



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

ปริญญา

วิศวกรรมเคมี

วิศวกรรมเคมี

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของสภาวะการไหลต่อการผสมของของเหลวในเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อแนวตั้ง

Effects of Flow Conditions on Liquid Mixing in a Vertical Tubular Jet Mixer

นามผู้วิจัย นางสาวรัชนิดา ปัญจาคะ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ผึ่งผาย พรรณวดี, D.Sc.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิช, D.Eng.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์อภิญา ดวงจันทร์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของสภาวะการไหลต่อการผสมของของเหลวในเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อแนวตั้ง

Effects of Flow Conditions on Liquid Mixing in a Vertical Tubular Jet Mixer

โดย

นางสาวรัชนิดา ปัญจาคะ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี)

พ.ศ. 2556

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

รัชนิดา ปัญญาคะ 2556: ผลของสภาวะการไหลต่อการผสมของของเหลวในเครื่องผสมเจ็ทแบบท่อแนวตั้ง ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมเคมี) สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รองศาสตราจารย์ฝั่งผาย พรรณวดี, D.Sc. 57 หน้า

งานวิจัยนี้ศึกษาลักษณะเฉพาะของการผสมของของเหลวในเครื่องผสมเจ็ทขนาดจำลองที่มีขนาดเป็นหนึ่งในสี่ของขนาดเครื่องผสมเจ็ทจริงที่ใช้ในโรงงานด้วยวิธีการฉีดสีแล้วสังเกตด้วยสายตา ผลการทดลองได้แสดงโดเมนของเลขเรย์โนลด์ที่ทำให้เกิดการผสมได้ดีและแสดงให้เห็นว่าสภาวะปฏิบัติการจริงของโรงงานไม่ทำให้เกิดการผสมที่ดี ผลการทดลองจากเครื่องผสมเจ็ทขนาดจำลองตัวแรกใช้ออกแบบเครื่องผสมเจ็ทตัวใหม่สำหรับโรงงานโดยใช้ช่วงค่าเลขเรย์โนลด์ที่ทำให้เกิดการผสมได้ดี เครื่องผสมเจ็ทตัวใหม่ถูกสร้างขึ้นและถูกทดสอบการผสมด้วยวิธีเดียวกับเครื่องผสมเจ็ทตัวแรกโดยการฉีดสีและสังเกตด้วยสายตา ซึ่งพบว่าเครื่องผสมเจ็ทตัวใหม่ให้เกิดการผสมได้ที่สภาวะปฏิบัติการของโรงงาน

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

Rachanida Panjakha 2013: Effects of Flow Conditions on Liquid Mixing in a Vertical Tubular Jet Mixer. Master of Engineering (Chemical Engineering), Major Field: Chemical Engineering, Department of Chemical Engineering. Thesis Advisor: Associate Professor Phungphai Phanawadee, D.Sc. 57 pages.

Liquid mixing characteristics in a jet mixer that was uniformly scaled down to 25 percent of a jet mixer used in a chemical plant was visually investigated using dye. Domain of the Reynolds number of the liquid providing good mixing was found. The results showed that the operating conditions applied for the jet mixer in the plant can not give good mixing. Based on the Reynold's number, a new jet mixer was designed. This new jet mixer was fabricated and visually tested. It was found that it works for the operating conditions of the plant.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ผ่องแผ้ว พรหมนวดิ ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือการวางแผนงานวิจัย ตลอดจนให้คำแนะนำในการแก้ไข ปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิทยานิพนธ์และตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆจนกระทั่งเสร็จสมบูรณ์ ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์เมตตา เจริญพานิชที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมที่ให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัย ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ไพศาล คงคาอุยฉาย ประธานการสอบ และอาจารย์ ดร.ปริญญา คงพรมผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกที่เสียสละเวลาเพื่อเป็นคณะกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ รวมถึงให้คำแนะนำและแนวคิดที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณบริษัทพีคิวดิเมคัล (ประเทศไทย) ที่ให้ทุนสนับสนุนและส่งเสริมการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ได้ให้ความกรุณาตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเคมีทุกท่านที่ได้มอบความรู้ที่เป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป และขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ปฏิบัติการ และเจ้าหน้าที่ธุรการ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัว เพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆสิ่ง คอยเป็นกำลังใจให้ทุกสถานการณ์ และช่วยสนับสนุนจนประสบความสำเร็จในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

รัชนิดา ปัญจาคะ

มีนาคม 2556

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(6)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	9
อุปกรณ์	9
วิธีการ	10
ผลและวิจารณ์	15
สรุปและข้อเสนอแนะ	49
สรุป	49
ข้อเสนอแนะ	49
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	50
ภาคผนวก	52
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	59

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	อัตราการไหลของท่อด้านข้างและ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 44 มิลลิเมตรที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้างแบบมีหัวเจ็ตและแบบไม่มีหัวเจ็ต โดยใช้ของเหลวที่สอที่มีความหนืดเท่ากับ 0.8, 5, 8 และ 15 cSt	46

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	ตัวอย่างพฤติกรรมการไหลของของเหลวผ่านหัวเจ็ต	4
2	หัวเจ็ตที่ติดตั้งแบบตามแนวแกน (axial jet) ในเครื่องผสมเจ็ตแบบถัง	5
3	หัวเจ็ตที่ติดตั้งแบบเข้าด้านข้าง (side-entry jet) ในเครื่องผสมเจ็ตแบบถัง	6
4	การติดตั้งหัวเจ็ตตามแนวแกน (coaxial) ในเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อ	7
5	การติดตั้งหัวเจ็ตเข้าด้านข้าง (side-entry) ในเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อ	7
6	การออกแบบเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองที่ใช้ในการทดลอง (ก) หัวเจ็ต (ข) หัวเจ็ตและท่อผสม	10
7	แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	13
8	พฤติกรรมการไหลของของเหลวภายในเครื่องผสมเจ็ต (ก) ไหลไม่เต็มท่อผสม อัตราการไหลของหัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 90 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 100 ลิตรต่อนาที (ข) ไหลเต็มท่อผสม อัตราการไหลของหัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 90 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 50 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลของท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 140 ลิตรต่อนาที	16
9	Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลอง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 44 มิลลิเมตร ที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง โดยมีอัตราส่วนความหนืดของของเหลวที่หนึ่งกับของเหลวที่สองเท่ากับ 1:1, 1:6, 1:10 และ 1:19	17
10	Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เริ่มเกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตที่อัตราส่วนความหนืดของของเหลวที่หนึ่งกับของเหลวที่สองเท่ากับ 1:1, 1:6, 1:10 และ 1:19	19
11	โดเมนของอัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ตและอัตราการไหลของของเหลวภายในท่อผสมที่อัตราส่วนความหนืด 1:1, 1:6, 1:10 และ 1:19	23

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
12	Re_{jet} และ Re_{mixer} ของเครื่องผสมเจ็ตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 44 มิลลิเมตร ที่สภาวะอัตราส่วนความหนืด 1:1, 1:6, 1:10, 1:19 และการออกแบบเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ที่สภาวะปฏิบัติการของโรงงาน โดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 76, 102 และ 127 มิลลิเมตร	31
13	เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ (ก) หัวเจ็ต (ข) หัวเจ็ตและท่อผสม	33
14	พฤติกรรมการไหลของของเหลวภายในเครื่องผสมเจ็ต (ก) ไหลไม่เต็มท่อผสม อัตราการไหลที่หัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 100 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 250 ลิตรต่อนาที (ข) ไหลเต็มท่อผสม อัตราการไหลที่หัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 120 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 270 ลิตรต่อนาที	34
15	Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการการผสมและไม่เกิดการผสมภายในท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ขนาดท่อผสม 74 มิลลิเมตร โดยใช้ น้ำเป็นของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง	36
16	Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ต โดยมีอัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 1:1 และ 1:6	38
17	Re_{jet} และ Re_{mixer} ของเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 74 มิลลิเมตร โดยของเหลวที่หนึ่งมีความหนืด 2 cSt และของเหลวที่สองมีความหนืด 12 cSt	40
18	โดเมนของอัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ตและอัตราการไหลของของเหลวภายในท่อผสมที่อัตราส่วนความหนืด 1:6 และ 2:12	42

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
19	โดเมนของอัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ตและอัตราการไหลของของเหลวภายในท่อผสมที่อัตราส่วนความหนืด 1:6 และ 2:12	43
20	Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองที่มีท่อเข้าด้านข้างเพียงข้างเดียวและท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง โดยใช้ น้ำเป็นของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง	45
21	Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ ที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้างที่มีขนาด 25 และ 38 มิลลิเมตร โดยมีใช้น้ำเป็นของเหลวที่หนึ่งกับของเหลวที่สอง	48
ภาพผนวกที่		
1	แบบร่างส่วนของท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาด 44 มิลลิเมตร	53
2	แบบร่างส่วนของหัวเจ็ตของเครื่องผสมเจ็ตขนาด 44 มิลลิเมตร	54
3	แบบร่างส่วนของท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาด 74 มิลลิเมตร	55
4	แบบร่างส่วนของหัวเจ็ตของเครื่องผสมเจ็ตขนาด 74 มิลลิเมตร	56

คำอธิบายสัญลักษณ์และอักษรย่อ

cSt	=	centistoke
D	=	diameter
in	=	inch
kg	=	kilogram
L	=	liter
m	=	meter
mm	=	millimeter
min	=	minute
NaCl	=	Sodium chloride
NaCMC	=	Sodium Carboxymethylcellulose
q	=	Volumetric flow rate
q _{jet}	=	Jet volumetric flow rate
q _{side}	=	Side volumetric flow rate
q _{mixer}	=	Mixer volumetric flow rate
Re	=	Reynolds number
Re _{jet}	=	Jet Reynolds number
Re _{side}	=	Side Reynolds number
Re _{mixer}	=	Mixer Reynolds number
x _i	=	Mass fraction
x _{jet}	=	Mass fraction of jet
x _{side}	=	Mass fraction of side
x _{mixer}	=	Mass fraction of mixer
μ	=	Dynamic viscosity
ν	=	Kinematic viscosity
ρ	=	Density

ผลของสภาวะการไหลต่อการผสมของของเหลวในเครื่องผสมเจ็ต แบบท่อแนวตั้ง

Effects of Flow Conditions on Liquid Mixing in a Vertical Tubular Jet Mixer

คำนำ

เครื่องผสมเจ็ต (Jet mixers) นิยมใช้ในกระบวนการผสมในอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่ติดตั้งง่ายและราคาไม่แพง เครื่องผสมเจ็ตทั่วไปมีทั้งแบบถัง (jet mixed tank) และแบบท่อ (tubular jet mixer) ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการใช้งานของแต่ละอุตสาหกรรม หลักการของเครื่องผสมเจ็ตคือ การฉีดของเหลวที่หนึ่ง (primary liquid) ผ่านไปที่หัวเจ็ต (jet) หรือหัวฉีด (nozzle) ด้วยความเร็วสูงเข้าไปยังของเหลวที่สอง (secondary liquid) ที่มีความเร็วต่ำกว่าหรือหยุดนิ่ง (stationary bulk liquid) (Harnby *et al.*, 1992; Zughbi and Rakib, 2004) ที่อยู่ภายในถังผสม (Kalaichelvi *et al.*, 2007) หรือท่อผสม (दन्य, 2552; Scampavia *et al.*, 1995; Hassel *et al.*, 2006) ซึ่งความแตกต่างของความเร็วทำให้เกิดการไหลปั่นป่วน (turbulent flow) ทำให้ของเหลวสองชนิดผสมกัน (Harnby *et al.*, 1992; Warren *et al.*, 1993)

ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมของของเหลวภายในเครื่องผสมเจ็ตแบบถัง ได้แก่ ตำแหน่งที่ติดตั้งหัวเจ็ต (Rahimi and Parvareh, 2005; Sedahmed *et al.*, 2007; Wang and Mujumdar, 2007; Ludwig and Dziak, 2009) ลักษณะของก้นถังผสม เช่น แบบครึ่งวงกลม (hemispherical) แบบก้นแบน (flat) หรือแบบทรงกรวย (conical) (Yan-fang *et al.*, 2010) ผลของมุมของหัวเจ็ต (jet angle) ระดับความสูงของหัวเจ็ต (elevation of jet) และจำนวนหัวเจ็ต (number of jets) (Zughbi and Rakib, 2004; Kalaichelvi *et al.*, 2007) ส่วนปัจจัยที่มีผลต่อการผสมของของเหลวภายในเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อ เช่น การติดตั้งหัวเจ็ตตามแนวแกน (coaxial) (दन्य, 2552; Heinz and Roekaerts, 2001; Jang and Sung, 2010) การติดตั้งหัวเจ็ตเข้าด้านข้าง (side-entry) (Zughbi, 2006)

การศึกษาการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ตสามารถใช้วิธีการสังเกตการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของเทรเซอร์ (tracer) เช่น น้ำเกลือ (NaCl solution) โดยมีหัวตรวจวัด (probe) ในการวัดค่าความเข้มข้นหรือค่าการนำไฟฟ้า (Maruyama *et al.*, 1982; Yousefi and Moghaddas, 2011)

หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของเทรเซอร์ (tracer) เช่น การใช้การฉีดสีแล้วสังเกตด้วยสายตา ซึ่งบริเวณที่เกิดการผสมจะมีการกระจายตัวของสีได้ดีกว่าบริเวณที่ไม่เกิดการผสมหรือเกิดการผสมได้น้อย (दनัย, 2552; Harnby *et al.*, 1992; Furman and Stegowski, 2011)

งานวิจัยนี้เป็นโครงการที่ต่อเนื่องจากงานวิจัยของคุณดนัย กลิ่นฉะกา (2552) ที่ต้องการศึกษาลักษณะเฉพาะของการผสมของเครื่องผสมเจ็ต (jet mixer) ที่ติดตั้งในโรงงานที่ร่วมโครงการ ลักษณะเฉพาะของการผสมได้ถูกวิเคราะห์ว่า การผสมขึ้นกับเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ของของเหลวในเครื่องผสมเจ็ต ถึงแม้จะได้ผลลัพธ์ที่เป็นพื้นฐานบางประการแต่การทดลองไม่ครอบคลุมและกว้างขวางเพียงพอที่จะออกแบบเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ที่มั่นใจว่าผสมได้ดีกว่าเดิม ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จึงจะทำการขยายขอบเขตของเลขเรย์โนลด์ให้กว้างขึ้น โดยไม่ต้องดัดแปลงชุดอุปกรณ์ ซึ่งสามารถทำได้ด้วยการลดขนาดของเครื่องผสมเจ็ตที่จะใช้ทดลอง ผลลัพธ์ที่ได้จากเลขเรย์โนลด์ที่กว้างมากขึ้นจะนำไปสู่การออกแบบเครื่องผสมเจ็ตที่มีขนาดที่เหมาะสม ในการทดลองใช้การสังเกตการผสมของของเหลวด้วยการฉีดสีในเครื่องผสมเจ็ตที่ทำด้วยอะคริลิกใสและถ่ายภาพเคลื่อนไหว เพื่อนำไปพิจารณาและวิเคราะห์หาสภาวะการผสมของเครื่องผสมเจ็ตที่สามารถเกิดการผสมได้ ผลการทดลองจะถูกนำไปใช้ออกแบบเครื่องผสมเจ็ตและประยุกต์ใช้ในโรงงานที่ร่วมโครงการนี้

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของสภาวะของการไหลที่มีต่อการผสมของของเหลวในเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อแนวตั้งที่มีหัวฉีดตามแนวแกน
2. ออกแบบและทดสอบเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อแนวตั้งที่เหมาะสมสำหรับโรงงานที่ร่วมโครงการ

ขอบเขตการวิจัย

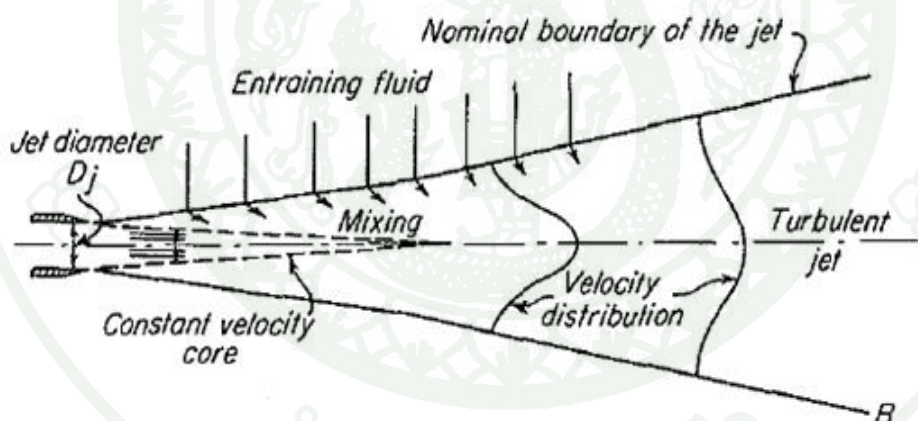
ศึกษาสภาวะของการไหลของของเหลวในการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อแนวตั้งที่ติดตั้งหัวฉีดเข้าตามแนวแกนสำหรับของเหลวชนิดที่หนึ่งและมีท่อเข้าด้านข้างของท่อผสมสำหรับของเหลวชนิดที่สอง การทดลองทำโดยใช้น้ำและสารละลายของน้ำผสมโซเดียมคาร์บอเนตซีเมติกเซลลูโลส ในแต่ละสภาวะที่ทดลองใช้วิธีการฉีดสีและถ่ายภาพเคลื่อนไหว เพื่อสังเกตการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ต

งานวิจัยนี้ทำการสร้างเครื่องผสมเจ็ตที่ใช้ทดลองที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อผสม 44 มิลลิเมตร หัวฉีด 13 มิลลิเมตร และท่อด้านข้าง 9 มิลลิเมตร เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหล เลขเรย์โนลด์ และความหนืดที่ทำให้เกิดการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ต ผลการทดลองของเครื่องผสมเจ็ตที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางท่อผสม 44 มิลลิเมตร จะถูกนำไปใช้ออกแบบและสร้างเครื่องผสมเจ็ตที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและเหมาะสมที่สามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตของโรงงานที่ร่วมโครงการได้ โดยเครื่องผสมเจ็ตที่สร้างขึ้นมานี้จะถูกทดสอบด้วยวิธีการทดลองเดียวกับเครื่องผสมเจ็ตตัวแรก เพื่อยืนยันว่าเกิดการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ตได้

การตรวจเอกสาร

เครื่องผสมเจ็ทเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้ในกระบวนการผสมของเหลวในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมยา อุตสาหกรรมอาหาร และอุตสาหกรรมปิโตรเคมี เนื่องจากเครื่องผสมเจ็ทไม่มีส่วนประกอบที่เคลื่อนที่ การติดตั้งไม่ยุ่งยาก การดูแลรักษาทำได้ง่าย และค่าใช้จ่ายไม่แพง (Jayanti, 2001; Patwardhan and Gaikwad, 2003)

หลักการทั่วไปของเครื่องผสมเจ็ทคือ การฉีดของเหลวชนิดที่หนึ่ง (primary liquid) หรือสายเจ็ท (jet stream) ผ่านทางหัวเจ็ท (jet) หรือหัวฉีด (nozzle) ด้วยความเร็วสูงเข้าไปยังของเหลวชนิดที่สอง (secondary liquid) ที่หยุดนิ่ง (stagnant liquid) หรือมีความเร็วต่ำกว่า (stationary bulk liquid) ความแตกต่างของความเร็วของของเหลวทั้งสองชนิดทำให้เกิดการผสม (Harnby, 1992; Zughbi and Rakib, 2004; Yu Yan-fang *et al.*, 2010; Saravanan *et al.*, 2012)



