

การจำลองพฤติกรรมกรไหลเพื่อออกแบบหัวดูดอากาศ
ที่เหมาะสมสำหรับถังชุบโลหะ



นายภัทรพันธุ์ ทมตเก้ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ปีการศึกษา 2558

**SIMULATION OF AIRFLOW FOR OPTIMUM HOOD
DESIGN FOR PLATING TANK**

Phattharaphan Thamatkeng



**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Mechanical Engineering
Suranaree University of Technology**

Academic Year 2015

การจำลองพฤติกรรมการไหลเพื่อออกแบบหัวดูดอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังบล็อหะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นักวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.ธีทัต คลวัชชัย)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.กิริติ สุลักษณ์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ผศ. ดร.สุภกิจ รูปจันทร์)

กรรมการ

(อ. ดร.เอกรงค์ สุขจิต)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและนวัตกรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

ภัทรพันธุ์ ทมตเก้ง : การจำลองพฤติกรรมการไหลเพื่อออกแบบหัวดูดอากาศที่เหมาะสม
สำหรับถังชุบโลหะ (SIMULATION OF AIRFLOW FOR OPTIMUM HOOD DESIGN
FOR PLATING TANK) อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์, 102 หน้า

การชุบโลหะเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มสมบัติของโลหะ เช่น ความเงา ความคงทนสภาพกัดกร่อน ความแข็งแรง เป็นต้น ในระหว่างการชุบโลหะมักเกิดไอระเหยของสารเคมีในน้ำยาชุบโลหะปนเปื้อนในอากาศซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาและการออกแบบหัวดูดอากาศสำหรับถังชุบขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) 0.620×1.500×1.000m โดยประเมินความเหมาะสมด้านขนาด ลักษณะการเจาะช่องทางดูดอากาศและลักษณะการติดตั้งการศึกษาใช้การจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT14.0 เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขนาดความสูงและความกว้างของหัวดูดอากาศไม่ส่งผลต่อการกระจายความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูด ลักษณะรูปทรงการเจาะช่องทางเข้าของอากาศไม่ส่งผลต่อความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูด ความเร็วอากาศจะขึ้นอยู่กับพื้นที่การเจาะช่องทางเข้าของอากาศซึ่งสัมพันธ์กับระยะในแนวแกน X ตามสมการ $A = 0.006X + 0.362 \text{ cm}^2$ จะทำให้ความเร็วของอากาศนั้นสม่ำเสมอตลอดความยาวหัวดูด นอกจากนี้ยังพบว่า การจำลองการไหลที่เหมาะสมกับการออกแบบหัวดูดอากาศคือ การจำลองการไหลแบบราบเรียบ

PHATTHARAPHAN THAMATKENG : SIMULATION OF AIRFLOW FOR
OPTIMUM HOOD DESIGN FOR PLATING TANK. THESIS ADVISOR :
ASST. PROF. KEERATI SULUKSNA, Ph.D., 102 PP.

PLATING/HOOD/CUPTURE VELOCITY/FLOW SIMULATION/DESIGN

Metal plating is a process to improve the properties of metals, such as shininess, corrosion resistance, and hardness. During the plating process, the chemicals in plating solutions will usually evaporate in the air which is harmful to human health. This research aims to study and design a hood for a plating tank size (width×length×height), of 0.62×1.50×1.00 m. The study assesses the suitability in hood size and drilling characteristic of hood slots which are in front to the section speed distribution. This research uses computer simulation with ANSYS Fluent 14.0 program. The computer simulation has been used to predict the flow behaviors based on laminar and turbulent flow. The study found that the increasing of height and depth of hood are not affect to the speed of air flow distribution in front of hood. Furthermore, the slot shape of the hood is also not affect to as well. The air flow distribution is depends on the area of hood slot which is relating to a distance in longitudinal direction (X) of hood with following equation $A = 0.006X + 0.362 \text{ cm}^2$. It is found that moreover the flow simulation which is suitable for designing the hood is laminar modelling

School of Mechanical Engineering

Academic Year 2015

Student's Signature_____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย จากบุคคลกลุ่มต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิริติ สุลักษณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำทั้งในด้านการเรียนและการทำงานวิจัย ช่วยแก้ปัญหา รวมทั้งช่วยตรวจทาน และแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนเสร็จสมบูรณ์

คุณสมภพ มหาโคตร นายช่างเทคนิค ประจำศูนย์เครื่องมือ ฝ่ายห้องปฏิบัติการวิศวกรรม 1 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องตัดด้วยเลเซอร์ สำหรับตัดอะคริลิกในการสร้างชุดทดลอง

คุณเกริกฤทธิ์ สิทธิศาสตร์ เจ้าหน้าที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวัดความเร็วของอากาศและพัดลมดูดอากาศสำหรับการทดลอง และให้คำแนะนำการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ บัณฑิตศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกคน ที่คอยให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำในการเรียนและการทำวิจัยด้วยดีเสมอมา

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยขอมอบให้กับบิดา มารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ผู้วิจัยตลอดมา จนทำให้ประสบความสำเร็จในชีวิต

ภัทรพันธุ์ ทมาตแก้ว

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ปรัชญ่วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	4
2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะ.....	5
2.2.1 การเตรียมผิวชิ้นงาน	5
2.2.2 การชุบโลหะ	6
2.2.3 การล้าง.....	7
2.2.4 การอบแห้ง	8
2.3 การระบายอากาศ.....	9
2.3.1 การกำจัดสารมลพิษ	9
2.3.2 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบระบายอากาศเฉพาะที่.....	10
2.4 อุปกรณ์สำหรับระบบระบายอากาศเฉพาะที่	11
2.4.1 หัวดูดอากาศ	11
2.4.2 ท่อนำอากาศ.....	16

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.3	พัฒลมดุดอกาศ	18
2.5	การออกแบบหัวดุดอกาศ	19
2.5.1	ความเร็วยัดจับ	19
2.5.2	อัตราการใช้ของอากาศเข้าหัวดุดอกาศ	19
2.5.3	ผลกระทบจากปีกและแผ่นกั้น	22
2.5.4	การกระจายตัวของอากาศ	23
2.5.5	อุปกรณ์ควบคุมมลพิษหรือระบบกำจัดสารมลพิษ	24
2.6	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ	25
2.6.1	กระบวนการซีเอฟดี	26
2.6.2	ขั้นตอนของซีเอฟดี	27
2.7	สมการควบคุมการไหล	27
2.8	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
3	วิธีดำเนินการวิจัย	34
3.1	บทนำ	34
3.2	จำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศของหัวดุดอกาศแบบเดิม	34
3.2.1	สร้างแบบจำลอง	34
3.2.2	การจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศ	36
3.3	การออกแบบหัวดุดอกาศ	40
3.4	การสร้างชุดทดลอง	44
3.5	เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง	46
3.5.1	พัฒลมดุดอกาศ	46
3.5.2	เครื่องมือวัดความเร็วอากาศ	47
3.5.3	ขั้นตอนการติดตั้งชุดทดลอง	48
3.5.4	การวัดความเร็วอากาศ	49
4	ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล	51
4.1	ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของหัวดุดอกาศแบบเดิม	51
4.2	ผลการออกแบบหัวดุดอกาศ	54

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.2.1 ผลการออกแบบตำแหน่งช่องทางเข้าของอากาศ.....	54
4.2.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหล	55
4.2.3 ผลการปรับความสูงของหัวดูดอากาศ.....	56
4.2.4 ผลการปรับความกว้างของหัวดูดอากาศ	63
4.2.5 ผลการออกแบบรูปทรงช่องทางเข้าของอากาศ	71
4.3 ผลการเปรียบเทียบ.....	77
4.3.1 กรณีที่ 1 หัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m.....	77
4.3.2 กรณีที่ 2 หัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m.....	81
4.3.3 กรณีที่ 3 หัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m.....	84
5 บทสรุป.....	89
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.1.1 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์	89
5.1.2 ออกแบบตำแหน่งช่องทางเข้าของอากาศ.....	89
5.1.3 การเพิ่มความสูงของหัวดูดอากาศ.....	90
5.1.4 การเพิ่มความกว้างของหัวดูดอากาศ	90
5.1.5 การออกแบบรูปทรงช่องทางเข้าของอากาศ.....	91
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	91
รายการอ้างอิง	92
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างการศึกษา	94
ภาคผนวก ข แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน.....	96
ประวัติผู้เขียน	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างของโลหะที่ใช้เคลือบชิ้นงานและสารเคมีที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า	7
2.2 ความเร็วลมต่ำสุดในท่อสำหรับสารปนเปื้อนลักษณะต่าง ๆ	17
2.3 ค่าความเร็วขีดจับสำหรับการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน	19
3.1 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ	37
3.2 การกำหนดค่าของการจำลองแบบปั่นป่วน	39
3.3 ข้อมูลมอเตอร์	47
3.4 ช่วงการวัดและค่าความถูกต้องของเครื่องมือวัดชนิดหลายพารามิเตอร์	48
4.1 ความเร็วเฉลี่ยของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาด (ปรับความสูง)	62
4.2 ความเร็วเฉลี่ยของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาด (ปรับความกว้าง)	70
4.3 ความเร็วเฉลี่ยของช่องทางเข้าอากาศ	74

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะ	2
2.1 การชุบทองแดงโดยใช้น้ำยาชุบคอปเปอร์ซัลเฟต	4
2.2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการชุบโลหะด้วยนิกเกิล	8
2.3 ส่วนประกอบของระบบระบายอากาศเฉพาะที่	11
2.4 หัวดูดแบบรีซีฟวิ่ง (Receiving Hood)	12
2.5 หัวดูดแบบไซด์ดราฟท์ (Side Draft Hood)	13
2.6 หัวดูดแบบสล็อต (Slot Hood)	14
2.7 หัวดูดแบบดาวน์เวด (Downward Hood)	14
2.8 หัวดูดแบบปริมาตรต่ำความเร็วสูง (Low volume, High Velocity Hood)	15
2.9 ระบบผลัก-ดึง (Push-pull system)	15
2.10 ระบบแทปเปอร์	16
2.11 ระบบพลีนิ้ม	17
2.12 หัวดูดอากาศมีขนาดเล็กและไม่มีปีกกัน	20
2.13 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างท่อดูดอากาศกับแหล่งสารปนเปื้อน	22
2.14 ลักษณะหัวดูดอากาศไม่มีปีกกันและมีปีกกัน	23
2.15 การกระจายตัวของอากาศ	23
2.16 กระบวนการดิสทริบูชัน	26
2.17 แบบจำลองห้องกลับฟাঁก่อนและหลังการปรับปรุงระบบระบายอากาศ	30
2.18 ระบบระบายอากาศในห้อง PL-Z ก่อนและหลังการปรับปรุง	30
2.19 ด้านหน้าผู้ผสมสารเคมี	31
2.20 ผลการจำลองการไหลของผู้ผสมสารเคมี	31
2.21 การวางท่อดูดควันสำหรับการเชื่อม	32
2.22 ระบบระบายอากาศแบบที่ใช้ในปัจจุบัน 3 มิติ	32
2.23 ความเร็วของควันที่เกิดจากการเชื่อมโลหะที่อัตราการไหลต่ำและอัตราการไหลสูง ก่อนการปรับปรุง	33

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.24 ความเร็วของควันที่เกิดจากการเชื่อมโลหะที่อัตราการไหลต่ำและอัตราการไหลสูง หลังการปรับปรุง.....	33
3.1 แบบจำลองหัวคู่อากาศแบบเดิม 3 มิติ	35
3.2 ขนาดของช่องทางเข้าของอากาศของหัวคู่อากาศแบบเดิม	35
3.3 แบบจำลองสำหรับจำลองการไหลของอากาศของหัวคู่อากาศแบบเดิม.....	36
3.4 การสร้างกริด	37
3.5 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ	38
3.6 การกระจายอากาศโดยใช้แทปเปอร์.....	41
3.7 พารามิเตอร์ในการออกแบบหัวคู่อากาศ.....	41
3.8 ลักษณะของหัวคู่อากาศที่ออกแบบขนาดความสูง	42
3.9 ลักษณะของหัวคู่อากาศที่ออกแบบขนาดความกว้าง	43
3.10 ตัวอย่างแบบหัวคู่อากาศที่นำไปตัดด้วยเลเซอร์.....	45
3.11 ชุดทดลองหัวคู่อากาศ.....	45
3.12 ชุดทดลองถึงซูปโลหะ	46
3.13 พัฒนาคู่อากาศ	46
3.14 เครื่องมือวัดชนิดหลายพารามิเตอร์ Testo 435 และ Hotwire probe	47
3.15 การติดตั้งหัวคู่อากาศ	48
3.16 การติดตั้งถึงซูปโลหะ.....	48
3.17 ตำแหน่งในการวัดค่าความเร็วอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศ 3 มิติ	49
3.18 ตำแหน่งในการวัดค่าความเร็วอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศ (มุมมองด้านบน).....	49
3.19 ตำแหน่งในการวัดค่าความเร็วอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศ (มุมมองด้านหน้า)	50
3.20 ตำแหน่งในการวัดค่าความเร็วอากาศด้านหน้าช่องทางเข้าของอากาศ (Z _i).....	50
4.1 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศของหัวคู่อากาศแบบเดิม 3 มิติ	51
4.2 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศของหัวคู่อากาศแบบเดิม	51
4.3 เส้นการไหลของอากาศของหัวคู่อากาศแบบเดิม.....	52
4.4 ผลความเร็วอากาศของหัวคู่อากาศแบบเดิม.....	52

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ขนาดและตำแหน่งของช่องทางเข้าของอากาศ	54
4.6 คอนทัวร์ความเร็วอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศ	54
4.7 เปรียบเทียบแบบจำลองการไหล	55
4.8 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความสูง 0.171 m	56
4.9 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความสูง 0.288 m	57
4.10 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความสูง 0.285 m.....	58
4.11 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.155$ m.....	59
4.12 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.310$ m.....	59
4.13 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.465$ m.....	60
4.14 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.620$ m.....	60
4.15 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Y = -0.125$ m, $Z = 0.310$ m	61
4.16 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Y = +0.100$ m, $Z = 0.310$ m.....	61
4.17 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความกว้าง 0.114 m.....	64
4.18 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความกว้าง 0.171 m.....	65
4.19 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความกว้าง 0.228 m.....	66
4.20 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.155$ m.....	67
4.21 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.310$ m.....	67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.22 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.465 \text{ m}$	68
4.23 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.620 \text{ m}$	68
4.24 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Y = -0.125 \text{ m}$, $Z = 0.310 \text{ m}$	69
4.25 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Y = +0.100 \text{ m}$, $Z = 0.310 \text{ m}$	69
4.26 รูปแบบช่องทางเข้าอากาศแบบกระจาย	71
4.27 รูปแบบช่องทางเข้าอากาศแบบรวม	72
4.28 เปรียบเทียบความเร็วของช่องทางเข้าของอากาศ	73
4.29 ช่องทางเข้าของอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู	75
4.30 เปรียบเทียบความเร็วของหัวดูดอากาศ.....	75
4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของช่องทางเข้าของอากาศกับระยะในแนวแกน X.....	76
4.32 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171 \text{ m}$ ที่ระยะ Y_1 , Z_1	77
4.33 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171 \text{ m}$ ที่ระยะ Y_1 , Z_1	78
4.34 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171 \text{ m}$ ที่ระยะ Y_1 , Z_2	78
4.35 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171 \text{ m}$ ที่ระยะ Y_1 , Z_2	79
4.36 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171 \text{ m}$ ที่ระยะ Y_1 , Z_3	79
4.37 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171 \text{ m}$ ที่ระยะ Y_1 , Z_3	80

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.38 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1	81
4.39 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1	81
4.40 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2	82
4.41 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2	82
4.42 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3	83
4.43 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3	83
4.44 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1	84
4.45 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1	85
4.46 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2	85
4.47 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2	86
4.48 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3	86
4.49 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3	87
5.1 ผลการออกแบบขนาดและตำแหน่งของช่องทางเข้าของอากาศ.....	90

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	พื้นที่
ACGIH	=	American conference of governmental industrial hygienists
BHP	=	Brake horsepower
CFD	=	พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics)
Cu	=	คอปเปอร์ (Copper)
CuSO ₄	=	คอปเปอร์ซัลเฟต (Copper sulfate)
dB	=	เดซิเบล
f/min	=	ฟุตต่อวินาที
f ³ /s	=	ลูกบาศก์ฟุตต่อวินาที
g	=	กรัม
g/L	=	กรัมต่อลิตร
in	=	นิ้ว
kW	=	กิโลวัตต์
m	=	เมตร
mm	=	มิลลิเมตร
m ²	=	ตารางเมตร
m/s	=	เมตรต่อวินาที
m ³ /s	=	ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที
mg/m ³	=	มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
min	=	นาที
s	=	วินาที
SO ₄	=	ซัลเฟต (Sulfate)
W	=	วัตต์

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

การชุบโลหะเป็นกระบวนการที่ทำเพื่อเพิ่มสมบัติต่าง ๆ ของโลหะเช่น ความต้านทานการกัดกร่อน ป้องกันการเกิดสนิม ความเงาผิวของชิ้นงาน เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนของการชุบโลหะนั้นเริ่มจากการเตรียมผิวชิ้นงานโดยการทำความสะอาดเพื่อกำจัดคราบน้ำมัน จารบี น้ำมันหล่อลื่นหรือสนิมที่ติดอยู่บนผิวชิ้นงานให้หมดไป จากนั้นจึงจะนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการชุบโลหะ ทั้งสองขั้นตอนนี้มีการใช้สารเคมีที่ก่อให้เกิดสารพิษที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์ เมื่อสารเคมีได้รับความร้อนจากกระบวนการชุบโลหะจะเกิดการระเหยตัวกลายเป็นไอลอยปนเปื้อนอยู่ในอากาศ สารเคมีที่ใช้ในการทำผิวชิ้นงานได้แก่ กรดบอริก กรดกำมะถัน กรดเกลือ โซดาไฟ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ รวมถึงตัวทำละลายคือ โทลูอีน และไตรคลอโรเอทิลีน ส่วนสารเคมีที่ใช้ในการชุบโลหะนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะที่ใช้ชุบและประเภทของโลหะที่นิยมนำมาใช้ชุบเช่น การชุบทองแดง การชุบนิกเกิล และการชุบโครเมียม ซึ่งสารเคมีที่ใช้ได้แก่ โซเดียมคาร์บอเนต คอปเปอร์ไฟโรฟอสเฟต โพแทสเซียมไฟโรฟอสเฟต นิกเกอร์ซัลเฟต โซเดียมซัลเฟต นิกเกิลคลอไรด์ โซเดียมไซยาไนด์ โพแทสเซียมไซยาไนด์ คอปเปอร์ไซยาไนด์ โครมิกแอซิกหรือโครเมียมไดออกไซด์ และโครไมท์แอซิด ดังนั้นเพื่อเป็นการควบคุมสารพิษไม่ให้ฟุ้งกระจายในอากาศจึงต้องมีการระบายอากาศที่มีสารพิษปนเปื้อนออกจากบริเวณนั้น ๆ ซึ่งวิธีที่นิยมใช้โดยทั่วไปคือ การติดตั้งหัวดูดอากาศที่ปากถังชุบโลหะ ประเภทของหัวดูดอากาศที่ใช้กันในปัจจุบันนั้นมีหลายแบบ แต่หัวดูดอากาศที่นิยมใช้สำหรับการระบายอากาศในกระบวนการชุบโลหะเป็นหัวดูดแบบสลีต (Slot hood) ซึ่งจะมีการเจาะช่องที่ด้านหน้าของหัวดูดอากาศเพื่อให้เป็นทางเข้าของอากาศ แรงลมจะกระจายไปตลอดหน้าตัดของหัวดูดอากาศ เนื่องจากปลายด้านหนึ่งของหัวดูดอากาศติดเข้ากับท่อลมดังรูปที่ 1.1

จากการศึกษาพบว่าหัวดูดอากาศที่ใช้ในปัจจุบันยังให้รูปแบบในการระบายอากาศได้ไม่ดีเท่าที่ควร ส่งผลให้หากเกิดไอสารในอากาศหัวดูดจะไม่สามารถระบายอากาศออกไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงได้สนใจศึกษาสภาพการระบายอากาศโดยใช้หัวดูดอากาศ การศึกษาใช้การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์โดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational fluid dynamics: CFD หรือ ซีเอฟดี) เพื่อวิเคราะห์หา

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญในการออกแบบหัวดูดอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังชุบโลหะ และสร้างชุดทดลองเพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ทางกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดจริงจากชุดทดลอง เพื่อเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของผลที่ได้จากการจำลองด้วยซอฟต์แวร์



รูปที่ 1.1 หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อวิเคราะห์และออกแบบขนาดของหัวดูดอากาศที่เหมาะสมกับกระบวนการชุบโลหะ

1.2.2 เพื่อวิเคราะห์และออกแบบรูปแบบการเจาะช่องทางเข้าอากาศและรูปทรงของช่องทางเข้าอากาศที่เหมาะสมกับหัวดูดอากาศสำหรับกระบวนการชุบโลหะ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เข้าสู่หัวดูดอากาศ ในกระบวนการชุบโลหะ การศึกษาใช้การจำลองผลด้วยคอมพิวเตอร์ ผลที่ได้จากการศึกษานำไปสู่การออกแบบหัวดูดอากาศที่เหมาะสมในการใช้ระบายอากาศในกระบวนการชุบโลหะ หัวดูดอากาศจะถูกออกแบบภายใต้เงื่อนไขดังต่อไปนี้

1.3.1 วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของอากาศโดยใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS FLUENT 14.0 บนสมมติฐานของการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ ความหนืดมีค่าคงที่ และมีเฟสเดียว

1.3.2 ออกแบบหัวคูดอากาศสำหรับถังขุบโลหะขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ $0.620 \times 1.500 \times 1.000$ m

1.3.3 ออกแบบรูปแบบการจัดเรียงและรูปทรงของช่องทางคูดอากาศ ความสูง และความกว้างของหัวคูดอากาศ

1.3.4 หัวคูดอากาศเป็นแบบสลีต คือ อัตราส่วนระหว่างความสูงต่อความยาวของหัวคูดอากาศน้อยกว่า 0.2 และมีการเจาะช่องทางเข้าของอากาศ

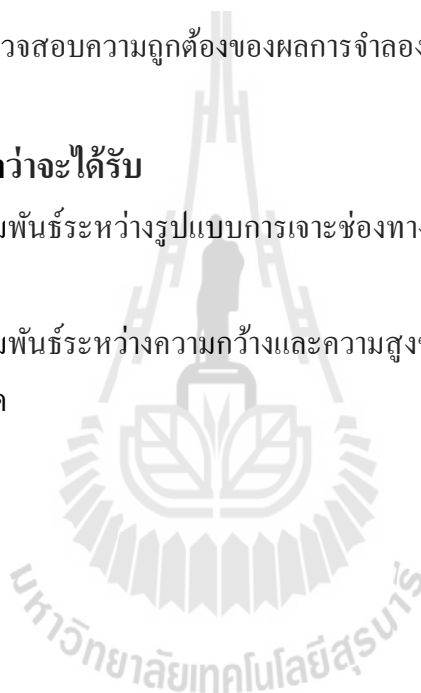
1.3.5 ท่อทางเดินอากาศต่อออกทางด้านข้างของหัวคูดอากาศ

1.3.6 สร้างชุดทดลองเพื่อทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองทางคอมพิวเตอร์กับค่าที่ตรวจวัดได้จริงเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการจำลองด้วยซอฟต์แวร์

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการเจาะช่องทางเข้าของอากาศกับความยาวของหัวคูดอากาศ

1.4.2 ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างและความสูงของหัวคูดอากาศที่ให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศดีที่สุด

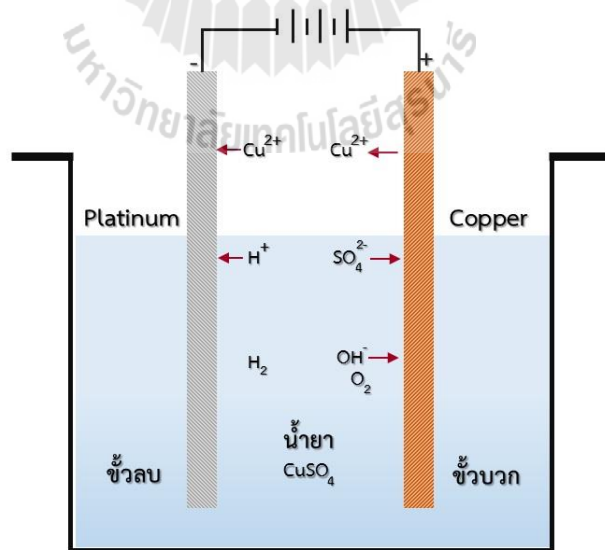


บทที่ 2

ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

การชุบโลหะมีวัตถุประสงค์เพิ่มสมบัติให้กับวัสดุ อาทิ ความเงา ความแข็งแรง และป้องกันการผุกร่อน เป็นต้น การชุบโลหะนั้นแบ่งออกเป็นหลายแบบ แต่ที่นิยมใช้กันในอุตสาหกรรมชุบโลหะคือ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating) กระบวนการเริ่มจากผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในสารละลายเกลือของโลหะ (Metallic salts) แล้วทำให้อิออนบวกวิ่งมารับประจุไฟฟ้าลบที่ชิ้นงานซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ (Cathode) จึงทำให้เกิดเป็นชั้นผิวบางของโลหะมาเคลือบอยู่บนผิวด้านนอกของชิ้นงาน การชุบทองแดง นิกเกิล โครเมียม (Cu-Ni-Cr plating) จัดอยู่ในประเภทการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า ดังตัวอย่างการชุบทองแดงโดยใช้น้ำยาชุบคอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ต่อไปนี้ เมื่อสารละลายจุนสีหรือคอปเปอร์ซัลเฟตมาทำการแยกสลายด้วยไฟฟ้า โดยใช้แผ่นทองคำขาว (Platinum) เป็นขั้วลบต่อเข้ากับขั้วลบแบตเตอรี่ และใช้แผ่นทองแดงบริสุทธิ์เป็นขั้วบวกต่อเข้ากับขั้วบวกของแบตเตอรี่ดังรูปที่ 2.1 จะเกิดปฏิกิริยาดังนี้



รูปที่ 2.1 การชุบทองแดงโดยใช้น้ำยาชุบคอปเปอร์ซัลเฟต

คอปเปอร์ซัลเฟตที่มีอยู่ในน้ำยาจะแยกสลายออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ 2 ส่วนคือ อนุภาคคอปเปอร์ (Cu^{++}) มีประจุไฟฟ้าบวก (+) ประจำตัว และซัลเฟต (SO_4^-) มีประจุไฟฟ้าลบ (-) ประจำตัว เมื่อต่อกระแสไฟฟ้าให้ครบวงจรอนุภาคเล็ก ๆ ทองแดงจะวิ่งไปหาทองคำขาว (ขั้วลบ) เกาะติดเป็นผงสีแดงอยู่บนแผ่นทองคำขาว ส่วนอนุภาคซัลเฟตจะวิ่งไปหาแผ่นทองแดง (ขั้วบวก) ทำปฏิกิริยากับทองแดงส่งผลให้ทองแดงละลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟตแทนที่คอปเปอร์ซัลเฟตตัวก่อนที่หมดไป คอปเปอร์ซัลเฟตตัวหลังนี้จะแยกสลายออกเป็น 2 ส่วนอีก คืออนุภาคคอปเปอร์ (Cu^{++}) และอนุภาคซัลเฟต (SO_4^-) อนุภาคคอปเปอร์จะเคลื่อนไปขั้วลบเกาะติดอยู่ที่แผ่นทองคำขาว อนุภาคซัลเฟตเคลื่อนไปที่ทำปฏิกิริยากับขั้วบวกกลายเป็นคอปเปอร์ซัลเฟตขึ้นมาแทนที่อีก ปฏิกิริยาจะเกิดหมุนเวียนเช่นนี้ตลอดไปตราบที่ยังคงต่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน จากการค้นพบกฎเกณฑ์นี้จึงได้มีการนำมาใช้เป็นประโยชน์ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า หรือการแยกโลหะให้บริสุทธิ์ (Refinery) อาทิ นำเอาทองแดงไม่บริสุทธิ์ไปทำเป็นแผ่นขั้วบวกแล้วจุ่มในสารละลายคอปเปอร์ซัลเฟต เมื่อไฟฟ้าไหลผ่านครบวงจรก็จะเกิดปฏิกิริยาทำให้ทองแดงบริสุทธิ์ไปเกาะติดบนแผ่นขั้วลบก็จะได้ทองแดงบริสุทธิ์ การชุบโลหะด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมาก เนื่องจากสามารถนำโลหะและอโลหะหลายชนิดมาทำการเคลือบผิวได้ ในขณะเดียวกันก็สามารถเลือกโลหะที่จะนำมาเคลือบผิวได้หลากหลายชนิดด้วย

2.2 ขั้นตอนการชุบโลหะ

ขั้นตอนในการชุบโลหะแบ่งเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

2.2.1 การเตรียมผิวชิ้นงาน

ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานเป็นขั้นตอนการทำให้ผิวชิ้นงานเรียบไม่ขรุขระและทำความสะอาดผิวเพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอม อาทิ ไขมัน น้ำมันหรือออกไซด์ต่าง ๆ ออกจากผิวหน้าของชิ้นงานที่นำมาชุบก่อนเข้าสู่ขั้นตอนการชุบ ขั้นตอนการเตรียมผิวชิ้นงานมีดังนี้

1) ขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงาน ขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนแรกในการเตรียมผิวชิ้นงาน ก่อนนำไปล้างทำความสะอาดเพราะชิ้นงานก่อนที่จะนำมาทำการชุบ จะมีผิวหยาบ ขรุขระ มีรอยขีดข่วนหรือเป็นสนิม การขัดจนผิวหน้าเรียบจะทำให้คุณภาพชิ้นงานหลังการชุบดี คือผิวชิ้นงานมีความเรียบสม่ำเสมอและการเกาะติดของโลหะจะแน่น ในขั้นตอนการขัดผิวชิ้นงานประกอบด้วยงานขัดหมุนด้วยไฟฟ้า หรือ มอเตอร์ขัด ล้อขัด และสายพานขัด และกระดาดทรายในการขัดผิวชิ้นงานนั้นจะเกิดฝุ่นละอองที่เกิดจากการขัดเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีพัดลมสำหรับเป่าไล่ฝุ่นและพัดลมดูดอากาศขนาดใหญ่ หรือเครื่องดูดฝุ่นเพื่อกักเก็บฝุ่นที่เกิดขึ้นจากการขัด นอกจากนี้ควรขัดผิวชิ้นงานในห้องที่มีแสงสว่างและการถ่ายเทของอากาศดีเพียงพอ

ในขั้นตอนนี้ไม่มีการสูญเสียทรัพยากรมากนัก แต่มีผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมเนื่องจากฝุ่นละอองจากการขัด

2) ขั้นตอนการล้างไขมันด้วยด่าง ขั้นตอนนี้เป็นการทำความสะอาดชิ้นงานโดยปกติจะใช้วิธีจุ่มหรือสเปรย์ด้วยสารละลายด่าง อาทิ โซดาไฟ หรือสารเคมีอื่น ๆ อาทิ โซเดียมคาร์บอเนต โซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต แอนไอออนิกเซอร์แฟกแทนท์ (Anionic surfactant) และนอนไอออนิกเซอร์แฟกแทนท์ (Nonionic surfactant) ที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 3-15 นาที ยกเว้นการใช้สเปรย์ด้วยเซอร์แฟกแทนท์ (Surfactant) จะทำที่อุณหภูมิ 64-74 °C การสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือ การใช้ด่างและสารเคมีมากเกินไป เนื่องจากการเปลี่ยนสารละลายด่างบ่อยและมีการหกหรือหยดระหว่างการขนย้ายไปสู่ขั้นตอนการล้าง และการใช้ปริมาณไฟฟ้าในขั้นตอนการล้างไม่เหมาะสม เนื่องจากระยะเวลาที่ใช้ในการล้างนานเกินไปทำให้สิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า ดังนั้นจำเป็นต้องมีการศึกษาถึงอายุการใช้งานของสารละลาย ปริมาณการใช้ไฟฟ้า และระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการล้าง รวมทั้งมาตรฐานในการล้างและการเปลี่ยนถ่ายสารละลาย

3) ขั้นตอนการกำจัดสนิมด้วยกรด เป็นขั้นตอนที่จะทำต่อจากการทำความสะอาดด้วยด่างโดยขั้นตอนนี้เป็นการกำจัดสนิมหรือฟิล์มออกไซด์ออกจากผิวชิ้นงาน ส่วนใหญ่จะใช้กรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งมีความรุนแรงในการกำจัดสนิมสูง ความเข้มข้นของกรดที่ใช้จะแตกต่างกันตามประเภทและความสกปรกของชิ้นงาน โดยทั่วไปจะใช้ความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริก 5-15% การสูญเสียที่เกิดขึ้นในขั้นตอนนี้คือการใช้ปริมาณมากเกินไป เนื่องจากการแตกเอาที่กรดซึ่งติดมากับชิ้นงานหกหยดระหว่างการเคลื่อนย้ายชิ้นงาน จากขั้นตอนการกำจัดสนิมด้วยกรดไปสู่ขั้นตอนการล้าง และจากการเปลี่ยนสารละลายกรดบ่อยครั้ง เนื่องจากการเสื่อมสภาพของกรด ซึ่งมีการปนเปื้อนของด่างจากขั้นตอนการล้างทำความสะอาดด้วยด่าง

2.2.2 การชุบโลหะ

ขั้นตอนการชุบโลหะเป็นขั้นตอนชุบผิวชิ้นงานด้วยโลหะโดยการใช้ไฟฟ้า โลหะที่ใช้ชุบผิวนั้นขึ้นกับความต้องการและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โลหะที่ใช้ในกลุ่มโรงงานตัวอย่างคือ นิกเกิล โครเมียม และทองแดง ในการชุบโลหะ ภายในบ่อชุบประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าสองขั้วคือแอโนด (ขั้วลบ) และแคโทด (ขั้วบวก) และสารเคมีต่างๆ โดยทั่วไปในขั้นตอนการชุบโลหะเป็นขั้นตอนที่มีการใช้ไฟฟ้ามากที่สุด

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างของโลหะที่ใช้เคลือบชิ้นงานและสารเคมีที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า

โลหะที่ใช้เคลือบผิวชิ้นงาน	วัตถุประสงค์การชุบ	สารเคมีที่ใช้ / ความเข้มข้นของสาร (กรัมต่อลิตร)	อื่นๆ
ชุบนิกเกิล	นิกเกิลเงา นิกเกิลดำ นิกเกิลกึ่งเงา ซาตินนิกเกิล และ นิกเกิลดำ	สารละลายนิกเกิลคลอไรด์ / 40-60 สารละลายนิกเกิลซัลเฟต 250-300 สารละลายกรดบอริก / 35-45	45-65 °C เวลา 20-60 min
ชุบโครเมียม	ความแข็งแรง	สารละลายกรดโครมิก / 126-250 สารละลายกรดซัลฟิวริก / 2.5 โครเมียมเฮกซะวาเลนท์ไอออน / 126-190	40-50 °C เวลา 10-20 min
ชุบทองแดง	เคลือบผิวชั้นแรกของโลหะเดิมก่อนที่จะนำไปชุบโลหะอื่นๆ	-การชุบทองแดงแบบต่าง คอปเปอร์ไซยาไนด์ / 15 โซเดียมไซยาไนด์ / 23 หรือ โพแทสเซียมไซยาไนด์ / 15 โซเดียมคาร์บอเนต -การชุบทองแดงแบบกรด คอปเปอร์ซัลเฟต / 188 กรดซัลฟิวริก / 75 และน้ำยาเงา	41-60 °C 25 °C

2.2.3 การล้าง

เป็นขั้นตอนการล้างวัตถุชุบและสารเคมีที่ติดกับชิ้นงานโดยใช้น้ำสะอาดขั้นตอนนี้มีการใช้น้ำปริมาณมากที่สุดเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่น การล้างมีด้วยกัน 2 แบบคือ การจุ่มล้างและการตักกรด เพื่อทำความสะอาดชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการชุบผิว ขั้นตอนการล้างมีอยู่ทุกส่วนของขั้นตอนการชุบ อาทิ การล้างหลังจากการขัด การล้างหลังจากการล้างไขมันด้วยด่าง การล้างหลังจากการกำจัดสนิมด้วยกรด การล้างหลังจากการชุบโลหะ เป็นต้น

การชุบโลหะนั้นมีขั้นตอนที่ใช้สารเคมีและก่อให้เกิดไอสารพิษเป็นอนในอากาศมากได้แก่ ขั้นตอนการล้างชิ้นงานก่อนการชุบผิว และขั้นตอนการชุบชิ้นงาน เพื่อไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจายของไอสารพิษจึงมีการติดตั้งระบบระบายไอสารพิษออกจากพื้นที่ทำงาน เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่ปฏิบัติงานบริเวณนั้น

