



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

ปริญญา

วิศวกรรมเกษตร

วิศวกรรมเกษตร

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาระบบดูดกลับน้ำเชื่อมที่รั่วไหลของเครื่องสูบน้ำเชื่อมในโรงงานน้ำตาล

A Study of Reversed System for Syrup Pump Leak in Sugar Cane Factory

นามผู้วิจัย นายชนพงศ์ อุดมศิลป์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ประเทือง อุษาบริสุทธิ์, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์วิชา หมั่นทำการ, M.Eng.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุกสิทธิ์ รอดขวัญ, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวลักษณ์ ปฐุวิรัตน์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาาระบบดูดกลับน้ำเชื่อมที่รั่วไหลของเครื่องสูบน้ำเชื่อมในโรงงานน้ำตาล

A Study of Reversed System for Syrup Pump Leak in Sugar Cane Factory

โดย

นายธนพงศ์ อุดมศิลป์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร)

พ.ศ. 2552

ธนพงศ์ อุดมศิลป์ 2552: การศึกษาระบบดูดกลับน้ำเชื่อมที่รั่วไหลของเครื่องสูบน้ำเชื่อม
ในโรงงานน้ำตาล ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) สาขา
วิศวกรรมเกษตร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร ประชานกรรมการที่ปรึกษา: รองศาสตราจารย์
ประเทือง อุษาบริสุทธิ์, Ph.D. 140 หน้า

วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้เพื่อศึกษาและออกแบบระบบดูดกลับน้ำเชื่อมที่รั่วไหลจาก
ซีลคอปเพลลาของปั๊มน้ำเชื่อมโดยใช้ท่อเวนทูรีในการสร้างแรงดูดกลับ ทำการศึกษาประสิทธิภาพของ
ท่อเวนทูรีที่มีอัตราส่วนช่องทางเข้าต่อช่องทาง 5:1 ด้วยวิธีการเชิงตัวเลขพบว่าท่อเวนทูรีที่มีมุมของ
Diffuser 15 องศา มีการไหลวนของกระแสน้ำน้อยกว่ามุมของท่อเวนทูรีที่มีมุมของ Diffuser 20
และ 30 องศา และความยาวของช่องทางของท่อเวนทูรีมีผลต่อความดันที่เกิดขึ้นบริเวณช่องทาง
และเมื่อทำการทดสอบในสภาวะใช้งานจริงพบว่า อุปกรณ์สามารถทำงานได้ดีที่ระดับแรงดัน
ทางเข้าไม่ต่ำกว่า 0.66 kg/cm^2 โดยที่แรงดันทางออกจากท่อมีค่าไม่เกิน 0.2 kg/cm^2 เมื่อนำอุปกรณ์
ไปทดสอบใช้งานเป็นเวลา 30 วัน พบว่าไม่มีการรั่วไหลเกิดขึ้นกับระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ และ
อุปกรณ์ที่ติดตั้งไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบ และคุณภาพของผลิตภัณฑ์

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อประธานกรรมการ

/ /

Thanapong Udomsilp 2009: A Study of Reversed System for Syrup Pump Leak in Sugar Cane Factory. Master of Engineering (Agricultural Engineering), Major Field: Agricultural Engineering, Department of Agricultural Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Prathuang Usaborisut, Ph.D. 140 pages.

The objectives of this research are to study and design the reversed system for syrup pump leak by using venturi tube to create a suction force. The efficiency of venturi tube with ratio of inlet and throat diameters at 5:1 was studied. By applying numerical method, it was found that the venturi tube with diffuser angle of 15 degree showed less recirculation flow when compared to those with diffuser angles of 20 and 30 degrees. Besides, the length of throat seemed to affect the pressure at the throat. When testing in actual condition, the venturi can operate well at inlet pressure not less than 0.66 kg/cm^2 and outlet pressure not more than 0.2 kg/cm^2 . The application test for 30 days confirmed that there was no leak of syrup in the system and there were no effects on both system performance and product quality.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยและจัดทำวิทยานิพนธ์นี้ ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์
รศ.ดร.ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ ประธานกรรมการที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำ
ปรึกษา และให้การช่วยเหลือทุกสิ่งจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี และขอกราบ
ขอบพระคุณท่านอาจารย์ รศ.วิชา หมั่นทำการ กรรมการวิชาเอก และท่านอาจารย์ ผศ.ดร.ศุภสิทธิ์
รอดขวัญ กรรมการวิชาการ ที่ได้ให้คำแนะนำจนวิทยานิพนธ์นี้เป็นอย่างดี

ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ของภาควิชาวิศวกรรมเกษตรทุกท่านที่ได้ช่วยอำนวยความสะดวก
สะดวกในระหว่างการค้าดำเนินงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณพนักงานแผนกซ่อมบำรุงเครื่องกลบริษัท
น้ำตาลสิงห์บุรีที่ช่วยเหลือเตรียมจัดหาและติดตั้งอุปกรณ์

และขอขอบคุณเพื่อนนิสิตภาควิชาวิศวกรรมเกษตร พี่และบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวถึงใน
ที่นี้ที่ช่วยเป็นกำลังใจและช่วยเหลือสนับสนุนมาโดยตลอดคิ่งานชิ้นนี้สำเร็จได้ด้วยดี

เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ของผู้เขียนที่เข้าใจและให้การสนับสนุน
ด้านการศึกษาแต่ผู้เขียนมาโดยตลอดจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา

ธนพงศ์ อุดมศิลป์

พฤษภาคม 2552

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	41
ผลและวิจารณ์	70
สรุปและข้อเสนอแนะ	94
สรุป	94
ข้อเสนอแนะ	95
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	96
ภาคผนวก	98
ภาคผนวก ก ข้อมูลการทดลอง	99
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ	108
ภาคผนวก ค การเตรียมสารละลายในการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเชื่อม	130
ภาคผนวก ง ภาพชุดแสดงลำดับการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของ น้ำเชื่อมบริสุทธิ์	133
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	140

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ปริมาณผลผลิตอ้อยและน้ำตาลของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541/42 ถึง 2550/51	3
2	องค์ประกอบของน้ำอ้อย	5
3	ปริมาณและมูลค่าการส่งออกน้ำตาลดิบของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ถึง พ.ศ. 2551	6
4	ปริมาณและมูลค่าการส่งออกน้ำตาลทรายของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ถึง พ.ศ. 2551	7
5	ปริมาณการสูญเสียน้ำตาลในกระบวนการผลิต	11
6	เทอมต่างๆในสมการพลังงานของ Bernoulli	19
7	การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ที่ความดันที่ออกจากท่อ Venturi เท่ากับ 0 kg/cm^2	72
8	การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ที่ความดันที่ออกจากท่อ Venturi เท่ากับ 0.1 kg/cm^2	72
9	การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ที่ความดันที่ออกจากท่อ Venturi เท่ากับ 0.2 kg/cm^2	73
10	การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ที่สภาวะใช้งานจริง	73
11	ผลการทดสอบการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบ ป้องกันการรั่วไหล	76
12	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้ง อุปกรณ์	80
13	ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบโดยเปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์	87
14	ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล	91

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
1	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 1	100
2	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 2	101
3	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 3	102
4	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 4	103
5	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 5	104
6	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 6	105
7	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 7	106
8	ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 8	107
9	ค่าเฉลี่ยของความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าบริกซ์ (Brix), ค่าโพล (Pol) และค่าสี (Color) ของน้ำเชื่อมที่ผ่านระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล ที่จำนวนซ้ำ 8 ซ้ำ	109
10	Paired Sample Statistics ของค่า pH	110
11	Paired Samples Correlations ของค่า pH	111
12	Paired Samples Test ของค่า pH	112
13	Paired Sample Statistics ของค่าบริกซ์	114
14	Paired Samples Correlations ของค่าบริกซ์	115
15	Paired Samples Test ของค่าบริกซ์	116
16	Paired Sample Statistics ของค่าโพลไรรเซชัน	118
17	Paired Samples Correlations ของค่าโพลไรรเซชัน	119

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่		หน้า
18	Paired Samples Test ของค่าโพลาริเซชัน	120
19	Paired Sample Statistics ของค่าสี	122
20	Paired Samples Correlations ของค่าสี	123
21	Paired Samples Test ของค่าสี	124
22	Paired Sample Statistics ของประสิทธิภาพของระบบ	126
23	Paired Samples Correlations ของประสิทธิภาพของระบบ	127
24	Paired Samples Test ของประสิทธิภาพของระบบ	128

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนผังแสดงส่วนประกอบของอ้อย	4
2	แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตน้ำตาล	10
3	เครื่องสูบแบบแรงเหวี่ยง	17
4	ปะเก็นแบบแฟลคกิ้ง	17
5	ปะเก็นแบบแมคคานิคัลซีล	18
6	การใช้สมการพลังงานการไหลในท่อ	19
7	การสูญเสียพลังงานของของไหลในท่อ	21
8	ท่อแยกความดัน	22
9	หัวตรวจความดัน	23
10	หัวตรวจความดันนิ่ง	25
11	การวัดความดันสถิตและความดันนิ่งเมื่อเส้นสายธารเป็นเส้นตรง	26
12	การวัดความดันสถิตและความดันนิ่งเมื่อเส้นสายธารเป็นเส้นโค้ง	26
13	สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหล	31
14	Diffuser แบบกรวยกลมที่มีทางออกอิสระ	33
15	Diffuser แบบเหลี่ยมที่มีทางออกเป็นช่วงตรง	33
16	การเปรียบเทียบการไหลใน Diffuser ที่มีท่อตรงบริเวณทางเข้าและไม่มีท่อตรงบริเวณทางเข้า	35
17	การไหลใน Diffuser ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างรวดเร็ว	35
18	การปรับปรุงประสิทธิภาพของ Diffuser โดยการใส่ช่วงตรงบริเวณทางออก	36
19	Cropped Diffuser	36
20	ตัวแปรรูปร่างของ Diffuser	36
21	การนำภาชนะมารองเพื่อป้องกันการรั่วไหล	38
22	อุปกรณ์ขนถ่ายน้ำเชื่อมที่รั่วไหล	38
23	เครื่องป้องกันการรั่วไหลรุ่นแรกที่ทำการศึกษาทดลองใช้	39
24	ระบบซีลคอปเพลเป็นแบบ Oil Seal	40
25	การวัดระยะติดตั้งอุปกรณ์จนถึงกึ่งกลางเพลาน้ำมัน	42
26	การวัดแรงดันทางด้านส่งของปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์	43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
27	การวัดแรงดันทางด้านคอของปั้มน้ำเชื้อบริสุทธิ์	43
28	แบบท่อ Venturi	44
29	แบบท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1	46
30	แผนภาพแสดงวิธีการทดสอบท่อ Venturi	48
31	อุปกรณ์จำลองที่ได้จากการติดตั้งตามภาพที่ 30	49
32	ภาพตัดขวางบริเวณช่องแคบของท่อ Venturi โดยระยะห่างระหว่างหน้าตัดขวาง 1 mm	50
33	ท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ที่มี Diffuser 30 องศา, 20 องศา และ 15 องศา	51
34	การไหลในท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ขนาดมุม Diffuser 30 องศา	52
35	การไหลในท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ขนาดมุม Diffuser 20 องศา	52
36	การไหลในท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ขนาดมุม Diffuser 15 องศา	52
37	แบบท่อ Venturi ที่ทำการปรับปรุงแล้ว	54
38	การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการทำงานของท่อ Venturi	56
39	การติดตั้งท่อ Venturi เพื่อใช้งานในระบบจริง	57
40	การทดสอบระบบโดยติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล	66
41	การทดสอบระบบโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล	67
42	กราฟเปรียบเทียบแรงดันในท่อ Venturi ที่เกิดขึ้นโดยวิธีการ Numerical Method และการทดสอบ	70
43	การเปิดวาล์วลดความดันเมื่อเริ่มเดินระบบ	71
44	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าท่อ Venturi กับ การเกิดแรงดันภายในท่อ ณ ความดันทางส่งที่แตกต่างกัน	74
45	ปริมาณการรั่วไหลที่เกิดขึ้นในระบบที่ติดตั้งและไม่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์	78
46	ค่า pH ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการวิเคราะห์ครั้งที่ 1-8	80
47	ผลการวัดค่า pH ในการทดลองครั้งที่ 6	81
48	ค่าบริคซ์ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการวิเคราะห์ครั้งที่ 1-8	82
49	ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบค่าโพลีทั้ง 8 ครั้ง	83
50	ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบค่าสีทั้ง 8 ครั้ง	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า	
51	ค่าประสิทธิภาพของระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล	89
ภาพผนวกที่		
1	ปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ก่อนการติดตั้ง	134
2	ถอดใบพัดแลพเสื้อปั้มน้ำเพื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์	134
3	ถอดเสื้อปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์เพื่อทำการเจาะรูคูดน้ำเชื่อมบริเวณ Stuffing Box	135
4	เจาะรูคูดน้ำเชื่อมบริเวณ Stuffing Box	135
5	ใส่ Oil Seal เข้ากับชุดคูดน้ำเชื่อมกลับบริเวณ Stuffing Box ต้องทำการเจาะรูให้ตรงกับรูเจาะบนเสื้อปั้มน้ำ โดยจะเป็นบริเวณที่มีการคูดน้ำเชื่อมกลับ	136
6	ประกอบชุด Oil Seal บริเวณ Stuffing Box ต้องประกอบรูเจาะให้ตรงกับรูเจาะบนเสื้อปั้มน้ำ	136
7	การใส่ชุดคูดน้ำเชื่อมกลับ	137
8	ต่อสายคูดกลับเข้ากับอุปกรณ์	138
9	ภาพแสดงการติดตั้งชุดคูดน้ำเชื่อมกลับ	138
10	ติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับทางส่งและทางคูดของปั้มน้ำ	139
11	ติดตั้งอุปกรณ์ที่สมบูรณ์	139

การศึกษาระบบดูดกลับน้ำเชื่อมที่รั่วไหลของเครื่องสูบน้ำเชื่อมในโรงงานน้ำตาล

A Study of Reversed System for Syrup Pump Leak in Sugar Cane Factory

คำนำ

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลเป็นอุตสาหกรรมที่ทำรายได้เข้าประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาทจากการส่งออกน้ำตาลทรายดิบโดยในปีการผลิต 2551 ประเทศไทยส่งออกน้ำตาลทรายดิบจำนวน 2,996,811 ตัน ทำรายได้เข้าประเทศ 25,904 ล้านบาท แต่ถ้าพิจารณาถึงประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลของโรงงานทั่วประเทศในปีการผลิต 2550/2551 มีประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาล 106.63 ก.ก.ต่อตันอ้อย ซึ่งตามเป้าหมายที่สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายตั้งไว้คือ 120 กิโลกรัมน้ำตาลต่อตันอ้อยที่ความหวาน 12 CCS. โรงงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในปีการผลิต 2550/2551 คือ โรงงานมิตรภาพสินธุ์สามารถทำผลผลิตได้ 116.59 กิโลกรัมน้ำตาลต่อตันอ้อยที่ความหวาน 13.11 CCS. ปัญหาหลักคือคุณภาพอ้อยรองลงมาคือประสิทธิภาพของโรงงานซึ่งประสิทธิภาพของโรงงานจะขึ้นอยู่กับ การสูญเสีย น้ำตาลในกระบวนการผลิต โดยในกระบวนการผลิตการสูญเสียจะสูญเสียไปในกากน้ำตาล (Molasses) ชานอ้อย (Bagasses) ไม่ทราบสาเหตุ (Undetermined Loss) และกากตะกอน (Filter Cake) ตามลำดับ

ปัญหาการหกฉ่นรั่วไหลจกอยู่ใน การสูญเสียแบบไม่ทราบสาเหตุ (Undetermined Loss) ซึ่งโรงงานน้ำตาลในประเทศไทยจะสูญเสียในส่วนนี้ประมาณ 5% แต่ประเทศในอเมริกาใต้การสูญเสียส่วนนี้จะมีไม่เกิน 2.5%

ทางผู้วิจัยได้คิดนำสมการเบอร์นูลลีมาประยุกต์ใช้สร้าง Venturi Tube เพื่อเป็นระบบดูดน้ำเชื่อมที่รั่วไหลกลับ โดยการทำงานร่วมกับเครื่องสูบน้ำแบบแรงเหวี่ยง ซึ่งผู้วิจัยคิดว่างานวิจัยนี้จะช่วยลดการสูญเสีย น้ำตาลในส่วนของการหกรั่วไหลในอุตสาหกรรมน้ำตาลได้เป็นอย่างดี

วัตถุประสงค์

สร้างระบบดูดกลับน้ำเชื่อมที่รั่วไหลจากเครื่องสูบน้ำเชื่อมเพื่อลดการสูญเสียผลผลิตใน
โรงงานน้ำตาล

ขอบเขตการวิจัย

- ศึกษาปัญหาการรั่วไหลของน้ำเชื่อมที่เกิดจากเครื่องสูบน้ำ
- ออกแบบระบบดูดกลับเพื่อป้องกันการสูญเสียน้ำเชื่อมหรือผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวใน
อุตสาหกรรมน้ำตาลที่เกิดจากการรั่วไหลจากเครื่องสูบน้ำ
- ทดสอบประสิทธิภาพของระบบ การใช้พลังงานและผลกระทบต่อผลิตภัณฑ์
- ศึกษาผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์และความสามารถในการนำไปใช้งานจริง

การตรวจเอกสาร

อ้อย

อ้อยเป็นพืชใบเลี้ยงเดี่ยวอยู่ในตระกูลหญ้ายืนต้น (Perennial Grass) อยู่ในสกุล *Saccharum* มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Saccharum officinarum* L. สามารถปลูกได้ในเขตร้อนแถบเส้นศูนย์สูตร หรือในเขตอบอุ่นระหว่างละติจูด 35 องศาเหนือและใต้ การปลูกอ้อยในประเทศไทยนิยมปลูกในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคกลาง ภาคเหนือ และภาคตะวันออกตามลำดับส่วนภาคใต้ นั้นภูมิอากาศไม่เหมาะสมต่อการปลูกอ้อยจึงไม่มีการทำอุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาลทรายทางภาคใต้ โดยปริมาณผลผลิตอ้อยและน้ำตาลทั่วประเทศแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ปริมาณผลผลิตอ้อยและน้ำตาลของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2541/42 ถึง 2550/51

ปีการผลิต	อ้อย		น้ำตาล		ค่าความหวาน (ซี.ซี.เอส)
	ผลผลิต (ล้านตัน)	ประสิทธิภาพการผลิต (ตันต่อไร่)	ผลผลิต (ล้านตัน)	ประสิทธิภาพการผลิต (ก.ก.ต่อตันอ้อย)	
2541/42	50.06	8.78	5.19	103.72	11.66
2542/43	53.13	9.01	5.52	103.92	11.70
2543/44	48.65	9.04	4.98	102.92	11.62
2544/45	59.49	9.50	6.13	103.85	11.72
2545/46	74.07	10.43	7.28	98.59	11.17
2546/47	64.48	9.10	7.01	108.71	12.09
2547/48	47.82	7.37	5.17	108.22	12.17
2548/49	46.69	7.91	4.78	103.56	11.61
2549/50	63.80	9.86	6.72	105.33	11.91
2550/51	73.31	11.82	7.82	106.63	12.10

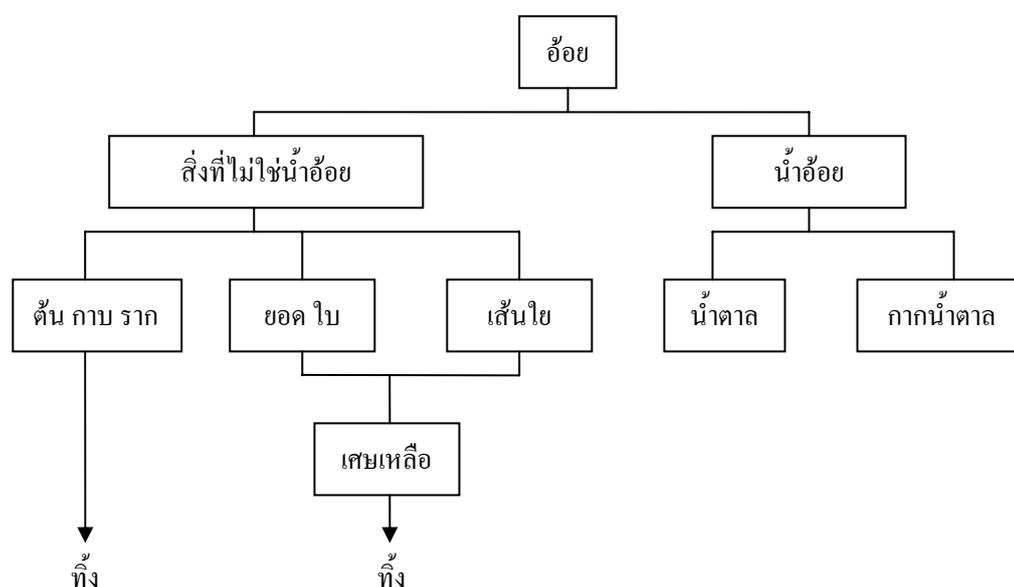
ที่มา: สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (2550)

ส่วนประกอบของอ้อย

อ้อยมีส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วนคือ มีส่วนที่เป็นน้ำอ้อยอยู่ร้อยละ 73 ถึง 76 และมีส่วนที่เป็นของแข็งอยู่ร้อยละ 24 ถึง 27 ดังแสดงในภาพที่ 1 ในส่วนของน้ำอ้อยนั้นองค์ประกอบส่วนใหญ่คือน้ำและมีปริมาณของแข็งละลายอยู่ประมาณร้อยละ 10 ถึง 16 ดังแสดงในตารางที่ 2

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล

อุตสาหกรรมอ้อยและน้ำตาล เป็นอุตสาหกรรมเกษตรที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย ทำรายได้เข้าประเทศปีละหลายหมื่นล้านบาทจากการส่งออกน้ำตาลทรายดิบ ดังตารางที่ 3 และจากการส่งออกน้ำตาลทราย ดังตารางที่ 4 โดยมีสำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทรายเป็นผู้ประสานการทำงานระหว่างชาวไร่อ้อย โรงงานน้ำตาล และหน่วยงานของรัฐ โดยปัจจุบันมีโรงงานน้ำตาลทั่วประเทศ 46 โรง มีกำลังการหีบอ้อยรวมประมาณ 75-80 ล้านตันต่อปี



ภาพที่ 1 แผนผังแสดงส่วนประกอบของอ้อย

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของน้ำอ้อย

องค์ประกอบ	ร้อยละ
น้ำ	84-90
ปริมาณของแข็งที่ละลายได้	10-16
1. น้ำตาล	72-92
- ซูโครส	70-88
- กลูโคส	2-4
- ฟรุคโตส	2-4
2. เกลือ	3-7
- เกลืออินทรีย์	10-30
- เกลืออนินทรีย์	15-45
3. กรดอินทรีย์อิสระ	0.5-2.5
4. สารอื่นๆ	
- โปรตีน	0.5-0.6
- แป้ง	0.001-0.005
- กัม	0.3-0.6
- ไขมัน	0.05-0.15
- และอื่นๆ	3.0-5.0

ที่มา: สมบัติ (2546)

ตารางที่ 3 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกน้ำตาลดิบของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ถึง พ.ศ. 2551 (ปริมาณ: ตัน มูลค่า: ล้านบาท)

เดือน	2546		2547		2548		2549		2550		2551	
	ปริมาณ	มูลค่า										
ม.ค	193,880	1,257.5	119,307	693.5	44,428	336.9	15,093	178.6	103,586	1,038.1	249,524	2,165.8
ก.พ	258,597	1,814.7	196,689	1,082.9	105,602	829.5	62,818	586.9	135,670	1,361.2	225,885	1,913.1
มี.ค	335,815	2,428.3	258,812	1,437.5	160,712	1,286.4	100,361	1,087.7	212,435	1,919.3	218,650	1,929.8
เม.ย	156,456	1,123.8	167,182	979.1	87,484	745.5	105,220	1,151.1	347,624	3,072.7	266,253	2,157.4
พ.ค	371,046	2,691.7	406,162	2,519.3	209,379	1,780.8	105,327	1,237.2	213,724	1,850.4	266,978	2,220.6
มิ.ย	314,366	2,295.9	255,119	1,563.6	203,149	1,690.1	152,500	1,773.7	284,389	2,371.9	321,587	2,714.1
ก.ค	222,140	1,480.3	269,881	1,759.4	215,265	1,823.0	141,914	1,775.9	242,661	1,939.5	389,361	3,300.2
ส.ค	253,907	1,652.6	118,535	831.3	206,143	1,780.9	78,356	1,008.2	163,315	1,307.8	411,125	3,442.4
ก.ย	163,374	1,051.1	188,913	1,351.8	169,558	1,611.5	210,857	2,593.4	91,105	816.1	207,963	1,890.8
ต.ค	100,711	682.1	100,567	702.8	80,640	712.2	88,652	939.3	116,354	1,045.7	164,370	1,571.3
พ.ย	122,248	758.1	74,623	526.2	54,629	458.5	107,205	1,055.8	105,072	925.9	169,165	1,617.1
ธ.ค	56,972	389.0	79,597	528.4	25,321	228.9	102,321	1,039.4	88,659	775.1	105,950	981.5
รวม	2,549,512	17,624.9	2,235,205	13,975.7	1,562,310	13,284.0	1,270,624	14,427.1	2,104,594	18,423.7	2,996,811	25,904.0

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร (2552)

ตารางที่ 4 ปริมาณและมูลค่าการส่งออกน้ำตาลทรายของประเทศไทยตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 ถึง พ.ศ. 2551 (ปริมาณ: ตัน มูลค่า: ล้านบาท)

เดือน	2546		2547		2548		2549		2550		2551	
	ปริมาณ	มูลค่า										
ม.ค	68,531	586.1	189,320	1,373.3	147,781	1,421.8	43,403	577.2	191,455	2,116.8	106,391	1,071.7
ก.พ	90,005	769.7	243,536	1,718.9	165,490	1,578.0	79,290	971.7	253,436	2,824.7	118,317	1,176.3
มี.ค	146,918	1,293.5	283,625	2,014.8	230,795	2,229.2	70,878	972.7	300,374	3,310.2	159,950	1,610.7
เม.ย	282,349	2,385.4	237,426	1,713.1	194,865	1,927.5	60,402	815.8	240,139	2,689.9	121,073	1,210.2
พ.ค	433,763	3,726.0	303,482	2,287.1	115,186	1,148.8	65,850	913.8	227,593	2,705.9	180,413	1,829.0
มิ.ย	306,666	2,591.2	286,825	2,212.4	126,823	1,282.7	61,271	890.4	285,822	3,076.6	262,377	2,726.6
ก.ค	220,833	1,866.5	163,323	1,319.4	89,698	954.9	60,958	1,007.0	196,988	2,192.3	273,684	2,940.7
ส.ค	195,877	1,603.0	170,509	1,462.0	97,461	1,077.0	87,742	1,258.0	179,110	1,958.6	186,216	2,067.6
ก.ย	173,121	1,372.7	145,405	1,296.4	76,830	851.5	180,390	2,345.5	128,594	1,290.8	166,499	1,918.9
ต.ค	164,770	1,270.6	161,507	1,529.9	63,296	707.0	117,058	1,606.0	116,999	1,184.2	159,129	1,897.3
พ.ย	264,913	2,026.9	106,563	1,018.0	56,332	650.3	83,230	1,127.1	125,101	1,250.3	148,113	1,736.4
ธ.ค	167,572	1,315.9	73,312	694.3	85,252	1,001.3	92,037	1,197.0	75,874	782.7	132,830	1,548.1
รวม	2,515,318	20,807.5	2,364,833	18,639.5	1,449,809	14,830.0	1,002,509	13,682.1	2,321,485	25,383.0	2,014,992	21,733.5

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร โดยความร่วมมือของกรมศุลกากร (2552)

กระบวนการผลิตน้ำตาลดิบ

กระบวนการผลิตน้ำตาลของโรงงานน้ำตาลโดยทั่วไปประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลักคือ การหีบสกัดน้ำอ้อย, การทำใส่น้ำอ้อย, การต้มเคี่ยวน้ำตาลให้ตกผลึก และการปั่นน้ำตาลและทำให้แห้ง (ภาพที่ 2) โดยกระบวนการผลิตเริ่มจากการรับอ้อยเข้าโรงงานจากนั้นอ้อยจะถูกลำเลียงไปตามสะพานอ้อย นำผ่านชุดใบมีดฟันอ้อยซึ่งจะตัดอ้อยเป็นท่อนเล็กๆ แล้วผ่านไปยังค้อนทุบอ้อยหรือเครื่องย่อยอ้อย (Shredder) ซึ่งจะย่อยอ้อยให้เป็นชิ้นเล็กๆเพื่อให้เหมาะกับการหีบอ้อยที่ทำให้สามารถสกัดน้ำอ้อยออกมาให้ได้มากที่สุด จากนั้นนำไปเข้าสู่ชุดลูกหีบ ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 4-6 ชุด เพื่อให้สามารถสกัดน้ำอ้อยออกจากกากอ้อยให้ได้มากที่สุด ในระหว่างการหีบอ้อยจึงมีการพรมน้ำร้อนลงไปด้วย ทั้งนี้ต้องมีการควบคุมปริมาณน้ำที่ใช้พรมอ้อยให้เหมาะสม น้ำอ้อยที่ได้จากชุดลูกหีบเรียกว่า น้ำอ้อยรวม (Mixed Juices) ซึ่งจะมีความสกปรกสูง มีสีคล้ำ ขุ่น และมีค่า pH ประมาณ 5.5 จึงต้องนำไปผ่านกระบวนการทำใส (Clarification) ซึ่งถ้าจะทำใสน้ำอ้อยรวมเพื่อให้ผลิตน้ำตาลทรายดิบ ก็จะต้องผ่านการตกตะกอนด้วยค่างที่เรียกว่า Defecation Process เมื่อนำไปตกตะกอนและกรองจะได้กากตะกอนและน้ำอ้อยใส น้ำอ้อยใสที่ได้ต้องนำไปต้มภายใต้ความดัน เพื่อไล่น้ำออกให้น้ำเชื่อมที่มีความเข้มข้นประมาณ 60 ° BX จากนั้นจะนำน้ำเชื่อมนี้ไปต้มเคี่ยวเพื่อให้ตกผลึกเป็นน้ำตาลทราย การตกผลึกน้ำตาลทรายนี้นั้นต้องใช้การล่อผลึก (Seeding) เมื่อเลี้ยงผลึกจนได้ขนาดเมล็ดน้ำตาลตามข้อกำหนดแล้ว นำไปปั่น (Centrifugation) จะได้น้ำตาลทรายและกากน้ำตาลออกมา น้ำตาลทรายที่ได้ยังมีความชื้น จึงต้องนำไปอบแห้งต่อจากนั้นนำไปบรรจุหรือเทกองรวมไว้ในโกดังน้ำตาล (สมบัติ, 2546)

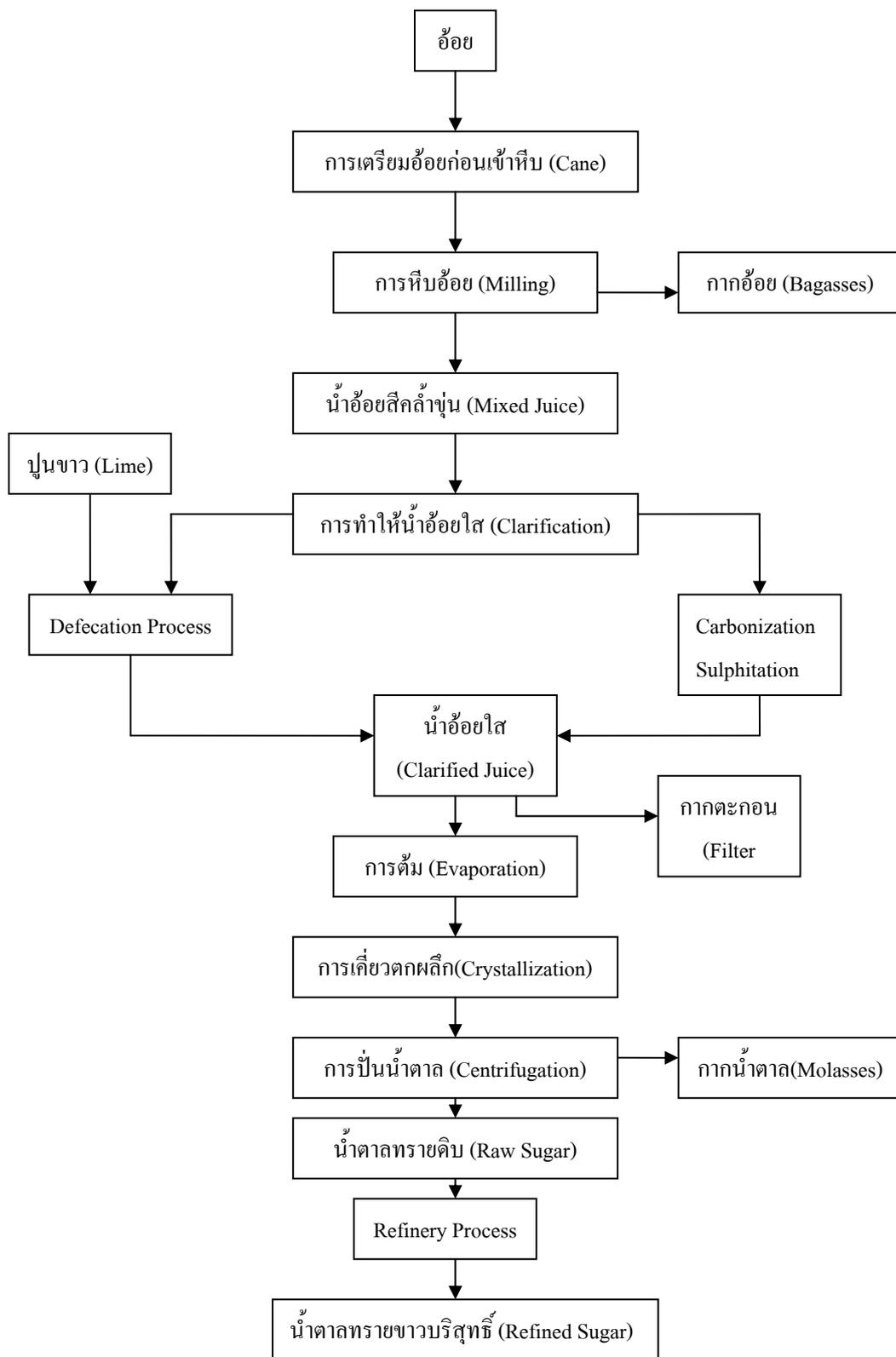
กระบวนการผลิตน้ำตาลรีไฟน์

กระบวนการผลิตน้ำตาลรีไฟน์เป็นกระบวนการต่อเนื่องจากกระบวนการผลิตน้ำตาลดิบ โดยจะนำน้ำตาลดิบมาผ่านกระบวนการละลายเมล็ดเป็นน้ำเชื่อมควบคุมที่ 55-65 ° BX และนำน้ำเชื่อมที่ได้ไปผ่านกระบวนการลดค่าสี กระบวนการที่นิยมใช้กันในประเทศไทยคือ ขั้นแรกผ่านกระบวนการลดค่าสีโดย Carbonation Process จะนำน้ำเชื่อมมาผสมเข้ากับน้ำปูนขาว (Lime Milk) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากการเผาไหม้จากเตาหม้อไอน้ำ ทำปฏิกิริยากันดูดจับค่าสีออกจากน้ำเชื่อมตกลงเป็นตะกอน น้ำเชื่อมที่ได้นำไปผ่านกระบวนการคัดแยกความหวานออกจากตะกอนโดยวิธีการผ่านผ้ากรอง ส่วนตะกอนจะนำไปทิ้งในระบบบำบัด ค่าสีที่กระบวนการ Carbonation สามารถลดได้โดยทั่วไปอยู่ที่ 70-80% ขึ้นอยู่กับการควบคุมกระบวนการ

เกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำเชื่อมที่ผ่านการกรองแล้วจะนำไปลดค่าสีอีกครั้งโดยผ่านเรซินแลกเปลี่ยนประจุ เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่ก่อให้เกิดสีในน้ำเชื่อมล้วนเป็นรงควัตถุที่เป็นสารประกอบที่เป็นประจุลบ (Anion) ได้แก่ สารประกอบที่มีสภาพความเป็นกรดอ่อน (Weakly Acidic Compound), สารประกอบกลุ่ม Polyphenols, Tannins และ Anthocyanins เป็นต้น สารประกอบรงควัตถุเหล่านี้มีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่างหลักร้อยจนถึงเกือบหลักหมื่น และการที่สารประกอบเหล่านี้มีคุณลักษณะเป็นประจุลบ จึงต้องใช้เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchange Resin) ทำหน้าที่เป็นตัวลดค่าสี (Decolorizer) โดยน้ำเชื่อมที่ได้จากกระบวนการนี้เรียกว่า น้ำเชื่อมบริสุทธิ์ (Fined Liquor) น้ำเชื่อมจะนำไปผ่านการต้มอีกครั้งเพื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นก่อนส่งไปทำการเคี้ยวผลึก น้ำตาลที่ได้จากกระบวนการเคี้ยวผลึกและปั่นแยกจะเป็นน้ำตาลทรายขาว

ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นวิธีการที่นิยมใช้กัน โดยทั่วไปอาจมีบางโรงงานใช้วิธีที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำตาลทรายขาวที่ต้องการผลิต โดยค่าที่ควบคุมสำคัญในน้ำตาลทรายขาวคือค่าสี, ความชื้น, ความบริสุทธิ์, ขนาดเม็ด และสิ่งปนเปื้อน

จะเห็นได้ว่าในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายขาวจะผ่านกระบวนการต้มเคี้ยวและปั่นแยกในกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายดิบแล้ว ต้องมาผ่านการละลายเพื่อลดค่าสี หลังจากนั้นผ่านกระบวนการต้มเคี้ยวและปั่นแยกในกระบวนการผลิตน้ำตาลรีไฟน์อีกครั้ง ดังนั้นต้นทุนในการผลิตน้ำตาลจะมีค่าสูง การสูญเสียในกระบวนการต่างๆต้องน้อยที่สุดเพื่อต้นทุนในการผลิตจะได้ต่ำลง โดยการสูญเสียในกระบวนการผลิตจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



ภาพที่ 2 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตน้ำตาล

การสูญเสียในกระบวนการผลิตน้ำตาล

จากตารางที่ 5 จะเห็นว่าการสูญเสียน้ำตาลของกระบวนการผลิตในทวีปอเมริกาใต้ โดยเฉลี่ย

ตารางที่ 5 เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำตาลในกระบวนการผลิต

	Bagasse	Filter Cake	Molasses	Undetermined	Total
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
1988	2.37	0.27	9.64	1.96	14.24
1989	2.4	0.27	9.26	1.85	13.78
1990	2.33	0.26	8.76	1.98	13.33
1991	2.25	0.29	9.02	1.92	13.48
1992	2.05	0.27	8.86	1.76	12.94
1993	2.19	0.25	11.31	2.23	15.98
1994	2.25	0.25	12.07	2.29	16.86
1995	2.13	0.22	10.97	2.01	15.33
1996	2.31	0.22	11.37	2.15	16.05
1997	2.28	0.25	9.84	1.81	14.18
1998	2.26	0.24	9.4	2	13.9
1999	2.27	0.25	9.29	2.1	13.91
2000	2.07	0.19	9.25	1.99	13.5
2001	2.25	0.18	9.45	1.92	13.8
2002	2.04	0.18	8.62	1.87	12.71
2003	2.21	0.15	8.96	1.67	12.99
2004	2.13	0.17	9.48	1.95	13.73
2005	2.02	0.14	9.65	1.96	13.77
Average	2.21	0.23	9.73	1.97	14.14

ที่มา: www.sugartech.co.za

จากข้อมูลข้างต้นจะเห็นว่าน้ำตาลจะสูญเสียในกากน้ำตาลมากที่สุด รองลงมาคือในชานอ้อย สูญเสียโดยไม่ทราบสาเหตุและกากตะกอน ตามลำดับ ซึ่งถ้านำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับกระบวนการผลิตน้ำตาลในเมืองไทยซึ่งแนวโน้มการสูญเสียมีมากกว่าของประเทศในอเมริกาได้ และในการสูญเสียที่ไม่ทราบสาเหตุ (Undetermined Loss) นั้นสาเหตุหลักเกิดจากการหกฉ่นรั่วไหลและอื่นๆในกระบวนการ

เครื่องสูบ

เครื่องสูบหรือปั๊ม เป็นเครื่องมือกลที่ทำหน้าที่เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลว เพื่อให้ของเหลวนั้นไหลผ่านระบบท่อปิดจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้ตามความต้องการ พลังงานที่นำมาเพิ่มให้แก่ของเหลวนั้นอาจได้มาจากเครื่องยนต์ มอเตอร์ แรงลม แรงคน หรือพลังงานอื่นๆ เครื่องสูบเป็นเครื่องมือสำคัญที่จำเป็นต่อความเป็นอยู่ของมนุษย์ นับตั้งแต่งานจัดหาและส่งน้ำเพื่ออุปโภคบริโภค การเกษตร งานอุตสาหกรรม คมนาคม หรือแม้กระทั่งงานทางการแพทย์

1. การแยกประเภทของเครื่องสูบ

ปัจจุบันได้มีการผลิตเครื่องสูบออกมามากมายหลายชนิด และมีชื่อเรียกแตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงได้มีการจัดหมวดหมู่เพื่อให้สามารถแยกประเภทและเรียกชื่อได้ชัดเจนขึ้น การแยกประเภทอาจแบ่งออกได้เป็น 2 แบบด้วยกัน คือ

1.1 แยกตามลักษณะการเพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวหรือการไหลของของเหลวในเครื่องสูบ ซึ่งได้แก่

1.1.1 ประเภทเซนตริฟูกอล (Centrifugal) เพิ่มพลังงานให้แก่ของเหลวโดยอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง เครื่องสูบประเภทนี้บางครั้งเรียกว่าเป็นประเภท Rotor-dynamic

1.1.2 ประเภทโรตารี (Rotary) เพิ่มพลังงานโดยอาศัยการหมุนของฟันเฟืองรอบแกนกลาง

1.1.3 ประเภทลูกสูบชัก (Reciprocating) เพิ่มพลังงานโดยอาศัยการอัดโดยตรงในกระบอกสูบ

1.1.4 นอกแบบ (Special) ซึ่งเป็นเครื่องสูบที่มีลักษณะพิเศษ ไม่

สามารถจัดให้อยู่ในสามประเภทข้างต้นได้ เช่น เครื่องสูบลมแบบเจ็ต (Jet Pump) เป็นต้น

1.2 แยกประเภทตามลักษณะการขับเคลื่อนของเหลวในเครื่องสูบลม ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ประเภทด้วยกัน คือ

1.2.1 ทำงานโดยไม่อาศัยหลักการแทนที่ของของเหลว (Non-positive Displacement) เครื่องสูบลมประเภทอาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางอาจจัดให้อยู่ในกลุ่มนี้ได้

1.2.2 ทำงานโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลวในห้องสูบลมด้วยการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนของเครื่องสูบลม เครื่องสูบลมประเภทนี้รวมแบบโรตารีและลูกสูบชักเข้าอยู่ในกลุ่มเดียวกัน

นอกจากการแบ่งประเภทตามที่กล่าวข้างต้นแล้ว ยังอาจแบ่งแยกเครื่องสูบลมตามวัตถุประสงค์การใช้งานของแต่ละแบบด้วย เช่น เครื่องสูบลมดับเพลิง เครื่องสูบลม เครื่องสูบลมสุญญากาศ เครื่องสูบลมน้ำบาดาล เป็นต้น เครื่องสูบลมเหล่านี้จะประกอบกันเป็นชุดโดยมีอุปกรณ์สำหรับใช้งานที่ออกแบบไว้โดยเฉพาะและไม่เหมาะที่จะนำไปใช้อย่างอื่น (วิบูลย์, 2529)

เครื่องสูบลมแต่ละประเภทยังก็เหมาะสมกับงานแต่ละชนิดแตกต่างกันออกไป ซึ่งในอุตสาหกรรมน้ำบาดาลนั้นเครื่องสูบลมที่ใช้กันส่วนใหญ่แล้วจะเป็นประเภทเครื่องสูบลมแบบแรงเหวี่ยงหรือประเภทเซนตริฟูกอล ดังนั้นจึงขออธิบายรายละเอียดของเครื่องสูบลมแบบแรงเหวี่ยงเพียงชนิดเดียว (ภาพที่ 3) ซึ่งเกี่ยวข้องกับงานวิจัยในครั้งนี้

2. ส่วนประกอบของเครื่องสูบลมแบบแรงเหวี่ยง

นิรนาท (2546) กล่าวว่า แม้ว่าเครื่องสูบลมแบบแรงเหวี่ยงจะมีส่วนประกอบที่ไม่สลับซับซ้อนมากนัก (ภาพที่ 3) และมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่น้อยชิ้น แต่ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องสูบลมชนิดนี้ก็มีส่วนสำคัญที่จะต้องทำความเข้าใจเช่นเดียวกัน ซึ่งจะได้กล่าวถึงรายละเอียดต่างๆดังต่อไปนี้

2.1 เรือนสูบ (Casing) เรือนสูบของเครื่องสูบลมทำหน้าที่ลดความเร็วของของเหลวที่ถูกเหวี่ยงจากใบพัด ซึ่งเราจะสังเกตได้จากลักษณะการออกแบบทางเดินของของเหลว ว่าพื้นที่หน้าตัดจะขยายใหญ่ขึ้นเรื่อยๆจนถึงทางออก หมายความว่า พลังงานจลน์ของของเหลวถูกเปลี่ยนไปเป็น

พลังงานศักย์ในรูปความดัน เพื่อให้มีความดันสูงพอที่จะทำให้เกิดการไหลในระบบส่งของเหลว
นั้นๆ

เรื่อนสูบปกติเราแบ่งเป็นแบบต่างๆตามลักษณะการผ่าซีก ดังนี้

2.1.1 ผ่าซีกตามแนวแกน (Axially Split หรือ Horizontally Split) ท่อเข้าและท่อออก
มักอยู่ที่ซีกล่างของเรื่อนสูบ เพื่อให้สะดวกต่อการถอดออกตรวจสอบและซ่อม เรื่อนสูบแบบนี้นิยม
ใช้กันมาก แต่มีข้อเสียคือ ใช้กับความดันสูงมากๆไม่ได้ (โดยปกติจำกัดแค่ 1,600 Psi เพราะการซีล
ทำลำบากกว่า)

2.1.2 ผ่าซีกตามแนวรัศมี (Radially Split หรือ Vertically Split) คือผ่าในแนวตั้งฉาก
กับแกนหมุนซึ่งนิยมใช้กันมากเช่นกัน โดยเฉพาะในเครื่องสูบน้ำความดันสูงๆ

2.2 ใบพัด (Impeller) ใบพัดของเครื่องสูบแต่ละแบบมีลักษณะแตกต่างกันออกไป และ
เครื่องสูบแบบหนึ่งๆใบพัดก็ยังมีออกแบบให้แตกต่างกัน เพื่อให้เหมาะสำหรับงานแต่ละชนิด การ
แบ่งชนิดของใบพัดนั้นขึ้นกับพื้นฐานของการแบ่งดังต่อไปนี้

2.2.1 แบ่งตามลักษณะของทางของเหลวเข้าได้ 2 แบบ คือ

2.2.1.1 ใบพัดทางเข้าด้านเดียว (Single Suction Impeller) ใช้สำหรับทั้งเครื่อง
สูบแบบสเตจเดียวและหลายสเตจ โดยเฉพาะในเครื่องสูบหลายสเตจใบพัดจะเป็นแบบทางเข้าด้าน
เดียวแทบทั้งสิ้น นอกจากนี้ในเครื่องสูบน้ำขนาดเล็ก และเครื่องสูบน้ำซึ่งเสื่อสูบผ่าซีกตามแนวรัศมีก็นิยมใช้
ใบพัดแบบนี้

2.2.1.2 ใบพัดทางเข้าสองด้าน (Double Suction Impeller) เหมาะสำหรับ
เครื่องสูบแบบสเตจเดียว และผ่าซีกตามแนวแกน เนื่องจากใบพัดแบบนี้ทำให้เกิดแรงสมดุลย์ใน
แนวแกนทำให้สามารถลดขนาดของแบร์ริง (Thrust Bearing) ลงได้

2.2.2 แบ่งตามรูปร่างลักษณะของใบพัด

2.2.2.1 แบบเวนตรง (Straight-vane Impeller)

2.2.2.2 แบบฟรานซิสเวน (Francis-vane Impeller)

2.2.2.3 แบบ Mixed-flow

2.2.2.4 แบบ Axial-flow หรือ Propeller

2.2.3 แบ่งตามลักษณะการออกแบบ

2.2.3.1 แบบเปิด (Open) มีแต่เวเนติคกับคัมตรงกลางเท่านั้น ไม่มีแผ่นกลมยึดใบของเวนมักใช้กับเครื่องสูบลูกสูบตัวเล็กราคาถูก และใช้กับของเหลวที่มีการกัดกร่อนสูง

2.2.3.2 แบบกึ่งเปิด (Semi-open) มีแผ่นกลมยึดด้านหนึ่งของเวน

2.2.3.2 แบบปิด (Closed) เวนมีแผ่นกลมประกอบทั้งสองข้าง

2.3 เพลลา และปลอกหุ้มเพลลา (Shaft and Shaft Sleeve) เพลลาของเครื่องสูบลูกสูบทำหน้าที่ส่งกำลังจากมอเตอร์ หรือเครื่องยนต์ไปยังใบพัดของเครื่องสูบลูกสูบ สิ่งที่ต้องคำนึงถึงอันดับแรกในการออกแบบเพลลา คือ จะต้องให้ความเบี่ยงเบนของเพลลา (จากแนวศูนย์กลาง) ในขณะทำงานมีค่าน้อยกว่าช่องว่างเล็กที่สุด (Clearance) ระหว่างใบพัดกับเสื้อเครื่องสูบลูกสูบ และเพลลานั้นต้องมีขนาดพอที่จะรับความเค้น (Stress) ที่เกิดจากแรงบิด น้ำหนักของเพลลา ส่วนประกอบของมัน และแรงจากความดันของของเหลวด้วย นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงค่าความเร็ววิกฤต (Critical Speed) ด้วย เพราะถ้าเพลลาที่เราออกแบบมามีค่าความถี่ตามธรรมชาติ (Natural Frequency) ใกล้เคียงกับความเร็วที่เครื่องสูบลูกสูบทำงาน จะเกิดการสั่นที่ตัวเครื่องสูบลูกสูบมาก และมักทำให้เครื่องสูบลูกสูบเสียหายอย่างรวดเร็ว

เพลลาทุกอันเมื่อใช้งานไปแล้วย่อมเกิดการสึกหรอ ซึ่งอาจเกิดจากการกัดกร่อนของของเหลวในเครื่องสูบลูกสูบ การสึกกร่อนเนื่องจากการขัดสี ดังนั้น เมื่อใช้ไปนานๆเพลลาจะเกิดการแกว่งในขณะที่มันหมุน ซึ่งถ้าเกินค่าจำกัดค่าหนึ่งของเครื่องสูบลูกสูบนั้นๆ จะเกิดการเสียหายขึ้น การแก้ไขโดยการเปลี่ยนเพลลาใหม่ทั้งอัน หรือใช้วิธีเชื่อมพอกแล้วกลึงให้ได้ขนาดเท่าเดิมนั้นจะต้องสิ้นเปลืองเงินมาก ดังนั้นเพลลาโดยทั่วไปจึงออกแบบให้มีปลอกหุ้มเพลลา ซึ่งสามารถเปลี่ยนได้เมื่อหมดอายุใช้งานของมัน ซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกับการมีแบร์ริงริง สำหรับใบพัดนั่นเอง

2.4 แบร์ริง (Bearing) คือส่วนที่ใช้สำหรับรองรับเพลลาและใช้ในการตั้งศูนย์ของเพลลาเครื่องสูบลูกสูบจะมีแบร์ริง 2 ตัวสำหรับรองรับแต่ละข้างของเพลลาแบร์ริงแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆนั่นก็คือ Sleeve Bearing และบอลล์แบร์ริง (Ball Roller Bearing) (จรรยาพล.2546)

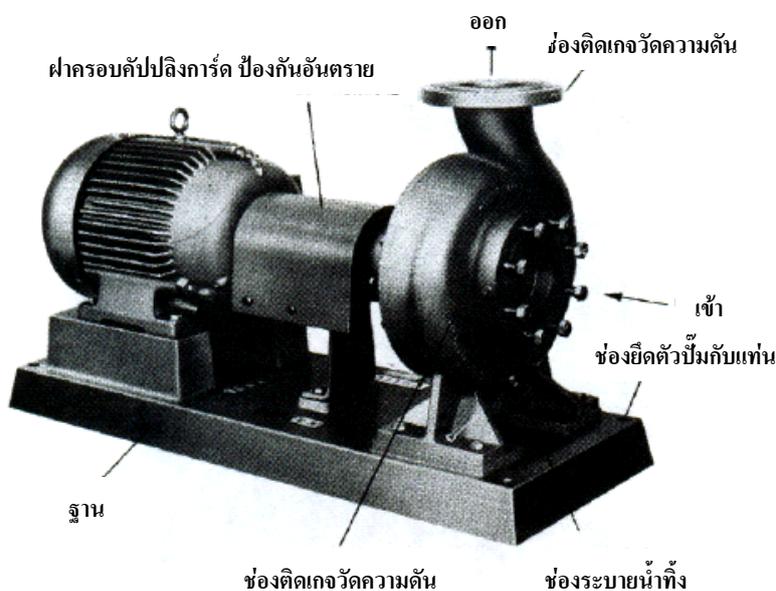
2.5 สตัพฟิงบ็อกซ์ (Stuffing Box) เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในการป้องกันการรั่วไหลเนื่องจากเป็นบริเวณที่เพลาสอดผ่านออกมาจากเรือนสูบโดยที่บริเวณสตัพฟิงบ็อกซ์จะเกิดทั้งแรงดูดและแรงดันในกรณีที่แรงดันภายในเรือนสูบน้อยกว่าแรงดันบรรยากาศสตัพฟิงบ็อกซ์จะทำหน้าที่ป้องกันอากาศจากภายนอกรั่วไหลเข้าไปในเรือนสูบซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการสูบลดลงและในกรณีที่แรงดันในเรือนสูบสูงกว่าหรือเท่ากับความดันบรรยากาศสตัพฟิงบ็อกซ์จะป้องกันของเหลวที่อยู่ในเรือนสูบบรรเทาออกมาทำให้เกิดความสูญเสียและประสิทธิภาพของเครื่องสูบลดลง

2.6 ประเก็น (Seal) ป้องกันการรั่วรอบๆเพล่า ซึ่งส่วนแกนเพล่านั้นจะต้องสอดผ่านตัวไบพัดและโผล่ออกไปนอกเรือนเครื่องสูบเพื่อต่อกับส่วนจับ เช่น มอเตอร์จะเห็นได้ว่าปลายด้านหนึ่งของเพล่านั้นจะจุ่มอยู่ในของเหลว ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งนั้นจะต้องโผล่ออกไปในอากาศซึ่งเป็นช่องทางที่จะมีของเหลวรั่วไหลออกไปได้ ตัวส่วนที่จะกันของเหลวรั่วไหลออกไปจากส่วนที่แกนเพล่าพันตัวเรือนเครื่องสูบออกไปนี้ก็คือส่วนที่เรียกว่า ประเก็นนั่นเอง ลักษณะของประเก็นที่ใช้อยู่กับเครื่องสูบแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ประเก็นประเภทแรกเรียกว่า แพคกิ้ง (Packing) และประเก็นอีกประเภทหนึ่งเรียกว่า แมคคานิคัลซีล (Mechanical Seal)

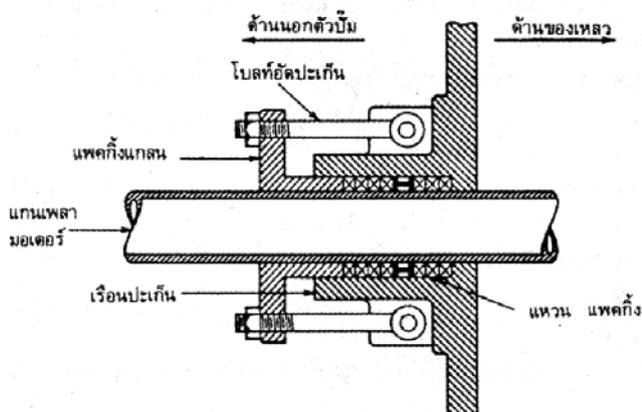
2.6.1 ประเก็นแบบแพคกิ้ง (Packing) ประเก็นประเภทนี้ใช้ลักษณะของสารที่จะพันรอบแนวแกนหลายๆรอบ ซึ่งสารประเภทนี้อาจจะเป็นวัสดุประเภทแอสเบสตอส พวกรubber หรือสารตะกั่ว ซึ่งมีคุณสมบัติในการหล่อลื่นได้ในตัวสารที่พันรอบแกนนี้จะถูกอัดเข้ากับแกรเพล่าเป็นวงซ้อนๆกันอยู่ในเรือนของประเก็นที่เรียกว่า Stuffing Box โดยใช้ตัว Packing Gland ซึ่งยึดจับตัวเรือนเครื่องสูบด้วยตัว Bolt แต่การยึด Packing Gland นี้จะต้องไม่ยึดแน่นจนเกินไป โดยจะต้องปล่อยให้ของเหลวออกมาหล่อลื่นตัวแพคกิ้งนี้อย่างสม่ำเสมอ ซึ่งถ้า Packing Gland แน่นเกินไปก็จะทำให้มีการหล่อลื่นน้อยและจะทำให้แพคกิ้งมีความร้อนได้ เมื่อใช้งานไปสักระยะหนึ่ง ตัวแพคกิ้งนี้ก็จะสูญเสียคุณสมบัติในการหล่อลื่นตัวของมันเอง ซึ่งทำให้ตัวเรือนของประเก็นร้อน และมีการรั่วไหลของของเหลวมาก ซึ่งแสดงว่าถึงเวลาที่จะต้องเปลี่ยนตัวเรือนของประเก็นร้อน และมีการรั่วไหลของของเหลวมาก ซึ่งแสดงว่าถึงเวลาที่จะต้องเปลี่ยนตัวแพคกิ้งใหม่แล้ว นอกจากนี้เมื่อมีการใช้ตัวแพคกิ้งไปสักระยะหนึ่งก็อาจจะต้องการตั้งให้ตัว Gland แน่นเข้า รายละเอียดของประเก็นชนิดนี้แสดงในภาพที่ 4

2.6.2 ประเก็นแบบแมคคานิคัลซีล (Mechanical Seal) ประเก็นชนิดนี้มีลักษณะแตกต่างไปจากการใช้แพคกิ้งในตัวเรือนประเก็น ในลักษณะของทิศทางกันการรั่วไหล สำหรับการใส่ตัวเรือนประเก็นนั้นจะมีการซีลไปตามแนวของแกนเพล่า ส่วนตัวแมคคานิคัลซีลใช้การสัมผัสของผิว

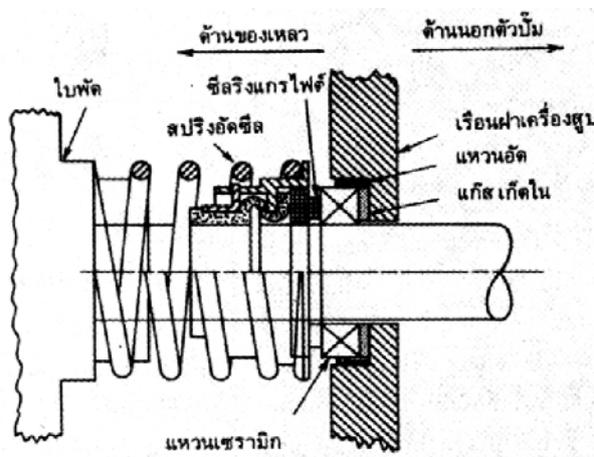
วัสดุขัดมันสองชิ้น ซึ่งจะสัมผัสกันในแนวตั้งฉากกับแกนเพลลา ผิวสัมผัสด้านในที่ใช้สปริงดันอยู่จะติดกับตัวแกนเพลลาและหมุนไปพร้อมๆกัน ส่วนผิวสัมผัสด้านนอกจะติดอยู่กับส่วนที่ไม่เคลื่อนที่ของเครื่องสูบลูกคือ ตัวเรือนเสื้อสูบนั่นเอง แต่การกันรั่วไหลผ่านตัวซีลจะทำได้โดยผิวสัมผัสทั้งสอง ซึ่งการกันรั่วโดยใช้แมคคานิคัลซีลนี้ จะป้องกันการรั่วได้ดีกว่าการใช้ตัวเรือนปะเก็นมากและเหมาะสมสำหรับการใช้ในการสูบของเหลวที่มีราคาแพง หรือมีพิษที่ไม่ควรปล่อยให้รั่วไหล (ภาพที่ 5) (จิระพล, 2546)



ภาพที่ 3 เครื่องสูบบแบบแรงเหวี่ยง



ภาพที่ 4 ปะเก็นแบบแพคกิ้ง



ภาพที่ 5 ปะเก็นแบบแมคคานิกัลซีล

สมการเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

จากสมการพลังงานของ Leonhard Euler สามารถอินทิเกรตได้ดังนี้ (กรีติ, 2541)

$$\int dz + \int \frac{dp}{\gamma} + \int \frac{VdV}{g} = 0 \quad (1)$$

$$z + \frac{p}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} = 0 \quad (2)$$

จากสมการ (2) คือสมการพลังงานของ Bernoulli ใช้สำหรับเงื่อนไขในการไหลของไหล
ดังนี้

1. ของไหลจินตภาพ (Ideal) คือของไหลที่ไม่มีแรงเสียดทานและอัดตัวได้ยาก (Incompressible)
2. การไหลคงที่ตามเวลา (Steady Flow) และเป็นกรไหลอย่างต่อเนื่อง
3. การไหลเป็นไปตามเส้นแนวการไหล
4. ความเร็วกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าตัดการไหล และมีค่าเท่ากับความเร็วเฉลี่ย
5. แรงที่กระทำต่อของไหลมีเพียงแรงโน้มถ่วงของโลก (Gravity Force) และแรงดัน (Pressure Force) เท่านั้น

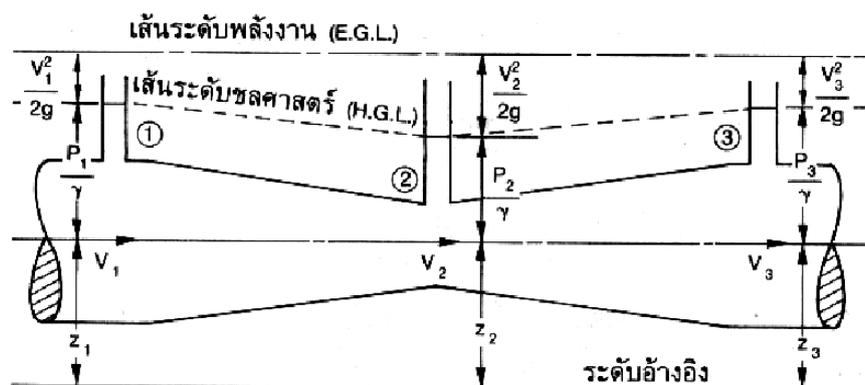
ทุกเทอมในสมการพลังงานของ Bernoulli มีมิติเป็นความยาว L ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เทอมต่างๆในสมการพลังงานของ Bernoulli

เทอม	ชื่อเรียก	มิติ
z	หัวศักดา (Potential Head หรือ Elevation Head)	L
$\frac{P}{\gamma}$	หัวความดัน (Pressure Head)	$\frac{F}{L^2} \frac{L^3}{F} = L$
$\frac{V^2}{2g}$	หัวความเร็ว (Velocity Head)	$\frac{L^2}{T^2} \frac{T^2}{L} = L$

หมายเหตุ: F คือแรงหรือน้ำหนัก L คือความยาว และ T คือเวลา

ในการเปรียบเทียบการไหลของของเหลวในแต่ละจุด สามารถใช้สมการพลังงานได้ในกรณีที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานใดๆ เช่น การไหลของของไหลในท่อลดขนาด (Converges) แล้วเพิ่มขนาด (Diverges) ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 การใช้สมการพลังงานการไหลในท่อ

จากภาพที่ 6 จะเห็นได้ว่าที่อัตราการไหล Q คงที่ และท่อวางในแนวนอน ($z_1=z_2=z_3$) จะได้

$$V_1 < V_2 \text{ และ } V_2 > V_3$$

ดังนั้น

$$\frac{V_1^2}{2g} < \frac{V_2^2}{2g} \text{ และ } \frac{V_2^2}{2g} > \frac{V_3^2}{2g}$$

เนื่องจากสมการพลังงานของ Bernoulli จะได้

$$\left. \begin{aligned} \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 &= \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \\ \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 &= \frac{P_3}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ทำให้ $\frac{P_1}{\gamma} > \frac{P_2}{\gamma}$ และ $\frac{P_2}{\gamma} > \frac{P_3}{\gamma}$

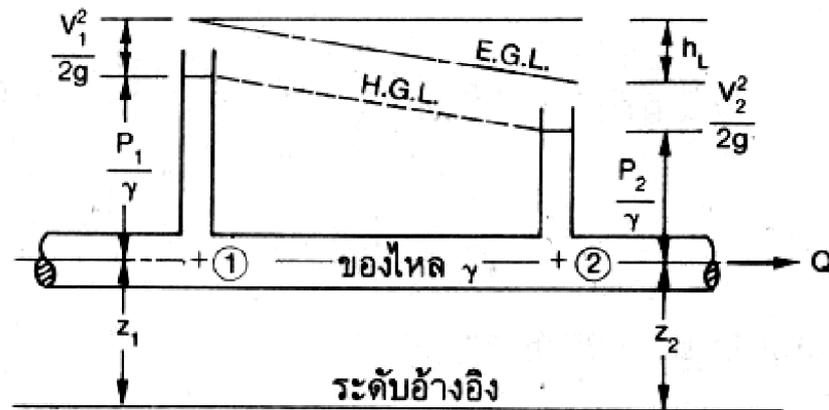
นั่นคือ ระดับของของไหลที่จุด (1) สูงกว่าที่จุด (2) และระดับของของไหลที่จุด (2) ต่ำกว่าที่จุด (3)

แนวเส้นที่เป็นผิวของของไหลคือ $z + \frac{P}{\gamma}$ เรียกว่า เส้นระดับชลศาสตร์ (Hydraulic Grade

Line; H.G.L.) และแนวเส้นที่เป็นผลรวมของ $z + \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g}$ เรียกว่า เส้นระดับพลังงาน (Energy

Grade Line; E.G.L.)