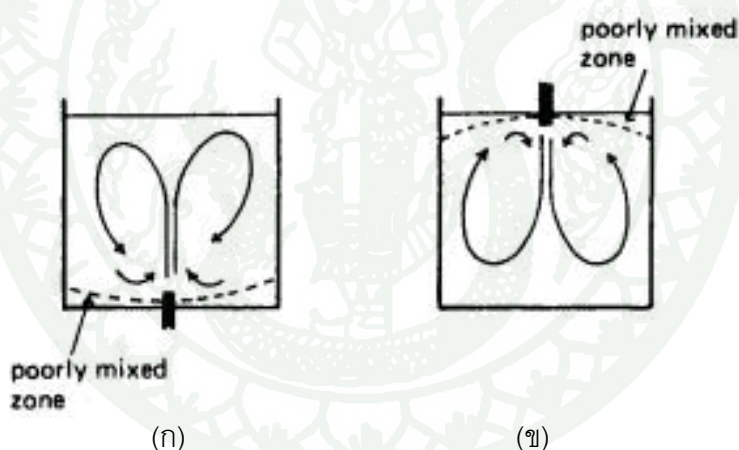
ภาพที่ 1 ตัวอย่างพฤติกรรมการไหลของของเหลวผ่านหัวเจ็ท

ที่มา: Warren *et al.* (1993)

ภาพที่ 1 แสดงตัวอย่างพฤติกรรมการไหลของของเหลวผ่านหัวเจ็ต กรณีจุ่มหัวเจ็ตไปยังน้ำที่อยู่นิ่งๆ แล้วทำการฉีดน้ำผ่านไปที่หัวเจ็ตด้วยความเร็วสูง โดยความเร็วจะคงที่ที่บริเวณแกน (core) แต่บริเวณที่ห่างออกไปจากหัวเจ็ตตามแนวแกนและตามแนวรัศมีของสายเจ็ตจะมีความเร็วลดลง ทำให้เกิดการไหลปั่นป่วน (turbulent flow) รอบบริเวณแกนเพิ่มขึ้นและของเหลวภายนอกไหลเข้าไปภายในสายเจ็ตได้ทำให้ของเหลวสองชนิดผสมกัน

เครื่องผสมเจ็ตโดยทั่วไปมีอยู่ 2 แบบคือ

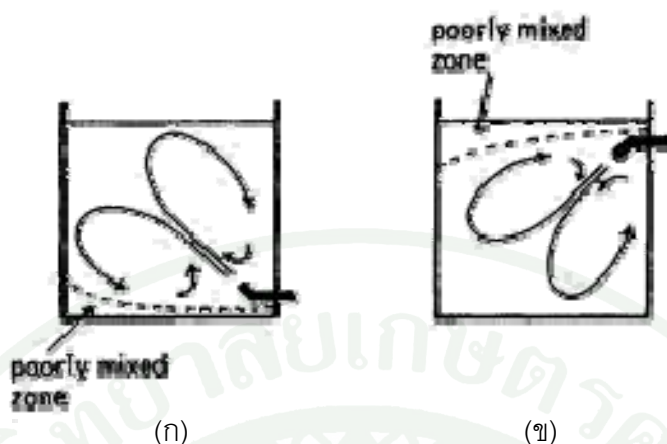
1. เครื่องผสมเจ็ตแบบถัง (jet-mixed tanks) ของเหลวที่หนึ่งถูกฉีดผ่านหัวเจ็ตด้วยอัตราการไหลสูงไปที่ของเหลวที่สองที่บรรจุอยู่ในถัง ลักษณะการไหลภายในถังผสมแตกต่างกันไปตามการติดตั้งหัวเจ็ต



ภาพที่ 2 หัวเจ็ตที่ติดตั้งแบบตามแนวแกน (axial jet) ในเครื่องผสมเจ็ตแบบถัง

ที่มา : Harnby *et al.* (1992)

ภาพที่ 2 แสดงการติดตั้งหัวเจ็ตแบบตามแนวแกน (axial jet) โดยภาพที่ 2 (ก) แสดงลักษณะการไหลของของเหลวที่หนึ่งที่ไหลผ่านหัวเจ็ตมีทิศทางจากก้นถังไปยังผิวของของเหลวที่สอง และภาพที่ 2 (ข) แสดงลักษณะการไหลของของเหลวที่หนึ่งที่ไหลผ่านหัวเจ็ตมีทิศทางจากผิวของของเหลวที่สองไปยังก้นถัง ทั้งสองกรณีของของเหลวจะเกิดกระแสไหลวน (eddy current)



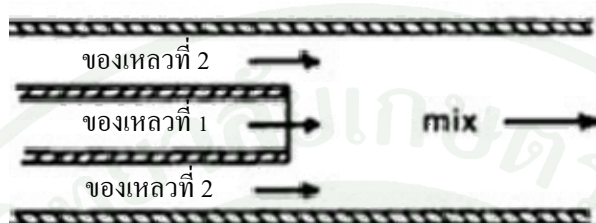
ภาพที่ 3 หัวเจ็ตที่ติดตั้งแบบเข้าด้านข้าง (side-entry jet) ในเครื่องผสมเจ็ตแบบถัง

ที่มา: Hamby *et al.* (1992)

ภาพที่ 3 แสดงการติดตั้งหัวเจ็ตแบบเข้าด้านข้าง (side-entry jet) โดยภาพที่ 3 (ก) แสดงลักษณะการไหลของของเหลวที่หนึ่งที่ผ่านหัวเจ็ตทางด้านล่างของถังและทำมุมเอียงขึ้น และภาพที่ 3 (ข) แสดงลักษณะการไหลของของเหลวที่หนึ่งที่ผ่านหัวเจ็ตทางด้านบนของถังและมุมเอียงลง ลักษณะดังกล่าวเป็นการเพิ่มระยะของเจ็ตให้ห่างจากผนังของถังผสม เพื่อลดการเกิดบริเวณที่ไม่ผสมให้เหลือน้อยที่สุด ปัจจัยที่มีผลต่อการผสมของของเหลวภายในเครื่องผสมเจ็ตแบบถังไม่ได้มีเพียงตำแหน่งของหัวเจ็ตและมุมของหัวเจ็ตเท่านั้น ลักษณะกั้นถังผสม (Lane and Rice, 1982b; Yu Yan-fang *et al.*, 2010) ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของถังผสมและขนาดของหัวเจ็ต (Hamby *et al.*, 1992; Patwardhan and Gaikwad, 2003) ระดับของของเหลวที่บรรจุภายในถังผสม และความเร็วของสายเจ็ต (Kalaichelvi *et al.*, 2007) ก็ถือว่าเป็นปัจจัยหนึ่งในการเกิดการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ต

2. เครื่องผสมเจ็ตแบบท่อ (tubular jet mixers) ของเหลวที่หนึ่งถูกฉีดผ่านหัวเจ็ตด้วยความเร็วสูงไปที่ของเหลวที่สองที่บรรจุอยู่ภายในท่อ โดยมีการติดตั้งหัวเจ็ต 2 แบบคือแบบตามแนวแกน (coaxial) และแบบเข้าด้านข้าง (side-entry)

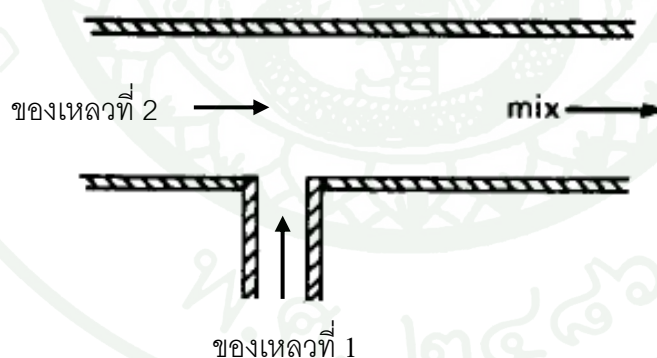
2.1 ตามแนวแกน (coaxial) ของเหลวที่หนึ่งจะถูกฉีดออกมาจากท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดเล็กที่อยู่ภายในท่อเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดใหญ่ที่มีของเหลวที่สองไหลอยู่ภายในท่อ โดยของของเหลวทั้งสองชนิดไหลไปในทิศทางเดียวกัน ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การติดตั้งหัวฉีดตามแนวแกน (coaxial) ในเครื่องผสมเจ็ดแบบท่อ

ที่มา: Harnby *et al.* (1992)

2.2 เข้าด้านข้าง (side-entry) ของเหลวที่หนึ่งจะถูกฉีดเข้าไปผสมกับของเหลวที่สองจากทางด้านข้างของท่อที่มีของเหลวที่สองไหลอยู่ภายใน ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การติดตั้งหัวฉีดเข้าด้านข้าง (side-entry) ในเครื่องผสมเจ็ดแบบท่อ

ที่มา: Harnby *et al.* (1992)

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ดโดยใช้การทดลอง (experiment) และการฉีดเทรเซอร์ (tracer) ในการสังเกตการผสมของของเหลว ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของเทรเซอร์ (दनัย, 2552; Patwardhan, 2002; Rahimi and Parvareh, 2005;

Furman and Stegowski, 2011) เช่น การใช้น้ำเกลือเป็นเทอร์ชเซอร์ (Lane and Rice, 1982b; Patwardhan and Gaikwad, 2003; Yousefi Amiri and Moghaddas, 2011) เนื่องจากน้ำเกลือเป็นพลาสมาอิเล็กโทรไลต์สามารถนำไฟฟ้าได้ การหาความเข้มข้นของน้ำเกลือที่เปลี่ยนแปลงโดยตรงทำได้จากการนำหัวตรวจวัด (probe) มาใช้วัดค่าการนำไฟฟ้าที่พิกัดต่าง ๆ ภายในเครื่องผสมเจ็ดแล้วนำไปคำนวณหาความเข้มข้นของน้ำเกลือ และในการทดลองต้องใช้หัวตรวจวัดติดตั้งทุกๆ พิกัดเพื่อความถูกต้องและแม่นยำของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นในแต่ละพิกัด แต่ข้อเสียก็คือการติดตั้งหัวตรวจวัดจะรบกวนการผสมภายในเครื่องผสมเนื่องจากเข้าไปกีดขวางการไหลของของเหลว ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยหลายคณะเลือกใช้สีเป็นเทอร์ชเซอร์ เช่น สีย้อมผ้า และสีผสมอาหาร เป็นต้น วิธีการคือฉีดสีที่ของเหลวที่หนึ่งที่จะไหลผ่านไปยังของเหลวที่สอง และสังเกตการผสมภายในเครื่องผสมของของเหลวทั้งสองชนิดจากการกระจายตัวของสีที่พิกัดต่างๆ (दनัย, 2552; Lane and Rice, 1982a; Furman and Stegowski, 2011) ในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ดแบบท่อแนวตั้งที่ติดตั้งหัวเจ็ดตามแนวแกน โดยมีการออกแบบและสร้างชุดจำลองเครื่องผสมเจ็ดแบบท่อแนวตั้ง เพื่อนำไปใช้ในการทดลองที่สภาวะต่างๆ ของโรงงานที่ร่วมโครงการ ในการศึกษาการผสมของของเหลวจะใช้วิธีฉีดสีผสมอาหารแล้วสังเกตการกระจายตัวของสีด้วยสายตาและถ่ายภาพเคลื่อนไหวที่สภาวะต่างๆ

อุปกรณ์และวิธีการ

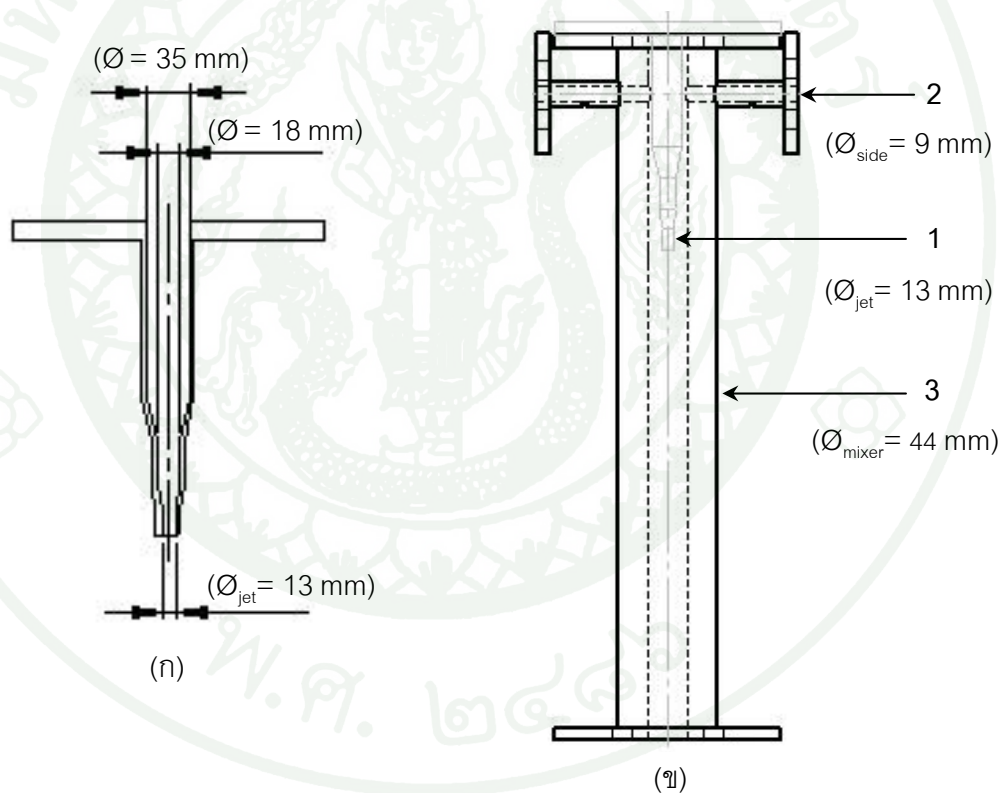
อุปกรณ์

1. ชุดจำลองเครื่องผสมเจ็ต
2. บั้ม บริษัท EBARA รุ่น 65x50 FSSJA 515 และรุ่น 40x32 FSSGA 52.2
3. เครื่องตรวจวัดอัตราการไหล บริษัท ENDRESS+HAUSER
4. ถังเหล็กขนาด 1,000 ลิตร 1 ถังและขนาด 4,000 ลิตร 2 ถัง
5. กล้องถ่ายภาพดิจิทัล บริษัท FUJIFILM รุ่น FinePix S2000HD
6. กระบอกฉีดยา บริษัท NIPRO ขนาด 10 มิลลิลิตร
7. เข็มฉีดยา บริษัท NIPRO เบอร์ 18 ยาว 1.25 นิ้ว
8. จุกยางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร
9. น้ำประปา
10. สีสผสมอาหารแบบผง บริษัท WINNER BRAND สีแดง
11. โซเดียมคาร์บอเนตซีเมติกเซลลูโลส (ความบริสุทธิ์ 99.00 เปอร์เซ็นต์จาก WEALTHY)

วิธีการ

1. การออกแบบและการสร้างเครื่องผสมแบบเจ็ตจำลอง

เครื่องผสมเจ็ตจำลองที่ถูกออกแบบและสร้างขึ้นมาเป็นการลดอัตราส่วนตามพื้นที่หน้าตัดของท่อผสม (mixer) หัวเจ็ต (jet) และท่อด้านข้าง (side) ให้มีค่าลดลงเป็น 1/4 เท่าของเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อของโรงงานที่ร่วมวิจัย และเป็น 1/2 เท่าของเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อของศูนย์ กลิ่นมะกา (2552) เครื่องผสมเจ็ตแบบท่อแนวตั้งที่มีท่อเข้าด้านข้างทั้ง 2 ข้างและทำด้วยอะคริลิกใส โดยมีลักษณะดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 เครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองที่ใช้ในการทดลอง (ก) หัวเจ็ต (ข) หัวเจ็ตและท่อผสม

ภาพที่ 6 (ก) แสดงส่วนของหัวเจ็ตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่ปลายทางออกของท่อ (ϕ_{jet}) เท่ากับ 13 มิลลิเมตร ภาพที่ 6 (ข) แสดงเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองที่ใช้ทดลอง โดยหมายเลข 1 ในภาพที่ 6 (ข) แสดงหัวเจ็ตที่ของเหลวที่หนึ่งไหลผ่านและด้านบนของท่อที่ต่อกับหัวเจ็ตมีการเจาะรูสำหรับใส่จุกยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เพื่อใช้เป็นตำแหน่งฉีดสึเข้าไปในของเหลวที่หนึ่ง หมายเลข 2 คือ ท่อด้านข้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ_{side}) 9 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นท่อที่ของเหลวที่สองไหลออกมา และหมายเลข 3 คือ ท่อผสมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (ϕ_{mixer}) 44 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นบริเวณที่สังเกตการผสมของของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง

หลังจากทำการทดลองและศึกษาการผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองแล้ว นำข้อมูลของโดเมนเลขเรย์โนลด์ของท่อผสม (Re_{mixer}) ที่เกิดการผสมที่ได้มา ใช้คำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผสมที่ใหญ่กว่าเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองตัวแรกและมีขนาดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้ในโรงงานที่ร่วมโครงการ ซึ่งในการคำนวณหาเลขเรย์โนลด์ (Re) ใช้สมการ (1) และมีสมการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้ (Warren et al., 2005)

$$Re = \frac{\rho \overline{DV}}{\mu} = \frac{\overline{DV}}{\nu} \quad (1)$$

โดยที่

- D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
- \overline{V} คือ อัตราเร็วของของเหลว (m/s)
- ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m^3)
- μ คือ ความหนืดไดนามิกส์ของของเหลว (kg/m.s หรือ Poise)
- ν คือ ความหนืดไคเนมาติกของของเหลว (m^2/s หรือ Stoke)

$$\bar{V} = \frac{q}{S} \quad (2)$$

$$S = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (3)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

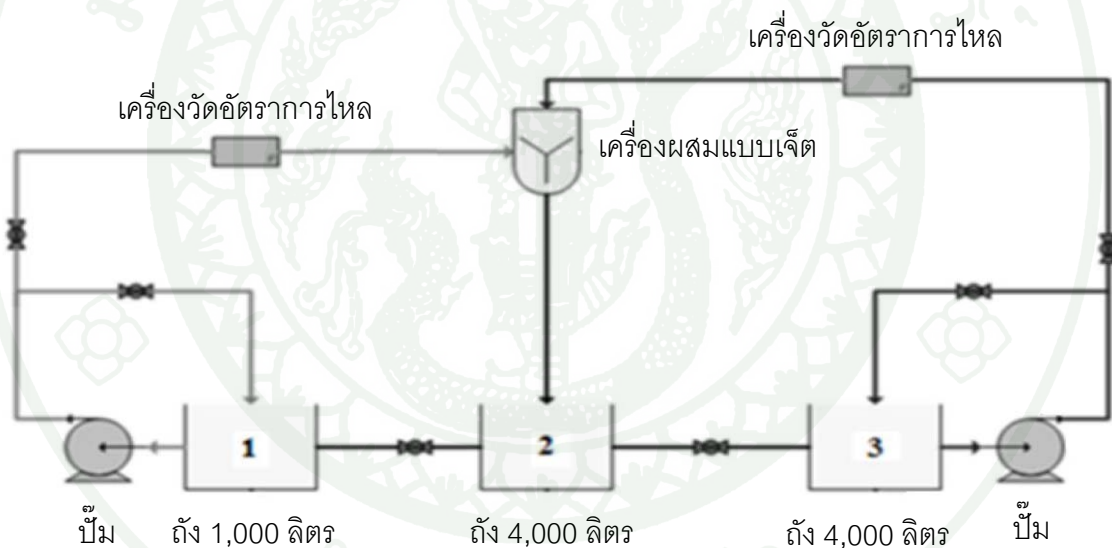
โดยที่

- D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
 q คือ อัตราการไหลของของเหลว (m³/s)
 S คือ พื้นที่หน้าตัด (m²)
 \bar{V} คือ อัตราเร็วของของเหลว (m/s)
 ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m³)
 μ คือ ความหนืดไดนามิกส์ของของเหลว (kg/m.s หรือ Poise)
 ν คือ ความหนืดไคเนติกส์ของของเหลว (m²/s หรือ Stoke)

เครื่องผสมเจ็ดตัวใหม่จะถูกทดสอบด้วยวิธีการทดลองเดียวกับเครื่องผสมเจ็ดขนาด
 จำลองตัวแรก