2.3 การระบายอากาศ

Mario and Berardo (1997) ได้ทำการศึกษาพบว่า การออกแบบโดยใช้หลักการออกแบบที่ถูกต้องมีส่วนทำให้สิ่งแวดล้อมในอาคารดีขึ้น รวมถึงความปลอดภัยของสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน พรพิมล (2543) รายงานว่าการระบายอากาศเป็นวิธีการควบคุมสิ่งแวดล้อมการทำงานโดยการเพิ่มอากาศหรือการดูดอากาศออก การระบายอากาศใช้ในการเจือจางความเข้มข้นของสารมลพิษให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ เพื่อเอาสารมลพิษออกจากแหล่งกำเนิดและ เพื่อเป็นการทำให้สิ่งแวดล้อมในการทำงานดีขึ้น การระบายอากาศสามารถใช้ในการควบคุมความชื้น กลิ่น และสภาวะสิ่งแวดล้อมอื่นเพื่อให้เกิดความสบายในการปฏิบัติงาน

ระบบระบายอากาศเฉพาะที่เป็นหลักการกำจัดมลพิษที่แหล่งกำเนิดก่อนที่จะแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมในพื้นที่ทำงาน หลักการทำงานของระบบอาศัยการดูดสารมลพิษที่ต้องการกำจัด โดยสมบัติของระบบระบายอากาศเฉพาะที่สามารถใช้ปริมาณอากาศน้อยกว่าระบบระบายอากาศแบบเจือจาง แต่การออกแบบหัวดูดอากาศ จะต้องมีการรูปร่างเหมาะสมและอยู่ในตำแหน่งที่จับไอสารพิษได้ มีพัดลมดูดอากาศ และท่ออากาศที่ออกแบบให้ดูดอากาศในปริมาณที่เหมาะสม โดยต้องมีการเลือกอุปกรณ์กำจัดมลพิษให้เหมาะสมกับชนิดและความเข้มข้นของสารมลพิษที่เกิดขึ้น รวมถึงต้องตรวจสอบประสิทธิภาพในการกำจัดสารมลพิษโดยต้องควบคุมมลพิษให้สอดคล้องกับมาตรฐานตามกฎหมายกำหนด

2.3.1 การกำจัดสารมลพิษ

จำแนกเป็น 3 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

1) มลพิษที่อยู่ในรูปของแข็ง มีลักษณะเป็นฝุ่นผงขนาดเล็กและขนาดใหญ่รวมทั้งพวกเชื้อจุลินทรีย์ต่าง ๆ ใช้วิธีการกำจัดดังนี้ ฝุ่นผงขนาดใหญ่ อาทิ ฝุ่นโลหะ ฝุ่นไม้ ฝุ่นแข็ง ใช้วิธีการกำจัดโดยการผ่านไซโคลน หรือหอเหวี่ยงแยกฝุ่น ฝุ่นผงขนาดกลาง อาทิ พวกแป้งต่าง ๆ หรือละอองสีฝุ่นต่าง ๆ ใช้วิธีการกำจัดโดยการผ่านผ้ากรองชนิดต่าง ๆ และ ส่วนฝุ่นผงขนาดเล็ก อาทิ ซีเมนต์ เหม่า ฝุ่นขานอ้อย ฯลฯ กำจัดโดยใช้ชุดกำจัดฝุ่นแบบประจุไฟฟ้า (Electro-static precipitators) นอกจากนี้ยังอาจผ่านไปยังชุดกรองฝุ่นแบบเปียก (Liquid washers) ซึ่งใช้กำจัดฝุ่นละอองที่มีน้ำหนักเบา อาทิ ใยผ้า ย่น เส้นใยต่าง ๆ เป็นต้น รวมทั้งพวกจุลินทรีย์ในอากาศด้วย

ทั้งนี้การกำจัดฝุ่นผงที่มีความสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสูงอาจประกอบด้วยขั้นตอนการกำจัด หลายขั้นตอนผสมกัน

2) มลพิษที่อยู่ในรูปของเหลว โดยอยู่ในลักษณะเป็นละอองของเหลว อาทิ ละอองสี หรือละอองสารเคมีอื่น ๆ ซึ่งมีขนาดเล็กและฟุ้งกระจายได้ทั่วไปไม่อาจกำจัดให้สมบูรณ์ได้ด้วยไซโคลอน แต่สามารถกำจัดได้ด้วยวิธีการผ่านตัวทำลายต่าง ๆ ที่เหมาะสมหรือผ่านตะแกรงโลหะขนาดต่าง ๆ เพื่อให้ละอองมีขนาดโตขึ้นและแยกตัวออกได้

3) มลพิษที่อยู่ในรูปของไอระเหยหรือแก๊ส อาทิ คลอรีน คาร์บอนมอนนอกไซด์ ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ไบปรอท ไอตะกั่ว ซึ่งเกิดจากความร้อนบนผิวโลหะที่หลอมเหลวอยู่ มักกำจัดใน 3 ลักษณะ คือ

3.1) การกำจัดแบบแห้ง โดยการผ่านหอกรองที่ภายในบรรจุสารดูดซับต่าง ๆ อาทิ ถ่านปรับสภาพแล้ว (Activated charcoal) หรือซิลิกาเจลหรืออื่น ๆ ซึ่งจะดูดซับไอหรือก๊าซพิษเหล่านั้น

3.2) การกำจัดแบบเปียก โดยการผ่านไอปิษเหล่านั้นไปยังหอซึ่งภายในมีสารละลายที่เหมาะสมมาดูดซับโดยการปล่อยให้อิหรือแก๊สพิษเหล่านั้นสัมผัส และละลายตัวเข้ากับสารละลายนั้น จากนั้นจึงไปกำจัดสารพิษออกจากสารละลายอีกครั้งหนึ่ง

3.3) การกำจัดแบบเผาไหม้ โดยการผ่านแก๊สพิษที่ลุกติดไฟเหล่านั้นไปยังหัวเผา ซึ่งจะเกิดการเผาไหม้ทำให้แก๊สพิษนั้นเปลี่ยนสภาพจากแก๊สปกติกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์กับไอน้ำซึ่งแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแก๊สที่มีสารอันตรายต่อคนงานน้อยกว่าแก๊สที่ดูดเข้ามา และสามารถปล่อยให้ธรรมชาติกำจัดออกได้โดยผ่านการสังเคราะห์แสงของพืช

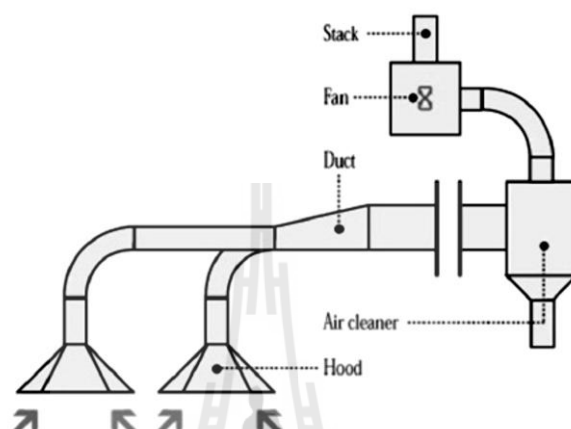
2.3.2 ประสิทธิภาพการทำงานของระบบระบายอากาศเฉพาะที่

มีหลักเกณฑ์ในการพิจารณาเลือกการกำจัดสารมลพิษโดยใช้ระบบระบายอากาศเฉพาะที่เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศที่ดีดังนี้

- 1) แหล่งกำเนิดมลพิษอยู่ใกล้กับบริเวณที่ผู้ปฏิบัติงานหายใจ
- 2) แหล่งกำเนิดสารมลพิษอยู่กับที่ก่อให้เกิดมลพิษในปริมาณสูง และสารมลพิษสามารถกระจายไปยังพื้นที่โดยรอบได้ไกล
- 3) ผู้ปฏิบัติงานได้รับผลกระทบด้านมลพิษในอากาศจนส่งผลให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพหรืออาจก่อให้เกิดปัญหาความไม่ปลอดภัยในการทำงาน อาทิ ก่อให้เกิดการติดไฟ หรือมีผลกระทบต่อผลผลิต ทำให้เกิดปัญหาต่อผู้ปฏิบัติงาน หรือทำการเก็บตัวอย่างอากาศแล้วพบว่าค่าความเข้มข้นของสารมลพิษมีค่าสูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานกำหนด
- 4) ผู้ปฏิบัติงานมีสุขภาพอนามัยดีขึ้น และปรับปรุงสภาพการทำงานให้มีความปลอดภัย

2.4 อุปกรณ์สำหรับระบบระบายอากาศเฉพาะที่

ระบบระบายอากาศเฉพาะที่ประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ได้แก่ หัวดูดอากาศ ท่อนำอากาศ อุปกรณ์ควบคุมมลพิษ หรือระบบกำจัดสารมลพิษ พัดลมดูดอากาศ และปล่องระบายอากาศ ดังรูปที่ 2.3 มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของระบบระบายอากาศเฉพาะที่

ที่มา : Canadian center for occupational health and safety

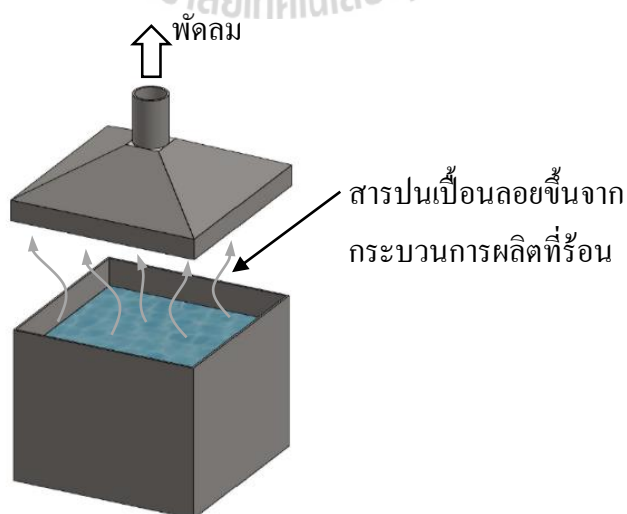
2.4.1 หัวดูดอากาศ

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรวบรวมสารพิษทางอากาศให้เข้าสู่ระบบระบายอากาศในอัตราที่ต้องการ รูปร่างของหัวดูดแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- 1) หัวดูดแบบเอ็นโคลสซิ่ง (Enclosing hood) เป็นหัวดูดอากาศที่ปิดครอบแหล่งกำเนิดของสารปนเปื้อนหรือกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดสารปนเปื้อนไว้ทั้งหมดหรือบางส่วน ลักษณะของหัวดูด จะทำให้สารปนเปื้อนสะสมอยู่ภายในหัวดูด มีประสิทธิภาพในการควบคุมสูง ปริมาณลมที่พาสารปนเปื้อนออกจากแหล่งกำเนิดเข้าสู่ระบบระบายอากาศมีไม่มากนัก ทำให้ง่ายต่อการนำสารปนเปื้อนเข้าสู่ระบบเนื่องจากไม่ถูกรบกวนด้วยกระแสลมหน้าหัวดูดอากาศ ทำให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดสูง อย่างไรก็ตามความเร็วลมหน้าหัวดูดอากาศ ควรออกแบบให้ได้ตามที่กำหนดไว้ เพราะถ้าความเร็วต่ำเกินไปสารปนเปื้อนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดอาจออกมาจากช่องเปิดของหัวดูดอากาศ และเข้ามาปนเปื้อนในบริเวณพื้นที่ทำงานได้ ทั้งนี้หากกระบวนการผลิตไม่มีข้อจำกัดในเรื่องการติดตั้งหรือไม่ขัดขวางการทำงาน ควรพิจารณาเลือกใช้หัวดูดอากาศประเภทนี้

2) หัวดูดแบบเอ็กทีเรีย (Exterior hood) หมายถึงหัวดูดอากาศที่ติดตั้งอยู่ในตำแหน่งที่ใกล้กับแหล่งของสารปนเปื้อนโดยไม่ปิดคลุมแหล่ง แบ่งเป็น 3 ชนิด คือ

2.1) คาโนปี (Canopy) หรือ หัวดูดแบบบริชีฟวิ่ง (Receiving hood) เป็นหัวดูดอากาศที่ลักษณะการปล่อยสารปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดมีความเร็วต้นสูงและมีทิศทางการเคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง หัวดูดอากาศจะติดตั้งในทิศทางการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน โดยหันช่องเปิดของหัวดูดอากาศรับสารปนเปื้อนเข้าสู่หัวดูดอากาศดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำให้สารปนเปื้อนที่เกิดขึ้นถูกดูดเข้าสู่หัวดูดอากาศได้ดีขึ้นมีการรื้อสารปนเปื้อนที่เคลื่อนที่เข้าใกล้ในระยะที่แรงดูดของพัดลมส่งผ่านหัวดูดอากาศสามารถดูดอากาศและสารปนเปื้อนเข้าไปได้นิยมใช้ ในกระบวนการผลิตที่มีความร้อนและสารปนเปื้อนลอยขึ้นสู่ระยะที่หัวดูดอากาศสามารถดูดได้โดยไม่ต้องใช้พลังงานมาก รวมถึงผู้ปฏิบัติงานไม่ได้ทำงานในบริเวณที่เป็นทางผ่านของสารจากแหล่งไปยังหัวดูดอากาศ อาทิ บริเวณเตาหลอม หม้อต้มหรือต้ม เป็นต้น หัวดูดอากาศแบบนี้เป็นท่อที่ใช้ประโยชน์ได้น้อย เนื่องจากความเร็วลมจะลดลงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกำลังสองของระยะทางระหว่างหัวดูดอากาศ แบบคาโนปีและแหล่งของสารมลพิษ และต้องใช้ปริมาณอากาศจำนวนมาก อีกทั้งยังอาจถูกรบกวนโดยการเคลื่อนไหวของอากาศในห้อง และผู้ปฏิบัติงานจะต้องทำงานอยู่ใต้ท่อดูดอากาศระหว่างจุดที่ปล่อยสารมลพิษ และหัวดูดอากาศทำให้สารปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดสามารถผ่านไปยังระบบการหายใจของผู้ปฏิบัติงานได้ง่ายหัวดูดอากาศประเภทนี้มี 2 ชนิด คือ High Canopy เป็นท่อที่มีการออกแบบและติดตั้งให้อยู่ในระดับสูงเพื่อไม่ให้กีดขวางการทำงานและ Low Canopy เป็นท่อที่มีระยะห่างระหว่างแหล่งสารปนเปื้อนกับหัวดูดอากาศ น้อยกว่าความยาวของเส้นผ่านศูนย์กลางของแหล่งสารปนเปื้อนหรือน้อยกว่า 3 ฟุต ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 หัวดูดแบบบริชีฟวิ่ง (Receiving Hood)

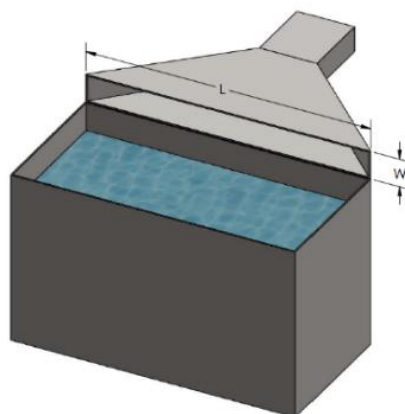
2.2) หัวดูดอากาศแบบแคปเจอร์ริง (Capturing hood) เป็นท่อที่ส่งแรงดูดออกไปเพื่อนำสารปนเปื้อนและอากาศเข้าสู่หัวดูดอากาศใช้กับแหล่งกำเนิดที่สารปนเปื้อนอยู่นอกท่อดูด โดยส่วนที่มีการปล่อยสารปนเปื้อนอยู่ในตำแหน่งที่ห่างออกไปนอกหัวดูดอากาศ ทั้งนี้หัวดูดอากาศประเภทนี้จะต้องมีแรงดูดมากพอที่ทำให้สารปนเปื้อนที่ปล่อยออกมาเคลื่อนที่เข้าสู่หัวดูดอากาศ ซึ่งความเร็วบริเวณที่สารปนเปื้อนถูกปล่อยออกมาเรียกว่า ความเร็วยึดจับ (Capture velocity) โดยต้องมีค่าความเร็วตามที่กำหนดไว้เพื่อลดปริมาณลมที่ใช้ในการดูดจับสารปนเปื้อนเข้าสู่หัวดูดอากาศ และต้องพยายามลดระยะห่างระหว่างจุดที่สารปนเปื้อนถูกปล่อยออกมาและหัวดูดอากาศให้สั้นที่สุด ในการติดตั้งเมื่อต่อหัวดูดอากาศเข้าไปที่พัดลมดูดอากาศแล้ว อากาศจะถูกดูดเข้ามาจากทุกทิศทางไปที่ช่องเปิดของหัวดูดอากาศ ลักษณะของหัวดูดอากาศประเภทนี้มี 4 ชนิด คือ

2.2.1) หัวดูดแบบไซด์ดราฟท์ (Side draft) เป็นท่อที่มีการออกแบบการติดตั้งอยู่ด้านข้างของแหล่งสารปนเปื้อนดังแสดงในรูปที่ 2.5 ท่อดูดชนิดนี้มีสัดส่วน $W/L \geq 0.2$ ใช้ในกระบวนการดูดสารปนเปื้อนจำพวกก๊าซหรือไอระเหย ซึ่งลอยขึ้นจากแหล่งกำเนิดอย่างช้า ๆ และถูกดูดเข้าสู่ระบบก่อนที่จะลอยสู่บรรยากาศรอบ ๆ หรือระดับหายใจของผู้ปฏิบัติงาน เช่น ถังชุบโลหะ หรือในกระบวนการผลิตที่ผู้ปฏิบัติงานต้องยืนใกล้กับแหล่งสารปนเปื้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 หัวดูดแบบไซด์ดราฟท์ (Side Draft Hood)

2.2.2) หัวดูดแบบสลีต มีสัดส่วนของด้านกว้าง (W) ต่อด้านยาว (L) น้อยกว่า 0.2 ดังแสดงในรูปที่ 2.6



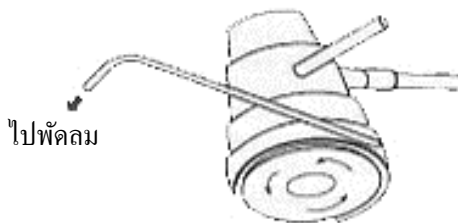
รูปที่ 2.6 หัวดูดแบบสล็อต (Slot Hood)

2.2.3) หัวดูดแบบดาวน์เวิด (Downward hood) เป็นท่อที่ติดตั้งอยู่บริเวณด้านล่างของแหล่งสารปนเปื้อนเพื่อรองรับและดูดสารปนเปื้อนเข้าสู่ระบบ ใช้กับสารปนเปื้อนที่เป็นอนุภาคและมีแนวโน้มตกลงสู่ด้านล่างดังแสดงในรูปที่ 2.7



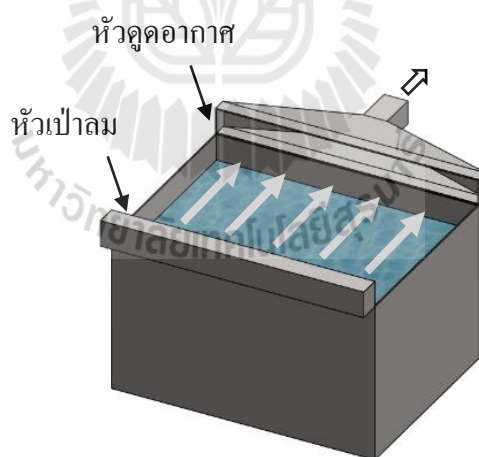
รูปที่ 2.7 หัวดูดแบบดาวน์เวิด (Downward hood)

2.2.4) หัวดูดแบบปริมาตรต่ำความเร็วสูง (Low volume, High velocity hood) เป็นท่อที่ดูดอากาศเข้าไปในปริมาณน้อยแต่ด้วยความเร็วสูง ใช้ในการดูดสารปนเปื้อนที่เกิดจากแหล่งกำเนิดขนาดเล็กและเคลื่อนตัวโดยใช้ความเร็วดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 หัวดูดแบบปริมาตรต่ำความเร็วสูง (Low volume, High velocity hood)

2.3) ระบบผลัก-ดึง (Push-pull system) เป็นท่อที่อาศัยหลักการเป่าและการดูดของพัดลมอากาศจากด้านตรงข้ามกับหัวดูดอากาศจะถูกเป่าออกมาเพื่อส่งสารปนเปื้อนให้เคลื่อนที่เข้าใกล้หัวดูดอากาศ ในระยะที่หัวดูดอากาศสามารถดูดสารปนเปื้อนเข้าสู่ระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพและใช้พลังงานน้อย การเป่าอากาศเพื่อส่งสารปนเปื้อนเข้าสู่หัวดูดอากาศ คือ ด้วยพลังงานที่ใช้เท่ากันสามารถควบคุมทิศทางของลำอากาศที่เป่าออกไปได้ระยะทางที่ไกลกว่าการดูด กล่าวคือการดูดและเป่าจะใช้พลังงานน้อยกว่าการดูดเพียงอย่างเดียว และมีประสิทธิภาพในการนำสารปนเปื้อนเข้าสู่ระบบได้ดีกว่าดังแสดงในรูปที่ 2.9

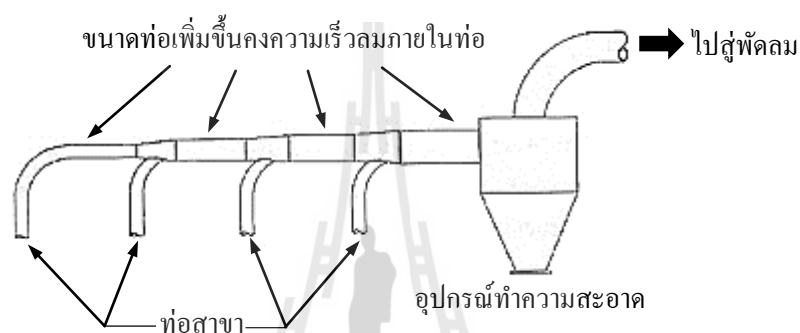


รูปที่ 2.9 ระบบผลัก-ดึง (Push-pull system)

2.4.2 ท่อนำอากาศ

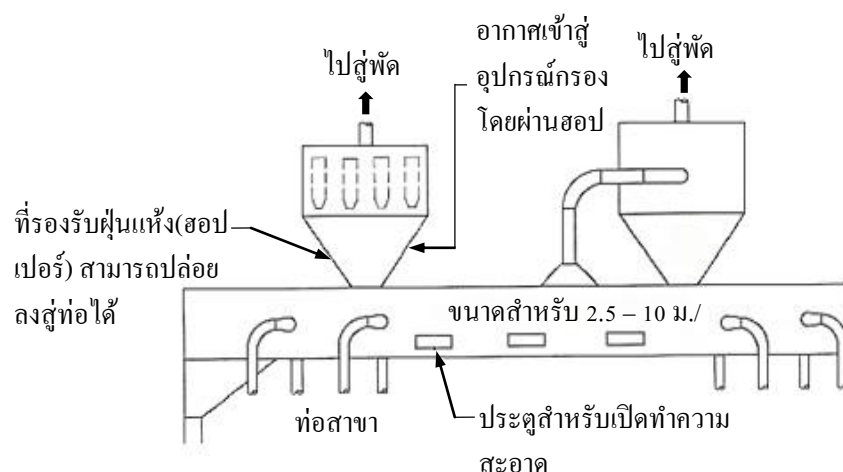
เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการนำอากาศและส่งต่ออากาศที่รวบรวมโดยหัวดูดอากาศ ผ่านต่อไปเพื่อเข้าสู่ระบบกำจัดสารมลพิษหรือระบายออกสู่ภายนอก ระบบท่อโดยทั่วไปมี 2 ประเภท คือ

1) ระบบแทปเปอร์ (Tapered system) เป็นระบบที่ท่อนำอากาศหลักมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ เพื่อรองรับอากาศจากท่อสาขาและคงความเร็วลมต่ำสุดภายในท่อไว้ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ระบบแทปเปอร์

2) ระบบพลีนิ้ม (Plenum system) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 เป็นระบบที่ท่อนำอากาศหลักมีขนาดใหญ่และความเร็วลมในท่อหลักต่ำ อนุภาคและกระแสน้ำอากาศจึงตกสะสมอยู่ในท่อหลัก โดยท่อหลักจะทำหน้าที่เป็นเส้นทางนำอากาศจากท่อสาขาต่าง ๆ ไปยังพัดลมหรืออุปกรณ์ทำความสะอาดที่มีความดันสูญเสียต่ำ จึงทำให้พลังงานที่ต้องการสำหรับระบบต่ำ และช่วยให้เกิดความสมดุลในทุกท่อสาขา ระบบพลีนิ้ม สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนท่อสาขาหรือเปลี่ยนตำแหน่งได้ตลอดแนวของท่อหลัก และกรณีที่ท่อสาขาบางช่วงไม่มีการใช้งานอาจปิดไว้และหากอัตราการไหลของอากาศทั้งระบบลดลงก็ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของระบบ หากความเร็วลมต่ำสุดในท่อสาขาทั้งหมดยังคงเดิม ทั้งนี้ท่อหลักจะทำหน้าที่เป็นที่แยกอนุภาคขนาดใหญ่ออกจากอากาศด้วย ซึ่งช่วยลดปริมาณอนุภาคที่อาจไปรบกวนหรือเป็นภาระของพัดลมและเครื่องทำความสะอาดอากาศ แต่มีข้อจำกัด คือ สารปนเปื้อนที่เหนียวหรือเป็นเส้นใยอาจมีแนวโน้มอุดตันในท่อหลักได้ และเป็น การยากที่จะทำความสะอาด และหากเป็นสารปนเปื้อนที่สามารถติดไฟได้เอง อาทิ ผุ่นแมงกานีส อลูมิเนียม ไททาเนียม หรือฝุ่นเมล็ดพืช ไม่ควรใช้ระบบท่อนำอากาศชนิดนี้ ความเร็วต่ำสุดในท่อนำอากาศที่กำหนดตามชนิดของสารปนเปื้อนแสดงดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.11 ระบบพ่นลม

ตารางที่ 2.2 ความเร็วลมต่ำสุดในท่อสำหรับสารปนเปื้อนลักษณะต่าง ๆ

ลักษณะสารปนเปื้อน	ตัวอย่าง	ความเร็วลม	
		f/min	m/s
ไอระเหย ก๊าซ คาร์บอน	ไอระเหย ก๊าซ คาร์บอนทุกชนิด	1000-2000	5-10
ฟุ้ง	ฟุ้งโลหะจากการเชื่อม	2000-2500	10-13
ฝุ่นที่มีขนาดเล็กมาก ๆ	เส้นใยฝ้ายขนาดเล็ก ฝุ่นละเอียดจากไม้	2500-3000	12-15
ฝุ่นและผงแห้ง	ฝุ่นยางละเอียด ฝุ่นผงจากปอ ฝุ่นฝ้าย	3000-4000	15-20
ฝุ่นจากอุตสาหกรรมโดยเฉลี่ย	ฝุ่นจากการเจีย ฝุ่นจากการขัด ฝุ่นจากเส้นใยปอ ผงกาแฟ ฝุ่นแกรนิต ผงซิลิกา ฝุ่นจากการเคลื่อนย้ายสิ่งของ ฝุ่นจากการตัดอิฐ ฝุ่นหินปูน อนุภาคจากการหล่อโลหะ	3500-4000	18-20
ฝุ่นหนัก	ฝุ่นจากการเลื่อยไม้ ฝุ่นทรายจากการขัดโลหะ ฝุ่นตะกั่ว ฝุ่นจากการทำงานเกลียวโลหะ หรือทองเหลือง ฝุ่นจากการเจาะเหล็กหล่อ	4000-4500	20-23
ฝุ่นหนักและชื้น	ฝุ่นโลหะขนาดใหญ่จากการขัดโลหะ ฝุ่นซีเมนต์ที่มีความชื้น แอสเบสตอสที่เกาะกันเป็นก้อน ฝุ่นปูนขาว ผงวัสดุที่มีความเหนียวซึ่งเกิดจากการขัด	>4500	>23

2.4.3 พัฒนาคูอากาศ

ทำหน้าที่ในการดูดอากาศทำให้เกิดการไหลของอากาศผ่านไปในระบบระบายอากาศ เนื่องจากการไหลของอากาศในระบบระบายอากาศจะมีความสัมพันธ์กับความต้านทานในระบบอันเกิดจากความเสียดทานกับปริมาณอากาศที่ไหลผ่านระบบ แต่การที่อากาศจะเอาชนะความต้านในระบบและไหลได้ในปริมาณที่ต้องการ อากาศจำเป็นต้องได้รับพลังงานจากภายนอกในรูปของความดันซึ่งเกิดจากการทำงานของพัดลม พัดลมที่ใช้ในระบบระบายอากาศในอุตสาหกรรมมี 2 ประเภท คือแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และแบบไหลตามแนวแกน หลักการทำงานของพัดลมแต่ละประเภทมีรายละเอียดดังนี้

1) แบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal fan) ประกอบด้วยใบพัดของพัดลมหมุนอยู่ในส่วนที่ติดตั้งใบพัด อากาศเคลื่อนที่เข้าสู่พัดลมตามแนวแกนของพัดลม และถูกเหวี่ยงออกตามแนวรัศมีของใบพัด การหมุนของใบพัดมีทิศทางไปยังทางออกของอากาศ พัดลมชนิดนี้แบ่งเป็น 3 ชนิดตามรูปร่างและลักษณะของใบพัด โดยพัดลมแต่ละชนิดจะมีข้อดีและข้อเสียที่มีความแตกต่างกันดังนี้

1.1) แบบใบแนวรัศมี (Radial blade) ใช้สำหรับระบบที่มีฝุ่นหรืออนุภาค เนื่องจากลักษณะของใบพัดที่แบน และแต่ละใบพัดมีระยะห่างกัน ทำให้สามารถสัดฝุ่นออกได้เองง่ายกว่า หากใช้วัสดุที่แข็งในการทำใบพัดจะช่วยทำให้สามารถทนการกัดกร่อนหรือแรงกระแทกของอนุภาคได้ แต่มีข้อเสีย คือ มีประสิทธิภาพการทำงานต่ำ มีขนาดใหญ่ โครงสร้างหนัก และมีราคาสูง

1.2) แบบใบโค้งหน้า (Forward curve blade) ใช้สำหรับการดูดอากาศในปริมาณมากที่ความดันสถิตของระบบขนาดปานกลาง (0-1.2 กิโลพาสคาลส์) มีเสียงดังน้อย สามารถดูดอากาศที่ความเร็วสูงความเร็วรอบต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับพัดลมประเภทอื่น ๆ มีข้อจำกัดในการใช้งาน คือ ไม่เหมาะกับอากาศที่มีวัสดุกัดกร่อนเจือปนอยู่และหากเพิ่มอัตราการไหลของอากาศ และระบบมีค่าความดันสถิตของระบบต่ำกว่าที่คำนวณไว้ พัดลมจะดูดอากาศด้วยอัตราที่สูงทำให้ต้องใช้พลังงานมากกว่าที่จำเป็น

1.3) แบบใบเอียงหลัง (Backward inclined blade) ใช้สำหรับดูดอากาศในปริมาณสูง ๆ ที่มีฝุ่นเจือปนอยู่เล็กน้อย มีประสิทธิภาพดีกว่าระบบแบบใบโค้งหน้า เนื่องจากใบพัดทำให้ความดันเพิ่มขึ้นโดยตรง และกำลังจะเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เมื่อเพิ่มอัตราไหลของอากาศ ซึ่งหากความดันสถิตของระบบต่ำกว่าที่คำนวณไว้พลังงานที่ใช้จะไม่เพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าสูงสุด และลดลงที่อัตราการไหลของอากาศสูง ทั้งนี้หากต้องการพัดลมที่ดูดอากาศด้วยความเร็วสูง ต้องทำการเพิ่มความเร็วยรอบของพัดลม ซึ่งต้องใช้ใบพัดที่เป็นวัสดุที่ทนแข็งแรง

2) แบบไหลตามแนวแกน (Axial fan) ลักษณะการทำงานคือทำให้อากาศเกิดการเคลื่อนที่ได้ในทิศทางตามแนวแกนของพัดลมด้วยการเพิ่มความเร็วของอากาศจากการหมุนของใบพัดและเหนี่ยวนำให้เกิดการเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียวโดยไม่ได้อาศัยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมาช่วย อย่างแบบแรก ด้วยลักษณะดังกล่าวนี้เองทำให้ความดันสถิตที่ได้จากพัดลมประเภทนี้มีค่าต่ำกว่าแบบเหวี่ยงหนีศูนย์กลางที่ปริมาณลมเท่า ๆ กัน

2.5 การออกแบบหัวดูดอากาศ

ในการออกแบบหัวดูดอากาศต้องคำนึงถึงรูปร่าง ขนาด ตำแหน่งที่ตั้ง และอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่หัวดูดอากาศ โดยปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการออกแบบได้แก่

2.5.1 ความเร็วยึดจับ

ความเร็วต่ำสุดที่อากาศ ณ จุดกำเนิดสารปนเปื้อนซึ่งอยู่ห่างไกลหัวดูดอากาศที่สุดที่ถูกดูดเข้าสู่ระบบได้ ความเร็วนี้จะขึ้นกับอัตราการไหลของอากาศเข้าสู่หัวดูดอากาศ และรูปร่างของหัวดูดอากาศ ค่าความเร็วยึดจับสำหรับการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อนจากแหล่งกำเนิดแต่ละชนิดแสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ค่าความเร็วยึดจับสำหรับการเคลื่อนที่ของสารปนเปื้อน

ลักษณะการฟุ้งของสารปนเปื้อน	ตัวอย่าง	ความเร็วยึดจับ (m/s)
ไม่มีความเร็วในอากาศ นิ่ง	การระเหยจากถังสารเคมี	0.25-0.5
ความเร็วต่ำในอากาศ นิ่งปานกลาง	การเชื่อมโลหะ ชุบโลหะ บรรจุสารเคมี เชื่อมโลหะ บุรพ่นสี	0.5-1.0
มีความเร็วพอสมควรในอากาศที่เคลื่อนที่เร็ว	งานบดย่อย พ่นสีในบูธที่แคบ ๆ เทสารเคมีลงในถัง	1.0-2.5
ออกมาด้วยความเร็วสูงในบริเวณที่มีอากาศเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง	งานเจียร ชัด	2.5-10

ที่มา: ACGIH(2003)

2.5.2 อัตราการไหลของอากาศเข้าหัวดูดอากาศ

1) หัวดูดอากาศแบบเอ็กทีเรียค่าอัตราการไหลของอากาศเข้าหัวดูดอากาศคำนวณจากรูปร่างทรงเรขาคณิตของหัวดูดอากาศได้แก่ ขอบเขตของปีกหัวดูด (Flang) หรือแผ่นกั้น

ด้านข้างของหัวดูด (Baffles) หรือผนังที่อยู่ใกล้กับหัวดูดอากาศ โดยจุดกำเนิดของสารปนเปื้อน (X) อยู่บนพื้นผิวของรูปทรงเรขาคณิตนั้น

2) หัวดูดอากาศแบบเอ็นโคลสเซอร์ค่าอัตราการไหลของอากาศเข้าหัวดูดอากาศคำนวณจากความเร็วลมที่พื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดของหัวดูดอากาศหรือ ความเร็วยึดจับคูณกับพื้นที่หน้าตัดของช่องเปิดหัวดูด

การคำนวณหาอัตราการไหลของอากาศที่เข้าหัวดูดอากาศแต่ละลักษณะนั้นมีวิธีการคำนวณที่แตกต่างกัน รายละเอียดดังนี้

$$Q = VA \quad (2.1)$$

กรณีหัวดูดอากาศขนาดเล็ก และไม่มีปีกกัน คำนวณหาอัตราการไหลที่จุด X บนพื้นที่ผิวทรงกลมจากสูตร

$$Q = V(4\pi X^2) = 12.57VX^2 \quad (2.2)$$

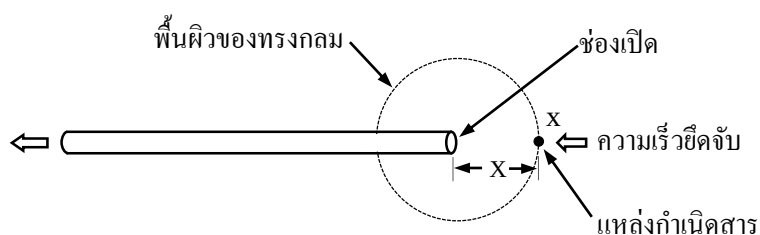
เมื่อ

Q = อัตราการไหลของอากาศเข้าสู่จุดดูด, m^3/s

V = ความเร็ว ณ ระยะ X , m/s

$A = 4\pi X^2$ = พื้นที่ผิวของทรงกลม, m^2

X = ระยะห่างระหว่างแหล่งสารปนเปื้อนและหัวดูดอากาศ รัศมีทรงกลม, m



รูปที่ 2.12 หัวดูดอากาศมีขนาดเล็กและไม่มีปีกกัน

กรณีหัวดูดอากาศที่มีแหล่งสารปนเปื้อนที่มีความยาวมากกว่าความกว้าง คำนวณค่าอัตราการไหลที่จุด X บนพื้นที่ผิวทรงกระบอกจากสูตร

$$Q = V(2\pi XL) = 6.28VXL \quad (2.3)$$

เมื่อ

L = ความยาวของแหล่งสารปนเปื้อน, m

X = ระยะห่างระหว่างแหล่งสารปนเปื้อนและหัวดูดซึ่งเท่ากับรัศมีทรงกระบอก, m

สมการข้างต้นอยู่บนพื้นฐานที่อาศัยความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากหัวดูดอากาศถึงแหล่งสารปนเปื้อน (X) อัตราการไหลของอากาศ (Q) และอัตราความเร็วในการดูดจับ ซึ่งสามารถใช้ในการประเมินภาพรวมได้ในเบื้องต้น แต่ในทางปฏิบัติช่องเปิดที่ดูดอากาศเข้าไปไม่ได้มีลักษณะเป็นจุดหรือเป็นเส้น แต่การไหลของอากาศจะเบี่ยงเบนไปจากรูปทรงเรขาคณิตและความเร็วของอากาศสามารถพิจารณาจากลักษณะของหัวดูดอากาศรูปทรงกลมและสี่เหลี่ยม