ในกรณีที่มีการสูญเสียพลังงาน เช่น การไหลของของเหลวในท่อจากจุด (1) ไปจุด (2) แล้วเกิดการสูญเสียพลังงานในรูปของความสูง h_L แสดงได้ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 การสูญเสียพลังงานของของไหลในท่อ

สมการพลังงานคือ

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_L \quad (4)$$

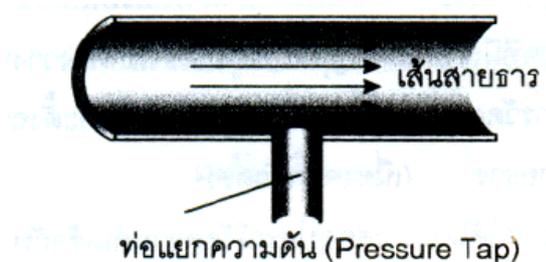
การวัดความดันสถิตด้วยท่อแยกความดัน (Pressure Tap) หรือหัวตรวจความดัน (Pressure Probe) และวัดความเร็วของการไหลด้วยสมการเบอร์นูลลี (วีระชัยและพงษ์ศักดิ์, 2544)

การนำสมการเบอร์นูลลีไปใช้งานจำเป็นต้องทราบความดันและความเร็วของการไหลที่จุดๆหนึ่ง เพื่อนำไปใช้คำนวณความดันหรือความเร็วของการไหลอีกจุดหนึ่ง ดังนั้น ข้อมูลที่ได้จากการวัดความดันและความเร็วในการใช้งานจริงจึงมีความสำคัญมากในหัวข้อนี้เราจะศึกษาวิธีการวัดค่าความดันซึ่งคำว่า “ความดัน” ในสมการเบอร์นูลลี จะหมายถึงความดันทางเทอร์โมไดนามิกส์หรือเรียกว่า “ความดันสถิต (Static Pressure)”

1. การวัดความดันสถิต

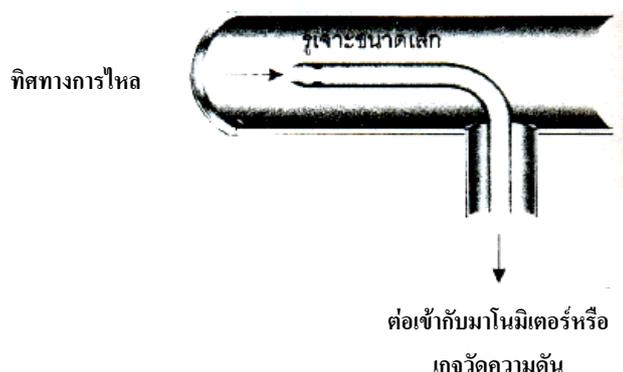
หากพิจารณาการวัดความดันสถิต ในสมการเบอร์นูลลีซึ่งเป็นความดันที่จุดๆหนึ่งในสนามการไหล ดังนั้น เราคงต้องใช้อุปกรณ์วัดความดัน ที่สามารถเคลื่อนที่ไปกับการไหลได้ แต่การทำเช่นนี้ในทางปฏิบัติเป็นไปได้ยาก เราจึงพิจารณาหาวิธีอื่นเพื่อวัดความดันสถิต โดยใช้ความจริงที่ว่า “บนเส้นสายธารที่เป็นเส้นตรง (คือ เส้นที่มีรัศมีความโค้งเท่ากับอนันต์) จะไม่มีการ

เปลี่ยนแปลงความดันสถิตในทิศทางตั้งฉากกับเส้นสายธารนี้” ข้อความนี้เป็นจริงดังที่เราได้จากการสร้างสมการออยเลอร์ในทิศทางตั้งฉากกับเส้นสายธาร ดังนั้น หากบริเวณที่ต้องการวัดความดันสถิตมีเส้นสายธารของการไหลเป็นเส้นตรง เราสามารถวัดความดันที่จุดนั้นๆ ด้วยการเจาะที่ผนังท่อหรือกำแพงในแนวตั้งฉากกับเส้นสายธารดังภาพที่ 8 แล้วต่ออุปกรณ์ช่วยวัดความดันใดๆ ก็ได้ที่เหมาะสมเข้ากับรูนี้ แทนที่จะใช้อุปกรณ์วัดความดันวัดโดยตรงจากการไหล วิธีการเช่นนี้ทำให้ความดันสถิตที่วัดได้มีค่าเท่ากับความดันสถิตที่จุดที่เราต้องการ เนื่องจากเส้นสายธารเป็นเส้นตรง และเราจะรูในทิศทางตั้งฉากกับเส้นสายธาร เราเรียกรูเล็กๆที่เราเจาะที่ท่อในแนวตั้งฉากกับเส้นสายธารนี้ว่า “ท่อแยกความดัน (Pressure Tap)”



ภาพที่ 8 ท่อแยกความดัน

การวัดความดันสถิตด้วยท่อแยกความดันที่ได้กล่าวไปแล้วนั้น ใช้ได้กับจุดที่มีเส้นสายธารเป็นเส้นตรงเท่านั้น ดังนั้น หากจุดที่ต้องการวัดมีเส้นสายธารเป็นเส้นโค้งจะไม่สามารถใช้ท่อแยกความดันเช่นในภาพที่ 8 ได้ ดังนั้น เราจึงต้องปรับปรุงท่อแยกความดันนี้ให้สามารถปรับเปลี่ยนทิศทางตามเส้นสายธารที่เป็นเส้นโค้ง โดยการใช้หัวตรวจที่มีลักษณะดังภาพที่ 9 ซึ่งเราต้องวางหัวตรวจนี้ในแนวขนานกับเส้นสายธารที่จุดที่เราต้องการวัดความดัน ซึ่งจะทำให้รูเล็กๆที่เจาะตั้งฉากกับพื้นผิวด้านข้างของหัวตรวจนี้ตั้งได้ฉากกับเส้นสายธาร (เนื่องจากหัวตรวจขนานกับเส้นสายธาร) ส่วนการจะตรวจวัดความดันสถิต สามารถทำได้โดยการต่ออุปกรณ์วัดความดันเข้ากับหัวตรวจความดันซึ่งจะเห็นได้ว่า ยังคงใช้หลักการเช่นเดียวกับท่อแยกความดัน หัวตรวจเช่นนี้เรียกว่า “หัวตรวจความดัน (Pressure Probe)” การใช้หัวตรวจความดันมีสิ่งที่พึงระวัง คือ ที่จุดที่ต้องการวัดความดันให้ใช้หัวตรวจความดันสอดเข้าทางด้านท้ายของสนามการไหล เนื่องจากหากสอดเข้าทางด้านต้นของสนามการไหล หัวตรวจความดันจะรบกวนสนามการไหลที่จุดที่ต้องการวัดและมีผลทำให้ความดันสถิตที่วัดได้มีค่าไม่ถูกต้อง



ภาพที่ 9 หัวตรวจความดัน

2. การวัดความเร็ว

ความเร็วของการไหลที่จุดหนึ่งๆ ไม่จำเป็นต้องวัดโดยตรงต่อเนื่องจาก ความเร็ว ความดัน และระดับของการไหลมีความสัมพันธ์กัน โดยสมการเบอร์นูลลี ดังนั้น หากเราทราบข้อมูลที่เพียงพอของความเร็ว ความดันและระดับของการไหล เราก็สามารถคำนวณหาความเร็วของการไหลจากสมการเบอร์นูลลีได้ ซึ่งที่จุดใดๆในสนามการไหล หากพิจารณาความเร็ว ความดัน และระดับการไหลที่สัมพันธ์กัน 2 คู่ จะเขียนสมการเบอร์นูลลีสำหรับการไหลแบบคงตัวได้ดังนี้

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{const} \quad (5)$$

หรือ

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} + gz_0 \quad (6)$$

การใช้สมการเบอร์นูลลีข้างต้นต้องคำนึงถึงสมมติฐานทั้ง 4 ข้อ และถ้าหากเราพิจารณาที่จุด 2 จุดที่มีระดับเดียวกันจะทำให้ $z = z_0$ ดังนั้น สมการเบอร์นูลลีข้างต้นลดรูปเหลือ

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} \quad (7)$$

ในสมการที่ (7) ค่าความเร็ว V เป็นสิ่งที่เราต้องการทราบ ดังนั้น เราควรต้องมีข้อมูลของความดันสถิต p ที่สัมพันธ์กับความเร็ว V และข้อมูลของความดัน p_0 และความเร็ว V_0 ที่สัมพันธ์กัน อีกคู่หนึ่งที่จุดเดียวกัน เราจะพิจารณาวิธีการหาข้อมูลทั้ง 3 ดังต่อไปนี้

1. ความดันสถิต p

การวัดความดันสถิต p สามารถทำได้โดยใช้วิธีการวัดความดันสถิตที่กล่าวไปแล้ว กล่าวคือ หากเส้นสายธารที่บริเวณนั้นเป็นเส้นตรงให้วัดโดยใช้ท่อแยกความดัน แต่หากเส้นสายธารเป็นเส้นโค้งให้ใช้หัวตรวจความดัน

2. ความดัน p_0 และความเร็ว V_0

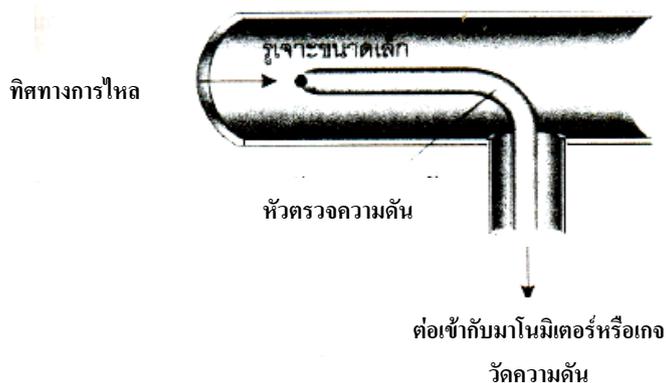
ที่จุดๆหนึ่งหากเราหน่วงอนุภาคของไหลที่กำลังเคลื่อนที่ให้มีความเร็วลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ตามกระบวนการการไหลแบบไม่มีแรงเสียดทาน (สมมติฐานของสมการเบอร์นูลลี) เราเรียกความดันที่จุดซึ่งอนุภาคของไหลมีความเร็วเท่ากับศูนย์เรียกว่า “ความดันนิ่ง หรือ p_0 (Stagnation Pressure)” ซึ่งที่จุดนี้จะมีความเร็วของการไหลหรือ V_0 เท่ากับศูนย์ การวัดความดันนิ่งทำได้โดยการใช้หัวตรวจความดันนิ่ง (Stagnation Pressure Probe) ที่มีรูเจาะเล็กๆที่ปลายของหัวตรวจซึ่งรูเจาะนี้จะอยู่ในแนวเดียวกับการไหลหรือขนานกับเส้นสายธารดังภาพที่ 10 และอนุภาคของไหลที่หน้าตัดของรูเจาะนี้มีความเร็วเท่ากับศูนย์ ดังนั้น ความดันที่วัดได้จึงเป็นความดันนิ่งนั่นเอง

จากสมการ (7) เมื่อเราใช้ค่าความดัน p_0 ทำให้ค่าความเร็ว V_0 มีค่าเท่ากับศูนย์ (Stagnation Point) จะได้

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} = \frac{p_0}{\rho} + \frac{V_0^2}{2} \quad (8)$$

หรือ

$$p_0 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (9)$$

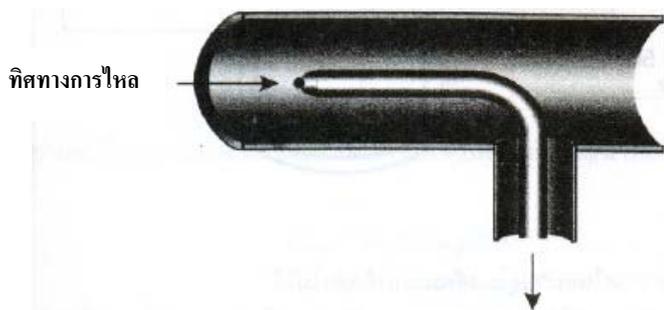


ภาพที่ 10 หัวตรวจความดันนิ่ง

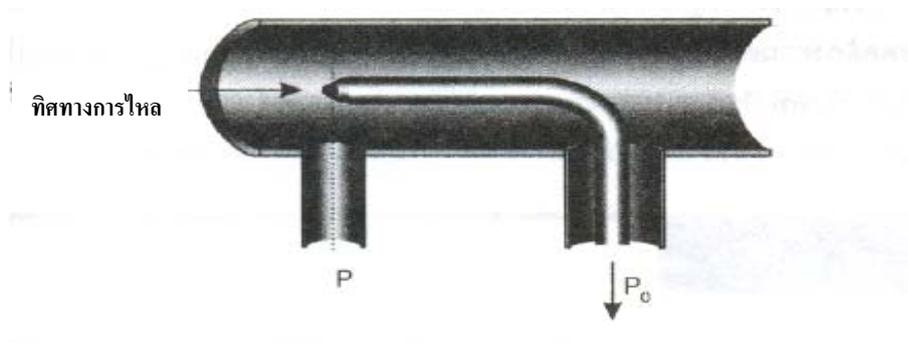
จากสมการ (9) เป็นนิยามในทางคณิตศาสตร์ของความดันนิ่งซึ่งจะเห็นได้ว่า ความดันนิ่งที่จุดหนึ่งๆมีค่ามากกว่าความดันสถิต p ด้วยปริมาณ $\frac{1}{2}\rho V^2$ ซึ่งเรียกว่า “ความดันพลศาสตร์ (Dynamic Pressure)” จากสมการ (9) เมื่อทราบความดันสถิตและความดันนิ่งจะหาความเร็วของการไหลสำหรับของไหลที่มีความหนาแน่นเท่ากับ ρ ได้ดังนี้

$$V = \sqrt{\frac{2(p_0 - p)}{\rho}} \quad (10)$$

ความเร็วของการไหลที่ได้จากการใช้สมการเบอร์นูลลี ประกอบกับข้อมูลของความดันสถิตและความดันนิ่งที่จุดที่ต้องการวัดความเร็วนี้ จะสามารถนำไปใช้ได้เมื่อทราบความดันสถิตและความดันนิ่ง ซึ่งในทางปฏิบัติเราสามารถใช้อุปกรณ์การวัดได้ 2 ประเภทตามลักษณะของเส้นสายธาร กล่าวคือ หากเส้นสายธารเป็นเส้นตรงเราใช้ท่อแยกความดันเพื่อวัดความดันสถิตแล้วใช้หัวตรวจความดันนิ่งเพื่อวัดความดันนิ่งดังภาพที่ 11 หากเส้นสายธารเป็นเส้นโค้งเราจะใช้หัวตรวจความดันที่มีรูเจาะทั้งด้านข้างและด้านปลายของหัวตรวจดังแสดงในภาพที่ 12 ทั้งนี้ระยะห่างระหว่างรูเจาะทั้งสองสามารถประมาณให้เป็นความดันที่จุดเดียวกันได้



ภาพที่ 11 การวัดความดันสถิตและความดันนิ่งเมื่อเส้นสายธารเป็นเส้นตรง



ภาพที่ 12 การวัดความดันสถิตและความดันนิ่งเมื่อเส้นสายธารเป็นเส้นโค้ง

การไหลในท่อปิด

ในงานที่มีการใช้ปั๊มขนส่งของเหลวจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ท่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันมากที่สุดจนอาจจะกล่าวได้ว่า ท่อเป็นส่วนหนึ่งของปั๊ม การไหลของของเหลวในท่อเมื่อใช้ร่วมกับปั๊มนี้ส่วนมากจะเป็นการไหลเต็มท่อซึ่งมีกฎเกณฑ์ในการคำนวณแตกต่างไปจากการไหลในทางน้ำเปิด ลักษณะการไหลในท่ออาจจะจำแนกออกได้โดยพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงความเร็วของการไหลเมื่อเปรียบเทียบกับเวลา สถานที่ และแรงเฉื่อย (Forces of Inertia) ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของของเหลวเมื่อเทียบกับแรงหนืด (Forces of Viscosity)

เมื่อความเร็วของการไหลที่จุดใดจุดหนึ่งไม่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลา การไหลนั้นเรียกว่า Steady Flow ถ้าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเรียกว่า Unsteady Flow

ถ้าความเร็วของการไหลในขณะใดขณะหนึ่งไม่เปลี่ยนทั้งขนาดและทิศทางตลอดระยะทางตามเส้นสายน้ำ (Streamline) การไหลนั้นเรียกว่าเป็น Uniform Flow ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงก็เป็น Nonuniform Flow

สำหรับการเปรียบเทียบแรงเทียบกับแรงหนืดนั้นก็เพื่อจะดูว่ามวลของของเหลวที่ไหลอยู่ในท่อนั้นมีการไหลวนและกระแทกกระทั้นกันมากน้อยอย่างไร ถ้าหากแรงหนืดมีค่าสูงเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อย การไหลของของเหลวก็จะมีลักษณะคล้ายเป็นแผ่นขนานกันไป การไหลในลักษณะดังกล่าวก็เรียกว่าเป็น Lamina Flow แต่ถ้าหากแรงหนืดมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับแรงเฉื่อย การไหลก็จะปั่นป่วน มวลของของเหลวจะมีการไหลวน การไหลในลักษณะนี้เรียกว่า Turbulent Flow

การที่จะบอกว่าการไหลในท่อใดๆ เป็น Lamina หรือ Turbulent ก็ให้พิจารณาจาก Reynolds Number, R_e คือ

$$R_e = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (11)$$

โดย ρ = ความหนาแน่นของของเหลว
 V = ความเร็วของการไหล
 D = เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ
 μ = Dynamic Viscosity
 ν = Kinematics Viscosity

ในทางปฏิบัติเราถือว่า ถ้า R_e มีค่าไม่เกิน 2,000 เป็นการไหลแบบ Lamina ถ้ามากกว่านี้เป็น Turbulent

การบอกลักษณะการไหลของของเหลวในท่อที่สมบูรณ์จะต้องบอกครบทั้งสามมิติ เช่นการไหลเป็นแบบ Steady, Uniform และ Lamina หรือ Unsteady, Uniform และ Turbulent เป็นต้น การหาการสูญเสียพลังงานในการไหลโดยทั่วไปแล้วเราถือว่าการไหลเป็นแบบ Steady และ Uniform แต่จะเป็น Lamina หรือ Turbulent จะต้องดูจาก R_e

1. การเสียดความฝืด

เป็นที่ยอมรับกันแล้วว่าการเสียดหรือพลังงานเนื่องจากความฝืด (Friction Head Loss) ในเส้นท่อตรง ไม่ว่าการไหลนั้นจะเป็นแบบ Lamina หรือ Turbulent คำนวณได้จากสูตรของ Darcy-Weisbach คือ

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (12)$$

โดย	h_f	=	การเสียดเนื่องจากความฝืด บอกรเป็นความสูงของของเหลว
	f	=	สัมประสิทธิ์ของความฝืด
	L	=	ความยาวของท่อ
	D	=	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ
	V	=	ความเร็วของการไหลในท่อ
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด f ขึ้นอยู่กับทั้งคุณสมบัติของท่อและลักษณะการไหลว่าเป็นแบบ Lamina หรือ Turbulent ในกรณีที่มีการไหลเป็นแบบ Lamina ค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวอาจจะหาได้จากสูตร

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (\text{Lamina Flow, } R_e \leq 2,000) \quad (13)$$

ขอให้สังเกตว่าในกรณีที่มีการไหลเป็นแบบ Lamina การเสียดจะขึ้นอยู่กับ Reynolds Number อย่างเดียว ไม่ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของผนังท่อ

เมื่อ Reynolds Number มีค่ามากกว่าประมาณ 3,000 การไหลจะเป็นแบบ Turbulent เสมอ ไม่ว่าผนังท่อจะเรียบสม่ำเสมอเท่าใดก็ตาม ในกรณีนี้สัมประสิทธิ์ของความฝืดจะขึ้นอยู่กับทั้ง R_e อัตราส่วนระหว่างความขรุขระของผนังท่อต่อความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน (ϵ/D)

จากการทดลองให้น้ำผ่านท่อพบว่า ถึงแม้ว่าการไหลจะเป็นแบบ Turbulent ก็ตาม แต่จะมีชั้นบางๆติดกับผนังท่อที่การไหลเป็นแบบ Lamina ความหนาของชั้นนี้จะลดลงเมื่อ Reynolds Number เพิ่มขึ้น ถ้าหากว่าความสูงของความขรุขระที่ยื่นออกมาจากผนังท่อน้อยกว่าชั้นความหนาที่การไหลเป็นแบบ Lamina อัตราส่วน ϵ/D ก็จะไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด f และถือว่าการไหลเป็นแบบเรียบทางชลศาสตร์ (Hydraulically Smooth Pipe)

ในทางตรงกันข้าม ถ้าความสูงของความขรุขระที่ผนังท่อดูสูงกว่าชั้นที่การไหลเป็นแบบ Lamina ส่วนที่สูงกว่าก็จะก่อนให้เกิดความปั่นป่วนในการไหลมากขึ้น และจะมีผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดเพิ่มขึ้น โดยตรง และถ้าผนังท่อขรุขระมากค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืดก็จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วน ϵ/D เพียงอย่างเดียว ไม่ขึ้นกับ R_c

ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด f ของทั้งสองกรณีนี้คำนวณได้จากสูตร

1. เมื่อผนังท่อเรียบ (Hydraulically Smooth)

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(\frac{R_c \sqrt{f}}{2.51} \right) \quad (14)$$

2. เมื่อผนังท่อขรุขระมากจนทำให้การไหลเป็น Turbulent อย่างแท้จริง

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \left(3.7 \frac{D}{\epsilon} \right) \quad (15)$$

3. ในกรณีที่การไหลเป็นแบบ Turbulent แต่ความขรุขระของผนังท่ออยู่ระหว่างสองกรณี ที่กล่าวข้างต้น ค่าสัมประสิทธิ์ของความฝืด f จะขึ้นอยู่กับทั้ง R_c และอัตราส่วน ϵ/D คือ

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon}{3.1D} + \frac{2.51}{R_c \sqrt{f}} \right) \quad (16)$$

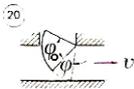
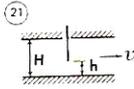
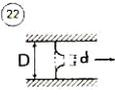
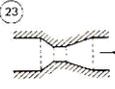
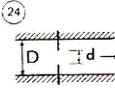
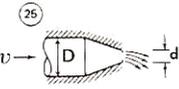
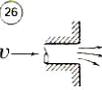
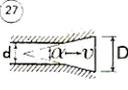
2. การสูญเสียเฮดเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ

การสูญเสียพลังงานเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ เช่น ข้องอ ประตูน้ำ ซึ่งถือว่าเป็นการสูญเสียส่วนน้อย (Minor Loss) อาจจะสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ

$$h_L = K \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (17)$$

โดย	h_L	=	การสูญเสียเฮดเนื่องจากอุปกรณ์ในระบบท่อ
	K	=	สัมประสิทธิ์ของการต้านทานการไหลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและขนาดของอุปกรณ์
	V	=	ความเร็วของการไหล
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก

ส่วนสัมประสิทธิ์ของความเสียดทานในการไหลในท่อปิดดูได้จากภาพที่ 13

	Segment gate in rectangular conduit:										
	$k = 0.8 \cdot 1.3 \left[\left(\frac{1}{n} \right) - n \right]^2$										
	where $n = \varphi/\varphi_0 =$ the rate of opening with respect to the central angle.										
	Sluice gate in rectangular conduit:										
	$k = 0.3 \cdot 1.9 \left[\left(\frac{1}{n} \right) - n \right]^2$										
	where $n = h/H$.										
	Measuring nozzle:										
	$E_L = 0.3 \Delta p \quad \text{for} \quad d = 0.8D$										
	$E_L = 0.95 \Delta p \quad \text{for} \quad d = 0.2D$										
	where Δp is the measured pressure drop.										
	Venturi meter:										
	$E_L = 0.1 \Delta p \quad \text{to} \quad 0.2 \Delta p$										
	where Δp is the measured pressure drop.										
	Measuring orifice, square edged:										
	$E_L = \Delta p \left(1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right)$										
	where Δp is the measured pressure drop.										
	Confusor outlet:										
	<table border="1" style="display: inline-table;"> <tbody> <tr> <td>$d/D =$</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> <td>0.8</td> <td>0.9</td> </tr> <tr> <td>$k =$</td> <td>5.5</td> <td>4</td> <td>2.55</td> <td>1.1</td> </tr> </tbody> </table>	$d/D =$	0.5	0.6	0.8	0.9	$k =$	5.5	4	2.55	1.1
$d/D =$	0.5	0.6	0.8	0.9							
$k =$	5.5	4	2.55	1.1							
	Exit from pipe into reservoir:										
	$k = 1.0$										
	Diffuser outlet for $D/d > 2$:										
	<table border="1" style="display: inline-table;"> <tbody> <tr> <td>$\alpha^\circ =$</td> <td>8</td> <td>15</td> <td>30</td> <td>45</td> </tr> <tr> <td>$k =$</td> <td>0.05</td> <td>0.18</td> <td>0.5</td> <td>0.6</td> </tr> </tbody> </table>	$\alpha^\circ =$	8	15	30	45	$k =$	0.05	0.18	0.5	0.6
$\alpha^\circ =$	8	15	30	45							
$k =$	0.05	0.18	0.5	0.6							

ภาพที่ 13 สัมประสิทธิ์ของความต้านทานการไหล

3. Diffuser (Miller, 1990)

Diffuser เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลง พลังงานจลน์ของของไหลเป็นพลังงาน ศักย์ โดยความเร็วของของไหลจะลดลงและความดันจะเพิ่มขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพของ Diffuser สามารถหาได้จากสมการ

$$\eta = \frac{Cp}{Cpi} \quad (18)$$

โดย
$$Cp = \frac{P_2}{\rho \frac{U_1^2}{2}} \quad (19)$$

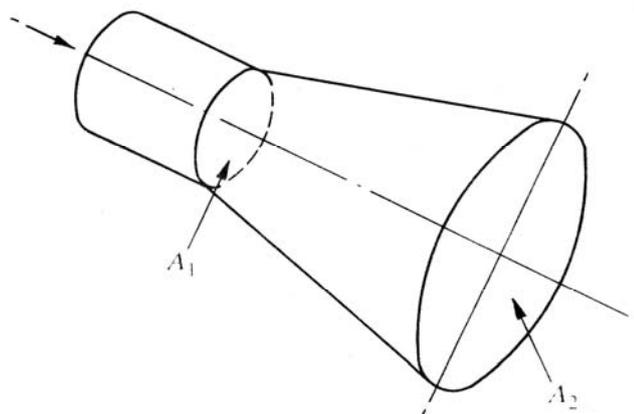
$$Cpi = 1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \quad (20)$$

โดย	η	=	ประสิทธิภาพของ Diffuser
	Cp	=	สัมประสิทธิ์การคืนกลับของแรงสถิต
	Cpi	=	สัมประสิทธิ์การคืนกลับของแรงสถิต ideal
	P_2	=	ความดันที่ Diffuser (Pa)
	ρ	=	ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
	A_1	=	พื้นที่หน้าตัด ณ จุด A_1 (m^2) ตามภาพที่ 14
	A_2	=	พื้นที่หน้าตัด ณ จุด A_2 (m^2) ตามภาพที่ 14
	U_1	=	ความเร็วของไหล ณ จุด A_1 (m/s)

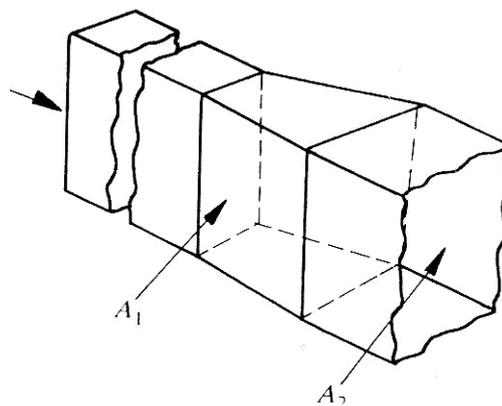
โดยที่สัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพการคืนกลับของ Diffuser คือ

$$Kd = 1 - Cp \quad \text{สำหรับ Diffuser ปลายปิด ตามภาพที่ 14}$$

$$Kd = Cpi - Cp \quad \text{สำหรับ Diffuser มีช่องทางออก ตามภาพที่ 15}$$



ภาพที่ 14 Diffuser แบบกรวยกลมที่มีทางออกอิสระ



ภาพที่ 15 Diffuser แบบเหลี่ยมที่มีทางออกเป็นช่วงตรง

โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของ Diffuser มีดังต่อไปนี้

1. การไหลทางด้านเข้าของ Diffuser

ประสิทธิภาพของ Diffuser ส่วนหนึ่งจะขึ้นอยู่กับ การกระจายตัวของพลังงานทางด้านเข้าของ Diffuser โดยถ้าด้านเข้าของ Diffuser เป็นการไหลแบบรูปร่างไม่แน่นอน จะทำให้ประสิทธิภาพของ Diffuser ลดลง ใน Rapid Diffusion การกระจายตัวของพลังงานจะไม่สมบูรณ์ ส่งผลทำให้ Diffuser มีประสิทธิภาพต่ำ ตามภาพที่ 16 b ดังนั้นในการออกแบบอาจเพิ่มส่วนต่อตรง

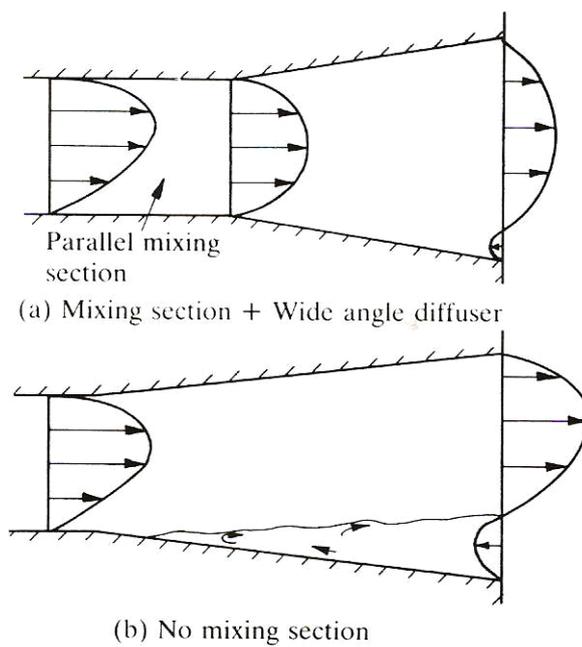
ก่อนเข้า Diffuser เรียกว่าส่วนผสมก่อนเข้า Diffuser ตามภาพที่ 16 a เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกระจายตัวของพลังงานจะทำให้ Diffuser มีประสิทธิภาพสูงขึ้น โดย Diffuser ที่เพิ่มช่วงตรงก่อนเข้าเรียกว่า Delay Diffuser

2. การไหลทางด้านออกของ Diffuser

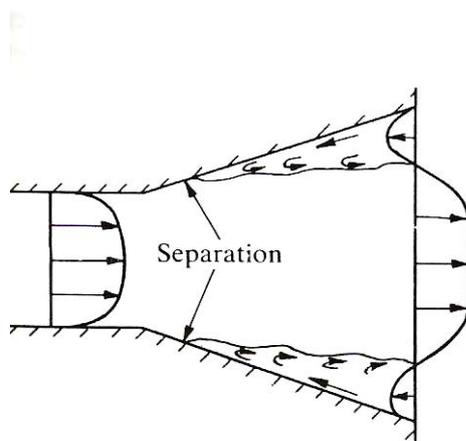
การเปลี่ยนรูปร่างของ Diffuser ที่รวดเร็วส่งผลให้เกิดการหมุนวนอย่างรุนแรง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของ Diffuser ต่ำ การไหลที่ทางออกปั่นป่วนมากอาจมีการไหลวนกลับดังภาพที่ 17 การใส่ช่วงตรงหลังจากออกจาก Diffuser ตามภาพที่ 18 จะทำให้เกิดบริเวณการไหลผสม โดยบริเวณที่เกิดการไหลแบบผสมจะเป็นบริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงพลังงานจลน์เป็นพลังงานสถิต ทำให้ประสิทธิภาพของ Diffuser สูงขึ้น ภาพ 19 เรียกว่า Cropped Diffuser ซึ่งจะมีช่วงต่อขยายตรงทางออกของ Diffuser เพื่อช่วยลดการเกิดการหมุนวนใน Diffuser

3. รูปร่างของ Diffuser

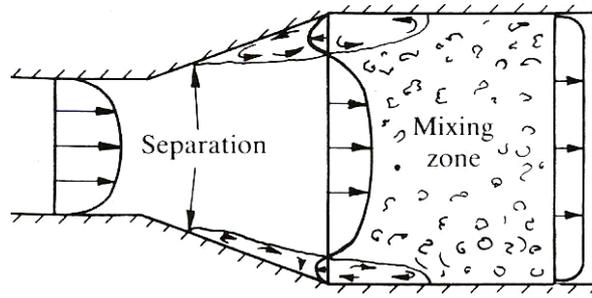
ตัวแปรของรูปร่าง Diffuser ตามภาพที่ 20 ได้แก่ อัตราส่วนพื้นที่ (A_2/A_1) และ Non-dimensional length (N/h) สำหรับ Diffuser กรวยกลม $h = R_1$ โดย R_1 เป็นรัศมีของช่องทางเข้าของ Diffuser สำหรับ Diffuser สี่เหลี่ยม $h = W_1$ โดย W_1 เป็นความสูงของท่อทางเข้าของ Diffuser ส่วนมุมของ Diffuser มีงานวิจัยได้แนะนำว่ามุมของ Diffuser ควรจะมีมุมครึ่งไม่เกิน 15 องศา (Massey, 2006; Shashi Menon, 2004; Frank, 2001; Frank Kreith, Berger and *et. al.* 1999.)