2. การติดตั้งอุปกรณ์

ภาพที่ 7 แสดงแผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง โดยของเหลวที่หนึ่งถูกเก็บอยู่ในถังหมายเลข 3 ปริมาตร 4,000 ลิตร และของเหลวที่สองถูกเก็บอยู่ในถังหมายเลข 1 ปริมาตร 1,000 ลิตร ถังเก็บของเหลวที่หนึ่งเชื่อมต่อกับหัวเจ็ตด้วยท่อเหล็กที่ต่อมาจากปั๊ม ส่วนถังเก็บของเหลวที่สองถูกเชื่อมด้วยท่อเหล็กที่มาจากปั๊มแล้วต่อไปยังท่อเข้าด้านข้างของเครื่องผสมเจ็ตที่ใช้ในการทดลอง ของเหลวที่หนึ่งจากถังขนาด 4,000 ลิตร และของเหลวที่สองจากถังขนาด 1,000 ลิตร จะถูกปั๊มให้ไหลมาผสมกันภายในเครื่องผสมเจ็ตและถูกปล่อยลงไปที่ถังหมายเลข 2 ที่มีปริมาตร 4,000 ลิตร โดยอัตราการไหลที่ใช้ในสภาวะต่าง ๆ จะอ่านได้จากเครื่องวัดอัตราการไหล (flow meter) ที่ติดตั้งไว้



ภาพที่ 7 แผนภาพการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

3. การศึกษาการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ดด้วยการฉีดสี

3.1 การทดลองเครื่องผสมเจ็ดโดยใช้น้ำเป็นของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง

เตรียมสีที่ใช้สำหรับทดลองโดยการผสมสีผสมอาหารกับน้ำประปา ตรวจสอบปริมาณน้ำในถังต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองให้เพียงพอกับการทดลอง ทำการปรับอัตราการไหลของของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สองดังนี้ อัตราการไหลของของเหลวที่หนึ่งคือ 0 - 200 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ และอัตราการไหลของของเหลวที่สองคือ 0 - 74 ลิตรต่อนาที ตามลำดับ ตำแหน่งฉีดสีด้านบนที่ต่อกับหัวเจ็ดแต่ครั้งที่ฉีดประมาณ 10 มิลลิลิตร ผลการทดลองจะถูกบันทึกด้วยภาพถ่ายเคลื่อนไหวของการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ด

3.2 การทดลองเครื่องผสมเจ็ดโดยใช้น้ำเป็นของเหลวที่หนึ่ง และใช้สารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับน้ำเป็นของเหลวที่สอง

การทดลองนี้ทดลองทำนองเดียวกับ 3.1 แต่ใช้สารละลายของโซเดียมคาร์บอเนตซีเมทิลเซลลูโลสผสมกับน้ำเป็นของเหลวที่สอง ซึ่งมีความหนืด 5, 8 และ 15 เซนติสโตกส์ตามลำดับ

ผลและวิจารณ์

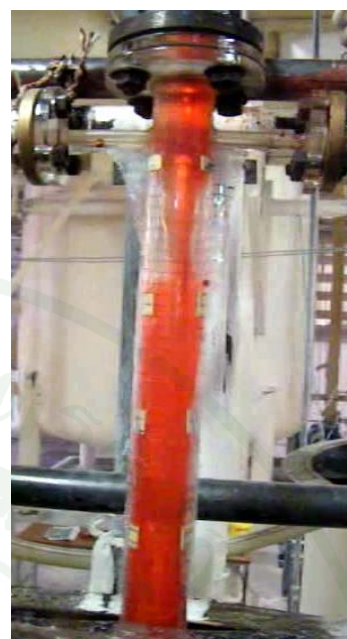
หัวข้อนี้รายงานผลการทดลองของเครื่องผสมเจ็ดขนาดจำลองตัวแรก การออกแบบเครื่องผสมเจ็ดตัวใหม่ที่จะใช้ในโรงงานและผลการทดสอบเครื่องผสมเจ็ดที่ออกแบบใหม่

1. ผลการศึกษาการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ดขนาดจำลองด้วยการฉีดสี

ภาพที่ 8 แสดงพฤติกรรมการไหลที่เกิดขึ้นภายในเครื่องผสมเจ็ดที่ใช้ในการทดลอง โดยสังเกตได้จากการกระจายตัวของสี ภาพที่ 8 (ก) แสดงกรณีที่อัตราการไหลที่หัวเจ็ด (q_{jet}) เท่ากับ 90 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 100 ลิตรต่อนาที พบว่า สีไม่กระจายตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อผสมและไม่เกิดการผสมของของเหลวสองสายนี้ ภาพที่ 8 (ข) แสดงกรณีที่อัตราการไหลที่หัวเจ็ด (q_{jet}) เท่ากับ 90 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 50 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 140 ลิตรต่อนาที กรณีนี้สีกระจายตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อผสมแสดงให้เห็นว่าการไหลเต็มท่อผสมและเกิดการผสมระหว่างของเหลวทั้งสองสาย จากการคำนวณเลขเรย์โนลด์ของของเหลวในท่อผสมด้วยสมการ (1) พบว่า กรณีไม่เกิดการผสม Re_{mixer} มีค่าเท่ากับ 60,200 ซึ่งมีค่าสูงและลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน ซึ่งสังเกตได้ว่าสาเหตุของการไม่ผสมกันเกิดจากของเหลวสองสายไหลไม่เต็มท่อผสม แต่ในกรณีที่ Re_{mixer} มีค่าเท่ากับ 84,300 และของเหลวไหลเต็มท่อผสมจึงเกิดการผสมได้ดังภาพที่ 8 (ข) ดังนั้นหาก Re มีค่าสูงและมี การไหลเต็มท่อผสม แสดงว่าของเหลวเกิดการผสมแน่นอน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 8 พฤติกรรมการไหลของของเหลวภายในเครื่องผสมเจ็ต

(ก) ไหลไม่เต็มท่อผสม

อัตราการไหลที่หัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 90 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 10 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 100 ลิตรต่อนาที

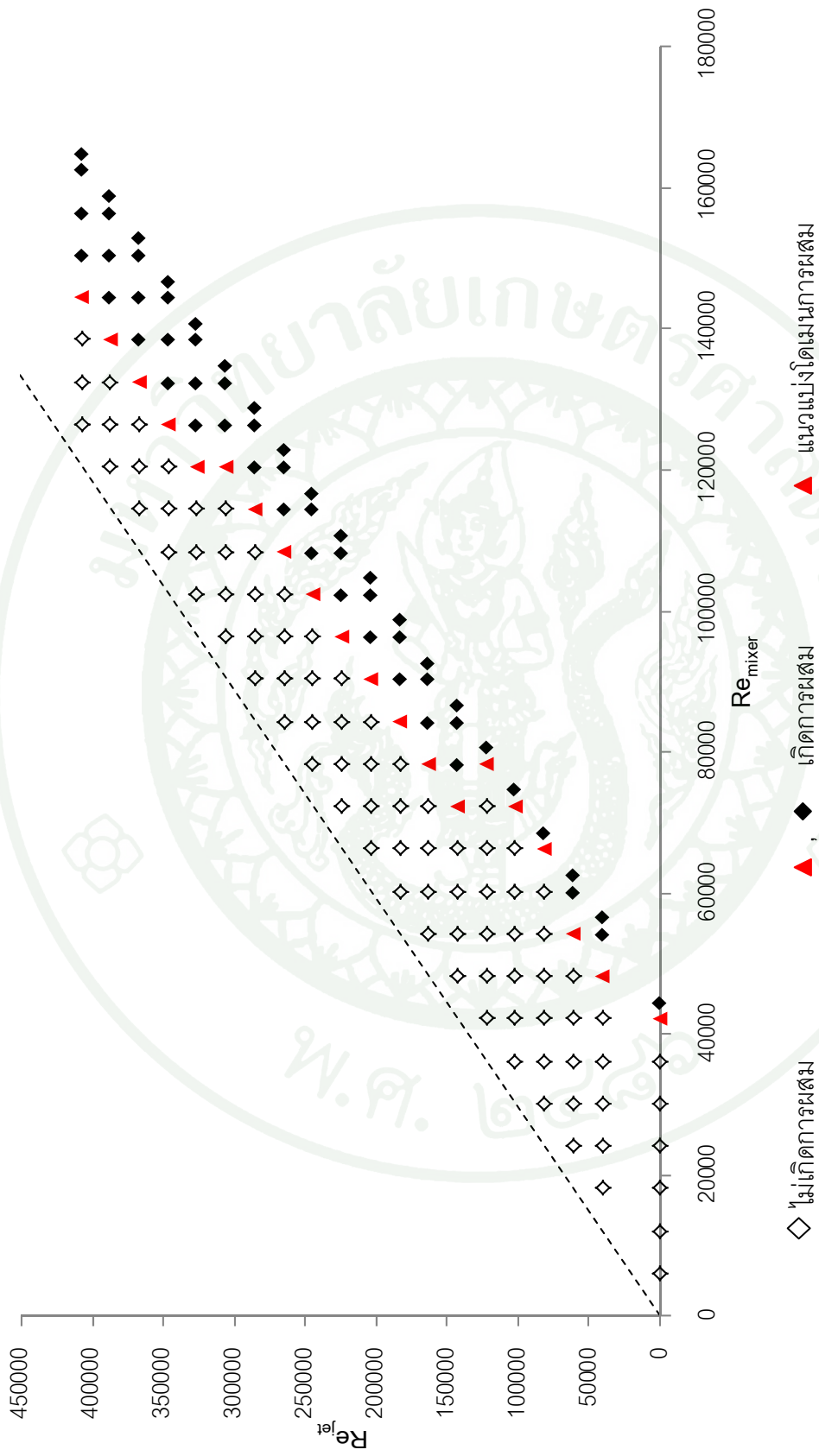
(ข) ไหลเต็มท่อผสม

อัตราการไหลที่หัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 90 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 50 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 140 ลิตรต่อนาที

จากการทดลองพบโดเมนของเลขเรย์โนลด์์ที่เกิดการผสมและไม่เกิดการผสมโดยรายงานดังภาพที่ 9 ซึ่งในภาพที่ 9 แสดงเลขเรย์โนลด์์ที่หัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์์ในท่อผสม (Re_{mixer}) ที่อัตราส่วนความหนืดของของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ตและของเหลวที่ผ่านท่อด้านข้างมีค่าเท่ากับ 1:1 โดยพิกัดจุดที่แสดงได้มาจากการคำนวณเลขเรย์โนลด์์ในท่อผสม (Re_{mixer}) และเลขเรย์โนลด์์ที่หัวเจ็ต (Re_{jet}) ของสภาวะที่เกิดการผสมได้ในการทดลองนี้



ภาพที่ 9 Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการผสมและไม่เกิดการผสมภายในท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ดขนาดจำลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 44

มิลลิเมตร ที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้างโดยมีอัตราส่วนความหนืดของเหลวที่หนึ่งกับขของเหลวที่สองเท่ากับ 1:1

เส้นประในภาพที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re_{jet} กับ Re_{mixer} กรณีที่มีของเหลวที่หนึ่งไหลผ่านหัวเจ็ตเพียงอย่างเดียวเข้าไปในท่อผสม ทำให้อัตราการไหลที่หัวเจ็ตเท่ากับอัตราการไหลภายในท่อผสม ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง Re_{jet} กับ Re_{mixer} จึงแสดงโดย

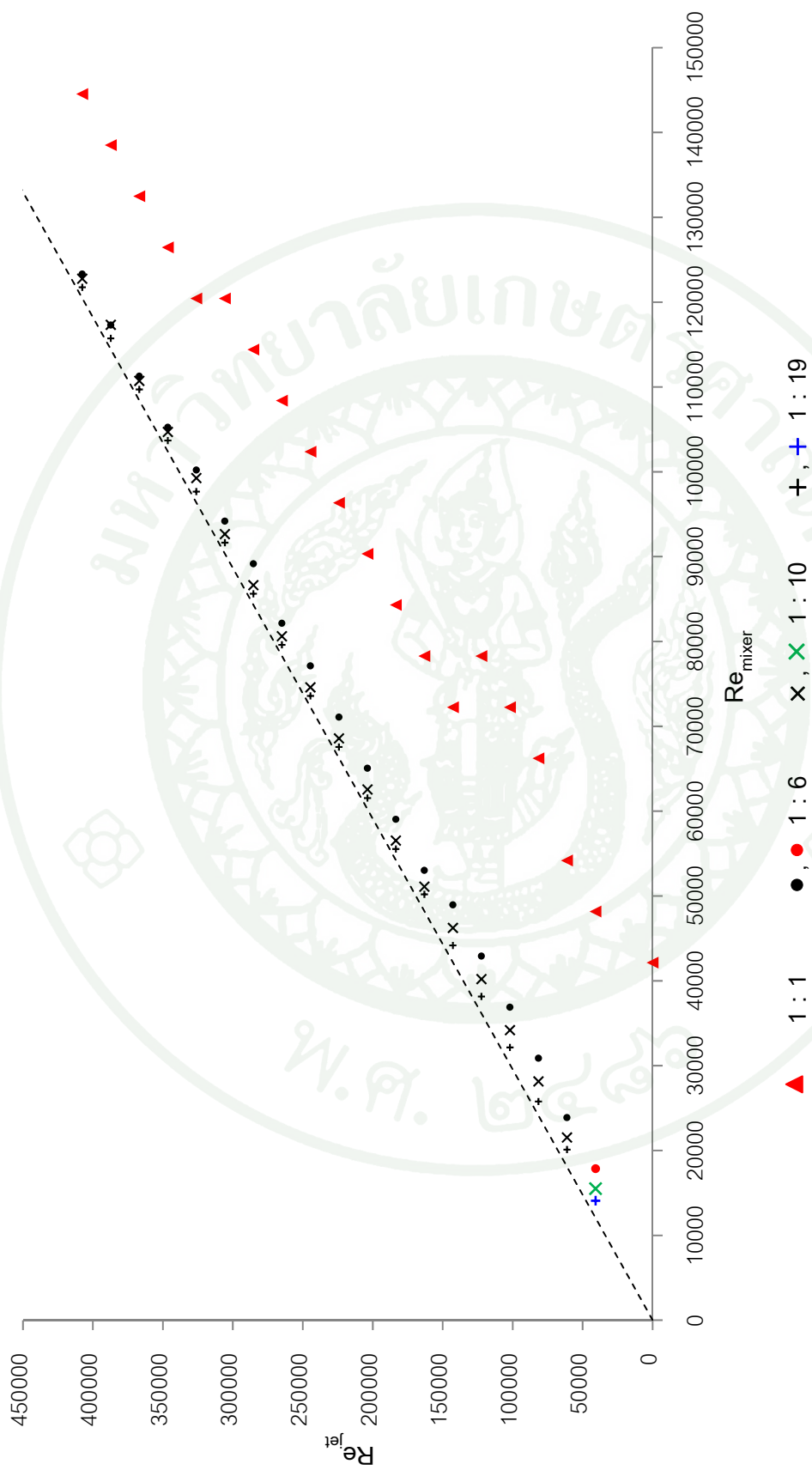
$$\frac{Re_{jet}}{Re_{mixer}} = \frac{D_{mixer}}{D_{jet}} \quad (5)$$

เมื่อมีของเหลวไหลจากท่อด้านข้างด้วย โดยที่ของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ตคงที่จะทำให้ค่า Re_{mixer} มากขึ้น ทำให้พิกัดที่ทดลองอยู่ทางขวามือของเส้นประ และทำให้ไม่มีข้อมูลการทดลองแสดงในบริเวณทางซ้ายมือของเส้นประ เพราะอัตราการไหลของของเหลวในท่อด้านข้างไม่น้อยกว่าศูนย์ ในกรณีที่เครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจ็ต 13 มิลลิเมตร และท่อผสม 44 มิลลิเมตร จะได้

$$Re_{jet} = (3.38)Re_{mixer} \quad (6)$$

จากผลการทดลองในภาพที่ 9 ของอัตราส่วนความหนืด 1:1 พบว่า กรณีไม่มีอัตราการไหลที่หัวเจ็ต ($q_{jet} = 0$, $Re_{jet} = 0$) แต่มีเพียงอัตราการไหลที่ท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่านั้น โดยจุดเริ่มเกิดการผสม (\blacktriangle) ที่ $Re_{mixer} = 41,200$ จุด (\blacklozenge) บนแกน Re_{mixer} โดย $Re_{jet} = 0$ เป็นสถานะที่สามารถเกิดการผสมได้เช่นเดียวกันแต่ $Re_{mixer} = 44,600$ ดังนั้นที่ $Re_{jet} = 0$ และ $Re_{mixer} \geq 41,200$ เกิดการผสมได้ จากการทดลองพบพิกัดจุดต่างๆ ที่เกิดการผสมและไม่เกิดการผสม โดยจุด \diamond แสดงสถานะที่ไม่เกิดการผสม จุด \blacklozenge แสดงสถานะที่เกิดการผสม และจุด \blacktriangle แสดงจุดเริ่มเกิดการผสมที่ใช้เป็นแนวแบ่งโดเมน โดยโดเมนที่ไม่เกิดการผสมอยู่ทางด้านซ้ายของแนวแบ่งโดเมน และทางด้านขวาของแนวแบ่งโดเมนเป็นโดเมนที่เกิดการผสมได้

จากผลการทดลองข้างต้นที่อัตราส่วนความหนืด 1:1 ในงานวิจัยนี้ทดลองเพิ่มอัตราส่วนความหนืดด้วยการใช้น้ำเป็นของเหลวที่หนึ่งแล้วทำการเพิ่มความหนืดของของเหลวที่สองที่ไหลผ่านท่อด้านข้างโดยใช้ไซเตียมคาร์บอเนตซีเมทิลเซลลูโลสละลายในน้ำให้มีความหนืดเท่ากับ 5, 8 และ 15 เซนติสโตกส์ ทำให้ได้อัตราส่วนความหนืดระหว่างของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สองเท่ากับ 1:6, 1:10 และ 1:19 ตามลำดับ โดยผลการทดลองรายงานในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เริ่มเกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตที่อัตราส่วนความหนืดของของเหลวที่หนึ่งกับของเหลวที่สองเท่ากับ 1:1, 1:6, 1:10 และ 1:19

เส้นประในภาพที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re_{jet} กับ Re_{mixer} กรณีที่มีของเหลวที่หนึ่งไหลผ่านหัวเจ็ตเพียงอย่างเดียวเข้าไปในท่อผสม ทำให้อัตราการไหลที่หัวเจ็ตเท่ากับอัตราการไหลภายในท่อผสม ดังสมการ (6) เช่นเดียวกับเส้นประในภาพที่ 9 ถึงแม้จะมีการเปลี่ยนค่าความหนืดของของเหลวในท่อด้านข้าง แต่เส้นประก็ยังคงเป็นเส้นเดิม

ภาพที่ 10 แสดงเลขเรย์โนลด์ที่หัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์ในท่อผสม (Re_{mixer}) ที่เริ่มเกิดการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ตที่อัตราส่วนความหนืดระหว่างของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สองเท่ากับ 1:1, 1:6, 1:10 และ 1:19 ผลการทดลองที่อัตราส่วนความหนืด 1:6 พบว่า กรณีไม่มีอัตราการไหลผ่านหัวเจ็ต ($q_{jet} = 0, Re_{jet} = 0$) ไม่เกิดการผสม แต่จะสามารถเริ่มเกิดการผสมได้ที่ $Re_{jet} = 40,800$ และ $Re_{mixer} = 17,900$ แสดงด้วย ● และพิกัดจุดอื่นๆของอัตราส่วนความหนืด 1:6 ที่เกิดการผสมที่สภาวะต่างๆ แสดงด้วย ● ซึ่งใช้เป็นแนวแบ่งโดเมนการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ต โดยโดเมนที่ไม่เกิดการผสมอยู่ทางด้านซ้ายและโดเมนเกิดการผสมอยู่ด้านขวาของแนวแบ่งโดเมน เมื่อเปรียบเทียบจุดเริ่มเกิดการผสมของอัตราส่วนความหนืด 1:1 ที่มีค่า $Re_{jet} = 163,000$ จะได้ $Re_{mixer} = 78,300$ แต่ที่ Re_{jet} ค่าเดียวกันของอัตราส่วนความหนืด 1:6 จะเริ่มเกิดไหลเต็มท่อผสมที่ $Re_{mixer} = 53,000$