กรณีหัวดูดอากาศรูปทรงกลมและสี่เหลี่ยม คำนวณค่าอัตราความเร็วลมที่ จุด X บนพื้นที่ผิวทรงกลมและสี่เหลี่ยมจากสูตร

$$Q = V(10X^2 + A) \quad (2.4)$$

เมื่อ

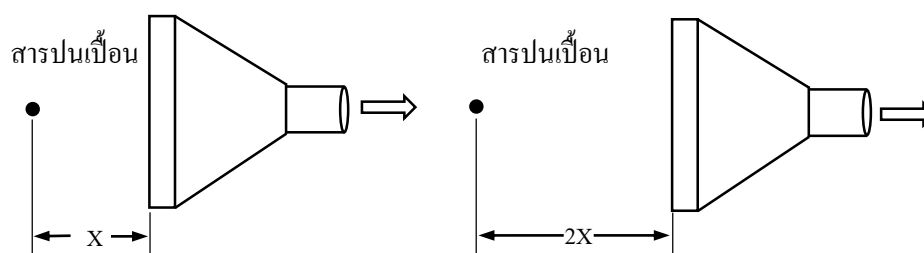
Q = อัตราการไหลของอากาศ, m^3/s

V = ความเร็วที่แนวกึ่งกลางของหัวดูด (Centerline velocity) ที่ จุด X , m

A = พื้นที่หน้าตัดของหัวดูดอากาศ, m^2

X = ระยะห่างจากแกนของหัวดูดอากาศ (โดยที่ $X < 1.5D$), m

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวดูดอากาศทรงกลมหรือ ความยาวด้านหน้าของหัวดูดอากาศสี่เหลี่ยม, m



ก. ต้องการอัตราการไหลอากาศ $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ข. ต้องการอัตราการไหลอากาศ $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$

รูปที่ 2.13 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างท่อดูดอากาศกับแหล่งสารปนเปื้อน

หมายเหตุ เมื่อระยะห่างระหว่างหัวดูดอากาศ กับแหล่งกำเนิดสารปนเปื้อนมากขึ้นยังต้องการ ปริมาตร อากาศมากขึ้นหรือความเร็วลมจะลดลงแปรผกผันเป็น 2 เท่าของระยะ X

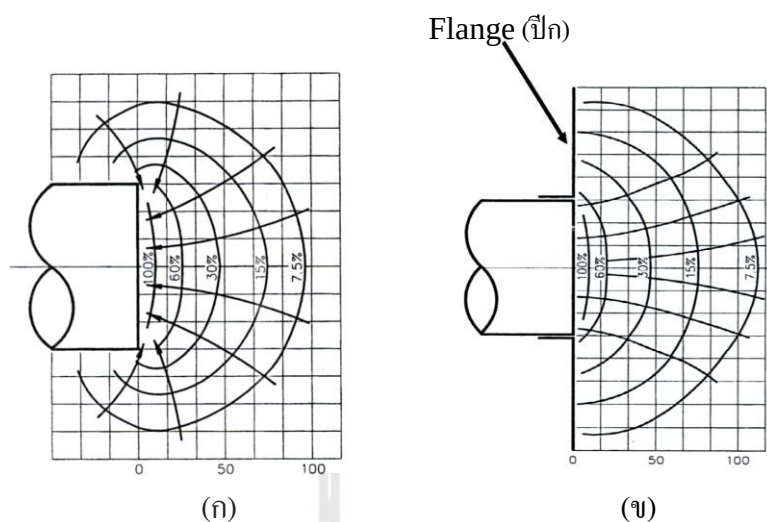
2.5.3 ผลกระทบจากปีกและแผ่นกัน

ปีก คือ แผ่นวัสดุที่ติดตั้งอยู่ที่ขอบด้านหน้าของหัวดูดอากาศ เพื่อป้องกันไม่ให้ลมจาก ด้านหลังของหัวดูดอากาศเคลื่อนที่เข้าไป

แผ่นกัน คือ แผ่นวัสดุที่ติดตั้งไว้เพื่อป้องกันไม่ให้อากาศทางด้านข้างและด้านหน้า ของหัวดูดอากาศที่ไม่ปนเปื้อนเคลื่อนที่เข้าไป

หัวดูดอากาศแบบสามัญหรือหัวดูดอากาศแบบไม่มีปีกกัน เป็นหัวดูดอากาศที่มีการ ดูดเข้าไปทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของหัวดูด มีแนวทิศทางการไหลของอากาศจากด้านนอกหัว ดูดอากาศเข้าไปด้านในของหัวดูด ดังรูปที่ 2.14 (ก) สำหรับหัวดูดอากาศแบบมีปีกกันส่วนของแผ่น ปีกกันจะทำหน้าที่ให้อากาศที่ถูกดูดเข้าไปในหัวดูดอากาศเป็นเพียงอากาศจากทางด้านหน้าท่อดูด เท่านั้น แผ่นกันจะป้องกันไม่ให้อากาศจากด้านหลังหัวดูด อากาศ ซึ่งไม่มีการปนเปื้อนเคลื่อนที่เข้า สู่หัวดูดอากาศมีแนวทิศทางการไหลของอากาศ ดังรูปที่ 2.14 (ข) ในทางปฏิบัติปีกสามารถลดอัตรา การไหลของอากาศลงได้ประมาณ 25 เปอร์เซ็นต์ เพื่อให้ค่าความเร็วยึดจับมีค่าเท่าเดิม และเพื่อให้ เกิดความเหมาะสมในการออกแบบความกว้างปีกที่เหมาะสมจะเท่ากับรากที่สองของพื้นที่หน้าตัด ของท่อนำอากาศ

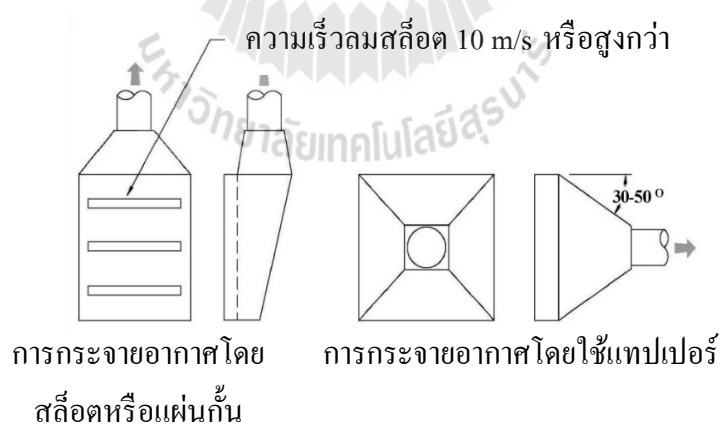
หากการติดตั้งหัวดูดอากาศอยู่บนพื้นระนาบขอบเขตอากาศรอบหัวดูดอากาศจะ เคลื่อนที่ลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งสามารถลดอัตราการไหลของอากาศลงได้ในขณะที่ความสามารถในการ ดูดสารปนเปื้อนได้เท่าเดิม ทั้งในกรณีที่มีและไม่มีปีก เนื่องจากค่าความเร็วยึดจับมีค่าเท่าเดิม



รูปที่ 2.14 ลักษณะหัวดูดอากาศไม่มีปีกและมีปีก

2.5.4 การกระจายตัวของอากาศ

การควบคุมให้อากาศที่ถูกดูดเข้ามาในหัวดูดอากาศกระจายตัวโดยการเพิ่มช่อง (Slot) เข้าไปที่ด้านหน้าของหัวดูด ดังรูปที่ 2.15 โดยที่ ช่องต้องมีอัตราความกว้างต่อความยาว (W/L) เท่ากับ 0.2 หรือน้อยกว่า



รูปที่ 2.15 การกระจายตัวของอากาศ

2.5.5 อุปกรณ์ควบคุมมลพิษหรือระบบกำจัดสารมลพิษ

ทำหน้าที่ในการกำจัดมลพิษทางอากาศโดยการแยกหรือกรองสารมลพิษออกจากอากาศให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานก่อนปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมอุปกรณ์ดักฝุ่นในปัจจุบันมีหลายประเภท ทั้งนี้หลักการเลือกใช้อุปกรณ์ใด ๆ นั้นจะต้องพิจารณาถึงปัจจัยหลายประการ อาทิ ประสิทธิภาพ การกำจัดของอุปกรณ์ ราคาอุปกรณ์และค่าติดตั้งค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ค่าบำรุงรักษา ขนาดพื้นที่ที่ใช้ในการติดตั้งอุปกรณ์ การวางรูปแบบการติดตั้ง และวัสดุที่ใช้ในการทำอุปกรณ์ รวมถึงปัจจัยทั่วไป ได้แก่

- 1) ความเข้มข้นและขนาดของสารปนเปื้อน หากมีความแตกต่างกันมากในพื้นที่ที่ตรวจวัดจะต้องพิจารณาเลือกใช้อุปกรณ์ดักหรือกรองมากกว่าหนึ่งชนิด
- 2) ประสิทธิภาพที่ต้องการ ในการเลือกจึงต้องคำนึงถึงคุณลักษณะต่าง ๆ ของอุปกรณ์และพิจารณาความเหมาะสมกับพื้นที่นั้น เนื่องจากอุปกรณ์ชนิดหนึ่งอาจมีคุณลักษณะที่พึงประสงค์และไม่พึงประสงค์อยู่ด้วยกัน อาทิ ประสิทธิภาพการทำงานสูง ราคาแพง แต่ใช้พลังงานต่ำ อาทิ High voltage electrostatic precipitators หรือประสิทธิภาพสูง ราคาปานกลาง อาทิ Bag House และ Wet collectors หรือเครื่องมือพื้นฐานราคาถูก อาทิ ไซโคลน (Cyclone)
- 3) คุณลักษณะของอากาศในระบบ อาทิ อุณหภูมิ และความชื้นมีผลต่อการเลือกอุปกรณ์ดักฝุ่น กล่าวคือ อุณหภูมิของอากาศอาจเป็นตัวกำหนดชนิดผ้าหรือวัสดุที่ใช้ผลิตอุปกรณ์ดักหรือกรองฝุ่น หรืออากาศชื้นที่สามารถกลั่นตัวเป็นหยดน้ำได้ อาจทำให้เกิดการอุดตันในระบบดักฝุ่นแบบแห้ง
- 4) คุณลักษณะของสารปนเปื้อน สารเคมีหรือสารปนเปื้อนที่ออกมาจากกระบวนการผลิตอาจทำลายวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์หรือกัดกร่อนอุปกรณ์ชนิดเปียก ถ้าเป็นสารเหนียวอาจติดกับส่วนใดส่วนหนึ่งของอุปกรณ์ดักฝุ่นทำให้เกิดการอุดตัน สารปนเปื้อนชนิดเส้นใยต่าง ๆ อาจติดกับผิวของวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์บางชนิด หรือสารที่แข็งและคมอาจเสียดสีกับอุปกรณ์ทำให้เกิดการสึกกร่อนได้อย่างรวดเร็ว ขนาด รูปร่าง และความหนาแน่นของอนุภาคอาจมีผลต่อการออกแบบอุปกรณ์ดักฝุ่นชนิดแห้ง
- 5) พลังงานและราคาเป็นปัจจัยที่ต้องพิจารณาในการเลือกอุปกรณ์การเลือกวิธีการกำจัดมลพิษที่เป็นอนุภาคจะแปรผันตามสมบัติของฝุ่น กระบวนการผลิต ปริมาณ และแบบของอุปกรณ์ รวมถึงความแตกต่างทางด้านเคมี ฟิสิกส์ ชีวะ และปริมาณของฝุ่นที่เกิดขึ้น ทั้งนี้การกำจัดมลพิษที่เป็นอนุภาคนั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ อุปกรณ์กรองอากาศ และอุปกรณ์ดักฝุ่น ทั้งนี้ อุปกรณ์กรองอากาศจะใช้กับพื้นที่ที่มีความเข้มข้นของฝุ่นในอากาศต่ำหรือมีความเข้มข้นของฝุ่นไม่เกิน 2 mg/m^3 ในขณะที่อุปกรณ์ดักฝุ่นถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมซึ่งมีปริมาณฝุ่นมากกว่าคือ มีความเข้มข้นของสารปนเปื้อนประมาณ $230\text{-}230,000 \text{ mg/m}^3$ อุปกรณ์

ดักฝุ่นที่ออกแบบมาจะต้องสามารถจัดการกับฝุ่นที่มีความเข้มข้นสูงกว่าอุปกรณ์กรองอากาศในสัดส่วน 100-20,000 เท่า สำหรับอุปกรณ์ดักฝุ่นสามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ

- 5.1) เครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต (Electrostatic precipitator)
- 5.2) อุปกรณ์กรอง (Fabric collectors)
- 5.3) อุปกรณ์ชนิดเปียก (Wet collectors หรือ Scrubber)
- 5.4) เครื่องแยกตะกอนแบบแรงหนีศูนย์กลาง (Centrifugal separator หรือ Dry centrifugal collector)

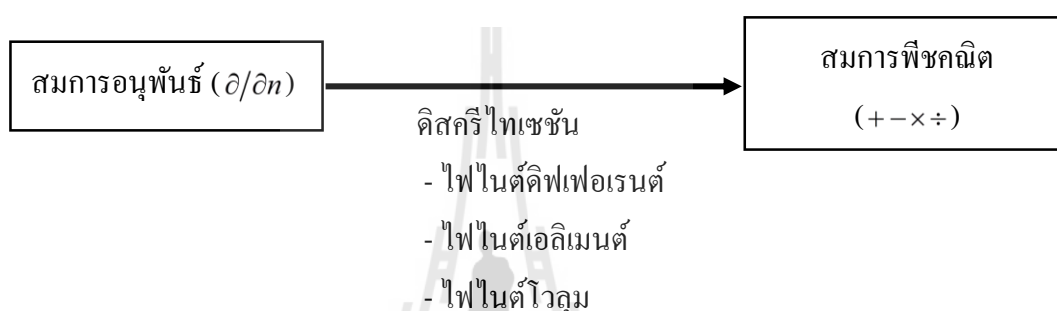
โดยทั่วไปอุปกรณ์ดักฝุ่นที่ใช้ในภาคอุตสาหกรรมจะใช้เครื่องเก็บอนุภาคแบบกรองเพื่อกำจัดอนุภาคที่เป็นของแข็งให้ออกจากอากาศโดยสกัดกันเอาอนุภาคของของแข็งไว้ที่ตัวกลางหรือตัวกรอง และอนุภาคนั้นจะทำหน้าที่ในการกรองอนุภาคอื่น ๆ ต่อไปจนกว่าจะเกิดการอุดตัน เมื่อเกิดการอุดตันที่ผิวของตัวกรองจะต้องทำการเปลี่ยนตัวกรองใหม่หรือทำความสะอาดที่ผิวของตัวกรองแล้วจึงนำกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวกรองที่นำมาใช้ แบ่งลักษณะของเครื่องกรองเป็น 2 แบบ คือ เครื่องกรองแบบใช้ผ้ากรอง เป็นเครื่องกรองที่ใช้วัสดุกรองที่ทำด้วยผ้า ได้แก่ ถูกรอง หรือบ้านถูกรอง และเครื่องกรองแบบชั้นสาร นอกจากนี้ยังมีเครื่องดักฝุ่นชนิดเครื่องกรองชนิดเครื่องเก็บอนุภาคแบบสกรับเบอร์ เครื่องแยกตะกอนแบบแรงหนีศูนย์กลาง และเครื่องตกตะกอนไฟฟ้าสถิต ซึ่งเป็นทางเลือกในการใช้ระบบการกำจัดฝุ่นที่เกิดจากกระบวนการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.6 พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ

พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเรียกว่า “ซีเอฟดี” คือการวิเคราะห์ปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลต่าง ๆ การถ่ายเทความร้อน การแพร่กระจายของอนุภาค รวมถึงการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ โดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วยหาผลเฉลยและจำลองพฤติกรรมที่เกิดขึ้น หรืออาจจะเรียกได้ว่า ซีเอฟดีคือวิธีเชิงตัวเลขสำหรับการไหล พื้นฐานของซีเอฟดีคือ สมการนาเวียร์-สโตกส์ มีการประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ปัญหาในภาคอุตสาหกรรมและงานวิจัยต่าง ๆ อาทิ การไหลของอากาศผ่านรถยนต์และอากาศยานเพื่อหาแรงยกและแรงต้าน การไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านลำเรือ การเผาไหม้ภายในกระบอกสูบและกังหันก๊าซ การไหลของของไหลผ่านปั๊มและเครื่องอัดไอ การหล่อเย็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ กระบวนการทางด้านเคมี การไหลและการถ่ายเทความร้อน(กิริติ สุกัญญ์)

2.6.1 กระบวนการซีเอฟดี

การสร้างสมการเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ของการไหลทำได้ไม่ยากนัก สิ่งที่ยากคือการแก้สมการหาผลเฉลยของปัญหาซึ่งมักมีรูปของสมการควบคุมในรูปของอนุพันธ์ โดยเฉพาะปัญหาการไหลที่มีสมการควบคุม (สมการนาเวียร์-สโตกส์) ในรูปสมการอนุพันธ์ย่อยแบบไม่เชิงเส้น การแก้สมการควบคุมการไหลโดยคอมพิวเตอร์จึงต้องอาศัยเทคนิคพิเศษเข้าช่วย เพื่อแปลงพจน์ในรูปแบบอนุพันธ์ ให้เป็นในรูปแบบพีชคณิตที่สามารถแก้ได้ด้วยคอมพิวเตอร์กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า ดิสครีไทเซชัน (Discretization)



รูปที่ 2.16 กระบวนการดิสครีไทเซชัน

ดิสครีไทเซชัน

กระบวนการดิสครีไทเซชันมีหลายวิธีแต่ที่นิยมนำมาประยุกต์แก้ปัญหาเชิงตัวเลขมี 3 วิธี ดังนี้

วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ เป็นวิธีเชิงตัวเลขในยุคแรกหาผลเฉลยของตัวแปรที่จุดต่อ ซึ่งถูกสร้างขึ้นกระจายบนเส้นกริดในโดเมน อาศัยการประมาณค่าบนพื้นฐานอนุกรมเทเลอร์แปลงสมการอนุพันธ์ให้เป็นสมการผลต่าง แล้วประยุกต์เข้าแต่ละจุดต่อสร้างเป็นระบบสมการใช้ได้กับปัญหารูปทรงที่ไม่ซับซ้อนมาก ปัจจุบันใช้เป็นพื้นฐานนำเข้าสู่ความเข้าใจวิธีเชิงตัวเลขเท่านั้น

วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ใช้หลักการแบ่งโดเมนปัญหาออกเป็นเอลิเมนต์ขนาดต่าง ๆ กัน จากนั้นสร้างสมการสำหรับแต่ละเอลิเมนต์โดยต้องสอดคล้องกับสมการควบคุมและเงื่อนไขขอบของปัญหานั้น แล้วทำการแก้ชุดสมการดังกล่าว จะได้ผลเฉลยโดยประมาณที่จุดต่อต่าง ๆ ความแม่นยำขึ้นกับจำนวนและรูปแบบของเอลิเมนต์ที่ใช้ ใช้กับปัญหาที่มีรูปทรงซับซ้อนได้ดี เหมาะกับปัญหาทางกลศาสตร์ของแข็งมากกว่าปัญหาทางกลศาสตร์ของไหล

วิธีไฟไนต์โวลูม เป็นวิธีที่ใช้หลักการแบ่งโดเมนออกเป็นปริมาตรควบคุมย่อย จากนั้นอินทิเกรตสมการควบคุมบนปริมาตรควบคุม แปลงสมการเชิงอนุพันธ์ให้เป็นสมการผลต่าง

และคำนวณหาผลเฉลยที่จุดต่อต่าง ๆ โดยใช้วิธีคำนวณซ้ำ การอินทิเกรตบนปริมาตรควบคุมเป็นหลักการที่ทำให้วิธีไฟไนต์โวลุ่มแตกต่างจากวิธีดิสครีไทเซชันแบบอื่น เป็นหลักพื้นฐานของความอนุรักษ์ปริมาณที่ไหลผ่านเข้าออกปริมาตรควบคุม จึงสอดคล้องกับกายภาพของการไหลเป็นอย่างดี ทำให้ทำความเข้าใจได้ง่าย ข้อดีของวิธีไฟไนต์โวลุ่มคือใช้ได้ผลดีกับการไหลทุกรูปแบบ ทั้งราบเรียบและปั่นป่วน จึงถูกนำไปใช้พัฒนาซอฟต์แวร์ทั่วไป

2.6.2 ขั้นตอนของซีเอฟดี

โปรแกรมซีเอฟดีที่พัฒนาขึ้นเองหรือซอฟต์แวร์ซีเอฟดีสำเร็จรูป มีการทำงานแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1) การประมวลผลก่อน (Pre-processor) ประกอบด้วยการกำหนดข้อมูลให้กับโปรแกรม ได้แก่ สร้างรูปทรงของโดเมนที่จะวิเคราะห์ สร้างกริดหรือปริมาตรควบคุมหรือเอลิเมนต์ การกำหนดค่าคุณสมบัติของการไหลเป็นต้น ความแม่นยำของผลเฉลยที่แก้ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างหนึ่งในปัจจัยหลักคือจำนวนจุดต่อที่ใช้ โดยทั่วไปจำนวนจุดต่อมากย่อมได้ความถูกต้องมากกว่าการใช้จำนวนจุดต่อน้อยแต่จำนวนจุดต่อมากย่อมใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เวลาประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ของที่ใช้ทั้งหมดถูกใช้ไปกับการเตรียมกริดที่เหมาะสมให้กับปัญหา ดังนั้นการป้อนข้อมูลให้กับกริดคำนวณเพื่อแก้ปัญหาต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของจำนวนจุดต่อที่ใช้เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องยอมรับได้ และใช้เวลาประมวลผลที่ไม่นานเกินไป

2) การประมวลผล (Processor) เป็นขั้นตอนการเลือกใช้รูปแบบดิสครีไทเซชันเพื่อสร้างสมการดิสครีไทส์ โดยปกติในซอฟต์แวร์ซีเอฟดีแต่ละแบบจะถูกพัฒนาบนกระบวนการดิสครีไทเซชันเพียงอันใดอันหนึ่ง ในขั้นตอนการประมวลผลนี้ผู้พัฒนาหรือผู้ใช้ซอฟต์แวร์จะต้องเลือกแบบแผนการประมาณค่าเชิงตัวเลขที่เหมาะสมให้กับกริดวิเคราะห์เพื่อให้ผลคำนวณที่ได้มีความแม่นยำและมีเสถียรภาพตามต้องการ

3) การประมวลผลหลัง (Post-processor) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการซีเอฟดี ขั้นตอนนี้รับค่าผลเฉลยจากขั้นตอนการคำนวณมาแสดงผลในรูปแบบของกราฟฟิกต่าง ๆ อาทิ รูปร่างของปัญหาและกริด กราฟเวกเตอร์ กราฟคอนทัวร์ กราฟพื้นผิว การเปลี่ยนตำแหน่ง อาทิ การเคลื่อนตัว การหมุน เป็นต้น

2.7 สมการควบคุมการไหล

สมการควบคุมการไหลล้วนถูกสร้างบนกฎมูลฐานของ 1) ความอนุรักษ์มวลที่ว่ามวลย่อมไม่เพิ่มขึ้นหรือสูญหายไปจากระบบ 2) ความอนุรักษ์โมเมนตัมที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมย่อมเท่ากับผลรวมของแรงทั้งหมดที่กระทำต่อปริมาตรควบคุมของการไหล ตามกฎข้อที่ 2 ของนิว

ตัน และ 3) ความอนุรักษ์พลังงานที่ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานย่อมเท่ากับผลรวมของอัตราความร้อนกับอัตราของงานที่กระทำกับปริมาตรควบคุมของการไหลตามกฎข้อที่ 1 ของเทอร์โมไดนามิกส์ ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องจึงประกอบด้วย

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (2.5)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

โมเมนตัมทิศทาง x

$$\frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + S_u \quad (2.6)$$

โมเมนตัมทิศทาง y

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + S_v \quad (2.7)$$

โมเมนตัมทิศทาง z

$$\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + S_w \quad (2.8)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น

p คือ ความดัน

μ คือ ความหนืด

u คือ ความเร็วในแนวแกน x

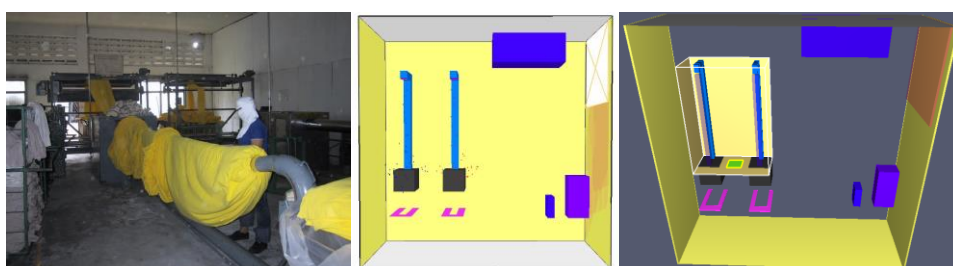
v คือ ความเร็วในแนวแกน y

w คือ ความเร็วในแนวแกน z

S_u , S_v และ S_w คือ เทอมแหล่งกำเนิด (Source term)

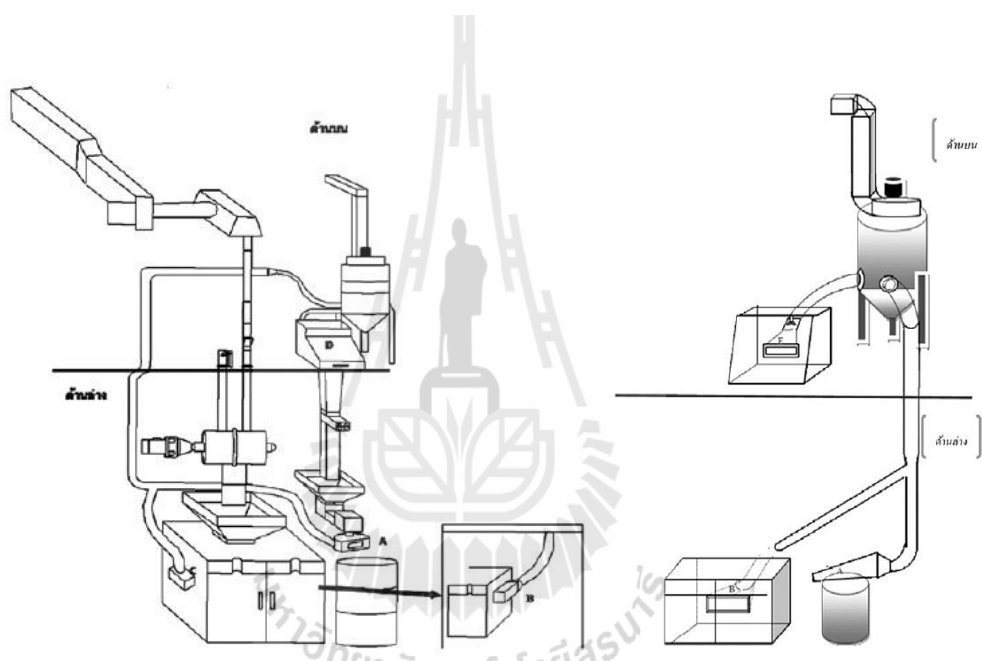
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สุทธิ พักเย็น(2551) ได้ทำการออกแบบระบบระบายอากาศเพื่อกำจัดฝุ่น : กรณีศึกษาการระบายอากาศสำหรับขั้นตอนการเตรียมผ้าของโรงงานฟอกย้อม โดยใช้โปรแกรม Fire dynamics Simulator และ Smokeview โดยการสร้างแบบจำลองห้องครอบเครื่องกลั่นผ้า และติดหัวดูดอากาศที่ตำแหน่งต่าง ๆ พบว่า การติดตั้งระบบระบายอากาศชนิดเอ็น โคลสเซอร์ ลักษณะหัวดูดแบบเปิดธรรมดาขนาด 1.0×1.0 m ที่ตำแหน่งผนังห้องครอบเครื่องกลั่นผ้าด้านบนบริเวณด้านท้ายเครื่อง ซึ่งถือเป็นตำแหน่งที่มีแนวโน้มการดูดจับอนุภาคฝุ่นผ้าที่ฟุ้งกระจายภายในห้องครอบเครื่องกลั่นผ้าได้มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยพิจารณาควบคุมค่าความเร็วยัดจับตามมาตรฐาน ACGIH เท่ากับ 2.5 m/s ใช้ค่าอัตราการไหลอากาศภายในห้องดูดอากาศเท่ากับ 8.75 m³/s พิจารณาควบคุมการทำงานของช่องเป่าลมในช่วงเวลาที่เครื่องกลั่นผ้าทำงานนาน 30 s (ค่าเวลาเฉลี่ยที่ใช้ลมเป่าในขั้นตอนการกลั่นผ้า) และพิจารณาควบคุมการทำงานของหัวดูดอากาศให้ทำงานตลอดช่วงระยะเวลาการประมวลผลโปรแกรม 500 s ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการออกแบบระบบระบายอากาศเฉพาะที่เพื่อการปรับปรุงพื้นที่ ณ ตำแหน่งติดตั้งหัวดูดอากาศที่ผนังห้องครอบเครื่องกลั่นผ้าด้านบนบริเวณด้านท้ายเครื่องพบว่า ระยะการติดตั้งระบบท่อ ณ ตำแหน่งดูดอากาศดังกล่าวต้องใช้ระยะท่อรวมทั้งระบบประมาณ 9 m ขนาดท่อในระบบที่ใช้เท่ากับ 75 cm ใช้ระบบกำจัดฝุ่นแบบถุงกรอง (Fabric filter) และต้องติดตั้งพัดลมเพื่อใช้ในระบบระบายอากาศเฉพาะที่ตามมาตรฐาน ACGIH เป็นแบบ Backward มีค่ากำลังขับของพัดลมที่ใช้ในระบบระบายอากาศเฉพาะที่จากการคำนวณเท่ากับ 26,179 W ทั้งนี้จากการพิจารณาเลือกพัดลมจากผู้ผลิต NICOTRA รุ่น RDZ 710 L พบว่าสามารถเลือกใช้กำลังขับพัดลมที่ 31.25 kW และมีระดับความดังของเสียงที่ 100 dB ซึ่งค่าการออกแบบดังกล่าวสามารถดูดจับอนุภาคฝุ่นผ้าที่ฟุ้งกระจายออกจากพื้นที่ทำงานได้ดีที่สุด และสิ้นเปลืองพลังงานน้อยกว่าการติดตั้งหัวดูดที่ตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากการติดตั้งระบบมีอุปกรณ์การติดตั้งไม่ซับซ้อน ทำให้ค่าความสูญเสียความดันรวมในระบบมีค่าน้อยส่งผลให้ค่ากำลังของพัดลมที่ใช้ในการขับมวลสารออกจากระบบมีค่าไม่สูงมาก ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการเดินระบบดังแสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แบบจำลองห้องกลั่นผ้าก่อนและหลังการปรับปรุงระบบระบายอากาศ

ศรัทธา และชวลิต(2552) ได้ทำการออกแบบระบบระบายอากาศในโรงงานผลิตสารเคมี กรณีศึกษาการระบายอากาศในห้อง PL-Z ซึ่งพบว่าระบบเดิมนั้นค่าความเร็วในการจับอนุภาคฝุ่นต่ำกว่าค่ามาตรฐาน ACGIH มาก จึงได้มีการออกแบบแนวท่อ และระบบใหม่ทั้งหมดพบว่าระบบระบายอากาศที่ออกแบบใหม่ต้องใช้พัดลมดูดอากาศขนาดกำลัง 4 แรงม้าความดันสถิต 7.086 in อัตราการไหล 1,353 ft^3/s เมื่อเทียบกับพัดลมดูดอากาศที่ใช้อยู่เดิมซึ่งมีค่า 7.37 แรงม้า ทำให้สามารถลดการใช้พลังงานลงได้ และยังจะทำให้ความเร็วหน้าหัวดูดอากาศและความเร็วในเส้นท่อเป็นไปตามค่ามาตรฐาน ACGIH ซึ่งจะส่งผลให้การระบายอากาศภายในห้อง PL-Z มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.18



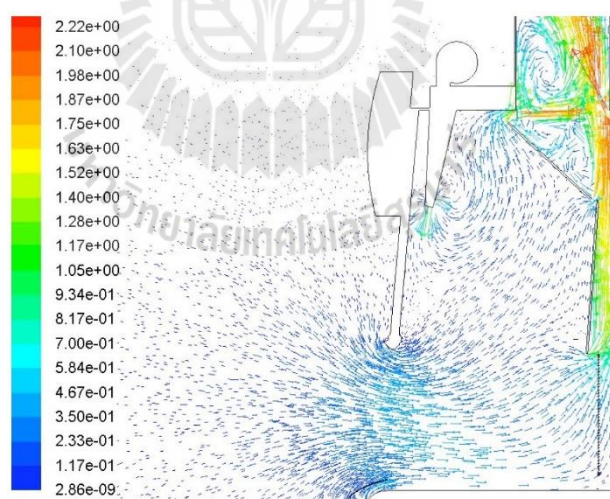
รูปที่ 2.18 ระบบระบายอากาศในห้อง PL-Z ก่อนและหลังการปรับปรุง

Chandra Manik และ Peh Jingpeng ได้ทำการศึกษาและออกแบบตู้ผสมสารเคมีที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี โดยออกแบบภายใต้สมมุติฐานของการไหลแบบราบเรียบ แบบอัดตัวไม่ได้ และความหนืดมีค่าคงที่ จุดประสงค์ของการออกแบบคือลดพลังงานที่ใช้ในการดูด เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนจากตู้เดิมที่ใช้ความเร็วลมด้านหน้าตู้ดูดเท่ากับ 0.5 m/s ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ด้านหน้าตู้ผสมสารเคมี

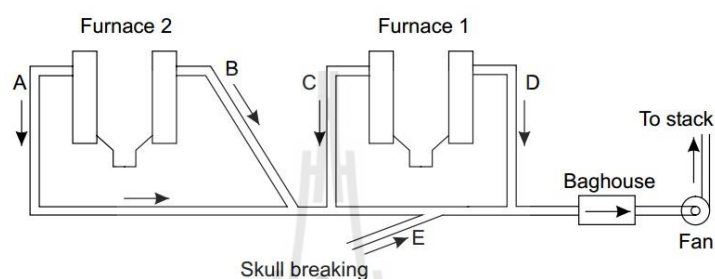
การออกแบบโดยการปรับรูปทรงขอบของช่องเปิดดังแสดงในรูปที่ 2.19 ให้มีลักษณะเป็นแพนอากาศและประมูม เพื่อให้อากาศไหลเข้าสู่ด้านในตู้ได้อย่างเป็นระเบียบลดการไหลวนของอากาศภายในตู้ การจำลองการไหลของอากาศนั้นใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ และผลการจำลองการไหลของอากาศเป็นดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ผลการจำลองการไหลของตู้ผสมสารเคมี

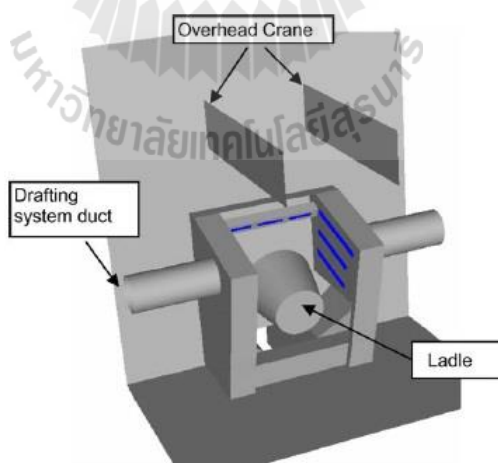
จากตู้ผสมสารเคมีที่ออกแบบใหม่พบว่า ตู้ที่ออกแบบมีประสิทธิภาพในการดูดที่ดีขึ้นและใช้ความเร็วในการดูดที่หน้าหน้าตู้ลดลงคือเท่ากับ 0.3 m/s นั่นคือมีการใช้พลังงานที่น้อยลงและเป็นการลดต้นทุนการผสมสารเคมีอีกด้วย

P.J. Witt, C.B. Solnordal, L.J. Mittoni, S. Finn และ J. Pluta ได้ศึกษาและปรับปรุงประสิทธิภาพเครื่องดูดควันที่เกิดจากการเชื่อมโลหะ โดยใช้การคำนวณทางวิศวกรรมและการจำลองด้วยโปรแกรมพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) โดยในระหว่างการเชื่อมโลหะนั้นจะมีควันเกิดขึ้น ซึ่งจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ที่ปฏิบัติงานและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม รูปแบบการวางท่อดูดควันดังแสดงในรูปที่ 2.21 เป็นการวางท่อดูดควันสำหรับดูดควันจากการเชื่อมโลหะจาก Furnace 1 และ Furnace 2