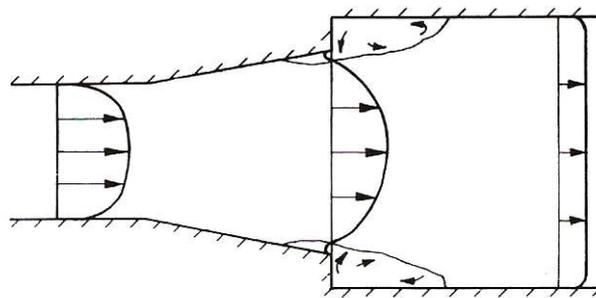
ภาพที่ 16 การเปรียบเทียบการไหลใน Diffuser ที่มีท่อตรงบริเวณทางเข้าและไม่มีท่อตรงบริเวณทางเข้า



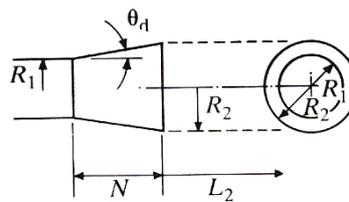
ภาพที่ 17 การไหลใน Diffuser ที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างรวดเร็ว



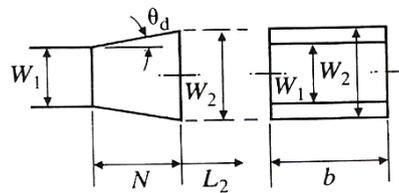
ภาพที่ 18 การปรับปรุงประสิทธิภาพของDiffuser โดยการใส่ช่วงตรงบริเวณทางออก



ภาพที่ 19 Cropped Diffuser



(a) Conical, non-dimensional length = N/R_1



(b) Rectangular, non-dimensional length = N/W_1
aspect ratio = b/W_1

ภาพที่ 20 ตัวแปรรูปร่างของ Diffuser

การพัฒนาระบบป้องกันการสูญเสียน้ำเชื่อมบริสุทธิ์

ในการปฏิบัติงานที่ผ่านมาเมื่อเกิดการรั่วไหลขึ้นที่ปั๊มน้ำเชื่อมทางพนักงานจะนำภาชนะไปรองรับน้ำเชื่อมเพื่อป้องกันการสูญเสียดังแสดงในภาพที่ 21 เมื่อเต็มภาชนะแล้วจะนำไปเทคืนในกระบวนการผลิตซึ่งการเทคืนต้องนำไปเทที่ต้นกระบวนการซึ่งต้องสูญเสียแรงงานคนปฏิบัติหน้าที่ในส่วนนี้ นอกจากนี้เนื่องจากน้ำเชื่อมที่รั่วไหลอยู่ในภาชนะเปิดอาจมีสิ่งสกปรกปนเปื้อนและบางครั้งถ้าขาดการดูแลอย่างต่อเนื่องและใกล้ชิดจะเกิดการหกส้นและเป็นปัญหาการสูญเสียผลผลิตของโรงงาน ซึ่งการรั่วไหลของน้ำเชื่อมจะเป็นส่วนหนึ่งที่อยู่ในการสูญเสียแบบ Undetermined Losses โรงงานน้ำตาลสิงห์บุรีจะเกิดขึ้นประมาณ 10-15% โดยที่การสูญเสียน้ำตาลจะอยู่ที่ประมาณ 20-25% จะเห็นได้ว่าการสูญเสียแบบ Undetermined Losses นั้นเกิดขึ้นประมาณครึ่งหนึ่งของการสูญเสียทั้งหมด ซึ่งโดยความเป็นจริงแล้วนอกจากการหกส้นรั่วไหลแล้ว Undetermined Losses ยังประกอบไปด้วย การแตกตัวของน้ำตาลซูโครสเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวกลูโคสและฟรุกโตส อันเนื่องมาจากสภาวะที่ไม่เหมาะสมดังนั้นผู้บริหารของทางโรงงานจึงให้ความสนใจกับปัญหา Undetermined Losses อย่างยิ่ง ทางแผนกซ่อมบำรุงเครื่องกลโรงงานน้ำตาลสิงห์บุรีจึงได้เริ่มพัฒนาระบบการป้องกันการรั่วไหลขึ้นมา ภาพที่ 22 เป็นอุปกรณ์ช่วยขนถ่ายน้ำเชื่อมที่รั่วไหลออกมาคืนเข้าสู่ระบบ โดยอาศัยหลักการของแรงอัดอากาศเมื่อน้ำเชื่อมในภาชนะรองรับเต็ม พนักงานจะนำน้ำเชื่อมเทลงไปในถังใส่น้ำเชื่อม ปิดวาล์วและเปิดลมอัดเพิ่มแรงดันในตัวถังส่งน้ำเชื่อมไหลกลับไปตามท่อคืนถังใส่น้ำเชื่อม โดยการใช้งานจริงพบว่าเกิดปัญหาความไม่สะอาดของน้ำเชื่อม และมีโอกาสปนเปื้อนของน้ำมันที่มากับลมอัดในน้ำเชื่อม อย่างไรก็ตามต่อมาได้นำไปใช้กับระบบน้ำตาลดิบเพราะเป็นอุปกรณ์ที่อำนวยความสะดวกให้พนักงานเป็นอย่างยิ่งและช่วยลดเวลาในการทำงานและลดโอกาสในการเกิดอุบัติเหตุในการปีนถังเพื่อเทน้ำเชื่อมกลับคืน

หลังจากนั้นทางแผนกซ่อมบำรุงได้พัฒนาเครื่องต้นแบบรุ่นแรกขึ้นภาพที่ 23 โดยอาศัยหลักการส่งน้ำเชื่อมกลับเข้าทางคูดของปั๊มซึ่งมีแรงดันเป็นลบ แต่เมื่อนำไปใช้งานจริงพบว่าในกระบวนการผลิตปั๊มส่วนใหญ่จะคูดจากถังทรงสูง ซึ่งมีแรงดันด้านคูดเป็นบวกทำให้เครื่องนี้ไม่สามารถใช้งานได้ ในกรณีนี้ อีกทั้งยังพบปัญหาเรื่องความสะอาดของน้ำเชื่อมที่คูดกลับอีกด้วย



ภาพที่ 21 การนำภาชนะมารองเพื่อป้องกันการรั่วไหล

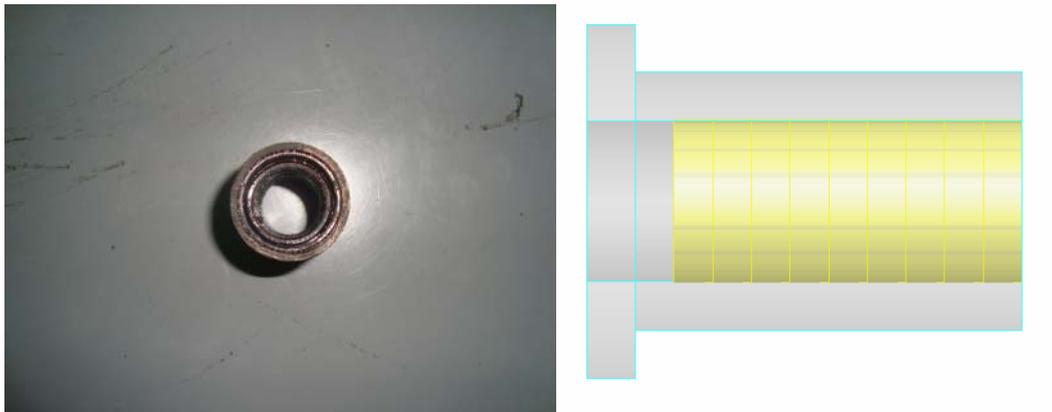


ภาพที่ 22 อุปกรณ์ขนถ่ายน้ำเชื่อมที่รั่วไหล



ภาพที่ 23 เครื่องป้องกันการรั่วไหลรุ่นแรกที่ทำกรทดลองใช้

ระบบซีลคอปเพลลาของปั้มน้ำทางผู้ผลิตใช้เป็นระบบประเก็นแบบแพคกิ้งตามภาพที่ 4 แต่เนื่องจากการใช้ประเก็นแบบแพคกิ้งมีอัตราการรั่วไหลสูงต้องทำการดูแลอย่างใกล้ชิดราคาของแพคกิ้งสูงและมีการหยุดเพื่อขันแน่นและเปลี่ยนประเก็นเป็นประจำต่อมาทางแผนกซ่อมบำรุงเครื่องกลได้ปรับปรุงระบบซีลคอปเพลลาเป็นแบบ Oil Seal โดยมีการตัดแปลงชุด Stuffing Box ใหม่โดยใส่แหวนทองเหลืองและ Oil Seal ดังภาพที่ 24 ซึ่งผลการใช้งานสามารถป้องกันการรั่วไหลได้ดีกว่าระบบประเก็นแบบแพคกิ้งสามารถขยายระยะเวลาการดูแลออกไปได้แต่เมื่อเกิดการชำรุดของ Oil Seal แล้วต้องทำการรื้อปั้มทั้งชุดเพลลา เสื่อลูกปืน และใบพัด ทำให้มีขั้นตอน และเวลาในการซ่อมแซมมากกว่าการใช้ประเก็นแบบแพคกิ้งทำให้ใช้ต้นทุนด้านแรงงานสูงกว่าแต่เมื่อเทียบต้นทุนระหว่าง Oil Seal กับประเก็นแบบแพคกิ้งพบว่า ซีลคอปเพลลาแบบ Oil Seal มีต้นทุนโดยรวมถูกกว่าและมีประสิทธิภาพมากกว่า



ภาพที่ 24 ระบบซีลคอปเพลเป็นแบบ Oil Seal

ดั่งนั้นทางผู้วิจัยจึงได้พัฒนาเครื่องป้องกันการรั่วไหลโดยใช้หลักการสมการเบอร์นูลลีมา ออกแบบ Venturi Tube เพื่อสร้าง Vacuum Seal ที่คอปเพลโดยใช้แรงดันน้ำเชื่อมด้านทางส่งของปั๊ม เป็นของเหลวขับเคลื่อนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

อุปกรณ์และวิธีการ

ได้แบ่งการดำเนินงานออกเป็นขั้นตอนต่างๆ ตามลำดับดังนี้

การคำนวณและออกแบบอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล

1. วัสดุอุปกรณ์

- 1.1 ท่อ Venturi Ratio 5:1
- 1.2 ชุดประกอบท่อ PVC
- 1.3 Pressure Gauge
- 1.4 Vacuum Gauge
- 1.5 Flow Meter ยี่ห้อ EESIFLO รุ่น 6000 Series
- 1.6 ปืนน้ำ
- 1.7 ถ้วยตวง
- 1.8 นาฬิกาจับเวลา
- 1.9 อ่างรับน้ำ

2. วิธีการทดลอง

การหาสถานะการใช้งานของระบบมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

2.1 ของเหลวที่ใช้ในการออกแบบ

กำหนดเป็นน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ (Fined Liquor) ซึ่งมีคุณสมบัติดังนี้

อุณหภูมิของเหลว	60 °C
ความเข้มข้นของน้ำเชื่อม	60 °BX
Dynamic Viscosity	146.625 m.Pa.s
Density	1319 kg/m ³

2.2 ระยะความสูงที่ระบบต้องการในกรณีน้ำเชื่อมรั่วไหลที่ระบบสามารถดูดกลับได้



ภาพที่ 25 การวัดระยะติดตั้งอุปกรณ์จนถึงกึ่งกลางเพลาน้ำ

จากการวัดระยะระหว่างจุดติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งเป็นทางส่งของปั๊มไปจนถึงกึ่งกลางเพลาน้ำมีระยะ 220 มิลลิเมตร (ภาพที่ 25) จึงนำมาคำนวณหาความดันที่ต้องการในการดูดน้ำเชื่อมกลับ

จากสมการ	P	=	ρgh	(21)
เมื่อ	P	=	ความดัน, Pa	
	ρ	=	Density, kg/m^3	
	g	=	ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง, m/s^2	
	h	=	ระยะความสูง, m	

จากการวัดจุดติดตั้งจริงพบว่าระยะความสูงจากทางส่งของปั๊มไปจนถึงกึ่งกลางเพลาน้ำมีระยะ 220 mm จึงกำหนดให้ $(h) = 220 \text{ mm}$ และอยู่ต่ำกว่าระดับติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งเป็นระดับอ้างอิงจึงทำให้มีค่าติดลบ Density (ρ) = $1,319 \text{ kg/m}^3$ และความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (g) = 9.8 m/s^2

$$P = (1319 \text{ kg / m}^3) \times (9.8 \text{ m / s}^2) \times (-0.22 \text{ m})$$

$$P = - 2843.76 \text{ Pa } (-0.029 \text{ kg/cm}^2)$$

2.3 แรงดันและอัตราการไหลทางด้านส่งของปั๊มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ ดังแสดงในภาพที่ 26



ภาพที่ 26 การวัดแรงดันทางด้านส่งของปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธี

จากการเก็บข้อมูลพบว่าความดันด้านส่งอยู่ในช่วงระหว่าง $2.1-2.52 \text{ kg/cm}^2$ โดยมีอัตราการไหลที่ได้จากการตวงและจับเวลาที่วาล์วที่เสื่อปั้มนอยู่ที่ $0.75 \text{ m}^3/\text{hr} - 1.23 \text{ m}^3/\text{hr}$ ดังนั้นค่าในการคำนวณแรงดันด้านเข้าอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลจึงใช้ค่าที่แรงดันต่ำสุด 2.1 kg/cm^2 และอัตราการไหลที่ $0.75 \text{ m}^3/\text{hr}$ โดยวาล์วน้ำมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 19 mm . ดังนั้นจาก สมการอัตราการไหล $Q = AV$ จะได้ $V = 0.734 \text{ m/s}$

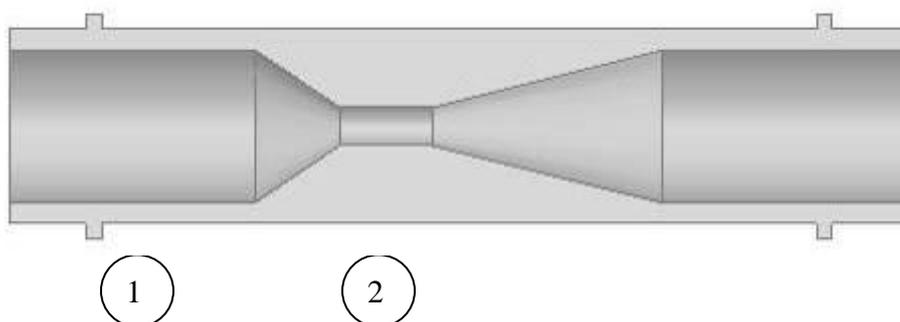
2.4 แรงดันทางด้านดูดของปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธี ดังแสดงในภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การวัดแรงดันทางด้านดูดของปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธี

จากการเก็บข้อมูลพบว่าความดันด้านคูคอยู่ในช่วงระหว่าง $0-0.2 \text{ kg/cm}^2$ เนื่องจากปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์สูบน้ำจากถังตั้งนั้นทางคูคของปั้มน้ำจึงเกิดเป็นแรงดันขึ้นอยู่กัปริมาณน้ำเชื่อมในถังตั้งนั้นค่าในการคำนวณแรงดันด้านออกอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลจึงใช้ค่าที่แรงดันสูงสุด 0.2 kg/cm^2 ที่เกิดที่ทางคูคของปั้มน้ำ

2.5 การออกแบบท่อ Venturi เพื่อสร้างอุปกรณ์คูคน้ำเชื่อมกลับ ดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 แบบท่อ Venturi

สมการพลังงานระหว่างจุด 1 และ 2 คือ

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (22)$$

เนื่องจาก $Z_1 = Z_2$ เพราะออกแบบให้ท่ออยู่ระดับเดียวกันดังนั้น

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \quad (23)$$

สมการการไหลต่อเนื่องคือ

$$V_1 \frac{\pi}{4} D_1^2 = V_2 \frac{\pi}{4} D_2^2$$

$$V_2 = V_1 \left[\frac{D_1}{D_2} \right]^2 \quad (24)$$

แทนค่า V_2 ในสมการ (23) จะได้

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 - 1 \right] \frac{V_1^2}{2g} \quad (25)$$

แทนค่าที่ได้จากการทดสอบ

$$\begin{aligned} \frac{205kPa - (-2.84376kPa)}{1319 \frac{kg}{m^3} \times 9.8 \frac{m}{s^2}} &= \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 - 1 \right] \frac{0.734^2 m/s}{2(9.8m/s^2)} \\ \left[\left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 - 1 \right] &= 584.97 \\ \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^4 &= 585.97 \end{aligned}$$

สมมติให้
ดังนั้น

$$D_2 = 1$$

$$D_1 = 4.92$$

จะเห็นว่าอัตราส่วนดังกล่าวเป็นจุดที่ระบบเกิด Vacuum เพียงพอต่อการดูดน้ำเชื่อมกลับ

ดังนั้นอัตราส่วนที่ใช้ในการออกแบบจะมีค่าน้อย $\frac{D_1}{D_2} = \frac{5}{1}$

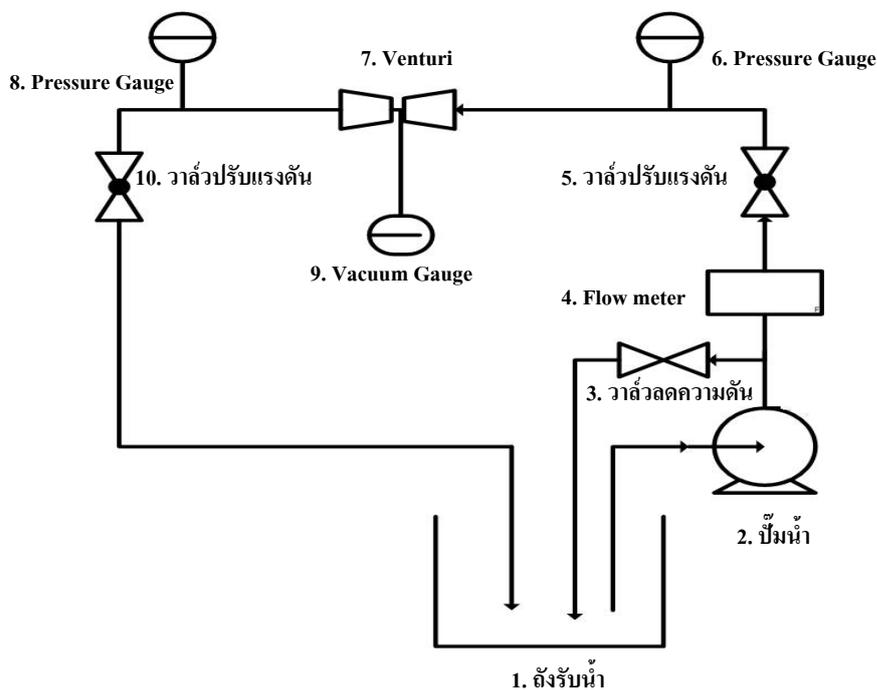
เมื่อพิจารณาจุดติดตั้งพบว่าท่อที่จะติดตั้งกับ Venturi มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 19 mm ซึ่งถ้าใช้อัตราส่วน 5:1 ในการออกแบบ ช่องแคบจะมีขนาด 3.8 mm ทางผู้ออกแบบได้วางแผนผลิตโดยใช้เครื่องเจาะแบบ Radial Drill ในการสร้างช่องแคบ และใช้วิธีการกลึงสร้างรูปทรงของท่อ Venturi เพราะเป็นวิธีการผลิตที่ทางโรงงานสามารถผลิตเองได้ ดังนั้นดอกสว่านที่มีขนาดใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องแคบ 3.8 mm คือดอกสว่านขนาด 4 mm เมื่อทำการออกแบบท่อ Venturi โดยใช้ขนาดช่องแคบ 4 mm จะได้ท่อ Venturi ตามภาพที่ 29

2.6 การสร้างแบบจำลองท่อ Venturi

จากการออกแบบท่อ Venturi นำมาสร้างแบบจำลองและทดสอบด้วยวิธีการ Numerical Method โดยการออกแบบให้อัตราการไหลด้านเข้าของท่อ Venturi มีขนาด เริ่มต้นที่ 16 L/min และปรับลดอัตราการไหลครั้งละ 1 L/min สภาวะด้านทางออกของท่อ Venturi ให้มีแรงดัน 0.1 kg/cm^2 โดยสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองมีดังนี้

1. ของไหลอัดตัวไม่ได้
2. ไม่มีการถ่ายเทความร้อน และอุณหภูมิของไหลคงที่ (ผนังท่อเป็น Ideal Wall)
3. การไหลเข้าท่อเป็นแบบ Uniform Flow
4. ระบบไม่มีความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง
5. ของไหลที่ใช้ในแบบจำลองคือน้ำ เนื่องจากวัตถุประสงค์ของการทดลอง คือการสร้างแบบจำลองและทดสอบพฤติกรรมของแบบจำลอง ซึ่งถ้านำสารละลายน้ำเชื่อมมาเป็นของไหลในแบบจำลองอาจมีความผิดพลาดของแบบจำลอง เนื่องจากความหนาแน่นและความหนืดของของไหล อีกทั้งในการควบคุมค่าความหนืดของน้ำเชื่อมนั้นต้องควบคุมทั้งค่าความเข้มข้น ($^{\circ}\text{BX}$) และอุณหภูมิของของไหล ซึ่งมีความยุ่งยากและสิ้นเปลืองงบประมาณ
6. ผนังของท่อกำหนดให้มีความขรุขระ $25 \mu\text{m}$ ตามมาตรฐานผิวงานกลึง DIN กับ ISO 1302

ทำการคำนวณหาค่าแรงดันที่เกิดขึ้นภายในท่อ Venturi นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าการทดสอบจริงของท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ตามแบบในภาพที่ 29 โดยใช้วิธีการและอุปกรณ์ตามภาพที่ 30



ภาพที่ 30 แผนภาพแสดงวิธีการทดสอบท่อ Venturi

2.6.1 ติดตั้งอุปกรณ์ตามภาพที่ 30 โดยกำหนดให้ระยะตรงก่อนเข้าท่อ Venturi มีค่าเป็น 10 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ Venturi ตามคำแนะนำในคู่มือการใช้ Flow Meter โดยการทดลองนี้ใช้ท่อ Venturi เส้นผ่านศูนย์กลาง ขนาด 20 mm ดังนั้นระยะตรงก่อนเข้าท่อ Venturi มีค่า 200 mm ส่วนระยะทางออกจากท่อที่กำหนดให้มีค่าเป็น 5 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ดังนั้นระยะตรงออกจากท่อมีค่า 100 mm โดยสาเหตุเพื่อป้องกันการไหลแบบปั่นป่วนก่อนเข้าท่อ Venturi ได้ชุดอุปกรณ์จำลองดังภาพที่ 31



ภาพที่ 31 อุปกรณ์จำลองที่ได้จากการติดตั้งตามภาพที่ 30

2.6.2 เริ่มเดินปั้มน้ำโดยเบี่ยงต้นเปิดวาล์วหมายเลข 3,5 และ 10 ในภาพที่ 30 ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดสุด ก่อนเพื่อป้องกันการชำรุดของระบบท่อเนื่องจากการเริ่มเดินปั้มน้ำจะทำให้เกิดการกระแทกในระบบหลังจากปั้มน้ำขึ้นแล้วจึงเริ่มปิดวาล์วหมายเลข 3 อย่างช้าๆจนสนิท

2.6.3 ทำการทดลอง โดยการปรับแรงดันให้ออกจากท่อ Venturi เป็น 0.1 kg/cm^2 ทางเข้า Venturi ปรับค่าอัตราการไหลเริ่มต้นที่ 16 L/min และปรับลดอัตราการไหลครั้งละ 1 L/min บันทึกค่าแรง Vacuum ที่เกิดขึ้นที่หมายเลข 9 ในภาพที่ 30

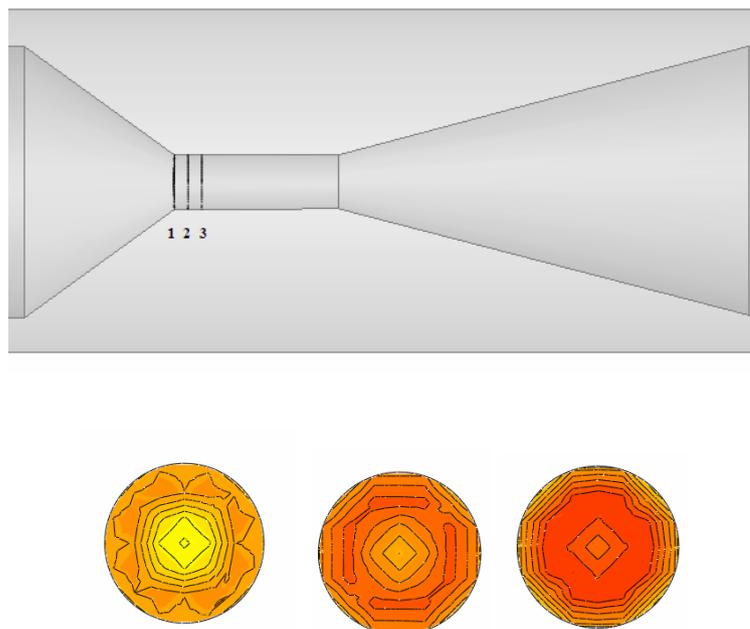
2.6.4 นำค่าที่ได้ทั้งจากวิธีทาง Numerical Method และวิธีการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบ

2.7 การออกแบบท่อ Venturi โดยใช้แบบจำลอง

จากแบบจำลองในหัวข้อที่ 2.6 นำมาพิจารณาตัวแปรที่มีผลต่อการทำงานของท่อ Venturi โดยตัวแปรที่ทำการพิจารณาได้แก่ ระยะความยาวของช่องแคบ และมุมของ Diffuser

2.7.1 สร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการไหลภายในช่องแคบของท่อ Venturi

นำแบบที่ทำการออกแบบตามภาพที่ 29 มาทำการทดสอบทาง Numerical Method โดยกำหนดให้อัตราการไหลด้านเข้าเป็น 2.1×10^{-4} ลบ.ม./วินาที โดยกำหนดตามอัตราการไหลที่เกิดจริงที่จุดใช้งาน และความดันทางด้านออกของ Diffuser มีขนาด 0.1 kg/cm^2 สมมติฐานในการสร้างแบบจำลองเหมือนในหัวข้อ 2.6 ผลลัพธ์ที่ได้นำมาพิจารณาภาพตัดขวางที่ระยะห่างระหว่างระนาบ 1 มิลลิเมตรบริเวณช่องแคบตามภาพที่ 32



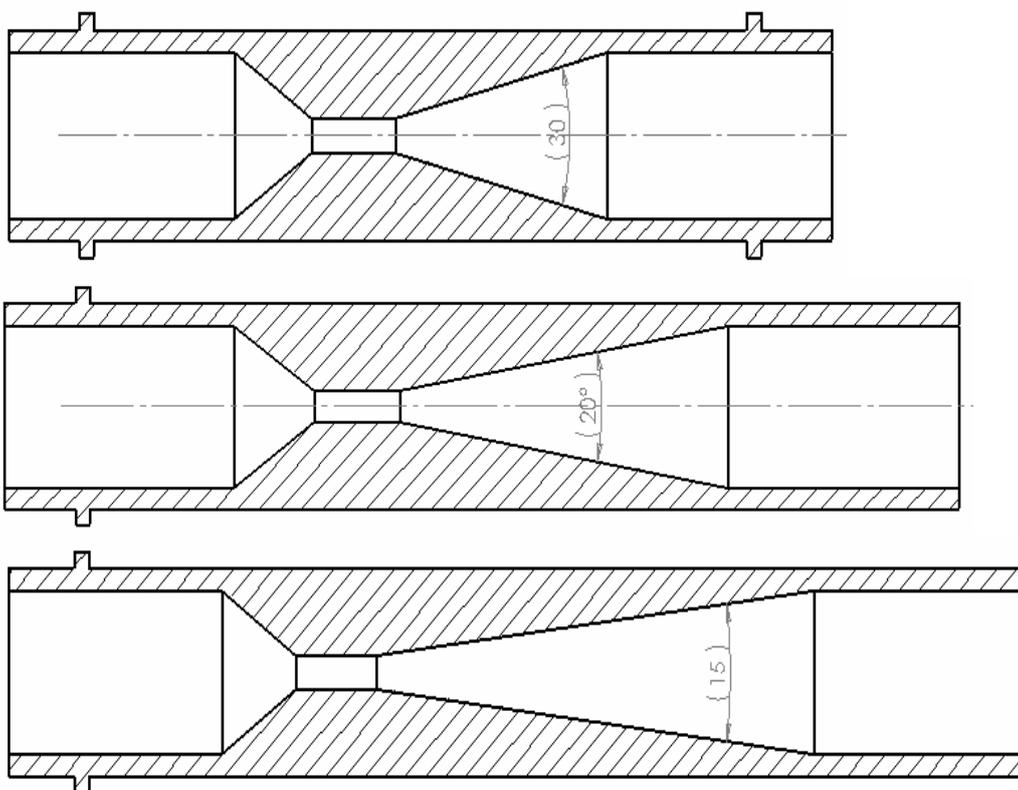
ภาพที่ 32 ภาพตัดขวางบริเวณช่องแคบของท่อ Venturi โดยระยะห่างระหว่างหน้าตัดขวาง 1 มิลลิเมตร

จากภาพที่ 32 (1) แสดงการกระจายตัวของความเร็วบริเวณทางเข้าของช่องแคบพบว่าการกระจายของความเร็วที่ผนังของช่องแคบยังไม่สม่ำเสมอ (2) เป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนรูปพลังงาน โดยเปลี่ยนจากพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์ การกระจายตัวของความเร็วที่ผนังเริ่มสม่ำเสมอขึ้น (3) เป็นภาพหน้าตัดซึ่งมีระยะห่างจากทางเข้าของช่องแคบ 2 มิลลิเมตร การกระจายตัวของความเร็วที่บริเวณผนังสม่ำเสมอ ส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการสร้างแรงดันได้สม่ำเสมอ และจากการตรวจเอกสารพบว่าการกระจายตัวของพลังงานที่สม่ำเสมอจะเพิ่มประสิทธิภาพของ Diffuser อีกด้วย

ดังนั้นการออกแบบช่องแคบของท่อ Venturi ควรออกแบบให้มีระยะตรงเพื่อที่ระบบจะสามารถเปลี่ยนพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์ได้อย่างสมบูรณ์

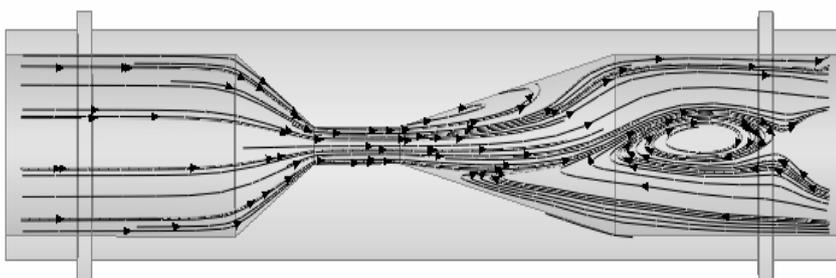
2.7.2 สร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการไหลใน Diffuser ที่มีมุม 30 องศา, 20 องศา และ 15 องศา

ทำการสร้างแบบจำลองเหมือนในหัวข้อ 2.7.1 โดยใช้ Venturi อัตราส่วน 5:1 แต่เปลี่ยนแปลงมุมของ Diffuser ให้มีขนาด 30 องศา, 20 องศา และ 15 องศา ตามภาพที่ 33 นำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์รูปแบบการไหล

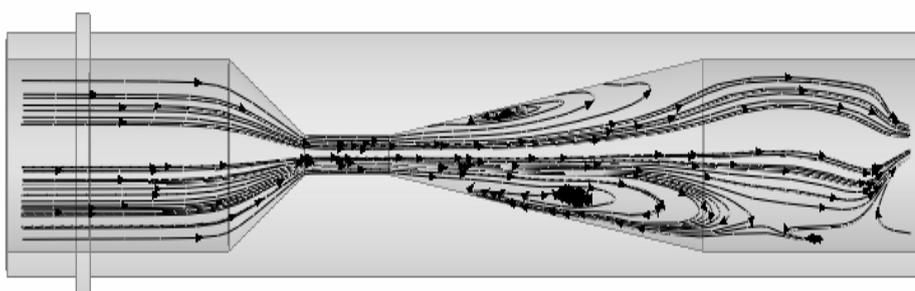


ภาพที่ 33 ท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ที่มีมุม Diffuser 30 องศา, 20 องศา และ 15 องศา

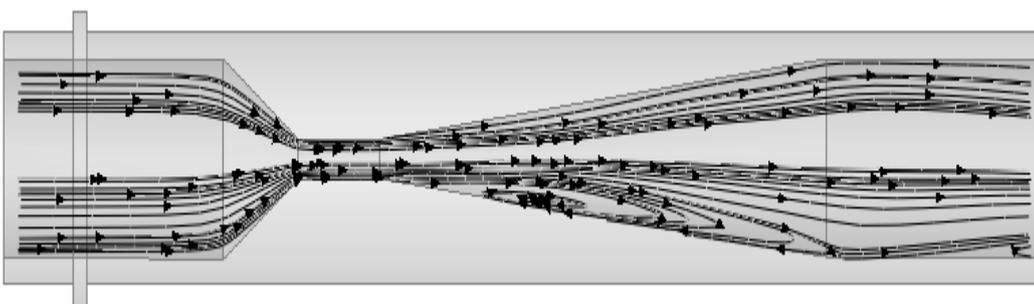
ผลที่ได้จากการสร้างแบบจำลองเพื่อศึกษาการไหลใน Diffuser ที่มีมุม 30 องศา, 20 องศา และ 15 องศา แสดงดังภาพที่ 34, 35 และ 36



ภาพที่ 34 การไหลในท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ขนาดมุม Diffuser 30 องศา



ภาพที่ 35 การไหลในท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ขนาดมุม Diffuser 20 องศา



ภาพที่ 36 การไหลในท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 ขนาดมุม Diffuser 15 องศา

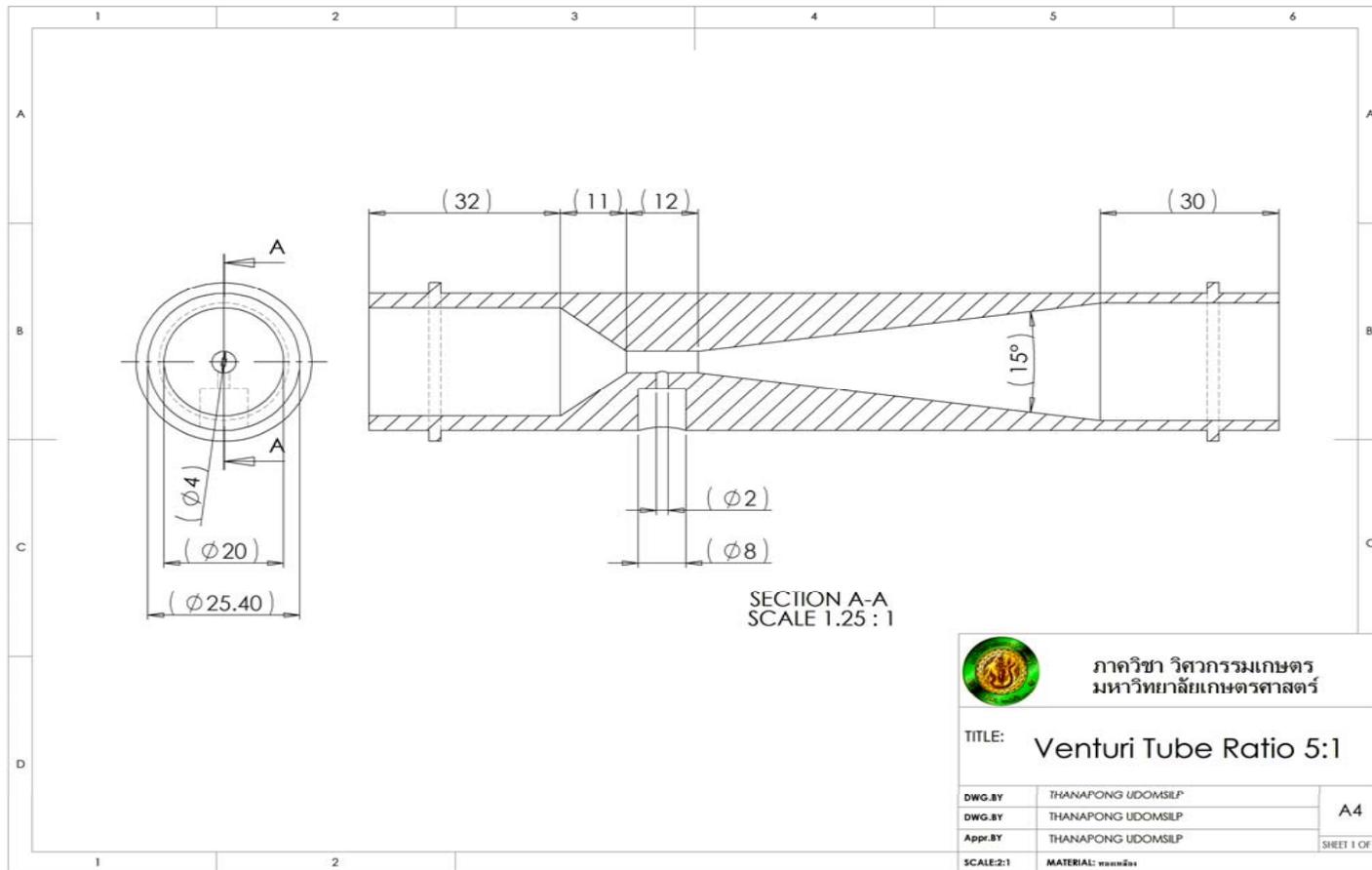
จากภาพที่ 34 ท่อ Venturi ขนาดมุม Diffuser 30 องศาเกิดการไหลวนของกระแสน้ำขนาดใหญ่ที่บริเวณ Diffuser และท่อตรงบริเวณทางออกของ Diffuser เนื่องจากเมื่อกระแสน้ำไหลออกมาจากช่องแคบของท่อ Venturi กระแสน้ำบริเวณกลางท่อ Venturi จะมีความเร็วสูงเกิดเป็นสายน้ำแคบพลังงานจลน์สูงทำให้ Diffuser ที่มีมุมกว้างไม่สามารถเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็นพลังงานศักย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความเร็วของสายน้ำในแต่ละระดับชั้นการไหลต่างกันมากจนเกิดการ

หมუნวนขึ้นดังนั้นวิธีการลดปัญหาการหมუნวนเนื่องจากประสิทธิภาพของ Diffuser สามารถทำได้ โดยการลดมุมของ Diffuser ให้แคบลงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจลน์เป็นพลังงาน ศักย์ดังภาพที่ 35 และ 36

จากภาพที่ 36 ท่อ Venturi ขนาดมุม Diffuser 15 องศา พบการหมუნวนขนาดเล็กบริเวณ ผนังของ Diffuser โดยมีสาเหตุส่วนหนึ่งเนื่องจากความขรุขระของผิวงานในการสร้าง Diffuser

จากการสร้างแบบจำลองของท่อ Venturi ที่มีมุม Diffuser ขนาดองศา 30,20 และ 15 พบว่า มุมของ Diffuser ขนาด 15 องศา (ภาพที่ 37) มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนพลังงานจลน์เป็น พลังงานศักย์สูงสุด

จากภาพที่ 37 ได้แบบของท่อ Venturi ที่ทำการปรับปรุงแล้ว หลังจากนั้นนำไปสร้างท่อ ตามแบบ และนำไปทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ต่อไป



ภาพที่ 37 แบบท่อ Venturi ที่ทำการปรับปรุง

การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi

เพื่อศึกษาลักษณะการทำงานและประสิทธิภาพของท่อ Venturi

1. วัสดุอุปกรณ์

- 1.1 ท่อ Venturi Ratio 5:1
- 1.2 ชุดประกอบท่อ PVC
- 1.3 Pressure Gauge
- 1.4 Vacuum Gauge
- 1.5 Flow Meter ยี่ห้อ EESIFLO รุ่น 6000 Series
- 1.6 ป้อน้ำ
- 1.7 ถ้วยตวง
- 1.8 นาฬิกาจับเวลา
- 1.9 อ่างรับน้ำ

