ ที่ชี้แนะให้เห็นภาพรวมของการคำนวณออกแบบทางวิศวกรรม การค้นหาข้อมูลดิบในการคำนวณ และที่วิศวกรรมส่วนเทคนิคโรงกลั่นทุกท่านที่ดูแล ให้คำแนะนำต่างๆ และสอนความรู้เกี่ยวกับกระบวนการผลิตการทำงานของอุปกรณ์แต่ละชนิด รวมทั้งการใช้ภาษา การใช้โปรแกรมในการคำนวณ และให้แนวคิดในการทำงานร่วมกับผู้อื่นในองค์กร

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริตสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์นิเทศที่ให้ความรู้ คำปรึกษาในการทำงาน รวมถึงอบรมสั่งสอนเพื่อพัฒนาศักยภาพในการทำงานมากขึ้น

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณบิดา มารดา ญาติพี่น้องและอาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน ให้ความรู้และกำลังใจในการทำงาน ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานสหกิจศึกษานี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจและหากมีสิ่งใดผิดพลาด ข้าพเจ้าขออ้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

พรชัยมล เจริญครองสกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูปภาพ	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ	2
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ.....	4
2.2 คุณสมบัติของแก๊สปีโตรเลียมเหลว.....	9
2.3 นิยามของของไหล.....	12
2.4 คุณสมบัติของของไหล.....	13
2.5 พฤติกรรมของการไหลในท่อ.....	16
2.6 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลในท่อ.....	18
2.7 การสูญเสียพลังงานของการไหลในท่อ	21
2.8 การหาค่าตัวประกอบเสียดทาน	23
2.9 การไหลแบบอัดตัวได้ในท่อ.....	27
2.10 ระบบท่อเผา.....	29
2.11 ระบบระบายความดัน	37
2.12 ระบบผลิตพลังงานร่วม	41
2.13 ฉนวนกันความร้อน	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.14 การถ่ายเทความร้อน	44
บทที่ 3 การดำเนินงาน	47
3.1 การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปีโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา	47
3.2 การคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง	55
บทที่ 4 ผลการดำเนินงาน	60
4.1 การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปีโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา	60
4.2 การคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง	64
บทที่ 5 สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ	68
5.1 การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปีโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา	69
5.2 การคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง	69
บรรณานุกรม	71
ภาคผนวก	72
ภาคผนวก ก ข้อมูลการคำนวณ	73
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณออกแบบขนาดของ Horizontal Knockout Drum	84
ภาคผนวก ค ตัวอย่างการคำนวณส่งแก๊สปีโตรเลียมไปยังระบบหอเผาและตั้งทิ้งสาร	93
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง	97

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานรอง.....	23
4.1 ข้อมูลผลการคำนวณ Horizontal Knockout Drum	62
4.2 ข้อมูลความดันภายในระบบ	62
4.3 แสดงค่าผลการคำนวณและค่าตามมาตรฐานการออกแบบของท่อแก๊ส	63
4.4 แสดงค่าผลการคำนวณของท่อของเหลว.....	63
4.5 ผลการคำนวณอุณหภูมิไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม	64
4.6 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมและ หลังผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจนในกรณีปกติ.....	65
4.7 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมในกรณี ไม่สามารถรับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจนได้.....	66
4.8 แสดงผลการคำนวณความร้อนสูญเสียของระบบที่ความหนาแน่นต่างๆ.....	66
4.9 แสดงผลการคำนวณความร้อนสูญเสียและค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้.....	67
ก.1 องค์ประกอบของแก๊สปีโตรเลียมเหลว	73
ก.2 สมดุลไอ-ของเหลวของแก๊สปีโตรเลียมเหลวที่ภาวะต่างๆ.....	73
ก.3 ตารางคำนวณค่า Drag Coefficient.....	74
ก.4 เกณฑ์การออกแบบท่อแก๊ส.....	75
ก.5 ข้อมูลไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม	76
ก.6 ข้อมูลไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน	78
ก.7 ข้อมูลไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor	81

สารบัญรูปภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ.....	4
2.2 ความแตกต่างระหว่างของเหลวกับแก๊ส	13
2.3 เปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วของการไหลแบบต่างๆ ในท่อกลม.....	23
2.4 Ground Flare	30
2.5 Elevated Flare	31
2.6 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบหอเผา.....	32
2.7 Vertical Knock-Out Drum	34
2.8 Water Seal Pot.....	35
2.9 ส่วนประกอบของ Pilot Burners และ Ring Steam Burner	36
2.10 ระบบไฟฟ้าพลังงานร่วม	41
2.11 การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อ	45
2.12 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดในรูปของ Bulk Temperature.....	46
3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการออกแบบ Horizontal Knockout Drum.....	48
3.2 ค่า Drag Coefficient	49
3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการออกแบบระบบท่อ	52
3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการคำนวณความหนาแน่นของไอและความดันสูง	56
3.5 แผนภาพแสดงระบบขนส่งไอน้ำเข้าอุปกรณ์ 4k-4001 Compressor.....	56
4.1 แผนภาพแนวทางติดตั้งระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา	60
4.2 แผนภาพการติดตั้งระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา	61
ก.1 กราฟ Drag Coefficient	75
ข.1 ค่า Drag Coefficient	85
ข.2 ปริมาตรทรงกระบอกแนวนอน.....	89

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) ดำเนินธุรกิจพลังงาน กิจการหลักได้แก่การประกอบธุรกิจโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม ตั้งแต่การจัดหาน้ำมันดิบทั้งจากในและต่างประเทศ มากล้นเป็นน้ำมันสำเร็จรูปที่ได้มาตรฐานและจัดจำหน่ายผ่านเครือข่ายสถานีบริการน้ำมันบางจาก รวมถึงได้ขยายกิจการสู่ธุรกิจผลิตไฟฟ้าจากเซลล์แสงอาทิตย์ที่เป็นพลังงานสะอาดจากธรรมชาติ ธุรกิจผลิตพลังงานชีวภาพ ธุรกิจสำรวจและผลิตน้ำมันปิโตรเลียม และธุรกิจเกี่ยวเนื่องด้านนวัตกรรม (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด, 2559)

โรงกลั่นน้ำมันบางจาก เป็น โรงกลั่นแบบ Complex Refinery ประกอบด้วยขั้นตอนในการผลิตหลักๆ 4 ขั้นตอน ได้แก่ การกลั่นลำดับส่วน การปรับปรุงคุณภาพ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง และการผสมผลิตภัณฑ์ บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) มีการพัฒนากระบวนการผลิตอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้การผลิตมีประสิทธิภาพภายใต้การปฏิบัติการที่ปลอดภัยสูงสุด การกลั่นลำดับส่วนจะแยกน้ำมันดิบออกเป็นผลิตภัณฑ์โดยอาศัยคุณสมบัติของจุดเดือดที่ต่างกันของส่วนผสมต่างๆ การปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์ คือการกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ปนมากับน้ำมันดิบและติดตามในผลิตภัณฑ์ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นการทำให้โครงสร้างในระดับโมเลกุลของน้ำมันเปลี่ยนแปลง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและราคาสูงขึ้น การผสมผลิตภัณฑ์เป็นการผสมน้ำมันหรือผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ซึ่งอาจจะมีการเติมสารปรุงแต่งคุณภาพเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตรงตามมาตรฐานที่กำหนดทั้งของกระทรวงพลังงานและลูกค้า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตคือ แก๊สเชื้อเพลิง แก๊สหุงต้มหรือแก๊สปิโตรเลียมเหลว แนฟทาเบา น้ำมันเบนซิน น้ำมันเครื่องบิน น้ำมันก๊าด และน้ำมันเตา หลังจากที่ได้ผลิตภัณฑ์จากกระบวนการผลิตแล้ว ผลิตภัณฑ์ต่างๆ จะถูกส่งไปยังถังเก็บเพื่อรอการขนส่งต่อไป

สำหรับระบบจัดเก็บแก๊สปิโตรเลียมเหลว จะมีการหยุดระบบประจำปีเพื่อซ่อมแซมหรือเปลี่ยนอุปกรณ์ ซึ่งต้องใช้น้ำหรือไนโตรเจนนำแก๊สปิโตรเลียมเหลวในระบบท่อเข้าถังเก็บทรงกลม และต้องไล่แก๊สปิโตรเลียมเหลวบางส่วนที่ยังคงค้างระบบ ซึ่งทางบริษัทจะจ้างบริษัทภายนอกมาจัดการกับ

แก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ค้างในระบบ และมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการสูง ดังนั้นทางบริษัทจึงต้องการ ออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ยังคงค้างในระบบ เพื่อไปกำจัดที่ระบบหอเผา

นอกจากนี้บริษัทยังมีระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration System) ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า และไอน้ำใช้ภายในโรงงาน ซึ่งไอน้ำที่ผลิตออกมาจะส่งออกไปยังส่วนต่างๆ ตามระบบท่อส่งไอน้ำ แต่เนื่องจากระบบท่อส่งไอน้ำไปยังหน่วยกลั่นที่ 4 มีระยะไกล ทำให้มีความร้อนสูญเสียมากและอุณหภูมิของไอน้ำจึงต่ำลง เกิดปัญหาเกี่ยวกับอุปกรณ์ที่รับไอน้ำไปใช้งานเนื่องจากไอน้ำเกิดการกลั่นตัวและกัดกร่อนเกิดความเสียหาย แก่อุปกรณ์ ดังนั้นจึงต้องคำนวณความหนาของฉนวนความร้อนที่เหมาะสมสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูงเพื่อลดความร้อนสูญเสียและประหยัดพลังงาน รวมทั้งป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์

1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 เพื่อออกแบบระบบท่อแก๊สปิโตรเลียมเหลวรวมทั้ง Knockout Drum เชื่อมต่อเข้าระบบหอเผา
- 1.2.2 เพื่อลดความร้อนสูญเสียในระบบท่อส่งไอน้ำความดันสูง โดยคำนวณความหนาของฉนวนความร้อนที่เหมาะสม

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา
 - 1.3.1.1 ศึกษาและวิเคราะห์หลักการทำงานของระบบส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวในปัจจุบัน
 - 1.3.1.2 ศึกษาและออกแบบระบบท่อเพื่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา
 - 1.3.1.3 สรุปข้อมูลการคำนวณระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวและจัดทำ Design Specification
- 1.3.2 การคำนวณความหนาของฉนวนความร้อนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง
 - 1.3.2.1 ศึกษาและวิเคราะห์ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบท่อส่งไอน้ำความดันสูง
 - 1.3.2.2 คำนวณความร้อนสูญเสียหลังการเพิ่มความหนาฉนวนและคำนวณความร้อนสูญเสียที่สามารถลดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3.2.3 สรุปข้อมูลการคำนวณความหนาของฉนวนความร้อนและจัดทำ Design Specification

1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.4.1 มีความรู้และความเข้าใจในการคำนวณออกแบบระบบท่อแก๊สปิโตรเลียมเหลว รวมทั้งอุปกรณ์ความปลอดภัยที่ใช้ในระบบ

1.4.2 มีความรู้ ความเข้าใจ และสามารถคำนวณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบท่อส่งไอน้ำ ความดันสูง



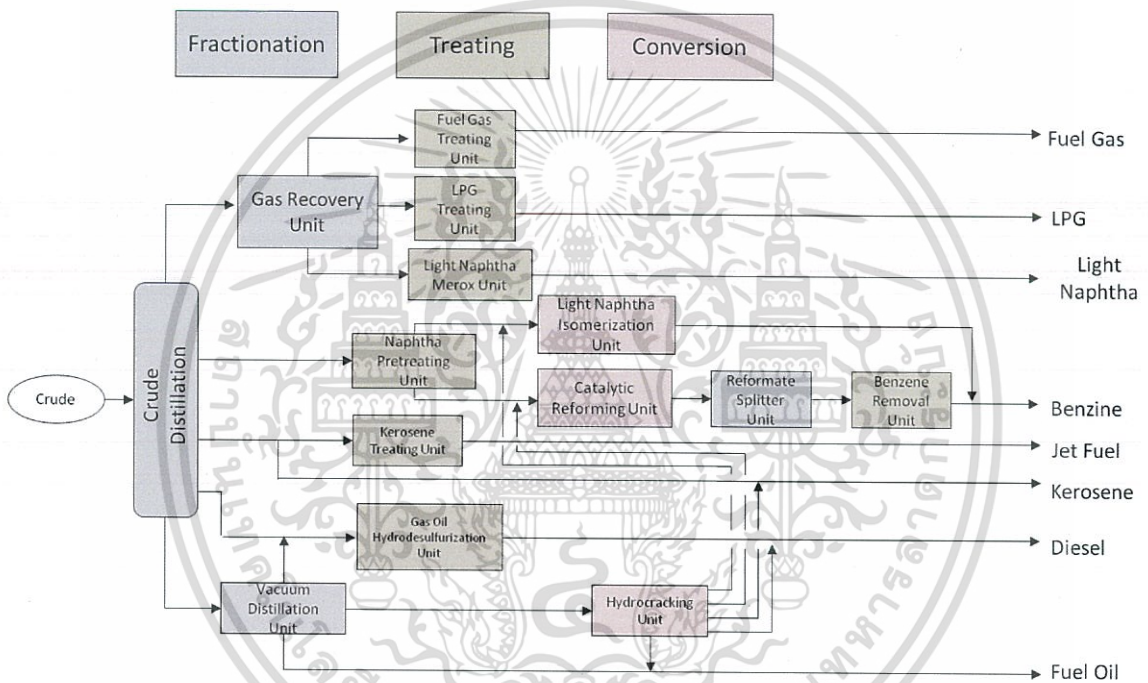
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน))

กิจการหลักของบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) คือ โรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมซึ่งเป็นโรงกลั่นแบบ Complex Refinery ประกอบด้วยขั้นตอนในการผลิตหลักๆ 4 ขั้นตอน



รูปที่ 2.1 กระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ

ที่มา : บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

2.1.1 ขั้นตอนการกลั่นลำดับส่วน (Fractionation Distillation)

เป็นขั้นตอนการแยกองค์ประกอบในน้ำมันดิบออกตามความแตกต่างของจุดเดือด ประกอบด้วยหน่วยการผลิตต่างๆ ดังนี้

2.1.1.1 หน่วยกลั่นแยกน้ำมันดิบ (Crude Distillation Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่แยกองค์ประกอบในน้ำมันดิบให้เป็นน้ำมันกึ่งสำเร็จรูป อาศัยคุณสมบัติของจุดเดือดของน้ำมันแต่ละชนิด น้ำมันดิบจากถังเก็บจะถูกส่งผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน (Heat Exchanger) และเตาต้มน้ำมัน (Furnace) เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนส่งเข้าสู่หอกลั่น น้ำมันที่มีจุดเดือดต่ำจะออกจากหน่วยกลั่นทางด้านบน ส่วนน้ำมันที่มีจุดเดือดสูงกว่าจะออกจากหอกลั่นในระดับที่ต่ำลงมา ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหน่วยจะถูกส่งไปยังกระบวนการกลั่นลำดับต่อไป

2.1.1.2 หน่วยแยกแก๊ส (Gas Recovery Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่รับแก๊สที่ได้จากหน่วยกลั่นแยกน้ำมันดิบรวมทั้งน้ำมันแนฟทาเบาแยกออกเป็น แก๊สเชื้อเพลิงที่ใช้ในกระบวนการกลั่น แก๊สหุงต้ม และน้ำมันแนฟทาเบา ซึ่งจะถูกส่งไปยังกระบวนการกลั่นลำดับต่อไปเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น

2.1.1.3 หน่วยกลั่นแยกสุญญากาศ (Vacuum Distillation Unit)

เป็นหน่วยที่นำน้ำมันหนักมากลั่นซ้ำที่หอกลั่นสุญญากาศเพื่อแยกน้ำมันหนักตามคุณสมบัติของจุดเดือด ผลิตภัณฑ์ที่ได้แยกออกเป็น แก๊สออยล์สุญญากาศชนิดเบาซึ่งส่งไปหน่วยกำจัดกำมะถัน แก๊สออยล์สุญญากาศชนิดหนักถูกส่งไปยังหน่วยแตกโมเลกุลน้ำมัน และกากน้ำมันจะส่งไปเป็นน้ำมันเตา

2.1.1.4 หน่วยแยกน้ำมันรีฟอร์มเมท (Reformate Splitter Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กลั่นแยกน้ำมันรีฟอร์มเมท ที่ได้จากหน่วยรีฟอร์มเมอร์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้แยกออกเป็น สารที่มีจำนวนคาร์บอน 5 อะตอม ซึ่งจะส่งเข้าหน่วยผลิตแก๊สไฮโดรเจน และถูกใช้ในการผสมแก๊สโซลีน น้ำมันรีฟอร์มเมทชนิดเบาที่ไม่อิ่มตัว จะถูกส่งไปหน่วยกำจัดเบนซีน และน้ำมันรีฟอร์มเมทชนิดหนักจะถูกใช้ในการผสมเป็นน้ำมันแก๊สโซลีน

2.1.2 ขั้นตอนการปรับปรุงคุณภาพ (Treating)

เป็นขั้นตอนในการกำจัดสิ่งเจือปนในน้ำมันที่เมื่อนำไปใช้งานแล้ว จะเกิดผลเสียต่ออุปกรณ์และสิ่งแวดล้อม

2.1.2.1 หน่วยปรับปรุงคุณภาพแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel Gas Treating Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดกำมะถันในแก๊สเชื้อเพลิง สารละลายต่างเอมีนจะถูกใช้ เป็นเป็นตัวดูดซับกำมะถันที่อยู่ในแก๊สเชื้อเพลิงออก แก๊สเชื้อเพลิงเหล่านี้จะถูกใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ของกระบวนการกลั่น ส่วนกำมะถันที่แยกได้จะส่งไปหน่วยผลิตกำมะถัน

2.1.2.2 หน่วยปรับปรุงคุณภาพแก๊สปิโตรเลียมเหลว (LPG Treating Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดกำมะถันในแก๊สปิโตรเลียมเหลว แก๊สปิโตรเลียมเหลวจากหน่วยแยกแก๊สจะถูกส่งเข้าอุปกรณ์ที่ใช้กำจัดกำมะถันในรูปแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก่อนที่จะผ่านไปยังอุปกรณ์ที่ใช้เปลี่ยนกำมะถันพวกเมอร์แคปแทนให้กลายเป็นไคซัลไฟด์ด้วยการเติมอากาศและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ขึ้น และแยกไคซัลไฟด์ออก แก๊สปิโตรเลียมเหลวที่มีกำมะถันต่ำ จะถูกส่งเข้าสู่ถังเก็บเพื่อรอการจำหน่าย

2.1.2.3 หน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำมันเนฟทา (Naphtha Pretreating Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดกำมะถันในน้ำมันเนฟทา โดยใช้ความร้อนและตัวเร่งปฏิกิริยา น้ำมันเนฟทาจากหน่วยกลั่นแยกน้ำมันดิบจะถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเตาต้มน้ำมัน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสม ก่อนส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนสารกำมะถันเป็นไคซัลไฟด์ แก๊สนี้จะถูกแยกออกจากน้ำมัน ไปกับ Off Gas และส่งไปรวมกับแก๊สเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเจือปน ส่วนน้ำมันจะถูกแยกเป็นน้ำมันเนฟทาเบาและน้ำมันเนฟทาหนัก น้ำมันเหล่านี้จะถูกส่งไปยังกระบวนการกลั่นลำดับต่อไปเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของน้ำมัน

2.1.2.4 หน่วยปรับปรุงคุณภาพเคโรซีน (Kerosene Treating Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดกำมะถันในเคโรซีน ที่เปลี่ยนเมอร์แคปแทนให้กลายเป็นไคซัลไฟด์ด้วยการเติมอากาศและใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิไดซ์ขึ้น เคโรซีนจากหอกถันจะถูกส่งผ่านอุปกรณ์เพื่อปรับสภาพให้เหมาะสมก่อนเข้าเครื่อง หลังจากนั้นเคโรซีนจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์กำจัดสิ่งเจือปนอื่นๆ รวมทั้งปรับสภาพให้เหมาะสมก่อนจะผลิตเป็นน้ำมันเครื่องบิน ก่อนจะส่งเข้าสู่ถังเก็บเพื่อรอการจำหน่าย

2.1.2.5 หน่วยปรับปรุงคุณภาพแก๊สออยล์ (Gas Oil Hydrodesulfurization Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดกำมะถันออกจากน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว ใช้แก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงและตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วย น้ำมันดีเซลและน้ำมันแก๊สออยล์จากหน่วยกลั่นแยกน้ำมันดิบจะถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเตาต้มน้ำมัน เพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนกำมะถันให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แก๊สนี้จะถูกแยกออกจากน้ำมัน และส่งไปรวมกับแก๊สเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเจือปนเพื่อกำจัดกำมะถันต่อไป ส่วนน้ำมันดีเซลหมุนเร็วที่มีปริมาณกำมะถันต่ำจะส่งไปเก็บที่ถังเก็บเพื่อรอการจำหน่าย

2.1.2.6 หน่วยกำจัดเบนซีน (Benzene Removal Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดเบนซีนออกจากน้ำมันรีฟอร์มเมทชนิดเบาที่ไม่อิ่มตัว ไซแก๊สไฮโดรเจนที่อุณหภูมิสูงและตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวช่วย น้ำมันรีฟอร์มเมทชนิดเบาซึ่งไม่อิ่มตัวจะถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสมก่อนส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์ เกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนเบนซีนเป็นไซโคลเฮกเซนที่อิ่มตัว จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนและ Off Gas ที่เกิดจากปฏิกิริยาจะถูกแยกออก ส่วนน้ำมันรีฟอร์มเมทชนิดเบาที่อิ่มตัว จะถูกนำไปใช้ในการผสมเป็นน้ำมันแก๊สโซลีน

2.1.2.7 หน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำ (Sour Water Stripper Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และแก๊สแอมโมเนียออกจากน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต แก๊สที่ถูกกำจัดออกจะถูกนำไปเผาพร้อมกับเชื้อเพลิงที่เตาเผาในหน่วยกลั่นแยกน้ำมันดิบ หรือส่งไปหน่วยผลิตกำมะถัน ส่วนน้ำที่มีกำมะถันต่ำจะถูกนำกลับมาใช้ใหม่บางส่วนและส่วนที่เหลือจะส่งไปยังหน่วยบำบัดน้ำทิ้ง

2.1.2.8 หน่วยปรับปรุงคุณภาพโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แล้ว (Spent Caustic Treating Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่กำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ที่มาจากหน่วยปรับปรุงคุณภาพแก๊สปิโตรเลียมเหลว และเคโรซีน โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้แล้ว จะถูกปรับสภาพให้เป็นกรดและส่งเข้าอุปกรณ์เพื่อทำปฏิกิริยากำจัดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์จะถูกนำไปเผาพร้อมกับเชื้อเพลิงที่เตาเผาในหน่วยกลั่นแยกน้ำมันดิบ ส่วนโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้วจะถูกปรับสภาพค่าความเป็นกรด – ด่าง ก่อนส่งไปยังหน่วยบำบัดน้ำทิ้ง

2.1.3 การเปลี่ยนแปลง โครงสร้าง (Conversion)

เป็นการทำให้โครงสร้างในระดับโมเลกุลของน้ำมันเปลี่ยนแปลง เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและราคาสูงขึ้น

2.1.3.1 หน่วยไอโซเมอไรเซชัน (Light Naphtha Isomerization Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันแนฟทาเบาให้เป็นโครงสร้างที่มีค่าออกเทนสูงขึ้น เรียกว่า น้ำมันไอโซเมอร์เรท น้ำมันแนฟทาเบาจากหน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำมันแนฟทา จะถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสม ก่อนส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใช้แก๊สไฮโดรเจนที่มีอุณหภูมิสูงและตัวเร่งปฏิกิริยา เกิดการเปลี่ยน

โครงสร้างโมเลกุลแบบเส้นตรงให้เป็น โมเลกุลแบบกิ่ง ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีค่าออกเทนสูงขึ้น น้ำมัน ไอโซเมอร์เรทที่ได้จะถูกส่งไปถังเก็บเพื่อรอการผสมเป็นน้ำมันเบนซินชนิดต่างๆ

2.1.3.2 หน่วยรีฟอร์มเมอร์ (Catalytic Reforming Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยน โครงสร้าง โมเลกุลของน้ำมันเนฟทาหนักให้เป็น โครงสร้างที่มีค่าออกเทนสูงขึ้น เรียกว่า น้ำมันรีฟอร์มเมท น้ำมันเนฟทาหนักจากหน่วยปรับปรุงคุณภาพ น้ำมันเนฟทา จะถูกส่งผ่านเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและเตาต้มน้ำมันเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้เหมาะสม ก่อนส่งเข้าเครื่องปฏิกรณ์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาที่ไซแกสไฮโดรเจนที่มีอุณหภูมิสูงและตัวเร่งปฏิกิริยา เป็น ตัวการเปลี่ยน โครงสร้าง โมเลกุลแบบต่างๆ ให้เป็น โมเลกุลแบบที่เป็นวงแหวน ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มี ค่าออกเทนสูงขึ้น น้ำมันรีฟอร์มเมทที่ได้ จะถูกส่งไปถังเก็บเพื่อรอการผสมเป็นน้ำมันเบนซินชนิดต่างๆ

2.1.3.3 หน่วยแตกโมเลกุล (Hydrocracking Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่แตกตัวน้ำมันหนักออกเป็นน้ำมันเบา ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใช้แก๊ส ไฮโดรเจน ในการแตกตัวน้ำมันหนัก ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากหน่วยแตกโมเลกุล ได้แก่ แก๊สเชื้อเพลิง แก๊สปิโตรเลียมเหลว น้ำมันเนฟทาเบา น้ำมันเนฟทาหนัก เคโรซีน น้ำมันดีเซล และน้ำมันเตา น้ำมัน บางชนิดจะส่งเข้าถังผลิตภัณฑ์ และบางชนิดจะถูกส่งไปยังหน่วยกลั่นเดิมเพื่อเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ให้มีมูลค่าสูงขึ้น

2.1.4 ขั้นตอนการผสมผลิตภัณฑ์ (Blending)

เป็นการผสมน้ำมันหรือผลิตภัณฑ์ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป อาจมีการเติมสารปรุงแต่งคุณภาพ (Additive) เพื่อทำให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพตรงตามมาตรฐานที่กำหนดทั้งของกระทรวงพลังงานและ ถูกค้า

2.1.5 หน่วยสนับสนุนหรือหน่วยควบคุมมลพิษ

เป็นหน่วยการผลิตพิเศษที่มีหน้าที่ในการสนับสนุนกระบวนการผลิต และควบคุมมลพิษของ ของเสียจากกระบวนการผลิต