ผลการทดลองที่อัตราส่วนความหนืด 1:10 (×) พบว่า กรณีไม่มีอัตราการไหลผ่านหัวเจ็ต ($q_{jet} = 0, Re_{jet} = 0$) ไม่เกิดการผสมเช่นเดียวกับอัตราส่วนความหนืด 1:6 (●) แต่เริ่มไหลเต็มท่อผสมได้ที่ $Re_{jet} = 40,800$ และ $Re_{mixer} = 15,500$ แสดงด้วย × และพิกัดจุดอื่นๆที่ไหลเต็มท่อผสมถูกแสดงด้วยจุด × ซึ่งเป็นแนวแบ่งโดเมนการผสมภายในท่อผสม โดยแบ่งโดเมนไม่เกิดการผสมอยู่ทางด้านซ้ายและโดเมนเกิดการผสมอยู่ทางด้านขวาของแนวแบ่งโดเมน เมื่อเปรียบเทียบจุดเริ่มเกิดไหลเต็มท่อผสมที่ $Re_{jet} = 163,000$ ของอัตราส่วนความหนืด 1:10 มีค่า $Re_{mixer} = 51,100$ แต่อัตราส่วนความหนืด 1:6 มีค่า $Re_{mixer} = 53,000$

การทดลองที่อัตราส่วนความหนืด 1:19 (+) พบว่า กรณีไม่มีอัตราการไหลผ่านหัวเจ็ต ($q_{jet} = 0, Re_{jet} = 0$) ไม่เกิดการไหลเต็มท่อผสม แต่เริ่มเกิดไหลเต็มท่อผสมได้ที่ $Re_{jet} = 40,800$ และ $Re_{mixer} = 14,100$ แสดงด้วย + และพิกัดจุดอื่นๆที่ไหลเต็มท่อผสมถูกแสดงด้วยจุด + ซึ่งเป็นแนวแบ่งโดเมนการผสมภายในท่อผสม โดยแบ่งโดเมนไม่เกิดการผสมอยู่ทางด้านซ้ายและโดเมนเกิดการผสมอยู่ทางด้านขวาของแนวแบ่งโดเมน เมื่อเปรียบเทียบจุดที่เริ่มเกิดไหลเต็มท่อที่ $Re_{jet} =$

163,000 ของอัตราส่วนความหนืด 1:10 มีค่า $Re_{\text{mixer}} = 51,100$ แต่อัตราส่วนความหนืด 1:19 มีค่า $Re_{\text{mixer}} = 50,200$

เลขเรย์โนลด์ (Re) เป็นตัวกำหนดลักษณะเฉพาะของการไหลในท่อ (pipe flow) โดยงานวิจัยนี้เลขเรย์โนลด์ (Re) ได้ถูกใช้ในการขยายขนาดบนสมมติฐานที่ว่า Re เท่ากันในท่อผสมที่มีขนาดต่างกันจะมีลักษณะเฉพาะของการไหลหรือการผสมที่ใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามในภาพที่ 10 ได้แสดงว่า เมื่อเพิ่มความหนืดของของเหลวชนิดที่สองที่ไหลผ่านท่อด้านข้างจะทำให้โดเมนที่ไม่เกิดการผสมแคบลงมาก เนื่องจากตำแหน่งที่เริ่มเกิดการผสมใกล้เส้นประมากขึ้น

เพื่อความกระจ่างภาพที่ 11 แสดงโดเมนของอัตราการไหลของของเหลวที่ไหลผ่านหัวเจ็ตและของเหลวภายในท่อผสมที่อัตราส่วนความหนืด 1:1, 1:6, 1:10 และ 1:19 ซึ่งเป็นสภาวะปฏิบัติการเดียวกันกับภาพที่ 10 โดยอัตราการไหลของของเหลวที่แสดงในภาพที่ 11 เป็นข้อมูลเบื้องต้นก่อนที่จะคำนวณเป็น Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่แสดงในภาพที่ 10 โดยในภาพที่ 11 แสดงว่าอัตราการไหลของของเหลวที่เริ่มเกิดการไหลเต็มท่อผสมที่อัตราส่วนความหนืดต่างๆมีค่าไม่ต่างกัน กล่าวคือ ที่ q_{jet} เดียวกัน เมื่อของเหลวในท่อด้านข้างหนืดมากขึ้นจะทำให้อัตราการไหลของท่อด้านข้างลดลงเล็กน้อยสังเกตได้จาก q_{mixer} ที่น้อยลงก็เกิดการผสมได้ แต่เมื่อคำนวณเป็นเลขเรย์โนลด์จะได้ค่า Re_{mixer} ที่เกิดการผสมมีค่าลดลงเพราะความหนืดเพิ่มขึ้นและทำให้พิกัดที่ทำให้เกิดการผสมอยู่ใกล้เส้นประมากขึ้น

การไหลในท่อ (pipe flow) มีลักษณะการไหลขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า เลขเรย์โนลด์ (Reynold number; Re) ในงานวิจัยนี้ต้องการหาสภาวะของอัตราการไหล (q) ที่มีค่าต่ำที่สุด หรือ เลขเรย์โนลด์ (Re) ที่ต่ำสุด ที่สามารถทำให้ของเหลวที่ไหลภายในท่อผสมเกิดการไหลเต็มท่อผสมได้ ซึ่งเป็นการเปลี่ยนจากการไหลในทางน้ำเปิด (open channel flow) ที่เป็นการไหลที่มีผิวของของไหลสัมผัสกับอากาศที่เรียกว่า ผิวของไหลอิสระ (free surface) ที่เกิดการไหลได้ด้วยแรงโน้มถ่วง (gravity force) ไปเป็นการไหลในท่อ (pipe flow) ซึ่งเป็นการไหลที่ไม่มีผิวของของไหลสัมผัสกับอากาศจะขึ้นอยู่กับกลุ่มตัวแปรไร้มิติที่เรียกว่า เลขฟรูด (Froude number; Fr) ดังสมการ (7) (Chow, 1959; Chanson, 2004)

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gd_{charac}}}$$

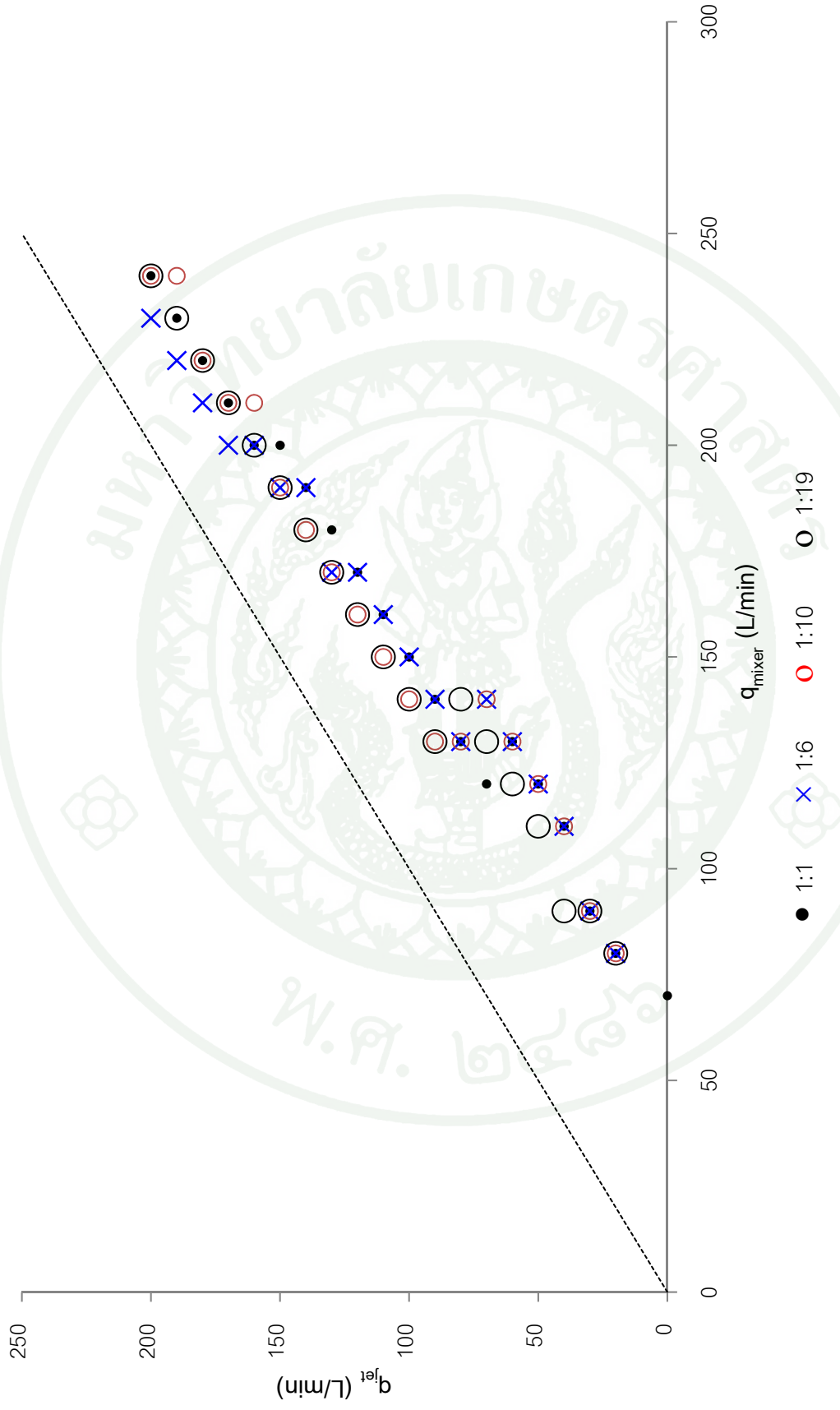
(7)

โดยที่

v คือ ความเร็วของการไหล (m/s)

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2) d_{charac} คือ ความลึกเฉพาะ (m)

จากสมการ (7) ความลึกเฉพาะ (d_{charac}) ขึ้นอยู่กับลักษณะทางน้ำเปิด เช่น แบบสี่เหลี่ยม (rectangular channel) ความลึกเฉพาะจะใช้ค่าความลึกทางชลศาสตร์ (hydraulic depth; D) (Chow, 1959) จากสมการของ Froude number (Fr) จะเห็นว่าไม่มีความหนืดมาเกี่ยวข้อง ดังนั้นกรณีอัตราการไหลที่อยู่ในช่วงของการไหลจากการไหลในทางน้ำเปิดเปลี่ยนเป็นการไหลในท่อนี้ อาจเป็นสาเหตุให้อัตราการไหลในท่อผสมมีค่าใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าความหนืดจะมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 โดเมนของอัตราการไหลของเหลวที่ผ่านหัวฉีดและอัตราการไหลของการผสมที่อัตราส่วนความหนืด 1:1, 1:6, 1:10 และ 1:19

2. ออกแบบและสร้างเครื่องผสมเจ็ดตัวใหม่

จากผลการทดลองเครื่องผสมเจ็ดขนาดจำลองตัวแรกพบโดเมนไหลเต็มท่อผสมและไหลไม่เต็มท่อผสม ซึ่งถูกนำมาใช้ในการออกแบบเครื่องผสมเจ็ดขนาดจำลองตัวใหม่ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นที่มีความแน่นอนของการเกิดการผสม เนื่องจากเกิดการไหลเต็มท่อผสมได้ โดยมีข้อมูลเบื้องต้นดังตารางที่ 10 และคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผสมจากสมการเลขเรย์โนลด์ (Re)

$$Re = \frac{4pq}{\pi D \mu} \quad (8)$$

โดยที่

- D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (m)
 q คือ อัตราการไหลของของเหลว (m³/s)
 ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m³)
 μ คือ ความหนืดไดนามิกส์ของของเหลว (kg/m.s หรือ Poise)

เครื่องผสมเจ็ดถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการนำไปใช้ที่สภาวะปฏิบัติการของโรงงาน ดังนั้นการคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผสมจึงต้องใช้สภาวะปฏิบัติการของโรงงาน ซึ่งสภาวะปฏิบัติการของโรงงานมีอัตราการไหล ความหนาแน่น และความหนืดของของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ดแตกต่างกับของเหลวที่ผ่านท่อด้านข้างจึงต้องคำนวณหาสภาวะของแต่ละสายของของเหลวที่ไหลอยู่ภายในท่อผสม เพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อผสมที่ถูกต้องในการออกแบบและการสร้างเครื่องผสมเจ็ดที่ใช้ได้จริงและครอบคลุมสภาวะปฏิบัติการของโรงงาน

2.1 สภาวะปฏิบัติการของโรงงาน

โรงงานที่ร่วมโครงการมีอัตราการไหลท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง เท่ากับ 318 kg/min ความหนาแน่นเท่ากับ 1,465 kg/m³ ความหนืดเท่ากับ 20.1x10⁻³ kg/m.s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 1 in. หรือ 0.025 m. สำหรับอัตราการไหลของหัวเจ็ดเท่ากับ 980-1,045 kg/min ความหนาแน่นเท่ากับ 1,300 kg/m³ ความหนืดเท่ากับ 3.01x10⁻³ kg/m.s ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวเจ็ดเท่ากับ 1.5 in หรือ 0.038 m

2.1.1 การหาอัตราการไหลของของเหลวแต่ละสาย (Felder and Rousseau, 2000)

$$\text{อัตราการไหลของของเหลว (q)} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (9)$$

โดยที่

\dot{m} คือ อัตราการไหลเชิงมวล (kg/s)

ρ คือ ความหนาแน่นของของเหลว (kg/m³)

(ก) อัตราการไหลของของเหลวผ่านท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง (q_{side})

$$q_{\text{side}} = (318 \text{ kg/min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})/(1,465 \text{ kg/m}^3) = 3.62 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

(ข) อัตราการไหลของของเหลวผ่านหัวเจ็ต (q_{jet})

1) อัตราการไหลของของเหลวต่ำสุดของหัวเจ็ต

$$q_{\text{jet}} = (980 \text{ kg/min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})/(1,300 \text{ kg/m}^3) = 1.26 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

2) อัตราการไหลของของเหลวสูงสุดของหัวเจ็ต

$$q_{\text{jet}} = (1,045 \text{ kg/min})(1 \text{ min}/60 \text{ s})/(1,300 \text{ kg/m}^3) = 1.34 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

(ค) อัตราการไหลของของเหลวภายในท่อผสม (q_{mixer})

$$q_{\text{mixer}} = q_{\text{jet}} + q_{\text{side}} \quad (10)$$

1) อัตราการไหลของของเหลวต่ำสุดของท่อผสม

$$q_{\text{mixer}} = (1.26 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}) + (3.62 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}) = 0.0161 \text{ m}^3/\text{s}$$

2) อัตราการไหลของของเหลวสูงสุดของท่อผสม

$$q_{\text{mixer}} = (1.34 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}) + (3.62 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}) = 0.0170 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.1.2 การหาความหนาแน่นของของเหลวภายในท่อผสม

ของผสมภายในท่อผสมเกิดจากการผสมของของเหลวที่หนึ่งที่ไหลผ่านหัวเจ็ทกับของเหลวที่สองที่ไหลผ่านท่อเข้าด้านข้าง โดยของเหลวทั้งสองชนิดมีความหนาแน่นและอัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate) ไม่เท่ากัน ดังนั้น ความหนาแน่นของของเหลวภายในท่อผสมจึงเป็นความหนาแน่นเฉลี่ย ซึ่งคำนวณได้จากสมการ (11) (Felder and Rousseau, 2000)

$$\frac{1}{\bar{\rho}} = \frac{X_{\text{side}}}{\rho_{\text{side}}} + \frac{X_{\text{jet}}}{\rho_{\text{jet}}} \quad (11)$$

โดยที่

$\bar{\rho}$ คือ ความหนาแน่นของของผสม (kg/m^3)

ρ_{side} คือ ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลผ่านท่อด้านข้าง (kg/m^3)

ρ_{jet} คือ ความหนาแน่นของของเหลวที่ไหลผ่านหัวเจ็ท (kg/m^3)

X_{side} คือ สัดส่วนโดยมวลของของเหลวที่ไหลผ่านท่อด้านข้าง

X_{jet} คือ สัดส่วนโดยมวลของของเหลวที่ไหลผ่านหัวเจ็ท

(ก) สภาวะอัตราไหลของของเหลวต่ำสุดของหัวเจ็ทกับท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง

$$\text{สัดส่วนโดยมวล } (x_i) = (\text{น้ำหนักของสาร } i) / (\text{น้ำหนักรวมทั้งหมด}) \quad (12)$$

$$\text{น้ำหนักรวมทั้งหมด } (\dot{m}_{\text{mixer}}) = 318 + 980 = 1,298 \text{ kg/min}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{1}{\bar{\rho}} = \frac{(318/1,298)}{1,465} + \frac{(980/1,298)}{1,300} = 7.48 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\bar{\rho} = 1,337 \text{ kg/m}^3$$

(ข) สภาวะอัตราไหลของของเหลวสูงสุดของหัวเจ็ทกับท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง

$$\text{น้ำหนักรวมทั้งหมด } (\dot{m}_{\text{mixer}}) = 318 + 1,045 = 1,363 \text{ kg/min}$$

$$\text{ดังนั้น } \frac{1}{\bar{\rho}} = \frac{(318/1,363)}{1,465} + \frac{(1,045/1,363)}{1,300} = 7.49 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$\bar{\rho} = 1,335 \text{ kg/m}^3$$

2.1.3 การหาความหนืดของของเหลวภายในท่อผสม

ของเหลวภายในท่อผสมเกิดจากการผสมของของเหลวที่หนึ่งที่ไหลผ่านหัวเจ็ทกับของเหลวที่สองที่ไหลผ่านท่อเข้าด้านข้าง โดยของเหลวทั้งสองชนิดมีความหนืดและอัตราการไหลเชิงมวล (mass flow rate) จะไม่คงที่ที่ภายในท่อผสมของผสม ดังนั้นความหนืดของของเหลวภายในท่อผสมจึงใช้ความหนืดเฉลี่ย ซึ่งคำนวณหาได้จากสมการ (13)

$$\mu = \frac{1}{\left(\frac{x_{\text{side}}}{\mu_{\text{side}}}\right) + \left(\frac{x_{\text{jet}}}{\mu_{\text{jet}}}\right)} \quad (13)$$

(ก) สภาวะอัตราไหลของของเหลวต่ำสุดของหัวเจ็ทกับท่อเข้าด้านข้าง 2 ซ้ำง

$$\mu = \frac{1}{\left(\frac{(318/1,298)}{20.1 \times 10^{-3}}\right) + \left(\frac{(980/1,298)}{3.01 \times 10^{-3}}\right)} = 3.81 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$$

(ข) สภาวะอัตราไหลของของเหลวสูงสุดของหัวเจ็ทกับท่อเข้าด้านข้าง 2 ซ้ำง

$$\mu = \frac{1}{\left(\frac{(318/1,363)}{20.1 \times 10^{-3}}\right) + \left(\frac{(1,045/1,298)}{3.01 \times 10^{-3}}\right)} = 3.76 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$$

2.2 การหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสมที่เหมาะสม

นำข้อมูลจากการทดลองเครื่องผสมเจ็ทจำลองขนาด 44 มิลลิเมตร เป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเครื่องผสมเจ็ทตัวใหม่ให้มีขนาดที่เหมาะสมกับสภาวะปฏิบัติการของโรงงาน โดยใช้สมการเลขเรย์โนลด์ ดังสมการ (14)

$$Re_{\text{mixer}} = \frac{4\rho_{\text{mixer}}q_{\text{mixer}}}{\pi D_{\text{mixer}}\mu_{\text{mixer}}} \quad (14)$$

2.2.1 สภาวะปฏิบัติการของโรงงานคำนวณหาอัตราไหลต่ำสุดในท่อผสมเท่ากับ $0.0161 \text{ m}^3/\text{s}$, ความหนาแน่นเฉลี่ย $1,337 \text{ kg/m}^3$, ความหนืดเฉลี่ย $3.81 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s}$ นำข้อมูลที่ได้แทนค่าในสมการ (14) จะได้

