กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยเรื่อง “อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว” ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนโครงการวิจัยงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2556 ทางคณะผู้จัดทำ และศึกษาขอขอบคุณการสนับสนุนในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

ผศ.ดร.ณัตวิภา เจียระไนวชิระ

ชื่อโครงการ อัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำเพื่อใช้ในการผสมก๊าซและของเหลว
แหล่งเงิน โครงการวิจัยงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2556
จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 80000 บาท
ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม พ.ศ. 2555 ถึง 30 กันยายน 2556

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร. ณัตวิภา เจียระไนวชิระ
หน่วยงานต้นสังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

บทคัดย่อ

การศึกษาผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดเหนี่ยวนำต่ออัตราการดูดอากาศเข้ามาในห้องผสม โดยนำเป็นของไหลหลักถูกฉีดผ่านหัวฉีดด้วยความเร็วสูงทำให้ความดันรอบๆบริเวณหัวฉีดลดลงและเหนี่ยวนำอากาศซึ่งเป็นของไหลรองจากภายนอกเข้ามาผสมกับของเหลวดังกล่าวโดยไม่ต้องใช้เครื่องอัดอากาศ การสร้างแบบจำลองอัตราการไหลของของไหลด้วยโปรแกรมคำนวณพฤติกรรมการไหลของของไหลและทำการเปรียบเทียบกับชุดทดลองจริงที่ออกแบบตามแบบจำลอง อัตราการไหลของนำที่ใช้ มีทั้งหมด 4 ค่า คือ 20.10, 18.67, 17.24 และ 15.81 ลิตรต่อนาที ผลที่ได้คือค่าอัตราส่วนเชิงมิติของหัวฉีดที่ทำให้อัตราการดูดอากาศมีค่าสูงที่สุด และสมรรถนะการดูดอากาศในรูปของมวลออกซิเจนต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง

Research Title: Dimension Ratio of Inducing Jet for Gas-Liquid Mixing
Researcher: Asst. Prof. Nuthvipa Jayranaiwachira
Faculty: Engineering **Department:** Mechanical Engineering

Abstract

By injecting high velocity water as the primary fluid through the vertical down-flow ejector, the pressure around the ejector is dropped and entrained the surrounding air to mix with the liquid. In this work, effects of dimension ratios of liquid jet ejector to the air suction rate were investigated. The Computational Fluid Dynamics (CFD) models have been used to obtain the results and validated with experiments. Dimensions of ejector are studied in terms of nozzle diameter (Dj), diameter (Dc) and length (Lc) of mixing chamber, air inlet diameter (D a) and position of air inlet referred to nozzle edge (La). Both simulation and experimental results show that dimension ratios which give the highest air suction rate with every water flow rates are Dc=3Dj, Lc=6Dj, La=2Dj and Da=2.5Dj. According to these dimension ratios, the performance of the ejector in air inducing are 0.36, 0.31, 0.25 and 0.19 kg air/kW-h at water flow rates of 20.10, 18.67, 17.24 and 15.81 L/min, respectively.