2.1.5.1 หน่วยผลิตแก๊สไฮโดรเจน (Hydrogen Plant)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่สนับสนุนหน่วยปรับปรุงคุณภาพน้ำมัน ทำหน้าที่ผลิตแก๊ส ไฮโดรเจน เพื่อส่งไปใช้ในหน่วยแตกโมเลกุล สารตั้งต้นอาจเป็นแก๊สปิโตรเลียมเหลว แก๊สเชื้อเพลิง หรือ

น้ำมันเนฟทาเบา สารตั้งต้นจะถูกกำจัดกำมะถัน คลอไรด์ และโลหะหนักก่อนส่งเข้าทำปฏิกิริยา เพื่อแยกแก๊สไฮโดรเจนออกและทำให้บริสุทธิ์ก่อนส่งไปใช้

2.1.5.2 หน่วยผลิตกำมะถัน (Sulfur Recovery Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่เปลี่ยนรูปกำมะถันที่แยกออกจากแก๊สเชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเจือปนอยู่ให้เป็นกำมะถันเหลว ซึ่งใช้ความร้อน อากาศ และตัวเร่งปฏิกิริยา กำมะถันที่ได้จากกระบวนการจะถูกส่งเข้าถังเก็บเพื่อรอการจำหน่าย

2.1.5.3 หน่วยบำบัดน้ำทิ้ง (Wastewater Treatment Unit)

เป็นหน่วยที่ทำหน้าที่บำบัดน้ำทิ้งจากระบบต่างๆ ของโรงกลั่น น้ำทิ้งที่ไม่มีสารปนเปื้อนจะถูกปรับสภาพให้เป็นกลางและระบายลงสู่บ่อพักน้ำ ส่วนน้ำทิ้งที่ได้จากกระบวนการผลิตจะต้องนำมาผ่านขั้นตอนการบำบัดทางกายภาพซึ่งเป็นการแยกน้ำมันที่ลอยอยู่บนผิวน้ำออกจากน้ำ ที่ใช้อุปกรณ์ดักเก็บน้ำมัน อุปกรณ์แยกน้ำมัน และการใช้ฟองอากาศจากระบบ Dissolved Air Floatation ก่อนผ่านเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ซึ่งประกอบด้วยบ่อเติมอากาศ บ่อตกตะกอน และถังกรองตะกอน ลดค่า BOD และค่าสารแขวนลอยให้น้อยลงจนมีคุณภาพได้มาตรฐานน้ำทิ้งของกระทรวงอุตสาหกรรม ก่อนลงสู่บ่อพักน้ำและระบายลงคลองสาธารณะ

2.2 คุณสมบัติของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน))

แก๊สปิโตรเลียมเหลวเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ซึ่งมีองค์ประกอบของแก๊สโพรเพน นอร์มอลบิวเทนและไอโซบิวเทน เป็นส่วนใหญ่ จึงเป็นแก๊สที่หนักกว่าอากาศ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น

2.2.1 แก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่ออยู่ในสถานะของเหลว

2.2.1.1 จุดเดือด

เนื่องจากแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีจุดเดือดต่ำมาก คือ โพรเพนมีจุดเดือดเท่ากับ -42 องศาเซลเซียส นอร์มอลบิวเทนมีจุดเดือดเท่ากับ -0.5 องศาเซลเซียส และไอโซบิวเทนมีจุดเดือดเท่ากับ - 11.7 องศาเซลเซียส ดังนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีสถานะเป็นแก๊สที่อุณหภูมิปกติ และความดันบรรยากาศเว้นเสียแต่จะถูกอัดให้เป็นของเหลวอยู่ในถังภายใต้ความดันหรือนำลงไปแช่เย็นเอาไว้

2.2.1.2 ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะและความถ่วงจำเพาะ

แก๊สปีโตรเลียมเหลวในสถานะที่เป็นของเหลวจะเบากว่าน้ำ ถ้าเกิดมีแก๊สรั่วขึ้นในขณะที่ถูกหุ้มโดยรอบในขณะนั้นต่ำมาก และแก๊สปีโตรเลียมเหลวเกิดไหลลงไปในรางระบายน้ำคูคลองแก๊สปีโตรเลียมเหลวก็จะลอยไปกับน้ำ ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอัคคีภัยในท้องที่ห่างไกลจากบริเวณที่แก๊สปีโตรเลียมเหลวรั่วออกไปได้

นอกจากนี้อุณหภูมิยังมีผลต่อค่าความหนาแน่น คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความหนาแน่นของสารเมื่ออยู่ในสถานะของเหลวจะลดลง

2.2.1.3 ความหนืด

ความหนืดคือ ความสามารถในการต้านทานการไหลของของไหลที่มีต่อภายนอกหรือท่อ ของไหลต่างชนิดกันจะมีความหนืดแตกต่างกัน แก๊สปีโตรเลียมเหลวในสภาพของเหลวจะมีความหนืดน้อยมาก จากคุณสมบัติอันนี้ ทำให้แก๊สเหลวรั่วซึมได้ง่ายกว่าของเหลวชนิดอื่น และนอกจากนี้แก๊สปีโตรเลียมเหลวไม่มีคุณสมบัติในการหล่อลื่น เนื่องจากมีความหนืดต่ำ อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง เช่น ปั๊ม จึงมีการสึกหรอสูง เพราะฉะนั้นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับแก๊สปีโตรเลียมเหลว จึงต้องออกแบบให้เหมาะสมทนต่อการสึกหรอและแรงดันสูงได้ อุณหภูมิจะมีผลต่อความหนืดของของไหล กล่าวคือ ของไหลที่มีสถานะเป็นของเหลวเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ค่าความหนืดจะลดลง แต่ถ้าเป็นแก๊ส เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นค่าความหนืดก็สูงขึ้นด้วย

2.2.1.4 ความดันไอ

แก๊สปีโตรเลียมเหลวเมื่อถูกบรรจุอยู่ในภาชนะปิดภายใต้ความดันจะมีสถานะเป็นของเหลว แก๊สปีโตรเลียมเหลวจะระเหยเป็นไอเต็มช่องว่างที่อยู่เหนือระดับส่วนที่เป็นของเหลวจนกระทั่งถึงจุดอิ่มตัว (Saturation Point) จึงจะหยุดระเหย ค่าความดันของแก๊สปีโตรเลียมเหลวที่จุดอิ่มตัวนี้เรียกว่า “ค่าความดันไออิ่มตัว” ค่าความดันไออิ่มตัวเป็นตัวบ่งบอกคุณสมบัติการระเหยของสาร กล่าวคือ ถ้าสารใดมีความดันไอสูง แสดงว่าสารนั้นสามารถระเหยได้เร็ว และเป็นค่าที่ขึ้นกับอุณหภูมิโดยตรง ถ้าอุณหภูมิสูง ค่าความดันไออิ่มตัวก็สูงขึ้นด้วย

2.2.2 แก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่ออยู่ในสถานะเป็นแก๊ส

2.2.2.1 ความหนาแน่น ปริมาตรจำเพาะและความถ่วงจำเพาะ

ค่าความถ่วงจำเพาะของแก๊สปิโตรเลียมเหลวเมื่อเป็นแก๊สจะแสดงถึงอัตราส่วนของความหนาแน่นระหว่างแก๊สกับอากาศที่อุณหภูมิและความดันเดียวกัน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งว่าเป็นตัวเลขที่ชี้ให้เห็นว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลว เมื่อเป็นแก๊สจะหนักเป็นกี่เท่าของอากาศ

ที่อุณหภูมิ 15.5 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ โพรเพนมีค่าความถ่วงจำเพาะเมื่อเป็นแก๊ส เท่ากับ 1.5 บิวเทนมีค่าความถ่วงจำเพาะเมื่อเป็นแก๊ส เท่ากับ 2.0 ดังนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะที่เป็นแก๊สจะหนักกว่าอากาศเมื่อเกิดการรั่วไหลขึ้น แก๊สจะไปรวมตัวอยู่ในที่ต่ำและถ้าบริเวณที่ต่ำนั้นเป็นรางระบายน้ำหรือคูคลอง แก๊สอาจจะไหลตามน้ำไป ทำให้เกิดอุบัติเหตุไฟไหม้ ณ จุดซึ่งห่างไกลจากบริเวณที่แก๊สรั่วได้

2.2.2.2 ความหนืด

แก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะของแก๊สจะมีความหนืดสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

2.2.2.3 ความสามารถในการอัดตัวของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (Compressibility Factor)

สำหรับแก๊สอุดมคติความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ ความดันและปริมาตร สามารถแสดงโดย สมการสภาวะ (Equation of State) แต่สำหรับแก๊สปิโตรเลียมเหลวจะมีลักษณะเบี่ยงเบนไปจากแก๊สอุดมคติ ดังนั้น เพื่อให้สามารถใช้สมการสภาวะได้ จึงจำเป็นต้องเพิ่มค่าความสามารถในการอัดตัวของแก๊ส (Compressibility Factor, Z) เข้าไปในสมการ

2.2.2.4 ช่วงการลุกไหม้

แก๊สที่สันดาปได้จะมีช่วงส่วนผสมกับอากาศเพียงช่วงเดียวที่จุดไฟแล้วลุกไหม้ได้ เพราะมีอากาศผสมอยู่ในปริมาณที่พอเหมาะ ช่วงการลุกไหม้ได้จะแสดงค่าเป็นอัตราส่วนร้อยละ ปริมาตรแก๊สต่ออากาศ ค่าทางด้านความเข้มข้นสูงของช่วงการลุกไหม้ เรียกว่าค่าขอบบน ส่วนทางด้านต่ำเรียกว่าค่าขอบล่าง แก๊สปิโตรเลียมเหลวจะสามารถลุกไหม้หรือติดไฟได้ก็ต่อเมื่อมีแก๊สผสมอยู่ในอากาศ 2-9% คือถ้ามีแก๊สปิโตรเลียมเหลวต่ำกว่า 2 ส่วนหรือมากกว่า 9 ส่วนในส่วนผสมของแก๊สกับอากาศกับอากาศ 100 ส่วน ส่วนผสมนั้นก็จะไม่ติดไฟ

2.2.2.5 อุณหภูมิของจุดติดไฟ (Ignition Temperature)

เมื่อค่อยๆ เพิ่มอุณหภูมิให้กับเชื้อเพลิงจนเลยอุณหภูมิค่าหนึ่งแล้ว เชื้อเพลิงก็จะเริ่มลุกไหม้เองแม้จะไม่มีประกายไฟหรือสาเหตุของการติดไฟ อุณหภูมิต่ำสุดที่เริ่มเกิดการลุกไหม้ตาม

ธรรมชาตินี้เรียกว่าอุณหภูมิของจุดติดไฟ เนื่องจากอุณหภูมิจุดติดไฟของโพรเพน คือ 460-580 องศาเซลเซียส และของบิวเทนคือ 410-550 องศาเซลเซียส ดังนั้นแก๊สปิโตรเลียมเหลวจึงติดไฟได้ยากกว่าเมื่อเทียบกับน้ำมันเบนซินซึ่งมีจุดติดไฟ 280 - 430 องศาเซลเซียสและน้ำมันดีเซล 250 - 340 องศาเซลเซียส ดังนั้น จึงกล่าวได้ว่าแก๊สปิโตรเลียมเหลวมีความปลอดภัยสูงกว่า

2.3 นิยามของของไหล (ฉัตร ออวะลาม, 2553)

ของไหล (Fluid) หมายถึง สสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่อง เมื่อถูกกระทำด้วยแรงเค้นเฉือน ซึ่งหมายความว่า เมื่อใดที่มีแรงเค้นเฉือนมากระทำ ของไหลจะเกิดการขยับตัว และเปลี่ยนรูปร่างไป เช่นเมื่อเทของไหลลงในภาชนะ ของไหลจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างต่อเนื่องไปชั่วขณะหนึ่ง เป็นเพราะรูปร่างของของไหลในขณะนั้น ไม่สอดคล้องกับรูปร่างของภาชนะ จึงทำให้เกิดแรงเค้นเฉือนขึ้นภายในของเหลว กระบวนการปรับตัวนี้จะดำเนินต่อเนื่อง ไปจนกระทั่งแรงเค้นเฉือนหายไป ซึ่งก็คือสถานะที่ของไหลมีรูปร่างเหมือนกับภาชนะ บริเวณผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับภาชนะจะมีแต่แรงเค้นตั้งฉากเท่านั้น หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ ในขณะที่ของไหลเคลื่อนที่จะต้องมีแรงเค้นเฉือนเกิดขึ้นในทางตรงกันข้าม หากของไหลไม่มีการเคลื่อนที่ ที่สถานะนั้นจะไม่มีแรงเค้นเฉือนกระทำอยู่เลย

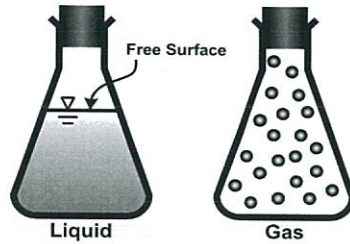
ของไหลสามารถรูปอยู่ได้ในสองสถานะ

2.3.1 ของเหลว (Liquid)

มีรูปร่างไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงได้ตามภาชนะที่บรรจุ แต่จะมีขอบเขตแบ่งระหว่างของไหลนั้นกับของไหลอื่นอย่างชัดเจน เรียกว่า ผิวอิสระ (Free Surface) ตัวอย่างเช่น ถ้านำของเหลวที่บรรจุอยู่ในภาชนะแล้วตั้งไว้ ของเหลวชนิดนั้นจะมีผิวอิสระแบ่งกับอากาศ และผิวอิสระนั้นจะวางตัวในแนวราบเสมอ นอกจากนี้ของเหลวยังมีคุณสมบัติที่ยากต่อการบีบอัด เนื่องจากระยะห่างระหว่างโมเลกุลค่อนข้างน้อย

2.3.2 แก๊ส (Gas)

มีรูปร่างไม่แน่นอน เปลี่ยนแปลงได้ตามภาชนะที่บรรจุ โดยมีลักษณะแพร่กระจายไปทั่วภาชนะ ไม่มีผิวอิสระ และถูกบีบอัดได้ง่ายกว่าของเหลว เนื่องจากมีระยะห่างระหว่างโมเลกุลมากกว่าของเหลว



รูปที่ 2.2 ความแตกต่างระหว่างของเหลวกับแก๊ส

ที่มา : รัชฎนคร ออกกะลาม, 2553

2.4 คุณสมบัติของของไหล (Yanus A. Cengel, 2014)

2.4.1 ความหนาแน่น (Density)

ความหนาแน่น หมายถึง มวลของของไหลในหนึ่งหน่วยปริมาตรสัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ “ ρ ”

$$\rho = \frac{\text{Mass}}{\text{Volume}} = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

โดยที่ m = มวลของของไหล
 V = ปริมาตรของของไหล

ความหนาแน่นของสารแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ ความหนาแน่นของแก๊สส่วนใหญ่จะแปรผันตามความดันและแปรผกผันกับอุณหภูมิ ในทางตรงกันข้าม ของเหลวและของแข็งส่วนใหญ่เป็นสารที่อัดตัวไม่ได้ จึง การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจากผลของความดันจึงมีค่าน้อยมาก ส่วนผลจากอุณหภูมิจะมีค่ามากกว่าผลจากความดัน แต่อย่างไรก็ตามการคำนวณทางวิศวกรรม จะถือว่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นจากทั้งอุณหภูมิและความดันจะมีค่าน้อยมาก และละทิ้งได้ในการคำนวณ

ความหนาแน่นของแก๊สที่เปลี่ยนแปลงตามความดันและอุณหภูมิ จะสามารถหาได้ด้วยสมการสถานะ ซึ่งสมการที่เป็นที่นิยมและใช้กันอย่างแพร่หลายคือสมการ Ideal Gas Equation Of State ดังแสดงในสมการ (2.2)

$$PV = nRT \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 น้ำหนักจำเพาะ (Specific Weight)

น้ำหนักจำเพาะ หมายถึง น้ำหนักเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของของไหลในหนึ่งหน่วยปริมาตร สัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ “ γ ”

$$\gamma = \frac{\text{Weight}}{\text{Volume}} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (2.3)$$

โดยที่ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 M/S^2)

m = มวลของของไหล

V = ปริมาตรของของไหล

เช่นเดียวกับความหนาแน่น น้ำหนักจำเพาะของของไหลจะไม่คงที่ โดยจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิและความดัน สำหรับสารที่เป็นของเหลว ความดันจะไม่มีผลต่อน้ำหนักจำเพาะมากนัก แต่จะขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมากกว่า

2.4.3 ความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity)

ในบางครั้ง ความหนาแน่นจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับสารอ้างอิงที่รู้จักกันทั่วไป เรียกค่านี้ว่า Specific Gravity หรือ Relative Density ซึ่งหมายถึง อัตราส่วนระหว่างความหนาแน่นของสารหนึ่งๆ กับความหนาแน่นของสารมาตรฐานที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง

ความถ่วงจำเพาะ หมายถึง เป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างค่าความหนาแน่นของของไหลชนิดหนึ่งกับค่าความหนาแน่นของของไหลมาตรฐาน สัญลักษณ์ที่ใช้คือ “ S ” หรือ “ S_g ”

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{STD}} \quad (2.4)$$

สำหรับของเหลวมาตรฐานที่นิยมใช้เปรียบเทียบคือน้ำที่อุณหภูมิ 4°C มีความหนาแน่น 1000 Kg/m^3 และสำหรับแก๊สคืออากาศที่อุณหภูมิ 20°C ความดัน 1 Atm มีความหนาแน่น 1.205 Kg/m^3

2.4.4 ปริมาตรจำเพาะ (Specific Volume)

ปริมาตรจำเพาะ หมายถึง ปริมาตรของของไหลต่อหนึ่งหน่วยมวลสัญลักษณ์ที่ใช้แทน คือ “ v ”

$$v = \frac{\text{Volume}}{\text{Mass}} = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (2.5)$$

2.4.5 ความหนืด (Viscosity)

เนื่องจากของไหลคือสสารที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้อย่างต่อเนื่อง หากพิจารณาของไหลเป็นก้อนอนุภาค เมื่อถูกกระทำด้วยแรงเค้นเฉือน (Shear Stress: τ) อนุภาคของไหลแต่ละชนิด จะมีความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนแปลงรูปร่างต่างกัน ซึ่งเป็นผลมาจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคและการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมระหว่างอนุภาคของของไหลนั้น ความสามารถในการต้านทานการเปลี่ยนรูปร่างอันเนื่องมาจากแรงเค้นเฉือนนี้เราเรียกว่า ความหนืด ในการเคลื่อนที่ของของไหล แรงเค้นเฉือนจะเกิดขึ้นจากแรงเสียดทานระหว่างอนุภาคของของไหลด้วยกันเอง

แรงเค้นเฉือนที่เกิดขึ้นสามารถคำนวณได้จาก

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) \quad (2.6)$$

โดยที่ μ = ความหนืดสัมบูรณ์ (Absolute Viscosity)

v = ความเร็วของของไหล

y = ระยะทางที่ของไหลไหล

สมการข้างต้นเป็นสมการสำหรับหาความเค้นเฉือนของของไหล ที่มีพฤติกรรมเป็นไปตามกฎของนิวตันหรือเรียกสมการนี้ว่า สมการความหนืดของนิวตัน (Newton's Equation Of Viscosity)

จากสมการความหนืดของนิวตันจะเห็นว่า ถ้าอุณหภูมิคงที่ความสัมพันธ์ระหว่างแรงเค้นเฉือน กับ dv/dy จะมีลักษณะเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ μ จึงสรุปได้ว่า สำหรับของไหลมีค่าความหนืดสูง จะต้องใช้แรงเค้นเฉือนมากเพื่อที่จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง

ค่าความหนืดสัมบูรณ์เป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของของไหล ที่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ กล่าวคือ ของไหลที่มีสถานะเป็นของเหลว เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ความหนืดสัมบูรณ์จะลดลง เป็นเพราะ

เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอนุภาคของของเหลวจะลดลง ส่วนของไหลในสถานะแก๊ส อนุภาคมีการเคลื่อนไหวยิ่งมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้โอกาสในการชนกันของอนุภาคมีมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุให้ค่าความหนืดสูงขึ้น

ในบางครั้ง ค่าความหนืดอาจแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่าง ความหนืดสัมบูรณ์ ต่อ ความหนาแน่น ซึ่งเรียกว่า ความหนืดจลน์ (Kinematic Viscosity) โดยมีสัญลักษณ์ที่ใช้แทนคือ “ ν ”

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.7)$$

2.4.6 ความสามารถในการบีบอัดตัวของของไหล (Compressibility)

สสารทุกชนิดมีความยืดหยุ่น นั่นหมายความว่าสสารสามารถขยายตัวหรือหดตัวภายใต้สภาวะที่แตกต่างกัน ในของไหล เมื่อถูกบีบอัดหรือมีการเปลี่ยนแปลงความดัน ปริมาตรของของไหลจะเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ความหนาแน่นเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ความสามารถในการเปลี่ยนแปลงปริมาตรนี้ถูกเรียกว่าความสามารถในการบีบอัดตัวของของไหล

หากพิจารณาความสามารถในการบีบอัดตัวของของไหล จะสามารถจำแนกของไหลออกเป็น 2 ประเภทคือ

2.4.6.1 ของไหลที่อัดตัวไม่ได้ หรือบีบอัดตัวได้น้อยมาก (Incompressible Fluid)

คือของไหลที่มีความหนาแน่นคงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความดัน ของไหลประเภทนี้ส่วนใหญ่อยู่ในสถานะของเหลว

2.4.6.2 ของไหลที่อัดตัวได้ (Compressible Fluid)

คือของไหลที่มีความหนาแน่นไม่คงที่เมื่อความดันเปลี่ยนแปลงไป ของไหลประเภทนี้ส่วนใหญ่อยู่ในสถานะแก๊ส

2.5 พฤติกรรมของการไหลในท่อ (ชัยดร ออกกะลาม, 2553)

ในปี ค.ศ. 1883 ออสบอร์น เรย์โนลด์ (Osborne Reynolds) ได้ศึกษาพฤติกรรมของการไหลในท่อ โดยใช้เครื่องมือที่ประกอบด้วยถังน้ำขนาดใหญ่ เชื่อมต่อกับท่อโปร่งใสที่มีวาล์วควบคุมการไหลอยู่ที่ปลายท่อ และถังบรรจุสีขนาดเล็กเชื่อมต่อกับท่อขนาดเล็ก ทำหน้าที่ปล่อยอนุภาคสีเข้าไปภายในท่อโปร่งใส

จากผลการทดลองพบว่า สามารถแบ่งพฤติกรรมการไหลของของไหลภายในท่อได้เป็น 3 ลักษณะคือ

2.5.1 การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow)

จะเกิดกับการไหลของของไหลที่มีความหนืดสูงหรือความเร็วในการไหลต่ำ อนุภาคของของไหลจะเคลื่อนที่อย่างเป็นระเบียบขนานกับทิศทางของการไหล ซึ่งสังเกตได้จากแนวเส้นสีที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จะมีลักษณะเป็นเส้นที่ค่อนข้างตรง และราบเรียบ

2.5.2 การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)

จะเกิดกับการไหลของของไหลที่มีความหนืดต่ำ หรือความเร็วในการไหลมาก อนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไม่เป็นระเบียบ แนวเส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีความแปรปรวนมาก สังเกตได้จากแนวเส้นสีที่เกิดขึ้นจากการทดลอง จะกวัดแกว่งไปมาไม่เป็นระเบียบและมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา

2.5.3 การไหลในช่วงแปรเปลี่ยน (Transition Flow)

เป็นช่วงของการไหลที่กำลังจะพัฒนาพฤติกรรม จากการไหลแบบราบเรียบ ไปเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เป็นช่วงที่ไม่สามารถคาดเดาพฤติกรรมของการไหลได้อย่างแน่นอน เพราะในบางตำแหน่งหรือบางช่วงเวลาใดๆ พฤติกรรมของการไหลอาจเป็นไปได้ทั้งแบบราบเรียบและปั่นป่วน สังเกตได้จากแนวเส้นสีที่เกิดขึ้นจากการทดลอง ในบางตำแหน่งจะมีลักษณะกวัดแกว่งไปมาในขณะที่ส่วนอื่นๆ มีลักษณะราบเรียบ หรือที่ตำแหน่งเดียวกัน ในบางเวลาอาจมีลักษณะราบเรียบ แต่เมื่อเวลาผ่านไปอาจมีลักษณะกวัดแกว่งไปมา ไม่สามารถคาดเดาได้

นอกจากนี้ การศึกษาของเรย์โนลด์ยังพบว่า พฤติกรรมทั้ง 3 ลักษณะสอดคล้องกับค่าของกลุ่มตัวแปรไร้มิติกลุ่มหนึ่ง ซึ่งภายหลังเรียกว่า เรย์โนลด์นัมเบอร์หรือเลขเรย์โนลด์ (Reynolds Number: Re) กล่าวคือ

- ถ้า $Re < 2000$ จะเป็นการไหลแบบราบเรียบ
- $2000 < Re < 4000$ จะเป็นการไหลในช่วงแปรเปลี่ยน
- $Re > 4000$ จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน

เลขเรย์โนลด์ของการไหลในท่อทรงกระบอกคำนวณได้จาก

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (2.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ
 v = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล
 μ = ความหนืดสัมบูรณ์
 ν = ความหนืดจลน์

2.6 สมการพื้นฐานสำหรับการไหลในท่อ (ดูลิวีต ซลตีคซ์, 2559)

หากพิจารณาอนุภาคของของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ในสนามของการไหล ความดัน ความเร็วของอนุภาค รวมถึงแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้น จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องไปตามตำแหน่ง และเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป เพื่อหาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ สามารถวิเคราะห์โดยอาศัยหลักการจากสมการพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง 3 สมการคือ สมการความต่อเนื่อง สมการพลังงาน และสมการโมเมนตัม

2.6.1 สมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation)

สมการความต่อเนื่องหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า กฎการอนุรักษ์มวล (Mass Conservation) การไหลในท่อจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งจะต้องมีมวลคงที่ จะได้ว่า

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad (2.9)$$

โดยที่ Q = อัตราการไหล
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล

2.6.2 สมการพลังงาน (Energy Equation)

สมการพลังงานของการไหลขึ้นต้นนั้นเกิดจากแนวคิดของ Leonhard Euler โดยพิจารณาตัวแปรต่างๆ ไปตามแนวเส้นทางของการไหล (Streamline) ซึ่งต่อมาแบร์นูลลีได้นำสมการของ Euler มาวิเคราะห์ต่อจนได้เป็นสมการพลังงานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายจนถึงปัจจุบัน

2.6.2.1 สมการแบร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)
 P = ความดันของของไหล
 v = ความเร็วของของไหล
 Z = ความสูงของของไหล
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล

หากการไหลไม่มีผลของพลังงานจากภายนอกและการสูญเสียพลังงานจากภายในระบบ ความสัมพันธ์ของตัวแปรของของไหล จะเป็นไปตามสมการที่ (2.10)

มิติของตัวแปรแต่ละเทอมในสมการคือความยาว (L) ซึ่งเป็นมิติเดียวกันกับมิติของพลังงานต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของของไหล และจะเรียกว่า เฮดพลังงาน (Energy Head) หรือเรียกสั้นๆ ว่า เฮด (Head) ซึ่งในแต่ละเทอมก็จะมีชื่อเรียกเฉพาะตามคำนิยามดังนี้

1) เฮดระดับ (Potential Head Or Elevation Head)

คือเฮดของพลังงานศักย์ในรูปของความสูงใช้สัญลักษณ์ z

2) เฮดความดัน (Pressure Head)

คือเฮดของพลังงานศักย์ในรูปของความดันสถิตใช้สัญลักษณ์ $\frac{P}{\rho g}$

3) เฮดความเร็ว (Velocity Head)

คือเฮดของพลังงานจลน์ในรูปของความเร็วใช้สัญลักษณ์ $\frac{v^2}{2g}$

ซึ่งในการไหลจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งพลังงานสามารถเปลี่ยนแปลงรูปแบบไปมาได้ หากไม่มีการสูญเสียเกิดขึ้น พลังงานรวมจะคงที่ อย่างไรก็ตามในความเป็นจริงจะมีการสูญเสียพลังงานเกิดขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างของเหลวและผิวท่อและการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการไหล ดังนั้นสมการดุลพลังงานจึงสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.11)

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho_1 g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad (2.11)$$

เมื่อ h_L คือ การสูญเสียซึ่งจะหักล้างออกจากพลังงานศักย์ในรูปของความดันสถิตในของไหล การสูญเสียนี้จะเกิดขึ้นเมื่อมีการไหลเท่านั้น

2.6.3 สมการ โมเมนตัม (Momentum Equation)

พิจารณาวัตถุใดๆ ที่กำลังเคลื่อนที่ เมื่อแรงภายนอกกระทำ จะเกิดความเร่งขึ้น ทำให้ขนาดหรือทิศทางของความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงความเร็วจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ ถ้าวัตถุนั้นมวลมาก หรือแรงที่มากกระทำมีค่าน้อย ในทางตรงกันข้าม การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วถ้าวัตถุนั้นมวลน้อย หรือแรงที่มากกระทำมีค่ามาก เป็นไปตามกฎอิมพัลส์โมเมนตัม (Impulse Momentum) ในของไหลก็เช่นเดียวกัน หากการไหลมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางหรือขนาดของความเร็ว นั้นเป็นผลมาจากแรงภายนอกที่มากกระทำ เช่น ในกรณีของการไหลในท่อที่มีการลดขนาดหรือข้ออชนิดต่างๆ บริเวณผิวของผนังท่อจะส่งแรงกระทำไปยังของไหล ทำให้ขนาดและทิศทางของความเร็วเปลี่ยนแปลงไป หรือในกรณีการไหลในทางน้ำเปิด แรงเสียดทานที่ผิวของทางน้ำ หรือแรงต้านจากสิ่งกีดขวางจะทำให้ความเร็วของการไหลเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน ซึ่งในกรณีของของไหลสามารถเขียนสมการของนิเวศน์ในรูปแบบของการคูณโมเมนตัมได้ดังนี้

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho Q \Delta \vec{v} = \rho Q (\vec{v}_2 - \vec{v}_1) \quad (2.12)$$

โดยที่

F = แรงที่มากกระทำต่อวัตถุ

m = มวลของของไหล

v = ความเร็วของของไหล

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล

t = เวลา

ρ = ความหนาแน่นของของไหล

ตามหลักพลศาสตร์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม (ขนาดและ/หรือทิศทาง) ของอนุภาคและของการไหล จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเสมอ ซึ่งทำให้ของไหลสูญเสียพลังงานเมื่อไหลผ่านข้อต่อ ข้ออ หรือวาล์วต่างๆ

2.7 การสูญเสียพลังงานของการไหลในท่อ

2.7.1 ประเภทของการสูญเสีย (คูลย โชติ ชลศึกษ์, 2559)

2.7.1.1 การสูญเสียหลัก (Major Loss) เป็นการสูญเสียเฮดที่เกิดจากแรงเสียดทานบริเวณผนังท่อ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า การสูญเสียเนื่องจากความฝืด (Friction Head Loss) ซึ่งการสูญเสียเฮดประเภทนี้จะเกิดอย่างต่อเนื่องตลอดช่วงความยาวของการไหล สัญลักษณ์ที่ใช้คือ h_f

2.7.1.2 การสูญเสียรอง (Minor Loss) เป็นการสูญเสียเฮดที่เกิดขึ้นบริเวณที่ความเร็วของของไหลมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน ซึ่งการสูญเสียเฮดประเภทนี้มักจะเกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อมต่อทางเข้าออกหรือจุดที่มีอุปกรณ์ประกอบต่างๆ (Fitting Devices) เช่น ข้อต่อ ข้องอต่างๆ วาล์ว เป็นต้น สัญลักษณ์ที่ใช้คือ h_m

2.7.2 การคำนวณการสูญเสียพลังงานในระบบท่อ (R. Shankar Subramanian, 2016)

การสูญเสียพลังงานจากการไหลในท่อเกิดจากสองสาเหตุหลักคือ การสูญเสียหลักซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างผิวท่อกับของไหลและการสูญเสียรองซึ่งเป็นการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม การสูญเสียทั้งสองส่วนนี้ทำให้พลังงานในของไหลลดลง ซึ่งจะไปที่ก้นล่างส่วนของพลังงานศักย์ในรูปของความดันสถิตในของไหล ความดันสถิตที่ลดลง เขียนในรูปของเฮด ได้ดังสมการ (2.13)

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = h_L = h_f + h_m \quad (2.13)$$

โดยที่ h_f = การสูญเสียหลักจากแรงเสียดทาน
 h_m = การสูญเสียรองจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม
 ΔP = ผลต่างของความดัน

2.7.2.1 การสูญเสียหลัก

การสูญเสียหลัก คือการสูญเสียเฮดที่เกิดจากผลของแรงเสียดทานอันเนื่องมาจากผลของความหนืดของของไหล และแรงเสียดทานระหว่างของไหลกับผนังท่อ โดยการสูญเสียเฮดนั้นจะขึ้นอยู่กับ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ความยาวของท่อ ความหยาบของวัสดุที่ใช้ทำท่อ ความหนืดของของไหล และความเร็วในการไหล ความสูญเสียจะมีอัตราคงที่ต่อความยาวท่อ ดังนั้นการไหลในท่อตรงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ความดันสถิตในของไหลจะลดลงอย่างสม่ำเสมอ

สมการที่ใช้ในการคำนวณการสูญเสียพลังงานหลักได้แม่นยำที่สุดคือ สมการของคาร์ซีและวิทซ์แบช (Darcy - Weisbach Equation) ซึ่งเขียนในรูปของเฮดได้ดังสมการ (2.14)

$$h_f = f \frac{Lv^2}{D2g} \quad (2.14)$$

โดยที่	D	= เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)
	f	= ตัวประกอบความเสียดทานของคาร์ซี
	g	= ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s ²)
	h _f	= การสูญเสียหลักจากแรงเสียดทาน
	v	= ความเร็วในการไหล (m/s)
	ΔP	= ผลต่างของความดัน

2.7.2.2 การสูญเสียรอง (R. Shankar Subramanian, 2016)

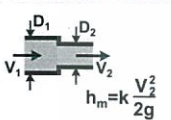

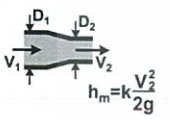
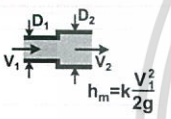
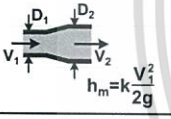
การสูญเสียรอง คือ การสูญเสียเฮดในจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดหรือทิศทางของความเร็วของของไหล เกิดขึ้นบริเวณที่ของไหลไหลผ่านอุปกรณ์ประกอบท่อต่างๆ เช่น วาล์ว ข้อต่อ ข้อลดขนาด ข้อขยายขนาด ข้องอชนิดต่างๆ เป็นต้น ซึ่งการสูญเสียรองนี้จะขึ้นอยู่กับรูปแบบการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลในอุปกรณ์นั้นๆ ดังนั้นการคำนวณค่าการสูญเสียรอง จึงสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของผลคูณระหว่าง ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (Minor Loss Coefficient : K) กับเฮดความเร็วดังสมการ (2.15)

$$h_m = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.15)$$

โดยที่	K	= ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานรอง
	v	= ความเร็วของของไหล

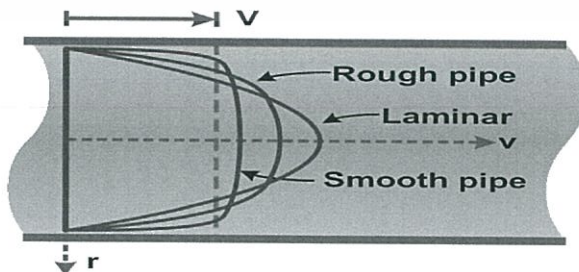
โดยค่า K จะขึ้นอยู่กับประเภทของอุปกรณ์ที่ไหลผ่าน ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานรอง (K)

Type of Component or Fitting : K	Type of Component or Fitting : K	Type of Component or Fitting : K
Pipe Entrance (Reservoir to Pipe)	Globe valve - fully open : 10.0	Cross
Square Connection : 0.50	Gate valve	Line flow : 0.50
Rounded Connection : 0.20	- fully open : 0.39	Branch flow : 0.75
Re-entrant (pipe juts into tank) : 1.00	- 3/4 open : 1.10	
Pipe Exit (Pipe to Reservoir)	- 1/2 open : 4.80	Mitered bend (θ)
Square Connection : 1.00	- 1/4 open : 27.0	15° : 0.05
Rounded Connection : 1.00	Ball Valve	30° : 0.10
Re-entrant (pipe juts into tank) : 1.00	- fully open : 0.05	45° : 0.20
Contraction – sudden	- 2/3 open : 5.50	60° : 0.35
 $D_2/D_1=0.80$: 0.18	- 1/3 open : 200	90° : 0.80
$D_2/D_1=0.50$: 0.37	Angle valve - fully open : 4.30	
$D_2/D_1=0.20$: 0.49	Check valve – conventional : 4.00	90° smooth bend
Contraction – conical	Check valve – clearway : 1.50	 Bend radius/D = 4 : 0.16-0.18
 $D_2/D_1=0.80$: 0.05	Check valve – ball : 4.50	Bend radius/D = 2 : 0.19-0.25
$D_2/D_1=0.50$: 0.07	Butterfly valve - fully open : 1.20	Bend radius/D = 1 : 0.35-0.40
$D_2/D_1=0.20$: 0.08	Cock - straight through : 0.50	Elbows
Expansion – sudden	Foot valve – hinged : 2.20	Threaded Regular 90° : 1.50
 $D_2/D_1=0.80$: 0.16	Foot valve – poppet : 12.5	Threaded Regular 45° : 0.40
$D_2/D_1=0.50$: 0.57	Tee	Threaded Long Radius 90° : 0.70
$D_2/D_1=0.20$: 0.92	Line flow : 0.30-0.40	Flanged Regular 90° : 0.30
Expansion – conical	Branch flow : 0.75-1.80	Flanged Long Radius 90° : 0.20
 $D_2/D_1=0.80$: 0.03	Flanged, Line Flow : 0.20	Flanged Long Radius 45° : 0.20
$D_2/D_1=0.50$: 0.08	Flanged, Branch Flow : 1.00	
$D_2/D_1=0.20$: 0.13	Threaded, Line Flow : 0.90	180° Return Bends
	Threaded, Branch Flow : 2.00	Flanged : 0.20
	Threaded Union : 0.08	Threaded : 1.50

2.8 การหาค่าตัวประกอบเสียดทาน (Friction Factor) (ชัยบุตร ออกวะลามา, 2553; สุธรรม สุขมณี, 2558; Yanus A. Cengel, 2014)

สิ่งที่มีผลต่อการเลือกใช้สมการคำนวณค่าตัวประกอบเสียดทานคือลักษณะการไหลต่างๆ ประกอบด้วยการไหลแบบราบเรียบ การไหลแบบปั่นป่วน และการไหลแบบแปรเปลี่ยน รวมทั้งความขรุขระของผนังท่อที่ของไหลไหลผ่าน



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการกระจายตัวของความเร็วของการไหลแบบต่างๆ ในท่อกลม

ที่มา : ชัยบุตร ออกวะลามา, 2553

Nikuradse ได้ศึกษาผลกระทบจากความขรุขระของผนังท่อ (Roughness: E) ที่มีต่อการไหล พบว่า ในกรณีที่มีการไหลมีพฤติกรรมแบบราบเรียบ ความขรุขระของผนังท่อจะไม่มีผลต่อการสูญเสียพลังงานหรือค่าตัวประกอบเสียดทาน แต่ในกรณีการไหลมีพฤติกรรมแบบปั่นป่วนผลกระทบของความขรุขระสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะดังนี้

$$\frac{\epsilon u^*}{\nu} < 5 \text{ ถือเป็นกรณีท่อผนังเรียบ เนื่องจากความขรุขระของผนังท่อจะไม่ส่งผลกระทบต่อค่าตัวประกอบเสียดทาน}$$

ต่อค่าตัวประกอบเสียดทาน

$$5 < \frac{\epsilon u^*}{\nu} < 70 \text{ ความขรุขระของผนังท่อจะส่งผลกระทบกับค่าตัวประกอบเสียดทานในระดับปานกลาง}$$

ปานกลาง

$$\frac{\epsilon u^*}{\nu} > 70 \text{ ท่อขรุขระมาก หรือการไหลแบบปั่นป่วนสมบูรณ์ ความขรุขระของผนังท่อจะส่งผลกระทบต่ออย่างมากกับค่าตัวประกอบเสียดทาน}$$

ส่งผลกระทบต่ออย่างมากกับค่าตัวประกอบเสียดทาน

$$\text{เมื่อ } u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \text{ เรียกค่านี้ค่า Friction Velocity หรือ Shear Velocity}$$

2.8.1 ค่าตัวประกอบเสียดทานของการไหลแบบราบเรียบ (Friction Factor For Laminar Flow)

สมการหาค่าตัวประกอบเสียดทานของคาร์ซีสำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อคือ

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.16)$$

โดยที่ f = ค่าตัวประกอบเสียดทาน

Re = เลขเรย์โนลด์

2.8.2 ค่าตัวประกอบเสียดทานของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อผนังเรียบ (Friction Factor For Turbulent Flow In Smooth Pipe)

ในปี ค.ศ. 1935 Prandtl ได้ทำการปรับปรุงสมการใหม่ โดยอาศัยข้อมูลจากการทดลองของ Nikuradse ได้ตั้งสมการ (2.17)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log(\text{Re} \sqrt{f}) - 0.8 \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการที่ (2.16) คือสมการที่ใช้หาค่าตัวประกอบเสียดทานของสภาพการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อที่มีผิวเรียบมาก และค่าตัวประกอบเสียดทานมีความสัมพันธ์กับค่าเลขเรย์โนลด์เพียงอย่างเดียว

2.8.3 ค่าตัวประกอบเสียดทานของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อผนังหยาบ (Friction Factor For Turbulent Flow In Rough Pipe)

2.8.3.1 ในปี ค.ศ. 1939 Colebrook ได้นำเสนอสมการการหาค่าตัวประกอบเสียดทานในกรณีที่มีความขรุขระของผนังท่อที่มีผลกระทบในระดับปานกลางดังสมการ (2.18)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (2.18)$$

โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
f = ค่าตัวประกอบเสียดทาน
Re = เลขเรย์โนลด์
ε = ความขรุขระของผนังท่อ

เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ ในปี ค.ศ. 1983 Haaland ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Colebrook แต่สมการของ Haaland มีความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 10-15% ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ สมการดังกล่าวคือ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.88 \log \left(\left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.91}{\text{Re}} \right) \quad (2.19)$$

2.8.3.2 ในกรณีการไหลในท่อขรุขระมาก (Fully Rough Flow) Karman ได้นำเสนอสมการการหาค่าตัวประกอบเสียดทานไว้ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{3.7}{\varepsilon/D} \right) \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน ในปี ค.ศ. 1944 Lewis F. Moody ได้รวบรวมสมการของ Hangen-Poiseuille สมการของ Prandtl สมการของ Colebrook และสมการของ Karman มาสร้างเป็น กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสามตัวแปร ได้แก่ ε/D เลขเรย์โนลด์ และค่าตัวประกอบเสียดทาน เรียก กราฟความสัมพันธ์นี้ว่ากราฟของมูดี้ (Moody Diagram)

2.8.4 สมการอื่นๆ ที่ใช้ในการประมาณค่าตัวประกอบเสียดทาน (Turhan C., 2012)

การหาค่าตัวประกอบเสียดทานจากกราฟของมูดี้อาจไม่สะดวกในการคำนวณ จึงมีการ เสนอการหาค่าตัวประกอบเสียดทานจากสมการต่างๆ ดังนี้

2.8.4.1 S.W. Churchill's Equation

$$f = 8 \left(\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right)^{1/12} \quad (2.21)$$

$$A = \left(2.457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D}} \right) \right)^{16} \quad (2.22)$$

$$B = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (2.23)$$

2.8.4.2 Serghides's Solution

$$f = \left(A - \frac{(B-A)^2}{C-2B-A} \right)^{-2} \quad (2.24)$$

$$A = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{12}{\text{Re}} \right) \quad (2.25)$$

$$B = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51A}{\text{Re}} \right) \quad (2.26)$$

$$C = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7D} + \frac{2.51B}{\text{Re}} \right) \quad (2.27)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 การไหลแบบอัดตัวได้ในท่อ (The Crane Company, 1965; Mohinder L. Nayyar, 1999)

การไหลแบบอัดตัวได้หมายถึงการไหลที่มีการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหล ซึ่งเป็นผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความดัน การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของของไหลที่เกิดขึ้นเป็นตัวแปรสำคัญในการวิเคราะห์การไหลแบบอัดตัวได้และถูกจำกัดความเร็วที่ความเร็วเสียงของของไหลนั้น

การหาค่าความดันลดสำหรับการไหลแบบอัดตัวได้ในท่อนั้น ในบางกรณีไม่สามารถใช้สมการคำนวณความดันลดของคาร์ซีได้ โดยเฉพาะกับของไหลแบบอัดตัวได้ จึงพิจารณาเป็นการไหลแบบแอดิเอแบติก (Adiabatic Flow) หรือการไหลแบบอุณหภูมิคงที่ (Isothermal Flow) และจำเป็นต้องทราบถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับปริมาตรจำเพาะ

สำหรับการไหลแบบแอดิเอแบติกใช้กับท่อที่มีระยะทางสั้นและหุ้มฉนวนไว้โดยรอบ ทำให้ไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น แต่ในความเป็นจริงแล้วจะมีความร้อนบางส่วนถูกสร้างขึ้นจากความเสียดทานและถ่ายเทสู่การไหล

สำหรับการไหลแบบอุณหภูมิคงที่ เป็นที่นิยมใช้ในการออกแบบมากกว่า เนื่องจากมีลักษณะคล้ายคลึงกับการไหลที่จริงที่เกิดขึ้น

การไหลแบบอุณหภูมิคงที่ที่มีการพิจารณาความเสียดทานร่วมด้วย เป็นลักษณะการไหลที่นิยมใช้กับระบบขนส่งแก๊สในท่อที่มีระยะทางไกล เมื่อท่อมีระยะทางยาวมาก ทำให้มีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนมากขึ้นจึงไม่สามารถพิจารณาเป็นการไหลแบบแอดิเอแบติกได้ และจะพิจารณการไหลเป็นแบบอุณหภูมิคงที่แทน

2.9.1 การพิจารณาใช้สมการของคาร์ซีในการหาค่าความดันลดเมื่อของไหลที่พิจารณาเป็นของไหลที่อัดตัวได้

2.9.1.1 ถ้าความดันลดที่คำนวณจากสมการของคาร์ซีมีค่าน้อยกว่า 10% ของความดันต้นทาง ค่าปริมาตรจำเพาะที่ใช้จะเป็นค่าที่ต้นทางหรือปลายทางค่าใดค่าหนึ่ง

2.9.1.2 ถ้าความดันลดที่คำนวณจากสมการของคาร์ซีมีค่าระหว่าง 10% – 40% ของความดันต้นทาง ปริมาตรจำเพาะที่ใช้ต้องเป็นค่าเฉลี่ยระหว่างค่าปริมาตรจำเพาะที่ต้นทางและปลายทาง

2.9.1.3 ถ้าความดันลดที่คำนวณจากสมการของคาร์ซีมีค่ามากกว่า 40% จำเป็นต้องใช้สมการอื่นในการคำนวณ ซึ่งส่วนใหญ่เกิดในระบบท่อที่มีระยะทางยาว

2.9.2 สมการคำนวณสำหรับการไหลแบบอณูโมเลกุลที่

การไหลของแก๊สผ่านท่อระยะทางยาวที่ไม่สามารถใช้สมการของดาร์ซีในการคำนวณค่าความดันลดได้ ต้องพิจารณาการไหลเป็นแบบอณูโมเลกุลที่และคำนวณด้วยสมการสำหรับการไหลแบบอณูโมเลกุลที่ดังแสดงในสมการที่ (2.28)

$$P_1^2 - P_2^2 = Z \frac{RT}{M_w} \left(\frac{W}{A} \right)^2 \left(f \frac{L}{D} + 2 \ln \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (2.28)$$

โดยที่	A	= พื้นที่หน้าตัดท่อ (m ²)
	D	= เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
	f	= ค่าตัวประกอบเสียดทาน
	L	= ความยาวของท่อ (m)
	M _w	= มวลโมเลกุลของของไหล (kg/kmole)
	P ₁	= ความดันที่ด้านต้นทาง (kPa)
	P ₂	= ความดันที่ด้านปลายทาง (kPa)
	R	= ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	= อุณหภูมิของของไหล (K)
	W	= อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (kg/h)
	Z	= Compressibility factor

สมการ (2.28) ข้างต้นมีสมมติฐานที่ใช้ดังนี้

- การไหลที่อณูโมเลกุลที่
- ไม่มีงานเกิดขึ้นในระบบ
- เป็นการไหลแบบคงตัว (Steady State) ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา
- เป็นแก๊สอุดมคติ (Ideal Gas)
- ความเร็วในท่อเป็นความเร็วเฉลี่ยที่จุดกึ่งกลางของพื้นที่หน้าตัดท่อ
- ค่าตัวประกอบเสียดทานมีค่าคงที่ตลอดการไหล

2.10 ระบบหอเผา (Flare System) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559)

หอเผาเป็นอุปกรณ์ความปลอดภัยในโรงงานอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและปิโตรเคมี ที่ใช้ในการกำจัดแก๊สที่ระบายออกจากระบบด้วยการเผาไหม้ เพื่อความปลอดภัยของโรงงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่โรงงานมีความดันเกิดขึ้นในระบบการผลิตอย่างกะทันหันจากเหตุฉุกเฉินและจำเป็นต้องมีการระบายความดันออก การทำงานของระบบหอเผาจะช่วยป้องกันการเกิดความเสียหายที่รุนแรงในโรงงานได้

ระบบหอเผาควรถูกออกแบบให้สามารถทำหน้าที่ดังต่อไปนี้โดยมีประสิทธิภาพ

1. กำจัดสารที่เป็นอันตรายที่เกิดจากกระบวนการผลิต
2. ระบายสารไวไฟออกจากระบบการผลิต
3. ลดการปลดปล่อยสารอินทรีย์ระเหยง่ายและสารไฮโดรคาร์บอนออกสู่บรรยากาศ

2.10.1 ประเภทของหอเผา

การแบ่งประเภทหอเผาสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ แบ่งตามความสูงของหอเผา (Flare Height) และแบ่งตามวิธีการในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมระหว่างอากาศและแก๊สที่ระบายออกจากระบบ (Flare Gas) ในตำแหน่งปากปล่องของหอเผา (Flare Tip)

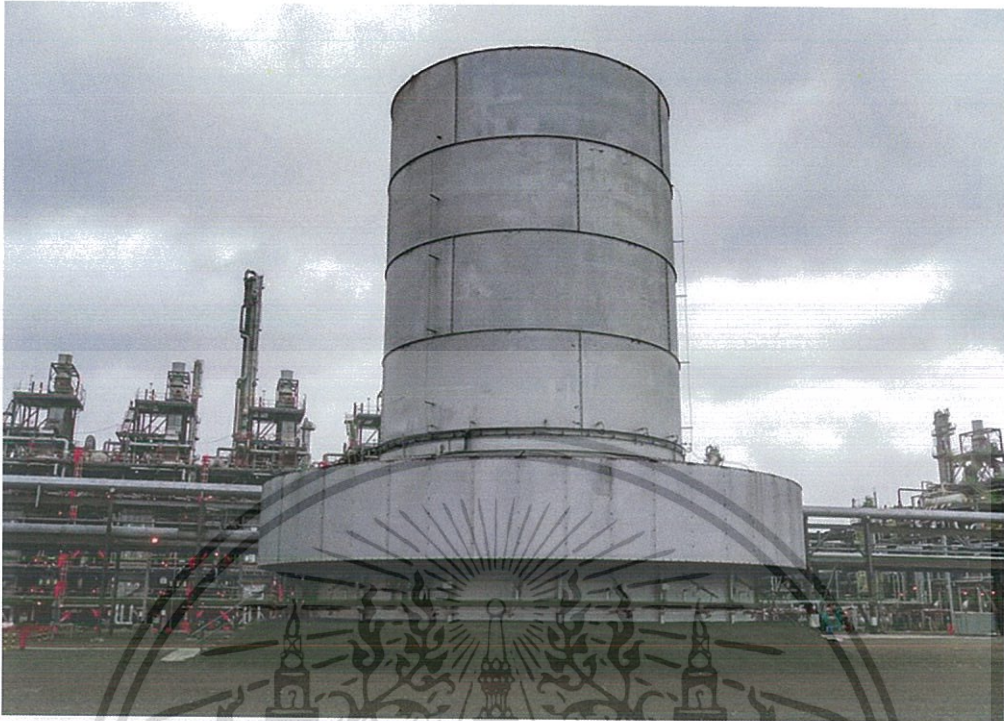
2.10.1.1 แบ่งตามความสูงของหอเผา

สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ หอเผาระดับพื้นดิน และหอเผาระดับเหนือพื้นดิน