ก) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 76 มิลลิเมตร (ประมาณ 3 นิ้ว)

$$Re_{\text{mixer}} = \frac{4(1,337 \text{ kg/m}^3)(0.0161 \text{ m}^3/\text{s})}{(3.141)(0.076 \text{ m})(3.81 \times 10^{-3} \text{ kg/m.s})} = 94,700$$

ข) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 102 มิลลิเมตร (ประมาณ 4 นิ้ว)

$$Re_{\text{mixer}} = \frac{4(1,337\text{kg/m}^3)(0.0161\text{m}^3/\text{s})}{(3.141)(0.102\text{m})(3.81 \times 10^{-3}\text{kg/m.s})} = 70,500$$

ค) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 127 มิลลิเมตร (ประมาณ 5 นิ้ว)

$$Re_{\text{mixer}} = \frac{4(1,337\text{kg/m}^3)(0.0161\text{m}^3/\text{s})}{(3.141)(0.127\text{m})(3.81 \times 10^{-3}\text{kg/m.s})} = 56,600$$

2.2.2 สภาวะปฏิบัติการของโรงงานคำนวณหาอัตราการไหลสูงสุดในท่อผสมเท่ากับ $0.0170\text{ m}^3/\text{s}$, ความหนาแน่นเฉลี่ย $1,335\text{ kg/m}^3$, ความหนืดเฉลี่ย $3.76 \times 10^{-3}\text{ kg/m.s}$ นำข้อมูลที่ได้แทนค่าในสมการ (14) จะได้

ก) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 76 มิลลิเมตร (ประมาณ 3 นิ้ว)

$$Re_{\text{mixer}} = \frac{4(1,335\text{kg/m}^3)(0.0170\text{m}^3/\text{s})}{(3.141)(0.076\text{m})(3.76 \times 10^{-3}\text{kg/m.s})} = 101,000$$

ข) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 102 มิลลิเมตร (ประมาณ 4 นิ้ว)

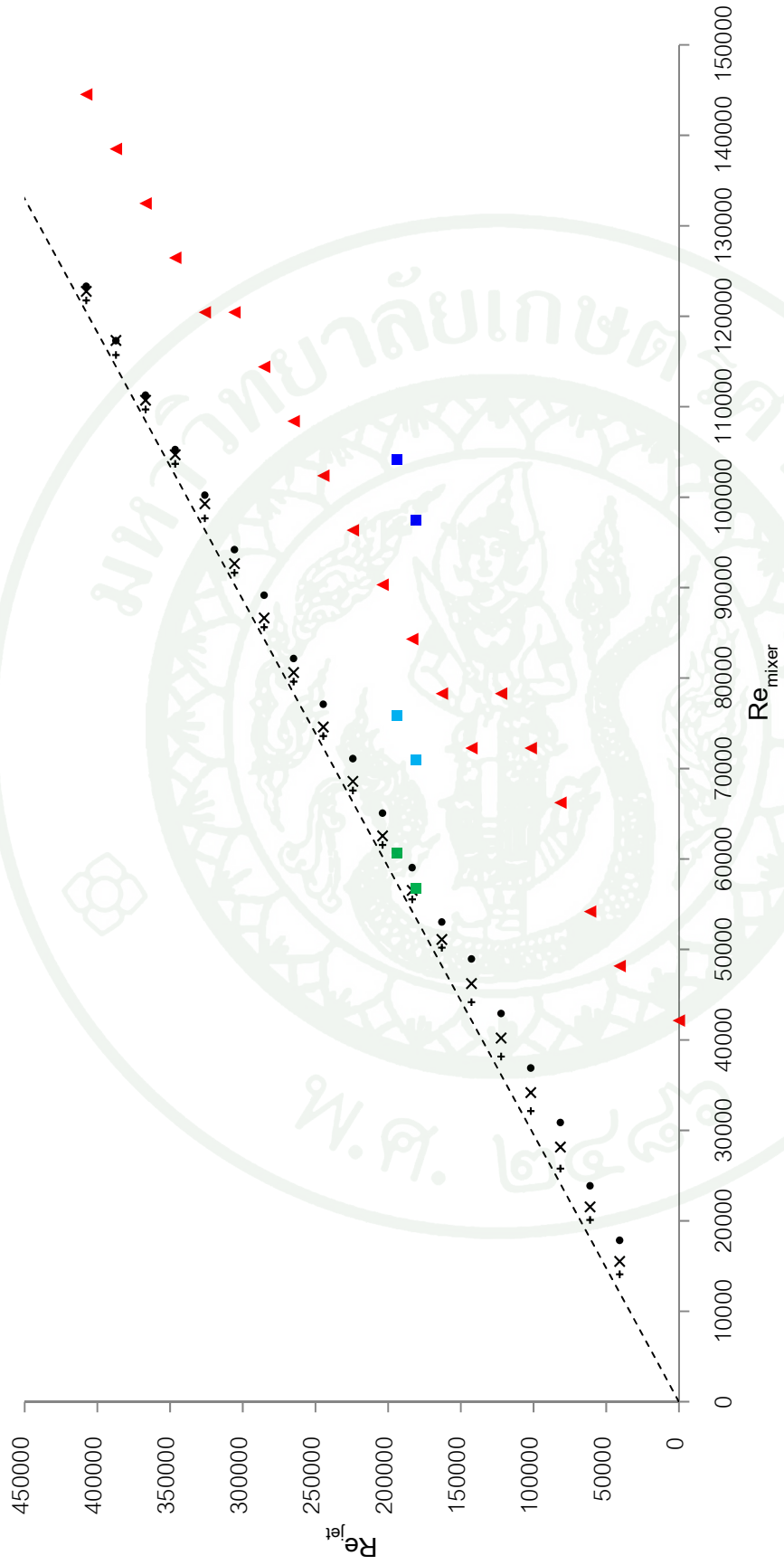
$$Re_{\text{mixer}} = \frac{4(1,335\text{kg/m}^3)(0.0170\text{m}^3/\text{s})}{(3.141)(0.102\text{m})(3.76 \times 10^{-3}\text{kg/m.s})} = 75,400$$

ค) กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 127 มิลลิเมตร (ประมาณ 5 นิ้ว)

$$Re_{\text{mixer}} = \frac{4(1,335\text{kg/m}^3)(0.0170\text{m}^3/\text{s})}{(3.141)(0.127\text{m})(3.76 \times 10^{-3}\text{kg/m.s})} = 60,500$$

การออกแบบเครื่องผสมเจ็ดตัวใหม่ที่สภาวะปฏิบัติการของโรงงาน โดยการกำหนดขนาดหัวเจ็ดคองที่ 38 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสมเท่ากับ 76, 102 และ 127 มิลลิเมตร นำค่า Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่ได้มาพิจารณาโดเมนของการผสม โดย Re_{jet} มีค่าอยู่ในช่วง 181,000 ถึง 194,000 ดังแสดงในภาพที่ 12





▲ 1:1 ● 1:6 × 1:10 + 1:16 ■ ออกแบบท่อผสม 76 มิลลิเมตร ■ ออกแบบท่อผสม 102 มิลลิเมตร ■ ออกแบบท่อผสม 127 มิลลิเมตร

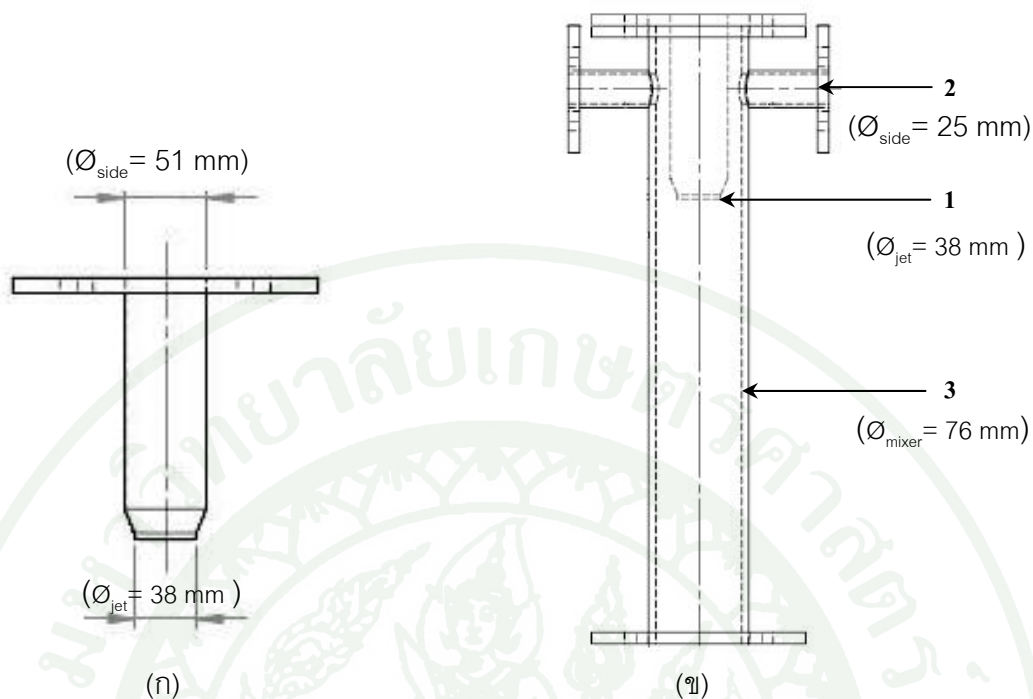
ภาพที่ 12 Re_{jet} และ Re_{mixer} ของเครื่องผสมเจ็ตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 44 มิลลิเมตร ที่สภาวะอัตราส่วนความหนืด 1:1, 1:6, 1:10, 1:19 และการออกแบบเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ ที่สภาวะปฏิบัติการของโรงงาน โดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 76, 102 และ 127 มิลลิเมตร

กรณีท่อผสมขนาด 127 มิลลิเมตร (■) จะได้ Re_{mixer} เท่ากับ 56,600 ถึง 60,500 แสดงให้เห็นว่า พิกัดจุด (■) อยู่ในโดเมนไม่เกิดการผสมของอัตราส่วนความหนืด 1:1 และ 1:6 ในกรณีท่อผสมขนาด 102 มิลลิเมตร (■) จะได้ค่า Re_{mixer} เท่ากับ 70,500 ถึง 75,400 พิกัดจุด ■ อยู่ที่โดเมนเกิดการผสมของอัตราส่วน 1:6 แต่อยู่ในโดเมนไม่เกิดการผสมของอัตราส่วน 1:1 แต่ที่พิกัดจุด ■ ของท่อผสมขนาด 76 มิลลิเมตร มีค่า Re_{mixer} เท่ากับ 94,700 ถึง 101,000 อยู่ในโดเมนเกิดการผสมของทุกอัตราส่วนความหนืด ผู้วิจัยได้กำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องผสมเจ็ตที่จะใช้จริงในสภาวะปฏิบัติการของโรงงานเป็น 76 มิลลิเมตร เพื่อให้ความมั่นใจกับโรงงานที่ร่วมโครงการว่าจะทำให้เกิดการผสมภายในท่อผสมได้ และมีความเหมาะสมกับสภาวะปฏิบัติการของโรงงาน โดยเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่นี้ถูกกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจ็ต 38 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเข้าด้านข้าง 25 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดเดียวกับเครื่องผสมเจ็ตเดิมที่ยังใช้อยู่ในโรงงาน เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่นี้จะถูกทดสอบเพื่อยืนยันว่าเกิดการผสมได้ โดยวิธีการทดลองเดียวกับเครื่องผสมเจ็ตขนาดท่อผสม 44 มิลลิเมตร

งานวิจัยนี้เลือกที่จะทดสอบขนาดเครื่องผสมเจ็ตขนาด 76 มิลลิเมตร เป็นที่ทราบกันดีว่าเครื่องผสมเจ็ตมีขนาดเล็กจะมีค่าความดันตกคร่อม (pressure drop) ที่มีค่าสูง แต่ถ้าพิจารณาจากข้อมูลในภาพที่ 12 ที่แสดงขนาดท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตที่น่าจะให้เกิดการผสมได้ ซึ่งสามารถมีขนาดที่ใหญ่กว่า 76 มิลลิเมตร และทำให้มีความดันตกคร่อมมีค่าน้อยกว่าได้ อย่างไรก็ตามก็ดีวิทยานิพนธ์นี้มีขอบเขตที่จะทดลองเครื่องผสมเจ็ตที่จะใช้ในโรงงานที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 76 มิลลิเมตรเท่านั้น

2.3 เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่

ภาพที่ 13 แสดงเครื่องผสมเจ็ตที่ออกแบบให้มีขนาดที่นำไปใช้ในโรงงาน ภาพที่ 13 (ก) แสดงลักษณะของหัวเจ็ต และภาพที่ 13 (ข) หมายเลข 1 คือ ปลายทางออกของหัวเจ็ตที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ_{jet}) เท่ากับ 38 มิลลิเมตร หมายเลข 2 คือ ท่อเข้าด้านข้างที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ_{side}) เท่ากับ 25 มิลลิเมตร โดยหัวเจ็ตและท่อเข้าด้านข้างนี้เท่ากับขนาดท่อที่ใช้ในโรงงาน หมายเลข 3 คือ ท่อผสมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (ϕ_{mixer}) เท่ากับ 76 มิลลิเมตร

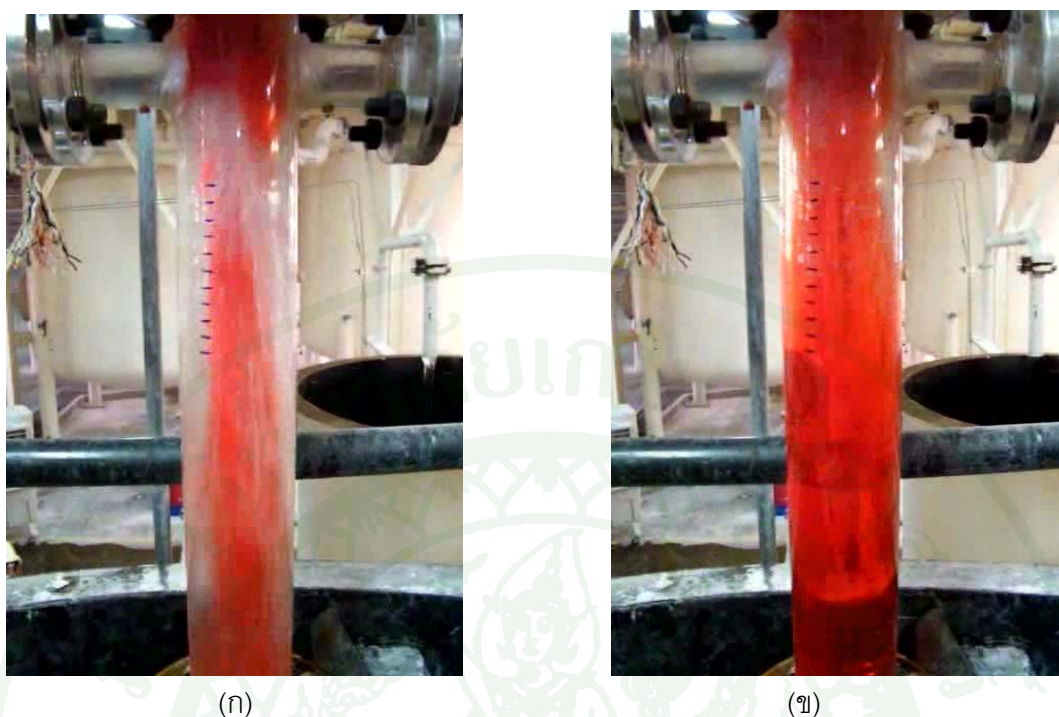


ภาพที่ 13 เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ (ก) หัวเจ็ต (ข) หัวเจ็ตและท่อผสม

ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่นี้แตกต่างจากเครื่องผสมเจ็ตที่ใช้จริงในโรงงานในปัจจุบันตรงที่มีขนาดของท่อผสมเล็กกว่า (ปัจจุบันโรงงานใช้ท่อผสมขนาด 127 มิลลิเมตร) และในงานวิจัยนี้ต้องการทดลองกรณีที่ท่อด้านข้างมีขนาดที่แตกต่างออกไปจึงได้ทำเครื่องผสมเจ็ตที่มีขนาดของท่อเข้าด้านข้างให้มีเส้นผ่านศูนย์กลาง (\varnothing_{side}) เท่ากับ 38 มิลลิเมตร

3. ผลการศึกษาการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ด้วยการฉีดสี

เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่มีการเปลี่ยนแปลงขนาดท่อผสมจาก 76 มิลลิเมตรเป็น 74 มิลลิเมตร เนื่องจากท่ออะคริลิคใสที่มีขายตามท้องตลาดมีเพียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 74 มิลลิเมตรที่มีค่าใกล้เคียงมาใช้ในการทดลอง จากการศึกษาการผสมของเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ด้วยส่ายตา สามารถสังเกตพฤติกรรมการไหลได้ 2 ลักษณะ คือ การไหลไม่เต็มท่อผสม และการไหลเต็มท่อผสม ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 พฤติกรรมการไหลของของเหลวภายในเครื่องผสมเจ็ต

(ก) ไหลไม่เต็มท่อผสม

อัตราการไหลที่หัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 100 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 250 ลิตรต่อนาที

(ข) ไหลเต็มท่อผสม

อัตราการไหลที่หัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 120 ลิตรต่อนาที

อัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 270 ลิตรต่อนาที

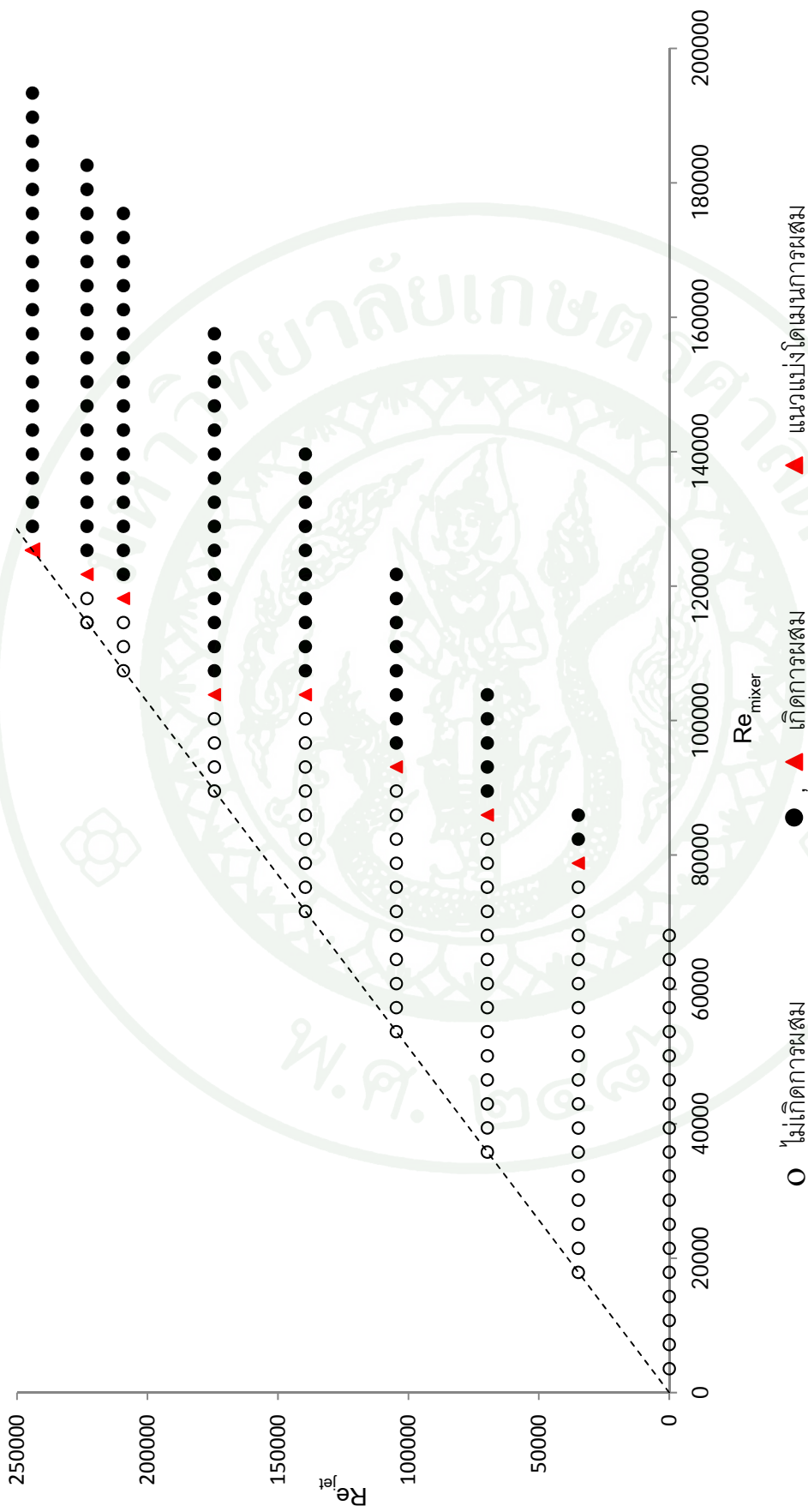
ภาพที่ 14 แสดงพฤติกรรมการไหลภายในเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ โดยภาพที่ 14 (ก) แสดงอัตราการไหลที่หัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 100 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 250 ลิตรต่อนาที พบว่า สีไม่กระจายตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อผสมและไม่เกิดการผสมของของเหลวสองสายนี้ และภาพที่ 14 (ข) แสดงอัตราการไหลที่หัวเจ็ต (q_{jet}) เท่ากับ 150 ลิตรต่อนาที อัตราการไหลในท่อด้านข้าง (q_{side}) เท่ากับ 120 ลิตรต่อนาที และอัตราการไหลในท่อผสม (q_{mixer}) เท่ากับ 270 ลิตรต่อนาที พบว่า สีกระจายตัวเต็มพื้นที่หน้าตัดของท่อผสม แสดงว่าของเหลวไหลเต็มท่อผสมและเกิดการผสมขึ้นได้