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ II

กิตติกรรมประกาศ III

สารบัญ IV

สารบัญตาราง IX

สารบัญรูป X

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาของโครงงาน 1

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงาน 1

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 1

1.4 ขอบเขตของโครงงาน 2

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม 3

2.1 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี 3

2.1.1 ลักษณะเฉพาะของเจ็ท 3

2.1.2 พฤติกรรมของเจ็ท 3

2.1.2.1 เจ็ทอิสระ (Free Jets) 3

2.1.2.2 ความยาวเจ็ท 4

2.1.3 ผลกระทบจากตัวแปรต่างๆต่อการกระจายตัวของเจ็ท 4

2.1.3.1 ผลกระทบจากความปั่นป่วน 4

2.1.3.2 ผลกระทบจากความหนืด 4

2.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ 5

2.2.1 การออกแบบและการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม 5

2.2.2 การออกแบบและการสร้างชุดทดลอง 5

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6

3.1 ทฤษฎีเจ็ท 6

3.1.1 โครงสร้างและการพัฒนาของเจ็ทอิสระ 6

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.2 องค์ประกอบที่มีผลต่อการกระจายของเจ็ท 8
3.1.2.1 รูปแบบของความเร็วเจ็ท ณ ปลายหัวฉีด 8
3.1.2.2 รูปทรงของหัวฉีด 9
3.1.2.3 ครึ่งความกว้างและจุดกำเนิดเสมือนของเจ็ท 10
3.1.2.4 ความไม่เสถียรของเจ็ท 11
3.1.2.5 ความต่อเนื่องของโครงสร้าง 11
3.1.2.6 การกระจายตัวแบบอุณหภูมิคงที่และไม่คงที่ 12
3.1.2.7 การจำลองตัวเอง 12
3.1.2.8 บทบาทของผนังด้านข้างต่อกระแสเจ็ท 13
3.1.2.9 มาตราส่วนความยาวของความปั่นป่วน 13
3.2 ทฤษฎีการเติมอากาศและการถ่ายเทมวลระหว่างฟองอากาศและน้ำ 14
3.2.1 หลักการคำนวณมวลสารที่ถูกถ่ายเท 15
3.2.2 ปัจจัยที่ทำให้ออกซิเจนในน้ำมีมากหรือน้อย 18
3.3 รูปแบบไร้มิติของสมการการขนถ่ายของไหล 19
3.3.1 กฎอนุรักษ์มวล (กฎความต่อเนื่อง) 20
3.3.2 สมการอนุรักษ์โมเมนตัม 21
3.4 การคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล 22
3.4.1 ขั้นตอนการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล 22
3.4.1.1 ขั้นก่อนประมวลผล 22
3.4.1.2 ขั้นประมวลผล 22
3.4.1.3 ขั้นแสดงผล 23
3.4.2 คุณสมบัติของวิธีการคำนวณทางพลศาสตร์ของไหล 23
3.4.2.1 ความเข้ากันได้ 23
3.4.2.2 เสถียรภาพการคำนวณ 23
3.4.2.3 การลู่เข้าของผลเฉลย 24
3.4.2.4 การอนุรักษ์ 24
3.4.2.5 ความจำกัดขอบ 24
3.4.2.6 ความเสมือนจริง 24

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.4.2.7 ความหนาแน่น 24
3.4.3 รูปแบบการจัดวางกริด 25
3.4.4 แบบแผนการคำนวณเชิงตัวเลข 26
3.4.4.1 แบบแผนวิธีผลต่างกึ่งกลาง 26
3.4.4.2 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับหนึ่ง 27
3.4.4.3 แบบแผนวิธีผลต่างต้นลมอันดับสอง 27
3.4.4.4 แบบแผนวิธีผลต่างควอดราติค 29
3.4.5 การดิสเครทไทต์สมการควบคุม 30
3.4.6 การดิสเครทไทต์สมการอนุรักษ์มวล 30
3.4.7 ลำดับวิธีการคำนวณหาผลเฉลยของสมการควบคุมในการไหลคงตัว 30
3.4.8 การจำลองโมเดลแบบปั่นป่วน 31
3.4.9 Renormalization-group (RNG) k-ε model 31
3.4.10 Mathematical Algorithm of the Renormalization k-ε model 32

บทที่ 4 การสร้างแบบจำลองและชุดทดลอง 33
4.1 การสร้างแบบจำลอง 33
4.1.1 การสร้างรูปร่างหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) 33
4.1.2 การสร้างขอบเขตย่อยด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) 34
4.1.3 การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT) 35
4.1.4 การกำหนดเงื่อนไขค่าเริ่มต้น 35
4.1.5 การกำหนดเงื่อนไขตัวแปร และสภาวะการแก้ปัญหา 35
4.1.6 กรณีศึกษา 36
4.2 ชุดทดลองและวิธีการทดลอง 40
4.2.1 อุปกรณ์การทดลอง 40
4.2.1.1 หัวฉีดเหนี่ยวนำอากาศ (Jet Head) 41