1) หอเผาระดับพื้นดิน (Ground Flare)

หอเผาระดับพื้นดินมีการเผาในระดับที่มีความสูงของหอเผาจากพื้นดินไม่มากนัก อาจทำการออกแบบเป็นกลุ่มของหัวเผาไหม้หลายหัวในบริเวณเดียวกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเผาไหม้ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น หอเผาระดับพื้นดินนี้นิยมใช้ในอุตสาหกรรมที่มีพื้นที่สำหรับหอเผาพอ หรือในกรณีที่โรงงานอยู่ห่างไกลชุมชนนิยมใช้หอเผาระดับพื้นดินแบบเปิด (Opened Ground Flare) ในบางกรณีจะต้องมีการสร้างสิ่งปกปิดอย่างมิดชิดคือหอเผาระดับพื้นดินแบบปิด (Enclosed Ground Flare) ซึ่งออกแบบเพื่อป้องกันผลกระทบด้านรังสีความร้อน เสียง และแสง

หากหอเผาชนิดนี้ถูกนำไปใช้กับสารที่ไม่เหมาะสมหรือเกิดความขัดข้อง ส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ อาจเกิด Vapor Cloud และปัญหาเรื่องกลิ่นได้ เนื่องจากระยะห่างจากพื้นดินถึงหัวเผาไหม้ (Burner) น้อย จึงเกิดการแพร่ของมลพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่อยู่ใกล้เคียงได้ง่ายกว่าหอเผาระดับเหนือพื้นดิน (Elevated Flare)

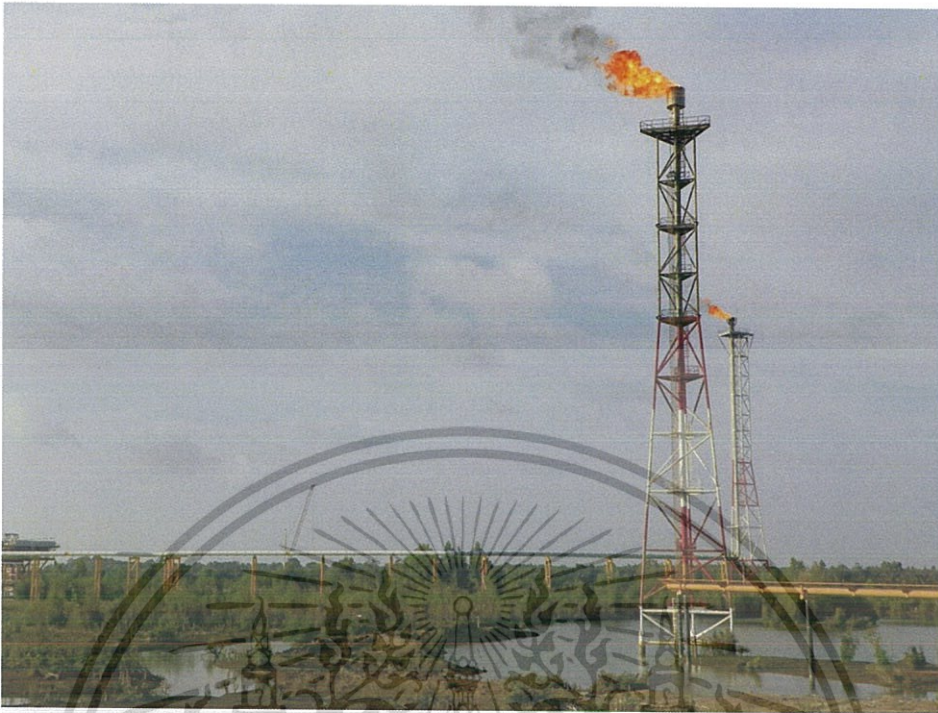


รูปที่ 2.4 Ground Flare

ที่มา : zeeco.com, 2016

2) หอเผาระดับเหนือพื้นดิน (Elevated Flare)

หอเผาระดับเหนือพื้นดินคือหอเผาที่มีปากปล่องของหอเผาสูงจากพื้นดินมากกว่า 100 เมตร หอเผานี้พบได้ทั่วไปตามโรงงาน เนื่องจากใช้พื้นที่ในการติดตั้งน้อยกว่าแบบหอเผาระดับพื้นดิน (Ground Flare) แต่สามารถเผาไหม้สารที่ระบายออกได้ในปริมาณที่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม หอเผานี้เกิดการเผาไหม้ในระดับที่สูง ส่งผลให้เกิดรังสีความร้อนกระจายออกไปไกลและเกิดแสงสว่างระหว่างการเผาไหม้ ทำให้เกิดปัญหากับโรงงานหรือชุมชนข้างเคียงโรงงาน



รูปที่ 2.5 Elevated Flare

ที่มา : kotaminyak.com, 2016

2.10.1.2 แบ่งตามวิธีการ ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผสมระหว่างอากาศและแก๊สที่ระบาย
ออกจากระบบ (Flare Gas) ในตำแหน่งปากปล่องของหอเผา

สามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท

1) หอเผาที่มีการฉีดไอน้ำช่วย (Steam-Assisted Flare)

หอเผาที่มีการฉีดไอน้ำช่วยคือหอเผา ที่ฉีดไอน้ำเข้าไปในบริเวณปลายปล่องที่มีการเผาไหม้ เพื่อช่วยเพิ่มการผสมระหว่างอากาศและแก๊สที่ระบายออก ให้เกิดการไหลวนอย่างรุนแรง ทำให้ ออกซิเจนในอากาศเข้าไปผสมกับแก๊สมากขึ้น เกิดการเผาไหม้ที่ดีขึ้น

2) หอเผาที่มีการฉีดอากาศช่วย (Air-Assisted Flare)

หอเผาที่มีการฉีดอากาศช่วยคือหอเผาที่เพิ่มอากาศเข้าไปโดยใช้พัดลมขนาดใหญ่ เพื่อช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์และลดการเกิดควัน

3) หอเผาที่ไม่มีอุปกรณ์ช่วย (Non-Assisted Flare)

หอเผาที่ไม่มีอุปกรณ์ช่วยคือหอเผาที่ไม่มีอุปกรณ์ช่วยเพิ่มการผสมระหว่างอากาศกับแก๊สที่ระบายออกที่ปล่อยออกมา

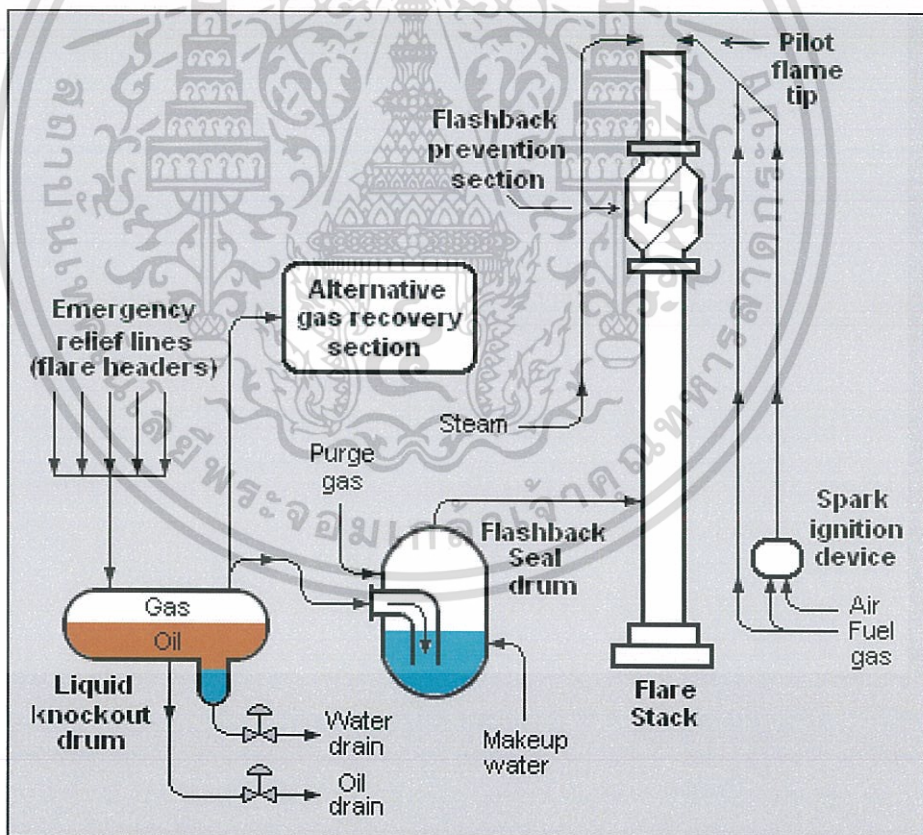
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) หอเผาที่มีความดันช่วย (Pressure-Assisted Flare)

หอเผาที่มีความดันช่วยคือหอเผาที่อาศัยความดันสูงของสายแก๊สที่ระบายออก (Vent Stream) ดึงอากาศให้เข้ามา ช่วยให้การผสมที่ปลายปล่องดีขึ้น

หากไม่มีหอเผา แก๊สที่ระบายออกจากระบบ ทั้งกรณีโรงงานเดินเครื่องปกติและกรณีฉุกเฉินจะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งแก๊สที่ระบายออกเหล่านี้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนหรือสารพิษที่สามารถติดไฟได้ หากออกสู่บรรยากาศอาจเกิดลูกไหม้ หรือเกิดการระเบิด หรือส่งผลกระทบต่อสุขภาพของสิ่งมีชีวิต และถ้าไม่ปล่อยแก๊สเหล่านี้จากระบบอาจทำให้ ความดันในระบบสูงจนไม่สามารถควบคุมได้ อาจส่งผลให้กระบวนการผลิตเกิด ระเบิดขึ้น

2.10.2 ส่วนประกอบของหอเผา



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการทำงานของระบบหอเผา

ที่มา : en.wikipedia.org, 2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10.2.1 Flare Header

Flare Header คืออุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รวมแก๊สที่ระบายจากกระบวนการผลิตเพื่อส่งเข้าสู่ระบบหอเผา มีลักษณะเป็นท่อรวมขนาดใหญ่ ดังแสดงในรูปที่ (2-12) ในระบบหอเผาอาจมีหนึ่งหรือหลาย Flare Header ก็ได้ Flare Header แบ่งออกเป็น 3 ชนิด ได้แก่

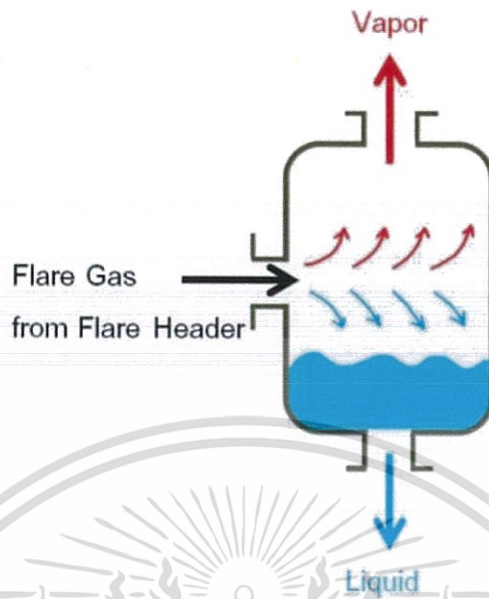
1) Main Header คือ ท่อรวมของแก๊สของสารไฮโดรคาร์บอนที่ระบายมาจากหน่วยผลิตต่างๆ ในสภาวะปกติจะมีแก๊สปล่อยออกสู่ระบบหอเผาในปริมาณน้อยมาก ดังนั้นจึงมี Purge Gas หรือแก๊สไนโตรเจน (N_2) ฉีดเข้าที่ต้นทางของ Main Header ตลอดเวลาเพื่อ ป้องกันการเกิดสุญญากาศ เนื่องจากเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำมันและป้องกันอากาศที่จะไหลเข้าสู่ท่อ Main Header

2) Sub Header คือ ท่อรวมของแก๊สจากแต่ละหน่วยผลิตก่อนที่จะรวมเข้าสู่ Main Header แต่ละ Sub Header จะมี Purge Gas หรือแก๊สไนโตรเจน (N_2) ฉีดเข้าที่ต้นทางเพื่อป้องกันการเกิดสุญญากาศหรือใช้กำจัดอากาศออกจากระบบเช่นเดียวกับ Main Header

3) Sour Gas Header คือ ท่อรวมที่รวบรวมเอาแก๊สที่มีความเป็นกรด เช่น แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) แก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ที่เจือปนมา

2.10.2.2 Knock-Out Drum

Knock-Out Drum คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แยกและรองรับของเหลวซึ่งอาจปนมากับแก๊สที่ระบายออกจากกระบวนการผลิตหรือเกิดการควบแน่นในท่อระหว่างขนส่ง ลักษณะของ Knock-Out Drum มีทั้งถังแนวตั้งและถังแนวนอน ติดตั้งอยู่ในบริเวณใกล้หอเผา เหตุผลที่ต้องแยกของเหลวออกก่อนส่งเข้าหอเผา เนื่องจาก ถ้ามีของเหลวติดขึ้นไปที่ยอดหอเผาอาจติดไฟและกระจายตัวเป็นลูกไฟออกมารอบๆ หอเผาได้ ของเหลวจะถูกแยกออกและนำไปเก็บที่ถังเก็บเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอีกครั้ง หรือนำไปเป็นเชื้อเพลิง ส่วนไอน้ำจะถูกส่งไปยังหอเผา

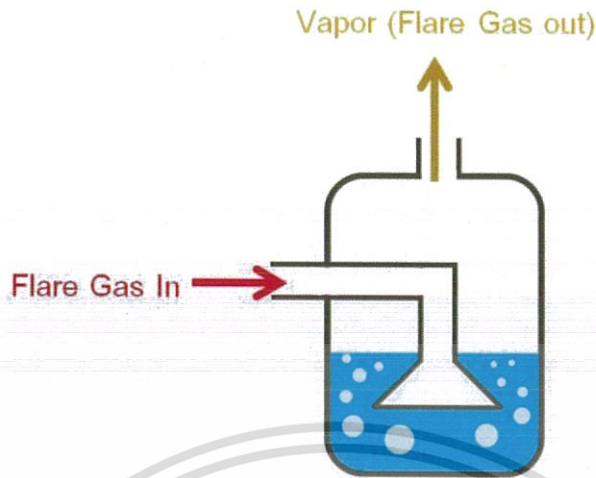


รูปที่ 2.7 Vertical Knock-Out Drum

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559

2.10.2.3 Water Seal Pot

คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการป้องกันไม่ให้ระบบท่อของหอเผาเป็นสูญญากาศและช่วยป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊สที่ระบายออกจากกระบวนการผลิต เนื่องจากหากปริมาณของแก๊สที่ระบายออกจากกระบวนการผลิตมีปริมาณน้อยหรือระบบท่อของหอเผาเป็นสูญญากาศความดันภายนอกท่อจะสูงกว่าความดันภายในท่อ ส่งผลให้อากาศจากภายนอกไหลเข้าสู่ท่อ และอาจเกิดการเผาไหม้ภายในท่อขึ้นได้ ดังนั้นปลายสุดของท่อแก๊สที่ระบายออกจะจุ่มอยู่ใต้ระดับน้ำในระยะที่กำหนดไว้ เพื่อรักษาความดันให้ความดันภายในท่อ สูงกว่าความดันภายนอกท่อ แก๊สที่ระบายออกจากท่อของหอเผาหรืออากาศจากภายนอกจึงไม่สามารถไหลย้อนไปสู่อ่างได้ ดังแสดงในรูปที่ (2-14)



รูปที่ 2.8 Water Seal Pot

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559

2.10.2.4 Gas Barrier

Gas Barrier หรือ Gas Seal บางครั้งเรียกอุปกรณ์นี้ว่า Purge Reduction Seal คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการป้องกันการไหลย้อนกลับของอากาศเข้าสู่ห่อเผาเนื่องจากลมหรือความแตกต่างของอุณหภูมิ ทำให้อากาศไหลเข้าไปภายในระบบ ซึ่งระบบอาจเกิดการระเบิดขึ้น เพื่อป้องกันเหตุนี้จะต้องติดตั้ง Gas Seal ซึ่งทำหน้าที่เป็น Orifice ลดปริมาณ Purge Gas ที่ไหลผ่านและทำให้เกิดมีความเร็วสูงขึ้น ส่งผลให้ความดันของแก๊สสูงกว่าความดันของอากาศจึงป้องกันการไหลของอากาศเข้าสู่ห่อเผาได้ การใช้ Purge Gas มากๆ จะทำให้สูญเสียค่าใช้จ่าย เกิดความร้อนสูงอาจทำความเสียหายแก่ Flare Tip และทำให้เกิดการแพร่กระจายของมลภาวะโดยไม่จำเป็น ดังนั้น Gas Seal จึงเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยลดปริมาณการใช้ Purge Gas

2.10.2.5 Pilot Burners

Pilot Burners คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่จุดเปลวไฟให้ติดอยู่ตลอดเวลาในบริเวณปลายปล่องห่อเผา เนื่องจากถ้าไฟเกิดดับ จะเกิดการสะสมตัวของแก๊สที่ระบายออกและอาจเกิดเพลิงไหม้หรือการระเบิดขึ้น การออกแบบ Pilot Burners อยู่ภายใต้เงื่อนไขคือ ต้องมีระบบจุดไฟ Ignition ที่เชื่อถือได้ Pilot ต้องไม่ดับ มีไฟตลอดเพื่อจุดให้แก๊สที่ระบายออกเกิดการเผาไหม้

2.10.2.6 Ring Steam Burner

Ring Steam Burner หรือ Steam Ring คือ อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ฉีดไอน้ำเข้าสู่เปลวไฟ บริเวณปลายปล่องของหอเผา ทำให้เกิดการผสมกันระหว่างแก๊สที่ระบายออกจากระบบและอากาศ ส่งผลให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ โดยไอน้ำจะทำหน้าที่เหนี่ยวนำให้อากาศรอบๆ บริเวณไหลเข้าสู่ Burning Zone เกิดเป็นการผสมแบบปั่นป่วน (Turbulent Mixing) ทำให้แก๊สที่ระบายออกจากระบบ ซึ่งมีสารไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบผสมกับอากาศได้ดีขึ้น อีกทั้งช่วยปรับแต่งเปลวไฟให้ตั้งตรง



รูปที่ 2.9 ส่วนประกอบของ Pilot Burners และ Ring Steam Burner

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2559

2.10.2.7 Flare Stack

Flare Stack คือ ท่อส่วนที่ช่วยยกระดับตำแหน่งการเผาไหม้ให้สูงขึ้นรวมถึง โครงสร้างที่ช่วยรองรับน้ำหนักต่างๆ การออกแบบระบบความมั่นคงแข็งแรงของ Flare Stack สามารถทำได้หลายรูปแบบ อาทิ Self-Supported Derrick-Supported และ Guy-Supported เป็นต้น

Self-Supported คือ การออกแบบ Flare Stack ที่มีความมั่นคงแข็งแรงด้วยโครงสร้างของตัวท่อของหอเผาเอง ซึ่งตามปกติจะใช้ในกรณีหอเผาที่มีความสูงประมาณ 9-30 เมตร แต่สามารถที่จะออกแบบให้สูงกว่า 76 เมตรได้ ดังแสดงใน รูปที่ (2-20) หอเผาแบบนี้จะตั้งอยู่ได้ด้วยตัวเองโดยใช้ฐานที่มีขนาดใหญ่ เพื่รองรับทั้งน้ำหนักของหอเผา และแรงกระทำจากภายนอก เช่น ฝน ลม พายุ ที่เกิดขึ้นจากภายนอก อีกทั้งพื้นที่ติดตั้งต้องเป็นพื้นดินที่แข็งแรงที่จะรับน้ำหนักของปล่องได้ หอเผาแบบนี้จึงมีราคาค่อนข้างสูง

Derrick-Supported เป็นหอเผาที่มีโครงเหล็กทำหน้าที่เป็นโครงยึดปล่องของหอเผา ทำให้สามารถสร้างหอเผาได้สูงมากกว่า 61 เมตร เนื่องจากโครงเหล็กช่วยรับน้ำหนัก รับแรงลม และรับแรงดัน ดังแสดงในรูปที่ (2-21)

Guy-Supported คือหอเผาที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกับ Self-Supported แต่มีลวดสลิงดึงให้ให้ตั้งตรงอยู่ได้โดยทั่วไปสามารถออกแบบให้มีความสูงถึง 91 เมตร แต่การออกแบบ Guy-Supported จะต้องคำนึงถึงพื้นที่สำหรับการชิงลวดสลิง โดยต้องมีรัศมีเท่ากับ ความสูงของหอเผา

2.10.2.8 Flare Tip หรือ Burner Tip

Flare Tip หรือ Burner Tip คือ อุปกรณ์ปลายปล่องที่เป็นจุดเผาแก๊สที่ระบายออกจากระบบ ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอน เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การออกแบบ Flare Tip ต้องพิจารณาถึงตัวแปรดังนี้คือ เสถียรภาพของเปลวไฟ ความน่าเชื่อถือของตัวจุดไฟ และการลดเสียง ปริมาณสูงสุดและต่ำสุดของปริมาณแก๊สที่จะเผาไหม้ที่ยังทำให้เปลวไฟมีความเสถียร โดยส่วนใหญ่ Flare Tip จะถูกออกแบบให้แก๊สที่ระบายออกจากระบบ มีอัตราการไหลที่ปลายปล่อง 0.3–180 M/S อัตราการปล่อยแก๊สที่ระบายออกจากระบบสูงสุดของหอเผานั้นขึ้นอยู่กับความดันของแก๊สที่ระบายออกและความต้านทานของระบบท่อของหอเผา

2.11 ระบบระบายความดัน (Pressure Relief System) (Siddhartha Mukherjee, 2008)

2.11.1 ระบบกำจัดสารแบบเปิดและปิด (Open And Close Disposal Systems)

ในกรณีที่ของไหลในระบบเป็นสารที่ไม่มีความเป็นอันตราย เช่น ไอน้ำ น้ำ อากาศ จะระบายความดันในระบบด้วยวาล์วระบายความดัน ซึ่งของไหลที่ออกจากวาล์วระบายความดันนี้จะถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศ เรียกระบบแบบนี้ว่าระบบกำจัดสารแบบเปิด (Open Disposal System)

ในกรณีที่ของไหลในระบบเป็นสารอันตรายหรือสารไวไฟ จำเป็นต้องปล่อยสารเหล่านี้ผ่านระบบกำจัดสารแบบปิด (Close Disposal System) เช่น ระบบหอเผา โดยปกติแล้วท่อขาออกจากวาล์วระบายความดันจะถูกต่อเข้ากับท่อหลักที่ส่งสารไปเผาภายในหอเผาและเปลี่ยนเป็นสารที่มีอันตรายน้อยลง

2.11.2 ส่วนประกอบของระบบกำจัดสารแบบปิด (Components Of Closed Systems)

2.11.2.1 ท่อขาออกของวาล์วระบายความดัน (Pressure Relief Valve Outlet Piping)

ระบบหอเผาประกอบด้วยท่อที่ต่อจากขาออกของวาล์วระบายความดันจากแต่ละหน่วย ซึ่งท่อเหล่านี้จะต่อเข้ากับท่อรวมย่อยของหน่วยต่างๆ และส่งต่อไปยังถังแยกของเหลวของระบบหอเผา

2.11.2.2 ท่อรวมแก๊สย่อยของหอเผา (Unit Flare Header)

ท่อขาออกของวาล์วระบายความดันในหน่วยหนึ่งๆ จะถูกต่อเข้ากับ ท่อรวมย่อยของหน่วยนั้นๆ ซึ่งอาจต่อเข้ากับ ท่อรวมแก๊สหลัก (Main Flare Header) หรือถังแยกของเหลวของระบบหอเผา (Flare Knockout Drum) โดยตรง ซึ่งระบบส่วนใหญ่จะต่อเข้ากับท่อรวมหลักก่อน สำหรับท่อรวมย่อยของทุกๆ หน่วย จะมีระบบไล่แก๊สอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่ต้นทางของท่อไปจนถึงถังแยกของเหลวของหน่วยนั้น เพื่อป้องกันอากาศที่อาจแทรกซึมเข้ามาในระบบ ด้วยการใช้แก๊สเฉื่อย เช่น แก๊สไนโตรเจน หรือแก๊สเชื้อเพลิง (Fuel Gas)

2.11.2.3 ถังแยกของเหลวย่อยของแต่ละหน่วยผลิต (Unit Flare Knockout Drum)

สำหรับกรณีที่มีของไหลที่ออกจากหน่วยต่างๆ มีของเหลวปะปนมาด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งของเหลวที่มีฤทธิ์กัดกร่อน ของเหลวที่ทำให้เกิดการอุดตัน และของเหลวที่แข็งตัวได้ อีกเหตุผลหนึ่งที่ต้องการถังแยกของเหลว สำหรับแต่ละหน่วยคือความชันของท่อไม่มากพอที่จะส่งของไหลเข้าสู่ถังแยกของเหลวหลักได้ ในกรณีนี้ ท่อรวมย่อยของหน่วยต่างๆ จึงต้องส่งของไหลเข้าสู่ถังแยกของเหลวย่อยก่อนส่งของไหลเหล่านี้เข้าสู่ท่อรวมหลัก

2.11.2.4 ท่อรวมแก๊สหลักของหอเผา (Main Flare Header)

ท่อรวมหลักจะรับของไหลจากท่อรวมย่อยหรือรับจากถังแยกของเหลวย่อยของหน่วยต่างๆ ของไหลภายในท่อรวมควรไหลไปยังถังแยกของเหลวที่ใกล้ที่สุดได้เอง ด้วยการใช้ความเอียงของท่อที่อัตราส่วน 1:500 เป็นอย่างน้อย

ขนาดของท่อรวมของหอเผาจะขึ้นกับค่าความดันลดและความเร็วของของไหลภายในท่อ ซึ่งต้องพิจารณาค่าเลขมัคให้อยู่ในช่วง 0.2-0.5 นอกจากนี้ยังควรคำนึงถึงการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของแก๊สภายในท่อตลอดความยาวของท่อ เนื่องจากแก๊สภายในหอเผาจะมีอุณหภูมิลดลงตามความยาวของท่อที่ขนส่งของไหล ทำให้ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มขึ้น และส่งผลให้อัตราการไหลลดลง ดังนั้นขณะทำการประมาณค่าความดันลดในท่อ จึงควรแบ่งการประมาณค่าความดันลดออกเป็นช่วงๆ

2.11.2.5 ถังแยกของเหลวหลักของระบบหอเผา (Main Flare Knockout Drum)

ใช้ในการแยกของเหลวที่ติดมาออกก่อนจะส่งเข้าสู่หอเผา และมีการติดตั้งปั๊มเพื่อขนส่งของเหลวที่สะสมไว้ไปยังสถานที่ที่ปลอดภัย