2. วิธีการทดลอง

2.1 ติดตั้งอุปกรณ์ตามภาพที่ 30 โดยใช้ Venturi Tube อัตราส่วน 5:1 ได้ชุดอุปกรณ์ทดสอบดังภาพที่ 38

2.2 เริ่มเดินป้อน้ำโดยเบื้องต้นเปิดวาล์วหมายเลข 3, 5 และ 10 ในภาพที่ 30 ให้อยู่ในตำแหน่งเปิดสุด ก่อนเพื่อป้องกันการชำรุดของระบบท่อเนื่องจากการเริ่มเดินป้อน้ำจะทำให้เกิดการกระแทกในระบบหลังจากป้อน้ำขึ้นแล้วจึงเริ่มปิดวาล์วหมายเลข 3 อย่างช้าๆจนสนิท

2.3 ทำการทดลองครั้งที่ 1 โดยการปรับแรงดันให้ออกจากท่อ Venturi เป็น 0 kg/cm^2 ทางเข้า Venturi ปรับค่า เริ่มต้นที่ 1 kg/cm^2 และลดความดันครั้งละ 0.1 kg/cm^2 บันทึกค่าแรง Vacuum ที่เกิดขึ้นที่หมายเลข 9 ในภาพที่ 30

2.4 ทำการทดลองครั้งที่ 2 โดยการปรับแรงดันให้ออกจากท่อ Venturi เป็น 0.1 kg/cm^2

ทางเข้า Venturi ปรับค่า เริ่มต้นที่ 1 kg/cm^2 และลดความดันครั้งละ 0.1 kg/cm^2 บันทึกค่าแรง Vacuum ที่เกิดขึ้นที่หมายเลข 9 ในภาพที่ 30

2.4 ทำการทดลองครั้งที่ 3 โดยการปรับแรงดันให้ออกจากท่อ Venturi เป็น 0.2 kg/cm^2 ทางเข้า Venturi ปรับค่า เริ่มต้นที่ 1 kg/cm^2 และลดความดันครั้งละ 0.1 kg/cm^2 บันทึกค่าแรง Vacuum ที่เกิดขึ้นที่หมายเลข 9 ในภาพที่ 30

2.5 ทำการทดลองครั้งที่ 4 โดยนำท่อ Venturi ไปติดตั้งเพื่อใช้งานในระบบจริง ตามภาพที่ 39 ปรับแรงดันทางเข้าเริ่มต้นที่ 2 kg/cm^2 บันทึกค่า Vacuum ที่เกิดขึ้นในท่อ Venturi



ภาพที่ 38 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อทดสอบการทำงานของท่อ Venturi



ภาพที่ 39 การติดตั้งท่อ Venturi เพื่อใช้งานในระบบจริง

การทดสอบการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ

1. วัสดุและอุปกรณ์

- 1.1 บีกเกอร์ขนาด 50 mL.
- 1.2 Centrifugal Pump ยี่ห้อ TAKI รุ่น 50-20
- 1.3 นาฬิกาจับเวลา
- 1.4 มอเตอร์ไฟฟ้า
- 1.5 Portable Ultrasonic Flowmeter ยี่ห้อ EESIPLE รุ่น 6000 Series
- 1.6 เครื่องชั่ง ยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น PL-1502-S

2. การทดสอบการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ

ได้ดำเนินการดังนี้

- 2.1 ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลบริเวณคอเพลากับปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ
- 2.2 ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลบริเวณทางรั่วของปั้มน้ำ
- 2.3 ทำการทดสอบทุกวันหลังจากติดตั้งเสร็จ โดยทดสอบวันละ 2 ครั้ง สุ่มสลับกันระหว่างระบบที่ใช้อุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลและระบบที่ไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล โดยจับเวลาในการทดสอบครั้งละ 20 นาที

2.4 นำบีกเกอร์ขนาด 250 mL ไปรองรับบริเวณ Stuffing Box ของปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์เพื่อรองรับน้ำเชื่อมที่เกิดการรั่วไหล

2.5 จดบันทึกค่าปริมาณน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ที่ขนถ่ายโดยปั้มน้ำ จากเครื่อง Portable Ultrasonic Flow เมื่อครบ 20 นาที นำกระบอกตวงที่รองรับน้ำเชื่อมที่รั่วไหลไปชั่ง บันทึกน้ำหนักของน้ำเชื่อมที่รั่วไหล

2.6 ทำการทดสอบซ้ำ 30 ครั้ง

2.7 นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การรั่วไหลของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์

การทดสอบผลกระทบต่อคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการติดตั้งระบบ

ประกอบด้วยการวิเคราะห์คุณภาพควบคุมของน้ำตาล ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าบริกซ์ (Brix) ค่าโพลาไรเซชัน (Pol) และค่าสี (Color) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

Brix หมายถึง ปริมาณร้อยละโดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของสารของแข็งทั้งหมด (Total Solids) ซึ่งมีอยู่ในสารละลายหรือของเหลวนั้น ค่าบริกซ์แบ่งเป็น 2 อย่างตามชนิดเครื่องวัดที่ใช้คือ

- Hydrometer หรือ Spindle Brix เมื่อใช้เครื่องวัดชนิด Hydrometer หรือ Spindle ซึ่งอาศัยหลักฟูลลอยตัว

- Refractometer Brix เมื่อใช้เครื่องวัดชนิด Refractometer ซึ่งอาศัยหลักการเบี่ยงเบนของลำแสงผ่านตัวกลางที่เป็นแก้วผลึกรูปเหลี่ยม (Prism)

Pol หมายถึง ค่าแสดงปริมาณน้ำตาลซูโครสโดยอนุโลมได้จากการวิเคราะห์แบบโพลาไรเซชันโดยตรง (Direct or Single Polarization) ของตัวอย่างสารละลายน้ำตาล ซึ่งมีความเข้มข้นของน้ำตาลซูโครสเทียบเท่ากับน้ำหนักสามัญ

ค่า โพล ในกรณีข้างต้นจะต่ำกว่าค่าจริงของซูโครสซึ่งวิเคราะห์ด้วยวิธีของ “CLERGET” (Double Polarization or Direct Reading and Invert Reading) เช่น กรณีของน้ำตาลทรายดิบ ค่า CLERGET Sucrose กับ ค่าโพล (Direct or Commercial Polarization) จะมีความสัมพันธ์กันมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณและรูปลักษณะของ Reducing sugar ที่มีอยู่ร่วมกัน ถ้า Dextrose และ

Levulose มีอยู่ประมาณเท่ากัน นั่นคือเมื่อ Reducing Sugar ในรูปของ Invert Sugar ค่า CLERGET Sucrose จะสูงกว่าค่า โพล (Direct Polarization) ประมาณ 1/3 ของค่าร้อยละของ Reducing Sugar

$$\frac{S - P}{I} = 0.333 = \text{Polarizing Const.} \quad (26)$$

แต่ถ้าค่า Levulose มีน้อยลง จะทำให้ค่า Polarizing Constant ต่ำลง และค่า CLERGET Sucrose กับค่าโพลจะใกล้เคียงกันยิ่งขึ้น หากค่า Levulose ลดต่ำลงไปอีกอาจทำให้ค่า CLERGET Sucrose ต่ำกว่าค่าโพลได้ กรณีดังกล่าวนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ D/L = 64:36

ค่าโพลแบ่งออกเป็น 2 อย่าง ขึ้นอยู่กับปริมาณซูโครสที่มีอยู่ในตัวอย่างวิเคราะห์รวมทั้งขนาดความยาวของหลอดบรรจุตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าโพล

- Pol Reading หมายถึง ค่าโพล ซึ่งอ่านได้โดยตรงจากการวิเคราะห์สารละลายน้ำตาลตัวอย่าง โดยมีได้เทียบปริมาณซูโครสให้เท่ากับน้ำหนักสามัญ เมื่อต้องการเปลี่ยนค่านี้เป็น % Pol จะต้องคำนวณจากสูตรหรือใช้ตารางเทียบค่าซึ่งสัมพันธ์กับค่าบริกซ์ของสารละลายน้ำตาลตัวอย่างนั้น

- % Pol หมายถึงค่า โพล ซึ่งเทียบเป็นค่าร้อยละของน้ำหนักสามัญของซูโครส

Color Value หรือ ค่าสี หมายถึง คุณภาพในด้านสีของตัวอย่างน้ำตาล ซึ่งวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสี (Colorimeter) ซึ่งปกติจะเป็นแบบสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) หน่วยวัดที่ใช้คือ ICUMSA Unit

1. วัสดุและอุปกรณ์

- 1.1 Refractometer Brix ยี่ห้อ Schmidt & Haensch รุ่น ATR-SW
- 1.2 Saccharimeter ยี่ห้อ Dr. Wolfgang Kernchen Optik Elektronik Automation รุ่น Sucromat
- 1.3 Spectrophotometer ยี่ห้อ Helios รุ่น Delta
- 1.4 เทอร์โมมิเตอร์

- 1.5 กรวยกรอง
- 1.6 หลอดโพล (Pol tube)
- 1.7 flask ขนาด 250 mL
- 1.8 กระดาษกรอง Whatman No.1
- 1.9 กระจกนาฬิกา
- 1.10 กระบอกตวงขนาด 5 mL, 10 mL., 100 mL และ 500 mL
- 1.11 บิวเรทขนาด 50 mL
- 1.12 ไปเปทขนาด 5 mL, 10 mL, 25 mL, 50 mL และ 100 mL
- 1.13 Electric hot plate
- 1.14 นาฬิกาจับเวลา
- 1.15 Glass beads
- 1.16 Volumetric flask ขนาด 100 mL, 200 mL, 250 mL, 500 mL และ 1000 mL
- 1.17 pH meter ยี่ห้อ TOA รุ่น HM-205
- 1.18 ขวดน้ำกลั่น
- 1.19 Syringe
- 1.20 Dry Lead acetate
- 1.21 Kieselguhr
- 1.22 0.1 N Hydrochloric Acid
- 1.23 0.1 N Sodium Hydroxide

2. การเก็บตัวอย่างและระยะเวลาการเก็บ

ทุกช่วง 2 ชั่วโมง ให้เก็บตัวอย่างครั้งละประมาณ 1 L จากท่อทางส่งของปั๊ม เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์เป็นเวลา 8 วัน โดยสลับกันระหว่างระบบที่ใช้อุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลและระบบที่ไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล

3. วิธีเตรียมตัวอย่าง

3.1 กรณีนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่า pH, Ref. Brix และ Color ให้ใช้ตัวอย่างรวมที่เก็บในช่วง 2 ชั่วโมงมาวิเคราะห์ โดยตรงไม่ต้องเจือจางด้วยน้ำกลั่น

3.2 กรณีนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ค่า % Pol ให้นำตัวอย่างรวมที่เก็บครบช่วง 2 ชั่วโมง มาเจือจางด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:2 โดยน้ำหนักค่าที่วิเคราะห์ได้ต้องคูณด้วย 3 จึงจะเป็นค่าจริงของตัวอย่างน้ำเชื่อมเดิมนั้น

4. วิธีการวิเคราะห์คุณภาพควบคุมของน้ำตาล

4.1 วิธีวิเคราะห์ pH

4.1.1 แบ่งตัวอย่าง ซึ่งเก็บไว้ในตู้เย็น นำมาวัดค่า pH โดยใช้ตัวอย่างจำนวนพอควรล้างด้วยแก้วหรือถ้วยพลาสติกทรงเตี้ยขนาดจุ 250 mL ปากกว้างพอให้ขั้ววัดค่า pH (Electrodes) ของ pH meter สอดลงไปจุ่มในตัวอย่างได้สะดวก รินตัวอย่างลงไปให้มีระดับสูง พอท่วมกระเปราะขั้ววัดอันที่เป็น Glass Electrode ขึ้นไปประมาณ 3 cm

4.1.2 วัดอุณหภูมิตัวอย่าง แล้วปรับปุ่มแก้ความคลาดเคลื่อนของอุณหภูมิของเครื่อง เพื่อให้ค่าที่วัดเป็นค่าที่อุณหภูมิ 20 °C กรณีที่เป็นเครื่องชนิดปรับอุณหภูมิโดยอัตโนมัติ ซึ่งจะมีขั้ว Temperature Compensator อยู่ด้วย ก็ไม่ต้องปรับอุณหภูมิ

4.1.3 กดปุ่มวัดค่า pH ทิ้งจังหวะให้การแสดงค่า pH ของเครื่องอยู่ในระดับคงที่พอควร จึงบันทึกค่าที่อ่านได้ กดปุ่มวัดค่า pH ให้ตัววงจรการแสดงค่า pH แล้วกดซ้ำเพื่ออ่านค่าทบทวนอีกครั้ง เมื่อได้ค่าคงที่ จึงบันทึกเป็นค่า pH ของตัวอย่างนั้น แต่ถ้าค่าผิดปกติไม่เท่ากัน แสดงว่ามีอะไรผิดพลาด อาจเป็นเพราะขั้ววัดหรือวงจรระบบใดระบบหนึ่งของเครื่องขัดข้อง ให้ช่างตรวจสอบแก้ไข

4.1.4 เมื่อวัดค่า pH ของตัวอย่างเสร็จแล้ว จึงยกขั้ววัดขึ้นจากตัวอย่าง ใช้น้ำกลั่นจากขวดชนิดน้ำล้างให้สะอาด แล้วแช่ขั้ววัดไว้ในน้ำกลั่น กรณีที่มีตัวอย่างนำมาวัดค่า pH ติดต่อกันหลายตัวอย่างให้ใช้ตัวอย่างใหม่ ที่จะวัดค่าต่อไปล้างขั้ววัด 2-3 ครั้ง แล้วเททิ้ง จากนั้นจึงจุ่มขั้ววัดลงในตัวอย่างนั้น แล้วทำการวัดค่า pH ต่อไป

4.2 วิธีวิเคราะห์ Brix

4.2.1 แบ่งตัวอย่างน้ำเชื่อม ซึ่งเก็บไว้ในตู้เย็นประมาณ 50 mL กรองผ่านกระดาษกรอง ขณะกรองใช้กระดาษฟิวส์หรือกระดาษอะลูมิเนียมปิดปากกรวยป้องกันการระเหย ทิ้งส่วนของตัวอย่างที่กรองได้ 25 mL แรก ส่วนที่เหลือนำมาวิเคราะห์ค่า Brix ด้วยเครื่อง Refractometer โดยบันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างไว้ขณะทำการวัดค่า

4.2.2 ใช้หลอดหยดน้ำยา (Dropper) ดูดตัวอย่างที่กรองได้ขึ้นมาล้างหลอดแล้วบีบทิ้งและดูดตัวอย่างดังกล่าวขึ้นมาใหม่ หยดตัวอย่างที่ดูดขึ้นมาลงบนกระจกريفตัวอย่างของเครื่อง Refractometer ซึ่งอาจเป็นแบบ Hand Refractometer หรือ Laboratory Refractometer มีสเกลวัดได้ในช่วงที่คลุมค่า Brix ของน้ำเชื่อมเช่น 0-32% หรือ 0-95% Dry Substance or Sucrose รัปปิดฝาทับตัวอย่างเบาๆ

4.2.3 ดูกล้องปรับสภาพจนสมดุล คือเห็นเส้นแบ่งระหว่างครึ่งวงกลมมืดกับสว่าง ตัดกับขีดแบ่งสเกลชัดเจน บันทึกค่า Brix ที่อ่านได้

4.2.4 ใช้ตัวอย่างเดียวกันวัดตรวจสอบค่า Brix อีกครั้งหนึ่ง

4.3 วิธีวิเคราะห์ Pol

4.3.1 แบ่งตัวอย่างเจือจาง 1:2 มาประมาณ 100 mL ใส่ในขวดแก้วปรับปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 200 mL

4.3.2 เติม Dry Lead Acetate จำนวนประมาณ 1 g แล้วเขย่าให้เข้ากัน

4.3.3 กรองผ่านกระดาษกรองโดยเติม Kieselguhr ประมาณ 1 ซ้อนชา ลงบนกระดาษกรองเป็นสารช่วยกรอง ขณะกรองใช้กระจกนาฬิกาหรือกระดาษอะลูมิเนียมปิดปากกรวย ป้องกันการระเหย

4.3.4 ทิ้งตัวอย่างที่กรองได้ส่วนแรกจำนวน 25 mL

4.3.5 ใช้ตัวอย่างที่กรองได้ส่วนต่อมา ล้างหลอดตัวอย่างขนาด 200 mL ของเครื่อง Saccharimeter ประมาณ 2-3 ครั้ง แล้วเททิ้ง บรรจุตัวอย่างเดียวกันนั้นให้เต็มหลอดพอดี ปิดฝานำไปวัดค่า Pol Reading โดยบันทึกอุณหภูมิตัวอย่างไว้ด้วย หาค่าเฉลี่ยจากการวัดค่าซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง

4.3.6 นำค่าเฉลี่ย Pol Reading มาแก้ค่าคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิโดยถือหลักว่า ถ้าอุณหภูมิตัวอย่างขณะวัดค่า Pol Reading สูงกว่าระดับ 20 °C เท่าใด ให้นำไปคูณกับ 0.03 แล้วจึงบวกกับค่า Pol Reading นั้น ส่วนกรณีที่ต่ำกว่า 20 °C ให้นำผลคูณที่ได้ไปหักออกจากค่า Pol Reading นั้น

4.3.7 นำค่า Pol Reading ที่แก้ความคลาดเคลื่อนจากอุณหภูมิตามข้อ 6 นั้นไปเทียบกับค่า % Pol จากตาราง Pol and Purity Factors from Refractometer Solids and Saccharimeter Readings โดยอาศัยค่า Brix ของตัวอย่างเดียวกันนั้นมาประกอบ

สูตรคำนวณ

$$Purity = \frac{\% Pol}{Brix} \times 100 \quad (27)$$

4.4 วิธีวิเคราะห์ Color

4.4.1 นำตัวอย่าง ซึ่งวัดค่า Ref. Brix แล้วมาวิเคราะห์ค่า Color ถ้าค่า Ref. Brix สูงเกิน 55° Ref. Brix ให้ใช้น้ำกลั่นเจือจางให้ได้ ค่าอยู่ระหว่าง 50-55° Ref. Brix

4.4.2 ปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 7.0± 0.2 ด้วยสารละลายมาตรฐาน 0.1 N ของกรดเกลือหรือ Sodium Hydroxide แล้วแต่กรณี

4.4.3 กรองสารละลายตัวอย่างที่ปรับค่า pH ดังกล่าวข้างต้นด้วยกระบอกกรองแบบที่ใช้ฉีดยา (Syringe)

4.4.4 วัดค่า Ref. Brix ของสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ แล้วนำไปเทียบค่า App.Density จากตาราง Brix, Apparent Density, Apparent Specific Gravity, Grams of Sucrose per 100 mL and Degree Baume of Sugar Solutions at 20 °C

4.4.5 นำสารละลายตัวอย่างที่กรองได้ตัวอย่างเดียวกันนั้น ไปวัดค่า Absorbance ด้วยเครื่อง Spectrophotometer ซึ่งอาจเป็นแบบ Spectronic ก็ได้ โดยใช้คลื่นแสงขนาด 560 nm. ให้ใช้น้ำกลั่นที่ใช้เจือจางตัวอย่างตั้งค่า Transmittance เป็น 100%

สูตรคำนวณ

$$Color = \frac{Absorbance \times 10^5}{Cell\ length(cm) \times Ref.\ Brix \times App.Density} \quad (28)$$

ใช้หน่วยเป็น ICUMSA

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ เปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการ รั่วไหล

1. วัสดุและอุปกรณ์

- 1.1 Centrifugal Pump ยี่ห้อ TAKI รุ่น 50-20
- 1.2 Induction Motor ยี่ห้อ Bauknecht รุ่น R185727M , 3 Phase, 22 kW, 2925rpm,
COS ϕ =0.90, 380V
- 1.3 Multi meter ยี่ห้อ Fluke รุ่น 333
- 1.4 Pressure Gauge Range 0-5 kg/cm²
- 1.5 Portable Ultrasonic Flowmeter ยี่ห้อ EESIFLO รุ่น 6000 Series

การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบสูบน้ำเชื่อมบริสุทธ์ เป็นการหาประสิทธิภาพรวมของระบบประกอบด้วยประสิทธิภาพปั้ม, ประสิทธิภาพมอเตอร์และประสิทธิภาพของระบบท่อและวาล์ว โดยใช้อุปกรณ์ชุดเดียวกันในการทดสอบเพื่อควบคุมประสิทธิภาพของมอเตอร์และประสิทธิภาพของระบบท่อและวาล์ว ประสิทธิภาพของระบบจะหาได้จากสมการ

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{wkW}{kW} \quad (29)$$

โดย

$$wkW = \frac{9.8QH(sp.gr.)}{1000} \quad (30)$$

$$kW = \frac{V \times I \times \sqrt{3} \times \cos \phi}{1000} \quad (31)$$

โดย

$$\begin{aligned} \eta_{\text{sys}} &= \text{ประสิทธิภาพรวมของระบบ} \\ wkW &= \text{กำลังที่เกิดขึ้นในระบบ (kW)} \end{aligned}$$

kW	=	กำลังที่ให้กับระบบ (kW)
Q	=	อัตราการไหล (kg/s)
H	=	ความดันระบบ (m)
$sp.gr.$	=	ความถ่วงจำเพาะ(1.319)
V	=	แรงดันไฟฟ้า (380 V)
I	=	กระแสไฟฟ้า (A)
$\cos \varphi$	=	Power Factor(0.90)

2. วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของระบบ เปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์

ดำเนินการดังนี้

- 2.1 ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลกับปั้มน้ำเชื่อมบริษัทตามหมายเลข 11 ในภาพที่ 40
- 2.2 ติดตั้ง Pressure Gauge ที่บริเวณทางส่งของปั้มน้ำตามหมายเลข 6 ในภาพที่ 40 และ 41
- 2.3 ติดตั้งเครื่องวัดอัตราการไหลบริเวณทางส่งของปั้มน้ำตามหมายเลข 9 ในภาพที่ 40

และ 41

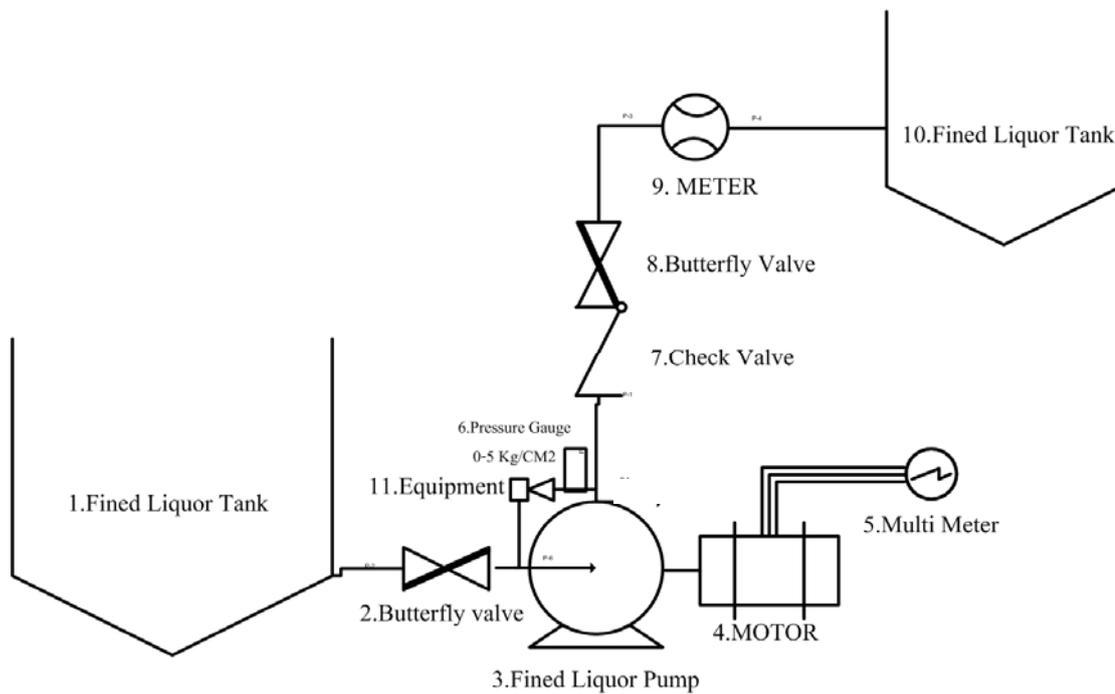
- 2.4 ติดตั้งเครื่องวัดกระแสไฟฟ้าตามหมายเลข 5 ในภาพที่ 40 และ 41

2.5 ทำการทดสอบ 30 ชุดข้อมูล โดยแต่ละชุดข้อมูลสลับกันระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล

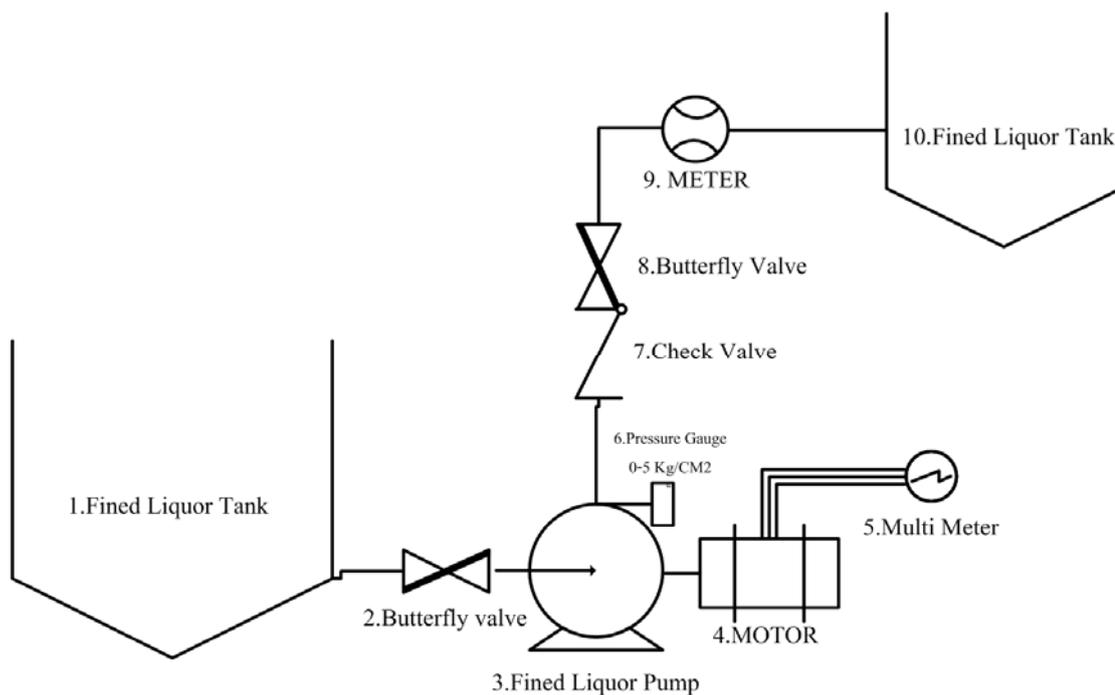
2.6 ทำการบันทึกค่าอัตราการไหลของน้ำเชื่อมบริษัท, ความดันที่บริเวณทางส่งของปั้มน้ำ และค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์

2.7 บันทึกค่าและแทนค่าในสมการ สมการที่ 30 เพื่อหาค่ากำลังที่เกิดขึ้นในระบบ

2.8 บันทึกค่าและแทนค่าในสมการ สมการที่ 31 เพื่อหาค่ากำลังที่ให้กับระบบ



ภาพที่ 40 การทดสอบระบบโดยติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล



ภาพที่ 41 การทดสอบระบบโดยไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์ครอบคลุมการหาต้นทุนค่าใช้จ่าย ระยะเวลาคืนทุน และจุดคุ้มทุน

ต้นทุน (Cost) หมายถึง จำนวนเงินหรือสิ่งแลกเปลี่ยนอย่างอื่น เพื่อให้ได้มาซึ่งทรัพย์สินหรือบริการใดๆ โดยต้นทุนจะมีความหมายกับค่าใช้จ่ายในการทำงาน โดยจะแบ่งต้นทุนออกเป็นดังนี้

- ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) คือต้นทุนที่ไม่แปรไปตามระดับกิจกรรมต่างๆ เช่น ต้นทุนของเครื่องจักรที่ซื้อมา ค่าเช่าที่ดิน ค่าอาคาร โรงเรือน และค่าติดตั้ง เป็นต้น

- ต้นทุนผันแปร (Variable Cost) คือ ต้นทุนที่แปรตามระดับกิจกรรม เช่น ค่าวัสดุ ค่าแรงงาน ค่าพลังงาน (น้ำมัน ไฟฟ้า) ต้นทุนผันแปรนี้จะเพิ่มปริมาณมากขึ้นตามจำนวนหน่วยกิจ

ค่าเสียโอกาส (Opportunity Cost) คือค่าใช้จ่ายที่ไม่ต้องจ่ายจริงแต่ต้องเสียไปเนื่องจากการใช้ทรัพยากร

จุดคุ้มทุน (Breakeven Point) หมายถึง จำนวนหน่วยการผลิตหรือบริการของโครงการที่ทำให้เกิดรายรับของโครงการเท่ากับต้นทุนของโครงการ จำนวนหน่วยที่เป็นจุดคุ้มทุนนี้ โครงการจะยังไม่มีกำไรหรือกำไรเป็นศูนย์

$$\text{จุดคุ้มทุน} = \text{ค่าใช้จ่ายคงที่} / (\text{อัตราค่าจ้าง} - \text{ค่าใช้จ่ายในการทำงาน}) \quad (32)$$

ระยะเวลาการคืนทุน คือ การหาคำตอบว่าเมื่อใดหรือนานเท่าไรที่กิจการจะคุ้มทุนหรือเริ่มจะมีกำไรขึ้นมา

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \text{ราคาซื้อเครื่อง} / \text{ผลประโยชน์สุทธิ} \quad (33)$$

โดยที่

ผลประโยชน์สุทธิ คือ (ผลประโยชน์ที่ได้รับ-ต้นทุนรวม)

ผลประโยชน์ที่ได้รับ คือ

1. ปริมาณน้ำตาล(คิดจากน้ำเชื่อมรีไฟน์ที่ร่วนไหล)คูณกับราคาน้ำตาลรีไฟน์ขายในประเทศ
2. ลดต้นทุนการผลิตโดยลดปริมาณน้ำตาลที่นำมา Re-process

ค่าเสื่อมราคา (Depreciation หรือ Capital Recovery) คือ มูลค่าของทรัพย์สินที่ลดลงตามเวลาและการใช้งาน การเสื่อมราคาจะเป็นไปตลอดเวลาจนทรัพย์สินหมดอายุ โดยทั่วไปค่าเสื่อมราคาในระยะเริ่มต้นจะสูงกว่าในระยะปลายของอายุ เมื่อหมดอายุทรัพย์สินจะมีมูลค่าขายทิ้งหรือมูลค่าขายต่อก็แล้วแต่สภาพของซาก

วิธีคำนวณค่าเสื่อมราคา คือ การคำนวณเพื่อจัดสรรการกระจายของต้นทุนของทรัพย์สินหนึ่ง หรือต้นทุนทั้งหมดของธุรกิจในระยะเวลาหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ช่วงเสื่อมราคา การคำนวณในกรณีนี้ใช้วิธีเส้นตรง (Straight Line Depreciation)

$$DP = (P-S) / L \quad (34)$$

โดยที่	DP	=	ค่าเสื่อมราคา (บาท)
	P	=	ค่าซื้อเครื่องจักร (บาท)
	S	=	ราคาขายหรือคงเหลือเมื่อเครื่องจักรหมดอายุ (บาท)
	L	=	อายุการใช้งานของเครื่องจักร (ปี)

สถานที่ทำการทดลอง

โรงงานน้ำตาลสิงห์บุรี 24/2 ต. ไม้คัด อ. บางระจัน จ. สิงห์บุรี 16130

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

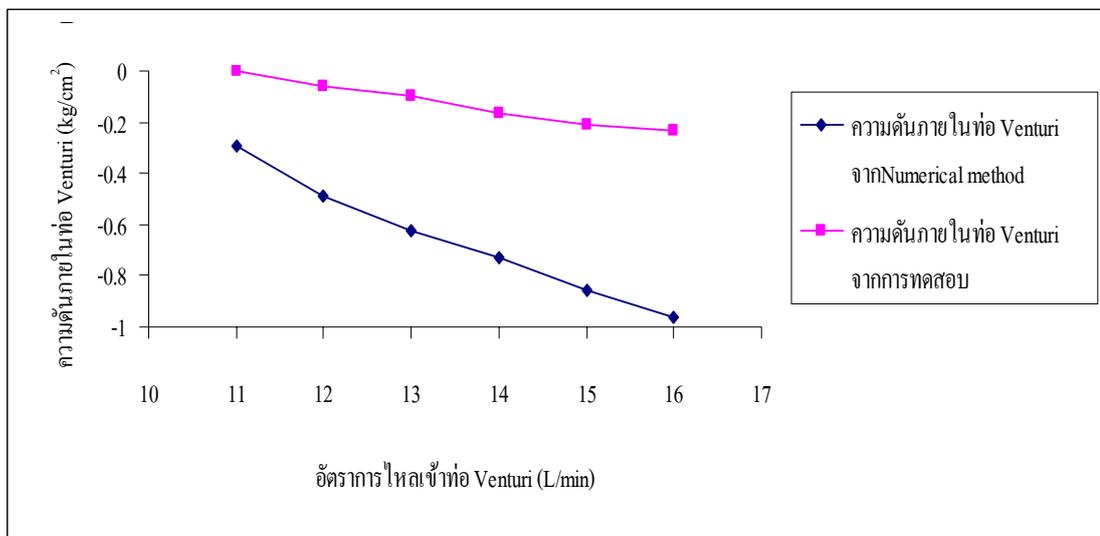
ระยะเวลาในการทำวิจัย

เริ่มต้น มกราคม 2550 สิ้นสุด กุมภาพันธ์ 2552

ผลและวิจารณ์

ผลการทดสอบเบื้องต้น

จากการทดลองหาสภาวะการใช้งานของระบบ เมื่อนำค่าที่ได้จากวิธีทาง Numerical Method และวิธีการทดสอบจริงมาเปรียบเทียบกัน ได้ผลดังภาพที่ 42



ภาพที่ 42 กราฟเปรียบเทียบแรงดันในท่อ Venturi ที่เกิดขึ้น โดยวิธีการ Numerical Method และการทดสอบ

จากภาพที่ 42 ค่าแรงดันภายในท่อ Venturi ที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจริงแต่มีค่าแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากระบบจริงนั้นมีการสูญเสียเกิดขึ้นในระบบ

ผลการทดสอบการทำงานของท่อ Venturi

จากการทดลองการทำงานของท่อ Venturi เมื่อเริ่มเดินปั้มน้ำให้ทำการเปิดวาล์วทุกตัวในระบบดังภาพที่ 43 เพื่อป้องกันการเกิดแรงกระแทกเมื่อเริ่มเดินระบบเนื่องจากระบบยังมีอากาศอยู่อาจทำให้ระบบเสียหายได้