จากการคำนวณเลขเรย์โนลด์ของของเหลวในท่อผสมด้วยสมการ (1) พบว่า กรณีไม่เกิดการผสม Re_{mixer} มีค่าเท่ากับ 89,500 ซึ่งมีค่าสูงและลักษณะการไหลเป็นแบบปั่นป่วน แต่สังเกตได้ว่าสาเหตุของการไม่ผสมกันเกิดจากของเหลวสองสายไหลไม่เต็มท่อผสม ในกรณีที่เกิดการผสม Re_{mixer} มีค่าเท่ากับ 96,700 พบว่า ของเหลวไหลเต็มท่อผสมและเกิดการผสมได้ ดังนั้นหากมีการไหลเต็มท่อผสมของเหลวจะผสมกันแน่นอนเนื่องจากค่า Re มีค่าสูง

เส้นประในภาพที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re_{jet} กับ Re_{mixer} กรณีที่ของเหลวไหลผ่านหัวเจ็ตเพียงอย่างเดียว ทำให้อัตราการไหลที่หัวเจ็ตเท่ากับอัตราการไหลในท่อผสม ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง Re_{jet} กับ Re_{mixer} ดังสมการ (5) เมื่อมีของเหลวไหลจากท่อด้านข้างด้วย โดยที่ของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ตคงที่จะทำให้ค่า Re_{mixer} มากขึ้น ทำให้พิกัดที่ทดลองอยู่ทางขวามือของเส้นประ และทำให้ไม่มีข้อมูลการทดลองแสดงในบริเวณทางซ้ายมือของเส้นประ เพราะอัตราการไหลของของเหลวในท่อด้านข้างไม่น้อยกว่าศูนย์ ในกรณีที่เครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวเจ็ต 38 มิลลิเมตร และท่อผสม 74 มิลลิเมตร จะได้

$$Re_{jet} = (1.93)Re_{mixer} \quad (15)$$

โดยพิกัดจุดกรณีที่ไม่มีของเหลวไหลผ่านท่อด้านข้าง ซึ่งแสดงด้วยเส้นประในภาพที่ 15 โดยเส้นประเป็นเส้นแบ่งโดเมนความสัมพันธ์ Re_{jet} กับ Re_{mixer} โดยพิกัดจุดอื่นที่อยู่ด้านขวาของเส้นประ แสดงว่า อัตราการไหลของท่อผสมเป็นอัตราไหลของหัวเจ็ตรวมกับอัตราการไหลของท่อด้านข้างและเป็นสภาวะเกิดได้จริง แต่ถ้าพิกัดจุดที่อยู่ด้านซ้ายของเส้นประ แสดงว่า สภาวะนั้นเกิดขึ้นไม่ได้

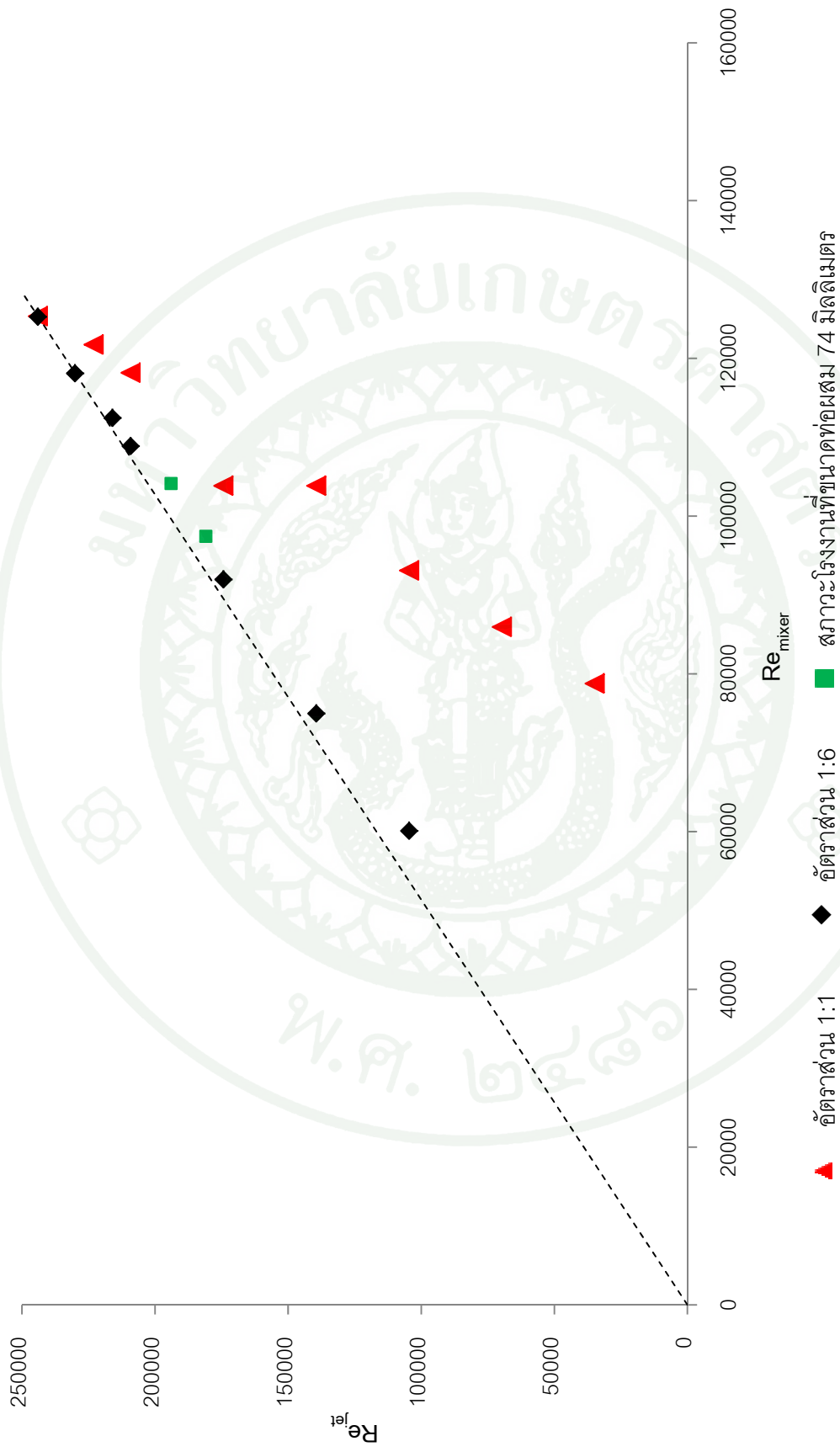


ภาพที่ 15 Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการผสมและไม่เกิดการผสมภายในท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ดตัวใหม่ขนาดท่อผสม 74 มิลลิเมตร โดยใช้เป็นของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง

ภาพที่ 15 แสดงเลขเรย์โนลด์ของหัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์ของท่อผสม (Re_{mixer}) ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ขนาดท่อผสม 74 มิลลิเมตร โดยใช้น้ำเป็นของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง ในภาพที่ 15 พบว่าที่ $Re_{jet} = 0$ ไม่สามารถเกิดการผสมได้ แต่เมื่อ $Re_{jet} = 34,900$ จะเริ่มเกิดการผสม (▲) อยู่ที่ $Re_{mixer} = 78,800$ จากการทดลองพบทั้งพิกัดจุดที่เกิดการผสมและไม่เกิดการผสม โดยจุด ▲ แสดงจุดที่เริ่มเกิดการผสม จุด ● แสดงสถานะที่เกิดการผสม และจุด ○ แสดงสถานะที่ไม่เกิดการผสม นอกจากนี้จุด ▲ ยังใช้เป็นแนวแบ่งโดเมนการผสม โดยโดเมนที่ไม่เกิดการผสมอยู่ทางด้านซ้ายของแนวแบ่งโดเมนและโดเมนที่เกิดการผสมจะอยู่ทางด้านขวาของแนวแบ่งโดเมน

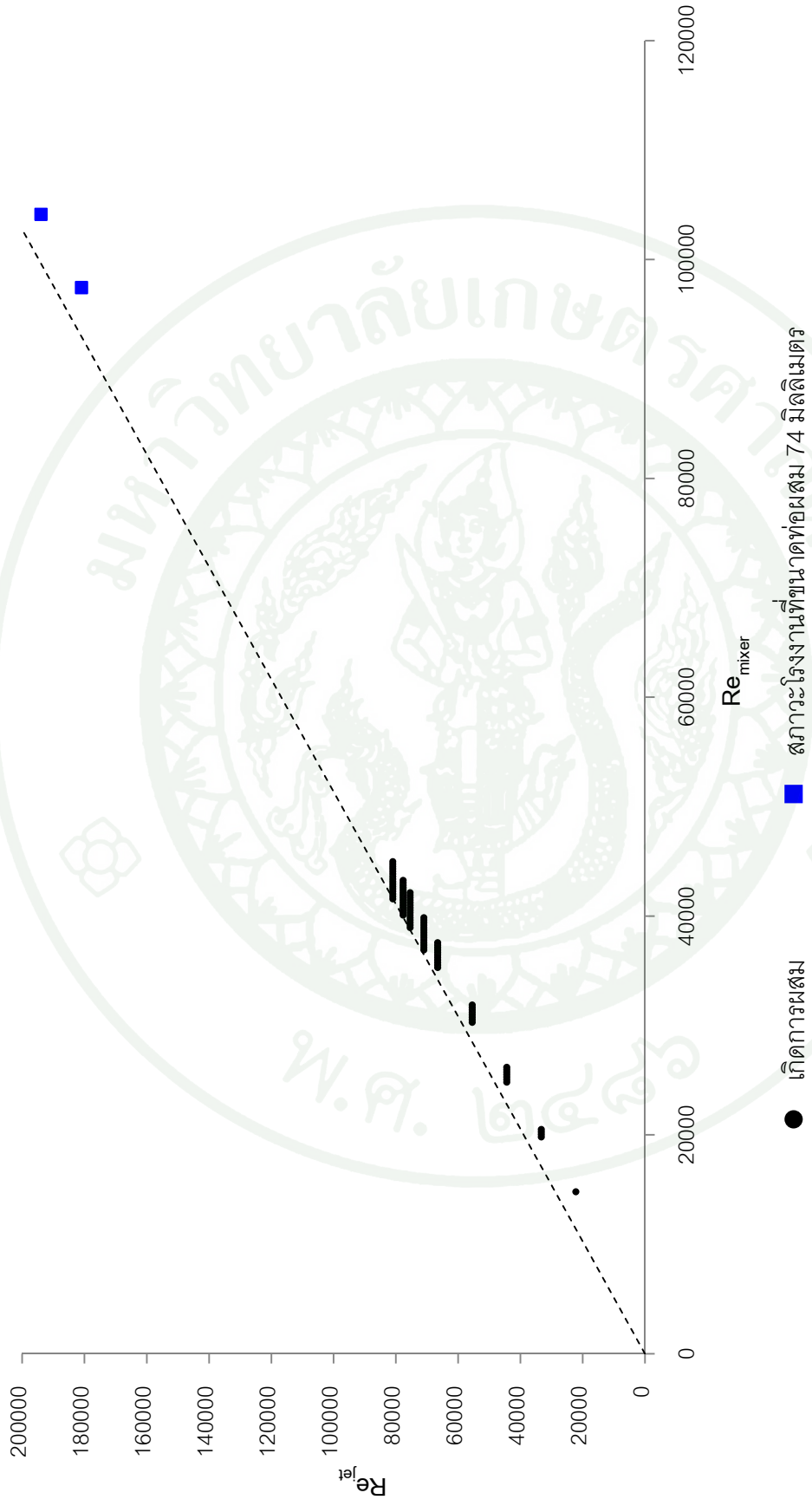
เส้นประในภาพที่ 16 แสดงเส้นแบ่งโดเมนความสัมพันธ์ระหว่าง Re_{jet} และ Re_{mixer} ของท่อผสมที่มีขนาด 74 มิลลิเมตร ที่มีของเหลวไหลผ่านหัวเจ็ตเพียงอย่างเดียวผ่านเข้าไปในท่อผสม โดยความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการ (15) โดยภาพที่ 16 แสดงเลขเรย์โนลด์ที่หัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์ในท่อผสม (Re_{mixer}) ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ต โดยมีอัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 1:1 และ 1:6 พบว่า เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ที่มีขนาดใหญ่กว่าเดิมนี้สามารถเกิดการผสมได้ ทั้งกรณีอัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 1:1 แสดงจุดเริ่มเกิดการผสมด้วยพิกัดจุด โดยที่ ▲ $Re_{jet} = 105,000$ จะเริ่มเกิดการผสมที่ $Re_{mixer} = 93,100$ และกรณีอัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 1:6 แสดงจุดเริ่มเกิดการผสมด้วยพิกัดจุด ◆ โดยที่ $Re_{jet} = 105,000$ จะเริ่มเกิดการผสมที่ $Re_{mixer} = 60,100$ ซึ่งพิกัดจุดที่แสดงไว้ใช้เป็นแนวแบ่งโดเมนการผสมของแต่ละอัตราส่วนความหนืด ดังนั้นแนวแบ่งโดเมนของพิกัดจุด ◆ จะพบโดเมนของการเกิดการผสมจะอยู่ทางขวาและโดเมนของการไม่เกิดการผสมอยู่ทางซ้าย และแนวแบ่งโดเมนของพิกัดจุด ▲ จะพบโดเมนไม่เกิดการผสมอยู่ทางด้านซ้ายและเกิดการผสมอยู่ทางด้านขวาของแนวแบ่งโดเมน

จากผลการทดลองเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ที่อัตราส่วนความหนืด 1:1 และ 1:6 ดังแสดงในภาพที่ 16 จากนั้นนำสภาวะปฏิบัติการของโรงงานมาคำนวณด้วยสมการเลขเรย์โนลด์ โดยกำหนดให้ท่อผสมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 74 มิลลิเมตร แสดงให้เห็นว่าพิกัดจุด ■ ของ Re_{jet} อยู่ในช่วง 181,000 ถึง 194,000 และ Re_{mixer} อยู่ในช่วง 97,400 ถึง 104,000 สภาวะปฏิบัติการของโรงงานมีอัตราส่วนความหนืดของของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สองเท่ากับ 1:6 เมื่อพิจารณาพิกัดจุด ■ พบว่า อยู่ในโดเมนไม่เกิดการผสมในกรณีที่อัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 1:1 แต่อยู่ในโดเมนเกิดการผสมในกรณีที่อัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 1:6 ดังนั้น สภาวะปฏิบัติการของโรงงานสามารถทำให้เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ที่มีขนาดท่อผสม 74 มิลลิเมตรเกิดการผสมได้



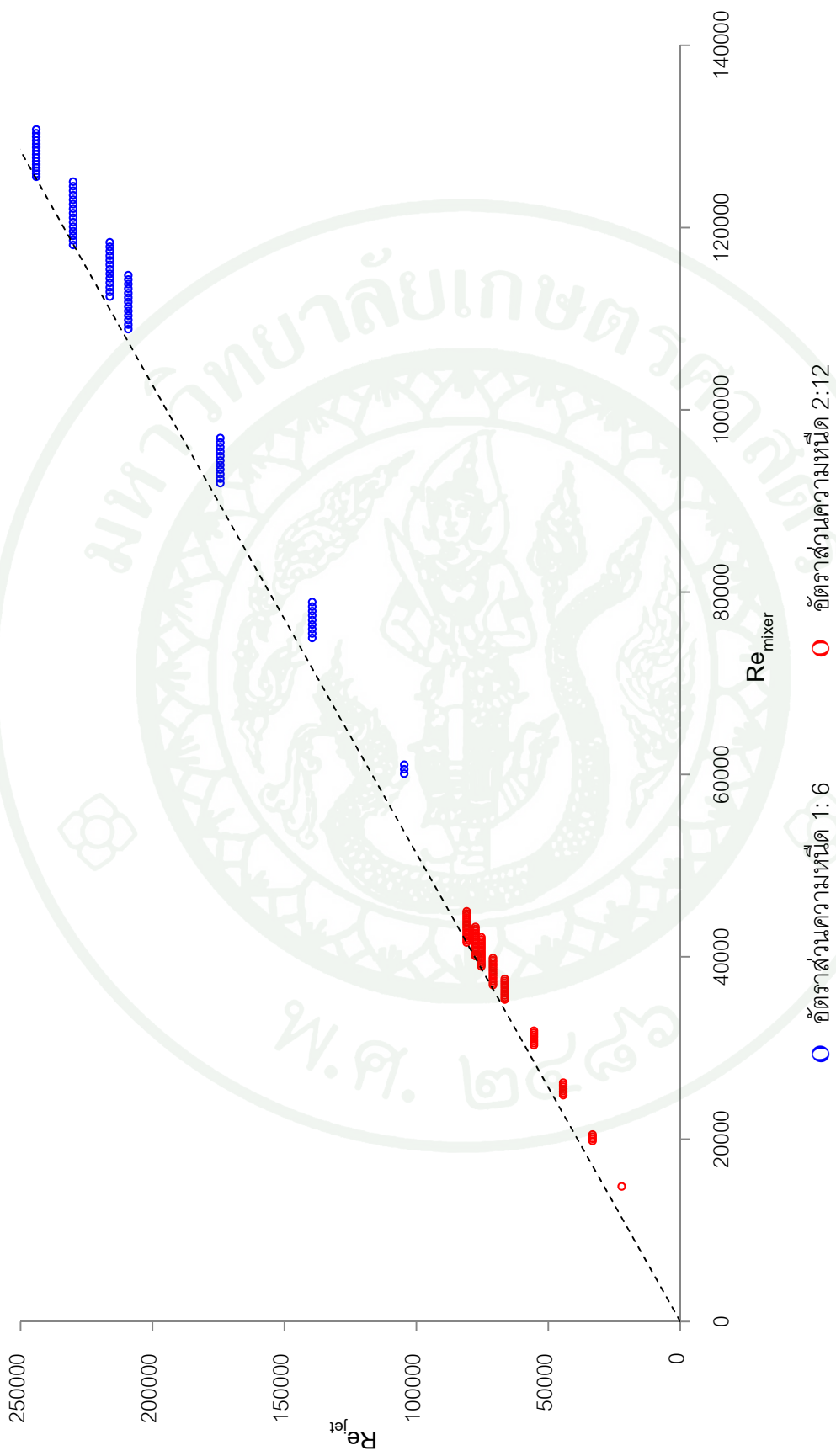
ภาพที่ 16 Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ต โดยมีอัตราส่วนความหนืดเท่ากับ 1:1 และ 1:6