2.11.3 ระบบท่อระบายความดัน (Relief System Piping)

2.11.3.1 ท่อขาเข้าวาล์วระบายความดัน (Inlet Piping)

ท่อที่ต่อจากระบบมาเข้าวาล์วระบายความดัน ควรมีการออกแบบให้ทนทานต่อความดันลดที่มากเกินไปซึ่งเป็นผลให้เกิดการสั่นและความผิดปกติกับการเปิดปิดวาล์วระบายความดัน ทำให้อัตราการไหลลดลงและเกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ ค่าความดันลดที่แนะนำควรมีค่าไม่เกิน 3% ของความดันที่ตั้งเอาไว้

2.11.3.2 ท่อขาออกวาล์วระบายความดัน (Discharge Piping)

ในกรณีที่ความดันในระบบมีค่าเพิ่มขึ้นสูงเกินไป วาล์วระบายความดันที่เกี่ยวข้องต้องเปิดออกตามค่าความดันที่ตั้งไว้ ช่วงขณะนั้น ความดันขาออกของวาล์วคือความดันด้านกลับ Superimpose ของระบบ ในขณะที่วาล์วเปิดออก ความดันจะเพิ่มสูงขึ้น ผลของการไหลของของไหลที่ออกจากวาล์วระบายความดันทำให้เกิดความดันด้านกลับ Built-Up ที่ด้านทางออกของท่อ หลังจากวาล์วเปิดออก ทรานไคที่ความดันด้านกลับ Built-Up ยังมีค่าน้อยกว่า Overpressure จะทำให้วาล์วยังคงเปิดได้และมีสมรรถภาพเพียงพอ แต่เมื่อใดที่ความดันด้านกลับ Built-Up มีค่ามากกว่า Overpressure จะส่งผลให้วาล์วถูกบังคับปิดลง ดังนั้นจึงควรออกแบบขนาดท่อขาออกจากวาล์วให้เหมาะสมในแต่ละระบบ

ท่อที่ออกจากวาล์วและท่อรวมแก๊สทั้งหมดถูกกำหนดขนาดสำหรับสถานการณ์ที่ต้องรับสารในปริมาณมากที่สุด การกำหนดขนาดทำได้โดยคำนวณย้อนกลับจากจุดปลายสุดของท่อที่ต่อกับวาล์วระบายความดันตัวนั้นๆ ซึ่งจะต้องทราบความดันด้านกลับ Superimpose ที่ปลายทางออกของท่อ เมื่อพิจารณาอัตราการไหลของของไหลที่ออกจากวาล์วระบายความดันแต่ละตัว และใช้สมการคำนวณความดันลดจะทำให้ทราบค่าความดันด้านกลับ Built-Up ของวาล์วระบายความดันแต่ละตัวได้

ในการคำนวณ มีตัวแปรสองค่าที่ต้องพิจารณา ได้แก่

- 1) เลขมัค (Mach Number) ในแต่ละส่วนของท่อไม่ควรเกิน 0.5
- 2) ค่าความดันด้านกลับของวาล์วระบายความดันแต่ละตัวไม่ควรเกิน 30-50% ของค่าความดันที่ตั้งไว้

2.11.3.3 สมการสำหรับการไหลแบบอุนทวมิกิงที่ (American Petroleum Institute, 2008)

อ้างอิงจากมาตรฐาน API Recommended Practice 521 ใช้ในการคำนวณความดันที่เกิดขึ้น จากด้านปลายท่อย้อนกลับไปยังต้นทางหรือที่ท่อทางออกของวาล์วระบายความดัน

$$\frac{fL}{D} = \frac{1}{(Ma_2)^2} \times \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 \times \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^2\right] - \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)^2 \quad (2.29)$$

- โดยที่ f = ค่าตัวประกอบเสียดทาน
 L = ความยาวท่อ (M)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (M)
 Ma_2 = เลขมัคที่ปลายทางออกของท่อ
 P_1 = ความดันต้นทางที่ปล่อยออกจากควาล์วระบายความดัน (Kpa)
 P_2 = ความดันปลายทางที่ปลายทางออกของท่อ (Kpa)

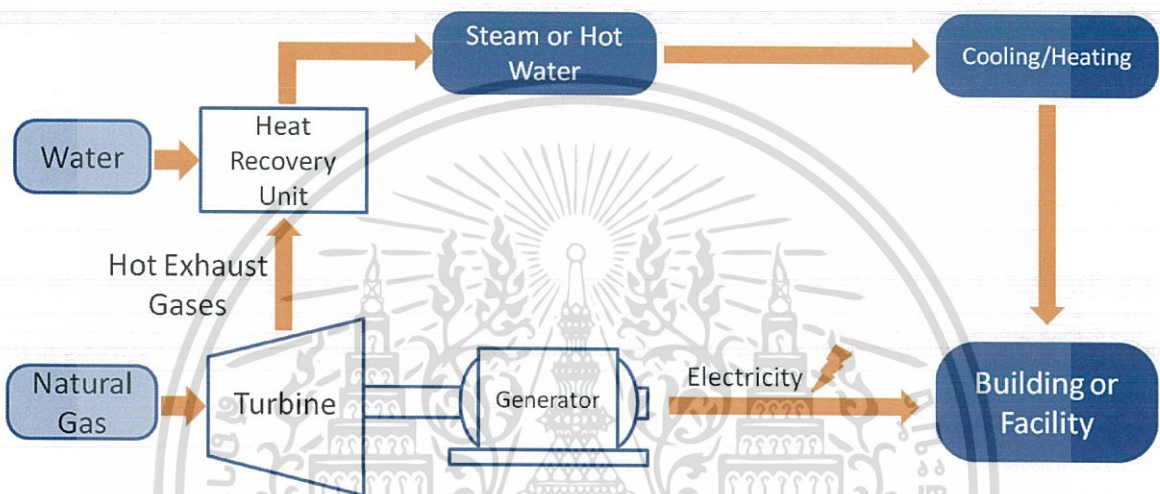
สำหรับเลขมัคที่ปลายท่อแต่ละส่วนสามารถหาได้จาก

$$Ma_2 = 3.293 \times 10^{-7} \times \left(\frac{W}{P_2 D^2}\right) \left(\frac{ZT}{kMw}\right)^{0.5} \quad (2.37)$$

- โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (M)
 k = อัตราส่วนความจุความร้อนจำเพาะของแก๊ส
 Mw = มวลโมเลกุลของแก๊ส (Kg/Kmole)
 P_2 = ความดันปลายทางที่ปลายทางออกของท่อ (Kpa)
 T = อุณหภูมิของแก๊ส (K)
 W = อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (Kg/H)
 Z = Compressibility Factor

2.12 ระบบผลิตพลังงานร่วม (Cogeneration) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

ระบบผลิตพลังงานร่วมหรือระบบโคเจนเนอเรชัน (Cogeneration) คือ ระบบที่ให้กำเนิดพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานกลและมีการใช้ประโยชน์จากพลังงานความร้อนควบคู่ไปด้วยในขณะเดียวกัน ซึ่งอาศัยเชื้อเพลิงแหล่งเดียวกัน



รูปที่ 2.10 ระบบไฟฟ้าพลังงานร่วม

ที่มา : c2es.org, 2016

ระบบผลิตพลังงานร่วมที่ใช้งานอยู่ในปัจจุบันสามารถผลิตพลังงานกลเพื่อใช้ขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้จากเครื่องต้นกำลัง 3 ชนิด คือ

- 1 ระบบกังหันไอน้ำ (Steam Turbine)
- 2 ระบบกังหันแก๊ส (Gas Turbine)
- 3 ระบบเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Internal Combustion Engine)

2.12.1 ระบบผลิตพลังงานร่วมชนิดกังหันไอน้ำ

ระบบชนิดนี้ประกอบด้วย หม้อไอน้ำ เครื่องกังหันไอน้ำ ที่ใช้เชื้อเพลิงเหลว แก๊สหรือเชื้อเพลิงแข็ง หลักการทำงานคือ เชื้อเพลิงจะถูกป้อนเข้าสู่ห้องเผาไหม้เพื่อให้ความร้อนแก่น้ำในหม้อไอน้ำ ซึ่งได้อิอน้ำยวดยิ่ง (Superheat Steam) ที่อุณหภูมิและความดันสูง ไอน้ำจะไปขับเคลื่อนกังหันไอน้ำได้กำลังงานที่เพล่า ซึ่งสามารถนำไปขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น ปั๊ม คอมเพรสเซอร์ หรือเปลี่ยนรูปเป็นไฟฟ้าโดยนำไปขับเคลื่อนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนไอน้ำที่ออกจากเครื่องสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไป กังหันไอน้ำ 2 ชนิดที่นิยมใช้คือ กังหันไอน้ำชนิด Back Pressure และกังหันไอน้ำชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Extraction ซึ่งหลักการทำงานแตกต่างกัน ตรงที่กักกันชนิด Back Pressure ไอน้ำที่ผ่านกักกันไอน้ำจะถูกลอยออกจากตัวกักกัน และมีความดันเหลืออยู่ประมาณ 3-20 บาร์ สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตต่อไปได้ ส่วนกักกันชนิด Extraction ไอน้ำบางส่วนถูกลอยออกมาในช่วงกลางของกักกัน และไอน้ำที่ปล่อยออกมานี้จะมีความดันหลายขนาดให้เลือกลงตามความเหมาะสมกับจุดใดจุดหนึ่งของกระบวนการผลิต ไอน้ำที่เหลือจะถูกลอยให้ขยายตัวผ่านกักกัน เพื่อผลิตไฟฟ้าจนมีความดันต่ำแล้วจึงออกจากกักกัน ข้อดีของกักกันไอน้ำคือสามารถใช้เชื้อเพลิงได้หลากหลายชนิด เช่น ถ่านหิน แก๊สธรรมชาติ น้ำมันเตา และพลังงานชีวมวล

2.12.2 ระบบผลิตพลังงานร่วมชนิดกักกันแก๊ส

หลักการทำงานคือ คอมเพรสเซอร์จะอัดอากาศจากภายนอก และนำเข้าสู่ห้องเผาไหม้เชื้อเพลิงที่นิยมใช้ได้แก่ แก๊สธรรมชาติ จะถูกฉีดเข้ามาผสมกับอากาศและจุดระเบิด เกิดแก๊สร้อนจากการเผาไหม้ขึ้น ซึ่งจะไปขยายตัวผ่านเครื่องกักกันแก๊ส ทำให้กักกันแก๊สหมุน แกนของเครื่องกักกันแก๊สจะต่อไปขับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนแก๊สร้อนที่ปล่อยจากกักกันแก๊สจะมีอุณหภูมิประมาณ 450-550 องศาเซลเซียส แก๊สร้อนนี้สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งให้ความร้อน โดยใช้อุปกรณ์เสริมคือ Waste Heat Boiler เพื่อผลิตไอน้ำที่ความดันต่ำๆ หรือนำไปใช้ในกระบวนการผลิต

กักกันแก๊สเป็นที่นิยมใช้เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการติดตั้งที่ต่ำ และมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ใช้เวลาในการเริ่มดำเนินระบบน้อย และสามารถแบ่งส่วนการใช้งานได้หลากหลาย

2.12.3 ระบบผลิตพลังงานร่วมชนิดเครื่องยนต์สันดาปภายใน

ระบบนี้สามารถแบ่งได้ตามประเภทเครื่องยนต์เป็น 2 ชนิด คือ เครื่องยนต์ Spark-Ignition Engines จะใช้เชื้อเพลิงเหลวหรือแก๊สธรรมชาติเป็นเชื้อเพลิง และเครื่องยนต์ Compression-Ignition Engines จะใช้น้ำมันดีเซลหรือน้ำมันเตาเป็นเชื้อเพลิง พลังงานที่ผลิตได้อยู่ในช่วง 100 Kw ถึง 10 Mw พลังงานความร้อนที่ได้อยู่ในรูปของแก๊สไอเสีย น้ำหล่อเย็นเสื่อสูบและน้ำมันหล่อลื่น ซึ่งการนำพลังงานความร้อนไปใช้อาจใช้คู่กับ Waste Heat Boiler ในการผลิตไอน้ำหรือน้ำร้อน ระบบผลิตพลังงานร่วมชนิดเครื่องยนต์สันดาปภายใน เป็นที่นิยมสำหรับโรงงานที่ต้องการใช้พลังงานไฟฟ้ามากกว่าพลังงานความร้อน เนื่องจากเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการผลิตพลังงานสูงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ชนิดอื่นๆ และมีการทำงานที่คงที่แม้อุณหภูมิภายนอกจะเปลี่ยนแปลง แต่อย่างไรก็ตาม ระบบนี้เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานและค่าการบำรุงรักษาสูง

2.13 ฉนวนกันความร้อน (บริษัท ไตรชัน ดีเวลอปเม้นท์ จำกัด)

ฉนวนกันความร้อนหมายถึง วัสดุที่มีความสามารถในการป้องกันความร้อนไม่ให้ส่งผ่านจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่ง การส่งผ่านความร้อนจากด้านหนึ่งไปยังอีกด้านหนึ่งของวัตถุใดๆ หรือ การถ่ายเทความร้อน (Heat Transfer) สามารถเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิของวัตถุทั้งสองมีความแตกต่างกัน ทั้งทางกายภาพและฟิสิกส์ ซึ่งลักษณะการถ่ายเทความร้อนดังกล่าวนี้มี 3 วิธี โดยอาจเกิดขึ้นจากวิธีใดวิธีหนึ่งหรือหลายๆ วิธีพร้อมกันหรือผสมผสานกันได้แก่ การนำความร้อน การพาความร้อน และการแผ่รังสีความร้อน

ประเภทของฉนวนกันความร้อน แบ่งตามวัสดุได้ 4 ประเภทคือ

1. วัสดุประเภทใยแร่ (Mineral Fibrous Material) เช่น ใยหิน ใยโลหะที่ได้จากการถลุงโลหะ ใยแก้ว
2. วัสดุประเภทเส้นใยธรรมชาติ (Organic Fibrous Material) เช่น ไม้ ชานอ้อย ฝ้าย ขนสัตว์ เส้นใยเซลลูโลส ใยสังเคราะห์
3. วัสดุประเภทเซลล์แร่ (Mineral Cellular Material) เช่น แกลเซียมซิลิเกต เพอร์ไลท์ เวอร์มิคูไลท์ โฟมคอนกรีต
4. วัสดุประเภทเซลล์ธรรมชาติ (Organic Cellular Material) เช่น ไม้ก๊อก โฟมยาง โพลีสไตรีน โพลียูรีเทน

คุณสมบัติของฉนวนกันความร้อนที่ดีควรมีค่าการนำความร้อนต่ำ เมื่อฉนวนมีค่าการนำความร้อนต่ำ จะทำให้ใช้ฉนวนที่มีความหนาน้อยลงได้ ซึ่งค่าการนำความร้อนเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของวัสดุที่ใช้ในการทำฉนวน นอกจากนี้ ฉนวนควรมีค่าการต้านทานความร้อนสูง ซึ่งค่าการต้านทานความร้อน หมายถึง ความสามารถของวัสดุที่จะยับยั้งการถ่ายเทความร้อนได้ ยิ่งค่าการนำความร้อนสูงมากเท่าไร แสดงว่าวัสดุชนิดนั้นเป็นฉนวนที่ดี

การใช้ฉนวนกันความร้อนต้องเลือกใช้ให้ตรงกันวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ซึ่งคุณสมบัติที่ใช้ในการพิจารณาการเลือกใช้ฉนวนได้แก่ 1. ติดตั้งได้ง่ายและสะดวก 2. มีน้ำหนักเบาและแข็งแรง 3. มีความคงตัวสูงและเปลี่ยนรูปได้ยาก 4. มีค่าการนำความร้อนต่ำ 5. มีความยืดหยุ่น คงทนต่อแรงดึงและแรงอัด 6. สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดี 6. ทนต่อการติดไฟ 7. มีอัตราการดูดซับความชื้นต่ำ

2.14 การถ่ายเทความร้อน (Holman, 2010)

2.14.1 การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน (Conduction)

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัตถุใดวัตถุหนึ่งเกิดจากการถ่ายเทพลังงานจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังอุณหภูมิต่ำ สามารถเรียกลักษณะการถ่ายเทความร้อนแบบนี้ว่าการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน โดยสามารถคำนวณได้จาก

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.30)$$

โดยที่ q_x = อัตราการถ่ายเทความร้อน
 $\frac{\partial T}{\partial x}$ = การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature Gradient)
 k = สัมประสิทธิ์การนำความร้อน (Thermal Conductivity)
 A = พื้นที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของพลังงาน
 $-$ = สัญลักษณ์เพื่อกลับค่า q_x ให้กลายเป็นบวก ตามหลักข้อที่สองของเทอร์โม

ไดนามิกส์

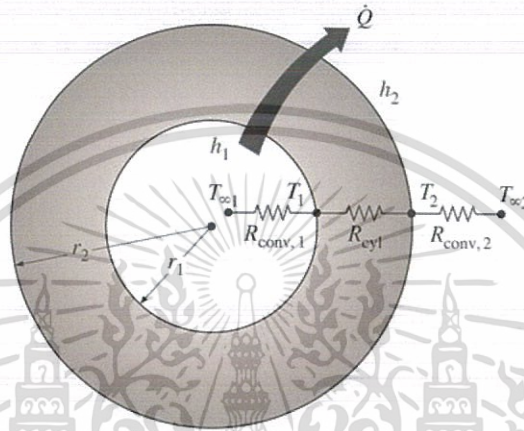
อัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น สามารถพิจารณาในรูปแบบของวงจรไฟฟ้าได้ โดยการรวมกันของสัมประสิทธิ์การนำความร้อน ความหนาของวัตถุและพื้นที่ในการนำความร้อน เป็นค่าความต้านทานการไหลของวงจรความร้อน และอุณหภูมิในแต่ละจุดของวงจรคือความต่างศักย์หรือแรงขับเคลื่อน ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการการถ่ายเทความร้อนได้ใหม่เป็น

$$q = \frac{\Delta T_{overall}}{\Sigma R_{th}} \quad (2.31)$$

โดยที่ R_{th} = ตัวต้านทานความร้อน (Thermal Resistances)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อน สามารถเกิดได้ทุกทิศทาง ดังนั้นการนำความร้อนผ่านท่อในเตาเพิ่มอุณหภูมิ จึงมีลักษณะการถ่ายเทความร้อนไปตามแนวรัศมีของท่อ (Radial System) ได้ด้วย ในกรณีที่ท่อมีความยาวมากกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อมากๆ สามารถสมมติให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแบบการนำความร้อนในแนวรัศมีท่ออย่างเดียวได้



รูปที่ 2.11 การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อ

ที่มา : Holman, 2010

พบว่าค่า R_{th} หรือค่าตัวต้านทานการนำความร้อนในแนวรัศมีของท่อมีค่าเท่ากับ

$$\frac{\ln(r_o / r_i)}{2\pi kL} \quad \text{จะได้ว่า}$$

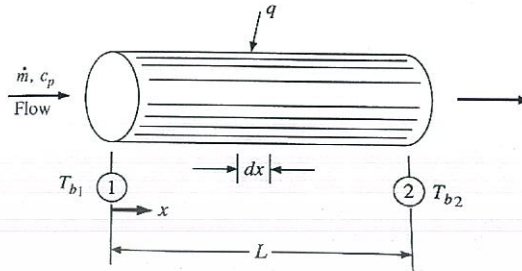
$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln(r_o / r_i)} \quad (2.32)$$

2.14.2 การพาความร้อนที่เกิดจากของไหลภายในท่อ (Holman, 2010)

Bulk Temperature เป็นสิ่งสำคัญในการคำนวณปริมาณการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในท่อ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากพลังงานที่เปลี่ยนไปของของไหลที่ไหลอยู่ในท่อดังสมการ (2.33)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$q = \dot{m}C_p(T_{b2} - T_{b1}) \quad (2.33)$$



รูปที่ 2.12 ปริมาณการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดในรูปของ Bulk Temperature

ที่มา : Holman, 2010

ปริมาณการถ่ายเทความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในท่อสามารถหาได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$q = hA(T_w - T_b)_{av} \quad (2.34)$$

โดยที่ A = พื้นที่ผิวของการถ่ายเทความร้อนทั้งหมด
 T_w = อุณหภูมิที่ผนังท่อ
 T_b = Bulk Temperature

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา

ในการออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา เนื่องจากการต่อท่อไปยัง Flare Header โดยตรงนั้น จะต้องต่อท่อที่มีความชันเพียงพอที่จะส่งของเหลวเข้าสู่ Flare Header ได้ และเนื่องจาก Flare Header นั้นอยู่สูงกว่าระดับพื้นดินมาก จึงต้องสร้างฐานรองรับท่อที่สูงขึ้นเพื่อให้ระบบท่อมีความชันเพียงพอ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง ดังนั้น อีกทางเลือกหนึ่งในการออกแบบระบบคือการสร้าง Knockout Drum เพื่อให้แยกของเหลวออกจากแก๊สก่อนส่งไปทำลายที่ขังหอเผา

การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลว ประกอบด้วย การออกแบบ 2 ส่วนด้วยกัน ได้แก่ การออกแบบ Horizontal Knockout Drum และการคำนวณขนาดท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมไปยังระบบหอเผาและถังทังสาร มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

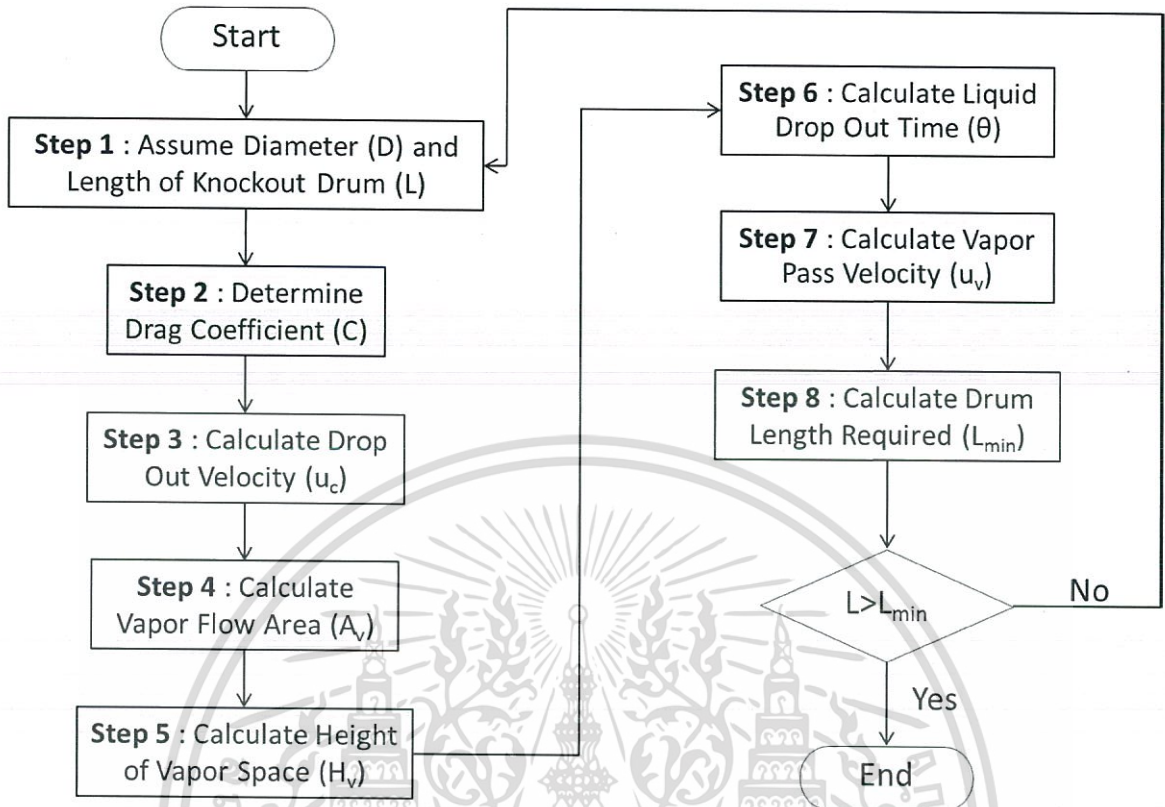
3.1.1 การออกแบบ Horizontal Knockout Drum

3.1.1.1 ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ Horizontal Knockout Drum

3.1.1.2 ศึกษาข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบ Horizontal Knockout Drum

3.1.1.3 ออกแบบขนาดของ Horizontal Knockout Drum ตามมาตรฐาน API 521

ขั้นตอนในการออกแบบ Horizontal Knockout Drum แบ่งออกเป็น 8 ขั้นตอนด้วยกัน



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการออกแบบ Horizontal Knockout Drum

1) สมมติค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของ Horizontal Knockout Drum อัตราส่วนระหว่างความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของ Horizontal Knockout Drum ที่แนะนำตามมาตรฐาน API 521 ที่ค่าระหว่าง 3-5 แต่สำหรับการออกแบบทั่วไปนิยมใช้อัตราส่วนเท่ากับ 3 เนื่องจากราคาค่าใช้จ่ายในการสร้าง Horizontal Knockout Drum น้อยที่สุด

2) คำนวณค่า Drag Coefficient

$$C(\text{Re})^2 = \frac{0.13 \times 10^8 \rho_v D^3 (\rho_l - \rho_v)}{\mu^2} \quad (3.1)$$

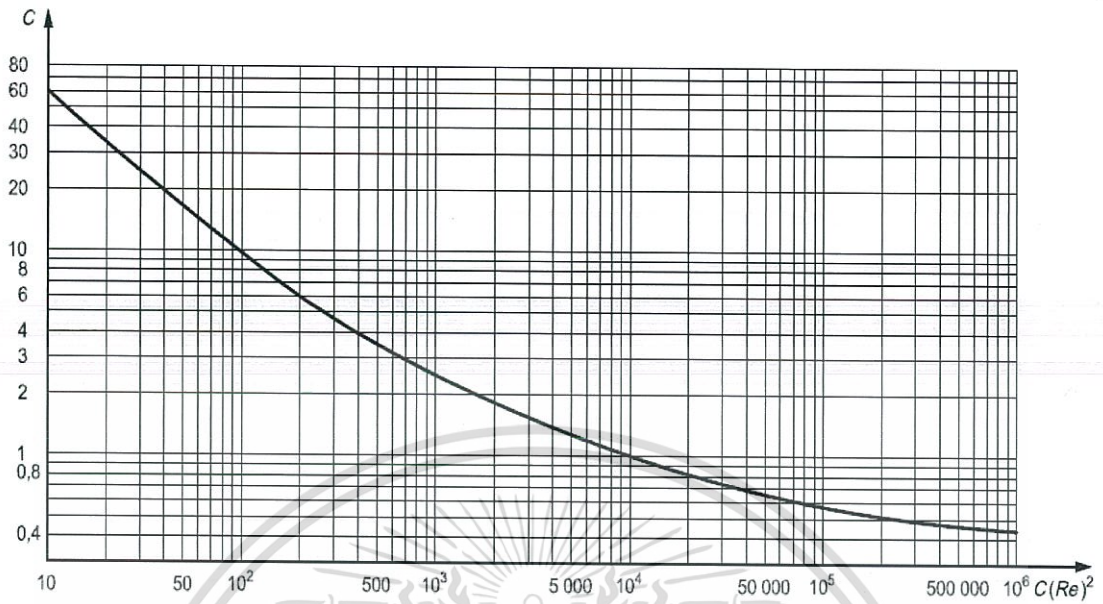
โดยที่ D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค (m)