ภาพที่ 43 การเปิดวาล์วลดความดันเมื่อเริ่มเดินระบบ

หลังจากนั้นเริ่มปิดวาล์วลดแรงดันจนสนิทเพื่อเข้าระบบการทดสอบและเริ่มปรับลดวาล์วทางเข้าท่อ Venturi เพื่อปรับแรงดันให้เหลือ 1 kg/cm^2 โดยควบคุมให้แรงดันทางด้านส่งเป็น 0 kg/cm^2 และทำการปรับค่าแรงดันทางเข้าท่อ Venturi ให้ได้ค่าตามการทดลองที่วางไว้โดยในการปรับวาล์วเข้าท่อ Venturi ต้องปรับวาล์วทางส่งตามด้วยเพื่อจะได้ค่าแรงดันตามที่กำหนด ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 7 เมื่อทำการทดลองโดยใช้วิธีเดียวกันแต่ปรับแรงดันทางส่งเป็น 0.1 kg/cm^2 และ 0.2 kg/cm^2 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 8 และ 9 ตามลำดับ และเมื่อนำท่อ Venturi ไปติดตั้งเพื่อใช้งานจริงแล้วทดสอบการทำงานได้ผลดังตารางที่ 10

ตารางที่ 7 การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ที่ความดันที่ออกจากท่อ Venturi เท่ากับ 0 kg/cm²

ความดันทางเข้าที่ Venturi (kg/cm ²)	ความดันภายในท่อ Venturi (kg/cm ²)
1.0	-0.548
0.9	-0.523
0.8	-0.489
0.7	-0.449
0.6	-0.421
0.5	-0.374
0.4	-0.324
0.3	-0.299
0.2	-0.272
0.1	-0.234

ตารางที่ 8 การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ที่ความดันที่ออกจากท่อ Venturi เท่ากับ 0.1 kg/cm²

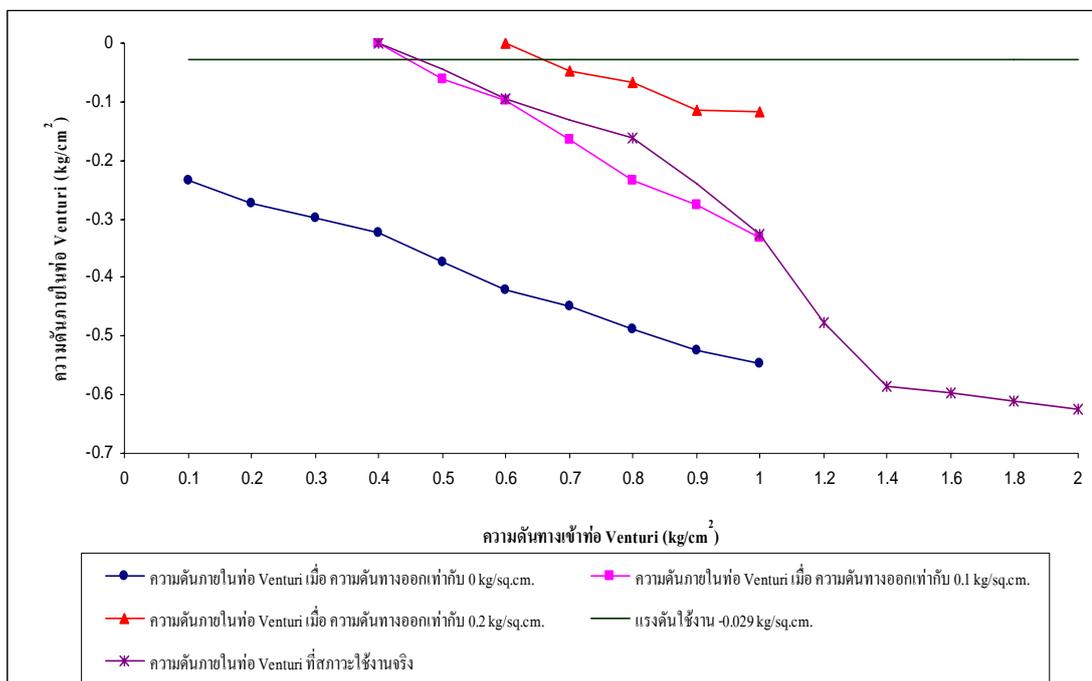
ความดันทางเข้าที่ Venturi (kg/cm ²)	ความดันภายในท่อ Venturi (kg/cm ²)
1.0	-0.333
0.9	-0.277
0.8	-0.235
0.7	-0.165
0.6	-0.098
0.5	-0.061
0.4	0

ตารางที่ 9 การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ที่ความดันที่ออกจากท่อ Venturi เท่ากับ 0.2 kg/cm^2

ความดันทางเข้าที่ Venturi (kg/cm^2)	ความดันภายในท่อ Venturi (kg/cm^2)
1.0	-0.116
0.9	-0.113
0.8	-0.068
0.7	-0.048
0.6	0

ตารางที่ 10 การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi ที่สภาวะใช้งานจริง

ความดันทางเข้าที่ Venturi (kg/cm^2)	ความดันภายในท่อ Venturi (kg/cm^2)
2.0	-0.625
1.8	-0.612
1.6	-0.598
1.4	-0.586
1.2	-0.476
1.0	-0.326
0.8	-0.163
0.6	-0.095
0.4	0



ภาพที่ 44 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันด้านเข้าท่อ Venturi กับ การเกิดแรงดันภายในท่อ ณ ความดันทางส่งที่แตกต่างกัน

จากการคำนวณจุดใช้งานจริงที่น้ำเชื่อมสามารถถูกระบบดูดกลับได้ภายในท่อต้องมีแรงดันอย่างน้อยอยู่ที่ -0.029 kg/cm^2 ดังนั้นในการใช้งานในระบบจริงที่สภาวะแรงดันด้านออกจาก Venturi มีแรงดัน 0 kg/cm^2 สามารถใช้ที่สภาวะแรงดันทางเข้าต่ำถึง 0.1 kg/cm^2 และในสภาวะที่แรงดันทางออกของท่อ Venturi มีค่า 0.1 kg/cm^2 และ 0.2 kg/cm^2 แรงดันทางเข้าที่สามารถใช้งานได้มีค่ามากกว่า 0.45 kg/cm^2 และ 0.66 kg/cm^2 ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 44

จากภาพที่ 44 แสดงว่าถ้าแรงดันทางเข้ามีค่าสูงอุปกรณ์จะมีความสามารถในการสร้างแรงดันลบสูงขึ้นด้วยและในสภาวะที่แรงดันทางส่งของท่อ Venturi มีค่าสูงขึ้นจะทำให้ความสามารถในการสร้างแรงดันลบของอุปกรณ์ลดลง

จากการสังเกตพบว่าในสภาวะที่แรงดันสูงซึ่งทำให้เกิดแรงดันลบในท่อ Venturi สูง ความเร็วในท่อก็จะสูงด้วยและมีฟองอากาศเข้าในระบบจึงทำให้เกิดเสียงดังซึ่งเป็นการเกิด Cavitation ขึ้นในระบบถ้าในสภาวะการใช้งานจริงอาจทำให้ท่อ Venturi ชำรุดได้จึงควรปรับสภาวะความดันใช้งานให้เหมาะสมเพื่อลดการสึกหรอของอุปกรณ์

จากภาพที่ 44 พบว่าการนำท่อ Venturi ไปใช้งานจริงที่แรงดันทางเข้า 2 kg/cm^2 สามารถทำให้เกิดแรงดัน -0.625 kg/cm^2 ซึ่งมีค่าสูงกว่าแรงดันที่ต้องการ ดังนั้นสามารถลดแรงดันทางด้านเข้าท่อ Venturi ให้เหลือเพียง 1 kg/cm^2 เพื่อเป็นการลดปริมาณน้ำเชื่อมที่ไหลวนกลับและลดการสึกหรอของท่อ Venturi

ผลการทดสอบการรั่วไหลของปั๊มน้ำเชื่อมที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ

ในการทดสอบอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั๊มน้ำเชื่อมได้กำหนดการทดสอบไว้ 30 วัน เพื่อต้องการให้เครื่องจักรเกิดการสึกหรอตามสภาพใช้งานจริงเนื่องจากขั้นตอนในการติดตั้งอุปกรณ์ทางคณะทำงานได้ทำการซ่อมบำรุงเครื่องจักรด้วยดังนั้นเมื่อเริ่มเดินเครื่อง เครื่องจักรจะอยู่ในสภาพสมบูรณ์ซึ่งจะไม่เกิดการรั่วไหล ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 11 ในช่วง 3 วันแรก ซึ่งเป็นผลมาจากเครื่องจักรอยู่ในช่วงแรกของการซ่อมแซมยังมีสภาพดีไม่ชำรุดสึกหรอจึงไม่เกิดการรั่วไหล และเริ่มพบการรั่วไหลหลังจากเดินเครื่องจักรได้ 3 วันโดยพบว่ามี การรั่วไหลเกิดขึ้นในระบบที่ไม่ใช้อุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลและหลังจากทดสอบต่อเนื่องอีก 27 วันพบว่าระบบที่ใช้ อุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั๊มน้ำเชื่อมไม่พบการรั่วไหลและมีแนวโน้มใช้งานต่อเนื่องได้ต่อไป ส่วนระบบที่ไม่ได้ใช้อุปกรณ์พบว่าระบบมีการรั่วไหลเกิดขึ้น และในการทดลองแต่ละช่วง จะกำหนดให้เดินปั๊มน้ำที่ 20 นาที เนื่องจากในการปฏิบัติงานจริงพนักงานจะเดินปั๊มไม่ต่อเนื่องโดยจะเดินปั๊มเมื่อในถังพักมีระดับน้ำเชื่อมอยู่ที่ความสูงจากกันถึง 1.5-2 เมตร

ตารางที่ 11 ผลการทดสอบการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล

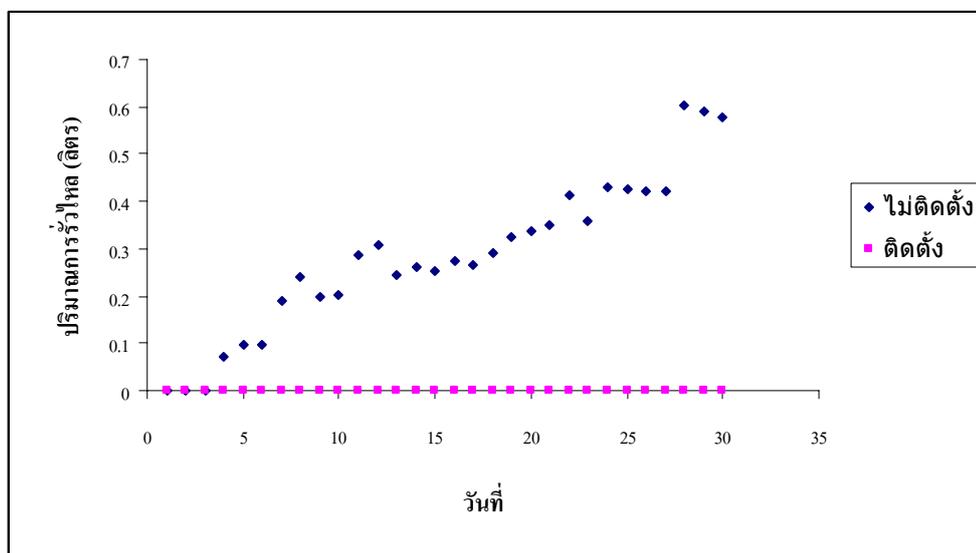
ช่วงที่	สถานะ	ปริมาณน้ำเชื่อมที่ส่ง (m ³)	ปริมาณน้ำเชื่อมที่รั่วไหล (L)	เปอร์เซ็นต์การ รั่วไหล (x 10 ⁻⁴)
1	ติดตั้ง	24.12	0	0
	ไม่ติดตั้ง	21.14	0	0
2	ไม่ติดตั้ง	20.85	0	0
	ติดตั้ง	20.14	0	0
3	ติดตั้ง	24.35	0	0
	ไม่ติดตั้ง	18.42	0	0
4	ไม่ติดตั้ง	16.57	0.071	4.28
	ติดตั้ง	21.17	0	0
5	ติดตั้ง	20.19	0	0
	ไม่ติดตั้ง	21.47	0.095	4.41
6	ติดตั้ง	19.78	0	0
	ไม่ติดตั้ง	20.31	0.099	4.87
7	ไม่ติดตั้ง	18.55	0.188	10.13
	ติดตั้ง	18.15	0	0
8	ติดตั้ง	19.45	0	0
	ไม่ติดตั้ง	23.41	0.241	10.29
9	ไม่ติดตั้ง	19.07	0.197	10.36
	ติดตั้ง	20.56	0	0
10	ไม่ติดตั้ง	20.11	0.204	10.14
	ติดตั้ง	23.88	0	0
11	ติดตั้ง	20.73	0	0
	ไม่ติดตั้ง	25.31	0.285	11.25
12	ติดตั้ง	17.53	0	0
	ไม่ติดตั้ง	27.12	0.309	11.41
13	ไม่ติดตั้ง	21.7	0.246	11.32
	ติดตั้ง	18.32	0	0
14	ติดตั้ง	25.66	0	0
	ไม่ติดตั้ง	21.44	0.263	12.26
15	ไม่ติดตั้ง	19.85	0.255	12.85
	ติดตั้ง	24.1	0	0

ตารางที่ 11 (ต่อ)

ช่วงที่	สถานะ	ปริมาณน้ำเชื่อมที่ส่ง (m ³)	ปริมาณน้ำเชื่อมที่รั่วไหล (L)	เปอร์เซ็นต์การ รั่วไหล (x 10 ⁻⁴)
16	ติดตั้ง	23.92	0	0
	ไม่ติดตั้ง	20.53	0.274	13.35
17	ไม่ติดตั้ง	20.1	0.267	13.28
	ติดตั้ง	21.27	0	0
18	ติดตั้ง	24.81	0	0
	ไม่ติดตั้ง	18.22	0.289	15.86
19	ติดตั้ง	21.52	0	0
	ไม่ติดตั้ง	19.65	0.324	16.49
20	ไม่ติดตั้ง	20.78	0.336	16.19
	ติดตั้ง	18.14	0	0
21	ติดตั้ง	17.5	0	0
	ไม่ติดตั้ง	19.47	0.351	18.03
22	ไม่ติดตั้ง	20.32	0.413	20.32
	ติดตั้ง	19.13	0	0
23	ไม่ติดตั้ง	17.07	0.359	21.03
	ติดตั้ง	20.64	0	0
24	ติดตั้ง	17.92	0	0
	ไม่ติดตั้ง	18.55	0.429	23.17
25	ติดตั้ง	18.56	0	0
	ไม่ติดตั้ง	18.2	0.426	23.43
26	ไม่ติดตั้ง	18.78	0.423	22.51
	ติดตั้ง	20.66	0	0
27	ติดตั้ง	24.51	0	0
	ไม่ติดตั้ง	17.25	0.420	24.37
28	ไม่ติดตั้ง	24.56	0.605	24.63
	ติดตั้ง	21.36	0	0
29	ติดตั้ง	22.32	0	0
	ไม่ติดตั้ง	24.14	0.592	24.51
30	ไม่ติดตั้ง	23.17	0.579	24.98
	ติดตั้ง	19.58	0	0

จากตารางที่ 11 จะเห็นว่าปริมาณน้ำเชื่อมที่ส่งในช่วง 20 นาทีในทุกครั้งการทดลองมีปริมาณที่ไม่เท่ากันซึ่งสาเหตุน่าจะเกิดจากค่าปริมาตรของน้ำเชื่อมที่มีการเปลี่ยนแปลงทำให้ความหนืดของน้ำเชื่อมเปลี่ยนแปลงไป โดยลักษณะการรั่วไหลจะพบว่าน้ำเชื่อมที่มีค่าปริมาตรต่ำจะรั่วไหลได้ง่ายกว่าน้ำเชื่อมที่มีค่าปริมาตรสูงแต่น้ำเชื่อมที่มีค่าปริมาตรต่ำจะมีปริมาณน้ำตาลน้อยกว่าน้ำเชื่อมที่มีปริมาตรสูง

จากผลการทดลองพบว่าตลอดระยะเวลา 30 วันระบบที่ทำการติดตั้งเครื่องป้องกันการรั่วไหลไม่พบการรั่วไหลของน้ำเชื่อมส่วนในระบบที่ไม่ติดตั้งอุปกรณ์พบว่ามีการรั่วไหลเกิดขึ้นโดยมีแนวโน้มในการรั่วไหลสูงขึ้นตามอายุการใช้งานของเครื่องจักร ดังแสดงในภาพที่ 45



ภาพที่ 45 ปริมาณการรั่วไหลที่เกิดขึ้นในระบบที่ติดตั้งและไม่ได้ทำการติดตั้งอุปกรณ์

จากภาพที่ 45 แสดงปริมาณการรั่วไหลของน้ำเชื่อมโดยเทียบกับปริมาณน้ำเชื่อมที่ขนถ่ายในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์จะแสดงให้เห็นว่าระบบมีแนวโน้มการรั่วไหลสูงขึ้นเนื่องจากอายุการใช้งานของระบบ โดยอายุการใช้งานของระบบ Seal คอเพลลาขึ้นอยู่กับคุณภาพของงานซ่อมบำรุงและการออกแบบเครื่องจักร เนื่องจากปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์เป็นปั้มที่ใช้มอเตอร์ที่มีความเร็วรอบถึง 3,000 rpm ซึ่งความถี่หรือของขึ้นส่วนต่างๆจะสูงกว่ามอเตอร์ที่มีความเร็วรอบน้อยกว่า อีกทั้งในการซ่อมบำรุงทั่วไปไม่มีการทำ Balance ใบพัดปั้มซึ่งในกรณีความเร็วรอบสูงจะเกิด Unbalance สูงตามไปด้วยทำให้เกิดการสั่นหรือเร็วขึ้น และบริเวณผิวงานบนเพลลาบริเวณที่ทำการติดตั้ง Seal ไม่ได้ทำการเจียรนัยพื้นผิว (ใช้การกลึงละเอียด) ทำให้คุณภาพผิวงานไม่ได้ตามมาตรฐานทำให้ Seal ที่สัมผัสกับเพลลาสึกหรอในอัตราที่สูงกว่า

จากการที่ออกแบบการทดลองให้ทดสอบการใช้อุปกรณ์วันละ 1 ครั้งทำให้การทดสอบวันที่ 7,11,14,19 และ 23 พบว่าอุปกรณ์ไม่สามารถใช้งานได้เนื่องจากจะมีน้ำตาลจับตัวเป็นก้อนแข็งอยู่ภายในท่อช่วง Venturi และสายยางคูดกลับ ก่อนการทดลองจึงต้องถอดอุปกรณ์มาทำการล้างน้ำตาลออกก่อน สาเหตุคือน้ำเชื่อมมีค่าความบริสุทธิ์สูงถ้าปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมิแวดล้อมจะทำให้แข็งตัวและระบบอาจเกิดการอุดตันดังนั้นในการใช้งานจริง ควรใช้อุปกรณ์ให้ต่อเนื่องเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว

ผลการทดสอบผลกระทบของคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการติดตั้งระบบ

การทดสอบหาผลกระทบต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์นั้น ได้ทำการเก็บตัวอย่างครั้งละ 2 ตัวอย่างโดยสลับกันระหว่างช่วงติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ สาเหตุที่ต้องเก็บตัวอย่างที่เวลาใกล้เคียงกันเนื่องจากคุณภาพของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น วัตถุดิบ การเกิดปฏิกิริยาเคมีที่สมบูรณ์ของกระบวนการก่อนหน้าเป็นต้น

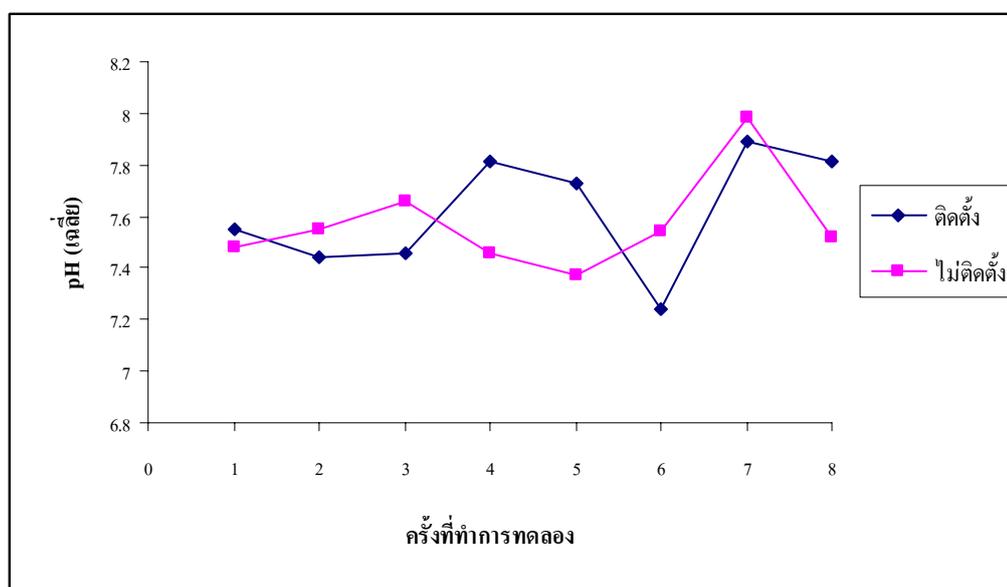
การทดสอบผลกระทบของคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการติดตั้งระบบ ประกอบด้วยการหาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าบริกซ์ (Brix) ค่าโพลาริเซชัน (Pol.) และค่าสี (Color) ได้ผลดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์

คุณภาพควบคุม	ค่าเฉลี่ย		
	ติดตั้งระบบ	ไม่ติดตั้งระบบ	ค่าควบคุมโรงงาน
pH	7.62	7.57	>7
Brix (° BX)	60.13	60.21	> 52
Pol.	60.11	60.33	>55
Color (ICUMSA)	228.13	225.13	< 250

จากตารางที่ 12 จะเห็นว่าค่าเฉลี่ยของระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีค่าอยู่ในช่วงของการควบคุมคุณภาพ

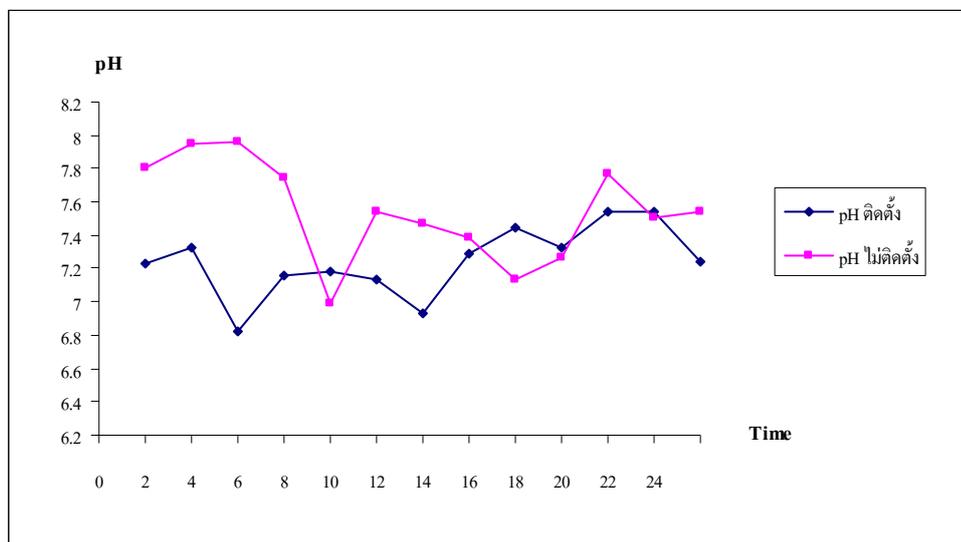
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)



ภาพที่ 46 ค่า pH ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการวิเคราะห์ครั้งที่ 1-8

ในภาพที่ 46 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 8 ครั้งพบว่าค่า pH ของระบบที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีค่าอยู่ในค่าควบคุมของทางโรงงานซึ่งเมื่อนำข้อมูลทั้ง 2 ชุดมา

วิเคราะห์ทางสถิติพบว่าในการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับระบบที่ไม่ติดตั้ง



ภาพที่ 47 ผลการวัดค่า pH ในการทดลองครั้งที่ 6

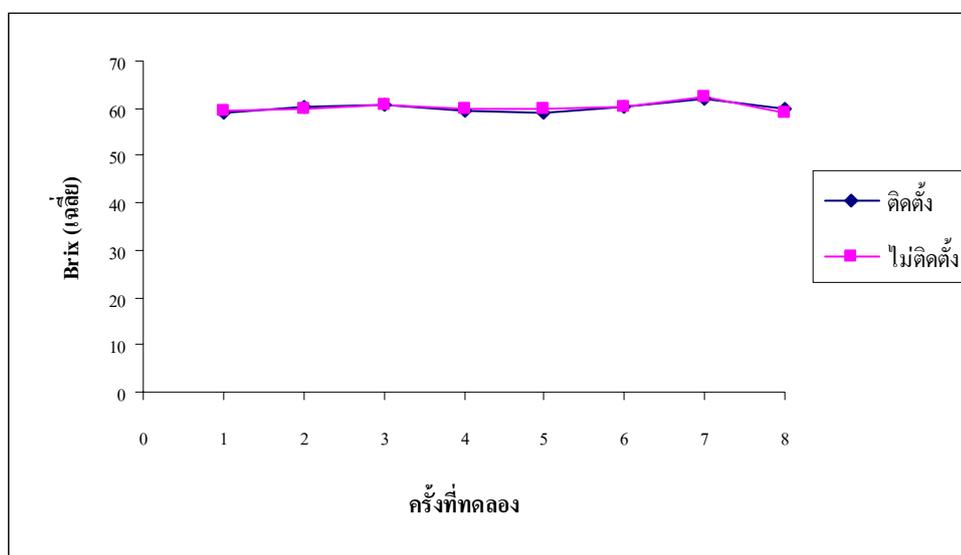
ในการเก็บตัวอย่างพบว่าค่า pH ในการทดสอบระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ของการทดสอบครั้งที่ 6 ชั่วโมงที่ 6 และ 14 มีค่า 6.82 และ 6.93 ตามลำดับซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าควบคุม คิดเป็น 2% ของปริมาณตัวอย่างทั้งหมด และในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์พบค่าต่ำกว่าคุณภาพที่กำหนดในการทดสอบครั้งที่ 6 ชั่วโมงที่ 10 มีค่า 6.99 ซึ่งคิดเป็น 1% โดยเมื่อข้อมูลในการทดลองครั้งที่ 6 มาพิจารณาตามภาพที่ 47 พบว่าค่าที่ไม่ได้ตามค่าควบคุมเกิดเฉพาะการทดสอบในครั้งที่ 6 เท่านั้น ระหว่างชั่วโมงที่ 6-14 ซึ่งปัญหาดังกล่าวน่าเกิดจากปัจจัยอื่นในกระบวนการผลิต เช่น ขั้นตอนการลดค่าสี ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbonation) โดยใช้ร่วมกับปูนขาว ในกระบวนการนี้จะได้น้ำปูนขาวเพื่อปรับค่า pH ของน้ำอ้อยให้มีสภาพเป็นด่างประมาณ 10-11 จากนั้นจึงนำไปผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สลับกับการเติมน้ำปูนขาว นานประมาณ 8-12 นาที โดยควบคุมให้ค่า pH อยู่ระหว่าง 10-11 และเกิดการตกตะกอนของสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ฟอกสีน้ำเชื่อมในเกือบทุกโรงงาน เพราะไม่เป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงานและเครื่องจักรอุปกรณ์การผลิตต่างๆ (สมบัติ, 2546) ปฏิกริยาเคมีหลักที่เกิดขึ้น ได้แก่



ในกระบวนการนี้จะใส่น้ำปูนขาวเพื่อปรับค่า pH ของน้ำอ้อยให้มีสภาพเป็นด่างประมาณ 10-11 จากนั้นจึงนำไปผ่านก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สลับกับการเติมน้ำปูนขาว นานประมาณ 8-12 นาที โดยควบคุมให้ค่า pH อยู่ระหว่าง 10-11

ค่า pH ที่มีค่าต่ำกว่าค่าควบคุมจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำตาลเนื่องจากการแตกตัวของซูโครสเป็นกลูโคสและฟรุกโตส โดยในสถานะที่อุณหภูมิสูงและ pH ต่ำจะทำให้อัตราการแตกตัวของน้ำตาลซูโครสสูงขึ้น

ค่าบริกซ์ (Brix)



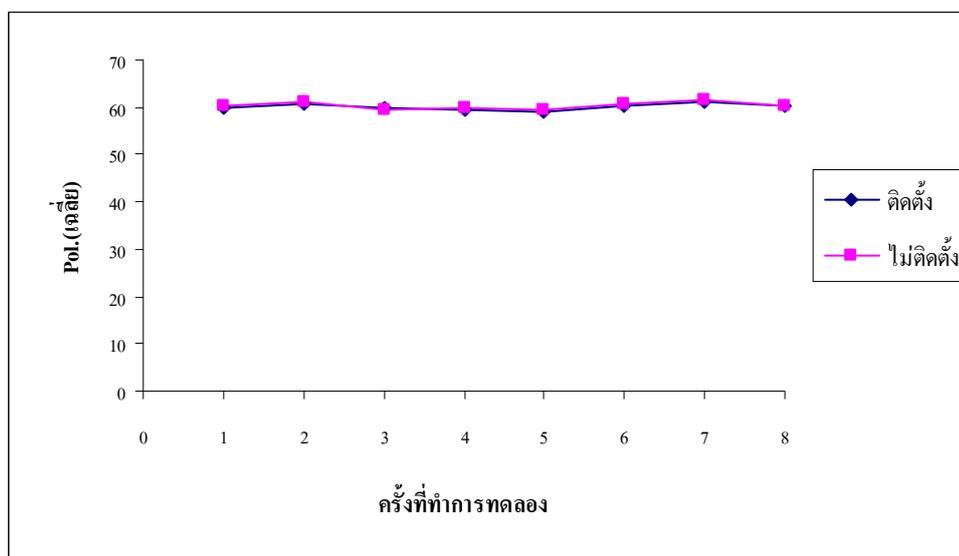
ภาพที่ 48 ค่าบริกซ์ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการวิเคราะห์ครั้งที่ 1-8

ในภาพที่ 48 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 8 ครั้งพบว่าค่า บริกซ์ ของระบบที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีค่าสูงกว่าค่าควบคุมของทางโรงงานที่กำหนดไว้ว่าค่าบริกซ์ของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ต้องไม่ต่ำกว่า 52 ° BX ซึ่งเมื่อนำข้อมูลทั้ง 2 ชุดมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าในการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับระบบที่ไม่ติดตั้ง

ค่าบริคซ์คือค่าปริมาณของแข็งในสารละลายโดยมวล เมื่อพิจารณาระบบในการติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวจะพบว่าไม่มีการนำน้ำหรือของเหลวอื่นเข้ามาเพิ่มในระบบดังนั้นสรุปได้ว่าไม่มีโอกาสที่อุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลจะส่งผลทำให้ค่าบริคซ์ลดลง

ในการควบคุมกระบวนการถ้ำกรณีที่ค่าบริคซ์มีค่าลดลงแสดงว่ามีการเพิ่มน้ำเข้ามาสู่ระบบซึ่งโดยวัตถุประสงค์ของการทำน้ำตาลคือควบคุมให้สารละลายอิมัลชันเกิดตกผลึกดังนั้นถ้ามีการเพิ่มน้ำในระบบก็ต้องใช้พลังงานในการระเหยน้ำส่วนเกินออกไปส่งผลให้กระบวนการใช้พลังงานสูงขึ้น ต้นทุนในการผลิตก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย

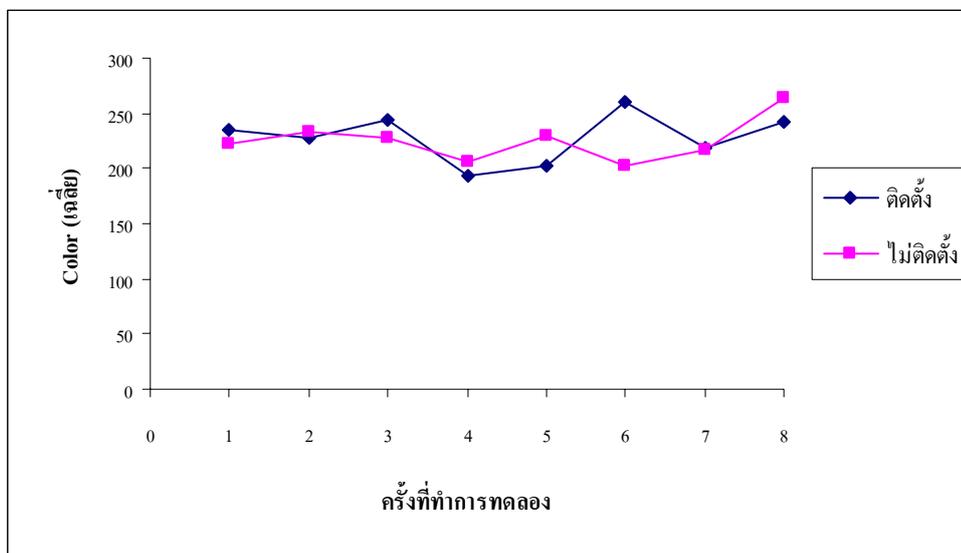
ค่าโพลาริเซชัน (Pol.)