รูปที่ 2.21 การวางท่อดูดควันสำหรับการเชื่อม

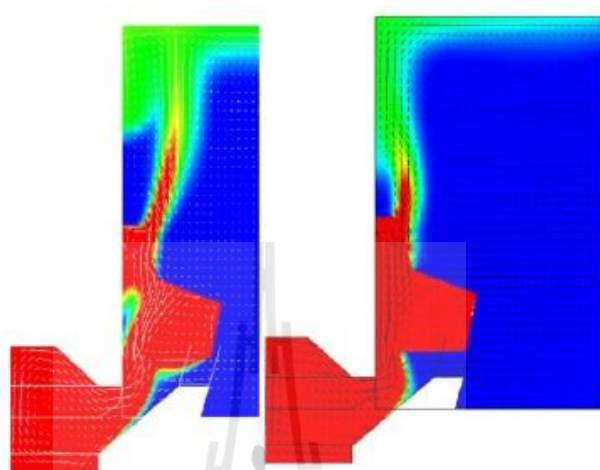
ระบบระบายอากาศแบบที่ใช้ในปัจจุบันดังแสดงในรูปที่ 2.22



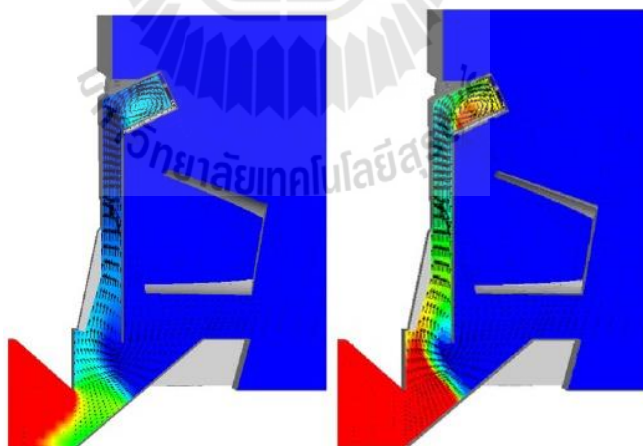
รูปที่ 2.22 ระบบระบายอากาศแบบที่ใช้ในปัจจุบัน 3 มิติ

จำลองการไหลเพื่อศึกษาปัญหาของระบบระบายอากาศที่ใช้ในปัจจุบัน โดยใช้การจำลองแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-ε และใช้วิธีการแก้ปัญหาแบบ SIMPLE ได้ผลการจำลองของระบบ

เดิมดังแดงในรูปที่ 2.23 ซึ่งปัญหาที่พบคือไม่สามารถดูดควันที่เกิดขึ้นออกได้หมดทำให้เกิดการ
ลอยออกสู่ภายนอก จึงได้มีการออกแบบช่องทางดูดอากาศใหม่ และเพิ่มแผ่นกันเพื่อให้อากาศไหล
เข้าสู่ช่องดูดได้ดีขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.23 ความเร็วของควันที่เกิดจากการเชื่อมโลหะที่อัตราการใช้ต่ำ (ซ้าย) และ
อัตราการใช้สูง (ขวา) ก่อนการปรับปรุง



รูปที่ 2.24 ความเร็วของควันที่เกิดจากการเชื่อมโลหะที่อัตราการใช้ต่ำ (ซ้าย) และ
อัตราการใช้สูง (ขวา) หลังการปรับปรุง

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 บทนำ

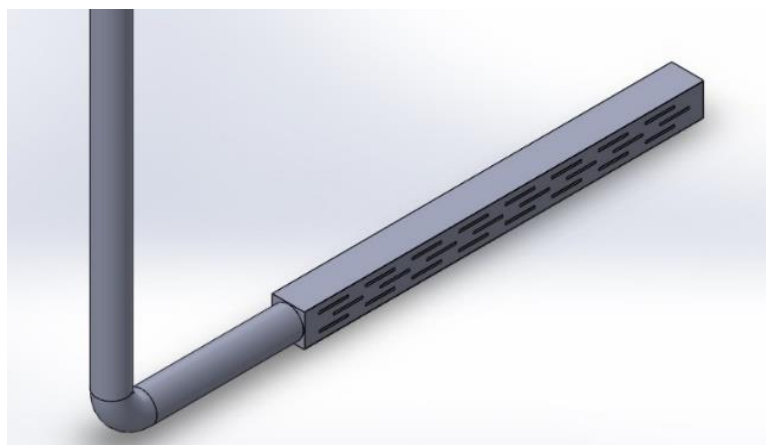
ขั้นตอนการดำเนินงานประกอบไปด้วยเนื้อหา 2 ส่วนหลักคือ การจำลองเชิงตัวเลขและการทดลอง โดยการจำลองเชิงตัวเลขมีวัตถุประสงค์เพื่อ ออกแบบหัวดูดอากาศให้มีประสิทธิภาพในการระบายอากาศได้ดีที่สุดใช้การจำลองด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกเป็นการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศของหัวดูดอากาศแบบดั้งเดิมที่มีการใช้งานอยู่ เพื่อให้ทราบข้อเสียและนำไปสู่การออกแบบหัวดูดอากาศในขั้นตอนต่อไป ในการจำลองพฤติกรรมการไหลใช้แบบจำลอง 3 แบบ คือ จำลองการไหลแบบราบเรียบ จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k- ϵ (Standard wall function) และแบบจำลอง k- ω SST เพื่อเป็นการหาการจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบหัวดูดอากาศ ส่วนการทดลองถูกทำขึ้นเพื่อใช้เทียบสอบข้อมูลกับผลจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานส่วนต่าง ๆ แสดงหัวข้อต่อไปนี้

3.2 จำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศของหัวดูดอากาศแบบเดิม

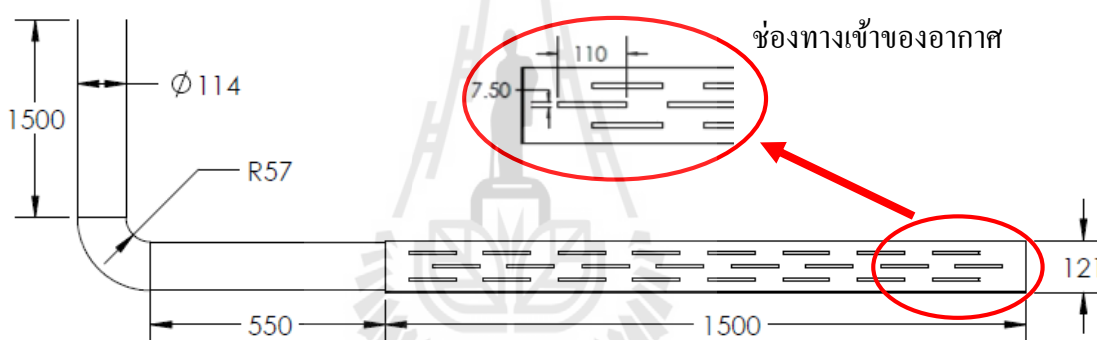
จำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศของหัวดูดอากาศที่ใช้ในการระบายอากาศในกระบวนการชุบโลหะในปัจจุบัน เพื่อให้ทราบถึงปัญหาที่เกิดขึ้นนำผลการจำลองที่ได้มาวิเคราะห์ข้อเสียของหัวดูดอากาศแบบเดิม เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบหัวดูดอากาศที่มีประสิทธิภาพมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การสร้างแบบจำลอง

ทำการสร้างแบบจำลองของหัวดูดอากาศโดยใช้โปรแกรม Solid Works 2014 ประกอบไปด้วย หัวดูดอากาศ ท่อที่ต่อจากหัวดูดอากาศเข้ากับพัดลม ถึงขั้วโลหะ ระดับน้ำยาชุบ และโดเมนของอากาศรอบ ๆ หัวดูดอากาศ หัวดูดอากาศที่ใช้ในกระบวนการชุบส่วนใหญ่เป็นหัวดูดแบบสล็อตดังแสดงในรูปที่ 3.1 หน้าที่หลักคือทำให้อากาศเคลื่อนที่เข้าและกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบ ซึ่งลักษณะของสล็อต (ช่องทางเข้าของอากาศ) เป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดดังรูปที่ 3.2 (หน่วยเป็น mm)

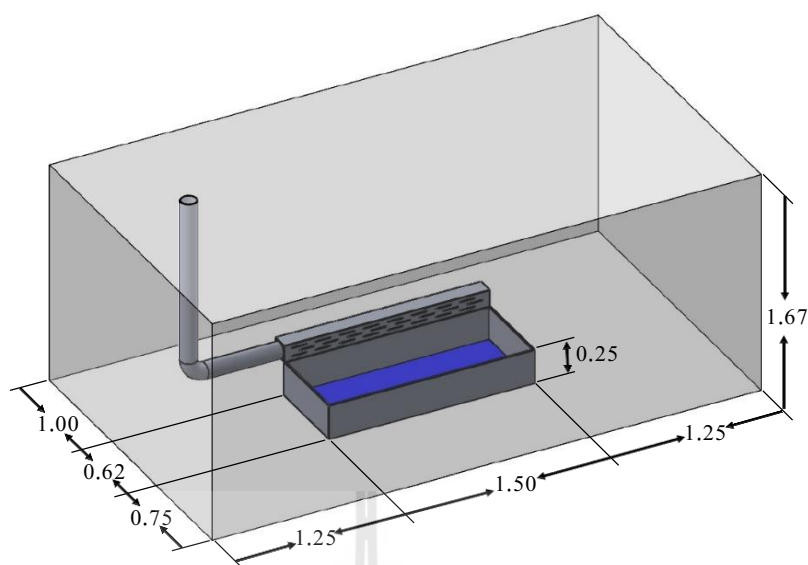


รูปที่ 3.1 แบบจำลองหัวดูดอากาศแบบเดิม 3 เมตร



รูปที่ 3.2 ขนาดของช่องทางเข้าของอากาศของหัวดูดอากาศแบบเดิม

จากนั้นสร้างโดเมนของอากาศรอบหัวดูดอากาศและถังชุบโลหะ จากการศึกษารูปร่างของถังชุบโลหะพบว่า ถังชุบโลหะมีอยู่หลายขนาดขึ้นอยู่กับขนาดของชิ้นงานที่นำมาชุบ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้ถังชุบโลหะขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ $0.620 \times 1.500 \times 1.000$ m ในการชุบโลหะจะเติมน้ำยาชุบโลหะลงในถังปริมาณเท่ากับ 3 ส่วน 4 ของถัง ดังนั้นในการสร้างแบบจำลองของถังชุบโลหะนั้นจะสร้างเฉพาะส่วนที่ไม่มีน้ำยาชุบโลหะอยู่ คือ 1 ส่วน 4 ของถัง หรือสูง 0.025 m วัดจากขอบทางด้านบน และกำหนดขนาดของโดเมนของอากาศดังนี้ ด้านหน้าห่างจากหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.750 m ด้านข้างทั้งสองด้านห่างจากหัวดูดอากาศเท่ากับ 1.250 m และด้านหลังห่างจากหัวดูดอากาศเท่ากับ 1.000 m ดังแสดงในรูปที่ 3.3



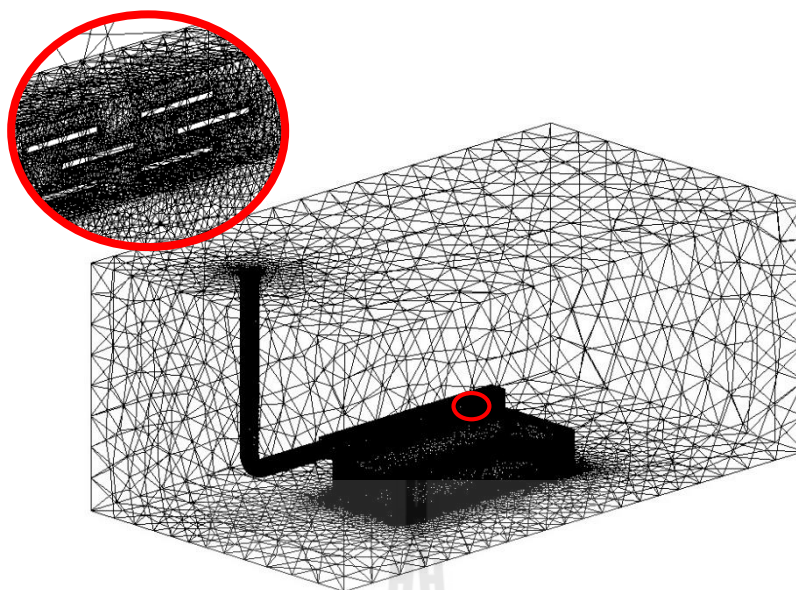
รูปที่ 3.3 แบบจำลองสำหรับจำลองการไหลของอากาศของหัวดูดอากาศแบบเดิม

3.2.2 การจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศ

ในการจำลองพฤติกรรมการไหลด้วยคอมพิวเตอร์นั้นจำลองโดยใช้โปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 ซึ่งจะเริ่มจากการสร้างแบบจำลองของหัวดูดอากาศ และ โดเมนของอากาศ จากนั้นจะถูกนำไปสร้างกริดตามกระบวนการทางไฟไนต์โวลุ่ม พร้อมทั้งกำหนดค่าเงื่อนไขขอบสำหรับการจำลองการไหลของอากาศ

1) การสร้างกริด

ทำการสร้างกริดด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 เนื่องจากบริเวณช่องทางเข้าของอากาศนั้นมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วค่อนข้างสูง เพื่อให้มีความเหมาะสมในการคำนวณ และเพื่อให้ได้ผลเฉลยที่ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น จึงได้กำหนดให้กริดบริเวณดังกล่าวมีความละเอียดสูงกว่าบริเวณอื่น และทำการทดสอบความเป็นอิสระของกริดเพื่อหาจำนวนของเซลล์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจำลองพฤติกรรมการไหล โดยการเพิ่มจำนวนของเซลล์ขึ้นเรื่อย ๆ แล้วนำกริดที่ได้ไปจำลองพฤติกรรมการไหลด้วยคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำผลของความเร็วที่ได้จากการจำลองมาเปรียบเทียบกันเพื่อเลือกชุดกริดที่เหมาะสมที่สุดที่จะใช้ในการจำลอง ซึ่งต้องมีผลเฉลยที่ถูกต้องยอมรับได้และมีจำนวนเซลล์ที่น้อยที่สุด การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ใช้กริดแบบพีระมิดทรงสี่หน้า (Tetrahedral) เนื่องจากกริดชนิดนี้สามารถสร้างเข้ากับรูปทรงของโดเมนที่ซับซ้อนได้ง่ายดังแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การสร้างกริด

จากการทดสอบความเป็นอิสระของกริด ทำให้ได้กริดที่ใช้ในการจำลองมีจำนวนเซลล์เท่ากับ 1,200,000 เอลิเมนต์ 228,805 โหนด มีค่าอัตราส่วนแอสเปก (Aspect ratio) ที่น้อยที่สุดเท่ากับ 1.159 และค่าสูงสุดเท่ากับ 46.926 โดยกำหนดขนาดของเซลล์ที่เล็กที่สุดที่ช่องทางเข้าของอากาศเท่ากับ 3 mm ขนาดเซลล์ที่เล็กที่สุดที่หัวคูดอากาศและถังบูโหลเท่ากับ 10 mm

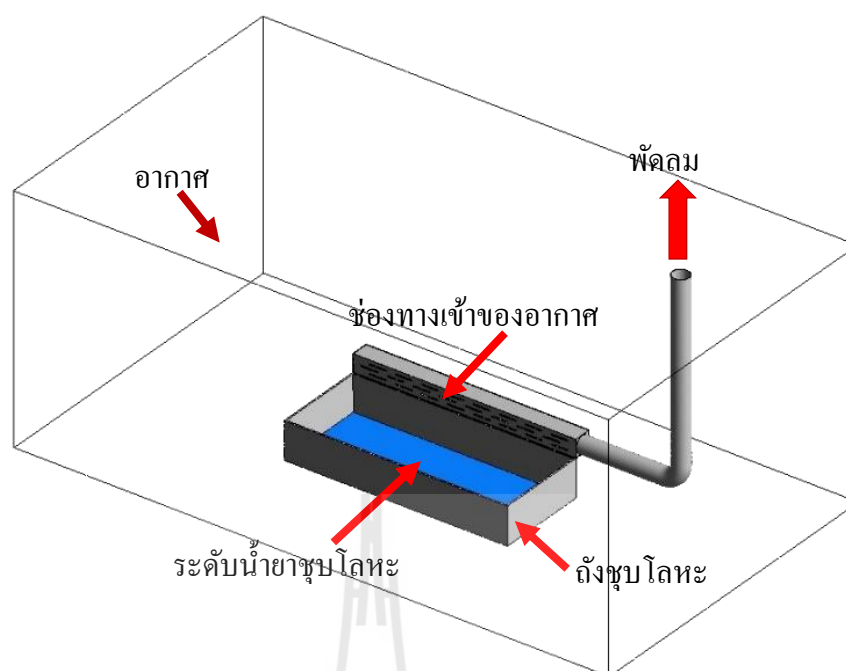
2) การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ

กำหนดค่าเงื่อนไขขอบสำหรับจำลองการไหลดังแสดงในตารางที่ 3.1 และ

รูปที่ 3.5

ตารางที่ 3.1 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ

โดเมนอากาศ	Pressure inlet = 0 Pa
โดเมนของวัตถุ	
- ผิวด้านหน้าของหัวคูด	Wall (No slip)
- ถังบูโหล	Wall (No slip)
- ผิวน้ำยาบูโหล	Wall (No slip)
- ปลายท่อคูด	Velocity inlet (-40m/s)
- ผิวด้านข้างของท่อ	Wall (No slip)



รูปที่ 3.5 การกำหนดค่าเงื่อนไขขอบ

สมบัติของอากาศ

อุณหภูมิ

30 °C

ความหนาแน่น

1.156 kg/m³

ความหนืด

1.868 kg/m·s

3) จำลองพฤติกรรมการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 การศึกษาใช้การจำลองการไหล 3 แบบ คือ จำลองการไหลแบบราบเรียบ จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-ε (Standard wall function) และแบบจำลอง k-ω SST เพื่อเป็นการหาการจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบหัวดูดอากาศ

3.1) จำลองการไหลแบบราบเรียบ

การจำลองการไหลแบบราบเรียบกำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ การจำลองแบบไม่ขึ้นกับเวลา ใช้วิธีการแก้ปัญหาคู่สมการความดันและความเร็วแบบขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) ใช้วิธีประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบวิธีผลต่างต้นลม (Upwind differencing scheme) กำหนดอันดับความแม่นยำเท่ากับ 2 ค่า Under-Relaxation factors สำหรับความดันเท่ากับ 0.3, สำหรับความหนาแน่นเท่ากับ 1, แรงเท่ากับ 1 โมเมนต์เท่ากับ 0.7 และกำหนดค่าเริ่มต้นของทุกตัวแปร (u, v, w, p) เท่ากับ 0

ตารางที่ 3.2 การกำหนดค่าของการจำลองแบบปั่นป่วน

k-ε (Standard wall function)	k-ω SST
ค่าคงที่แบบจำลอง - $C_\mu = 0.09$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1$ Under-Relaxation factors - Pressure = 0.3 - Density = 1 - Body forces = 1 - Momentum = 0.7 - Turbulent kinetic energy = 0.8 กำหนดค่าเริ่มต้น - Gauge pressure = 0 Pa - X Velocity = 0 m/s - Y Velocity = 0 m/s - Y Velocity = 0 m/s - Turbulent kinetic energy = 1 - Turbulent dissipation rate = 1	ค่าคงที่แบบจำลอง - $\alpha_\infty^* = 1$, $\alpha_\infty = 0.52$, $\beta_\infty^* = 0.09$, $\xi_\infty^* = 1.5$ Under-Relaxation factors - Pressure = 0.3 - Density = 1 - Body forces = 1 - Momentum = 0.7 - Turbulent kinetic energy = 0.8 กำหนดค่าเริ่มต้น - Gauge pressure = 0 Pa - X Velocity = 0 m/s - Y Velocity = 0 m/s - Y Velocity = 0 m/s - Turbulent kinetic energy = 1 - Turbulent dissipation rate = 1

3.2) จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-ε (Standard wall function)

การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-ε กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ $C_\mu = 0.09$, $C_{1\epsilon} = 1.44$, $C_{2\epsilon} = 1.92$, $\sigma_k = 1$ การจำลองแบบคงตัว ใช้วิธีการแก้ปัญหาลูกผสมระหว่างความดันและความเร็วแบบขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) ใช้วิธีประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบวิธีผลต่างด้านลม (Upwind differencing scheme) กำหนดอันดับความแม่นยำเท่ากับ 2 ค่า Under-Relaxation factors สำหรับความดันเท่ากับ 0.3, สำหรับความหนาแน่นเท่ากับ 1, แรงเท่ากับ 1 โมเมนตัมเท่ากับ 0.7 Turbulent kinetic energy เท่ากับ 0.8 และกำหนดค่าเริ่มต้นของทุกตัวแปร (u, v, w, p) เท่ากับ 0 Turbulent kinetic energy เท่ากับ 1 และ Turbulent dissipation rate เท่ากับ 1 สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบของพัดลม กำหนดความเร็วเท่ากับ 40 m/s และอากาศ กำหนดค่า Intensity and length scale Turbulent intensity เท่ากับ 1 และ Turbulent length scale เท่ากับ 0.1

3.3) จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-ω SST

การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k-ω SST กำหนดค่าต่าง ๆ ดังนี้ $\alpha_\infty^* = 1$, $\alpha_\infty = 0.52$, $\beta_\infty^* = 0.09$, $\xi_\infty^* = 1.5$ การจำลองแบบคงตัว ใช้วิธีการแก้ปัญหาลูกผสมระหว่างความดันและความเร็วแบบขั้นตอนวิธี SIMPLE (Semi-Implicit Pressure Linked Equation) ใช้วิธีประมาณค่าเชิงตัวเลขแบบวิธีผลต่างด้านลม (Upwind differencing scheme) กำหนด

อันดับความแม่นยำเท่ากับ 2 ค่า Under-Relaxation factors สำหรับความดันเท่ากับ 0.3, สำหรับความหนาแน่นเท่ากับ 1, แรงเท่ากับ 1 โมเมนต์เท่ากับ 0.7 Turbulent kinetic energy เท่ากับ 0.8 และกำหนดค่าเริ่มต้นของทุกตัวแปร (u, v, w, p) เท่ากับ 0 Turbulent kinetic energy เท่ากับ 1 และ Turbulent dissipation rate เท่ากับ 1 สำหรับการกำหนดเงื่อนไขขอบของพัดลม กำหนดความเร็วเท่ากับ 40 m/s และอากาศ กำหนดค่า Intensity and length scale Turbulent intensity เท่ากับ 1 และ Turbulent length scale เท่ากับ 0.1

3.3 การออกแบบหัวดูดอากาศ

การออกแบบหัวดูดอากาศเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการระบายอากาศได้ดีขึ้น โดยการออกแบบจะกำหนดให้พื้นที่ช่องทางเข้าของอากาศที่เท่ากับหัวดูดอากาศแบบเดิมคือ เท่ากับ 0.0198 m^2 ออกแบบหัวดูดอากาศโดยการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศที่เข้าสู่หัวดูดและพิจารณาความเร็วของอากาศที่เข้าสู่หัวดูดตามมาตรฐานของการระบายอากาศในโรงงาน ซึ่งในการออกแบบนั้นได้มีการคำนวณค่าของอัตราการไหลของอากาศ และเลือกใช้ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการออกแบบตามมาตรฐานของการออกแบบหัวดูดอากาศ ACGIH

คำนวณอัตราการไหลและความเร็วของอากาศจากสมการ
สำหรับหัวดูดอากาศแบบตั้งบนขอบหรือพื้น

$$Q = V(5X^2 + A) \quad (3.1)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลของอากาศ (m^3/s)

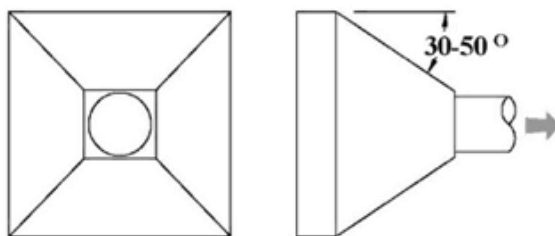
V คือ ความเร็วอากาศที่แนวกึ่งกลางหัวดูดอากาศ ณ จุด X (m/s)

X คือ ระยะตามแนวแกนของหัวดูดอากาศ (m)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของหัวดูดอากาศ (m^2)

หัวดูดอากาศแบบเดิมเป็นแบบสล็อต คือมีอัตราส่วนความยาวต่อความสูง (W/L) น้อยกว่า 0.2 ประกอบด้วยช่องดูดอากาศแคบ ๆ และพลี้นุ่ม ความยาวของหัวดูดตั้งแต่หน้าไปจนถึงส่วนที่ต่อเข้ากับท่อ ซึ่งควรยาวที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้หน้าที่หลักคือ ทำให้อากาศเคลื่อนที่เข้าและกระจายตัวอย่างเป็นระเบียบ

แทปเปอร์ คือ ส่วนที่ต่อหัวดูดเข้ากับท่อทำให้อากาศกระจายตัวสม่ำเสมอ และลดการสูญเสียก่อนเข้าสู่ท่อดังแสดงในรูปที่ 3.6

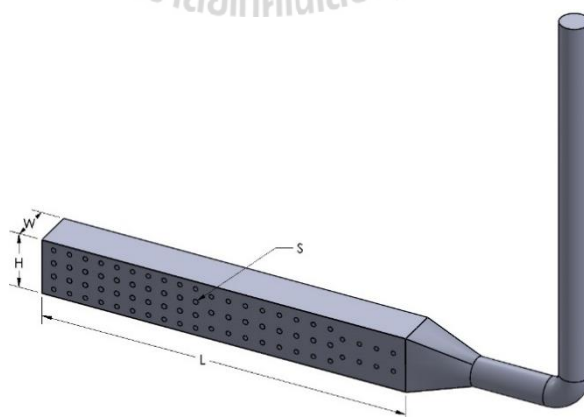


รูปที่ 3.6 การกระจายอากาศโดยใช้แทปเปอร์

ในการออกแบบได้ปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ และพิจารณาความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูด เพื่อให้ได้ขนาดของหัวดูด และการเจาะช่องทางเข้าของอากาศที่ให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศสูงสุด มีการปรับค่าดังนี้

- 1) รูปแบบการจัดวาง รูปทรงและขนาดช่องทางเข้าของอากาศ
- 2) ปรับขนาดความสูงของหัวดูดเท่ากับ 1.5D, 2.0D และ 2.5D
- 3) ปรับขนาดความกว้างของหัวดูดอากาศ 1.0D, 1.5D และ 2.0D

ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 พารามิเตอร์ในการออกแบบหัวดูดอากาศ

- เมื่อ H คือ ความสูงของหัวคู่อากาศ
 L คือ ความยาวของหัวคู่อากาศ
 W คือ ความกว้างของหัวคู่อากาศ
 S คือ ช่องทางเข้าของอากาศ
 D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อเท่ากับ 0.114 m

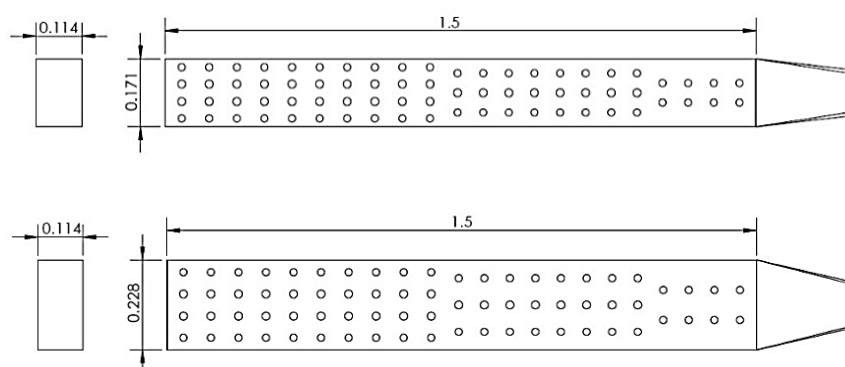
มีขั้นตอนการออกแบบหัวคู่อากาศดังนี้

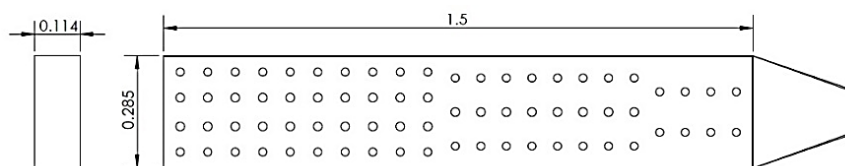
1) การรูปแบบการจัดวาง รูปทรงและขนาดช่องทางเข้าของ

การหา รูปแบบการจัดวางหรือตำแหน่งของช่องทางเข้าของอากาศนั้น ในเบื้องต้นจะให้รูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศเป็นวงกลมและหาตำแหน่งและรูปแบบของการจัดวางช่องทางเข้าของอากาศที่ทำให้ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคู่นั้นสม่ำเสมอตลอดความยาวของหัวคู่อากาศ โดยใช้หัวคู่อากาศขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m และใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ เมื่อได้รูปแบบการจัดวางและขนาดของช่องทางเข้าของอากาศแล้วจะนำไปสู่การออกแบบเพื่อหาขนาดความกว้างและความสูงของหัวคู่อากาศที่เหมาะสมต่อไป

2) ออกแบบขนาดความสูงของหัวคู่อากาศ

กำหนดให้ขนาดความกว้างและความยาวของหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.114 m และ 1.500 m ตามลำดับ ปรับขนาดความสูงของหัวคู่อากาศเป็น 1.5, 2.0 และ 2.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (0.114 m) จะได้หัวคู่อากาศทั้งหมด 3 ขนาด (กว้าง×ยาว×สูง) คือ ขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m, ขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m และขนาด ขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.285$ m ดังแสดงในรูปที่ 3.8





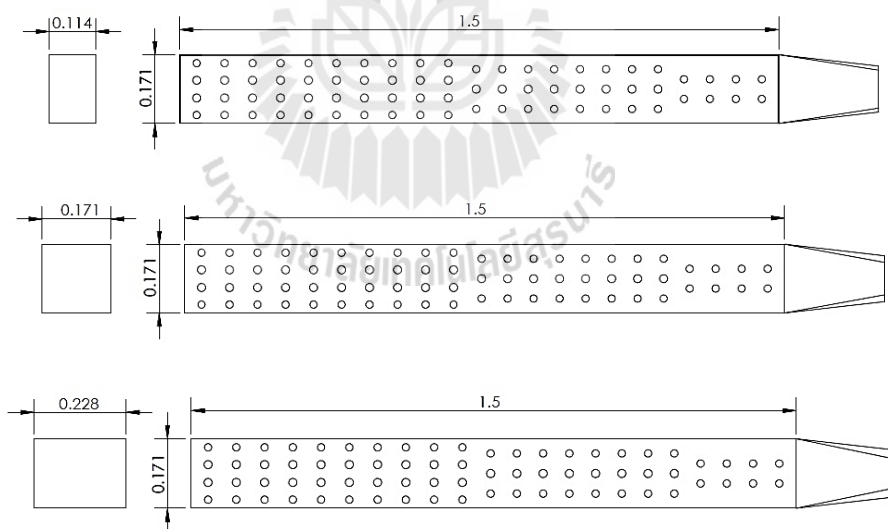
รูปที่ 3.8 ลักษณะของหัวดูดที่ออกแบบขนาดความสูง (บน) หัวดูดอากาศขนาด

$0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m, (กลาง) ขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m และ

(ล่าง) ขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.285$ m

3) ออกแบบขนาดความกว้างของหัวดูดอากาศ

กำหนดให้ขนาดความสูงและความยาวของหัวดูดเท่ากับ 0.171 m และ 1.500 m ตามลำดับ ปรับขนาดความกว้างของหัวดูดเป็น 1.0, 1.5 และ 2.0 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (0.114 m) จะได้หัวดูดทั้งหมด 3 ขนาด (กว้าง $\times$ ยาว $\times$ สูง) คือ ขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m, ขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.171$ m และขนาด ขนาด $0.228 \times 1.500 \times 0.171$ m ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ลักษณะของหัวดูดที่ออกแบบขนาดความกว้าง (บน) หัวดูดอากาศ

$0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m, (กลาง) ขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.171$ m และ

(ล่าง) ขนาด $0.228 \times 1.500 \times 0.171$ m

4) จำลองพฤติกรรมการไหลด้วยโปรแกรม ANSYS FLUENT 14.0 ในการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศใช้การจำลอง 3 แบบคือ จำลองการไหลแบบราบเรียบ จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k- ϵ (Standard wall function) และแบบจำลอง k- ω SST เพื่อเป็นการหารูปแบบการจำลองที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการออกแบบหัวดูดอากาศ ซึ่งการกำหนดค่าต่าง ๆ ในการจำลองนั้นกำหนดเช่นเดียวกับการจำลองหัวดูดอากาศแบบดั้งเดิม

3.4 การสร้างชุดทดลอง

การสร้างชุดทดลองหัวดูดอากาศเพื่อทำการวัดค่าความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดแล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ เป็นการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบหัวดูดอากาศด้วยการจำลองการไหลและหารูปแบบการจำลองการไหลที่เหมาะสมกับการออกแบบหัวดูดอากาศ

3.4.1 สร้างชุดทดลองหัวดูดอากาศและถัง

สำหรับชุดทดลอง สร้างหัวดูดอากาศทั้งหมด 3 ขนาด คือ (กว้าง×ยาว×สูง)

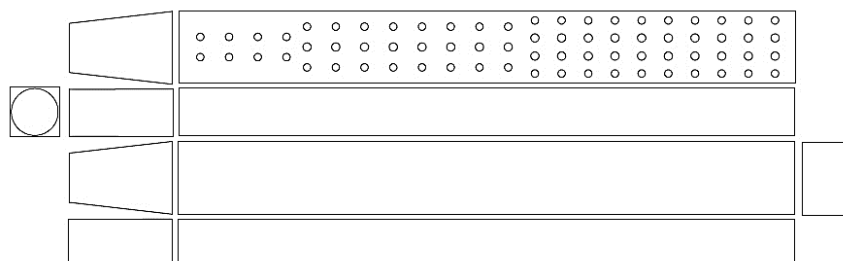
0.114×1.500×0.171 m, 0.114×1.500×0.228 m, 0.171×1.500×0.228 m

1) วัสดุอุปกรณ์สำหรับสร้างหัวดูดอากาศ

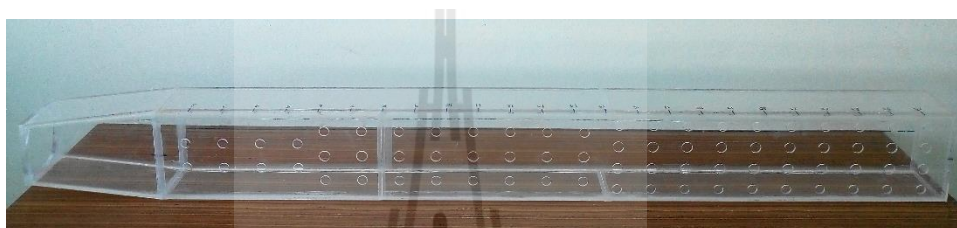
- 1.1) อะคริลิกแผ่นหนา 4 mm
- 1.2) น้ำยาประสานอะคริลิกไร้คราบ ACRYLIC MATE
- 1.3) ซิลิโคนใส
- 1.4) ปืนยิงซิลิโคน
- 1.5) พู่กันสำหรับทาน้ำยาประสานอะคริลิก

2) วิธีการสร้างชุดทดลองหัวดูดอากาศ

เขียนแบบหัวดูดอากาศด้วยโปรแกรม AutoCAD โดยแต่ละชุดทดลองจะมีทั้งหมด 10 แผ่น ตามขนาดของหัวดูดอากาศดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.10 และนำอะคริลิกแผ่นไปตัดด้วยเลเซอร์เพื่อความแม่นยำในการตัด จากนั้นนำแต่ละแผ่นมาประกอบกันโดยใช้น้ำยาประสานอะคริลิกเป็นตัวเชื่อมแต่ละแผ่นเข้าด้วยกัน และใช้ซิลิโคนยาแนวตามรอยต่อเพื่อความแข็งแรงและป้องกันการรั่วไหลของอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างแบบหัวดูดอากาศที่นำไปตัดด้วยเลเซอร์



รูปที่ 3.11 ชุดทดลองหัวดูดอากาศ

3) วัสดุอุปกรณ์สำหรับสร้างถัง

3.1) ฟิวเจอร์บอร์ด

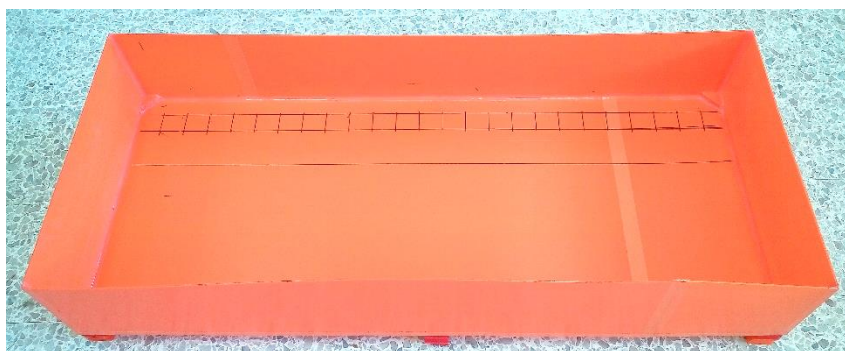
3.2) แล็กชีน

3.3) ซิลิโคนใส

3.4) ปืนยิงซิลิโคน

4) วิธีการสร้างชุดทดลองถังขบโลหะ

ตัดฟิวเจอร์บอร์ดตามขนาดดังนี้ (กว้าง×ยาว) 0.620×1.500 m จำนวน 1 แผ่น ขนาด 0.250×1.500 m จำนวน 2 แผ่น และขนาด 0.250×0.620 m จำนวน 2 แผ่น นำมาประกอบกันโดยใช้ แล็กชีนยึดแต่ละแผ่นเข้าด้วยกัน แล้วใช้ซิลิโคนยาแนวตามรอยต่อเพื่อความแข็งแรงและป้องกันการรั่วไหลของอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ชุดทดลองถังชุบโลหะ