μ = ความหนืดของแก๊ส (cP)

ρ_v = ความหนาแน่นของแก๊ส (kg/m^3)

ρ_l = ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ค่า Drag Coefficient

ที่มา : American Petroleum Institute Standard 521, 2008

3) คำนวณค่า Drop Out Velocity

$$u_c = 1.15 \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v C}} \quad (3.2)$$

โดยที่ C = Drag coefficient
 g = ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก (m/s²)
 u_c = Drop out velocity (m/s)

4) คำนวณค่า Vapor Flow Area

$$A_v = A_t - A_L \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ A_t = พื้นที่หน้าตัด Knockout Drum (m^2)
 A_v = พื้นที่หน้าตัดที่แก๊สไหลผ่าน (m^2)
 A_L = พื้นที่หน้าตัดของของเหลว (m^2)

5) คำนวณค่า Height of Vapor Space

$$h_v = h_t - h_L \quad (3.4)$$

โดยที่ h_t = เส้นผ่านศูนย์กลาง Knockout Drum (m)
 h_v = ความสูงที่แก๊สไหลผ่าน (m)
 h_L = ความสูงของของเหลว (m)

6) คำนวณค่า Liquid Dropout Time

$$\theta = \frac{h_v}{u_c} \quad (3.5)$$

โดยที่ θ = Liquid drop out time (s)

7) คำนวณค่า Vapor Pass Velocity

$$u_v = \frac{Q_g}{A_v} \quad (3.6)$$

โดยที่ Q_g = อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส (kg/h)
 u_v = ความเร็วของแก๊ส (m/s)

8) คำนวณค่า Drum Length Required

$$L_{\min} = u_v \theta \quad (3.7)$$

โดยที่ L_{\min} = Drum length required (m)

ถ้าค่าความยาวของ Horizontal Knockout Drum ที่สมมติในขั้นตอนที่ 1 มีค่าน้อยกว่าค่า Drum Length Required แล้ว ต้องทำการสมมติค่าเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของ Horizontal Knockout Drum ใหม่ในขั้นตอนที่ 1 และคำนวณซ้ำอีกครั้ง

ถ้าค่าความยาวของ Horizontal Knockout Drum ที่สมมติในขั้นตอนที่ 1 มีค่ามากกว่าค่า Drum Length Required แล้ว แสดงว่า Horizontal Knockout Drum มีขนาดเพียงพอสำหรับระบบที่ออกแบบ

3.1.2 การคำนวณขนาดท่อส่งแก๊สไปยังระบบหอเผาและถังตั้งสาร

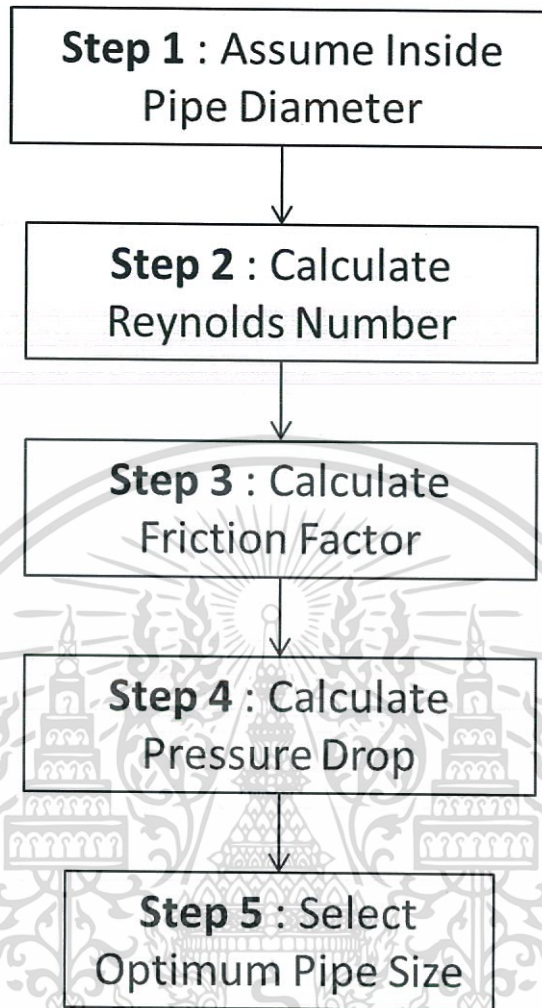
3.1.2.1 ศึกษามาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบท่อ

3.1.2.2 ศึกษาข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณออกแบบระบบท่อ

3.1.2.3 ศึกษาเส้นทางในการต่อท่อจากบริเวณถังเก็บไปยังระบบหอเผาและถังตั้งสาร

3.1.2.4 คำนวณออกแบบขนาดของท่อโดยประมาณที่ต่อไปยังระบบหอเผาและถังตั้งสาร

ขั้นตอนในการคำนวณออกแบบระบบท่อแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนด้วยกัน



รูปที่ 3.3 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการออกแบบระบบท่อ

ในการออกแบบระบบท่อ จะต้องคำนวณค่าความดันตกที่เกิดขึ้นในท่อแต่ละขนาด และเลือกขนาดท่อที่เหมาะสมกับระบบมาใช้งาน

1. สมมติขนาดท่อเพื่อใช้ในการคำนวณขั้นต่อไป
2. คำนวณเลขเรย์โนลด์

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (3.8)$$

โดยที่ D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (m)
 v = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ (m/s)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)
 μ = ความหนืดสัมบูรณ์ (kg/m.s)
 ν = ความหนืดคินเนมาติก (m^2/s)

3. คำนวณค่าตัวประกอบเสียดทาน

S.W. Churchill's Equation

$$f = 8 \left(\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right)^{1/12} \quad (3.9)$$

$$A = \left[2.457 \ln \left(\frac{1}{\left(\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D} \right)} \right) \right]^{16} \quad (3.10)$$

$$B = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (3.11)$$

- โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
 f = ค่าตัวประกอบเสียดทาน
 Re = เลขเรย์โนลด์
 ε = ความขรุขระของผนังท่อ (m)

4. คำนวณความดันตกที่เกิดขึ้นในท่อ

- ท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลว (สถานะแก๊ส) ไปยังหอเผา

$$P_1^2 - P_2^2 = Z \frac{RT}{Mw} \left(\frac{W}{A} \right)^2 \left(f \frac{L}{D} + 2 \ln \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (3.12)$$

- โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดท่อ (m^2)
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- f = ค่าตัวประกอบเสียดทาน
 L = ความยาวของท่อ (m)
 Mw = มวลโมเลกุลของของไหล (kg/kmole)
 P₁ = ความดันที่ด้านต้นทาง (kPa)
 P₂ = ความดันที่ด้านปลายทาง (kPa)
 R = ค่าคงที่ของแก๊ส
 T = อุณหภูมิของของไหล (K)
 W = อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (kg/h)
 Z = Compressibility factor

- ท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลว (สถานะของเหลว) ไปยังถังตั้งสาร

$$h_f = f \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (3.13)$$

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (3.14)$$

- โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ (m)
 f = ตัวประกอบความเสียดทานของคาร์ซี
 g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s²)
 h_f = การสูญเสียหลักจากแรงเสียดทาน
 v = ความเร็วในการไหล (m/s)
 ΔP = ผลต่างของความดัน

5. สมการคำนวณความเร็วของแก๊สในท่อ

$$v = \frac{\rho A}{W} \quad (3.15)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โดยที่ A = พื้นที่หน้าตัดท่อ (m^2)
 W = อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล (kg/h)
 ρ = ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

3.1.2.5 ตรวจสอบค่าที่คำนวณได้เทียบกับค่ามาตรฐานและเลือกท่อขนาดที่เหมาะสม

3.1.2.6 กำหนดจุดเชื่อมต่อ (Tie in)

3.1.2.7 จัดทำ Design Specification

3.2 การคำนวณความหนาของฉนวนความร้อนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง

มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

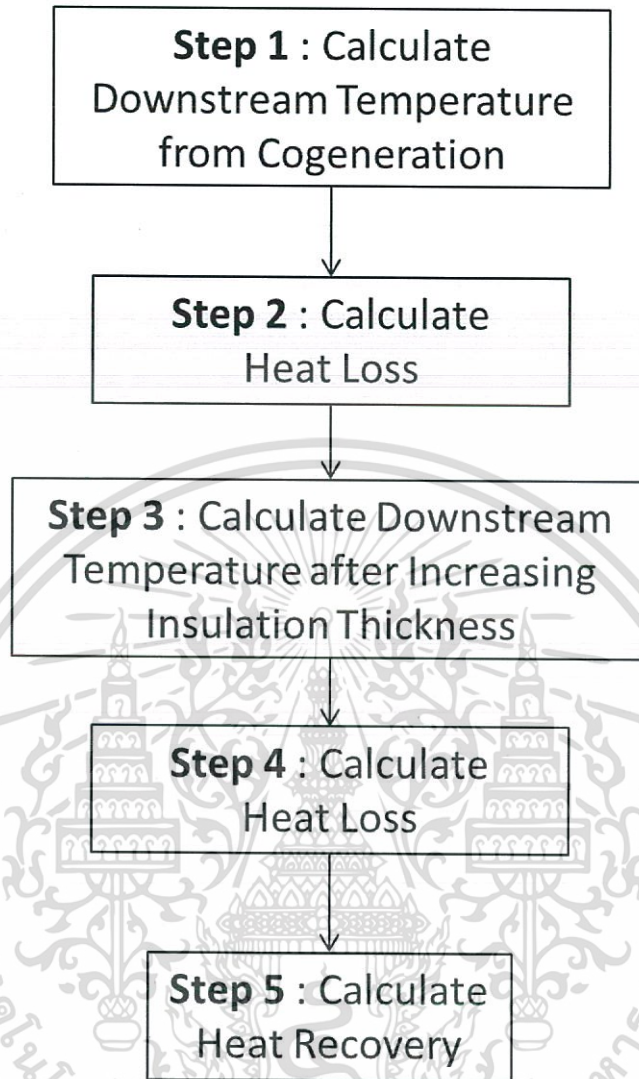
3.2.1 ศึกษาเส้นทางการขนส่งไอน้ำความดันสูงไปยังหน่วยกลั่นที่ 4

3.2.2 ศึกษาข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง

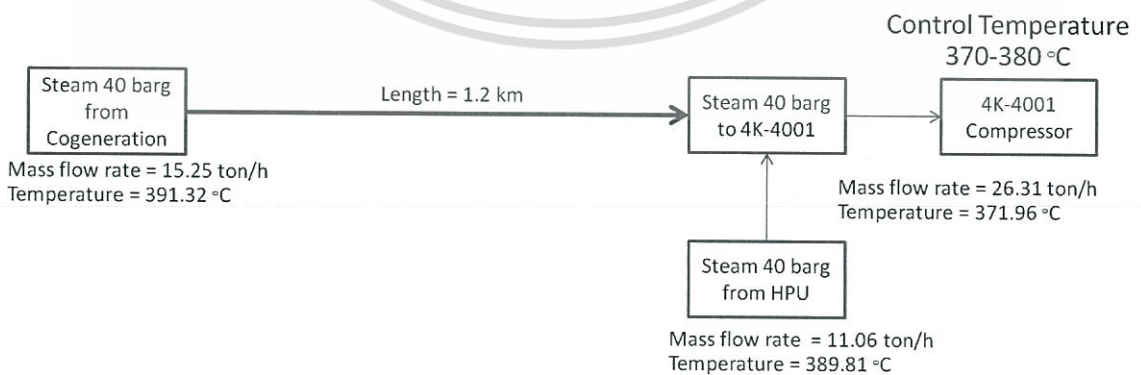
3.2.3 คำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง

ขั้นตอนในการคำนวณความหนาของฉนวนท่อไอน้ำความดันสูง แบ่งออกเป็น 5

ขั้นตอนด้วยกัน



รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงขั้นตอนในการคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงระบบขนส่งไอน้ำเข้าอุปกรณ์ 4k-4001 Compressor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณความหนาของฉนวน เนื่องจากมีอุปกรณ์ที่ต้องควบคุมอุณหภูมิของไอน้ำให้อยู่ในช่วงอุณหภูมิ 370-380 องศาเซลเซียส ซึ่งได้แก่ 4k-4001 Compressor เนื่องจากถ้าอุณหภูมิไอน้ำต่ำกว่า 370 องศาเซลเซียส จะทำให้ไอน้ำควบแน่น และเกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์เสียหายได้ ดังนั้นจะใช้ช่วงอุณหภูมิของ 4k-4001 Compressor เป็นฐานในการคำนวณ และเนื่องจาก 4k-4001 Compressor รับไอน้ำจากสองแหล่งด้วยกัน ได้แก่ ไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมและไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน ดังแสดงตามรูปที่ 3.5

3.2.3.1 จำนวนอุณหภูมิปลาตทางของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม

เนื่องจากไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor มาจากไอน้ำจากสองแหล่งผสมกัน และไม่มีตัววัดค่าอุณหภูมิของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน ดังนั้น จึงต้องคำนวณอุณหภูมิของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมดังสมการ

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 \quad (3.16)$$

$$m_{tot} Cp_{tot} \Delta T_{tot} = m_1 Cp_1 \Delta T_1 + m_2 Cp_2 \Delta T_2 \quad (3.17)$$

- โดยที่
- Q_{tot} = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของไอน้ำก่อนเข้าสู่ 4k-4001 Compressor
 - Q_1 = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม
 - Q_2 = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของไอน้ำจาก หน่วยผลิตไฮโดรเจน
 - m_{tot} = อัตราการไหลเชิงมวลรวมของไอน้ำก่อนเข้าสู่ 4k-4001 Compressor
 - m_1 = อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม
 - m_2 = อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน
 - Cp_{tot} = ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor
 - Cp_1 = ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน
 - Cp_2 = ความจุความร้อนจำเพาะไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม

3.2.3.2 การคำนวณความร้อนสูญเสียของไอน้ำ

$$Q = mCp\Delta T \quad (3.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3.3 การคำนวณค่าอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมก่อนผสมกับไอน้ำจาก หน่วยผลิตไฮโดรเจนหลังเพิ่มความหนาของฉนวน

$$Q = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln \frac{r'}{r_i}}{2\pi L k_1} + \frac{\ln \frac{r_o}{r'}}{2\pi L k_2}} \quad (3.19)$$

โดยที่ T_i = อุณหภูมิของไอน้ำภายในท่อ
 T_o = อุณหภูมิผิววนอกของฉนวน
 r_i = รัศมีภายในของท่อ
 r' = รัศมีภายนอกของท่อ
 r_o = รัศมีของผิวฉนวน ($r' +$ ความหนาของฉนวน)
 L = ระยะทางของท่อส่งไอน้ำความดันสูง
 k_1 = ค่า Thermal Conductivity ของท่อ
 k_2 = ค่า Thermal Conductivity ของฉนวน

การคำนวณอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำจะใช้หลักการค่าความร้อนสูญเสียของการส่งไอน้ำจากต้นทางไปยังปลายทางจะเท่ากับค่าความร้อนที่ถ่ายเทจากไอน้ำภายในท่อไปยังผิวของฉนวนหุ้มท่อ

NetChangeHeat = Conduction Heat

$$mCp\Delta T = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln \frac{r'}{r_i}}{2\pi L k_1} + \frac{\ln \frac{r_o}{r'}}{2\pi L k_2}} \quad (3.20)$$

การคำนวณจะใช้การคำนวณแบบ Trial and Error ซึ่งต้องสมมติค่าอุณหภูมิปลายทาง และคำนวณจนกว่าค่าทั้งสองข้างของสมการจะเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากคำนวณอุณหภูมิของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมหลังเพิ่มความหนาของฉนวนแล้ว จะต้องคำนวณอุณหภูมิของไอน้ำหลังผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน โดยใช้สมการ(3.16) ในการคำนวณ และคำนวณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นหลังเพิ่มความหนาของฉนวนโดยใช้สมการ (3.18) ในการคำนวณ

นอกจากนี้ ในกรณีที่หน่วยผลิตไฮโดรเจนไม่สามารถส่งไอน้ำมาได้ จะต้องเร่งอัตราการไหลของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมขึ้น เพื่อส่งไอน้ำเข้าสู่ 4k-4001 Compressor และจะต้องคำนวณค่าอุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้าอุปกรณ์ทั้งก่อนและหลังเพิ่มความหนาของฉนวน และใช้สมการ (3.20) ในการคำนวณอุณหภูมิไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor

3.2.3.4 การคำนวณปริมาณความร้อนที่สามารถลดได้หลังเพิ่มความหนาของฉนวน

เมื่อกำหนดให้บริเวณฐานรับรองท่อไม่สามารถหุ้มฉนวนได้ทำให้ความร้อนสูญเสียมากกว่าค่าที่คำนวณได้อยู่ 10%

$$Q_{recovery} = Q_{loss,200mm} - (1.1 \times Q_{loss,newinsulation}) \quad (3.21)$$

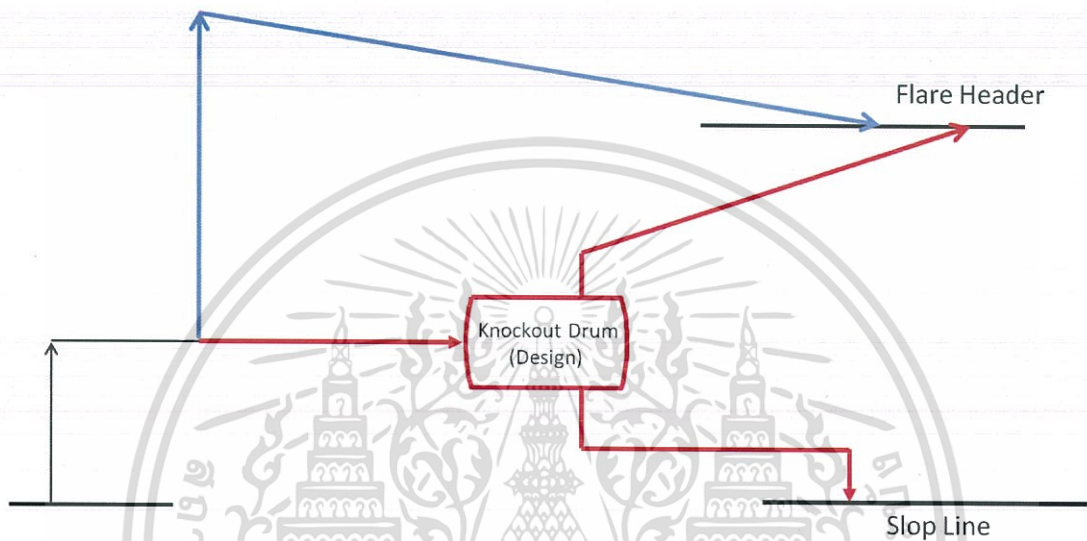
3.2.3.5 การคำนวณค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้

$$\text{Heat loss} \times \text{Energy cost} \times \text{Working day} \quad (3.22)$$

บทที่ 4

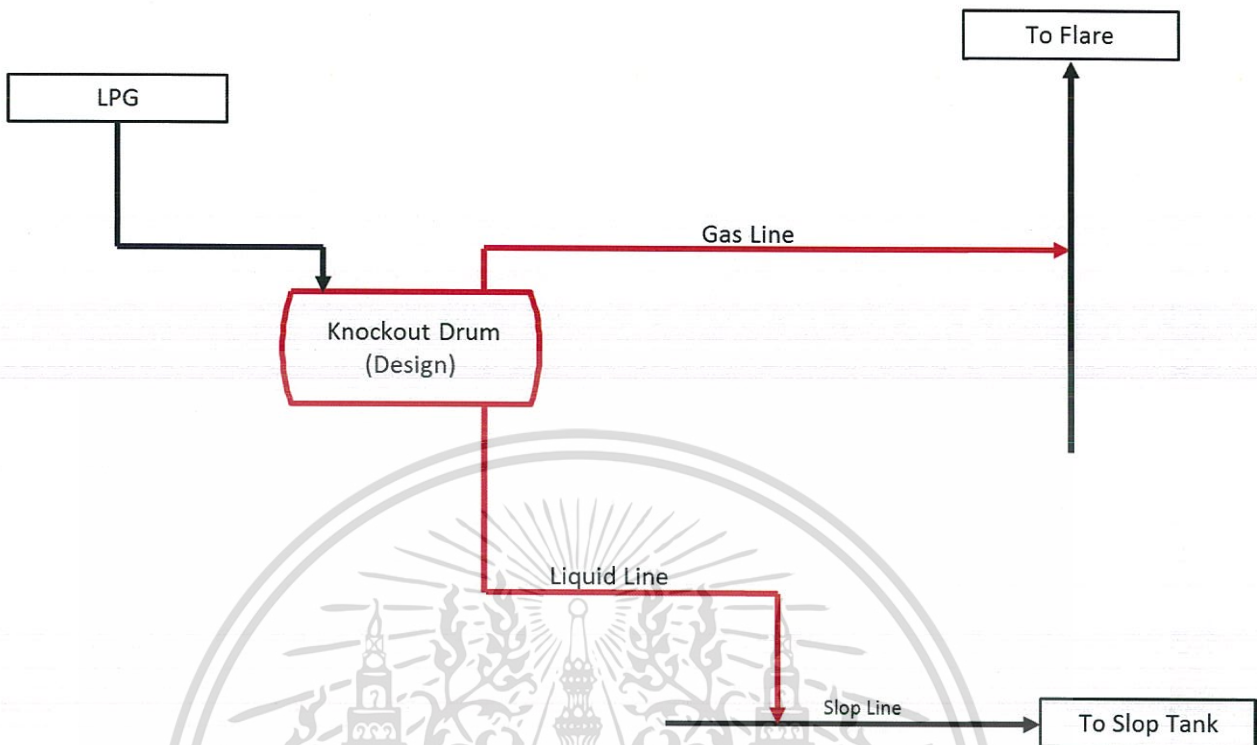
ผลการดำเนินงาน

4.1 การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา



รูปที่ 4.1 แผนภาพแนวทางติดตั้งระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา

ในการติดตั้งท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังหอเผานั้นมีแนวทางในการติดตั้งด้วยกันสองแนวทาง แนวทางแรกคือต่อท่อเข้า Flare Header โดยตรง แต่เนื่องจากการต่อท่อเข้า Flare Header จะต้องมี ความชันของท่อที่เพียงพอในการส่งของเหลวที่ติดมากับแก๊สที่ปล่อยออกจากระบบเข้าสู่ระบบหอเผา จึงต้องยกระดับของท่อให้สูงขึ้น และเนื่องจาก Flare Header เดิมที่มีอยู่นั้น อยู่สูงจากระดับพื้นดินมาก ทำให้การติดตั้งท่อ จำเป็นต้องสร้างฐานรองรับท่อขึ้นใหม่ และมีค่าใช้จ่ายที่สูง ดังนั้นแนวทางในการติดตั้งท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผาอีกแนวทางหนึ่งคือการติดตั้ง Knockout Drum ตัวใหม่ เพื่อแยกของเหลวที่ติดมากับแก๊สที่ปล่อยออกจากระบบออกก่อนจะส่งเข้าไปยัง Flare Header ดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.2 แผนภาพการติดตั้งระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา

4.1.1 การออกแบบ Knockout Drum

ข้อมูลการออกแบบ

รายละเอียด

สารที่บรรจุ

แก๊สปิโตรเลียมเหลว

มวลโมเลกุล

53.46 kg/kmol

ความดันออกแบบ*

3.5 barg

อุณหภูมิออกแบบ

30 °C

อัตราการไหลเชิงมวล

2740 kg/h

-สถานะแก๊ส

1738.83 kg/h

-สถานะของเหลว

1001.10 kg/h

ขนาดอนุภาคสาร*

300 μ m

เวลาที่ใช้รองรับของเหลว*

20 min

หมายเหตุ *ค่าตามมาตรฐานการออกแบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลผลการคำนวณ Horizontal Knockout Drum

Trial No.	D (m)	L (m)	Cross-Sectional Area (m ²)			Vertical Depth (m)			θ (s)	u_v (m/s)	L_{min} (m)
			A_t	A_L	A_v	h_t	h_L	h_v			
1	0.5	1.5	0.2	0.37	-0.18	0.5	0.58	-0.08	-	-	-
2	1	3	0.79	0.19	0.4	1.0	0.29	0.71	1.8	0.08	0.15
3	1.5	4.5	1.77	0.12	1.64	1.5	0.18	1.32	3.32	0.03	0.1

หมายเหตุ D คือค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง Knockout Drum ที่สมมติขึ้น

L คือ ค่าความยาวของ Knockout Drum ที่สมมติขึ้น

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่าการคำนวณ Trial and Error ในการออกแบบ Knockout Drum ตามมาตรฐาน API 521 กำหนดขนาดของถังให้สามารถรับของเหลวในเหตุการณ์ฉุกเฉินได้เป็นระยะเวลา 20 นาที ขนาดของ Knockout Drum ที่เหมาะสมมีหลายขนาด ซึ่งต้องมีค่าความยาว Knockout Drum ที่ต้องการ (L_{min}) น้อยกว่าค่าความยาวที่กำหนดขึ้นในตอนแรก ทั้งนี้ในการเลือกขนาดของ Knockout Drum ที่จะนำมาใช้งานจะพิจารณาจากราคาค่าใช้จ่ายในการสร้างและการติดตั้ง ซึ่งได้ขนาดของ Knockout Drum ที่เหมาะสมมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ 1 เมตร และความยาวที่ 3 เมตร

4.1.2 การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลว

ข้อมูลความดันในระบบ

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลความดันภายในระบบ

	ความดันในระบบ (barg)	ความดันสูงสุดที่สามารถเกิดเกิดขึ้นได้ (bar)
Knockout Drum	3.50	-
ระบบท่อเผา	0.25	3.25
ถังทิ้งสาร	0.95	2.55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 ท่อส่งแก๊สไปยังระบบห่อเผา

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าผลการคำนวณและค่าตามมาตรฐานการออกแบบของท่อแก๊ส