ภาพที่ 49 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบค่าโพลทั้ง 8 ครั้ง

ในภาพที่ 49 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 8 ครั้งพบว่าค่าโพลาริเซชันของระบบที่ทำการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีค่าสูงกว่าค่าควบคุมของทางโรงงานที่กำหนดไว้ว่าค่าโพลาริเซชัน ของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ต้องมีค่าไม่ต่ำกว่า 55 ซึ่งเมื่อนำข้อมูลทั้ง 2 ชุดมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าในการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับระบบที่ไม่ติดตั้ง

ค่าสี (Color)



ภาพที่ 50 ค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบค่าสีทั้ง 8 ครั้ง

ในภาพที่ 50 แสดงค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบทั้ง 8 ครั้งพบว่าค่าสีของระบบที่ทำการติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีค่าสีสูงเกินกว่าค่าควบคุมอย่างละ 1 ครั้งซึ่งค่าควบคุมของโรงงานที่กำหนดไว้ว่าค่าสีของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ต้องมีค่าไม่เกิน 250 ICUMSA โดยถ้าพิจารณาจากข้อมูลการทดลองทั้งหมดพบว่าเมื่อติดตั้งอุปกรณ์การดูดกลับน้ำเชื่อมมีค่าสีเกินค่าควบคุม 28 ครั้งจากการทดสอบ 96 ครั้ง คิดเป็น 29.16% ส่วนระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์พบค่าสีเกินค่าควบคุม 24 ครั้งจากการทดสอบ 96 ครั้ง คิดเป็น 25 % จะเห็นว่าค่าสีที่เกินกว่ากำหนดทั้ง 2 กรณีมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อนำข้อมูลทั้ง 2 ชุดมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าในการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีผลต่อคุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับระบบที่ไม่ติดตั้ง

ในกระบวนการผลิตมีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าสีของน้ำเชื่อม โดยเริ่มตั้งแต่กระบวนการละลายผลึกน้ำตาล (Remelt) ถ้าน้ำตาลดิบที่มีค่าสีสูงเข้ามาในระบบ ค่าสีของน้ำเชื่อมก็จะมีแนวโน้มสูงขึ้นเนื่องจากในกระบวนการลดค่าสีด้วยกระบวนการ Carbonation ประสิทธิภาพในการลดค่าสีประมาณ 70-75% และกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ผ่านเรซิน) ประสิทธิภาพในการลดค่าสีประมาณ 80-85% ซึ่งถ้าน้ำตาลดิบค่าสีสูงเข้ามาในกระบวนการก็จะทำให้ค่าสีของน้ำเชื่อมสูงขึ้นด้วย และอีกปัจจัยคือในการลดค่าสีด้วยกระบวนการ Carbonation ต้องมีการเตรียมสถานะให้

เหมาะสมต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีให้สมบูรณ์โดย ส่วนประกอบของปฏิกิริยาเคมีคือ น้ำปูนขาว (Lime Milk) ต้องควบคุมความเข้มข้นได้สม่ำเสมอและใส่น้ำปูนให้เหมาะสมกับปริมาณน้ำเชื่อมที่เข้ากระบวนการ การให้ความร้อนเพื่อเร่งปฏิกิริยาเคมีต้องสม่ำเสมอ และปริมาณคาร์บอน ไดออกไซด์ ที่ส่งมาจากปล่องเตาเผาไหม้ต้องมีปริมาณสม่ำเสมอ ซึ่งถ้าขาดอย่างหนึ่งอย่างใดการเกิดปฏิกิริยาเคมีจะไม่สมบูรณ์ทำให้ค่าสีของน้ำเชื่อมมีค่าสูงจากภาพ 50 แสดงค่าเฉลี่ยของค่าสีในการทดลองแต่ละครั้งจะเห็นว่ามีความเปลี่ยนแปลงสูง โดยเกิดมาจากปัจจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น

การวิเคราะห์สถิติเปรียบเทียบความแตกต่างของระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดูดกลับน้ำเชื่อมต่อค่า pH, Brix, Pol และ Color แสดงในภาคผนวก ข ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า น้ำเชื่อมที่ได้จากระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลมีคุณภาพเหมือนกันหรือการติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล ไม่มีผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อม

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ เปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์

เมื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบและบันทึกค่าอัตราการไหลของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ ความดันที่บริเวณทางส่งของปั๊ม และค่ากระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์ นำค่าที่ได้เหล่านี้ไปแทนค่าในสมการ (30) และ (31) เพื่อหาค่ากำลังที่เกิดขึ้นในระบบและกำลังที่ให้กับระบบ หลังจากนั้นนำค่ากำลังที่เกิดขึ้นในระบบและกำลังที่ให้กับระบบมาแทนค่าในสมการ (29) เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ ได้ดังตารางที่ 13

ตัวอย่างการคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลจากการทดสอบครั้งที่ 1 คำนวณได้ดังนี้

อัตราการไหลของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์	=	20.48	kg/s
ความดันที่บริเวณทางส่งของปั๊ม	=	27.21	m
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้มอเตอร์	=	19.8	A

แทนค่าในสมการ (30) เพื่อหาค่ากำลังที่เกิดขึ้นในระบบ

$$wkW = \frac{9.8QH(sp.gr.)}{1000}$$

$$w kW = \frac{9.8 \times 20.48 \times 27.21 \times 1.319}{1000}$$

$$w kW = 7.20 \text{ kW}$$

แทนค่าในสมการ (31) เพื่อหาค่ากำลังที่ให้กับระบบ

$$kW = \frac{V \times I \times \sqrt{3} \times \cos \varphi}{1000}$$

$$kW = \frac{380 \times 19.8 \times \sqrt{3} \times 0.9}{1000}$$

$$kW = 11.73 \text{ kW}$$

แทนค่า $w kW$ และ kW ในสมการ (29)

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{w kW}{kW} \times 100$$

$$\eta_{\text{sys}} = \frac{7.20}{11.73} \times 100$$

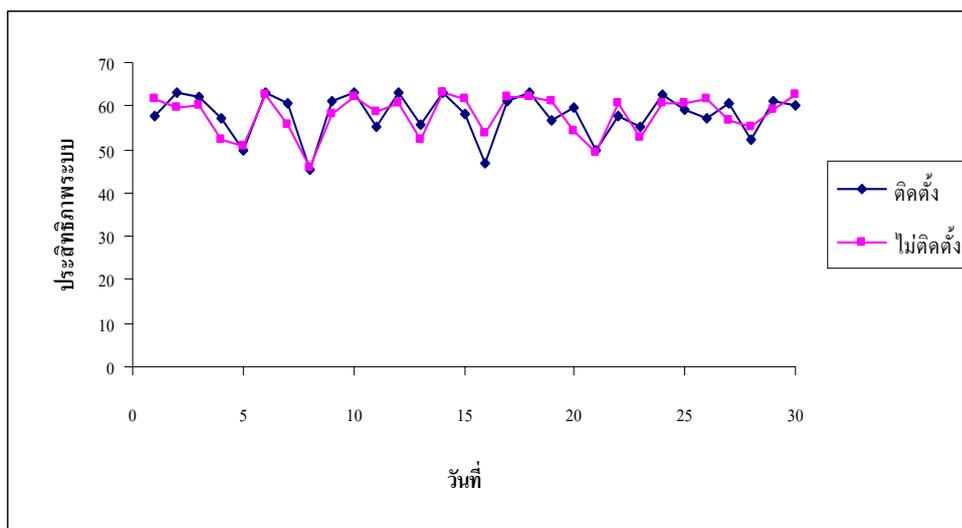
$$\eta_{\text{sys}} = 61.42$$

ตารางที่ 13 ผลการทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบโดยเปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้ง
อุปกรณ์

ครั้งที่	สถานะ อุปกรณ์	อัตราการไหล (kg/s)	ความดัน (m)	กระแสไฟฟ้า (A)	wkW	kW	η_{sys}
1	ไม่ติดตั้ง	20.48	27.21	19.8	7.20	11.73	61.42
	ติดตั้ง	20.92	25.51	20.2	6.90	11.97	57.65
2	ไม่ติดตั้ง	20.70	26.31	20	7.04	11.85	59.42
	ติดตั้ง	20.26	27.91	19.5	7.31	11.55	63.28
3	ติดตั้ง	20.44	27.41	19.7	7.24	11.67	62.06
	ไม่ติดตั้ง	20.63	26.51	19.9	7.07	11.79	59.97
4	ไม่ติดตั้ง	21.36	23.11	20.7	6.38	12.26	52.04
	ติดตั้ง	20.96	25.31	20.3	6.86	12.02	57.03
5	ไม่ติดตั้ง	20.70	21.51	19.2	5.76	11.37	50.61
	ติดตั้ง	21.47	22.11	20.8	6.14	12.32	49.80
6	ติดตั้ง	20.22	27.91	19.5	7.29	11.55	63.15
	ไม่ติดตั้ง	20.41	27.61	19.7	7.28	11.67	62.42
7	ติดตั้ง	20.55	26.81	19.8	7.12	11.73	60.72
	ไม่ติดตั้ง	21.07	24.81	20.4	6.76	12.08	55.92
8	ไม่ติดตั้ง	21.73	20.51	21.1	5.76	12.50	46.09
	ติดตั้ง	21.80	20.11	21.2	5.67	12.56	45.13
9	ติดตั้ง	20.66	26.51	19.5	7.08	11.55	61.29
	ไม่ติดตั้ง	20.92	25.51	20.1	6.90	11.91	57.94
10	ติดตั้ง	20.19	27.91	19.5	7.28	11.55	63.06
	ไม่ติดตั้ง	20.44	27.41	19.7	7.24	11.67	62.06
11	ไม่ติดตั้ง	20.77	26.11	20.1	7.01	11.91	58.88
	ติดตั้ง	21.10	24.51	20.4	6.68	12.08	55.32
12	ติดตั้ง	20.22	27.91	19.5	7.29	11.55	63.15
	ไม่ติดตั้ง	20.55	26.81	19.8	7.12	11.73	60.72
13	ไม่ติดตั้ง	21.32	23.21	20.7	6.40	12.26	52.17
	ติดตั้ง	21.07	24.81	20.4	6.76	12.08	55.92
14	ติดตั้ง	20.33	27.81	19.6	7.31	11.61	62.95
	ไม่ติดตั้ง	20.04	27.91	19.4	7.23	11.49	62.91
15	ไม่ติดตั้ง	20.48	27.21	19.8	7.20	11.73	61.42
	ติดตั้ง	20.96	25.31	19.9	6.86	11.79	58.17

ตารางที่ 13 (ต่อ)

ครั้งที่	สถานะอุปกรณ์	อัตราการไหล (kg/s)	ความดัน (m)	กระแสไฟฟ้า (A)	wkW	kW	η_{sys}
16	ไม่ติดตั้ง	21.29	23.51	20.4	6.47	12.08	53.54
	ติดตั้ง	21.87	20.41	20.8	5.77	12.32	46.83
17	ติดตั้ง	20.19	26.81	19.4	7.00	11.49	60.89
	ไม่ติดตั้ง	20.44	27.31	19.6	7.22	11.61	62.15
18	ติดตั้ง	20.26	27.91	19.6	7.31	11.61	62.96
	ไม่ติดตั้ง	19.85	28.31	19.7	7.26	11.67	62.25
19	ไม่ติดตั้ง	20.55	26.81	19.6	7.12	11.61	61.34
	ติดตั้ง	21.10	24.31	19.8	6.63	11.73	56.53
20	ไม่ติดตั้ง	21.51	22.41	19.4	6.23	11.49	54.22
	ติดตั้ง	20.30	27.41	20.3	7.19	12.02	59.81
21	ติดตั้ง	21.51	21.31	20.1	5.93	11.91	49.77
	ไม่ติดตั้ง	21.73	21.01	20.3	5.90	12.02	49.08
22	ไม่ติดตั้ง	20.59	26.81	19.9	7.14	11.79	60.53
	ติดตั้ง	20.92	25.51	20.2	6.90	11.97	57.65
23	ไม่ติดตั้ง	21.32	23.21	20.4	6.40	12.08	52.93
	ติดตั้ง	21.14	24.31	20.3	6.64	12.02	55.24
24	ติดตั้ง	20.22	27.91	19.7	7.29	11.67	62.51
	ไม่ติดตั้ง	20.37	26.71	19.6	7.03	11.61	60.58
25	ไม่ติดตั้ง	20.55	26.81	19.8	7.12	11.73	60.72
	ติดตั้ง	20.77	26.01	20	6.98	11.85	58.94
26	ติดตั้ง	20.99	25.21	20.2	6.84	11.97	57.17
	ไม่ติดตั้ง	20.19	27.91	19.9	7.28	11.79	61.79
27	ติดตั้ง	20.59	26.81	19.9	7.14	11.79	60.53
	ไม่ติดตั้ง	21.03	25.11	20.4	6.83	12.08	56.49
28	ไม่ติดตั้ง	21.29	23.51	19.7	6.47	11.67	55.44
	ติดตั้ง	21.47	22.11	19.9	6.14	11.79	52.06
29	ติดตั้ง	20.44	26.71	19.5	7.06	11.55	61.10
	ไม่ติดตั้ง	19.82	26.91	19.7	6.89	11.67	59.08
30	ติดตั้ง	20.63	26.51	19.9	7.07	11.79	59.97
	ไม่ติดตั้ง	20.41	27.61	19.7	7.28	11.67	62.42



ภาพที่ 51 ค่าประสิทธิภาพของระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล

จากตารางที่ 13 นำค่าอัตราการไหลและความดันมาแทนค่าในสมการ (2) เพื่อหาค่าล้างที่เกิดขึ้นกับระบบ (wkW) นำค่ากระแสไฟฟ้ามาแทนค่าในสมการ (3) เพื่อหาค่าล้างที่ให้กับระบบ (kW) และนำค่า wkW กับ kW มาแทนค่าในสมการ (1) เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบ พบว่าประสิทธิภาพของระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 58.02 ส่วนประสิทธิภาพของระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 57.89 ซึ่งค่าประสิทธิภาพในแต่ละช่วงการทดลองสามารถแสดงดังภาพที่ 51

ประสิทธิภาพที่ทำการทดสอบเป็นประสิทธิภาพเปรียบเทียบของระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งประกอบไปด้วยมอเตอร์ ปั้มน้ำ ระบบท่อและวาล์วและรวมถึงสมบัติของน้ำเชื่อมอีกด้วย ไม่ได้เป็นประสิทธิภาพของอุปกรณ์ใดอุปกรณ์หนึ่ง จึงมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบซึ่งดูได้จากความแปรปรวนของค่าประสิทธิภาพในแต่ละการทดสอบดังภาพที่ 51

การวิเคราะห์สถิติเปรียบเทียบความแตกต่างของระบบที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ดูกลับน้ำเชื่อมต่อค่าประสิทธิภาพของระบบซึ่งแสดงในภาคผนวก ข สรุปได้ว่าการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของระบบปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์

ผลการวิเคราะห์และประเมินผลเชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

ในการทดสอบการรั่วไหลบริเวณคอเพลาพบว่าอัตราการรั่วไหลเฉลี่ยอยู่ที่ $1.384 \times 10^{-3} \%$ โดยฤดูกาลผลิตน้ำตาลรีไฟน์ปีละ 150,000 ตัน ดังนั้นคิดปริมาณน้ำเชื่อมที่มีการรั่วไหลอยู่ที่ 2.62 m^3 /ปี

ผลการประเมินค่าใช้จ่ายในการทำงาน

ค่าใช้จ่ายในการทำงานของเครื่องจักร คำนวณได้จาก ต้นทุนคงที่ (Fixed Cost) และต้นทุนผันแปร (Variable Cost) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ต้นทุนคงที่ (Fixed cost)

ราคาเครื่องที่ทำการประเมินไว้ (ตารางที่ 9) เท่ากับ 1,788 บาท มูลค่าซากเครื่องเมื่อสิ้นปีที่ 10 คงเหลือ 10 % ของราคาเครื่อง

ดังนั้นราคาซากเครื่อง = $(10/100) \times 1,788 = 178.8$ บาท

ค่าเสื่อมราคา (DP) = $(1,788 - 178.8) / 10 = 160.92$ บาท/ปี

ดอกเบี้ยหรือค่าเสียโอกาส (Interest on Investment) คิดค่าเสียโอกาส

$$I = \left(\frac{P + S}{2} \right) \times \left(\frac{i}{100} \right) \quad \text{โดยที่ } i \text{ คือ อัตราดอกเบี้ยต่อปี (เปอร์เซ็นต์)} \quad (36)$$

กำหนดให้อัตราดอกเบี้ยต่อปี เท่ากับ 6.00 % (อัตราดอกเบี้ยเงินกู้ธนาคารกรุงเทพ เมื่อวันที่ 10/04/09)

$$\text{ดังนั้น ค่าเสียโอกาสต่อปี} = \left(\frac{178.8 + 160.92}{2} \right) \times \left(\frac{6.00}{100} \right) = 10.192 \text{ บาทต่อปี}$$

รวมต้นทุนคงที่ต่อปี (Fixed Cost) = $160.92 + 10.192 = 171.112$ บาทต่อปี

ต้นทุนผันแปร (Variable Cost)

ค่าบำรุงรักษา (Repair and Maintenance) บำรุงรักษาปีละ 1 ครั้ง พนักงาน 1 คน ครั้งละ 4 ชั่วโมงทำงาน (0.5 Manhour) ค่าจ้างพนักงาน 8 ชั่วโมง (1 Manhour) คิดเป็นเงิน 235 บาท ดังนั้นจะเสียค่าใช้จ่ายซ่อมบำรุงปีละ 117.5 บาท

รวมต้นทุนผันแปรเท่ากับ 117.5 บาทต่อปี

คิดต้นทุนในการใช้งานของอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล โดยรวมต้นทุนคงที่กับต้นทุนผันแปรเท่ากับ $171.112 + 117.5 = 228.612$ บาทต่อปี

ตารางที่ 14 ค่าใช้จ่ายในการสร้างอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล

รายการ	จำนวน	ราคา/หน่วย (บาท)	รวม (บาท)
วัสดุอุปกรณ์			868
- วาล์วประตู 1"	1	250	250
- นิเปิล 1"	2	33	66
- ข้อต่อ 1"	2	38	76
- ข้องอ 90 องศา 1"	2	46	92
- ข้องอ 90 องศา 3/4"	1	26.5	26.50
- ข้อลด 3/4" – 1"	1	38	38
- ท่อเหล็กขนาด OD 30 x L150 mm.			320
ค่าจ้าง/ค่าแรง			920
- ค่าแรงงานกลึง	1	450	450
- ค่าแรงงานติดตั้ง (ประกอบ/ตัดแปลง)	2	235	470
รวม			1,788

ผลตอบแทนที่ได้รับ

ปริมาณน้ำตาลดิบที่นำมาผลิตน้ำตาลรีไฟน์	150,000	ตัน/ปี
คิดเป็นน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ 60°BX	250,000	ตัน/ปี
ปริมาตรน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ 60°BX	189,537.5	m ³ /ปี

การรั่วไหลที่ปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ $1.384 \times 10^{-3} \%$ (ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบ)

คิดเป็นน้ำเชื่อมที่รั่วไหล $2.62 \text{ m}^3/\text{ปี} = 3,455.78 \text{ kg/ปี}$

คิดเป็นน้ำตาล $2,073.468 \text{ kg/ปี}$

คิดเป็นมูลค่า $47,378.75 \text{ บาท/ปี}$

(ราคาน้ำตาลทรายขาวบริสุทธิ์ ณ วันที่ 1 เมษายน 2552 กิโลกรัมละ 22.85 บาท)

ดังนั้น ผลประโยชน์ที่ได้รับสุทธิ = ผลประโยชน์ที่ได้รับต่อปี – ต้นทุนต่อปี

= $47,378.75 - 228.612$

= $47,150.138 \text{ บาท/ปี}$

ระยะเวลาการคืนทุน

ระยะเวลาการคืนทุน คือ ผลหารระหว่างต้นทุนในการสร้างกับผลประโยชน์ที่ได้รับสุทธิ

ดังนั้น

ระยะเวลาการคืนทุน = ต้นทุนในการสร้าง/ผลประโยชน์ที่ได้รับสุทธิ

$$\begin{aligned} &= 1,788 / 47,150.138 \\ &= 0.038 \quad \text{ปี} \end{aligned}$$

การใช้งานค้ำทุน

$$\begin{aligned} \text{การใช้งานค้ำทุน} &= \text{ค่าใช้จ่ายคงที่} / (\text{อัตราค่าจ้าง}-\text{ค่าใช้จ่ายในการทำงาน}) \\ &= 171.112 / (29.375 - 0) \\ &= 5.83 \text{ ชม./ปี} \end{aligned}$$

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การออกแบบท่อ Venturi ที่ปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์พบว่าต้องใช้อัตราส่วนขนาดทางเข้าต่อคอคอของท่อ Venturi อย่างน้อยที่ 5:1 โดยลักษณะของท่อ Venturi ควรมีส่วนตรงก่อนเข้า Diffuser เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ มุมของ Diffuser ที่เหมาะสมคือ 15 องศา

2. การทดสอบการทำงานของท่อ Venturi พบว่าแรงดันที่ท่อ Venturi อัตราส่วน 5:1 สามารถดูดน้ำเชื่อมกลับได้ต้องมีค่าอย่างน้อย 0.66 kg/cm^2 ที่แรงดันทางออกของท่อ Venturi สูงสุด 0.2 kg/cm^2

3. การทดสอบการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมที่ติดตั้งและไม่ติดตั้งระบบพบว่าระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมมีการรั่วไหลเกิดขึ้น คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ตั้งแต่ 4.28×10^{-4} - 24.98×10^{-4} คิดเป็นการรั่วไหลเฉลี่ย 1.384×10^{-3} ส่วนระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมไม่พบการรั่วไหลของน้ำเชื่อม

4. การทดสอบผลกระทบของคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการติดตั้งระบบพบว่าเมื่อนำมาวิเคราะห์สถิติแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมไม่มีผลต่อคุณภาพของน้ำเชื่อมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าบrix (Brix), ค่าโพลาริเซชัน (Pol) และค่าสี (Color)

5. การทดสอบประสิทธิภาพของระบบปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์เปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์พบว่าประสิทธิภาพของระบบที่มีการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อม มีค่าเท่ากับ 72.52 ส่วนประสิทธิภาพของระบบที่ไม่ได้ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อม มีค่าเท่ากับ 72.35 และจากการวิเคราะห์สถิติ พบว่าการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของปั้มน้ำเชื่อมไม่มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบปั้มน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

6. ผลตอบแทนที่ได้จากการติดตั้งอุปกรณ์คือ ลดการสูญเสียน้ำตาล $2,073.468 \text{ kg/ปี}$ คิดเป็นมูลค่า $47,378.75$ บาท/ปี เมื่อหักต้นทุนในการผลิตออก 228.612 บาท/ปี จะได้ผลประโยชน์

สุทธิ 14,150.138 บาท/ปี ระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 0.038 ปี ระยะเวลาการใช้งานคุ้มทุนอยู่ที่ 5.83 ชั่วโมง/ปี

ข้อเสนอแนะ

1. มุมของ Diffuser มีผลต่อประสิทธิภาพการไหลของของไหลทางด้านส่งของท่อ Venturi มากกว่าผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการสร้าง Vacuum ของช่องแคบแต่การเกิดการไหลวนภายใน Diffuser จะทำให้อุปกรณ์เกิดการสึกหรอสูง โดยมุมที่แคบกว่าจะทำให้เกิดการหมุนวนน้อยกว่าแต่ต้องคำนึงถึงความยาวของอุปกรณ์ด้วยเนื่องจากอาจเกิดปัญหาจากสถานที่ติดตั้งและต้นทุนการผลิตจะสูงตามขึ้นด้วยเนื่องจากต้องใช้วัสดุมากขึ้น

2. การออกแบบระยะตรงในช่องแคบ Venturi ถ้ามีระยะตรงมากจะทำให้การไหลสม่ำเสมอและมีประสิทธิภาพในการสร้าง Vacuum ดีกว่าแต่ไม่ควรให้ระยะตรงยาวเกินความจำเป็นเนื่องจากเมื่อระยะยิ่งยาวการสูญเสียพลังงานเนื่องจากความฝืดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย

3. Venturi ที่อัตราส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 5:1 สามารถใช้งานได้แต่จะทำให้ความเร็วของของไหลสูงขึ้นด้วยการสึกหรอของอุปกรณ์ก็จะสูงและถ้าที่สภาวะใช้งานเดียวกันอาจเกิดการอุดตันของช่องแคบได้ง่ายกว่าเนื่องจากช่องแคบมีขนาดเล็กกว่า

4. จุดติดตั้งอุปกรณ์ควรมีระดับสูงกว่าคอเพลลาของปั้มน้อยที่สุดเนื่องจากจะสามารถลดแรงดันทางเข้าได้

5. ผลต่างระหว่างแรงดันทางเข้าและทางออกท่อ Venturi มีผลต่อความเร็วในช่วงแคบของท่อ Venturi ซึ่งถ้าผลต่างมากก็จะมีความเร็วที่ช่องแคบสูงกว่าซึ่งความเร็วที่สูงกว่าจะสามารถสร้างแรงดันลบได้สูงกว่า อย่างไรก็ตามต้องพิจารณาจุดใช้งานให้เหมาะสมเนื่องจากถ้าใช้ระบบที่ความเร็วสูงมากการสึกหรอของอุปกรณ์จะมีสูงขึ้นด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กิริติ ลีวัจนกุล. 2541. **ชลศาสตร์**. บริษัทซีเอ็ดยูเคชั่น, กรุงเทพฯ.
- จิระพล ฉายัษฐิต. 2546. **ปั๊ม** หอยโข่ง, น. 252-255. **ในเครื่องกลชุดที่ 1**. บริษัทเอ็มแอนอีจำกัด, กรุงเทพฯ.
- นীরนาท. 2546. **ปั๊ม** หอยโข่ง, น. 178-183. **ในระบบท่อ วาล์ว ปั๊ม**. บริษัทเอ็มแอนอีจำกัด, กรุงเทพฯ.
- ทวิช จิตรสมบุญ. 2004. **กลศาสตร์ของไหล**. บริษัทสำนักพิมพ์ท็อปจำกัด, กรุงเทพฯ.
- วิบูลย์ บุญทโรกุล. 2529. **ปั๊มและระบบดูดสูบน้ำ**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- วีระชัย ลิ้มพรชัยเจริญ และ พงษ์ศักดิ์ ชินนาบุญ. 2544. **กลศาสตร์ของไหล 1**. แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- สมบัติ ขอทวีวัฒนา. 2546. **เทคโนโลยีน้ำตาล**. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย (สอน.). 2550. **รายงานประจำปี 2550**.
- Anonymous. 2009. **Sucrose Loss in a Cane Sugar Factory**. Sugar Engineer's Library.
<http://www.sugartech.co.za/search/index.php>, November 21, 2008.
- Frank, M. W. 2001. **Fluid Mechanics**. McGraw-Hill Book Company, U.S.A.
- Karassik, I.J., W.C. Krutzsch, W.H. Fraser and J.P. Messina. 1986. **Pump Handbook**. McGraw-Hill Book Company, USA.

Karassik, I.J., Roy Carter. 1960. **Centrifugal Pump**. McGraw-Hill Book Company, U.S.A.

Kreith, F., S.A. Berger. *et. al.* 1999. **Fluid Mechanics**. *Mechanical Engineering Handbook*.
CRC Press LLC, U.S.A.

Massey, B.S. 2006. **Mechanics of Fluids**. Taylor & Francis, U.S.A.

Miller, D.S. 1990. **Internal Flow Systems**. Gulf Publishing Company, U.S.A.

Shashi Menon, E. 2004. **Liquid Pipeline Hydraulics**. Marcel Dekker, Inc., U.S.A.

Stepanoff. A.J. 1948. **Centrifugal and Axial Flow Pumps Theory, Design and Application**.
Ingersoll-Rand Company, USA

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ข้อมูลการทดลอง

การทดสอบผลกระทบของคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการติดตั้งระบบ

การทดสอบผลกระทบของคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการติดตั้งระบบ ประกอบด้วยค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความหวาน (Brix) ค่าโพล (Pol) และค่าสี (Color) โดยทำการทดลองทั้งหมด 8 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเชื่อมทุก 2 ชั่วโมง มีผลการทดลองดังตารางผนวกที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8

ตารางผนวกที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ ครั้งที่ 1

TIME	BX.		POL.		pH		Col.	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
2	58.4	60.48	58.38	61.29	8.09	7.64	215	196
4	58.16	58.26	60.73	63.63	7.63	7.57	176	227
6	57.84	59.64	62.96	61.48	7.68	7.62	272	233
8	57.86	59.38	59.72	61.53	7.44	7.64	224	226
10	57.96	59.3	58.95	58.99	7.48	7.54	213	185
12	57.94	59.78	60.4	59.56	7.57	7.42	208	224
14	61.2	60.72	60.84	58.33	7.48	7.3	211	232
16	60.06	59.96	58.94	57.82	7.46	7.46	214	216
18	59.96	59.44	56.15	57.72	7.42	7.23	200	215
20	59.34	59.48	58.93	60.03	7.47	7.57	326	289
22	59.76	58.08	62.6	61.28	7.36	7.39	349	213
24	58.8	59.38	58.86	61.2	7.47	7.32	217	206
Average	58.94	59.49	59.79	60.24	7.55	7.48	235	222

ตารางผนวกที่ 2 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และ ไม่ติดตั้งอุปกรณ์
ครั้งที่ 2

TIME	BX.		POL.		pH		Col.	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
2	55.44	60.24	59.55	61.21	7.67	7.4	248	166
4	57.84	59.04	62.73	61.02	7.24	7.44	179	194
6	59.64	59.88	60.53	62.41	7.14	7.56	214	232
8	61.24	58.98	60.67	59.94	7.48	7.61	201	238
10	61.38	58.48	58.25	60.25	7.45	7.52	232	172
12	61.3	58.7	59.61	59.81	7.44	7.51	267	196
14	61.68	60.24	60.97	59.88	7.37	7.69	202	276
16	61.12	59.72	61.1	60.82	7.61	7.68	237	271
18	60.8	60.34	60.85	62	7.59	7.9	227	296
20	61.6	61.18	60.84	61.78	7.83	7.51	243	231
22	61.56	61.44	61.32	61.06	7.24	7.35	225	304
24	61.7	60.94	60.51	61.44	7.26	7.4	261	214
Average	60.44	59.93	60.58	60.97	7.44	7.55	228	233

ตารางผนวกที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์
ครั้งที่ 3

TIME	BX.		POL.		pH		Col.	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
2	61.68	60.64	61.04	59.09	7.52	7.4	309	199
4	61.42	61.06	60.34	61.24	7.48	7.48	255	187
6	60.48	59.04	59.24	57.99	7.49	7.45	290	241
8	61.78	62.54	59.04	61.1	7.48	7.86	205	238
10	61.44	62.18	59.33	59.01	7.46	7.85	269	280
12	60.16	58.88	59.63	57.57	7.67	7.8	241	238
14	59.88	61.68	61.13	60.5	7.83	7.58	248	343
16	59.96	61.86	60.98	59.87	7.49	8.08	249	283
18	60.18	60.46	60.13	60.98	7.17	7.72	189	204
20	60.44	60.76	59.03	57.55	7.34	7.8	251	162
22	62.52	60.96	59.23	60.55	7.3	7.5	256	213
24	60.3	60.34	59.25	58.17	7.33	7.43	170	154
Average	60.85	60.87	59.86	59.47	7.46	7.66	244	228

ตารางผนวกที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์
ครั้งที่ 4

TIME	BX.		POL.		pH		Col.	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
2	59.28	58.32	58.81	59.2	7.6	7.55	127	201
4	60.36	58.44	59.7	58.21	7.53	7.56	183	244
6	59.88	58.2	59.72	57.68	7.67	7.67	243	333
8	59.76	58.32	59.27	57.72	8.33	7.97	259	304
10	58.68	58.2	57.99	57.62	8.34	7.58	311	268
12	59.4	60.84	58.91	60.15	8.29	7.58	242	163
14	59.52	62.4	60.25	61.47	7.83	7.28	173	132
16	59.52	60.84	58.94	60.5	7.76	7.42	165	104
18	57.12	60.9	56.55	60.82	7.54	7.26	135	178
20	59.76	61.08	61.76	60.94	7.75	7.1	149	190
22	60.24	61.8	59.96	61.79	7.62	7.3	142	165
24	60.48	61.56	62.89	61.02	7.42	7.24	183	193
Average	59.5	60.08	59.56	59.76	7.81	7.46	193	206

ตารางผนวกที่ 5 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์
ครั้งที่ 5

TIME	BX.		POL.		pH		Col.	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
2	59.28	60.36	58.81	60.18	7.48	7.6	247	211
4	59.04	60.72	58.48	60.45	7.4	7.62	283	199
6	58.32	58.92	57.86	58.66	8.18	7.43	200	185
8	59.4	59.04	59.92	58.85	8.25	7.53	132	198
10	59.52	57.96	58.32	57.93	8.03	7.51	229	209
12	58.92	58.08	58.83	57.87	8.04	7.17	162	228
14	58.32	59.52	60.25	59.4	7.68	7.16	161	273
16	55.8	60.48	55.21	60.45	7.65	7.36	210	208
18	60.12	60.84	60.47	60.33	7.58	7.38	253	273
20	59.88	60.12	59.35	59.64	7.35	7.27	167	240
22	60.36	60.12	59.31	59.53	7.48	7.23	192	292
24	61.32	60.96	60.36	60.66	7.61	7.17	202	237
Average	59.19	59.76	58.93	59.50	7.73	7.37	203	229

ตารางผนวกที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์
ครั้งที่ 6

TIME	BX.		POL.		pH		Col.	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
2	59.4	60.04	59.99	61.65	7.23	7.8	266	225
4	59.72	60.42	61.17	62.68	7.33	7.95	316	192
6	60.06	59.16	61.05	62.38	6.82	7.96	338	241
8	59.54	59.72	62.86	61.15	7.16	7.75	271	185
10	58.68	60.08	59.83	58.66	7.18	6.99	220	187
12	60.76	59.8	59.15	58.67	7.14	7.54	277	169
14	61.92	60.96	61.02	60.55	6.93	7.47	233	214
16	61.8	59.28	58.62	60.16	7.29	7.39	217	252
18	61.76	59.56	62.29	61.69	7.44	7.14	281	207
20	59.34	61.04	59.13	60.52	7.33	7.26	230	182
22	59.64	62.52	59.53	61.04	7.54	7.77	245	194
24	59.68	58.7	61.13	60.34	7.54	7.5	242	183
Average	60.19	60.11	60.48	60.79	7.24	7.54	261	203

ตารางผนวกที่ 7 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์
ครั้งที่ 7

TIME	BX.		POL.		pH		Col.	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
2	62.04	62.64	62.93	61.31	7.95	8.23	186	204
4	63.24	61.68	62.02	60.22	7.9	7.84	196	218
6	60.12	60.84	59.04	60.44	7.71	8.02	226	183
8	60.06	60.48	61.03	60.25	8.02	7.97	157	165
10	60.48	62.4	60.03	61.3	8.03	8.21	262	169
12	59.88	63.84	59.63	62.44	8.18	8.16	373	206
14	62.04	63.96	61.36	62.42	7.51	7.92	233	265
16	62.64	63.96	62.13	62.98	7.57	7.88	238	225
18	61.68	62.52	60.48	62.21	7.75	8.1	155	230
20	62.88	62.52	61.49	62.47	7.65	7.72	238	219
22	63.12	62.4	61.42	62.23	8.22	7.78	174	240
24	64.08	62.16	62.69	61.7	8.24	7.97	193	270
Average	61.86	62.45	61.19	61.66	7.89	7.98	219	216

ตารางผนวกที่ 8 ผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเชื่อมบริสุทธิ์ โดยติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์
ครั้งที่ 8

TIME	BX.		POL.		pH		Col.	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
2	60.78	61.88	59.67	59.63	8.08	7.91	223	227
4	61.06	60.02	60.38	59.24	8.01	7.62	272	233
6	57.96	60.72	59.52	60.51	7.71	7.2	193	266
8	60.44	56.02	59.76	59.95	7.86	7.27	289	260
10	60.24	55.92	59.19	59.71	7.87	7.3	230	257
12	60.84	56.92	60.5	60.12	7.88	7.22	220	245
14	62.7	57.36	60.39	59.39	7.63	7.36	263	256
16	59.84	58.02	61.86	62.1	7.67	7.25	241	298
18	59.96	59.86	60.23	59.38	7.68	7.67	276	253
20	58.46	59.46	61.99	60.44	7.78	7.42	236	313
22	58.8	60.36	61.79	62.13	7.85	7.85	243	324
24	60	61.18	60.56	60.27	7.72	8.15	262	240
Average	60.09	58.98	60.49	60.24	7.81	7.52	246	264

ภาคผนวก ข
การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติ

การทดสอบผลกระทบของคุณภาพผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการติดตั้งระบบ

การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) , ค่าบริกซ์ (Brix), ค่าโพล (Pol) และค่าสี (Color) ของผลิตภัณฑ์ โดยมีตัวแปร 2 ตัวแปร คือค่า pH, Brix, Pol และ Color ของน้ำเชื่อมก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ และค่า pH, Brix, Pol และ Color ของน้ำเชื่อมหลังการติดตั้งอุปกรณ์ ที่การทดลอง 8 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง โดยเก็บตัวอย่างน้ำเชื่อมทุก 2 ชั่วโมง มีผลการทดลองดังตารางผนวกที่ 9

ตารางผนวกที่ 9 ค่าเฉลี่ยของความเป็นกรด-ด่าง (pH), ค่าบริกซ์ (Brix), ค่าโพล (Pol) และค่าสี (Color) ของน้ำเชื่อมที่ผ่านระบบที่ติดตั้งอุปกรณ์และไม่ติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหล ที่จำนวนชั่วโมง 8 ชั่วโมง

จำนวน ชั่วโมง	BX.		POL.		pH		Color	
	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง	ติดตั้ง	ไม่ติดตั้ง
1	58.94	59.49	59.79	60.24	7.55	7.48	235	222
2	60.44	59.93	60.58	60.97	7.44	7.55	228	233
3	60.85	60.87	59.86	59.47	7.46	7.66	244	228
4	59.5	60.08	59.56	59.76	7.81	7.46	193	206
5	59.19	59.76	58.93	59.50	7.73	7.37	203	229
6	60.19	60.11	60.48	60.79	7.24	7.54	261	203
7	61.86	62.45	61.19	61.66	7.89	7.98	219	216
8	60.09	58.98	60.49	60.24	7.81	7.52	246	264

จากนั้นจึงทดสอบความสัมพัทธ์หรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ pH, Brix, Pol และ Color ของน้ำเชื่อมระหว่างการติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล ด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ข้อมูลดิบ (ตารางผนวกที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 ภาคผนวก ก) ได้ผลดังนี้

1. การทดสอบค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ได้ผลดังตารางผนวกที่ 10, 11 และ 12

ตารางผนวกที่ 10 Paired Sample Statistics ของค่า pH

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	pH	7.6171	96	0.31227	0.03187
	pH2	7.5698	96	0.27877	0.02845

โดยที่ pH1 = pH ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล
 pH2 = pH ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการไม่ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 10 Paired Sample Statistics

Mean = ค่า pH เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 7.6171 และ 7.5698 ตามลำดับ

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์

Std.Deviation = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ pH เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 0.31227 และ 0.27877 ตามลำดับ

Std. Error Mean = ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ pH เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 0.03187 และ 0.02845 ตามลำดับ

ตารางผนวกที่ 11 Paired Samples Correlations ของค่า pH

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	pH1 & pH2	96	0.208	0.042

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 11 Paired Samples Correlations

เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) ของค่า pH เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล และใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร pH1 และ pH2

H_0 : ตัวแปร pH1 และ pH2 ไม่มีความสัมพันธ์กัน

H_1 : ตัวแปร pH1 และ pH2 มีความสัมพันธ์กัน

โดยที่ $-1 \leq \text{Correlation} \leq 1$

Sig. = 0.042 แสดงว่าค่า Significance ของการทดสอบ = 0.042 < 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าค่า pH เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลมีความสัมพันธ์กัน และสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน

ตารางผนวกที่ 12 Paired Samples Test ของค่า pH

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval of				
					Mean	the Difference			
			Lower	Upper					
Pair 1	pH1 - pH2	0.04729	0.37285	0.03805	-0.02825	0.12284	1.243	95	0.217

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 12 Paired Samples Test

Pair 1	=	การหาค่าแตกต่างระหว่างค่า pH เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบ - ค่า pH เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล หรือ $d = \text{pH1} - \text{pH2}$
Mean	=	ค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่างของค่า pH ของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและ ไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล (\bar{d}) = 0.04729
Std. Deviation	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแตกต่าง (S_d) หรือ = 0.37285 = SD(pH1 - pH2)
Std. Error Mean	=	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่าง $S_{\bar{d}} = 0.03805$
95% Confidence	=	- 0.02825 < μ_d < 0.12284
t	=	ค่าสถิติทดสอบของการทดสอบ $H_0 : \mu_d = 0$ ในที่นี้ $t = 1.243$
df	=	องศาอิสระ = 96-1 = 95
Sig. (2-tailed)	=	ค่า Significance ของสถิติทดสอบ $t = 0.217$ ซึ่งมากกว่า 0.05

เนื่องจาก $t = 1.243$ มากกว่าค่า $t_{.95,95}$ ที่เปิดได้จากตารางหรือ Sig. (2-tailed) มากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (เพราะเป็นการทดสอบ 2 ด้าน) จึงยอมรับ $H_0 : \mu_d = 0$ นั่นคือค่า pH เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือพิจารณาจาก 95% ค่าประมาณแบบช่วงของ μ_d จะพบว่าค่าต่ำสุดเป็นลบในขณะที่ค่าสูงสุดเป็นบวก จึงสรุปได้ว่าค่า pH ของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. การทดสอบค่าบริกซ์ (Brix)

ได้ผลดังตารางผนวกที่ 13, 14 และ 15

ตารางผนวกที่ 13 Paired Sample Statistics ของค่าบริกซ์

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	brix1	60.1327	96	1.52566	0.15571
	brix2	60.2073	96	1.58059	0.16132

โดยที่ brix1 = brix ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล
 brix2 = brix ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 13 Paired Sample Statistics

Mean = ค่า brix เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 60.1327 และ 60.2073 ตามลำดับ

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์

Std.Deviation = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ brix เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 1.52566 และ 1.58059 ตามลำดับ

Std. Error Mean = ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ brix เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 0.15571 และ 0.16132 ตามลำดับ

ตารางผนวกที่ 14 Paired Samples Correlations ของค่าบริกซ์

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	brix1 & brix2	96	0.304	0.003

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 14 Paired Samples Correlations

เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) ของค่า brix เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล และใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร brix1 และ brix2

H_0 : ตัวแปร brix1 และ brix2 ไม่มีความสัมพันธ์กัน

H_1 : ตัวแปร brix1 และ brix2 มีความสัมพันธ์กัน

โดยที่ $-1 \leq \text{Correlation} \leq 1$

Sig. = 0.003 แสดงว่าค่า Significance ของการทดสอบ = 0.003 < 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าค่า brix เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลมีความสัมพันธ์กัน และสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน

ตารางผนวกที่ 15 Paired Samples Test ของค่าบrix

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval of				
					Mean	the Difference			
			Lower	Upper					
Pair 1	brix1 - brix2	-0.07458	1.83277	0.18706	-0.44594	0.29677	-0.399	95	0.691

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 15 Paired Samples Test

Pair 1	=	การหาค่าแตกต่างระหว่างค่า brix เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบ – ค่า brix เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล หรือ $d = \text{brix1} - \text{brix2}$
Mean	=	ค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่างของค่า brix ของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล (\bar{d}) = -0.07458
Std. Deviation	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแตกต่าง (S_d) หรือ = 1.83277 = SD (brix1 – brix2)
Std. Error Mean	=	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่าง $S_{\bar{d}} = 0.18706$
95% Confidence	=	- 0.44594 < μ_d < 0.29677
t	=	ค่าสถิติทดสอบของการทดสอบ $H_0 : \mu_d = 0$ ในที่นี้ $t = -0.399$
df	=	องศาอิสระ = 96-1 = 95
Sig. (2-tailed)	=	ค่า Significance ของสถิติทดสอบ $t = 0.691$ ซึ่งมากกว่า 0.05

เนื่องจาก $t = -0.399$ มากกว่าค่า $t_{.95,95}$ ที่เปิดได้จากตารางหรือ Sig. (2-tailed) มากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (เพราะเป็นการทดสอบ 2 ด้าน) จึงยอมรับ $H_0 : \mu_d = 0$ นั่นคือค่า brix เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือพิจารณาจาก 95% ค่าประมาณแบบช่วงของ μ_d จะพบว่าค่าต่ำสุดเป็นลบในขณะที่ค่าสูงสุดเป็นบวก จึงสรุปได้ว่าค่า brix ของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. การทดสอบค่าโพล (Pol.)

ได้ผลดังตารางผนวกที่ 16, 17 และ 18

ตารางผนวกที่ 16 Paired Sample Statistics ของค่าโพลาระยะชั้น

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	pol.1	60.1098	96	1.44633	0.14762
	pol.2	60.3281	96	1.42266	0.14520

โดยที่ Pol.1 = Pol. ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล
 Pol.2 = Pol. ของน้ำเชื่อมที่ได้จากการไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 16 Paired Sample Statistics

Mean = ค่า Pol. เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบ
 ป้องกัน
 การรั่วไหล คือ 60.1098 และ 60.3281 ตามลำดับ

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์

Std.Deviation = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของ Pol. เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบ
 และไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 1.44633 และ
 1.42266 ตามลำดับ

Std. Error Mean = ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ Pol. เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้ง
 ระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 0.14762 และ
 0.14520 ตามลำดับ

ตารางผนวกที่ 17 Paired Samples Correlations ของค่าโพลาริเซชัน

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	pol.1 & pol.2	96	0.473	0.000

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 17 Paired Samples Correlations

เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) ของค่า Pol. เกลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล และใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร Pol.1 และ Pol.2

H_0 : ตัวแปร Pol.1 และ Pol.2 ไม่มีความสัมพันธ์กัน

H_1 : ตัวแปร Pol.1 และ Pol.2 มีความสัมพันธ์กัน

โดยที่ $-1 \leq \text{Correlation} \leq 1$

Sig. = 0.000 แสดงว่าค่า Significance ของการทดสอบ = 0.000 < 0.05 จึงปฏิเสธ H_0 สรุปได้ว่าค่า Pol. เกลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลมีความสัมพันธ์กัน และสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน

ตารางผนวกที่ 18 Paired Samples Test ของค่าโพลาริเซชัน

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval of				
					Mean	the Difference			
			Lower	Upper					
Pair 1	pol.1 - pol.2	-0.21833	1.47349	0.15039	-0.51689	0.08022	-1.452	95	0.150

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 18 Paired Samples Test

Pair 1	=	การหาค่าแตกต่างระหว่างค่า Pol. เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบ – ค่า Pol. เฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการ รั่วไหล หรือ $d = \text{pol.1} - \text{pol.2}$
Mean	=	ค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่างของค่า Pol. ของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบ และไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล (\bar{d}) = -0.21833
Std. Deviation	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแตกต่าง (S_d) หรือ = 1.47349 = SD (pol.1 – pol.2)
Std. Error Mean	=	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของค่า แตกต่าง $S_{\bar{d}} = 0.150399$
95% Confidence	=	- 0.51689 < μ_d < 0.08022
t	=	ค่าสถิติทดสอบของการทดสอบ $H_0 : \mu_d = 0$ ในที่นี้ $t = -1.452$
df	=	องศาอิสระ = 96-1 = 95
Sig. (2-tailed)	=	ค่า Significance ของสถิติทดสอบ $t = 0.150$ ซึ่งมากกว่า 0.05

เนื่องจาก $t = -1.452$ มากกว่าค่า $t_{.95,95}$ ที่เปิดได้จากตารางหรือ Sig. (2-tailed) มากกว่าระดับ
นัยสำคัญที่กำหนด (เพราะเป็นการทดสอบ 2 ด้าน) จึงยอมรับ $H_0 : \mu_d = 0$ นั่นคือค่า Pol. เฉลี่ยของ
น้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
หรือพิจารณาจาก 95% ค่าประมาณแบบช่วงของ μ_d จะพบว่าค่าต่ำสุดเป็นลบในขณะที่ค่าสูงสุดเป็น
บวก จึงสรุปได้ว่าค่า Pol. ของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่
แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

4. การทดสอบค่าสี (Color)

ได้ผลดังตารางผนวกที่ 19, 20 และ 21

ตารางผนวกที่ 19 Paired Sample Statistics ของค่าสี

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	col1	228.7292	96	48.17501	4.91684
	col2	225.1979	96	44.63976	4.55603

โดยที่ col1 = ค่าสีของน้ำเชื่อมที่ได้จากการติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล
col2 = ค่าสีของน้ำเชื่อมที่ได้จากการไม่ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 19 Paired Sample Statistics

Mean = ค่าเฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 228.7292 และ 225.1979 ตามลำดับ

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์

Std.Deviation = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 48.17501 และ 44.63976 ตามลำดับ

Std. Error Mean = ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 4.91684 และ 4.55603 ตามลำดับ

ตารางผนวกที่ 20 Paired Samples Correlations ของค่าสี

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	col1 & col2	96	0.191	0.063

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 20 Paired Samples Correlations

เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) ของค่าสีเฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล และใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร col1 และ col2

H_0 : ตัวแปร col1 และ col2 ไม่มีความสัมพันธ์กัน

H_1 : ตัวแปร col1 และ col2 มีความสัมพันธ์กัน

โดยที่ $-1 \leq \text{Correlation} \leq 1$

Sig. = 0.063 แสดงว่าค่า Significance ของการทดสอบ = 0.063 > 0.05 จึงยอมรับ H_0 สรุปได้ว่าค่าสีเฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่มีความสัมพันธ์กัน

ตารางผนวกที่ 21 Paired Samples Test ของค่าสี่

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval of				
					Mean	the Difference			
			Lower	Upper					
Pair 1	col1 - col2	3.53125	59.10240	6.03211	-8.44401	15.50651	0.585	95	0.560

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 21 Paired Samples Test

Pair 1	=	การหาค่าแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบ – ค่าเฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล หรือ $d = \text{col1} - \text{col2}$
Mean	=	ค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่างของค่าสีของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล $(\bar{d}) = -3.53125$
Std. Deviation	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแตกต่าง (S_d) หรือ $= 59.10240 = \text{SD}(\text{col1} - \text{col2})$
Std. Error Mean	=	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่าง $S_{\bar{d}} = 6.03211$
95% Confidence	=	$- 8.44401 < \mu_d < 15.50651$
t	=	ค่าสถิติทดสอบของการทดสอบ $H_0 : \mu_d = 0$ ในที่นี้ $t = 0.585$
df	=	องศาอิสระ $= 96 - 1 = 95$
Sig. (2-tailed)	=	ค่า Significance ของสถิติทดสอบ $t = 0.560$ ซึ่งมากกว่า 0.05

เนื่องจาก $t = 0.585$ มากกว่าค่า $t_{.95,95}$ ที่เปิดได้จากตารางหรือ Sig. (2-tailed) มากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (เพราะเป็นการทดสอบ 2 ด้าน) จึงยอมรับ $H_0 : \mu_d = 0$ นั่นคือค่าเฉลี่ยของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือพิจารณาจาก 95% ค่าประมาณแบบช่วงของ μ_d จะพบว่าค่าต่ำสุดเป็นลบในขณะที่ค่าสูงสุดเป็นบวก จึงสรุปได้ว่าค่าสีของน้ำเชื่อมที่ติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ เปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์

การทดสอบประสิทธิภาพของระบบ เปรียบเทียบระหว่างติดตั้งและไม่ติดตั้งอุปกรณ์ โดยมีตัวแปร 2 ตัวแปร คือค่าประสิทธิภาพของระบบก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ และค่าประสิทธิภาพของระบบหลังการติดตั้ง โดยทำการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง จากนั้นจึงทดสอบความสัมพันธ์หรือเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยประสิทธิภาพของระบบระหว่างการติดตั้งระบบและไม่ได้ติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล ด้วยการวิเคราะห์ทางสถิติ ได้ผลดังตารางผนวกที่ 22, 23 และ 24

ตารางผนวกที่ 22 Paired Sample Statistics ของประสิทธิภาพระบบ

		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	effbefore	57.8850	30	4.61535	0.84264
	effafter	58.0213	30	5.00662	0.91408

โดยที่ effbefore = ประสิทธิภาพของระบบก่อนการติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล
 effafter = ประสิทธิภาพของระบบหลังการติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 22 Paired Sample Statistics

Mean = ประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยก่อนติดตั้งระบบและหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 57.8850 และ 58.0213 ตามลำดับ

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมดที่นำมาวิเคราะห์

Std.Deviation = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยก่อนติดตั้งระบบและหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 4.61535 และ 5.00662 ตามลำดับ

Std. Error Mean = ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของ ประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยก่อนติดตั้งระบบและหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล คือ 0.84264 และ 0.91408 ตามลำดับ

ตารางผนวกที่ 23 Paired Samples Correlations ของประสิทธิภาพระบบ

		N	Correlation	Sig.
Pair 1	effbefore & effafter	30	0.764	0.000

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 23 Paired Samples Correlations

เป็นการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation) ของค่าประสิทธิภาพของระบบก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล และใช้ในการทดสอบความสัมพันธ์ของตัวแปร effbefore และ effafter

H_0 : ตัวแปร effbefore และ effafter ไม่มีความสัมพันธ์กัน

H_1 : ตัวแปร effbefore และ effafter มีความสัมพันธ์กัน

โดยที่ $-1 \leq \text{Correlation} \leq 1$

Sig. = 0.000 แสดงว่าค่า Significance ของการทดสอบ = 0.000 < 0.05 จึงยอมรับ H_0 สรุปได้ว่าค่า ประสิทธิภาพของระบบก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลมีความสัมพันธ์กัน และสัมพันธ์กันในทิศทางเดียวกัน

ตารางผนวกที่ 24 Paired Samples Test ของประสิทธิภาพระบบ

		Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
		Mean	Std. Deviation	Std. Error	95% Confidence Interval				
					Mean	of the Difference			
			Lower	Upper					
Pair 1	effbefore - effafter	-0.13633	3.32221	0.60655	-1.37687	1.10420	-0.225	29	0.824

ความหมายของผลลัพธ์ในตารางผนวกที่ 24 Paired Samples Test

Pair 1	=	การหาค่าแตกต่างระหว่างค่าประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยก่อนติดตั้งระบบ – ค่าประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล หรือ $d = \text{effbefore} - \text{effafter}$
Mean	=	ค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่างของค่าประสิทธิภาพของระบบก่อนติดตั้งระบบและหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหล (\bar{d}) = -0.13633
Std. Deviation	=	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าแตกต่าง (S_d) หรือ = 3.32221 = SD(effbefore – effafter)
Std. Error Mean	=	ค่าคลาดเคลื่อนมาตรฐานของค่าเฉลี่ยของค่าแตกต่าง $S_{\bar{d}} = 0.75835$
95% Confidence	=	-1.37687 < μ_d < 1.10420
t	=	ค่าสถิติทดสอบของการทดสอบ $H_0 : \mu_d = 0$ ในที่นี้ $t = -0.225$
df	=	องศาอิสระ = 30-1 = 29
Sig. (2-tailed)	=	ค่า Significance ของสถิติทดสอบ $t = 0.824$ ซึ่งมากกว่า 0.05

เนื่องจาก $t = -0.225$ มากกว่าค่า $t_{.95,29}$ ที่เปิดได้จากตารางหรือ Sig. (2-tailed) มากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนด (เพราะเป็นการทดสอบ 2 ด้าน) จึงยอมรับ $H_0 : \mu_d = 0$ นั่นคือค่าประสิทธิภาพของระบบเฉลี่ยก่อนติดตั้งระบบและหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 หรือพิจารณาจาก 95% ค่าประมาณแบบช่วงของ μ_d จะพบว่าค่าต่ำสุดเป็นลบในขณะที่ค่าสูงสุดเป็นบวก จึงสรุปได้ว่าค่าประสิทธิภาพของระบบก่อนติดตั้งระบบและหลังติดตั้งระบบป้องกันการรั่วไหลไม่แตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ภาคผนวก ค

การเตรียมสารละลายในการวิเคราะห์คุณภาพของน้ำเชื่อม

Dry Lead Acetate

สูตรโมเลกุล $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Pb}(\text{OH})_2$

ปริมาณธาตุตะกั่วทั้งหมด (Total Pb.) ไม่ต่ำกว่า 72%

ปริมาณ Basic lead (as PbO) ไม่ต่ำกว่า 33%

ปริมาณความชื้น (Moisture loss at 100°C) ไม่สูงกว่า 1.5%

Kieselguhr

ใช้เป็นสารช่วยกรองสารละลาย (Filter aid) เรียกหลายชื่อเช่น Purified Infusorial Earth, Diatomaceous Earth, Diatomaceous silica หรือ Diatomite ลักษณะเป็นผงละเอียดสีขาว ไม่ละลายน้ำ และกรดต่างอ่อน

0.1 N Hydrochloric Acid

(1)	Hydrochloric Acid; HCl	4.23	mL
(2)	Distilled Water	500	mL

ผสมสารละลาย (1) กับน้ำกลั่น และเทียบมาตรฐานสารละลายนี้ โดยให้ละลาย Anhydrous Sodium Carbonate ซึ่งอบแห้งแล้ว 2.6501 g ในน้ำกลั่น 250 mL ในขวดแก้วปรับปริมาตรขนาด 500 mL เขย่าจนละลายหมด แล้วเติมน้ำกลั่นให้ปริมาตรครบ 500 mL พอดี

ใช้ไปเป็ทจุดสารละลายโซเดียมคาร์บอเนตข้างต้น 25 mL ถ่ายลงในขวดแก้วคอสั้นขนาด 300 mL เติมน้ำกลั่นลงไปประมาณ 50-75 mL หยด Methyl Orange Indicator ลงไป 2-3 หยด นำไปไทเทรตกับสารละลายกรดเกลือข้างต้นที่เตรียมขึ้นนั้น จุดสมมูลของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนสีส้มอมเหลืองของสารละลายเป็นสีส้มชมพู ถ้าจำนวนไทเทรตคือสารละลายกรดเกลือที่ใช้ไทเทรตเท่ากับ 25.00 mL พอดี แสดงว่า นอร์แมลิตีของสารละลายกรดเกลือนี้เท่ากับ 0.1 N. ถ้าไม่เป็นเช่นนั้น ให้ปรับความเข้มข้นใหม่ให้ถูกต้อง

0.1 N Sodium Hydroxide

(1)	Sodium Hydroxide; NaOH	4.3	g
(2)	Distilled Water	1000	mL

ผสมสารละลาย (1) กับน้ำกลั่น และเก็บไว้ในขวดแก้วใช้จุกยาง หรือขวดทำด้วย Polyethylene

ภาคผนวก ง

ภาพชุดแสดงลำดับการติดตั้งอุปกรณ์ป้องกันการรั่วไหลของน้ำเชื่อมบริสุทธิ์



ภาพผนวกที่ 1 ป้อนน้ำเชื่อมปริสทุธิ์ก่อนการติดตั้ง



ภาพผนวกที่ 2 ถอดใบพัดและเสื่อป้อนเพื่อทำการติดตั้งอุปกรณ์



ภาพผนวกที่ 3 ถอดเสื้อปั๊มน้ำเชื่อมบริสุทธ์เพื่อทำการเจาะรูคูดน้ำเชื่อมบริเวณ Stuffing box



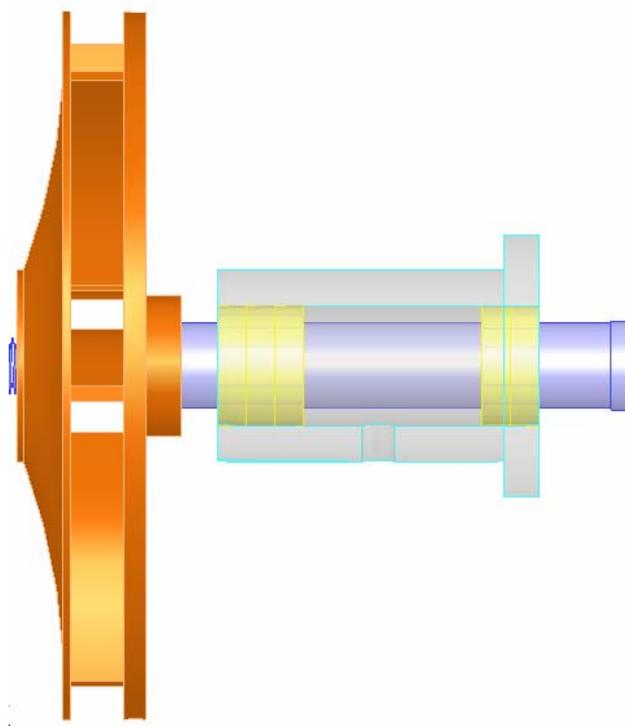
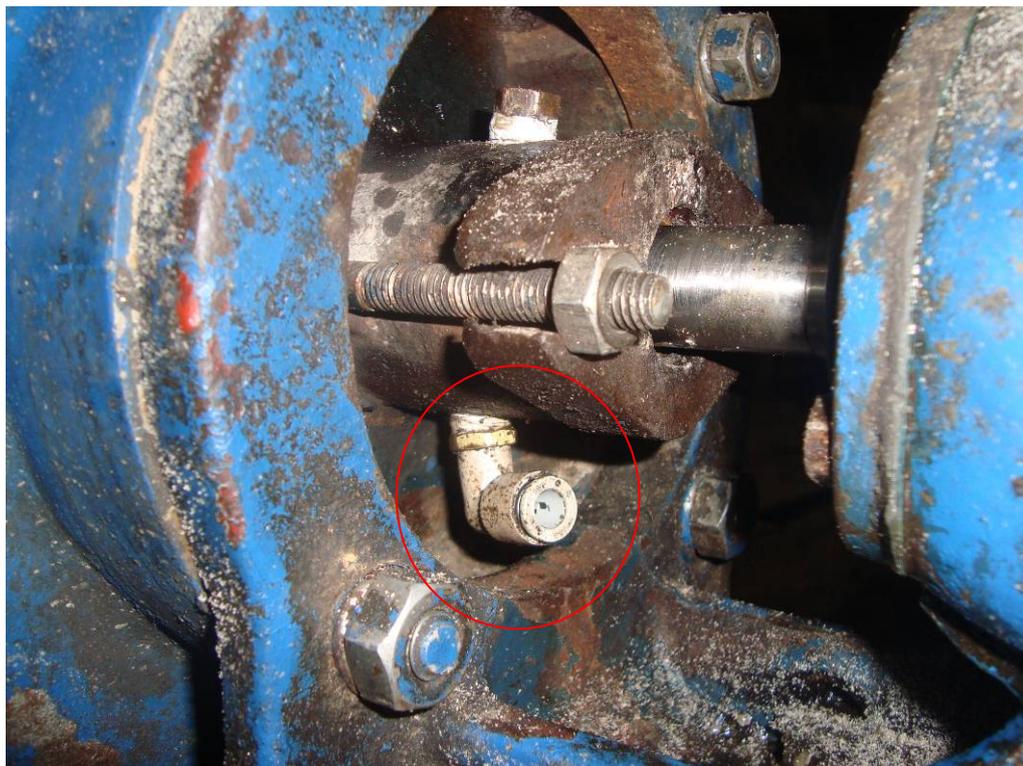
ภาพผนวกที่ 4 ทำการเจาะรูคูดน้ำเชื่อมบริเวณ Stuffing box



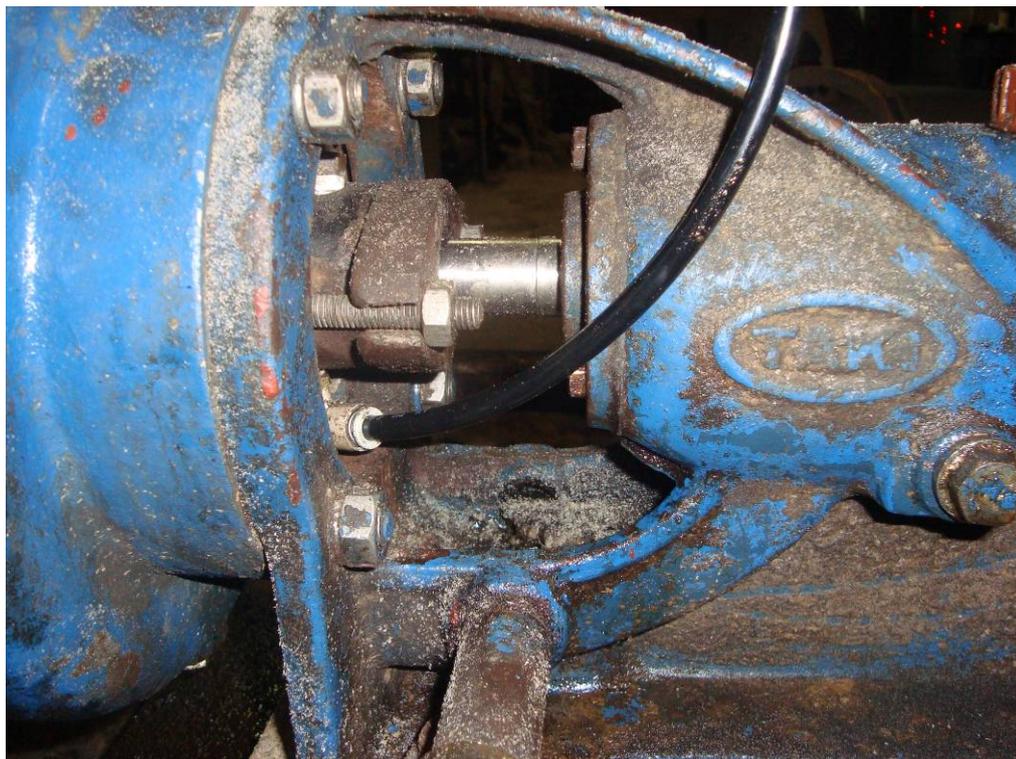
ภาพผนวกที่ 5 ใส่ Oil seal เข้ากับชุดคูดน้ำเชื่อมกลับบริเวณ Stuffing box ต้องทำการเจาะรูให้ตรงกับรูเจาะบนเสื้อปั๊ม โดยจะเป็นบริเวณที่มีการคูดน้ำเชื่อมกลับ



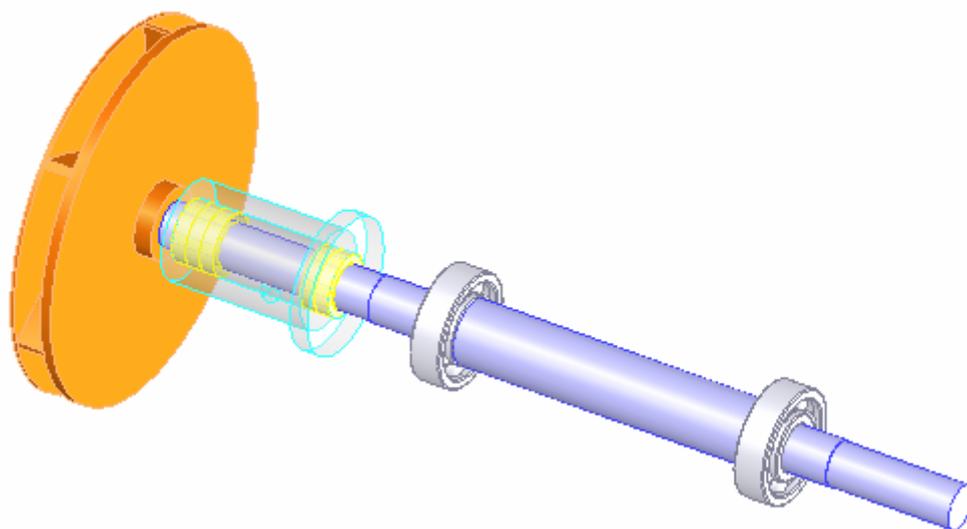
ภาพผนวกที่ 6 ประกอบชุด Oil seal บริเวณ stuffing box ต้องประกอบรูเจาะให้ตรงกับรูเจาะบนเสื้อปั๊ม



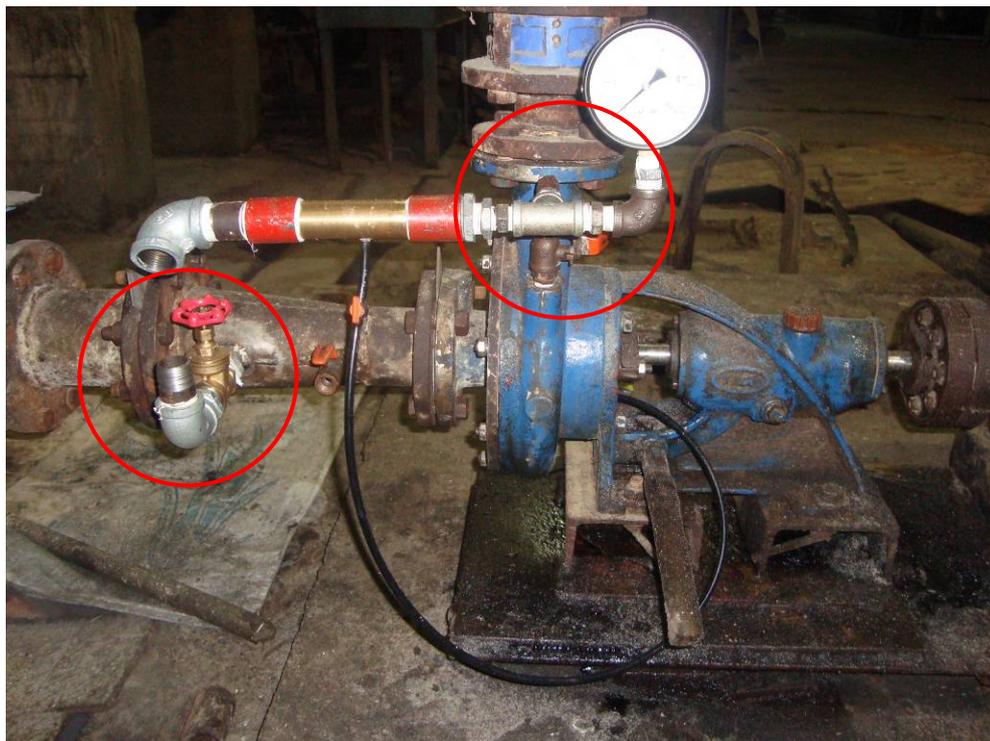
ภาพผนวกที่ 7 การใส่ชุดคูน้ำเชื่อมกลับ



ภาพผนวกที่ 8 ต่อสายคูดกลับเข้ากับอุปกรณ์



ภาพผนวกที่ 9 ภาพแสดงการติดตั้งชุดคูดน้ำเชื่อมกลับ



ภาพผนวกที่ 10 ติดตั้งอุปกรณ์เข้ากับทางส่งและทางดูดของปั้มน้ำ



ภาพผนวกที่ 11 ติดตั้งอุปกรณ์ที่สมบูรณ์

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นายธนพงศ์ อุดมศิลป์
วัน เดือน ปี ที่เกิด	วันที่ 13 กรกฎาคม 2522
สถานที่เกิด	จังหวัด สิงห์บุรี
ประวัติการศึกษา	ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเกษตร) ประกาศนียบัตรหลักสูตรเทคโนโลยีของน้ำตาล รุ่นที่ 7 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	หัวหน้าแผนกซ่อมบำรุงเครื่องกล
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	โรงงานน้ำตาลสิงห์บุรี
ผลงานดีเด่นและรางวัลทางวิชาการ	-
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ได้รับทุน AIEJ ของประเทศญี่ปุ่น ไปทำวิจัยที่ประเทศ ญี่ปุ่นเป็นเวลา 1 ปี