3.5 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลอง

3.5.1 พัดลมดูดอากาศ

พัดลมที่ใช้ในการทดลองเป็นแบบใบพัดโค้งไปข้างหน้าในทิศทางเดียวกับการหมุนของชุดใบพัด จะมีจำนวนแผ่นใบพัดประมาณ 64 ใบ ชุดใบพัดจะมีลักษณะคล้ายกับกรงกระรอก (Squirrel Cage) ดังแสดงในรูปที่ 3.13 เพลาใบพัดมีขนาดเล็กหมุนด้วยความเร็วรอบที่สูง กำลังมอเตอร์ 2 แรงม้า ใช้กับแรงดันไฟฟ้า 220 V, กระแสไฟฟ้า 9.3 A ความถี่ 50 Hz และความเร็วรอบเท่ากับ 1,450 r/min ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 3.2 ความเร็วอากาศที่ช่องอากาศเข้าเท่ากับ 26.31 m/s



รูปที่ 3.13 พัดลมดูดอากาศ

ตารางที่ 3.3 ข้อมูลมอเตอร์

ENGINEER INDUCTION MOTOR CAPACITOR START AND RUN SINGLE PHASE INDUCTION MOTOR			
2 HP		4 POLE	TYPE PMC-SA
Hz	50	60	FRAME 100L
V	220	220	RATING CONT
A	9.3	8.8	INS CLASS B
r/min	1450	1740	AMB TEMP 40°C
JIS C 4004 JP 22 JC 0			BEARING 6206ZZ 6205ZZ
CAP RUN 21.5 μ F CAP ST 150 μ F			SERIAL 000279

3.5.2 เครื่องมือวัดความเร็วอากาศ

เครื่องมือวัดความเร็วอากาศที่ใช้ในการทดลอง คือ เครื่อง Testo 435 เครื่องมือวัดชนิดหลายพารามิเตอร์ (Multi-Function) โพรบ (Probe) ที่ใช้ในการวัดเป็นแบบ Hotwire ดังแสดงในรูปที่ 3.14 มีช่วงการวัดตั้งแต่ 0 ถึง 20 m/s ดังแสดงในตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.14 เครื่องมือวัดชนิดหลายพารามิเตอร์ Testo 435 และ Hotwire probe

ตารางที่ 3.4 ช่วงการวัดและค่าความถูกต้องของเครื่องมือวัดชนิดหลายพารามิเตอร์

พารามิเตอร์	ช่วงการวัด	ค่าความถูกต้อง
อุณหภูมิ	NTC : -40 ถึง +150 °C TC type K : -200 ถึง +1370 °C	$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (-25 ถึง + 74.9 °C) $\pm 0.5\%$ of reading
ความชื้นสัมพัทธ์	0 ถึง 100 %RH	$\pm 2\text{ \%RH}$ (-2 ถึง 98 %RH)
ความเร็วลม	Hotwire probe : 0 ถึง 20 m/s Vane probe : 0 ถึง 40 m/s	$\pm 0.03\text{ m/s} + 5\%$ of reading
แรงดันอากาศสัมบูรณ์	0 ถึง +2,000 hPa	$\pm 5\text{ hPa}$
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์	0 ถึง 10,000 ppm	$\pm 50\text{ ppm} + 2\%$ of reading

3.5.3 ขั้นตอนการติดตั้งชุดทดลอง

- 1) การติดตั้งหัวคู่อากาศเข้ากับพัดลมคู่อากาศดังแสดงในรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 การติดตั้งหัวคู่อากาศ

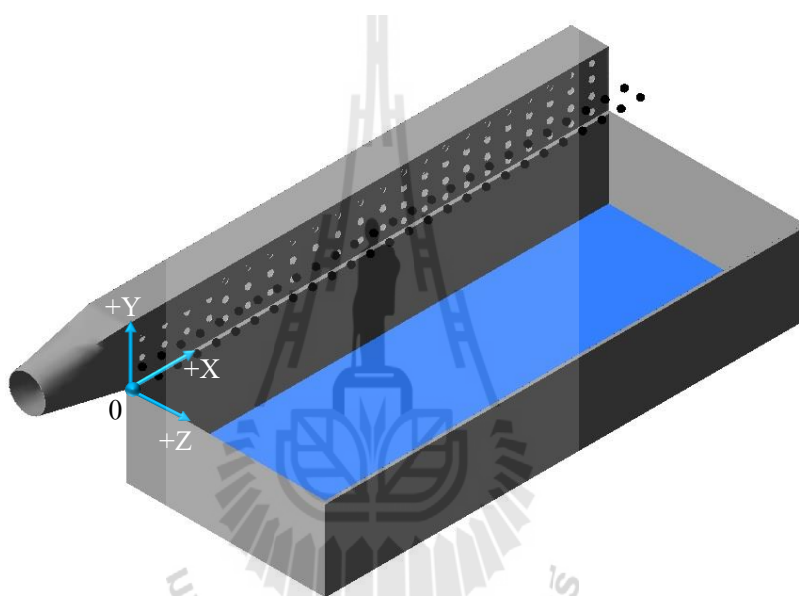
- 2) การติดตั้งถังชุดทดลองถึงชุดโลหะด้านหน้าหัวคู่อากาศ ดังแสดงในรูปที่ 3.16



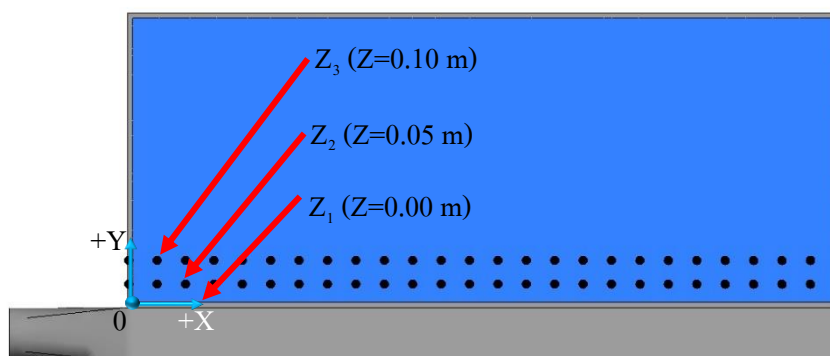
รูปที่ 3.16 การติดตั้งถังชุดทดลอง

3.5.4 การวัดความเร็วอากาศ

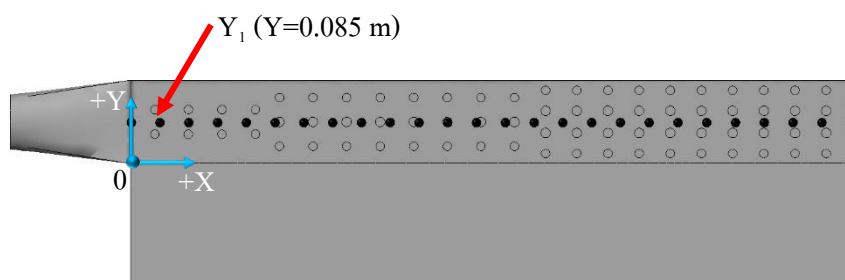
จากการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์และการทดลอง ข้อมูลที่สนใจคือ ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศ โดยวัดค่าความเร็วอากาศที่ระยะห่างจากขอบถึงด้านบนในแนวแกน Y เท่ากับ 0.0855 m, ที่ระดับน้ำยาสูบ และระยะห่างจากด้านบนของหัวคู่อากาศ เท่ากับ 0.100 m และระยะห่างจากด้านหน้าหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.050 m และ 0.100 m ตามลำดับ โดยวัดค่าในแต่ละระยะ 26 จุดดังแสดงในรูปที่ 3.17 ถึง 3.19 และที่ด้านหน้าช่องทางเข้าของอากาศแต่ละช่อง นำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.17 ตำแหน่งในการวัดค่าความเร็วอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศ 3 มิติ

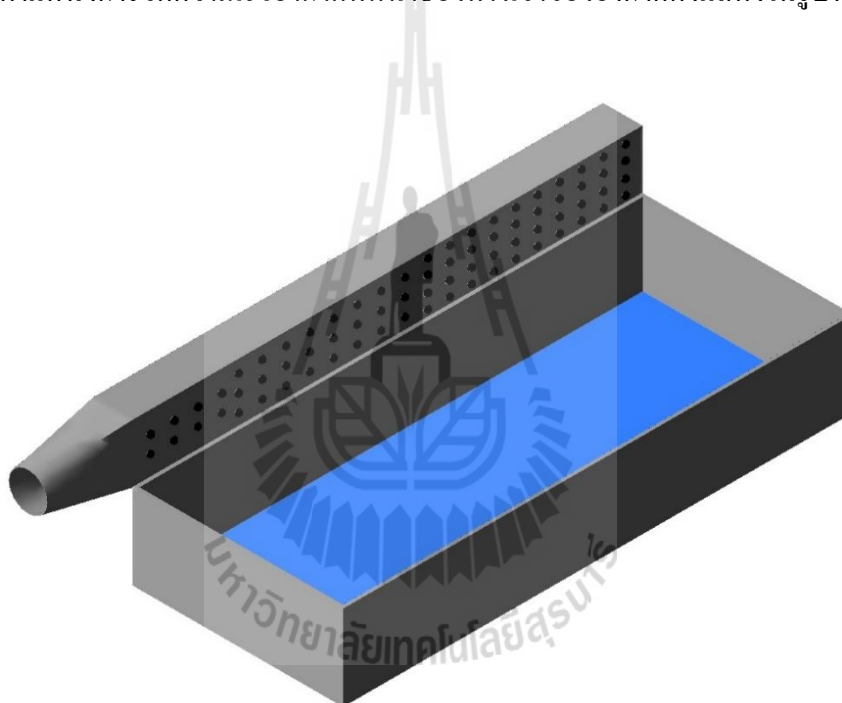


รูปที่ 3.18 ตำแหน่งในการวัดค่าความเร็วอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศ (มุมมองด้านบน)



รูปที่ 3.19 ตำแหน่งในการวัดค่าความเร็วอากาศด้านหน้าหัวคูดอากาศ (มุมมองด้านหน้า)

ตำแหน่งการวัดความเร็วอากาศที่หน้าช่องทางเข้าของอากาศดังแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 ตำแหน่งในการวัดค่าความเร็วอากาศด้านหน้าช่องทางเข้าของอากาศ (Z_1)

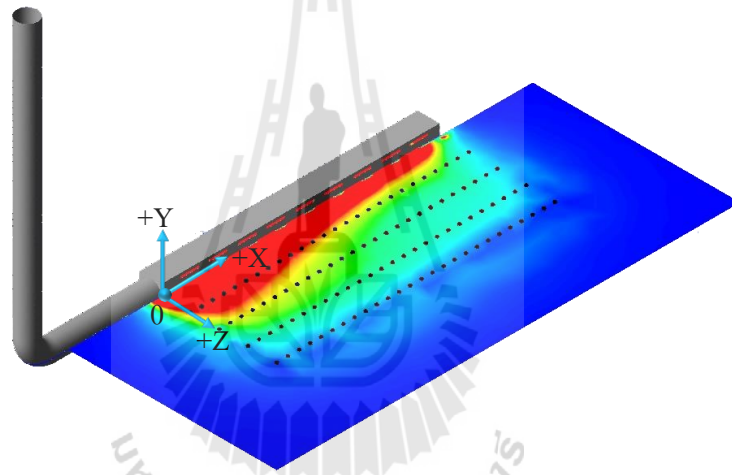
วัดความเร็วของอากาศในแนวแกน X และแนวแกน Y เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสามารถวัดความเร็วได้ครั้งละ 1 แกนและทิศทางในการวัดต้องขนานกับแกนนั้น ๆ การวัดในแนวแกน Y จึงทำได้ยากทำให้เกิดความผิดพลาดสูง การวัดค่าจะวัดตามตำแหน่งที่แสดงในรูปที่ 3.17 ถึง 3.20 วัดตำแหน่งละ 2 ครั้งแล้วหาค่าความเร็วเฉลี่ย

บทที่ 4

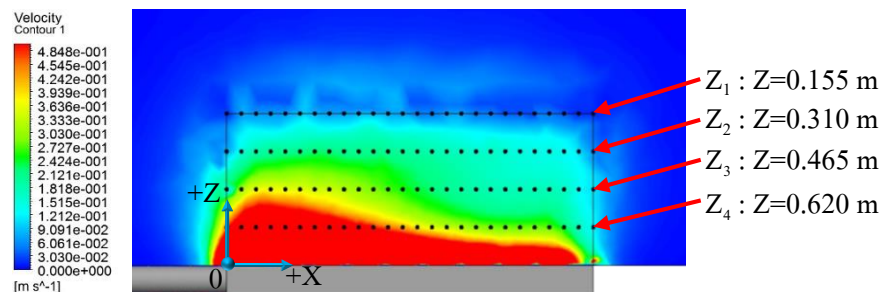
ผลการวิจัยและการวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศแบบเดิม

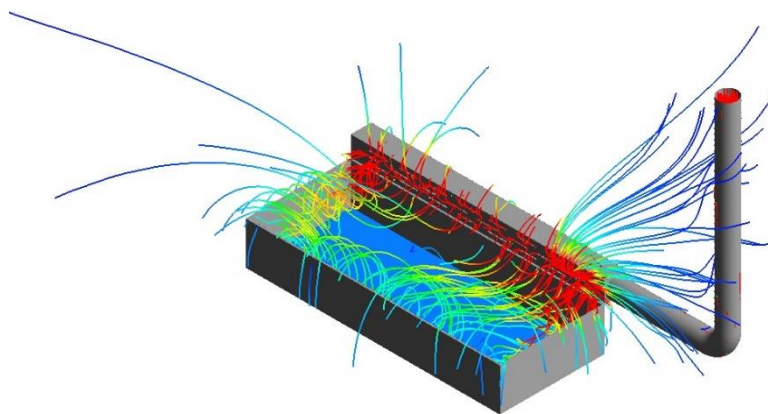
จากการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศและนำค่าความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดที่ระนาบกึ่งกลางของหัวดูด ($Y = 0.085$ m) มาแสดงได้ผลดังแสดงเป็นคอนทัวร์ของความเร็วจึงเส้นการไหลของการได้ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ถึง 4.3



รูปที่ 4.1 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศแบบเดิม 3 มิติ

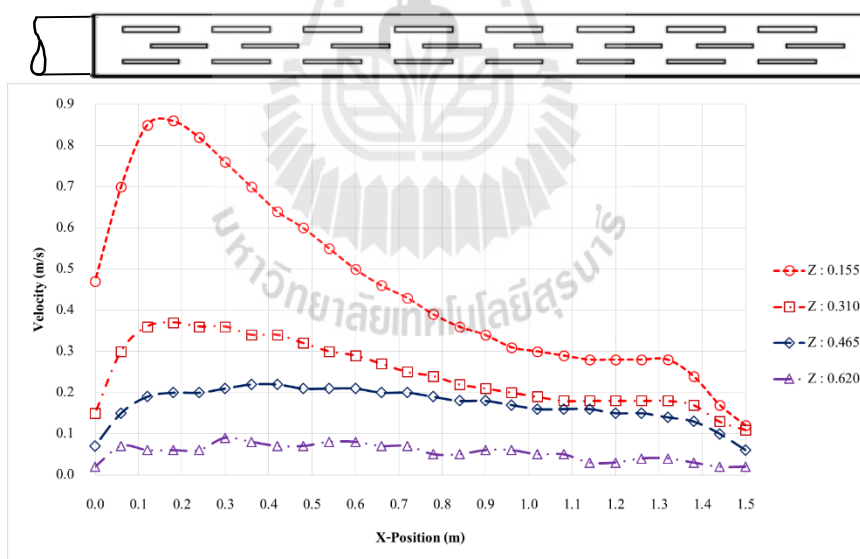


รูปที่ 4.2 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศแบบเดิม



รูปที่ 4.3 เส้นการไหลของอากาศของหัวดูดอากาศแบบเดิม

เมื่อนำค่าความเร็ว ที่ระยะห่างจากขอบถึงซูปโลหะในแนวแกน $Y = 0.0605 \text{ m}$ และที่ระยะห่างจากด้านหน้าหัวดูดอากาศที่ระยะต่าง ๆ บนระนาบดังกล่าวมาแสดงเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลความเร็วอากาศของหัวดูดอากาศแบบเดิม

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศที่ระนาบดังกล่าวนี้จะมีค่าสูงที่สุดที่ตำแหน่งด้านที่ต่อกับท่อ ($X = 0 \text{ m}$) และจะมีค่าลดลงจนถึงปลายของหัวดูดอากาศซึ่งเป็นตำแหน่งที่ความเร็วของอากาศต่ำที่สุด เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศที่ระยะห่างต่าง ๆ มา

เปรียบเทียบกับค่าความเร็วยี่ดจับ (0.5 m/s) พบว่าความเร็วลมในการดูดสารปนเปื้อนนั้นยังต่ำกว่าค่าความเร็วยี่ดจับ

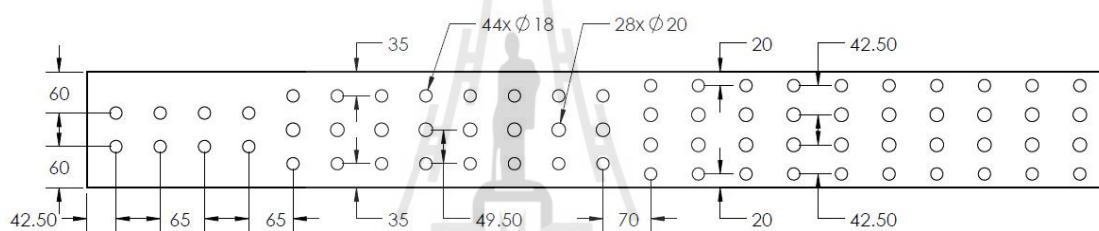
จากผลของความเร็วที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมการไหลทำให้ทราบว่าปัญหาของหัวดูดอากาศที่ใช้ในปัจจุบันนั้นคือ ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศไม่สม่ำเสมอตลอดความยาวของหัวดูดกล่าวคือความเร็วของอากาศมีความแตกต่างกันมากที่ระยะเริ่มต้นและปลายของหัวดูดอากาศ ทำให้ไม่สามารถระบายอากาศได้ตามมาตรฐานที่กำหนดไว้ ส่งผลให้ไม่สามารถดูดสารปนเปื้อนที่เกิดจากกระบวนการชุบโลหะออกจากพื้นที่ทำงานได้ดีเท่าที่ควร ทำให้เกิดสารปนเปื้อนตกค้างสะสมในอากาศ เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าวจึงได้การออกแบบหัวดูดอากาศให้สามารถระบายได้ดีขึ้น ผลการออกแบบจะแสดงในหัวข้อต่อไป



4.2 ผลการออกแบบหัวคู่อากาศ

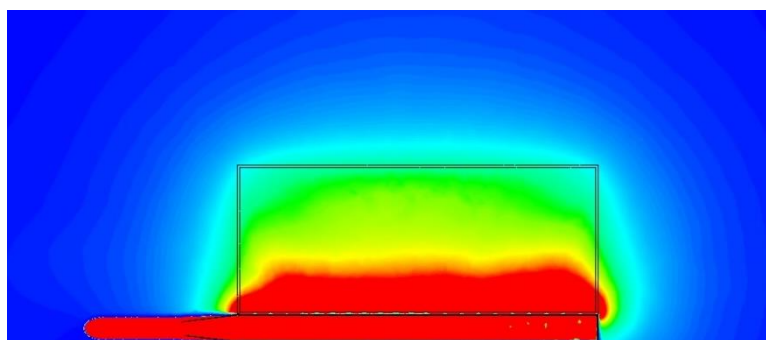
4.2.1 ผลออกแบบตำแหน่งช่องทางเข้าของอากาศ

การออกแบบช่องทางเข้าของอากาศนั้นจะใช้การจำลองพฤติกรรมการไหลและปรับตำแหน่งและขนาดของช่องทางเข้าของอากาศไปเรื่อย ๆ ในเบื้องต้นของการออกแบบตำแหน่งของช่องทางเข้าของอากาศนั้นจะกำหนดให้รูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศเป็นวงกลมเพื่อให้ง่ายในการสร้างแบบจำลองและกำหนดพื้นที่ทางเข้าของอากาศเท่ากับ 0.0198 m^2 ขนาดของหัวคู่อากาศ (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ $0.114 \times 1.500 \times 0.171 \text{ m}$ ใช้แบบจำลองการไหลแบบราบเรียบ เนื่องจากหัวคู่อากาศที่ต่อกับท่อมีแรงดูดที่สูงและลดลงเรื่อย ๆ จนถึงปลายของหัวคู่อากาศ ดังนั้นจึงกำหนดให้พื้นที่ทางเข้าของอากาศเป็นแบบกระจายคือ ด้านที่ต่อกับท่อพื้นที่จะน้อยและเพิ่มขึ้นตามความยาวของหัวคู่อากาศ ผลการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ขนาดและตำแหน่งของช่องทางเข้าของอากาศ

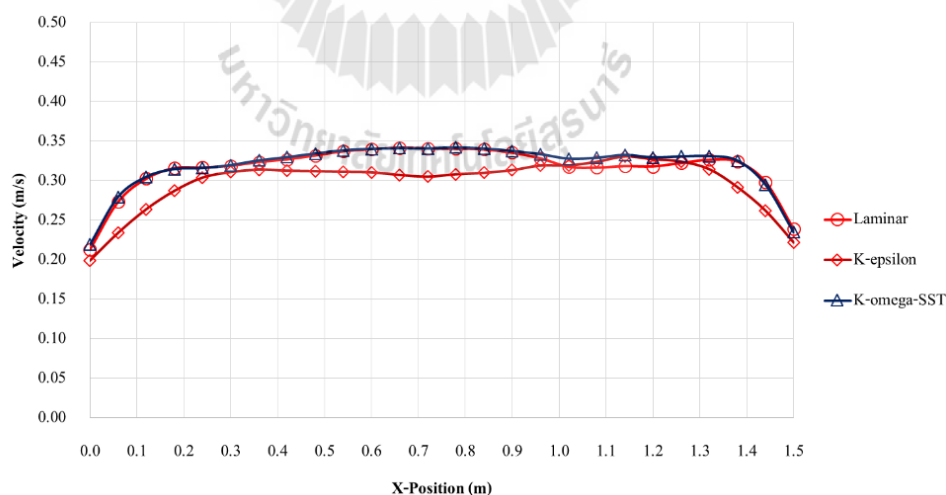
จากรูปที่ 4.5 ขนาดและตำแหน่งของช่องทางเข้าของอากาศที่ได้จะทำให้ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศมีความสม่ำเสมอตลอดความยาวของหัวคู่อากาศดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 คอนทัวร์ความเร็วอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศ

4.2.2 ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองการไหล

ในการจำลองพฤติกรรมการไหลเพื่อออกแบบหัวดูดอากาศนั้นใช้การจำลองการไหลทั้งหมด 3 แบบคือ การจำลองการไหลแบบราบเรียบ การไหลแบบปั่นป่วนโดยใช้แบบจำลอง k- ϵ และแบบจำลอง k- ω SST เพื่อเป็นการหารูปแบบการจำลองที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบหัวดูดอากาศ โดยกำหนดขนาดของหัวดูดอากาศ (กว้าง×ยาว×สูง) เท่ากับ $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m เช่นเดียวกับการออกแบบช่องทางเข้าของอากาศ เมื่อนำผลของความเร็วที่หน้าหัวดูดอากาศบนระนาบ XZ ที่ระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ 0.0855 m และระยะห่างจากด้านหน้าหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.310 m หรือระยะกึ่งกลางถึงหุบโลหะ ของการจำลองการไหลทั้ง 3 แบบมาเปรียบเทียบกันพบว่า ผลของความเร็วของการไหลแบบราบเรียบกับผลที่ได้จากการจำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k- ω SST นั้นให้ผลที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากผลที่ได้จากการจำลองด้วยแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- ϵ ดังแสดงในรูปที่ 4.7 เนื่องจากตำแหน่งของความเร็วของอากาศที่สนใจนั้นคือความเร็วด้านหน้าหัวดูดอากาศ ซึ่งเป็นการไหลภายนอกมีความเร็วต่ำทำให้การไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ การใช้การจำลองการไหลแบบราบเรียบกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- ω SST นั้นสามารถจับพฤติกรรมการไหลได้ดีกว่าการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- ϵ ดังนั้นจึงเลือกใช้การจำลองการไหลแบบราบเรียบในการออกแบบหัวดูดอากาศ

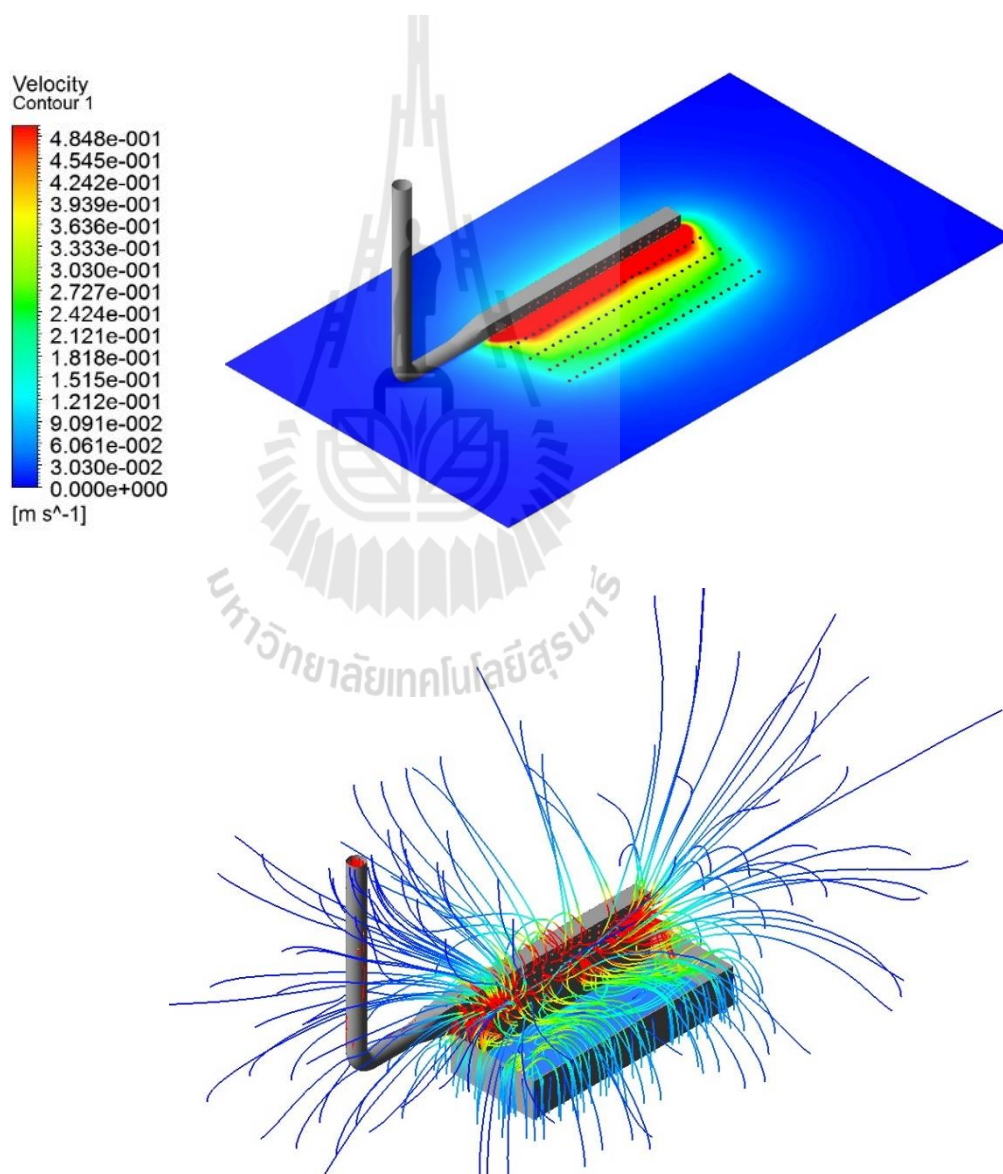


รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบแบบจำลองการไหล

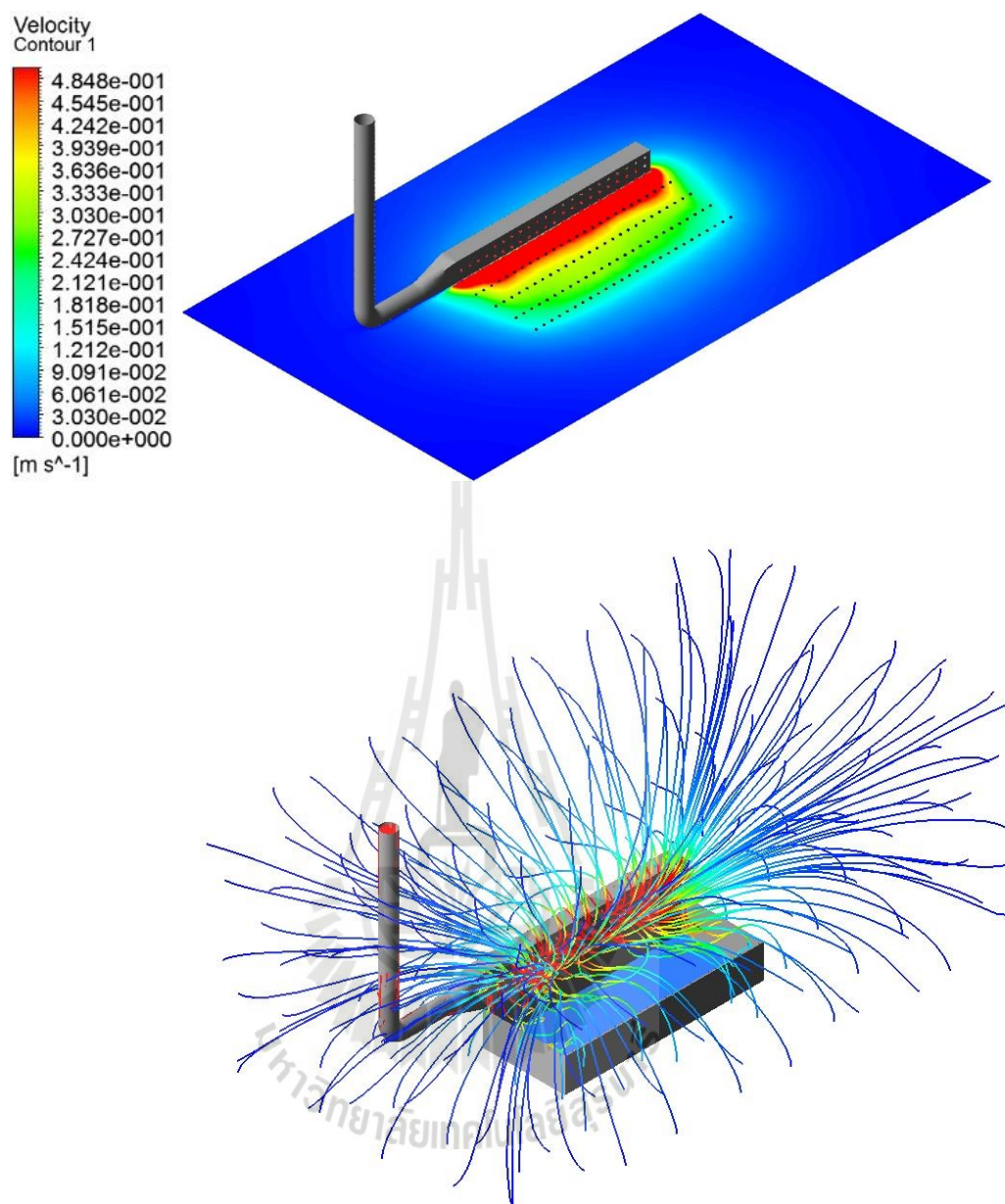
4.2.3 ผลการปรับความสูงของหัวดูดอากาศ

กรณีศึกษาปรับความสูงของหัวดูดอากาศเท่ากับ 1.5, 2.0 และ 2.5 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และกำหนดความกว้างของหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.114 m เท่ากันทุกโมเดล จากนั้นนำค่าความเร็วในแต่ละระยะมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาขนาดความสูงของหัวดูดอากาศที่ให้ประสิทธิภาพในการระบายอากาศได้ดีที่สุด

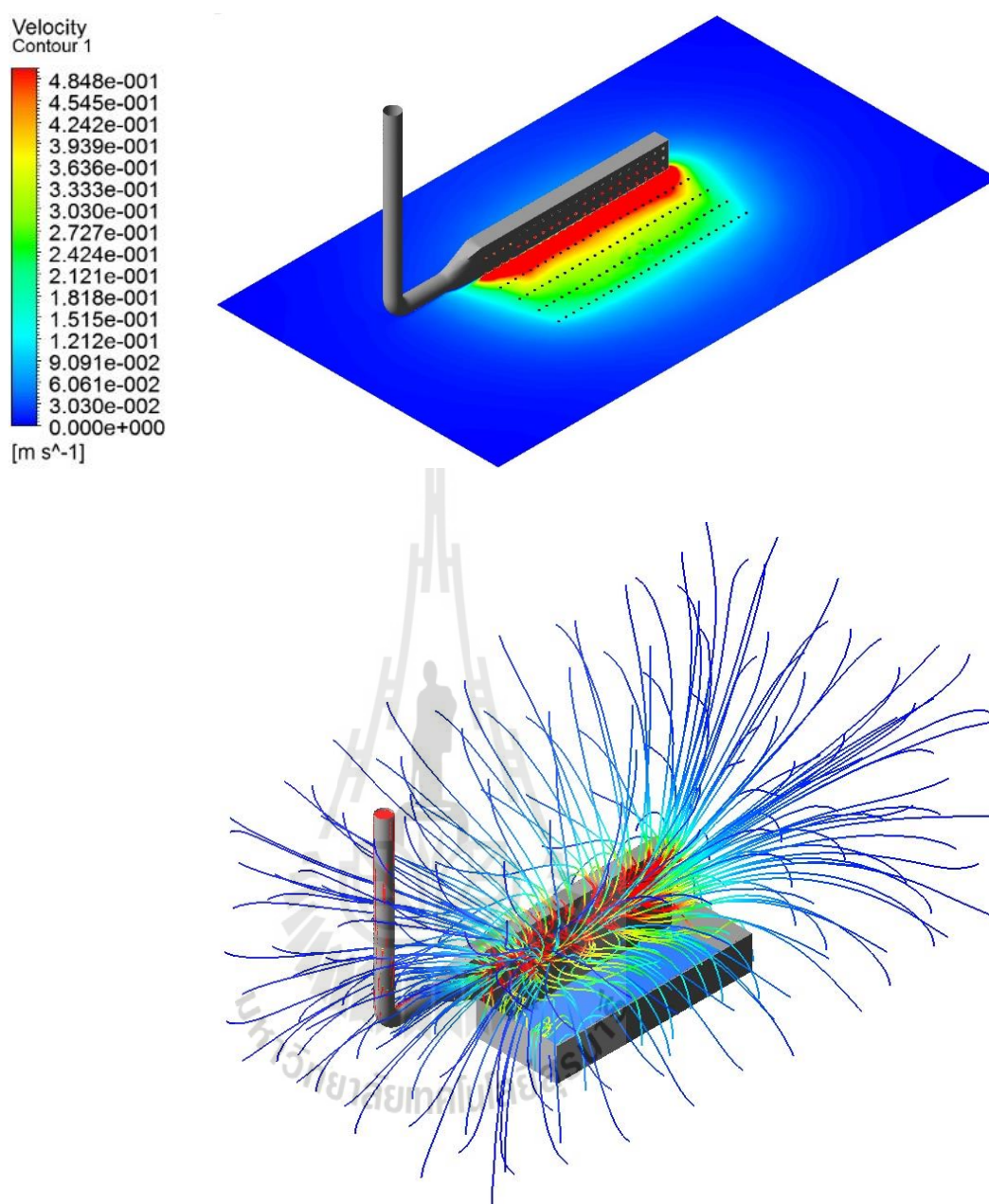
1) ความเร็วของอากาศบนระนาบ XZ ระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน y เท่ากับ 0.0855 m สำหรับหัวดูดอากาศที่มีความสูงขนาดต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 4.8 ความสูง 0.171 m, รูปที่ 4.9 ความสูง 0.228 m และรูปที่ 4.10 ความสูง 0.285 m