Item		ท่อขนาด 3 นิ้ว	Bangchak Internal Standard
ความเร็ว (m/s)	ต้นทาง	11.29	39.8
	ปลายทาง	14.05	
อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)		1738.8	
ความดัน (bara)	ต้นทาง	4.51	1.53
	ความดันลด	0.87	
	ปลายทาง	3.63	
	ระบบปลายทาง	1.25	

จากตารางที่ 4.4 การคำนวณค่าความเร็วและความดันลดที่เกิดขึ้นในท่อขนาดต่างๆ ที่ความยาว 450 เมตร มีเกณฑ์ในการออกแบบคือ ความเร็วของแก๊สในท่อมามีค่าไม่เกินกว่า 39.8 m/s และค่าความดันลดที่เกิดขึ้นต้องมีค่าไม่เกินกว่า 1.53 bar ซึ่งความดันลดในท่อขนาด 3 นิ้วมีค่า 0.87 bar และมีค่าไม่เกินจากค่าเกณฑ์การออกแบบ ดังนั้นจึงสามารถใช้ท่อขนาด 3 นิ้วกับระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบห่อเผาได้

4.1.2.2 ท่อส่งของเหลวไปยังถังตั้งสาร

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าผลการคำนวณของท่อของเหลว

Item		ท่อขนาด 1 นิ้ว	ท่อขนาด 2 นิ้ว
ความเร็ว (m/s)		0.915	0.229
อัตราการไหลเชิงมวล (kg/h)		1001.17	1001.17
ความดัน (bara)	ต้นทาง	4.51	4.51
	ความดันลด	0.69	0.02
	ปลายทาง	3.81	4.49
	ระบบปลายทาง	1.95	1.95

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.5 การคำนวณค่าความเร็วและความดันลดที่เกิดขึ้นในท่อขนาดต่างๆ ที่ความยาว 250 เมตร ค่าความดันลดที่เกิดขึ้นในท่อทั้ง 2 ขนาด มีค่าน้อยกว่าค่าความดันลดสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ ซึ่งมีค่า 2.55 bar ดังนั้นในการเลือกขนาดท่อจะพิจารณาจากราคาค่าใช้จ่ายซึ่งท่อขนาด 1 นิ้ว มีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด ดังนั้นจึงเลือกท่อขนาด 1 นิ้วในการส่งแก๊สปีโตรเลียมเหลวไปยังถังสาร

4.2 การคำนวณความหนาของฉนวนความร้อนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง

4.2.1 การคำนวณอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน สำหรับระบบปัจจุบัน

เนื่องจากไม่มีตัววัดค่าอุณหภูมิของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม ก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน จึงต้องใช้การคำนวณในการหาอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำที่มาจากระบบผลิตพลังงานร่วมก่อนผสมกับไอน้ำที่มาจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน ซึ่งอุณหภูมิไอน้ำที่คำนวณได้มีค่า 352.81 องศาเซลเซียส ที่ความหนาของฉนวนเท่ากับ 200 มิลลิเมตร

4.2.2 การคำนวณอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน หลังเพิ่มความหนาของฉนวน

ในการเพิ่มความหนาของฉนวน จะเพิ่มขึ้นทีละ 50 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นฉนวนสำเร็จรูปทำให้ราคาค่าใช้จ่ายต่ำกว่า เนื่องจากถ้าเป็นความหนาอื่นๆ จะต้องสั่งทำพิเศษ และมีค่าใช้จ่ายมากขึ้นในการผลิตและติดตั้งฉนวน ดังนั้น จึงคิดความหนาของฉนวนที่ 250 และ 300 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.5 ผลการคำนวณอุณหภูมิไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม

ความหนาของฉนวน (mm)	อุณหภูมิไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม (°C)
200	352.81
250	355.75
300	360.54

4.2.3 การคำนวณอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำหลังผสมกับไอน้ำที่มาจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน

4.2.3.1 ในกรณีปกติ

หลังจากคำนวณอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำที่มาจากระบบผลิตพลังงานร่วมแล้ว จะต้องคำนวณอุณหภูมิของไอน้ำหลังผสมไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากต้องใช้ในการคำนวณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมและหลังผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจนในกรณีปกติ

ความหนาของฉนวน (mm)	อุณหภูมิไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม (°C)	อุณหภูมิไอน้ำหลังผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน (°C)
200	352.81	371.96
250	355.75	373.33
300	360.54	375.65

4.2.3.2 ในกรณีไม่สามารถรับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน

เนื่องจากในบางครั้งหน่วยผลิตไฮโดรเจนไม่สามารถส่งไอน้ำมายังอุปกรณ์ 4k-4001 Compressor ได้ เช่น อุปกรณ์วัดอุณหภูมิวัดค่าไม่ได้มาตรฐาน ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้ต่ำกว่าที่อุปกรณ์ในระบบต้องการ และปีละครั้งเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น ดังนั้น เมื่อไอน้ำจากไฮโดรเจนไม่สามารถส่งมาได้ จึงต้องเร่งอัตราการไหลของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมมาทดแทน และต้องคำนวณอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor เนื่องจากอุปกรณ์ 4k-4001 Compressor จะต้องรับไอน้ำที่ช่วงอุณหภูมิ 370-380 องศาเซลเซียส

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการคำนวณอุณหภูมิไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมในกรณีไม่สามารถรับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจนได้

ความหนาของฉนวน (mm)	อุณหภูมิไอน้ำหลังผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน (°C)
200	367.04
250	371.26
300	373.13

4.2.4 การคำนวณความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในท่อส่งไอน้ำ

หลังจากคำนวณอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำแล้ว สามารถคำนวณค่าความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบของแต่ละความหนาของฉนวนได้

ตารางที่ 4.8 แสดงผลการคำนวณความร้อนสูญเสียของระบบที่ความหนาของฉนวนต่างๆ

	ความหนาของฉนวน (mm)	ความร้อนสูญเสีย (kW/h)
กรณีปกติ	200	360.86
	250	335.55
	300	300.63
กรณีไม่สามารถรับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน	200	340.62
	250	326.40
	300	293.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.5 การคำนวณความร้อนสูญเสียและค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการคำนวณความร้อนสูญเสียและค่าใช้จ่ายที่สามารถลดได้

	ความหนาของฉนวน (mm)	ความร้อนสูญเสียที่ลดได้ (kW/h)	ค่าใช้จ่ายที่ลดได้ (baht/year)
กรณีปกติ	200	-	-
	250	25.30	190,000
	300	60.22	470,000
กรณีไม่สามารถรับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน	200	-	-
	250	14.21	-
	300	47.35	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการดำเนินงาน

5.1 การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผา

แนวทางที่เลือกในการติดตั้งระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผาได้แก่การติดตั้งระบบท่อรวมทั้ง Horizontal Knockout Drum เพื่อใช้แยกของเหลวก่อนส่งไปยังระบบหอเผา เนื่องจากหากมีของเหลวติด ไปยังระบบหอเผาจะทำให้ของเหลวถูกติดไฟ กลายเป็นลูกไฟทั่วบริเวณหอเผาและเกิดอันตราย ทั้งนี้การออกแบบระบบท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวนั้นยังไม่ได้คำนวณค่าใช้จ่ายในการติดตั้ง ซึ่งต้องพิจารณาในลำดับต่อไป

5.1.1 การออกแบบ Horizontal Knockout Drum

ในการออกแบบได้เลือกใช้ Horizontal Knockout Drum เนื่องจากประสิทธิภาพในการแยกของเหลวดีกว่า Vertical Knockout Drum และในการคำนวณออกแบบ Horizontal Knockout Drum ตามมาตรฐาน API 521 นั้น ใช้การคำนวณแบบลองผิดลองถูก ซึ่งความดันที่ใช้ในการออกแบบคือ 3.5 barg ตามมาตรฐานการคำนวณของบริษัท และมีอุณหภูมิในการออกแบบคือ 30 องศาเซลเซียส ผลการคำนวณที่ได้คือ Horizontal Knockout Drum ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เมตร ความยาว 3 เมตร สามารถรองรับของเหลวในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินภายในโรงงานได้ 20 นาที

5.1.2 การคำนวณขนาดท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวไปยังระบบหอเผาและถังทังสาร

ในการคำนวณขนาดท่อจะใช้การคำนวณความดันลดที่เกิดขึ้นในระบบสำหรับท่อขนาดต่างๆ และเลือกขนาดท่อที่เหมาะสม

สำหรับท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะแก๊สไปยังหอเผานั้น ใช้ท่อขนาด 3 นิ้ว ซึ่งมีความเร็วและความดันลดไม่เกินเกณฑ์ที่ใช้ในการออกแบบและความดันลดที่เกิดขึ้นไม่เกินความดันลดสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นในระบบ

สำหรับท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลวในสถานะของเหลวไปยังถังทังสาร ใช้ท่อขนาด 1 นิ้ว ซึ่งมีความดันลดไม่เกินค่าความดันลดสูงสุดที่สามารถเกิดขึ้นในระบบ

5.2 การคำนวณความหนาของฉนวนความร้อนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง

ในการคำนวณความหนาของฉนวนจะแบ่งการคำนวณออกเป็นในกรณีที่ระบบอยู่ในภาวะปกติ และในภาวะที่ระบบไม่สามารถรับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจนได้ ซึ่งการเพิ่มความหนาของฉนวนจะเพิ่มจากความหนาเดิมที่ 200 มิลลิเมตรเป็น 250 มิลลิเมตรและ 300 มิลลิเมตร เนื่องจากฉนวนที่ขายเป็นฉนวนสำเร็จรูปที่มีความหนาที่ 50 มิลลิเมตร

5.2.1 ผลการคำนวณความหนาของฉนวนในกรณีปกติ

เมื่อเพื่อความหนาของฉนวนเป็น 250 มิลลิเมตร อุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor มีค่า 373.33 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่อุปกรณ์ต้องการคือ 370 - 380 องศาเซลเซียส ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่า 335.55 kW/h ซึ่งสามารถลดความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ 25.30 kW/h คิดเป็นมูลค่าเชื้อเพลิง 190,000 บาทต่อปี

เมื่อเพื่อความหนาของฉนวนเป็น 300 มิลลิเมตร อุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor มีค่า 375.65 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่อุปกรณ์ต้องการคือ 370 - 380 องศาเซลเซียส ความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นมีค่า 300.63 kW/h ซึ่งสามารถลดความร้อนสูญเสียที่เกิดขึ้นได้ 60.22 kW/h คิดเป็นมูลค่าเชื้อเพลิง 470,000 บาทต่อปี

5.2.2 ผลการคำนวณความหนาของฉนวนในกรณีที่ไม่สามารถรับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจนได้

ในกรณีที่ไม่สามารถรับไอน้ำจากไฮโดรเจนได้ จำเป็นต้องเร่งอัตราการไหลของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมซึ่งทำให้อุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor นั้นลดลงเมื่อเทียบกับภาวะปกติ ดังนั้นการเพิ่มความหนาของฉนวนเป็นอีกวิธีหนึ่งในการคงอุณหภูมิของไอน้ำให้อยู่ในช่วงที่อุปกรณ์รับได้

เมื่อเพื่อความหนาของฉนวนเป็น 250 มิลลิเมตร อุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor มีค่า 371.26 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่อุปกรณ์ต้องการคือ 370 - 380 องศาเซลเซียส

เมื่อเพื่อความหนาของฉนวนเป็น 300 มิลลิเมตร อุณหภูมิของไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor มีค่า 373.13 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่อุปกรณ์ต้องการคือ 370 - 380 องศาเซลเซียส

ทั้งนี้พิจารณาเลือกความหนาของฉนวนที่เหมาะสมอยู่ที่ 250 มิลลิเมตร เนื่องจากน้ำหนักของท่อที่หุ้มฉนวนเพิ่มขึ้น ถ้ามากเกินไปจะต้องเสริมความแข็งแรงของฐานรองรับท่อ ทำให้มีค่าใช้จ่ายสูงขึ้นและความหนาของฉนวนที่ 250 มิลลิเมตร ทำให้อุณหภูมิของไอน้ำก่อนส่งเข้าอุปกรณ์ 4k-4001 Compressor อยู่ในช่วงที่อุปกรณ์ต้องการ ทั้งในกรณีที่ระบบอยู่ในภาวะปกติและในภาวะที่ระบบไม่สามารถรับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจนได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2559. ระบบผลิตพลังงานร่วม.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2559. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับหอเผาทิ้ง.
- ดุยโชติ ชลศึกษ์. 2555. การออกแบบระบบท่อทางวิศวกรรม. กรุงเทพฯ :
- ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
- ชัยคร ออกกะลา. 2553. กลศาสตร์ของไหล. นครปฐม : ภาควิชาวิศวกรรมชลประทาน
- คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- บริษัท ไตรชั้น ดีเวลลอปเม้นท์ จำกัด. ฉนวนกันความร้อน.
- บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน). ภาพรวมกระบวนการผลิต.
- บริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน). แก๊สปิโตรเลียมเหลว.
- สุธรรม สุขมณี. 2558. การออกแบบอุปกรณ์ทางวิศวกรรมเคมี. ปรับปรุงแก้ไขครั้งที่ 9.
- ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- American Petroleum Institute. 2008. **Pressure-relieving and Depressuring Systems.**
- Washington : API.
- Cengel, Y.A. 2006. **Heat Transfer: A Practical Approach.** New York : McGraw-Hill.
- Cengel, Y.A and Cimbala, J.M. 2014. **Fluid Mechanics.** 3rd ed. New York : McGraw-Hill..
- Holman, J.P. 2010. **Heat Transfer.** 10th ed. New York : McGraw-Hill.
- Green, D.W. and Perry, R.H. 2008. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** 8th ed.
- New York : McGraw-Hill.
- Ludwig, E.E. 1999. **Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants Vol. 1.**
- 3rd ed. Massachusetts : Butterworth-Heinemann.
- McCabe, W.L. Smith, J.C. and Harriot, P. 2005. **Unit Operation of Chemical Engineering.**
- 7th ed. New York : McGraw-Hill.
- Mohinder L.N. 1999. **Piping Handbook.** 7th ed. New York : McGraw-Hill.
- Siddhartha, M. 2008. **Pressure Relief System Design.** India : Lurgi India
- Subramanian, R.S. 2016. **Pipe Flow Calculations.** New York :
- Department of Chemical and Biomolecular Engineering Clarkson University
- The Crane Company. 1965. **Flow of Fluid.** Chicago.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการคำนวณ

ตารางที่ ก.1 องค์ประกอบของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน))

วันที่	องค์ประกอบของแก๊สปิโตรเลียมเหลว (% Vol.)					
	C ₃	Iso-C ₄	n-C ₄	Iso-C ₅	n-C ₅	> C ₆
2/10/2016	26.47	40.83	31.3	1.29	0	0
12/10/16	26.43	39.38	32.54	1.65	0	0
12/10/16	26.73	40.41	31.56	1.3	0	0
18/10/16	38.97	32.59	27.77	0.67	0	0
26/10/16	30.87	35.54	28.11	3.44	0	0
26/10/16	27.85	39.01	31.16	1.42	0	0
27/10/16	28.37	38.84	30.79	1.46	0	0
28/10/16	28.37	39.14	31.03	1.46	0	0

ตารางที่ ก.2 สมดุลไอ-ของเหลวของแก๊สปิโตรเลียมเหลวที่ภาวะต่างๆ

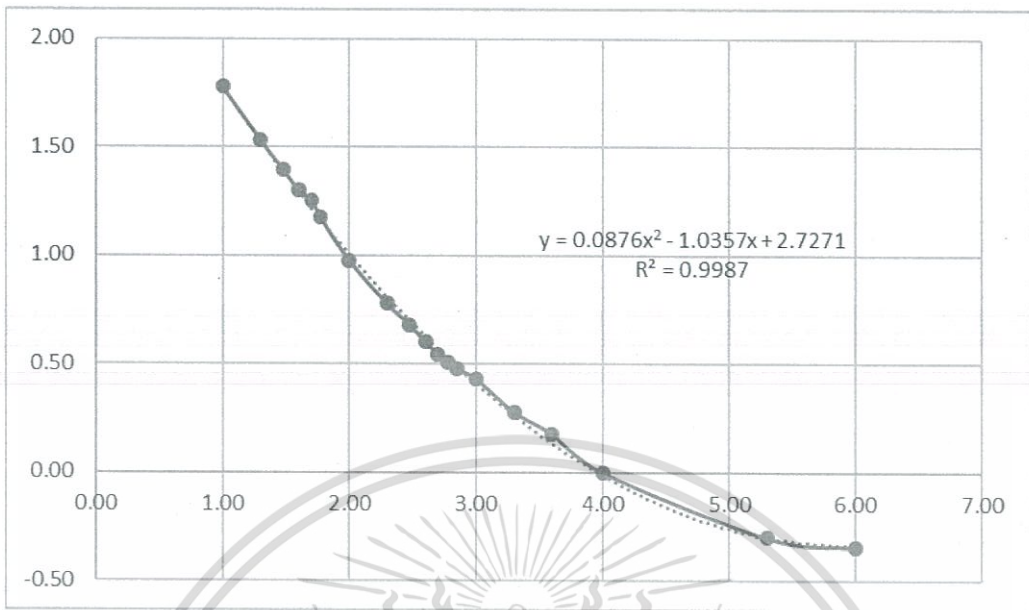
Pressure (barg)	Temp. (°C)	สถานะแก๊ส (wt %)				สถานะของเหลว (wt %)			
		C ₃	n-C ₄	Iso-C ₄	Iso-C ₅	C ₃	n-C ₄	Iso-C ₄	Iso-C ₅
3.5	20.0	-	-	-	-	0.267	0.402	0.309	0.022
3.5	25.0	0.461	0.262	0.271	0.006	0.202	0.449	0.322	0.028
3.5	30.0	0.343	0.341	0.304	0.011	0.134	0.507	0.317	0.042
3.5	38.0	0.267	0.402	0.309	0.022	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 ตารางคำนวณค่า Drag Coefficient

$C(Re)^2$	C	$\text{Log}(C(Re)^2)$	$\text{log}(C)$
10	60	1.00	1.78
20	34	1.30	1.53
30	25	1.48	1.40
40	20	1.60	1.30
50	18	1.70	1.26
60	15	1.78	1.18
100	9.5	2.00	0.98
200	6	2.30	0.78
300	4.8	2.48	0.68
400	4	2.60	0.60
500	3.5	2.70	0.54
600	3.2	2.78	0.51
700	3	2.85	0.48
1000	2.7	3.00	0.43
2000	1.9	3.30	0.28
4000	1.5	3.60	0.18
10000	1	4.00	0.00
200000	0.5	5.30	-0.30
1000000	0.45	6.00	-0.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ก.1 กราฟ Drag Coefficient

ตารางที่ ก.4 เกณฑ์การออกแบบท่อแก๊ส (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน))

Item	Maximum $\Delta P/100$ m bar	Maximum Velocity (m/s)
Hydrocarbon Line		
0-3.45 barg	0.5	
3.45-10.3 barg	1.5	$122/(\rho)^{1/2}$
10.3-34.5 barg	3.0	
> 34.5 barg	5.0	

หมายเหตุ ρ มีหน่วยเป็น kg/m^3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.5 ข้อมูลไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน))

วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
7/5/16	17.02	392.36	40.51
8/5/16	15.31	391.84	40.44
9/5/16	14.70	391.99	40.42
10/5/16	15.16	392.09	40.43
11/5/16	15.32	391.94	40.44
12/5/16	14.57	392.66	40.41
13/5/16	11.61	390.15	40.30
14/5/16	12.14	390.33	40.33
15/5/16	15.16	393.36	40.46
16/5/16	13.18	394.39	40.37
17/5/16	13.83	395.07	40.40
18/5/16	12.75	394.49	40.36
19/5/16	14.96	392.27	40.45
20/5/16	13.74	389.50	40.38
21/5/16	16.49	392.91	40.52
22/5/16	15.16	391.26	40.47
23/5/16	18.26	394.71	40.61
24/5/16	17.09	394.88	40.55
25/5/16	15.12	393.40	40.46
26/5/16	14.60	391.94	40.43
27/5/16	12.38	391.54	40.36
28/5/16	15.70	392.58	40.49
29/5/16	16.78	392.78	40.53
30/5/16	16.90	393.42	40.53
31/5/16	14.77	392.36	40.44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
1/6/16	15.35	390.89	40.46
2/6/16	16.22	392.17	40.48
3/6/16	16.02	393.69	40.48
4/6/16	16.47	394.81	40.49
5/6/16	15.90	394.66	40.46
6/6/16	16.31	393.34	40.47
7/6/16	12.97	388.85	40.32
8/6/16	12.24	388.53	40.29
9/6/16	12.28	389.20	40.32
10/6/16	11.98	388.76	40.32
11/6/16	12.51	388.69	40.35
12/6/16	15.43	388.50	40.45
13/6/16	15.35	390.19	40.50
14/6/16	16.45	391.27	40.52
15/6/16	18.09	394.26	40.59
16/6/16	16.23	390.70	40.51
17/6/16	15.31	392.65	40.48
18/6/16	18.03	392.69	40.60
19/6/16	13.64	391.27	40.41
20/6/16	15.35	391.91	40.47
21/6/16	15.45	388.92	40.43
22/6/16	13.46	389.31	39.78
25/6/16	14.19	387.95	40.37
26/6/16	15.73	389.12	40.42
27/6/16	15.53	389.19	40.42
28/6/16	16.06	389.14	40.43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
29/6/16	16.17	389.05	40.42
30/6/16	17.64	388.97	40.47
1/7/16	18.83	390.04	40.55
2/7/16	17.41	390.18	40.49
3/7/16	14.81	388.57	40.38
4/7/16	15.40	388.56	40.39
5/7/16	16.94	388.62	40.45
6/7/16	17.12	389.08	40.48

ตารางที่ ก.6 ข้อมูลไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน))

วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
7/5/16	54.38	390.00	39.77
8/5/16	54.67	390.00	39.77
9/5/16	54.55	390.00	39.77
10/5/16	54.05	390.01	39.76
11/5/16	54.37	390.00	39.76
12/5/16	54.52	390.00	39.76
13/5/16	53.64	390.00	39.74
14/5/16	54.80	390.00	39.76
15/5/16	57.83	390.01	39.81
16/5/16	58.66	390.00	39.80
17/5/16	58.53	390.00	39.80
18/5/16	59.38	390.00	39.80
19/5/16	56.93	390.00	39.78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
20/5/16	53.27	390.00	39.75
21/5/16	58.21	390.00	39.81
22/5/16	59.29	390.00	39.81
23/5/16	59.58	390.00	39.83
24/5/16	59.70	390.00	39.83
25/5/16	59.78	390.00	39.82
26/5/16	59.73	390.00	39.82
27/5/16	60.62	390.00	39.81
28/5/16	60.74	390.00	39.83
29/5/16	59.89	390.00	39.83
30/5/16	57.37	390.00	39.80
31/5/16	56.93	390.00	39.79
1/6/16	57.06	390.00	39.78
2/6/16	56.20	390.00	39.77
3/6/16	56.87	390.00	39.78
4/6/16	57.87	390.00	39.79
5/6/16	58.98	390.00	39.79
6/6/16	59.49	390.00	39.80
7/6/16	60.10	390.00	39.79
8/6/16	61.11	390.00	39.80
9/6/16	61.48	390.00	39.81
10/6/16	61.68	390.00	39.82
11/6/16	60.79	390.00	39.81
12/6/16	60.34	390.00	39.81
13/6/16	59.64	390.00	39.81
14/6/16	60.87	390.00	39.83

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
15/6/16	60.91	390.00	39.84
16/6/16	61.19	390.00	39.83
17/6/16	57.94	389.98	39.80
18/6/16	56.14	390.01	39.79
19/6/16	60.45	390.01	39.81
20/6/16	61.82	390.00	39.83
21/6/16	63.96	390.01	39.80
22/6/16	61.72	388.96	38.60
25/6/16	26.89	380.06	39.59
26/6/16	34.61	389.78	39.62
27/6/16	37.79	390.02	39.64
28/6/16	47.21	389.99	39.68
29/6/16	38.88	390.01	39.63
30/6/16	45.96	390.01	39.68
1/7/16	51.03	390.00	39.72
2/7/16	53.96	390.01	39.74
3/7/16	57.47	390.01	39.75
4/7/16	58.39	390.00	39.76
5/7/16	58.64	390.00	39.76
6/7/16	58.42	390.00	39.76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.7 ข้อมูลไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน))