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1.2 ห้องผสม (Mixing Chamber) 41
4.2.1.3 หัวต่อท่ออากาศ (Air Inlet) 42
4.2.2 ถังผสม (Mixing Tank) 43
4.2.3 ระบบสูบน้ำ ท่อ และอุปกรณ์ต่างๆ (Water Pump, pipes and Tools) 43
4.2.3.1 เครื่องสูบน้ำ 43
4.2.3.2 วาล์ว(Valve) 44
4.2.3.3 สายยาง (Rubber Tube) 44
4.2.3.4 ชุดท่อพีวีซี (PVC pipes and joints) 46
4.2.4 เครื่องมือวัด (Measuring Equipment) 45
4.2.4.1 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer) 45
4.2.4.2 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ (Rota Meter) 46
4.2.4.3 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า (Clamp on Power meter) 46
4.2.5 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ (Canon EOS 7D) 47
4.3 วิธีการทดลอง 47

บทที่ 5 ผลการสร้างแบบจำลองและการทดลอง 48
5.1 ผลการสร้างแบบจำลอง 48
5.2 ผลการทดลอง 60

บทที่ 6 วิจารณ์และสรุปผลการทดลองและการจำลอง 69
6.1 วิจารณ์ผลการทดลองและการจำลอง 69
6.2 สรุปผลการทดลองและการจำลอง 69

เอกสารอ้างอิง 70

ภาคผนวก
ภาคผนวก ก การตีพิมพ์ที่ได้รับการเผยแพร่ 72

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

5.1 อัตราการไหลของอากาศที่ได้จากการคำนวณ 59
5.2 อัตราการไหลของน้ำเทียบกับปริมาณการเหนี่ยวนำอากาศ 65

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
3.1	ลักษณะกระแสการไหลของของเหลวที่ออกจากหัวฉีดพ่น	6
3.2	ตำแหน่งของจุดกำเนิดเสมือนและระยะครึ่งความกว้าง	10
3.3	ความปั่นป่วนในเจ็ท	11
3.4	พฤติกรรมของรูปแบบความเร็วของเจ็ทเมื่อมีผนังด้านข้าง	13
3.5	การถ่ายเทออกซิเจนจากอากาศสู่หยดน้ำ	14
3.6	การถ่ายเทออกซิเจนจากฟองอากาศสู่ของเหลวที่ห่อหุ้ม	14
3.7	แนวคิดของความแน่นอนและความแม่นยำ	25
3.8	รูปแบบการจัดวางกริดแบบโครงสร้างปกติ	26
3.9	รูปแบบแนวคิดของแบบแผนวิธีผลต่างควอดราติคในปริมาณควบคุมแบบ 1 มิติ	27
4.1	(ก) แบบของชุดหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง	33
	(ข) ตัวแปรของระยะต่างๆ ในชุดทดลองหัวฉีด	33
4.2	แบบจำลองของชุดหัวฉีดด้วยโปรแกรมแกมบิท (GAMBIT)	34
4.3	(ก) รูปแบบของขอบเขตย่อยของชุดหัวฉีด, (ข) จำนวนขอบเขตย่อย	34
4.4	การกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของชุดหัวฉีด	35
4.5	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 2 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และที่ขนาด D_j เท่ากับ4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	37
4.6	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 4 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และที่ขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	38
4.7	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 6 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	38
4.8	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 8 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	39
4.9	แผนผังความเร็วและแผนผังความดันที่อัตราการไหล 10 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง และขนาด D_j เท่ากับ 4, 6, 8, 10 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ	40
4.10	(ก) แผนผังโครงสร้างชุดทดลอง, (ข) การติดตั้งชุดทดลองของจริง	40
4.11	(ก) แบบของหัวฉีดที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวฉีดเจ็ทที่ใช้ในการทดลอง	41
4.12	(ก) แบบของห้องผสมที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ห้องผสมขนาดต่างๆ ที่ใช้ในการทดลอง	41
4.13	(ก) แบบของห้องผสมที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) ห้องผสมขนาดต่างๆที่ใช้ในการทดลอง	42