รูปที่ 4.8 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความสูง 0.171 m

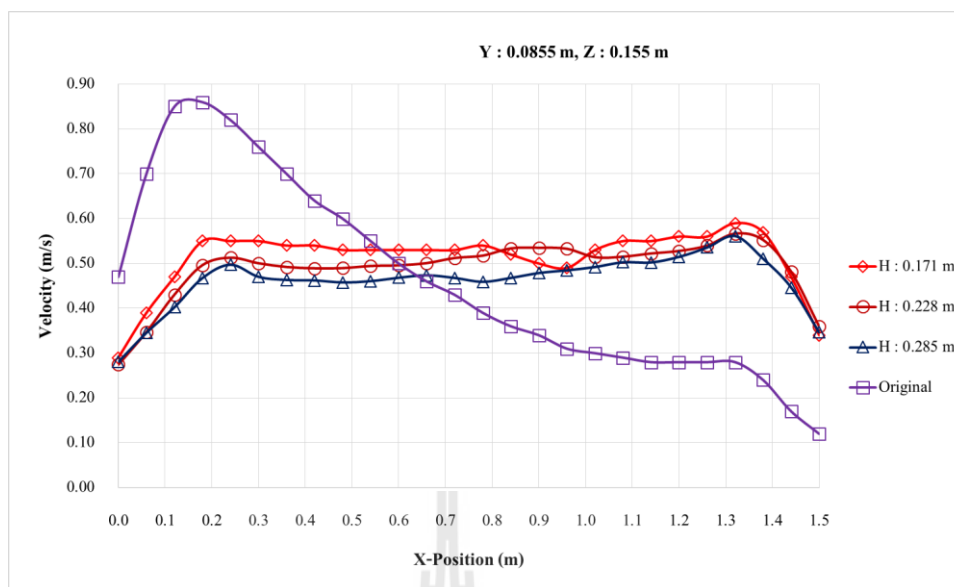


รูปที่ 4.9 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวคู่อากาศ ความสูง 0.228 m

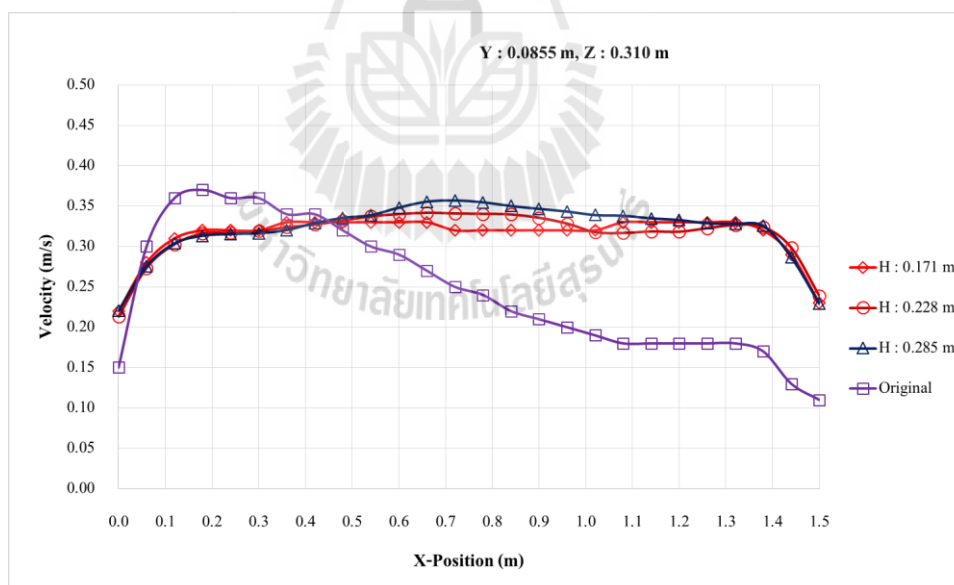


รูปที่ 4.10 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวคูดอากาศ ความสูง 0.285 m

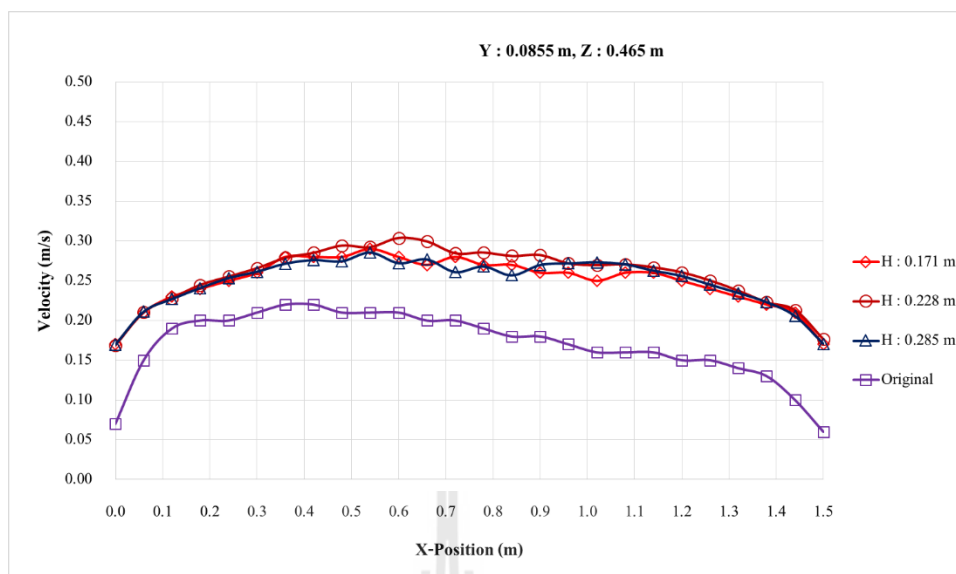
จากรูปที่ 4.8 ถึง 4.10 เป็นคอนทัวร์แสดงความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคูดอากาศจะเห็นว่าความเร็วมีความสม่ำเสมอตลอดความยาวของหัวคูดอากาศ เพื่อเป็นการเปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวคูดทั้ง 3 ขนาด จึงนำค่าความเร็วบนระนาบดังกล่าวที่ระยะห่างจากหัวคูดอากาศในแนวแกน Z ในระยะต่าง ๆ ของหัวคูดอากาศทั้ง 3 ขนาดและความเร็วของอากาศของหัวคูดอากาศแบบดั้งเดิมมาเปรียบเทียบกันได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.11 ถึง 4.16



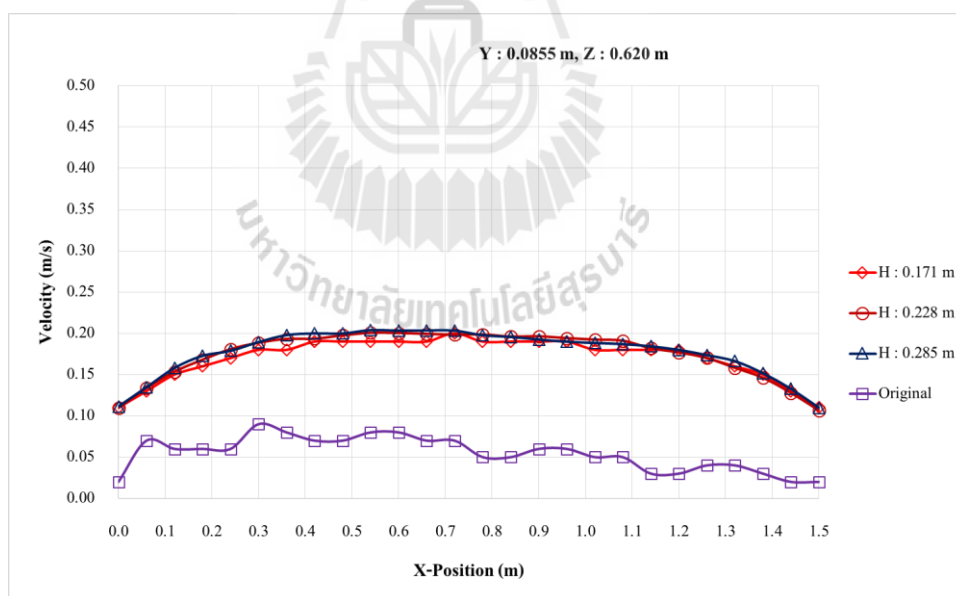
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.155$ m



รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.310$ m

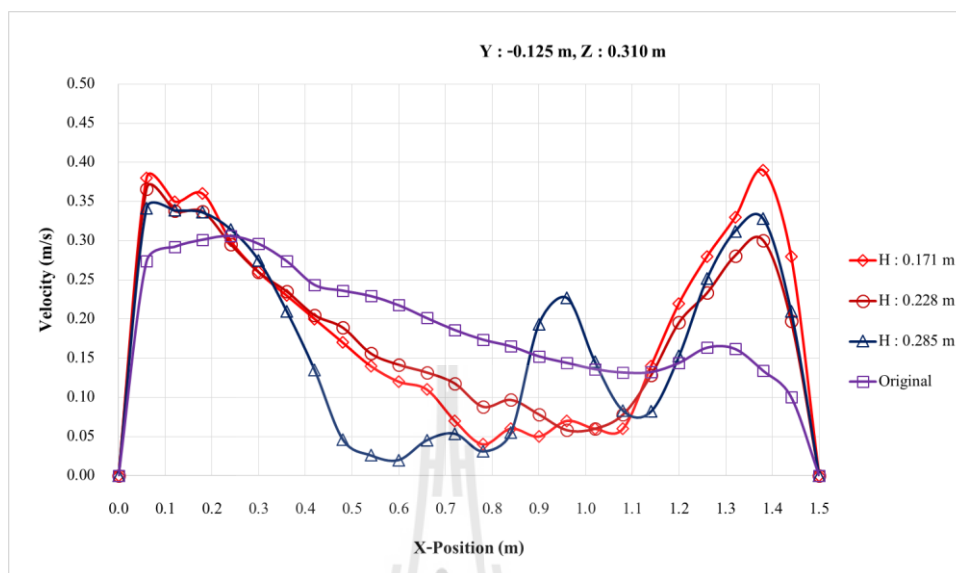


รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.465$ m



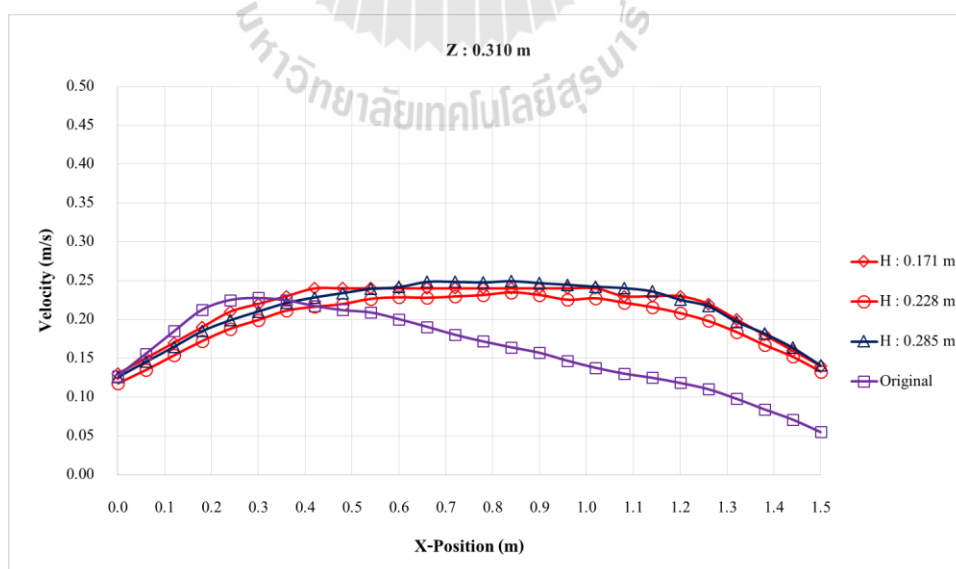
รูปที่ 4.14 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.620$ m

2) ระบาย XZ ระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ -0.125 m



รูปที่ 4.15 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ Y = -0.125 m, Z = 0.310 m

3) ระบาย XZ ระยะห่างจากขอบด้านบนของหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.100 m



รูปที่ 4.16 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ Y = +0.100 m, Z = 0.310 m

ตารางที่ 4.1 ความเร็วเฉลี่ยของหัวคู่อากาศทั้ง 3 ขนาด (ความสูง)

ความสูง หัวคู่อากาศ	ความเร็ว (m/s)					
	Y : 0.0855 m				Z : 0.310 m	
	Z (m)				Y (m)	
	0.155	0.310	0.465	0.620	-0.125	+0.100
0.171 m	0.51	0.31	0.25	0.17	0.18	0.21
0.228 m	0.49	0.32	0.26	0.18	0.18	0.20
0.285 m	0.46	0.32	0.25	0.18	0.16	0.21

เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศด้านหน้าของหัวคู่อากาศในแต่ละตำแหน่ง ของหัวคู่อากาศทั้ง 3 ขนาดมาเปรียบเทียบกันพบว่า ที่ระยะห่างจากหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.155 m บนระนาบ XY และระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ 0.0855 m ดังแสดงในรูปที่ 4.8 ค่าความเร็วเฉลี่ยเป็นดังนี้ หัวคู่อากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.171 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.51 m/s หัวคู่อากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.228 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.49 m/s และหัวคู่อากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.285 m มีค่าความเร็วเฉลี่ย เท่ากับ 0.46 m/s ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะเห็นว่าที่ระยะห่างจากหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.155 m หัวคู่อากาศที่มีความสูง 0.171 m หรือ 1.5 เท่าของขนาดของท่อนั้นมีค่าความเร็วเฉลี่ยสูงที่สุด เมื่อพิจารณาจากค่าความเร็วเฉลี่ยจะพบว่าเมื่อเพิ่มความสูงของหัวคู่อากาศ จะทำให้ความเร็วของอากาศลดลง เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาจากเส้นกราฟในรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าหัวคู่อากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.171 m จะให้ความเร็วของอากาศสูงที่สุดตลอดความยาวของหัวคู่อากาศและความเร็วจะลดลงเมื่อเพิ่มความสูงของหัวคู่อากาศขึ้นคือ หัวคู่อากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.285 m จะให้ความเร็วที่ต่ำที่สุด ซึ่งอาจเป็นผลมาจากตำแหน่งการเก็บค่าความเร็วในบางโมเดล อาจจะตรงกับช่องทางเข้าของอากาศจึงทำให้มีความเร็วของอากาศมีความแตกต่างกัน เนื่องจากในช่วงใกล้กับช่องทางเข้าของอากาศนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความเร็วค่อนข้างสูง ดังนั้นในการพิจารณาจึงจะใช้ระยะห่างจากหัวคู่อากาศเริ่มต้นที่กึ่งกลางถึงซูปโลหะ หรือที่ระยะห่างจากหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.310 m เป็นต้นไป

จากรูปที่ 4.12 ที่ระยะห่างจากหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.310 m บนระนาบ XZ และระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ 0.0855 m ค่าความเร็วเฉลี่ยเป็นดังนี้ หัวคู่อากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.171 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.31 m/s หัวคู่อากาศที่มีความสูง 0.228 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 m/s และหัวคู่อากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.285 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.32 m/s ดังแสดงในตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความสูงของหัวคู่อากาศขึ้นจะทำให้

ให้ความเร็วลมด้านหน้าหัวดูดอากาศเพิ่มขึ้นแต่จะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อพิจารณาจากกราฟจะเห็นว่าเส้นกราฟของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดนั้นมีความใกล้เคียงกันมากซึ่งสอดคล้องกับผลการพิจารณาจากค่าความเร็วเฉลี่ย เมื่อพิจารณาความเร็วของอากาศที่ระยะห่างจากหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.465 m และ 0.620 m ดังแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่าความเร็วเฉลี่ยมีความใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับที่ระยะห่างจากด้านหน้าหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.310 m แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะห่างจากหัวดูดอากาศเพิ่มขึ้น ความเร็วของอากาศในแต่ละระยะนั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นการเพิ่มความสูงของหัวดูดอากาศจึงไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างของความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาด

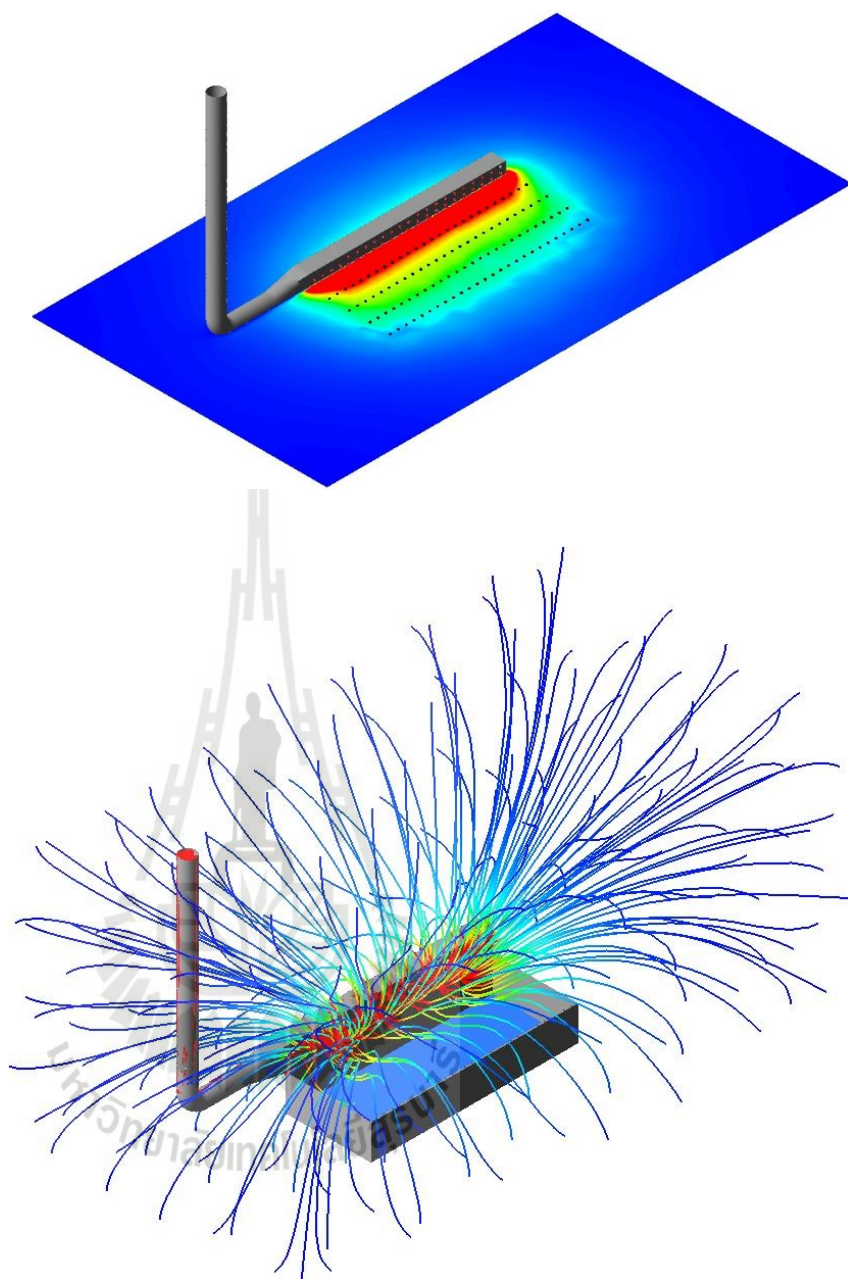
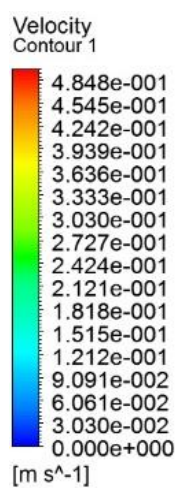
เมื่อพิจารณาที่ระยะในแนวแกน Y ที่เปลี่ยนไป คือที่ระยะกึ่งกลางของถังชุบโลหะในแนวแกน Y (-0.125 m) จากขอบถึงด้านบนและระยะห่างจากด้านหน้าของหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.310 m ดังแสดงในรูปที่ 4.15 พบว่าความเร็วที่อยู่ในถังชุบโลหะนั้นสำหรับหัวดูดอากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.171 m และ 0.228 m จะมีค่าที่ใกล้เคียงกัน ส่วนหัวดูดอากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.285 m ความเร็วของอากาศภายในถังจะมีความเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากด้านหน้าหัวดูดอากาศระยะเดียวกันและระยะห่างจากขอบด้านบนของหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.100 m พบว่าความเร็วของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดนั้นมีความใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวมาแล้วในข้างต้นดังแสดงในรูปที่ 4.16

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบขนาดความสูงของหัวดูดในขณะที่ขนาดของท่อดูดที่ต่อเข้ากับหัวดูดยังเท่าเดิม ย่อมไม่ส่งผลให้อัตราการดูดอากาศที่ถูกดูดเข้าสู่หัวดูดมีการเปลี่ยนแปลงนั่นคือ ที่อัตราการดูดคงที่ค่าหนึ่งการเปลี่ยนความสูงของหัวดูดไม่ส่งผลต่อการกระจายแรงดูดของหัวดูด

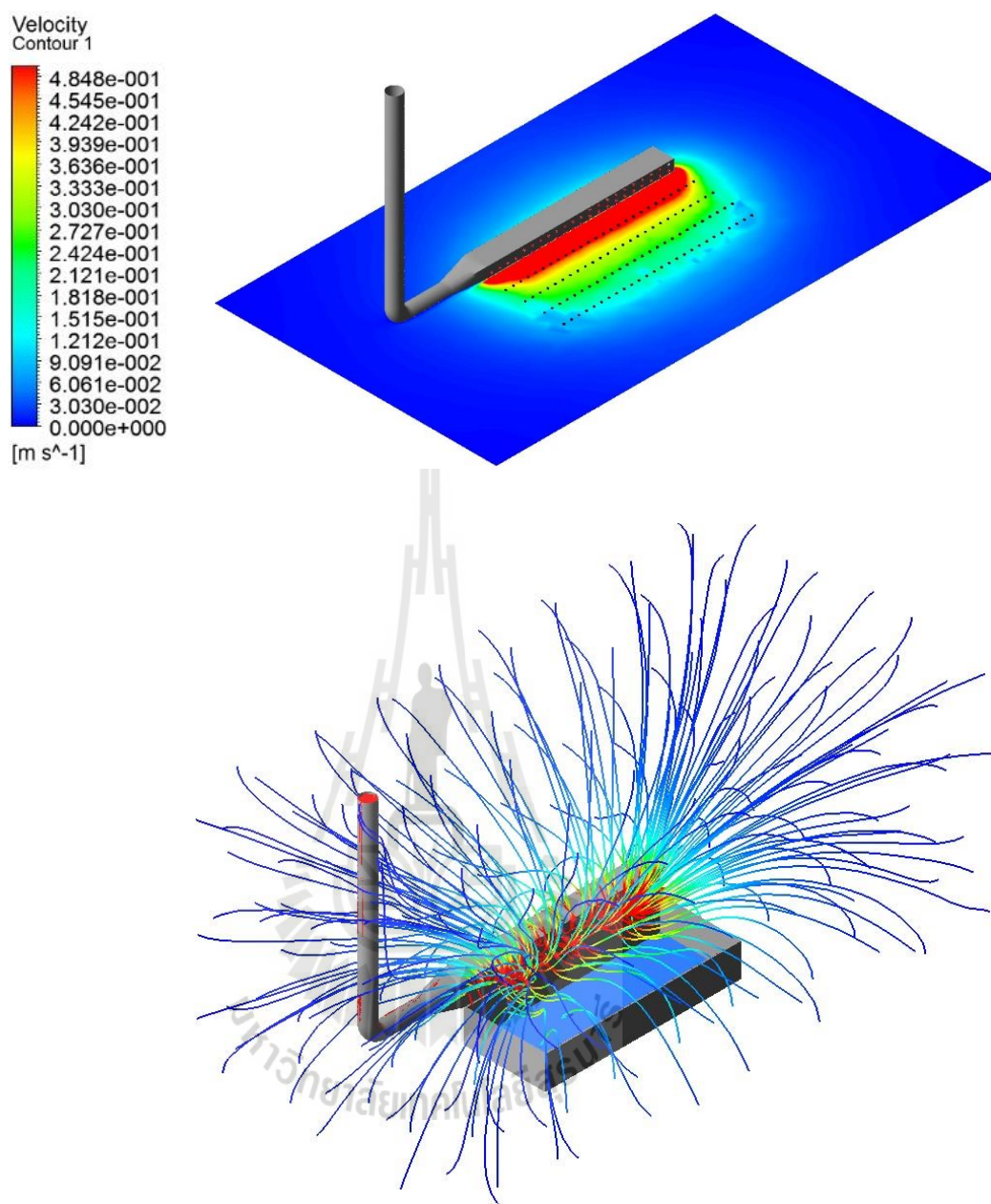
4.2.4 ผลการปรับความกว้างของหัวดูดอากาศ

กรณีปรับความกว้างของหัวดูดอากาศเท่ากับ 1.0, 1.5 และ 2.0 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ และกำหนดความสูงของหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.171 m เท่ากันทุกโมเดล จากนั้นนำค่าความเร็วในแต่ละระยะมาเปรียบเทียบกันเพื่อหาขนาดความกว้างของหัวดูดอากาศที่ทำให้ความสามารถในการระบายอากาศได้ดีที่สุด

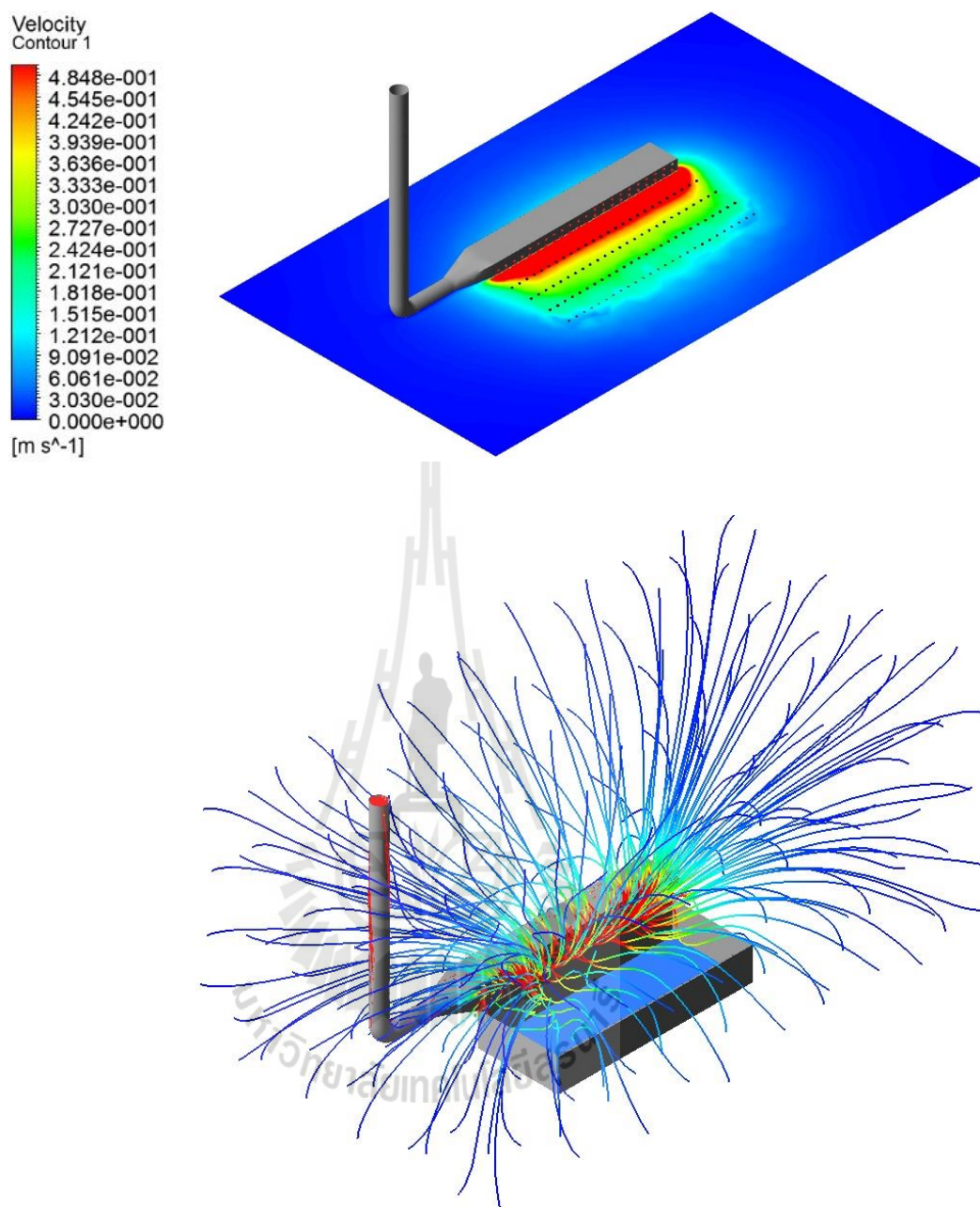
1) ความเร็วของอากาศบนระนาบ XZ ระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ 0.0855 m คอนทัวร์ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศสำหรับหัวดูดอากาศที่มีความกว้างขนาดต่าง ๆ กัน ดังรูปที่ 4.17 ความกว้าง 0.114 m, รูปที่ 4.18 ความกว้าง 0.171 m และรูปที่ 4.19 ความกว้าง 0.228 m



รูปที่ 4.17 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความกว้าง 0.114 m

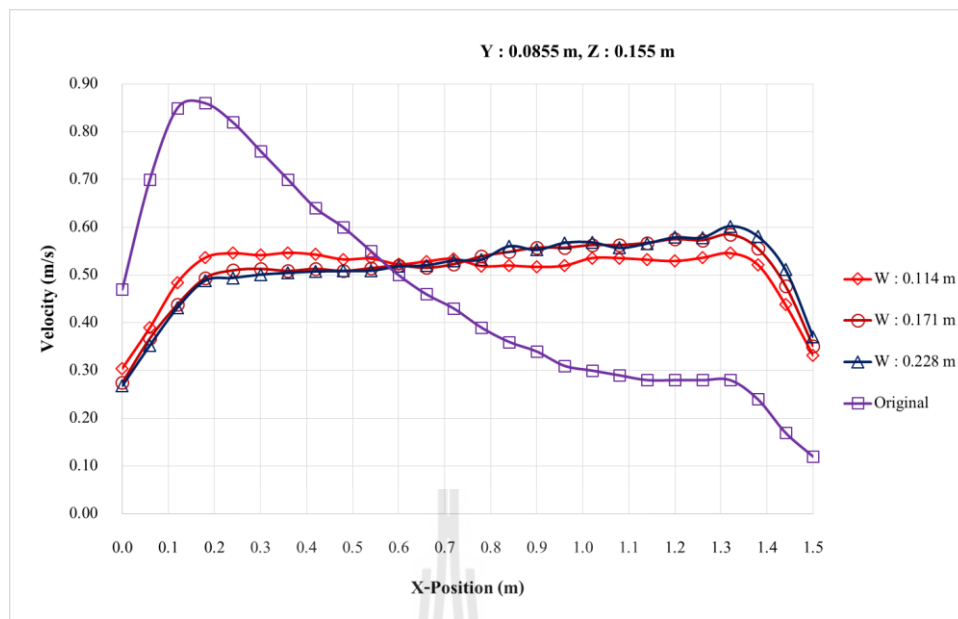


รูปที่ 4.18 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความกว้าง 0.171 m

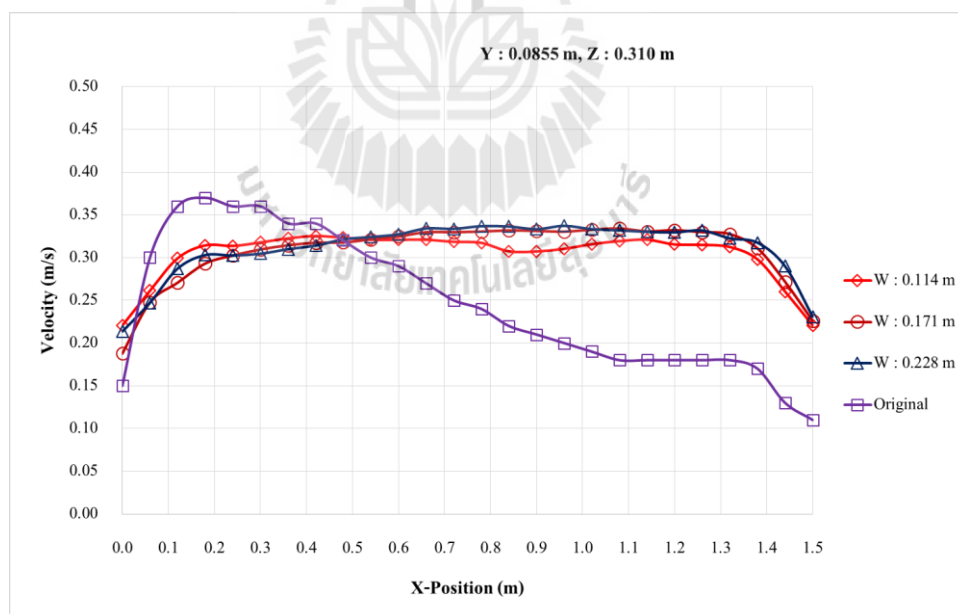


รูปที่ 4.19 คอนทัวร์ความเร็วของอากาศและเส้นการไหลของหัวดูดอากาศ ความกว้าง 0.228 m

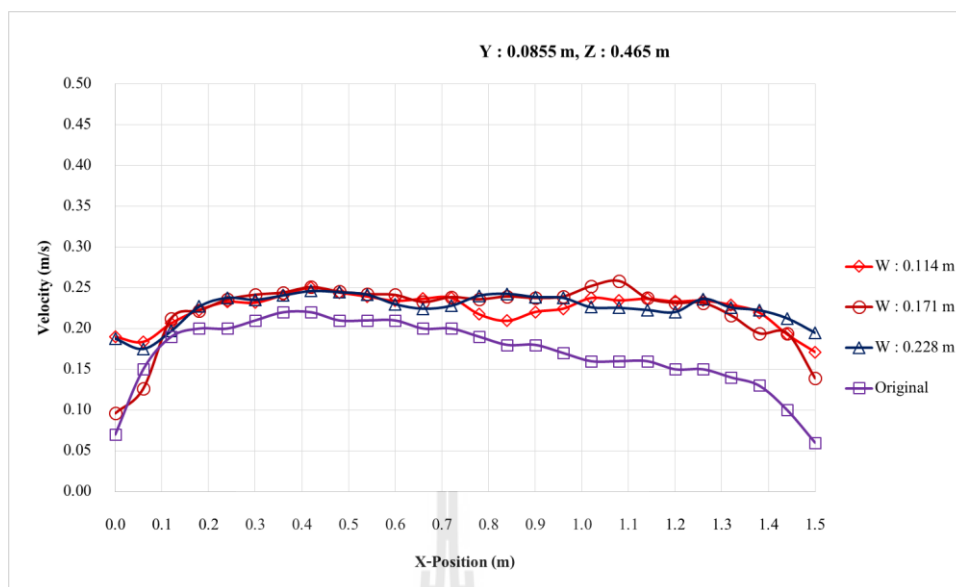
เมื่อนำค่าความเร็วบนระนาบดังกล่าวที่ระยะห่างจากหัวดูดอากาศในแนวแกน Z ในระยะต่าง ๆ ของตัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดและความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศแบบเดิมมา เปรียบเทียบกันได้ดังแสดงในรูปที่ 4.20 ถึง 4.25



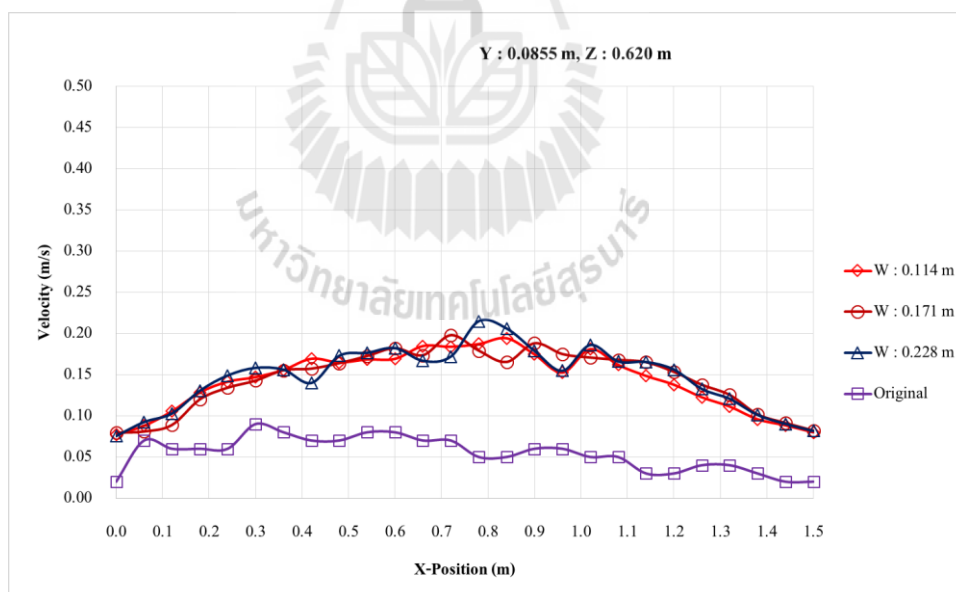
รูปที่ 4.20 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.155$ m



รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.310$ m

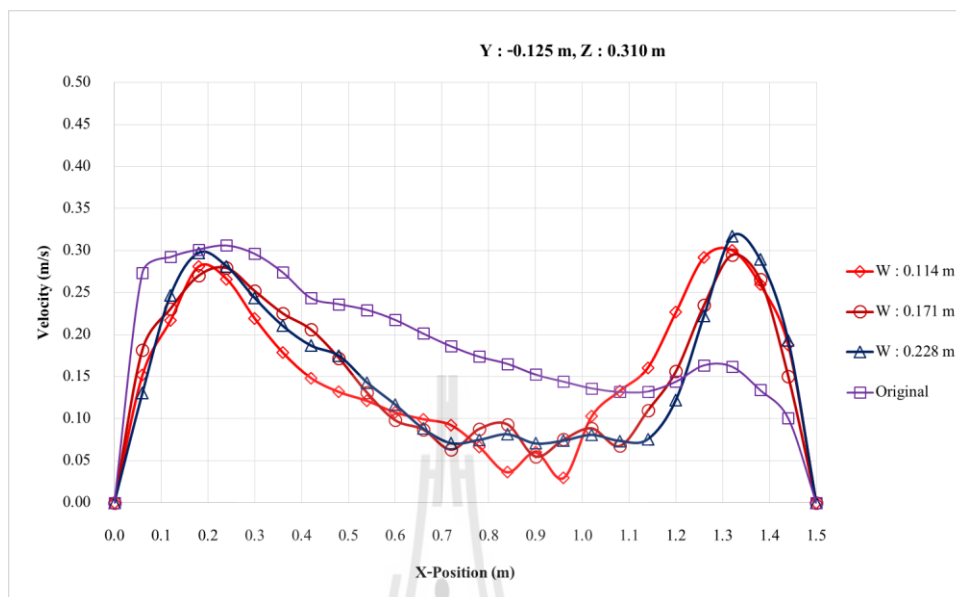


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.465$ m



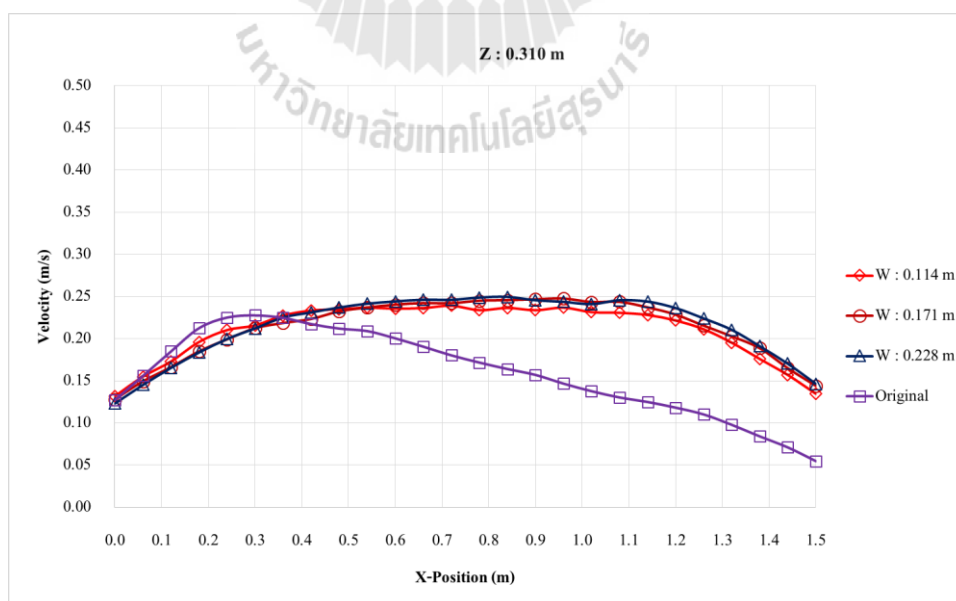
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ $Z = 0.620$ m

2) ระบาย XZ ระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ -0.125 m



รูปที่ 4.24 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ Y = -0.125 m, Z = 0.310 m

2) ระบาย XZ ระยะห่างจากขอบด้านบนของหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.100 m



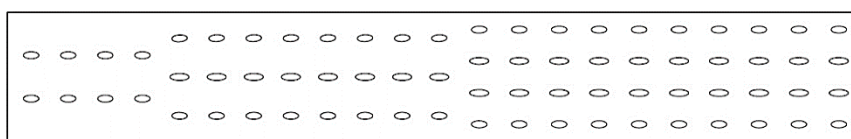
รูปที่ 4.25 เปรียบเทียบความเร็วของอากาศของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดกับ
หัวดูดอากาศแบบเดิมที่ระยะ Y = +0.100 m, Z = 0.310 m

ตารางที่ 4.2 ความเร็วเฉลี่ยของหัวคู่อากาศทั้ง 3 ขนาด (ปรับความกว้าง)

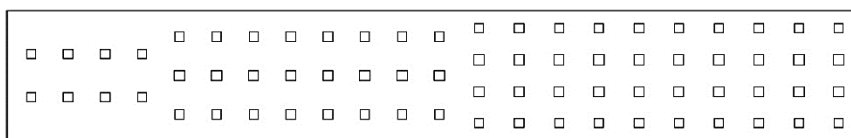
ความกว้าง หัวคู่อากาศ	ความเร็ว (m/s)					
	Y : 0.0855 m				Z : 0.310 m	
	Z (m)				Y (m)	
	0.115	0.310	0.465	0.620	-0.125	+0.100
0.114 m	0.50	0.30	0.22	0.14	0.15	0.21
0.171 m	0.51	0.31	0.22	0.14	0.15	0.21
0.228 m	0.51	0.31	0.23	0.14	0.15	0.21

เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศด้านหน้าของหัวคู่อากาศในแต่ละตำแหน่ง ของหัวคู่อากาศทั้ง 2 ขนาดมาเปรียบเทียบกับพบว่า ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศที่ตำแหน่งต่างๆ บนระนาบ XZ ที่ระยะห่างจากขอบตံงซูป โลหะเท่ากับ 0.0855 m เมื่อพิจารณาความเร็วเฉลี่ยของแต่ละระยะพบว่า ที่ระยะห่างจากด้านหน้าของหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.155 m มีความเร็วเฉลี่ยดังนี้ หัวคู่อากาศที่มีความกว้างเท่ากับ 0.114 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.50 m/s หัวคู่อากาศที่มีความกว้างเท่ากับ 0.171 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.51 m/s และหัวคู่อากาศที่มีความกว้างเท่ากับ 0.228 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.51 m/s ดังแสดงในตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความกว้างของหัวคู่อากาศขึ้นจะทำให้ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และจะมีค่าคงที่ที่ค่าความกว้างของหัวคู่อากาศค่าหนึ่ง จากค่าความเร็วเฉลี่ยของอากาศที่ได้จะเห็นว่าหัวคู่อากาศที่มีความกว้างเท่ากับ 0.171 m และ 0.228 m มีค่าความเร็วเฉลี่ยเท่ากัน และเมื่อพิจารณาจากกราฟที่แสดงในรูปที่ 4.20 จะเห็นว่ากราฟของหัวคู่อากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.171 m และ 0.228 m มีความใกล้เคียงกันมาก ซึ่งสอดคล้องกับการพิจารณาจรค่าความเร็วเฉลี่ย และเมื่อพิจารณาค่าความเร็วของอากาศที่ระยะห่างจากด้านหน้าของหัวคู่อากาศที่เพิ่มขึ้น ที่ระยะห่างเท่ากับ 0.310 m ค่าความเร็วเฉลี่ยของหัวคู่อากาศมีค่าเท่ากับ 0.30 m/s, 0.31 m/s และ 0.31 m/s ตามลำดับความกว้างของหัวคู่อากาศดังแสดงในตารางที่ 4.2 และเมื่อพิจารณาที่ระยะห่างจากด้านหน้าหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.465 m และ 0.620 m ดังแสดงในรูปที่ 4.22 และ 4.23 จะเห็นว่าความเร็วของอากาศเมื่อระยะห่างจากด้านหน้าหัวคู่อากาศเพิ่มขึ้นความเร็วที่ระยะดังกล่าวมีความใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาที่ระยะ Y ที่เปลี่ยนไปดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 จากความเร็วเฉลี่ยในตารางที่ 4.2 จะเห็นวามความเร็วอากาศของหัวคู่อากาศทั้ง 3 ขนาดนั้นมีค่าเท่ากันแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มความกว้างของหัวคู่อากาศขึ้นไม่มีผลต่อความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศ ดังนั้น



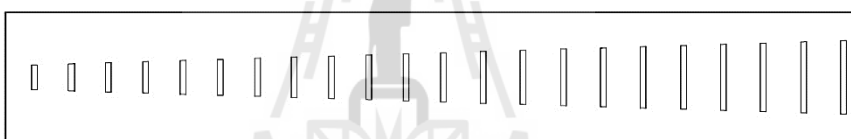
(ก)



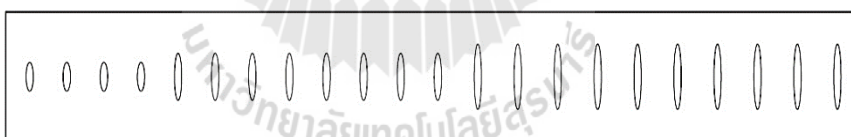
(ง)

รูปที่ 4.26 รูปแบบช่องทางเข้าอากาศแบบกระจาย (ก) วงกลม, (ข) วงรีแนวตั้ง, (ค) วงรีแนวนอน, และ (ง) สี่เหลี่ยมจัตุรัส

2) รูปแบบ B : ช่องทางเข้าแบบรวม



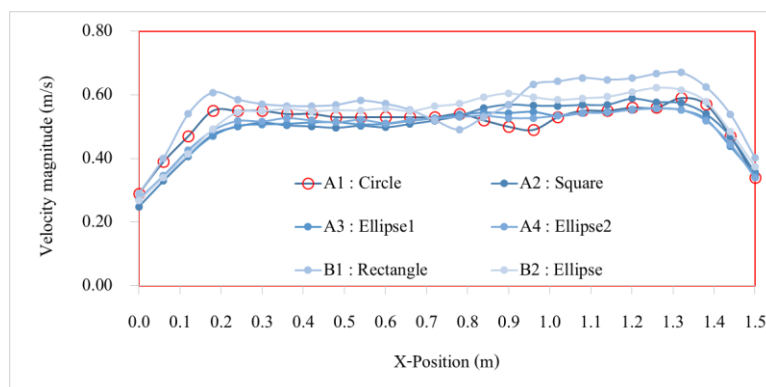
(ก)



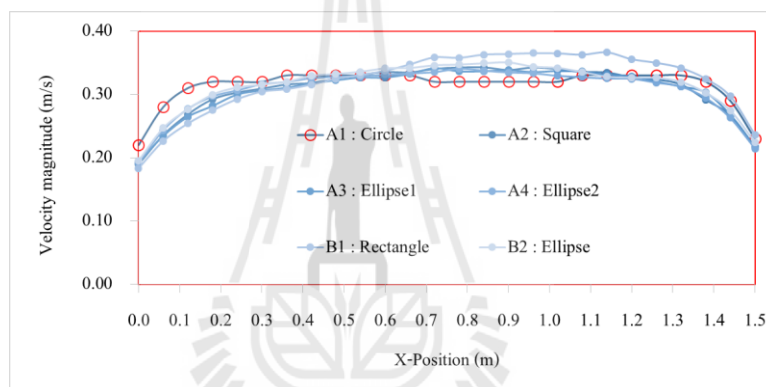
(ข)

รูปที่ 4.27 รูปแบบช่องทางเข้าอากาศแบบรวม (ก) สี่เหลี่ยมผืนผ้า และ (ข) วงรียาวแนวตั้ง

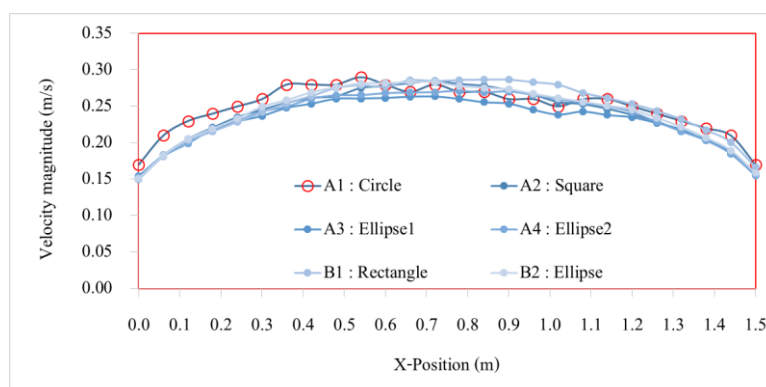
เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศบนระนาบ XZ ที่ระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ 0.0855 m และระยะห่างจากด้านหน้าของหัวดูด Z_1 , Z_2 , Z_3 และ Z_4 ของช่องทางเข้าของอากาศทั้ง 6 แบบมาเปรียบเทียบกันได้ดังแสดงในรูปที่ 4.28(ก) ถึง 4.28(ง)



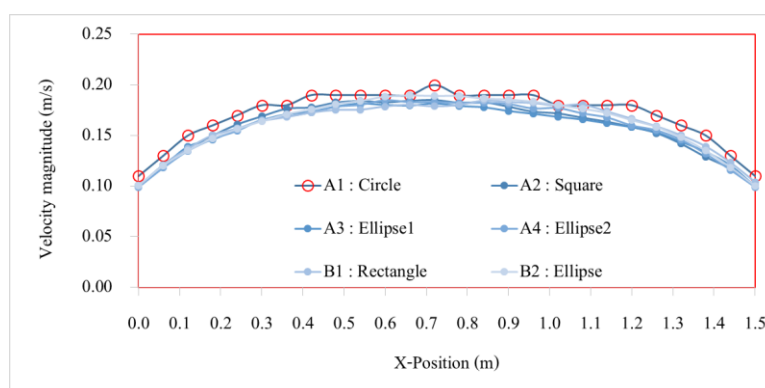
(ก) $Z_1 = 0.155$ m



(ข) $Z_2 = 0.310$ m



(ค) $Z_3 = 0.465$ m



(ง) $Z_4 = 0.620$ m

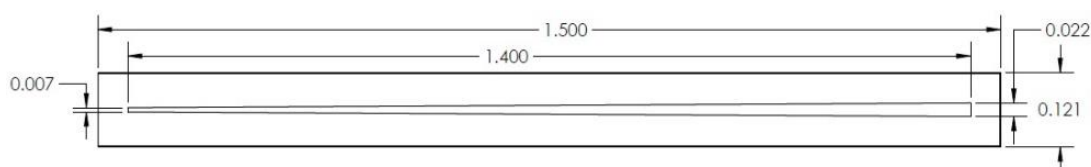
รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบความเร็วของช่องทางเข้าของอากาศ

ตารางที่ 4.3 ความเร็วเฉลี่ยของช่องทางเข้าอากาศ

ค่าความเร็ว (m/s)	รูปแบบช่องทางเข้า					
ระยะ Z (m)	A1	A2	A3	A4	B1	B2
0.155	0.51	0.50	0.49	0.50	0.54	0.53
0.310	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
0.465	0.25	0.24	0.23	0.24	0.25	0.24
0.620	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16

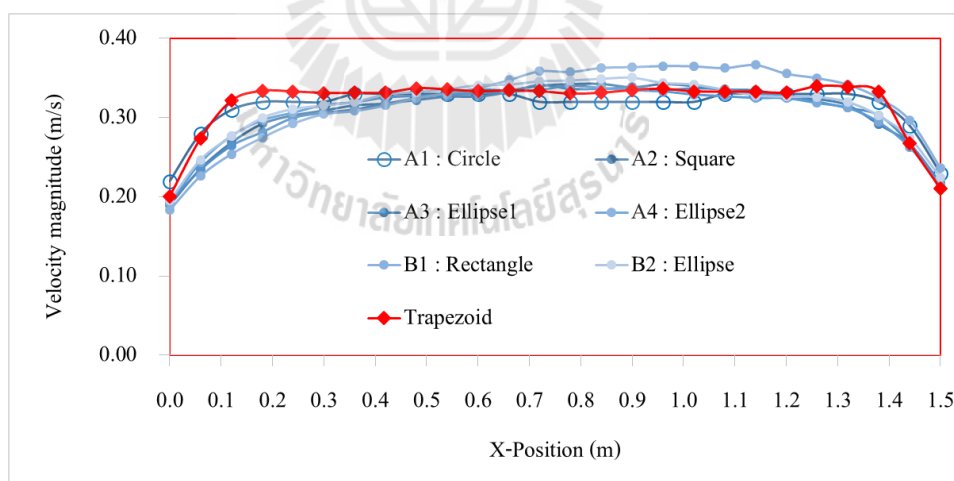
จากการปรับรูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศจะเห็นว่าเมื่อนำค่าความเร็วบนระนาบ XZ ที่ระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ 0.0855 m และระยะห่างจากด้านหน้าของหัวดูดอากาศเท่ากับ 0.310 m ของแต่ละรูปทรงมาเปรียบเทียบกัน พบว่าผลของความเร็วนั้นมีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาจากค่าความเร็วเฉลี่ยของทุกรูปทรง จะพบว่าค่าความเร็วเฉลี่ยของทุกรูปทรงมีค่าเท่ากับ 0.31 m/s ดังแสดงในตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าเมื่อรูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศเปลี่ยนไปจะไม่ส่งผลกระทบต่อการกระจายความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูด หากกำหนดระยะห่างในแนวแกน X ให้เท่ากัน ดังนั้นความสามารถในการดูดอากาศของหัวดูดอากาศจึงไม่ขึ้นกับรูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศ แต่จะขึ้นอยู่กับพื้นที่การเจาะช่องทางเข้าในแนวแกน X เห็นได้จากจากการเปรียบเทียบรูปแบบช่องทางเข้าของอากาศรูปแบบ A และ B จึงทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ในการเจาะช่องทางเข้าของอากาศกับระยะ

ในแนวแกน X เพื่อเป็นการหาความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงได้มีการออกแบบช่องทางเข้าของอากาศโดยใช้หัวคู่อากาศขนาดเท่ากับหัวคู่อากาศแบบเดิมคือขนาดความกว้างเท่ากับ 0.121 m สูง 0.121 m และยาว 1.500 m ออกแบบช่องทางเข้าของอากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังแสดงในรูปที่ 4.29 กำหนดให้พื้นที่ของช่องทางเข้าของอากาศเท่าเดิม



รูปที่ 4.29 ช่องทางเข้าของอากาศสี่เหลี่ยมคางหมู

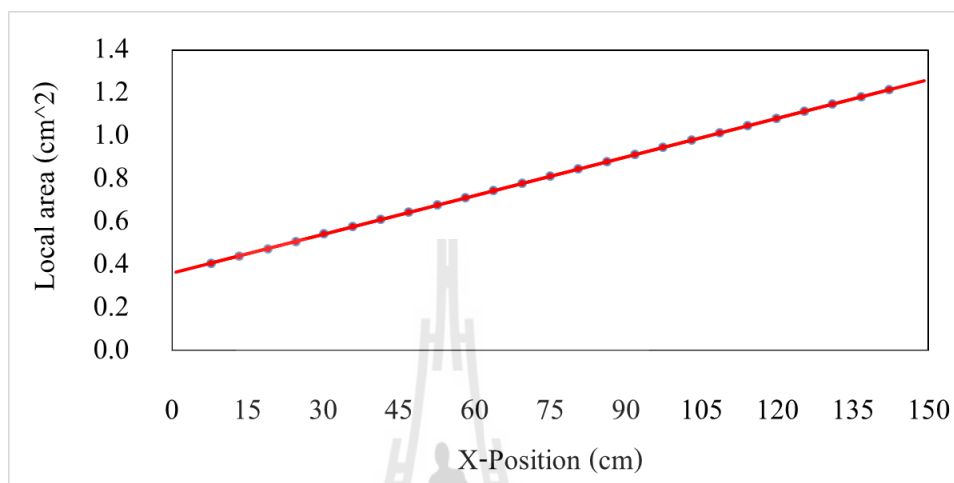
เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคู่อากาศบนระนาบ XZ ระยะห่างจากขอบถึงในแนวแกน Y เท่ากับ 0.0605m และระยะห่างจากด้านหน้าของหัวคู่อากาศเท่ากับ 0.310 m มาเปรียบเทียบกับผลของการออกแบบขนาดและรูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 เปรียบเทียบความเร็วของหัวคู่อากาศ

จากรูปที่ 4.30 จะเห็นว่าเมื่อกำหนดให้พื้นที่ช่องทางเข้าของอากาศเท่ากัน ในแต่ละระยะในแนวแกน X เมื่อขนาดของหัวคู่อากาศนั้นจะไม่มีผลต่อความเร็วที่เกิดขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัตินั้นการเจาะช่องทางเข้าเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูช่องเดียวนั้นสามารถทำได้ง่ายและสะดวกกว่าการ

เจาะช่องในรูปแบบอื่นที่ได้นำเสนอมาข้างต้น จากรูปจะเห็นว่าความเร็วนั้นมีค่าใกล้เคียง และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของช่องทางเข้าของอากาศกับระยะในแนวแกน X ได้ดังแสดงในรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของช่องทางเข้าของอากาศกับระยะในแนวแกน X

ได้สมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$A = 0.006X + 0.362 \quad \text{cm}^2 \quad (4.1)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่การเจาะช่องทางเข้าของอากาศในแนวแกน X

X คือ ตำแหน่งในแนวแกน X โดยที่ $X > 0$

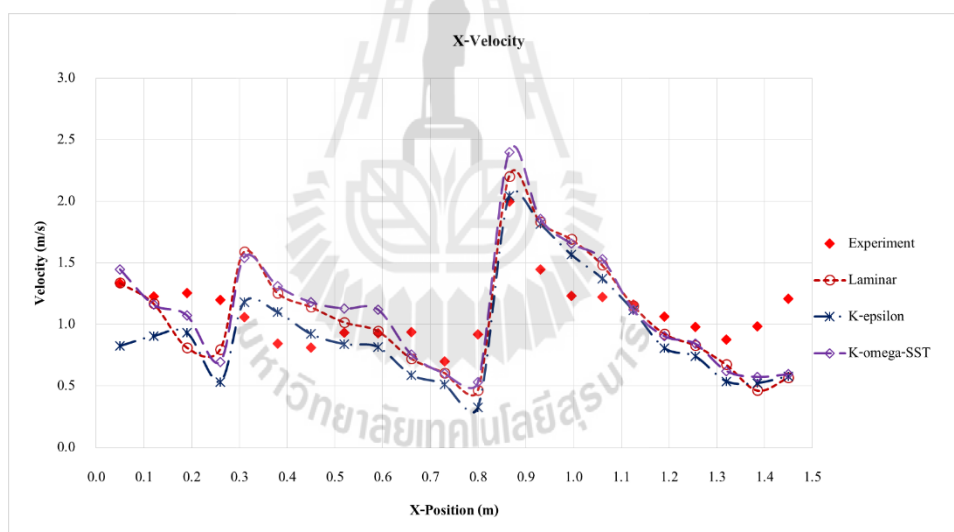
สมการที่ 4.1 เป็นสมการที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ของช่องทางเข้าของอากาศกับระยะในแนวแกน X โดยที่ X ต้องมีค่ามากกว่า 0 ถ้าหากเจาะช่องทางเข้าของอากาศตามความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่ว่าจะเจาะช่องทางเข้าของอากาศด้วยรูปทรงใด จะให้ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวคูดสมา่เสมอตลอดความยาวของหัวคูดอากาศ

4.3 ผลการเปรียบเทียบ

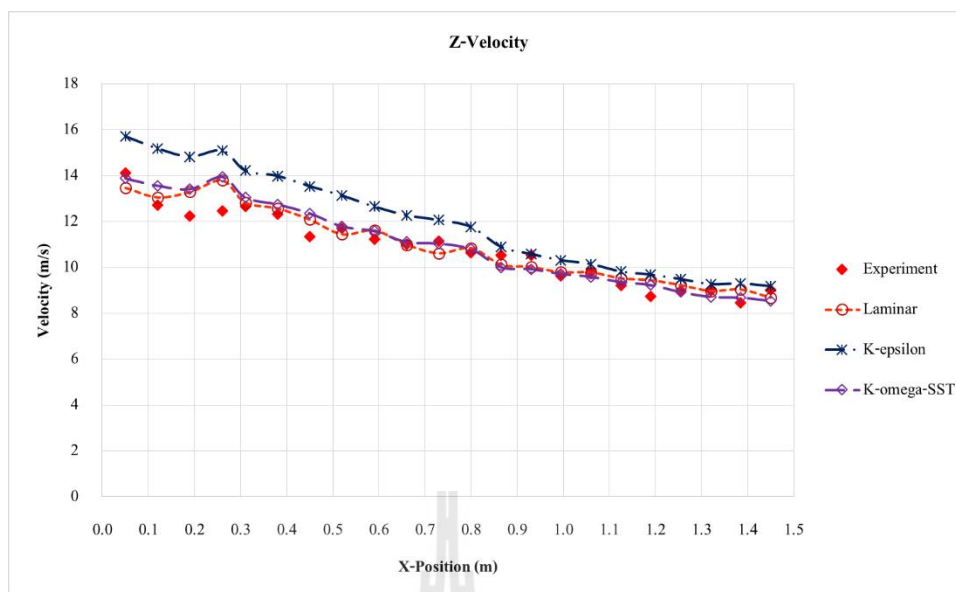
การวัดค่าความเร็วอากาศจากการทดลองนั้นจะวัดความเร็วของอากาศที่ด้านหน้าช่องทางเข้าของอากาศแต่ละช่องที่ระยะ Y_1, Z_1 ระยะ Y_1, Z_2 และระยะ Y_1, Z_3 เมื่อนำค่าความเร็วของอากาศที่วัดได้จากทดลองหัวคู่อากาศมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ของการจำลองการไหลทั้ง 3 แบบ คือ จำลองการไหลแบบราบเรียบ จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง k- ϵ และแบบจำลอง k- ω SST เพื่อหาแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมกับการออกแบบหัวคู่อากาศ ในการวัดค่าความเร็วของอากาศจะวัดค่า ในแนวแกน X และ แนวแกน Z ได้ผลดังนี้

4.3.1 กรณีที่ 1 หัวคู่อากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m

1) ความเร็วของอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1, Z_1 ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 ตามลำดับ

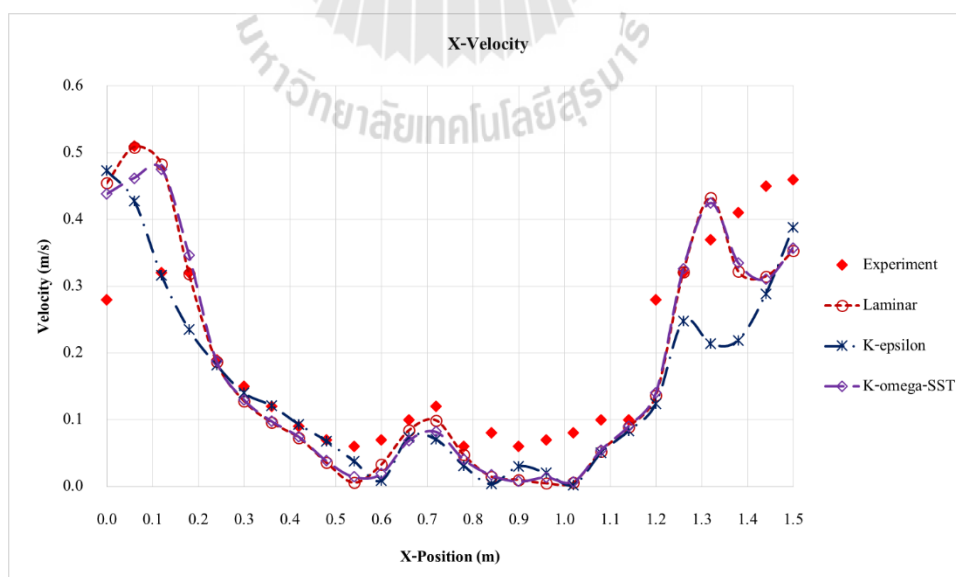


รูปที่ 4.32 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวคู่อากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1

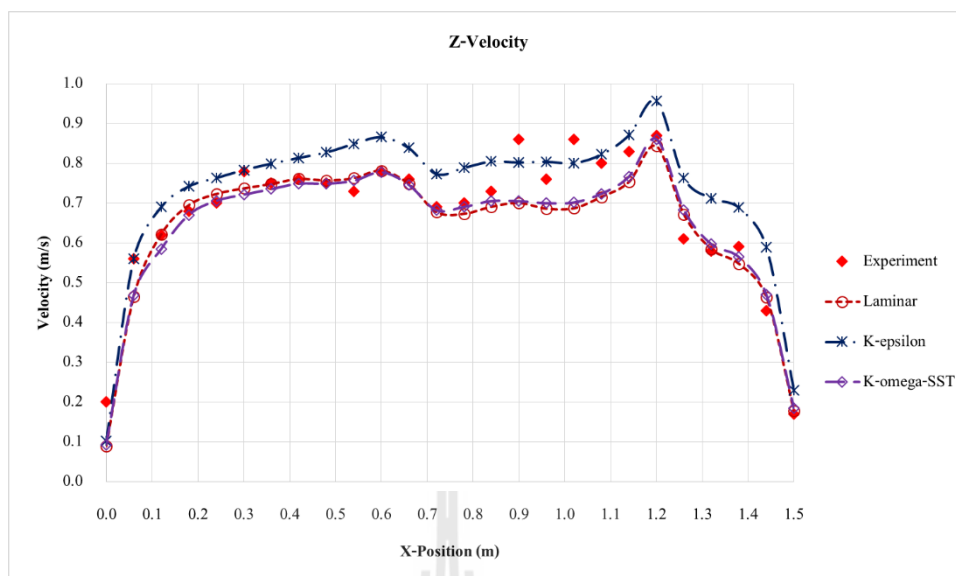


รูปที่ 4.33 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1

2) ความเร็วอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1, Z_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และ 4.35 ตามลำดับ

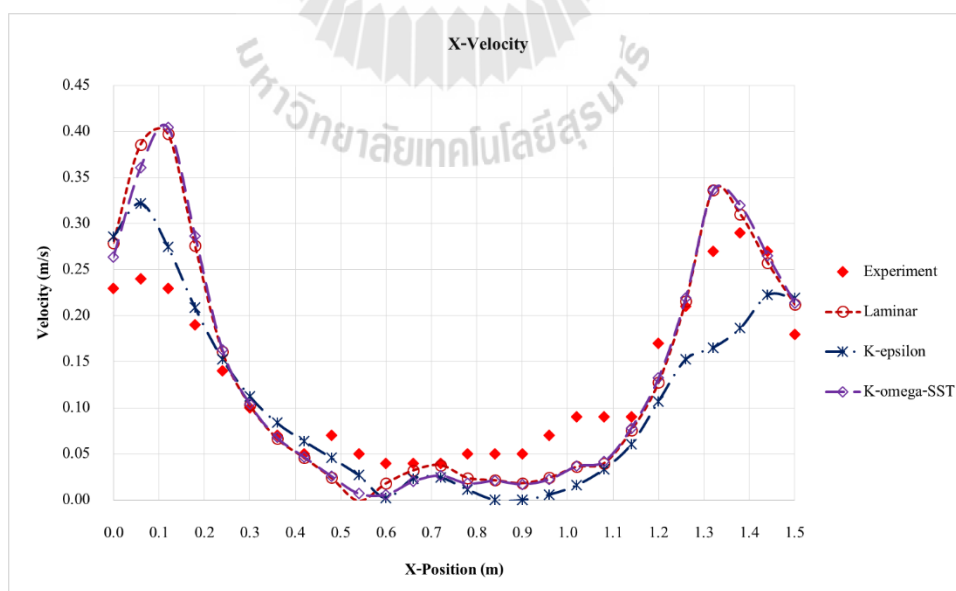


รูปที่ 4.34 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2

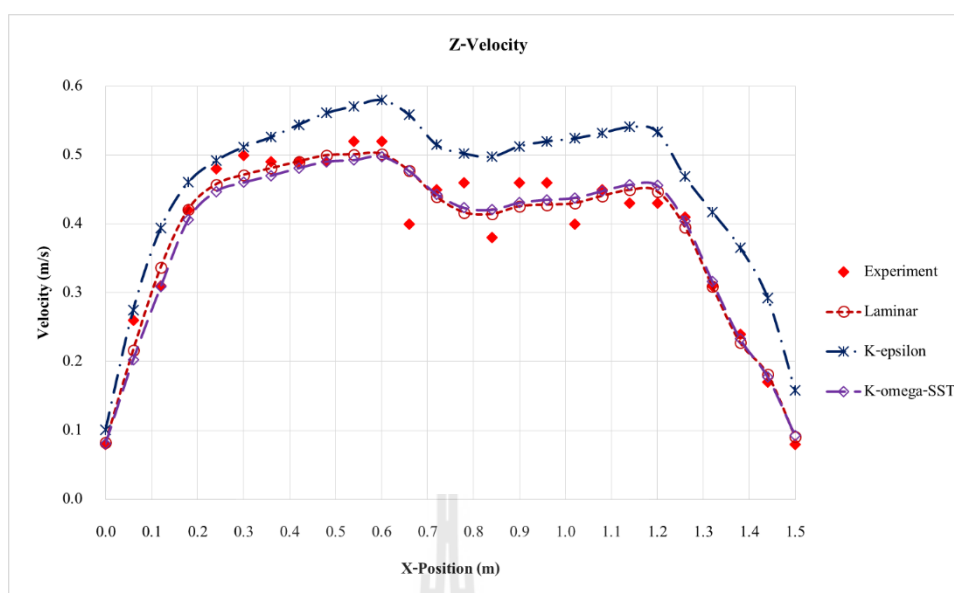


รูปที่ 4.35 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2

3) ความเร็วอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1, Z_3 ดังแสดงในรูปที่ 4.36 และ 4.37 ตามลำดับ



รูปที่ 4.36 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3



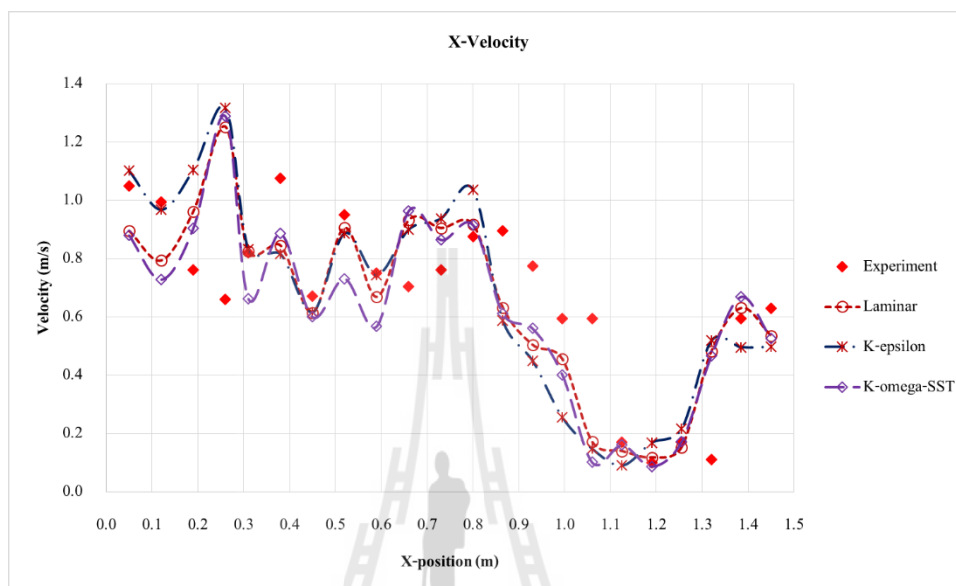
รูปที่ 4.37 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m
ที่ระยะ Y_1, Z_3

จากรูปที่ 4.32 ถึง 4.37 เป็นการเปรียบเทียบผลของความเร็วอากาศที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมการไหลทั้ง 3 แบบ คือ จำลองการไหลแบบราบเรียบ จำลองการไหลแบบปั่นป่วน ด้วยแบบจำลอง k- ϵ และแบบจำลอง k- ω SST กับผลของความเร็วอากาศที่ได้จากการทดลองของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.171$ m จากรูปที่ 4.32 เมื่อพิจารณาความเร็วในแนวแกน X ที่ด้านหน้าช่องทางเข้าของอากาศแต่ละช่อง (Z_1) พบว่าความเร็วอากาศนั้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันแต่จะมีบางช่วงที่ผลมีความแตกต่างกันซึ่งอาจเกิดการความผิดพลาดในการวัดค่าจากการทดลอง และเมื่อพิจารณาความเร็วในแนวแกน Z ดังแสดงในรูปที่ 4.33 จะเห็นว่าความเร็วอากาศที่ได้จากการทดลองกับความเร็วของอากาศที่ได้จากการจำลองแบบราบเรียบกับแบบปั่นป่วน k- ω SST นั้นมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งแตกต่างจากแบบจำลอง k- ϵ