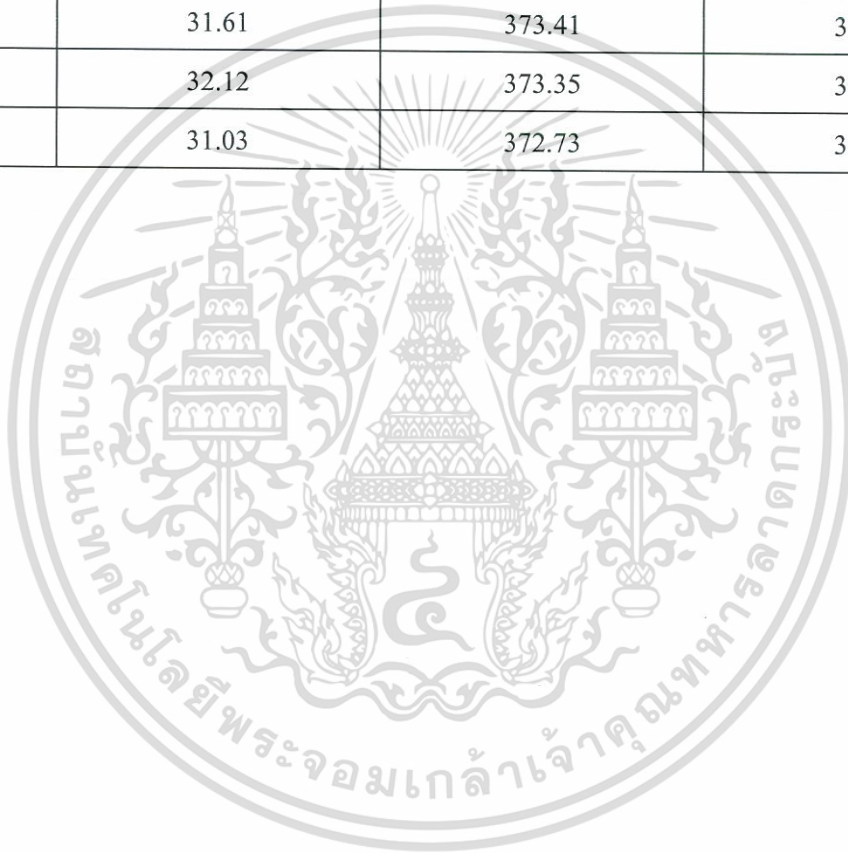
วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
7/5/16	25.81	372.36	39.58
8/5/16	25.86	372.04	39.56
9/5/16	25.83	371.89	39.56
10/5/16	26.06	372.33	39.56
11/5/16	26.02	372.04	39.56
12/5/16	25.69	372.45	39.56
13/5/16	25.70	371.55	39.53
14/5/16	25.37	371.42	39.55
15/5/16	25.54	372.35	39.58
16/5/16	26.43	373.87	39.55
17/5/16	26.21	373.99	39.56
18/5/16	26.20	373.90	39.56
19/5/16	25.86	372.12	39.56
20/5/16	25.13	370.97	39.55
21/5/16	25.69	372.67	39.58
22/5/16	26.10	372.16	39.58
23/5/16	25.69	373.65	39.60
24/5/16	25.72	373.55	39.59
25/5/16	25.60	373.34	39.58
26/5/16	25.74	372.30	39.57
27/5/16	25.79	372.40	39.56
28/5/16	26.18	372.45	39.59
29/5/16	26.10	372.58	39.59
30/5/16	25.52	372.50	39.59
31/5/16	25.97	372.53	39.56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
1/6/16	27.41	372.10	39.54
2/6/16	28.31	373.27	39.53
3/6/16	28.09	373.93	39.54
4/6/16	28.61	375.07	39.53
5/6/16	29.85	375.54	39.52
6/6/16	30.37	375.07	39.51
7/6/16	30.46	373.86	39.48
8/6/16	30.19	373.77	39.48
9/6/16	28.00	372.85	39.52
10/6/16	26.07	371.51	39.55
11/6/16	26.13	371.43	39.55
12/6/16	26.11	370.83	39.57
13/6/16	25.70	372.17	39.57
14/6/16	25.87	372.22	39.59
15/6/16	25.52	373.12	39.60
16/6/16	25.66	371.84	39.59
17/6/16	24.62	371.74	39.58
18/6/16	23.99	370.69	39.60
19/6/16	27.02	372.53	39.55
20/6/16	28.27	373.70	39.56
21/6/16	27.78	371.83	39.51
22/6/16	24.35	370.07	38.39
25/6/16	12.88	359.51	39.58
26/6/16	16.05	361.02	39.58
27/6/16	18.22	364.33	39.56
28/6/16	25.10	369.86	39.51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่	อัตราการไหลเชิงมวล (Ton/h)	อุณหภูมิ (°C)	ความดัน (barg)
29/6/16	24.65	368.88	39.50
30/6/16	28.48	371.50	39.49
1/7/16	28.71	372.02	39.51
2/7/16	29.03	373.12	39.50
3/7/16	29.97	372.95	39.47
4/7/16	31.61	373.41	39.46
5/7/16	32.12	373.35	39.47
6/7/16	31.03	372.73	39.48



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณออกแบบขนาดของ Horizontal Knockout Drum

ภาคผนวก ข แสดงตัวอย่างการคำนวณออกแบบขนาดของ Horizontal Knockout Drum ตาม
มาตรฐาน API 521

ข้อมูลการคำนวณ (บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน))

ข้อมูลแก๊สปิโตรเลียมเหลวใน Horizontal Knockout Drum

ความดันออกแบบ	=	4.51	bara
อุณหภูมิออกแบบ	=	30.00	°C
อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส	=	1738.83	kg/h
อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว	=	1001.17	kg/h
น้ำหนักโมเลกุล	=	53.46	kg/kmol
ความหนาแน่นของแก๊ส	=	9.57	kg/m ³
ความหนาแน่นของของเหลว	=	598.42	kg/m ³
ความหนืดของแก๊ส	=	0.007	cP
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค	=	300.00	µm
เวลาในการรองรับของเหลว	=	20.00	min

1) คำนวณค่า Drag Coefficient

$$C(\text{Re})^2 = \frac{0.13 \times 10^8 \rho_v D^3 (\rho_l - \rho_v)}{\mu^2} \quad (\text{ข.1})$$

โดยที่ D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค = 300 µm

μ = ความหนืดของแก๊ส = 0.007 cP

ρ_v = ความหนาแน่นของแก๊ส = 9.57 kg/m³

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

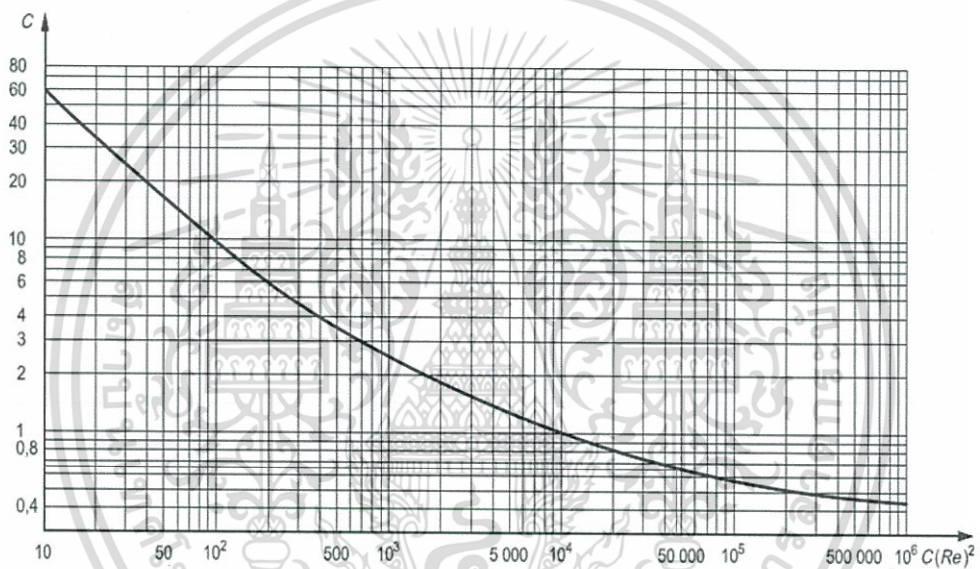
$$\rho_l = \text{ความหนาแน่นของของเหลว} = 598.42 \text{ kg/m}^3$$

จะได้ค่า $C(Re)^2$

$$C(Re)^2 = \frac{0.13 \times 10^8 \times 9.57 \times (300 \times 10^{-6})^3 \times (598.42 - 9.57)}{0.007^2}$$

$$C(Re)^2 = 39026.31$$

หาค่า Drag Coefficient จากกราฟ



รูปที่ ข.1 ค่า Drag Coefficient

ที่มา : American Petroleum Institute Standard 521, 2008

จะได้ค่า Drag Coefficient

$$C = 0.66$$

2) คำนวณค่า Drop Out Velocity

$$u_c = 1.15 \sqrt{\frac{gD(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v C}} \quad (\text{ข.2})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $C = \text{Drag coefficient} = 0.66$
 $g = \text{ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก} = 9.81 \text{ m/s}^2$

จะได้ค่า Drop Out Velocity

$$u_c = 1.15 \sqrt{\frac{9.81 \times (300 \times 10^{-6}) \times (598.42 - 9.57)}{9.57 \times 0.66}} \quad \text{m/s}$$

$$u_c = 0.40 \quad \text{m/s}$$

3) คำนวณอัตราการไหลเชิงปริมาตร
 - อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส

$$Q_v = \frac{\dot{m}_v}{\rho_v}$$

(ข.3)

โดยที่ $\dot{m}_v = \text{อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส} = 1738.83 \text{ kg/h}$
 $\rho_v = \text{ความหนาแน่นของแก๊ส} = 9.57 \text{ kg/m}^3$

จะได้อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส

$$Q_v = \frac{1738.83}{9.57 \times 3600} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

$$Q_v = 0.05 \quad \text{m}^3/\text{s}$$

- อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลว

$$Q_L = \frac{\dot{m}_L}{\rho_L} \quad \text{(ข.4)}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $\dot{m}_L =$ อัตราการไหลเชิงมวลของของเหลว = 1001.17 kg/h
 $\rho_1 =$ ความหนาแน่นของของเหลว = 598.42 kg/m³

จะได้ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลว

$$Q_L = \frac{1001.17}{598.42 \times 3600} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

$$Q_L = 0.005 \quad \text{m}^3/\text{s}$$

4) กำหนดค่า Vapor Flow Area

$$A_v = A_t - A_L \quad (\text{ข.5})$$

โดยที่ $A_t =$ พื้นที่หน้าตัด Knockout Drum (m²)
 $A_v =$ พื้นที่หน้าตัดที่แก๊สไหลผ่าน (m²)
 $A_L =$ พื้นที่หน้าตัดของของเหลว (m²)

-กำหนดหาพื้นที่หน้าตัด Knockout Drum

$$A_t = \frac{\pi D^2}{4} \quad (\text{ข.6})$$

โดยที่ $D =$ เส้นผ่านศูนย์กลางของ Knockout Drum = 1 m

จะได้พื้นที่หน้าตัด Knockout Drum

$$A_t = \frac{3.14 \times 1^2}{4} \quad \text{m}^2$$

$$A_t = 0.79 \quad \text{m}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คำนวณหาพื้นที่หน้าตัดของของเหลว

$$A_L = \frac{Q_L \times t}{L} \quad (\text{ข.7})$$

โดยที่ Q_L = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของเหลว = $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$

t = เวลาในการรองรับของเหลว = 20 min

L = ความยาวของ Knockout Drum = 3 m

จะได้พื้นที่หน้าตัดของของเหลว

$$A_L = \frac{0.005 \times 20 \times 60}{3} \quad \text{m}^2$$

$$A_L = 0.19 \quad \text{m}^2$$

- คำนวณพื้นที่หน้าตัดที่แก๊สไหลผ่าน

$$A_v = A_t - A_L \quad (\text{ข.5})$$

โดยที่ A_t = พื้นที่หน้าตัด Knockout Drum = 0.79 m^2

A_L = พื้นที่หน้าตัดของของเหลว = 0.19 m^2

จะได้ค่าพื้นที่หน้าตัดที่แก๊สไหลผ่าน

$$A_v = 0.79 - 0.19 \quad \text{m}^2$$

$$A_v = 0.60 \quad \text{m}^2$$

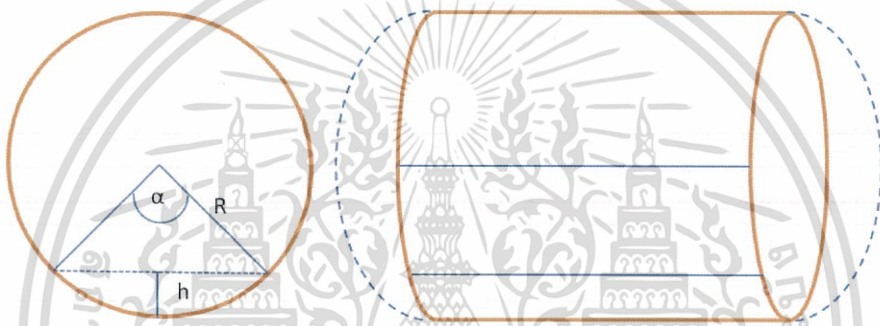
5) คำนวณค่า Height of Vapor Space

$$h_v = h_t - h_L \quad (\text{ข.8})$$

โดยที่ h_t = เส้นผ่านศูนย์กลาง Knockout Drum (m)

h_v = ความสูงที่แก๊สไหลผ่าน (m)

h_L = ความสูงของของเหลว (m)



รูปที่ ข.2 ปริมาตรทรงกระบอกแนวนอน

-คำนวณหามุม α

$$A_L = \frac{1}{2} r^2 (\alpha - \sin \alpha) \quad (\text{ข.9})$$

โดยที่ A_L = พื้นที่หน้าตัดของของเหลว = 0.19 m^2

r = รัศมีของ Knockout Drum = 0.5 m

จะได้มุม α

$$0.19 = \frac{1}{2} 0.5^2 (\alpha - \sin \alpha)$$

$$\alpha = 2.26$$

rad

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- คำนวณความสูงของของเหลว

$$\alpha = 2 \arccos\left(\frac{r - h_L}{r}\right) \quad (\text{ข.10})$$

โดยที่ $r =$ รัศมีของ Knockout Drum = 0.5 m

$\alpha =$ มุมภายในทรงกระบอก = 2.26 rad

จะได้ความสูงของของเหลว

$$2.26 = 2 \arccos\left(\frac{0.05 - h_L}{0.05}\right)$$

$$h_L = 0.29 \quad \text{m}$$

- คำนวณความสูงที่แก๊สไหลผ่าน

$$h_v = h_t - h_L \quad (\text{ข.8})$$

โดยที่ $h_t =$ เส้นผ่านศูนย์กลาง Knockout Drum = 1 m

$h_L =$ ความสูงของของเหลว = 0.29 m

จะได้ค่าความสูงที่แก๊สไหลผ่าน

$$h_v = 1 - 0.29 \quad \text{m}$$

$$h_v = 0.71 \quad \text{m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) คำนวณค่า Liquid Dropout Time

$$\theta = \frac{h_v}{u_c} \quad (\text{ข.11})$$

โดยที่ h_v = ความสูงที่แก๊สไหลผ่าน = 0.71 m

u_c = Drop Out Velocity = 0.40 m/s

จะได้ Liquid Dropout Time

$$\theta = \frac{0.71}{0.40}$$

$$\theta = 1.80$$

7) คำนวณค่า Vapor Pass Velocity

$$u_v = \frac{Q_g}{A_v}$$

โดยที่ Q_g = อัตราการไหลเชิงปริมาตรของแก๊ส = 0.05 kg/h

A_v = พื้นที่หน้าตัดที่แก๊สไหลผ่าน = 0.60 m²

จะได้ Vapor Pass Velocity

$$u_v = \frac{0.05}{0.60} \quad \text{m/s}$$

$$u_v = 0.08 \quad \text{m/s}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8) คำนวณค่า Drum Length Required

$$L_{\min} = u_v \theta \quad (\text{ข.13})$$

โดยที่ u_v = ความเร็วของแก๊ส = 0.08 m/s

θ = Liquid drop out time = 1.80 s

จะได้ Drum Length Required

$$L_{\min} = 0.08 \times 1.80$$

$$L_{\min} = 0.15$$

m

m



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ตัวอย่างการคำนวณส่งแก๊สปีโตรเลียมไปยังระบบหอเผาและถังทังสาร

ภาคผนวก ค แสดงตัวอย่างการคำนวณขนาดท่อส่งแก๊สปีโตรเลียมไปยังระบบหอเผาและถังทังสาร ซึ่งแบ่งการคำนวณเป็นสองส่วน ได้แก่ ท่อส่งแก๊สปีโตรเลียมเหลวในสถานะแก๊สไปยังหอเผาและท่อส่งแก๊สปีโตรเลียมเหลวในสถานะของเหลวไปยังถังทังสาร

ข้อมูลการคำนวณ(บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน))

ข้อมูลแก๊สปีโตรเลียมเหลวภายในระบบ

อัตราการไหลเชิงมวลของแก๊ส	=	1738.83	kg/h
อัตราการไหลเชิงมวลของเหลว	=	1001.17	kg/h
อุณหภูมิของของไหล	=	30.00	°C
น้ำหนักโมเลกุล	=	53.46	kg/kmol
ความหนาแน่นของแก๊ส	=	9.57	kg/m ³
ความหนาแน่นของของเหลว	=	598.42	kg/m ³
ความหนืดของแก๊ส	=	0.007	cP
ความขรุขระของท่อ	=	5.0×10^{-5}	m
ความหนืดของของไหล	=	7.0×10^{-6}	Pa.s

1. คำนวณเลขเรย์โนลด์

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad (\text{ค.1})$$

โดยที่ D = ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อ = 0.076 m

v = ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ = 11.02 m/s

ρ = ความหนาแน่นของของไหล = 9.57 kg/m³

μ = ความหนืดสัมบูรณ์ = 7.0×10^{-6} Pa.s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้เลขเรย์โนลด์

$$\text{Re} = \frac{9.57 \times 11.02 \times 0.0076}{7.0 \times 10^{-6}}$$

$$\text{Re} = 1,132,980$$

2. คำนวณค่าตัวประกอบเสียดทาน

S.W. Churchill's Equation

$$f = 8 \left(\left(\frac{8}{\text{Re}} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right)^{1/12} \quad (\text{ก.2})$$

$$A = \left(2.457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{\text{Re}} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{\varepsilon}{D}} \right) \right)^{16} \quad (\text{ก.3})$$

$$B = \left(\frac{37530}{\text{Re}} \right)^{16} \quad (\text{ก.4})$$

โดยที่ D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 0.076 m

Re = เลขเรย์โนลด์ = 1,132,980

ε = ความขรุขระของผนังท่อ = 5.0×10^{-5} m

จะได้ค่าตัวประกอบเสียดทาน

$$A = \left(2.457 \ln \left(\frac{1}{\left(\frac{7}{1,132,980} \right)^{0.9} + 0.27 \frac{5.0 \times 10^{-5}}{0.076}} \right) \right)^{16}$$

$$B = \left(\frac{37530}{1,132,980} \right)^{16}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f = 8 \left(\left(\frac{8}{1,132,980} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right)^{1/12}$$

$$f = 0.0182$$

3. คำนวณความดันลดที่เกิดขึ้นในท่อ

- คำนวณความดันลดท่อส่งแก๊สปิโตรเลียมเหลว (สถานะแก๊ส) ไปยังหอเผา

$$P_1^2 - P_2^2 = Z \frac{RT}{Mw} \left(\frac{W}{A} \right)^2 \left(f \frac{L}{D} + 2 \ln \frac{P_1}{P_2} \right) \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่

P_1 = ความดันที่ด้านต้นทาง = 450 kPa

P_2 = ความดันที่ด้านปลายทาง (kPa)

Z = Compressibility factor = 1

R = ค่าคงที่ของแก๊ส = 8.314 m³Pa/K.mol

T = อุณหภูมิของของไหล = 303.15 K

Mw = มวลโมเลกุลของของไหล = 53.46 kg/kmole

W = อัตราการไหลเชิงมวลของของไหล = 1738.83 kg/h

A = พื้นที่หน้าตัดท่อ 0.0046 m²

f = ค่าตัวประกอบเสียดทาน 0.0182

L = ความยาวของท่อ = 550 m

D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ = 0.076 m

จะได้ความดันที่ด้านปลายทาง

$$450^2 - P_2^2 = 1 \frac{8.314 \times 303.15}{53.46} \left(\frac{1738.83}{0.0046} \right)^2 \left(0.0182 \frac{550}{0.076} + 2 \ln \frac{450}{P_2} \right)$$

$$P_2 = 365.0$$

kPa

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น ความดันตกที่เกิดขึ้นในท่อมีค่า

$$\Delta P = 450 - 365 \quad \text{kPa}$$

$$\Delta P = 85 \quad \text{kPa}$$

$$\Delta P = 0.85 \quad \text{bar}$$

- คำนวณความดันตกท่อส่งแก๊สปีโตรเลียมเหลว (สถานะของเหลว) ไปยังถังทิ้งสาร

$$h_f = f \frac{Lv^2}{2Dg} \quad (\text{ก.6})$$

$$h_f = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (\text{ก.7})$$

โดยที่

h_f = การสูญเสียหลักจากแรงเสียดทาน

ΔP = ผลต่างของความดัน

D = เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ = 0.0254 m

v = ความเร็วในการไหล = 0.92 m/s

g = ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก = 9.81 m/s²

f = ตัวประกอบความเสียดทานของคาร์ซี = 0.0235

จะได้ความดันตกที่เกิดขึ้นในท่อ

$$h_f = 0.0235 \frac{300 \times 0.92^2}{2 \times 0.0254 \times 9.81}$$

$$h_f = \frac{\Delta P}{598.42 \times 9.81}$$

$$\Delta P = 69.7 \quad \text{kPa}$$

$$\Delta P = 0.69 \quad \text{bar}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ง

ตัวอย่างการคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง

ภาคผนวก ง แสดงตัวอย่างการคำนวณความหนาของฉนวนสำหรับท่อส่งไอน้ำความดันสูง

ข้อมูลการคำนวณ

ข้อมูลไอน้ำที่ส่งจากระบบผลิตพลังงานร่วม

อัตราการไหลเชิงมวล	=	15.25	ton/h
อุณหภูมิไอน้ำ	=	391.32	°C
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	=	2.38	J/g°C

ข้อมูลไอน้ำที่ส่งจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน

อัตราการไหลเชิงมวล	=	11.06	ton/h
อุณหภูมิไอน้ำ	=	389.81	°C
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	=	2.38	J/g°C

ข้อมูลไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor

อัตราการไหลเชิงมวล	=	26.31	ton/h
อุณหภูมิไอน้ำ	=	371.96	°C
ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำ	=	2.42	J/g°C

1) คำนวณอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานรวมก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 \quad (จ.1)$$

$$\dot{m}_{tot} C_{p_{tot}} \Delta T_{tot} = \dot{m}_1 C_{p_1} \Delta T_1 + \dot{m}_2 C_{p_2} \Delta T_2 \quad (จ.2)$$

โดยที่ Q_{tot} = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของไอน้ำก่อนเข้าสู่ 4k-4001 Compressor
 Q_1 = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานรวม
 Q_2 = อัตราการถ่ายเทความร้อนรวมของไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน
 \dot{m}_{tot} = อัตราการไหลเชิงมวลรวมของไอน้ำก่อนเข้าสู่ 4k-4001 Compressor
 = 6630.01 g/s
 \dot{m}_1 = อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานรวม = 3842.94 g/s
 \dot{m}_2 = อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน = 2787.07 g/s
 $C_{p_{tot}}$ = ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำก่อนเข้า 4k-4001 Compressor = 2.42 J/g°C
 C_{p_1} = ความจุความร้อนจำเพาะของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานรวมก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน
 = 2.38 J/g°C
 C_{p_2} = ความจุความร้อนจำเพาะไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานรวม = 2.38 J/g°C

จะได้อุณหภูมิปลายทางของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานรวมก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจน

$$(6630.01 \times 2.42 \times 371.96) = (3842.94 \times 2.38 \times \Delta T_1) + (2787.07 \times 2.39 \times 389.81)$$

$$\Delta T_1 = 352.81 \quad ^\circ\text{C}$$

2) การคำนวณความร้อนสูญเสียของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานรวมก่อนเข้าผสมกับไอน้ำจาก หน่วยผลิตไฮโดรเจน

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (จ.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ Q = อัตราการสูญเสียความร้อน
 \dot{m} = อัตราการไหลเชิงมวลของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม = 3842.94 g/s
 C_p = ความจุความร้อนจำเพาะไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม = 2.38 J/g $^{\circ}$ C
 ΔT = ความแตกต่างของอุณหภูมิของไอน้ำในท่อ = 391.32 – 352.81 $^{\circ}$ C

จะได้ร้อนสูญเสียของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วม

$$Q = \frac{3842.94 \times 2.38 \times (391.32 - 352.81)}{1000} \quad \text{kW/h}$$

$$Q = 360.86 \quad \text{kW/h}$$

3) การคำนวณค่าอุณหภูมิปลายทางของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานร่วมก่อนผสมกับไอน้ำจากหน่วยผลิตไฮโดรเจนหลังเพิ่มความหนาของฉนวน

$$\dot{m}C_p\Delta T = \frac{T_i - T_o}{\frac{\ln \frac{r}{r_i}}{2\pi Lk_1} + \frac{\ln \frac{r_o}{r}}{2\pi Lk_2}} \quad (ง.4)$$

โดยที่ T_i = อุณหภูมิของไอน้ำภายในท่อ = 391.32 $^{\circ}$ C
 T_o = อุณหภูมิผิววนอกของฉนวน = 50 $^{\circ}$ C
 r_i = รัศมีภายในของท่อ = 118.6 mm
 r' = รัศมีภายนอกของท่อ = 133.7 mm
 r_o = รัศมีของผิวฉนวน = 133.7 + 250 mm
 L = ระยะทางของท่อส่งไอน้ำความดันสูง = 1200 m
 k_1 = ค่า Thermal conductivity ของท่อ CS class D25A = 54 W/mK
 k_2 = ค่า Thermal conductivity ของฉนวน Rockwool (Fibermesh-650)
= 0.125 W/mK

จะได้อุณหภูมิปลายทางของไอน้ำจากระบบผลิตพลังงานรวมก่อนผสมกับไอน้ำจาก หน่วยผลิตไฮโดรเจน หลังเพิ่มความหนาของฉนวน

$$3842.94 \times 2.38 \times (391.32 - T) = \frac{391.32 - 50}{\frac{\ln \frac{133.7}{118.6}}{2 \times 3.14 \times 1200 \times 54} + \frac{\ln \frac{133.7 + 250}{133.7}}{2 \times 3.14 \times 1200 \times 0.13}}$$

$$T = 355.75 \quad ^\circ\text{C}$$

4) การคำนวณปริมาณความร้อนที่สามารถลดได้หลังเพิ่มความหนาของฉนวน

เมื่อบริเวณฐานรับท่อไม่สามารถหุ้มฉนวนได้ทำให้ความร้อนสูญเสียมากกว่าค่าที่คำนวณได้อยู่ 10%

$$Q_{\text{recovery}} = Q_{\text{loss,200mm}} - (1.1 \times Q_{\text{loss,250mm}}) \quad (\text{ง.5})$$

โดยที่

Q_{recovery} = อัตราการสูญเสียความร้อนที่สามารถลดได้

$Q_{\text{loss,200 mm}}$ = อัตราการสูญเสียความร้อนที่ความหนาของฉนวน 200 มิลลิเมตร
= 360.86 kW/h

$Q_{\text{loss,250 mm}}$ = อัตราการสูญเสียความร้อนที่ความหนาของฉนวน 250 มิลลิเมตร
= 335.55 kW/h

จะได้ปริมาณความร้อนที่สามารถลดได้หลังเพิ่มความหนาของฉนวน

$$Q_{\text{recovery}} = 360.86 - (1.1 \times 335.55) \quad \text{kW/h}$$

$$Q_{\text{recovery}} = 25.30 \quad \text{kW/h}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวพรชยมล เจริญครองสกุล
วัน เดือน ปีเกิด 19 กันยายน 2537
ที่อยู่ 9/30 ม.5 ถ.พุทธรักษา ต.แพรภษา อ.เมืองฯ จ.สมุทรปราการ 10280
Email chamziichz@gmail.com
โทรศัพท์ 086-367-6431

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2550 - 2555 ระดับมัธยมศึกษา โรงเรียนราชวินิตบางแก้ว
- พ.ศ. 2556 - ปัจจุบัน วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศ.บ.) สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์

- นักศึกษาฝึกงาน แผนกประสิทธิภาพกระบวนการผลิต โอลิฟิน บริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน)
- นักศึกษา โครงการสหกิจศึกษา แผนกเทคนิค โรงกลั่น บริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้