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.14 (ก) แบบของรูอากาศที่ใช้ในการสร้างจริง, (ข) หัวต่อท่ออากาศที่ใช้ในการทดลอง 42
4.15 ถังผสม (Mixing-Tank) ที่ใช้ในการทดลอง 43
4.16 เครื่องสูบน้ำที่ใช้ในการทดลอง 43
4.17 เกทวาล์ว 44
4.18 โกลบวาล์ว 44
4.19 สายยางขนาดใหญ่ 45
4.20 ชุดท่อพีวีซี 45
4.21 เครื่องวัดอัตราการไหลของอากาศ (Thermo anemometer) 46
4.22 เครื่องวัดอัตราการไหลของน้ำ 46
4.23 เครื่องวัดกำลังไฟฟ้า 46
4.24 กล้องถ่ายภาพฟองอากาศ 47
5.1 แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $3D_j$ 49
5.2 แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และL_c เท่ากับ $3D_j$ 49
5.3 แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$ 50
5.4 แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$,$5D_j$ และ L_c เท่ากับ $6D_j$ 50
5.5 แสดงแผนผังความเร็วที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $9D_j$ 51
5.6 แสดงแผนผังความดันที่ D_c เท่ากับ $3D_j$, $4D_j$, $5D_j$ และ L_c เท่ากับ $9D_j$ 51
5.7 แสดงถึงแผนผังความเร็ว (ซ้าย) และแผนผังความดัน (ขวา) ที่ D_c เท่ากับ
3Dj และ L_c เท่ากับ $6D_j$ 51
5.8 (ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน
ที่อัตราการไหล 20.1 ลิตรต่อนาที 52
5.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน 52
5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ
จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก 53
5.11 (ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน
ที่อัตราการไหล 18.67 ลิตรต่อนาที 53
5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน
ที่ที่อัตราการไหล 18.67 ลิตรต่อนาที 54

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก 54

5.14 (ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน ที่อัตราการไหล 17.24 ลิตรต่อนาที 55

5.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน ที่อัตราการไหล 17.24 ลิตรต่อนาที 55

5.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก 56

5.17 (ก) ภาพแผนผังความเร็วและ (ข) ภาพแผนผังความดัน ที่อัตราการไหล 15.81 ลิตรต่อนาที 56

5.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งรูอากาศกับความดัน ที่อัตราการไหล 15.81 ลิตรต่อนาที 57

5.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ออกจากหัวฉีดกับตำแหน่งต่างๆ จากปลายหัวฉีดจนถึงทางออก 57

5.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำและอากาศ 60

5.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์น้ำและอากาศของ L_a ต่างๆ ที่ได้จากการจำลอง 60

5.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับ อัตราการไหลของอากาศที่ L_a ต่างๆ 61

5.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำกับ อัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ 62

5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ L_a ต่างๆ 62

5.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ D_a ต่างๆ 63

5.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราการไหลของน้ำ กับอัตราการไหลของอากาศที่ D_a ต่างๆ 64

5.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเลขเรย์โนลด์น้ำและอากาศที่ D_a ต่างๆ 64

5.28 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $1D_j$ 66

5.29 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $2D_j$ 66

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

5.30 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ L_a เท่ากับ $3D_j$ 67

5.31 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1D_j$ 68

5.32 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $1.5D_j$ 68

5.33 (ก), (ข), (ค) และ (ง) ของฟองอากาศที่ D_a เท่ากับ $2.5D_j$ 69