เส้นประในภาพที่ 17 แสดงเส้นแบ่งโดเมนความสัมพันธ์ระหว่าง Re_{jet} และ Re_{mixer} ของท่อผสมที่มีขนาด 74 มิลลิเมตร ที่มีของเหลวไหลผ่านหัวเจ็ตเพียงอย่างเดียวผ่านเข้าไปในท่อผสม โดยความสัมพันธ์แสดงได้ดังสมการ (15) ซึ่งภาพที่ 17 แสดงเลขเรย์โนลด์ของหัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์ของท่อผสม (Re_{mixer}) ของเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 74 มิลลิเมตร โดยของเหลวที่หนึ่งมีความหนืด 2 เซนติสโตกส์ (cSt) และของเหลวที่สองมีความหนืด 12 เซนติสโตกส์ (cSt) พบว่า การไหลของของเหลวที่หนึ่งผ่านหัวเจ็ตเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดการไหลเต็มท่อได้ที่ค่า $Re_{mixer} = 41,600$ ซึ่งเป็นอัตราการไหลสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง โดยการทดลองพบทั้งพิกัดจุดที่เกิดการผสมและไม่เกิดการผสม ซึ่งพิกัดจุดที่เกิดการผสมแสดงด้วย ● ในภาพที่ 17 แต่พิกัดจุดที่ไม่เกิดการผสมไม่ได้แสดงไว้ แต่สามารถพิจารณาจากโดเมนที่เกิดการผสมจะอยู่ที่พิกัดจุดที่แสดงรวมไปถึงด้านขวาของพิกัดจุด ● และโดเมนไม่เกิดการผสมจะอยู่ทางด้านซ้ายของจุดเริ่มเกิดการผสมในแต่ละสภาวะ จากนั้นนำค่าเลขเรย์โนลด์ของท่อผสมที่คำนวณจากสภาวะปฏิบัติการของโรงงานโดยกำหนดให้ท่อผสมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 74 มิลลิเมตรได้พิกัดจุด ■ ของ Re_{jet} อยู่ในช่วง 181,000 ถึง 194,000 และ Re_{mixer} อยู่ในช่วง 97,400 ถึง 104,000 พบว่า อยู่ในโดเมนเกิดการผสม ดังนั้นเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่สามารถเกิดการผสมได้ที่สภาวะปฏิบัติการของโรงงาน

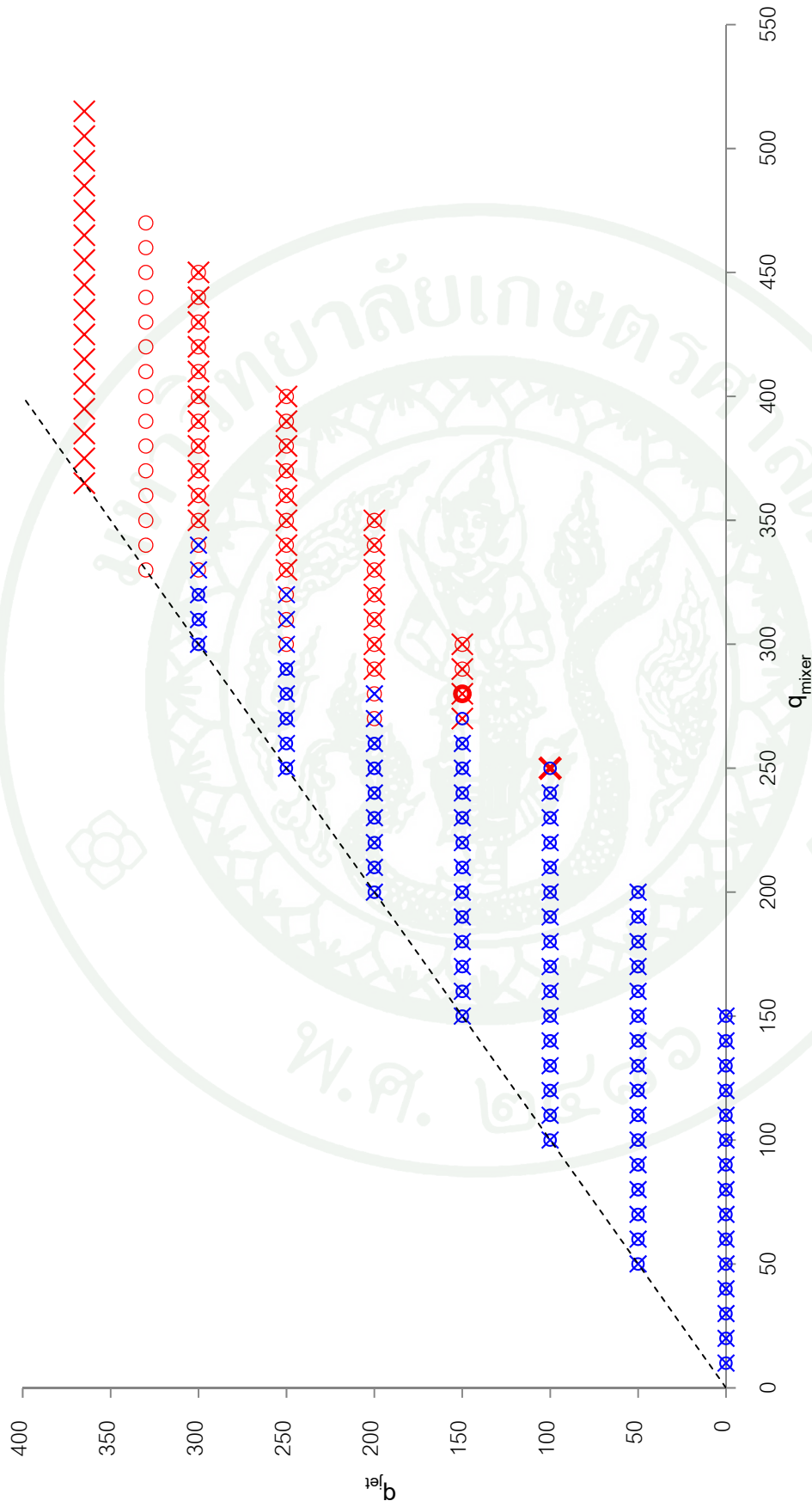


ภาพที่ 17 Re_{jet} และ Re_{mixer} ของเครื่องผสมเจ็ดตัวใหม่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 74 มิลลิเมตร โดยของเหลวที่นิ่งมีความหนืด 2 cSt และของเหลวที่ลดลงมีความหนืด 12 cSt

ประเด็นที่น่าสนใจการเปรียบเทียบข้อมูลจากการทดลองที่แสดงในภาพที่ 16 สำหรับความหนืดของของเหลวที่มีอัตราส่วน 1:6 กับข้อมูลในภาพที่ 17 ซึ่งแสดงกรณีที่มีความหนืดเป็นสองเท่า แต่อัตราส่วนความหนืดเท่ากัน ภาพที่ 18 แสดงเลขเรย์โนลด์ของหัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์ของท่อผสม (Re_{mixer}) ที่เกิดการผสมภายในเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ สำหรับสองกรณีดังกล่าวจะเห็นได้ว่า Re_{mixer} ที่เกิดการผสมได้ของอัตราส่วน 1:6 (○) มีค่ามากกว่าอัตราส่วน 2:12 (○) ภาพที่ 19 แสดงโดเมนของอัตราการไหลของของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ตและอัตราการไหลของของเหลวภายในท่อผสมที่อัตราส่วนความหนืด 1:6 และ 2:12 ในภาพนี้ผลการทดลองแต่ละอัตราการไหลถูกแสดงไว้ทั้งกรณีของการเกิดการผสม (× สำหรับอัตราส่วนความหนืด 2:12 , ○ สำหรับอัตราส่วนความหนืด 1:6) และไม่เกิดการผสม (× สำหรับอัตราส่วนความหนืด 2:12 , ○ สำหรับอัตราส่วนความหนืด 1:6) ในกรณีที่อัตราส่วนความหนืด 1:6 การผสมเริ่มเกิดขึ้นได้ที่ $q_{jet} = 150$ ลิตรต่อนาที และ $q_{mixer} = 130$ ลิตรต่อนาที แสดงด้วย ○ (ตัวหนา) แต่ในกรณีอัตราส่วนความหนืด 2:12 เริ่มเกิดการผสมได้ที่ $q_{jet} = 100$ ลิตรต่อนาที และ $q_{mixer} = 150$ ลิตรต่อนาที แสดงด้วย × (ตัวหนา) และยังพบว่าอัตราส่วนความหนืด 1:6 ถ้ามีอัตราการไหลที่หัวเจ็ตเพียงอย่างเดียวทำให้เกิดการไหลเต็มท่อผสมได้ที่ $q_{jet} = 330$ ลิตรต่อนาที (จุด ○ ที่อยู่บนเส้นประพอดี) แต่ที่อัตราส่วนความหนืด 2:12 เกิดการไหลเต็มท่อผสมได้ที่ $q_{jet} = 365$ ลิตรต่อนาที แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนความหนืด 1:6 สามารถเกิดการไหลเต็มท่อผสมได้ที่อัตราการไหลต่ำกว่า และข้อมูลของอัตราการไหลที่แสดงในภาพที่ 19 ถูกแปลงให้อยู่ในรูปของเลขเรย์โนลด์ (Re) ดังแสดงในภาพที่ 18 โดยความหนืดของกรณีอัตราส่วน 1: 6 และ 2:12 นี้ต่างกันหนึ่งเท่า ทำให้ Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่คำนวณได้ของทั้งสองกรณีอยู่ห่างกันมากได้ที่สภาวะอัตราการไหลของทั้งสองกรณีมีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 18 Re_{jet} และ Re_{mixer} ของเครื่องผสมเจ็ดตัว เหมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 74 มิลลิเมตร โดยมีอัตราความหนืดเท่ากับ 1:6 และ 2:12



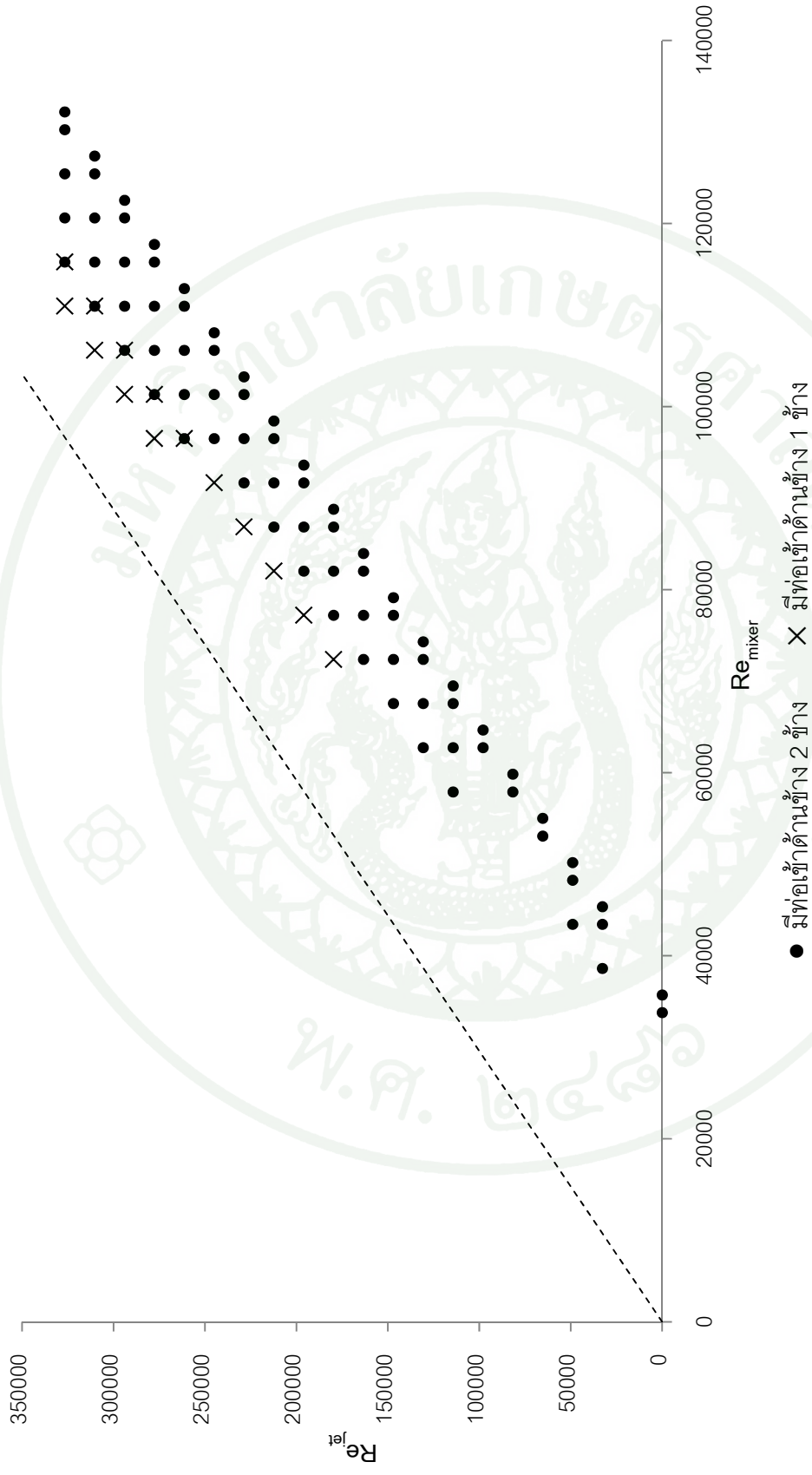
○ เกิดการผสมที่อัตราส่วน 1:6 ○ ไม่เกิดการผสมที่อัตราส่วน 1:6 × เกิดการผสมที่อัตราส่วน 2:12 × ไม่เกิดการผสมที่อัตราส่วน 2:12

ภาพที่ 19 โดเมนของอัตราไหลของเหลวที่ผ่านหัวฉีดและอัตราการไหลของเหลวภายในท่อผสมที่อัตราส่วนความหนืด 1:6 และ 2:12

4. ผลการศึกษาการผสมเพิ่มเติมด้วยเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองด้วยการฉีดสี

4.1 เครื่องผสมเจ็ตขนาดท่อผสม 44 มิลลิเมตรที่ติดตั้งหัวเจ็ตที่มีท่อเข้าด้านข้าง 1 ข้างกับท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง

ภาพที่ 20 แสดงเลขเรย์โนลด์ที่หัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์ของท่อผสม (Re_{mixer}) ที่เกิดการไหลเต็มท่อของเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองที่มีท่อเข้าด้านข้างเพียงข้างเดียว (X) และท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง (●) โดยใช้น้ำเป็นของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง พบว่า เครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองที่มีของเหลวไหลผ่านท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้างที่ไม่มีของเหลวไหลผ่านหัวเจ็ตสามารถเกิดการไหลเต็มท่อผสมได้ที่ค่า Re_{mixer} เท่ากับ 33,800 และ 35,700 เมื่อมีการไหลของของเหลวผ่านหัวเจ็ตร่วมกับของเหลวที่ไหลผ่านท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง พบว่า ที่ค่า Re_{jet} สูงขึ้นจะทำให้ไหลเต็มท่อผสมได้ที่ค่า Re_{mixer} น้อยลง ในกรณีของเครื่องผสมเจ็ตจำลองที่มีของเหลวไหลผ่านท่อเข้าด้านข้างเพียงข้างเดียวโดยไม่มีของเหลวไหลผ่านหัวเจ็ต พบว่า ไม่เกิดการไหลเต็มท่อผสม แต่ถ้ามีการไหลของของเหลวผ่านหัวเจ็ตร่วมกับท่อเข้าด้านข้างเพียงข้างเดียวทำให้เกิดการไหลเต็มท่อได้ที่ Re_{mixer} สูง การมีของเหลวไหลผ่านท่อเข้าด้านข้างที่มีเพียงด้านเดียวที่สภาวะ Re_{jet} และ Re_{mixer} ไม่สูงนั้นทำให้เกิดการปั่นป่วนภายในท่อผสมไม่เพียงพอที่จะเกิดการไหลเต็มท่อผสมได้



ภาพที่ 20 Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำกัดของที่มีท่อเข้าด้านข้างเพียงข้างเดียวและท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง โดยใช้เป็นของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง

4.2 เครื่องผสมเจ็ทขนาดท่อผสม 44 มิลลิเมตรที่ติดตั้งหัวเจ็ทและไม่ติดตั้งหัวเจ็ทที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง

ตารางที่ 1 อัตราการไหลของท่อด้านข้างและ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ทขนาดจำลองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสม 44 มิลลิเมตรที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้างแบบมีหัวเจ็ทและแบบไม่มีหัวเจ็ท โดยใช้ของเหลวที่สองที่มีความหนืดเท่ากับ 0.8, 5, 8 และ 15 เซนติสโตกส์

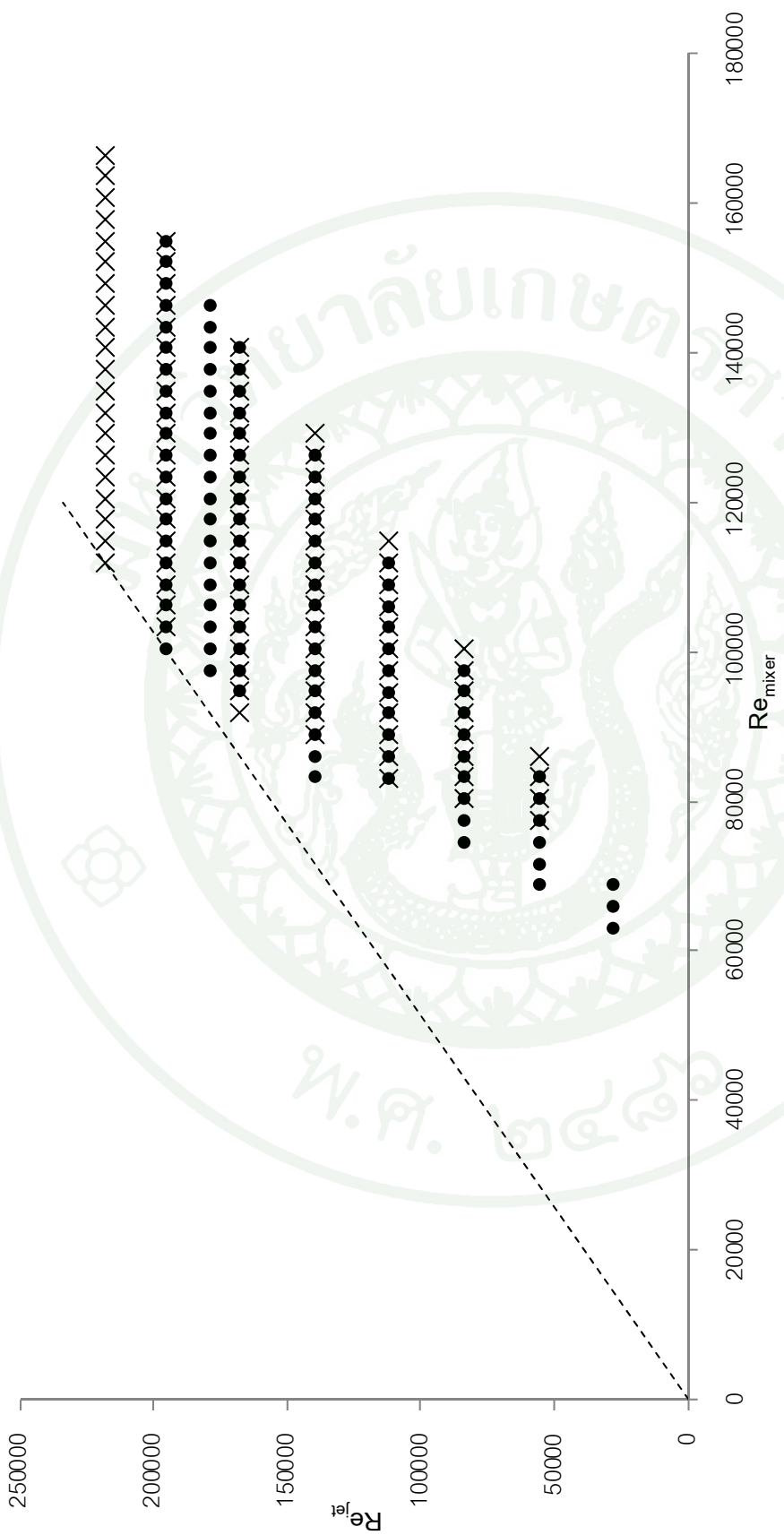
ความหนืดจลน์ (cSt)	มีหัวเจ็ท ($Q_{\text{jet}}=0$)		ไม่มีหัวเจ็ท ($Q_{\text{jet}}=0$)	
	Q_{side} (L/min)	Re_{mixer}	Q_{side} (L/min)	Re_{mixer}
0.8	70	42,100	70	42,100
5	ไม่เกิดการผสม	ไม่เกิดการผสม	60	5,070
8	ไม่เกิดการผสม	ไม่เกิดการผสม	50	2,860
15	ไม่เกิดการผสม	ไม่เกิดการผสม	50	1,710

หมายเหตุ ไม่เกิดการผสม เนื่องจากของเหลวไหลไม่เต็มท่อผสม

ตารางที่ 1 แสดง Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ทขนาดจำลองที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้างแบบมีหัวเจ็ทและแบบไม่มีหัวเจ็ท โดยไม่มีการไหลของของเหลวที่หนึ่งไหลผ่านหัวเจ็ท แต่มีของเหลวที่สองที่ไหลผ่านท่อเข้าด้านข้างที่ความหนืดเท่ากับ 0.8, 5, 8 และ 15 เซนติสโตกส์ แสดงเห็นว่า กรณีมีหัวเจ็ทติดตั้ง แต่ไม่มีของเหลวที่หนึ่งไหลผ่านหัวเจ็ทและสภาวะความหนืดของเหลวที่สองเท่ากับ 5, 8 และ 15 เซนติสโตกส์ ไม่สามารถเกิดการไหลเต็มท่อผสมได้ แต่เกิดได้กรณีใช้น้ำเป็นของเหลวที่สองเท่านั้น โดยจุดเริ่มเกิดไหลเต็มท่อผสมมีค่า Re_{mixer} เท่ากับ 33,800 ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกรณีไม่มีหัวเจ็ทที่ใช้น้ำเป็นของเหลวที่สอง ในกรณีไม่มีหัวเจ็ทยังพบว่า การเพิ่มความหนืดทำให้เกิดการไหลเต็มท่อที่ค่า Re_{mixer} มีค่าน้อยลง

4.3 เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ขนาดท่อผสม 74 มิลลิเมตร ที่ติดตั้งหัวเจ็ตที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง โดยมีขนาดท่อด้านข้างเท่ากับ 25 และ 38 มิลลิเมตร ตามลำดับ

ภาพที่ 21 แสดงเลขเรย์โนลด์ที่หัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์ในท่อผสม (Re_{mixer}) ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาดจำลองตัวใหม่ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อเข้าด้านข้าง 25 มิลลิเมตร (●) และ 38 มิลลิเมตร (×) ทำการทดลองด้วยเครื่องผสมเจ็ตที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ข้าง โดยใช้ น้ำ เป็นของเหลวที่หนึ่งและของเหลวที่สอง จากการทดลองพบว่า กรณีท่อเข้าด้านข้าง 25 มิลลิเมตรที่มีการไหลของของเหลวที่หนึ่งเพียงอย่างเดียวสามารถเกิดการไหลเต็มท่อผสมที่ Re_{mixer} เท่ากับ 89,700 และกรณีท่อเข้าด้านข้าง 38 มิลลิเมตรที่มีการไหลของของเหลวที่หนึ่งเพียงอย่างเดียวสามารถเกิดการไหลเต็มท่อที่ Re_{mixer} เท่ากับ 99,900 แต่ของเหลวที่สองผ่านท่อเข้าด้านข้างเพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ของเหลวที่สองไหลเต็มท่อผสมได้ กรณีมีการไหลของของเหลวที่ผ่านหัวเจ็ตร่วมกับท่อเข้าด้านข้าง พบว่า ที่ค่า Re_{jet} ในช่วงแรก ท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร เกิดการผสมได้ที่ Re_{mixer} ต่ำกว่า เนื่องจากท่อที่ใหญ่กว่าทำให้ของเหลวปั่นป่วนได้น้อยกว่า แสดงว่า ท่อที่มีขนาดเล็กจะผสมได้ง่ายกว่าท่อขนาดใหญ่ แต่เมื่อ Re_{jet} มีค่าสูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า กรณีท่อเข้าด้านข้างมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 และ 38 มิลลิเมตรมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากอัตราการไหลของของเหลวที่สองมากเพียงพอจนสามารถทำให้ของเหลวไหลเต็มท่อได้จึงทำให้ขนาดของท่อด้านข้างไม่มีผลที่ Re มีค่าสูง



● ท่อเข้าด้านข้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร X ท่อเข้าด้านข้างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร

ภาพที่ 21 Re_{jet} และ Re_{mixer} ที่เกิดการไหลเต็มท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่ ที่มีท่อเข้าด้านข้าง 2 ช่องที่มีขนาด 25 และ 38 มิลลิเมตร โดยไม่มีเขื่อน เป็นของเหลวที่หนึ่งกับของเหลวที่สอง

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผสมในเครื่องผสมเจ็ตแบบท่อแนวตั้งที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อผสมเท่ากับ 44 มิลลิเมตรและ 74 มิลลิเมตร โดยมีหัวเจ็ตติดตั้งตามแนวแกน สังเกตด้วยการฉีดสีและการกระจายตัวของสีที่เกิดภายในท่อผสมพร้อมกับถ่ายภาพเคลื่อนไหว ผลการทดลองแสดงว่า เลขเรย์โนลด์ (Reynolds number) ถึงแม้ว่าจะอยู่ในโดเมนการไหลที่ปั่นป่วน แต่ไม่เกิดการผสมได้ในทุกกรณี ทั้งนี้เนื่องจากของเหลวทั้งสองสายที่ป้อนเข้ามาไม่สัมผัสกัน หรืออีกนัยหนึ่งของเหลวไหลไม่เต็มท่อผสม ผลการทดลองแสดงโดเมนของการไหลของของเหลวที่เกิดการผสมและไม่เกิดการผสมในรูปของเลขเรย์โนลด์ที่หัวเจ็ต (Re_{jet}) กับเลขเรย์โนลด์ในท่อผสม (Re_{mixer}) จากข้อมูลเหล่านี้ทำให้สามารถกำหนดขนาดของเครื่องผสมเจ็ตที่จะใช้ในกระบวนการผลิตในโรงงานได้ ขนาดของเครื่องผสมเจ็ตตัวที่จะใช้ในโรงงานถูกเลือกให้แน่ใจว่ามีเลขเรย์โนลด์ที่หัวเจ็ต (Re_{jet}) และเลขเรย์โนลด์ในท่อผสม (Re_{mixer}) ที่ทำให้เกิดการผสมและอยู่ในช่วงสภาวะปฏิบัติการจริงของโรงงาน งานวิจัยนี้ได้กำหนดให้เครื่องผสมเจ็ตตัวนี้มีขนาดท่อผสมเท่ากับ 74 มิลลิเมตร ผลการทดสอบโดยการทดลองเช่นเดียวกับเครื่องผสมเจ็ตตัวแรกพบว่า เครื่องผสมเจ็ตนี้สามารถเกิดการผสมได้ในช่วงสภาวะปฏิบัติการจริงของโรงงาน

ข้อเสนอแนะ

เครื่องผสมเจ็ตที่มีท่อผสมขนาดเล็กจะมีความดันตกคร่อมสูงกว่าท่อผสมขนาดใหญ่ ซึ่งปั๊มที่ใช้ต้องมีกำลังที่เหมาะสมกับความดันตกคร่อมที่เกิดขึ้น เพื่อที่จะสามารถนำส่งของเหลวเข้าไปในท่อผสมนั้นได้ ในกรณีที่โรงงานต้องการจะลดความดันตกคร่อมให้ต่ำลงก็สามารถทำได้ โดยออกแบบท่อผสมให้มีขนาดใหญ่กว่า 76 มิลลิเมตร ที่เชื่อถือได้ว่าจะเกิดการผสมได้ตามโดเมนที่แสดงในภาพที่ 12 เครื่องผสมเจ็ตตัวใหม่สามารถทำการทดสอบโดยการทดลองแบบที่รายงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

दनัย กลิ่นพะกา. 2552. การศึกษาการผสมของของเหลวในเครื่องผสมเจ็ดแบบท่อแนวตั้ง.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Chanson, H. 2004. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. 2nd ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford.

Chow, V.T. 1959. *Open-Channel Hydraulics*. McGraw Hill, New York.

Felder, R.M. and R.W.Rousseau. 2000. *Elementary Principles of Chemical Process*. 3rd ed. John Wiley & Sons, Inc., United States of America. 189-191.

Furman, L. and Z. Stegowski. 2011. CFD models of jet mixing and their validation by tracer experiments. *Chem. Eng. Processing* 50: 300-304.

Harnby, N., M.F. Edwards, and A.W. Nienow. 1992. *Mixing in the Process Industries*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Oxford.

Lane, A. G. C. and P. Rice. 1982a. An investigation of liquid jet mixing employing an inclined side entry jet. *Tran. Inst. Chem. Eng.* 60: 171-176.

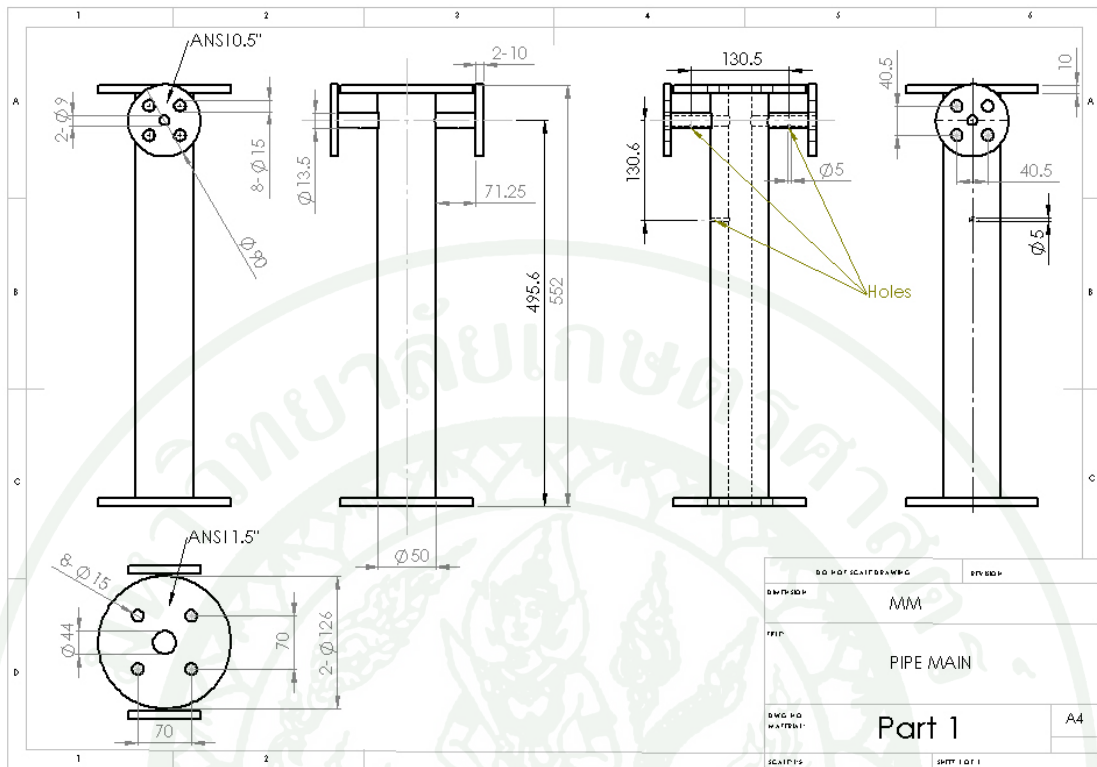
Lane, A. G. C. and P. Rice. 1982b. Comparative assessment of the performance of three designs for liquid jet mixing. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 21: 650-653.

Maruyama, T., Y. Ban and T. Mizushima. 1982. Jet mixing of fluids in tanks. *J. Chem. Eng. Japan* 15: 342-348.

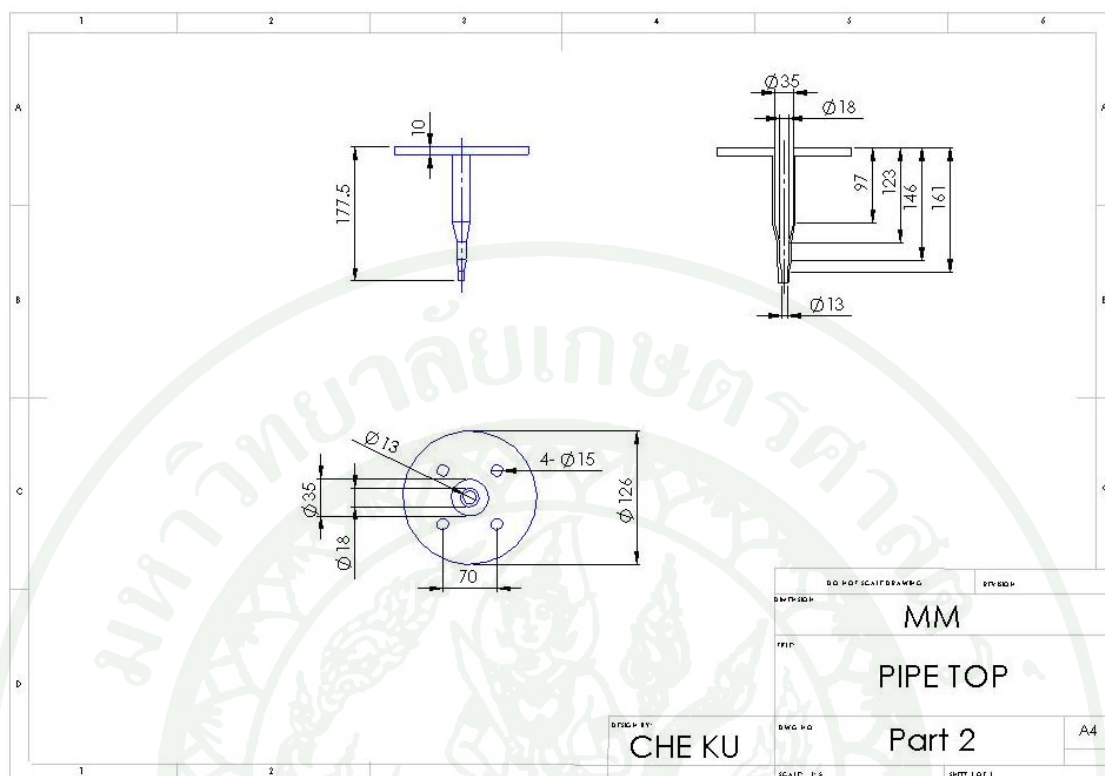
Patwardhan, A.W. 2002. CFD modeling of jet mixed tanks. *Chem. Eng. Sci.* 57: 1307-1318.

- Rahimi, M. and A. Parvareh. 2005. Experimental and CFD investigation on mixing by a jet in a semi-industrial stirred tank. **Chem. Eng. J.** 115: 85-92.
- Wang, S.J. and A.S. Mujumdar. 2005. A numerical study of flow and mixing characteristics of three-dimensional confined turbulent opposing jet: Unequal jets. **Chem. Eng. Process.** 44: 1068-1074.
- Warren, L., C. Julian and H. Peter. 1993. **Unit Operations of Chemical Engineering.** McGraw-Hill, Singapore.
- Yousefi Amiri T., J.S. Moghaddas and Y. Moghaddas. 2010. A jet mixing study in two phase gas-liquid systems. **Chem. Eng. Research and Design** 89: 352-366.
- Yan-Fang, Y., M. Hui-Bo and W. Jian-Hua. 2010. A numerical study of the effect of geometrical factors on jet mixing. pp. 116-120. *In Computer Engineering and Technology (ICCET) 2nd International Conference.* 16-18 April 2010, Computer Engineering and Technology (ICCET). Chengdu, China.
- Zughbi, H.D. and M.A. Rakib. 2004. Mixing in a fluid jet agitated tank: effects of jet angle and elevation and number of jets. **Chem. Eng. Science** 59: 829-842.

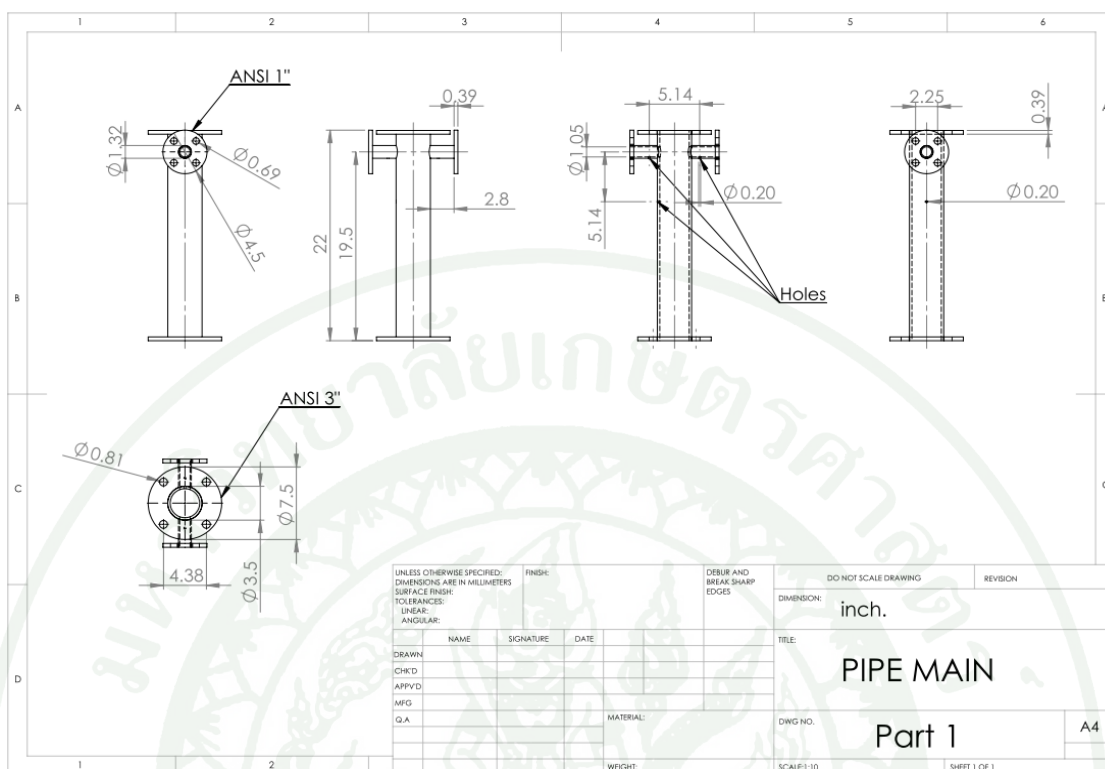




ภาพผนวกที่ 1 แบบร่างส่วนของท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาด 44 มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ 2 แบบร่างส่วนของหัวเจ็ทของเครื่องผสมเจ็ทขนาด 44 มิลลิเมตร



ภาพผนวกที่ 3 แบบร่างส่วนของท่อผสมของเครื่องผสมเจ็ตขนาด 74 มิลลิเมตร

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ นางสาวรัชนิดา ปัญจาคะ
เกิดวันที่ 21 มีนาคม 2527
สถานที่เกิด อำเภอเมือง จังหวัดอุดรธานี
ประวัติการศึกษา วท.บ. (เคมี) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ทุนการศึกษาที่ได้รับ ทุนสนับสนุนของพีคิวเคมีคอลล์ (ประเทศไทย) จำกัด