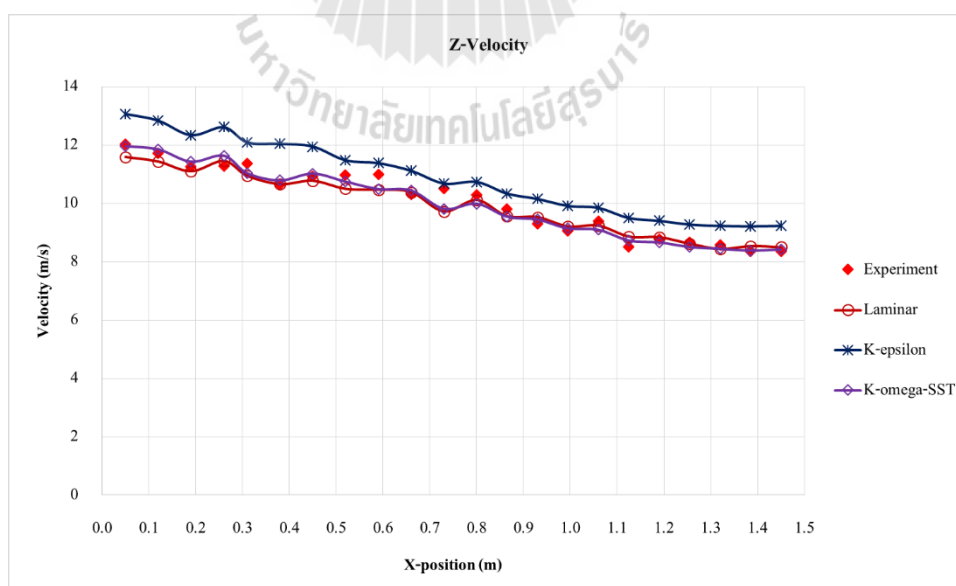
เมื่อพิจารณาความเร็วอากาศที่ระยะ Y_1, Z_2 และระยะ Y_1, Z_3 ความเร็วในแนวแกน X ที่ได้จากการทดลองกับผลการจำลองพฤติกรรมการไหลนั้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และรูปที่ 4.36 และเมื่อพิจารณาความเร็วในแนวแกน Z จะได้ว่าค่าความเร็วที่ได้จากการทดลองนั้นใกล้เคียงกับค่าของความเร็วที่ได้จากการจำลองแบบราบเรียบ กับการจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- ω SST ดังแสดงในรูปที่ 4.35 และรูปที่ 4.37 เช่นเดียวกับการพิจารณาความเร็วอากาศที่ช่องทางเข้าของอากาศ

4.3.2 กรณีที่ 2 หัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m

1) ความเร็วของอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1, Z_1 ดังแสดงในรูปที่ 4.38 และ 4.39 ตามลำดับ

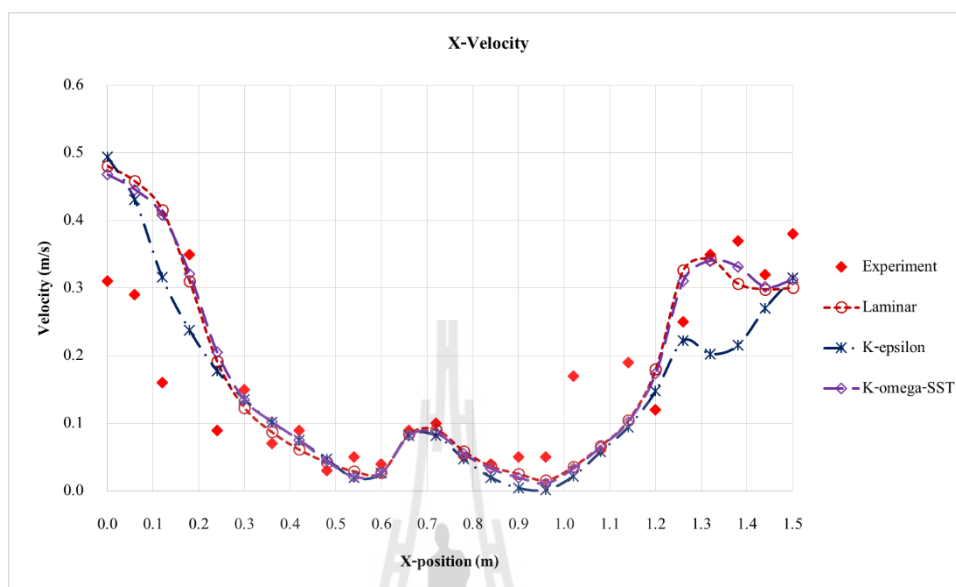


รูปที่ 4.38 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1

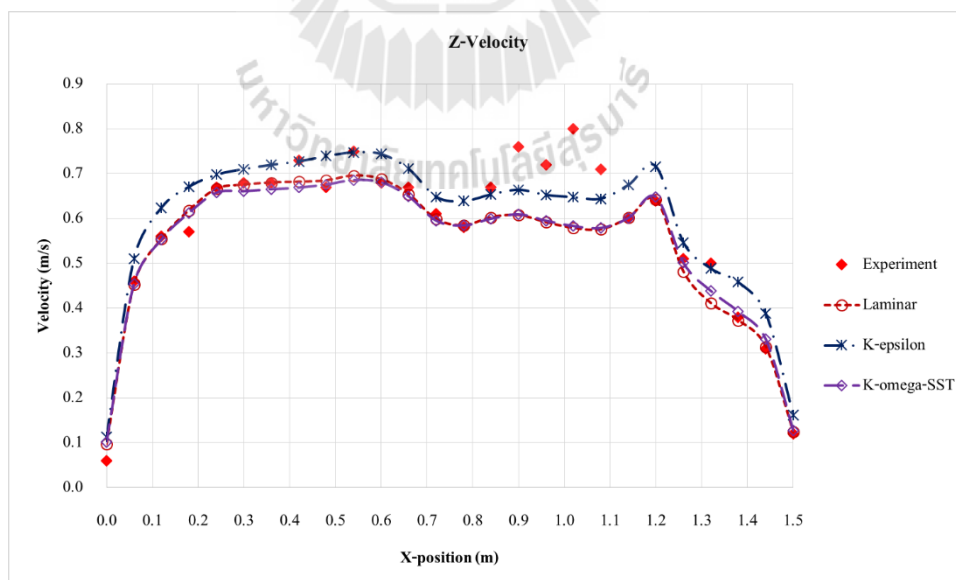


รูปที่ 4.39 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1

2) ความเร็วของอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1, Z_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.40 และ 4.41

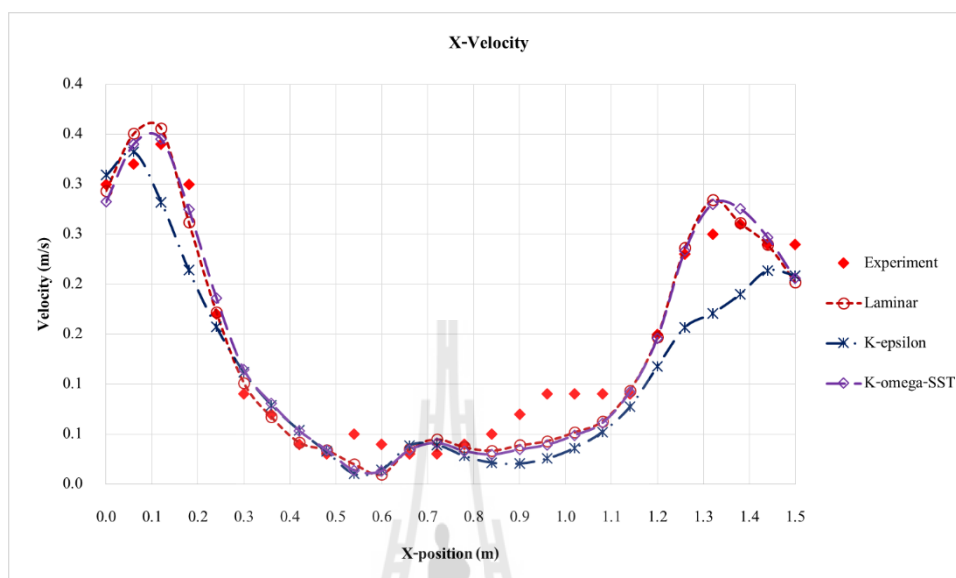


รูปที่ 4.40 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวคูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2

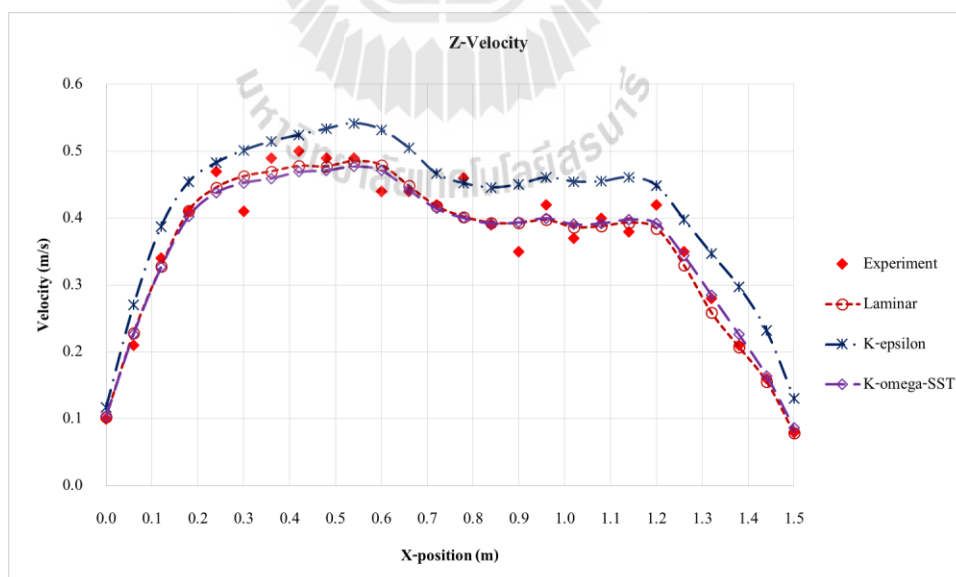


รูปที่ 4.41 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวคูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2

3) ความเร็วของอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1, Z_3 ดังแสดงในรูปที่ 4.42 และ 4.43 ตามลำดับ



รูปที่ 4.42 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3

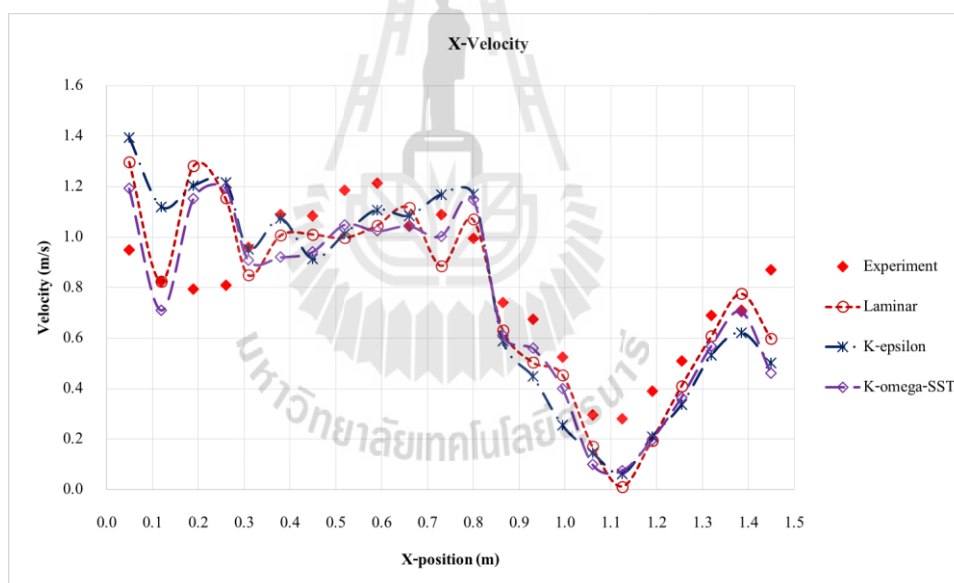


รูปที่ 4.43 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3

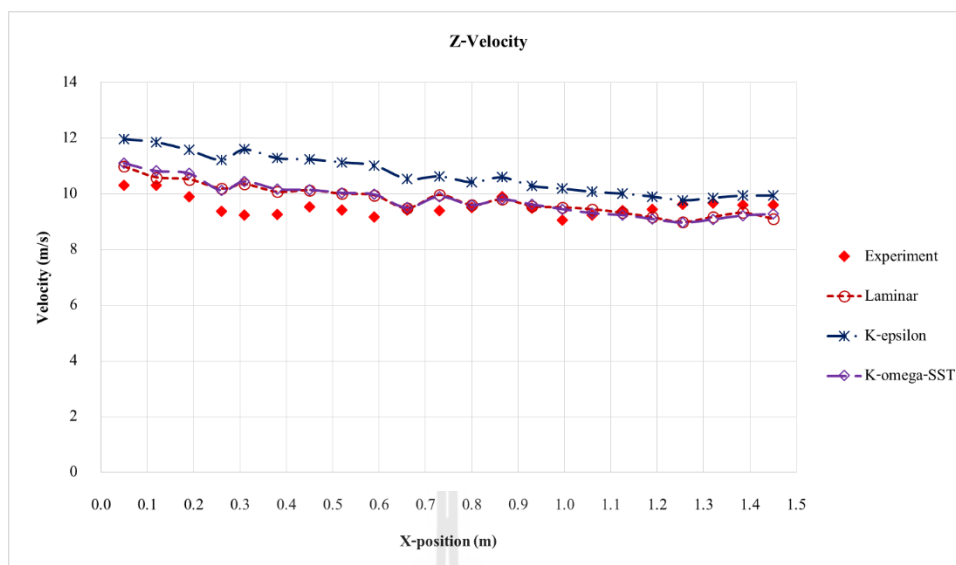
จากรูปที่ 4.38 ถึง 4.43 เป็นการเปรียบเทียบผลของความเร็วอากาศที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมกรไหลทั้ง 3 แบบ กับผลของความเร็วอากาศที่ได้จากการทดลองของหัวดูดอากาศ ขนาด $0.114 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ช่องทางเข้าของอากาศแต่ละช่อง (Z_1) ระยะ Y_1 , Z_2 และที่ระยะ Y_1 , Z_3 เมื่อพิจารณาความเร็วในแนวแกน X พบว่าความเร็วอากาศในแนวแกน X ของแต่ละตำแหน่งนั้นมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน เมื่อพิจารณาความเร็วในแนวแกน Z จะเห็นว่าความเร็วอากาศที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการจำลองแบบราบเรียบกับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- ω SST นั้นมีค่าใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับการผลการทดลองในกรณีที่ 1

4.3.3 กรณีที่ 3 หัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m

1) ความเร็วของอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1 , Z_1 ดังแสดงในรูปที่ 4.44 และ 4.45 ตามลำดับ

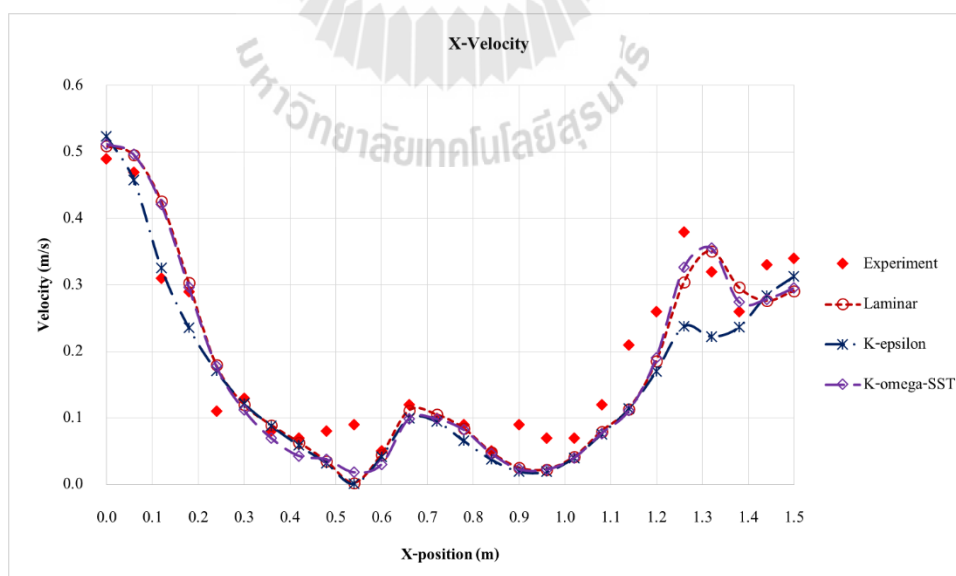


รูปที่ 4.44 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1 , Z_1

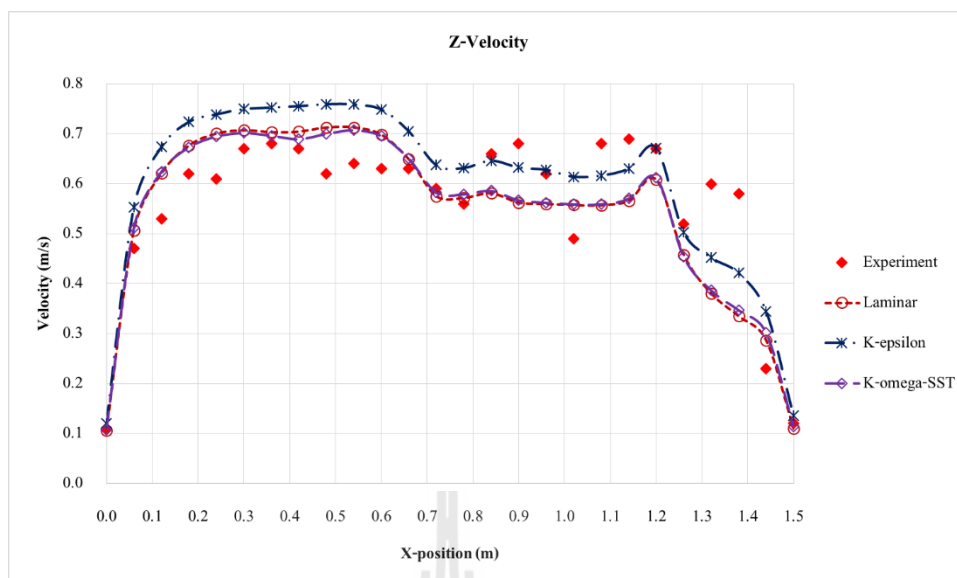


รูปที่ 4.45 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_1

2) ความเร็วของอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1, Z_2 ดังแสดงในรูปที่ 4.46 และ 4.47 ตามลำดับ

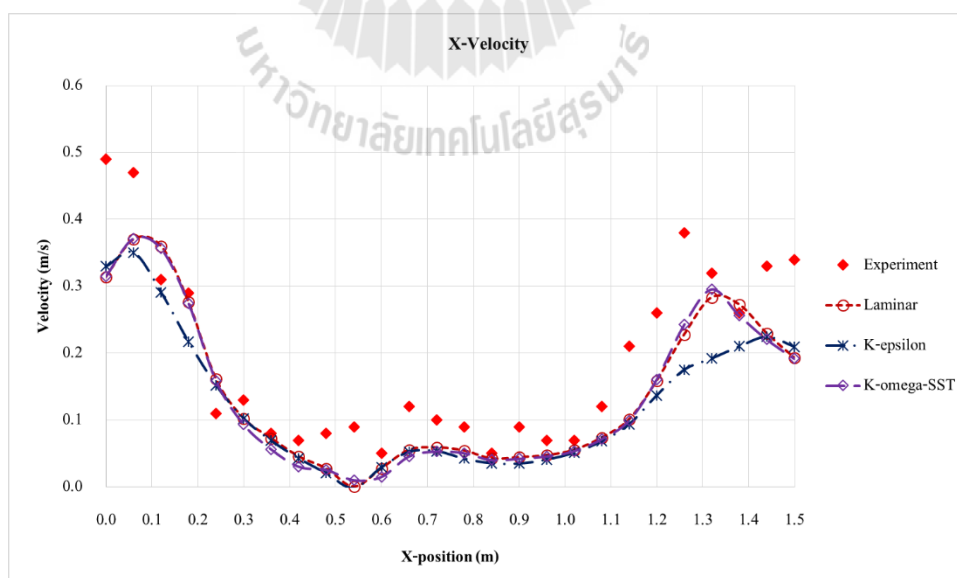


รูปที่ 4.46 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวดูดอากาศขนาด $0.174 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2

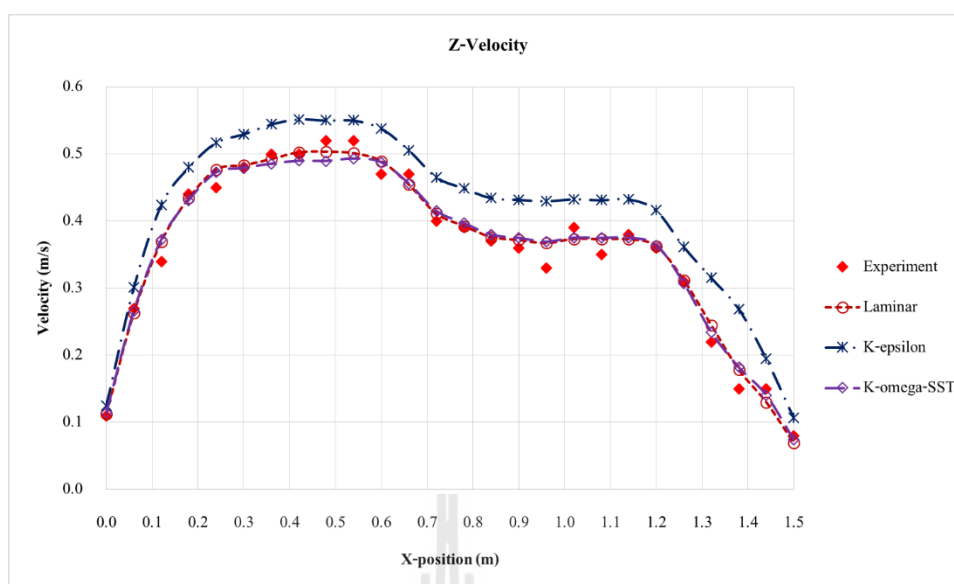


รูปที่ 4.47 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวคูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_2

3) ความเร็วของอากาศแนวแกน X และแนวแกน Z ที่ระยะ Y_1, Z_3 ดังแสดงในรูปที่ 4.48 และ 4.49 ตามลำดับ



รูปที่ 4.48 ความเร็วอากาศแนวแกน X ของหัวคูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3

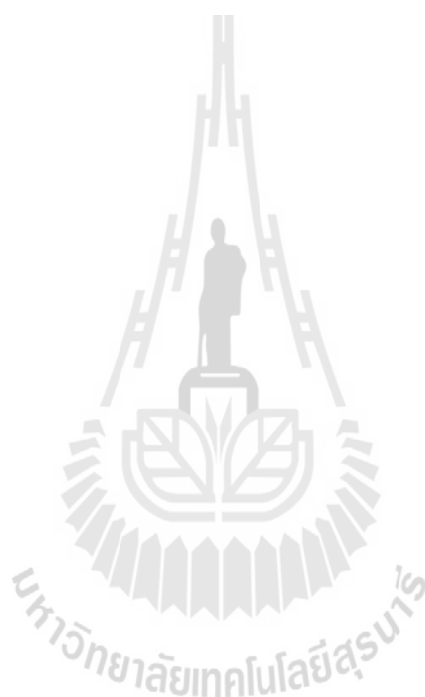


รูปที่ 4.49 ความเร็วอากาศแนวแกน Z ของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะ Y_1, Z_3

จากรูปที่ 4.44 ถึง 4.49 เป็นการเปรียบเทียบผลของความเร็วอากาศที่ได้จากการจำลองทั้ง 3 รูปแบบกับผลของความเร็วอากาศที่ได้จากการทดลองของหัวดูดอากาศขนาด $0.171 \times 1.500 \times 0.228$ m ที่ระยะต่าง ๆ เมื่อพิจารณาความเร็วในแนวแกน X และแนวแกน Z พบว่าความเร็วอากาศของแต่ละตำแหน่งนั้นมีแนวโน้มไปในทางกับความเร็วของอากาศที่ได้จากการจำลองแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน k- ω SST นั้นมีค่าใกล้เคียงกันและใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุดส่วนความเร็วจากแบบจำลอง k- ϵ จะมีค่าที่แตกต่างจากผลการทดลองอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบค่าของความเร็วอากาศจากการทดลองหัวดูดอากาศกับผลของความเร็วอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดที่ทำการทดลองพบว่าความเร็วอากาศในแนวแกน X และแนวแกน Z นั้น มีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ซึ่งความเร็วที่ได้จากการทดลองนั้นใกล้เคียงกับผลการจำลองแบบราบเรียบ กับแบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน k- ω SST เนื่องจากการจำลองทั้ง 2 แบบนั้นให้ผลเช่นเดียวกันแต่การใช้แบบจำลองแบบราบเรียบจะใช้เวลาในการคำนวณที่น้อยกว่าการจำลองด้วยแบบจำลอง k- ω SST ซึ่งเป็นการจำลองแบบปั่นป่วนมีสมการในการแก้ปัญหาที่ซับซ้อน จึงใช้เวลาในการคำนวณที่มากกว่า ดังนั้นจากการทดลองหัวดูดอากาศสามารถสรุปได้ว่าผลการจำลองคอมพิวเตอร์สอดคล้องกับผลการทดลอง (นั้น

คือ การกำหนดค่าการจำลองผลมีความน่าเชื่อถือ) และการจำลองการไหลแบบราบเรียบมีความเหมาะสมในการใช้จำลองหัวตุ่



บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

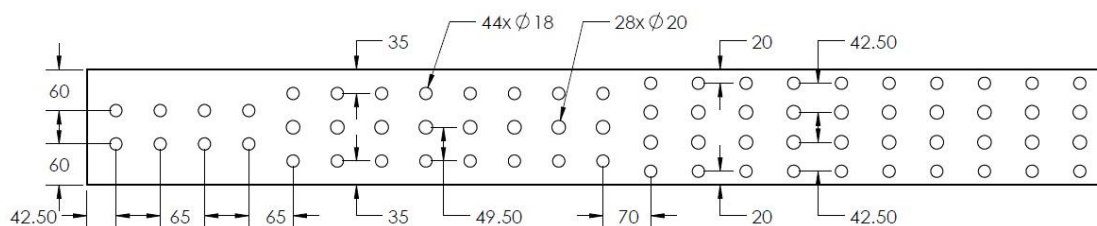
จากการศึกษาการระบายอากาศในกระบวนการชุบโลหะ ทำให้พบว่าหัวดูดอากาศที่ใช้ในการชุบโลหะที่ใช้ในปัจจุบันนั้นไม่สามารถระบายที่มีสารปนเปื้อนออกจากพื้นที่ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงได้มีการออกแบบหัวดูดอากาศสำหรับใช้ในการระบายอากาศในกระบวนการชุบโลหะ โดยการศึกษาพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่มีผลต่อการออกแบบหัวดูดอากาศคือ ความสูงและความกว้างของหัวดูดอากาศ และรูปทรงการเจาะช่องทางเข้าของอากาศที่ทำให้ความเร็วอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศนั้นสม่ำเสมอตลอดความยาวหัวดูด และแบบจำลองการไหลที่เหมาะสมกับการออกแบบหัวดูดอากาศ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1.1 เปรียบเทียบผลการทดลองกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

จากผลการทดลองหัวดูดอากาศเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองพฤติกรรมกรไหลเพื่อออกแบบหัวดูดอากาศนั้น โดยเปรียบเทียบความเร็วในแนวแกน X และความเร็วในแนวแกน Z จากการเปรียบเทียบค่าของความเร็วอากาศจากการทดลองหัวดูดอากาศกับผลของความเร็วอากาศที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ คือ จำลองการไหลแบบราบเรียบ จำลองการไหลแบบปั่นป่วนด้วยแบบจำลอง $k-\epsilon$ และแบบจำลอง $k-\omega$ SST ของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาดที่ทำการทดลองพบว่าความเร็วอากาศในแนวแกน X และแนวแกน Z นั้น มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันและเมื่อเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์แต่ละแบบพบว่าความเร็วที่ได้จากการทดลองนั้นใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการจำลองการไหลแบบราบเรียบ กับการจำลองแบบปั่นป่วน $k-\omega$ SST ดังนั้นการจำลองการไหลที่เหมาะสมกับการออกแบบหัวดูดอากาศที่ทำให้ความเร็วอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศมีความสม่ำเสมอคือการจำลองแบบราบเรียบ

5.1.2 ออกแบบตำแหน่งช่องทางเข้าของอากาศ

ตำแหน่งและขนาดในการเจาะช่องทางเข้าของอากาศเพื่อให้ความเร็วอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศสม่ำเสมอตลอดความยาวของหัวดูดอากาศ ดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ผลการออกแบบขนาดและตำแหน่งของช่องทางเข้าของอากาศ

5.1.3 การเพิ่มความสูงของหัวดูดอากาศ

เมื่อความสูงของหัวดูดอากาศเพิ่มมากขึ้นค่าความเร็วของอากาศจะแตกต่างกันในช่วงที่อยู่ใกล้ด้านหน้าหัวดูดอากาศเท่านั้น ($Z = 0.115 \text{ m}$) ความเร็วของอากาศในช่วงนี้สามารถเรียงลำดับความเร็วของอากาศตามความสูงของหัวดูดอากาศได้ดังนี้ หัวดูดอากาศที่มีความสูงเท่ากับ 0.171 m , 0.228 m และ 0.285 m ตามลำดับซึ่งจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แต่เมื่อระยะห่างจากด้านหน้าของหัวดูดอากาศเพิ่มขึ้น ($Z > 0.310 \text{ m}$) ซึ่งเป็นตำแหน่งที่สนใจ ความเร็วของอากาศในแต่ละระยะของหัวดูดอากาศทั้ง 3 ขนาด จะมีค่าใกล้เคียงกันมาก เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะเมื่อเปรียบเทียบขนาดความสูงของหัวดูดในขณะที่ขนาดของท่อดูดที่ต่อเข้ากับหัวดูดยังเท่าเดิม ย่อมไม่ส่งผลให้อัตราการดูดอากาศที่ถูกดูดเข้าสู่หัวดูดมีการเปลี่ยนแปลงนั่นคือ ที่อัตราการดูดคงที่ค่าหนึ่ง การเปลี่ยนความสูงของหัวดูดไม่ส่งผลต่อการกระจายแรงดูดของหัวดูด ดังนั้นในการสร้างหัวดูดอากาศเพื่อนำไปใช้ในกระบวนการชุบโลหะ ควรเลือกขนาดความสูงของหัวดูดที่น้อยที่สุดคือเท่ากับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ เพื่อให้ง่ายต่อการต่อหัวดูดเข้ากับท่อ และไม่กีดขวางการทำงาน

5.1.4 การเพิ่มความกว้างของหัวดูดอากาศ

เมื่อความกว้างของหัวดูดอากาศเพิ่มขึ้น จะทำให้ความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น และเมื่อเพิ่มความกว้างของหัวดูดอากาศให้มากขึ้นจนถึงค่าความกว้างของหัวดูดอากาศค่าหนึ่งความเร็วของอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง เหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะ เมื่อเปรียบเทียบขนาดความกว้างของหัวดูดในขณะที่ขนาดของท่อดูดที่ต่อเข้ากับหัวดูดยังเท่าเดิม ย่อมไม่ส่งผลให้อัตราการดูดอากาศเข้าสู่หัวดูดเปลี่ยนแปลง เมื่ออัตราการดูดคงที่การกระจายความเร็วของอากาศจึงไม่เปลี่ยนแปลง แม้จะเปลี่ยนความกว้างของหัวดูดก็ตาม ซึ่งในการใช้งานจริงเนื่องจากหัวดูดอากาศถูกติดตั้งตามแนวยาวของถังชุบโลหะซึ่งถูกวางเรียงกันตามขั้นตอนของการชุบโลหะ การเพิ่มความกว้างของหัวดูดอากาศให้มากขึ้นนั้นอาจจะทำให้เกิดการกีดขวางการทำงานได้ จึงควรเลือกขนาดความกว้างของหัวดูดอากาศที่น้อยที่สุดคือขนาดเท่ากับเส้น

ผ่านศูนย์กลางของท่อเพื่อเป็นการลดพื้นที่ในการติดตั้งตัวดูดอากาศ และความสะดวกในการชุบโลหะ

5.1.5 การออกแบบรูปทรงช่องทางเข้าของอากาศ

เมื่อทำการปรับรูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศเป็นรูปทรงต่าง ๆ โดยให้พื้นที่ในการเจาะช่องเท่ากัน และวางในตำแหน่งเดียวกัน ผลของความเร็วอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศนั้น จะไม่มีการเปลี่ยนแปลง จึงสรุปได้ว่าความเร็วของอากาศในแต่ละระยะในแนวแกน X ไม่ได้ขึ้นอยู่กับรูปทรงของช่องทางเข้าของอากาศแต่จะขึ้นอยู่กับพื้นที่ในการเจาะช่องทางเข้าของอากาศตามสมการที่ 4.1

$$A = 0.006X + 0.362 \quad cm^2 \quad (4.1)$$

เมื่อ A คือ พื้นที่การเจาะช่องทางเข้าของอากาศในแนวแกน X
 X คือ ตำแหน่งในแนวแกน X โดยที่ X มากกว่า 0

หากเจาะช่องทางเข้าของอากาศตามสมการที่ 4.1 จะทำให้ความเร็วอากาศด้านหน้าหัวดูดอากาศนั้นสม่ำเสมอตลอดความยาวของหัวดูดอากาศ และจากการออกแบบพบว่าการใช้หัวดูดอากาศขนาดเท่าเดิมและเจาะช่องทางเข้าของอากาศเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูดังที่แสดงในผลการออกแบบนั้น เป็นการเจาะช่องทางเข้าที่เหมาะสมที่สุดเนื่องจากสามารถทำได้ง่ายและสะดวกในการสร้างเพื่อนำไปใช้งานจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 เนื่องจากงานวิจัยนี้ไม่ได้สนใจความเร็วของอากาศภายในท่อซึ่งอาจมีการสูญเสียเนื่องจากการไหลเกิดขึ้นดังนั้นในการออกแบบครั้งต่อไปควรศึกษาการสูญเสียภายในท่อด้วย

5.2.2 ในการวัดค่าการทดลองควรวัดค่าความเร็วในแนวแกน Y เพิ่มเนื่องจากในงานวิจัยมีข้อจำกัดเรื่องความสามารถของเครื่องมือวัดจึงวัดความเร็วในแนวแกน Y ได้ยากและเกิดความผิดพลาดในการอ่านค่า

รายการอ้างอิง

- กิริติ สุกัญญ์ (2553). **พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ**. สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชา วิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- สุนทรี พักเย็น (2551). **การออกแบบระบบระบายอากาศเพื่อกำจัดฝุ่น : กรณีศึกษาการระบายอากาศ สำหรับขั้นตอนการเตรียมผ้าของโรงงานฟอกย้อม**. บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ศรีรัตนา วาณิชชิตศักดิ์ และชวลิต กิตติชัยการ (2552). **การออกแบบระบบระบายอากาศใน โรงงานผลิตสารเคมี กรณีศึกษาการระบายอากาศในห้อง PL-Z. วิศวกรรมสาร มก. ฉบับที่ 69 ปีที่ 22 สิงหาคม – ตุลาคม 2552.**
- เมธี เพชรณิโชติ (2006) **Air Pollution Control System Guide Book**. ENCO ENGINEERING AND TRADING CO.,LTD.
- รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา อยู่สุข, **การตรวจสอบระบบระบายอากาศ**. ภาควิชาอาชีวอนามัยและความปลอดภัย คณะสาธารณสุขศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม, **หลักปฏิบัติเพื่อป้องกันมลพิษ (เทคโนโลยีการผลิตที่สะอาด) สำหรับอุตสาหกรรมรายสาขาขุบโลหะ INDUSTRIAL SECTOR CODES OF PRACTICE FOR POLLUTION PREVENTION (CLEANER TECHNOLOGY)**, กรกฎาคม 2548.
- สำนักอนามัย กรุงเทพมหานคร, **คู่มือการประกอบกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพประเภทการผลิต โลหะเป็นภาชนะ เครื่องมือ เครื่องจักร อุปกรณ์หรือเครื่องใช้ต่าง ๆ**.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2547. **ตำราระบบบำบัดมลพิษอากาศ**. ศูนย์บริการวิชาการแห่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ
- ประกาศกระทรวงมหาดไทย. 2520. **ความปลอดภัยในการทำงานเกี่ยวกับภาวะแวดล้อม (สารเคมี)** พ.ศ. 2520. กระทรวงมหาดไทย, กรุงเทพฯ.

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (1998). **Industrial Ventilation A manual of Recommended Practice**. 23rd Edition. Kemper Meadow Drive Cincinnati, Ohio.
- Henry J. McDermott, **Handbook of Ventilation for Contaminant Control**. (Including OSHA Requirements), 1977.
- D. Jeff Burton, PE, CSP, CIH, **Industrial Ventilation**, 1995.
- Loren Cook Company, **Engineering Cook Book A Handbook for the Mechanical Design**. 2nd Edition, 1999.
- Richard G. Bond, M.S., MPH, Conrad P. Straub, Ph.D., **Handbook of Environmental Control Volume : Air Pollution**, 1974.
- Anthony J. Buonicore, Wayne T. Davis, **Air Pollution Engineering Manual**, 1992.
- Vincent Cavaseno, **Industrial air Pollution Engineering**. 1980.
- Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers, **Odor Control in Wastewater Treatment Plants**, 1995
- Federation of Electro Plating Industry Association, Japan, **Electroplating Industry** January 2001
Revised: March 2002
- Mechanical Exhaust Ventilation Systems Design**. Calculations, and Operational Guidelines, California Conference of Directors of Environmental Health September, 2000
- P.J. Witt, C.B. Solnordal, L.J. Mittoni, S. Finn, J. Pluta (2006). **Optimising the design of fume extraction hoods using a combination of engineering and CFD modelling**. Applied Mathematical Modelling. 30 (2006) 1167–1179
- Chandra Manik, Peh Jingpeng. (2008). **High Performance Low Flow Fume Hood Design**.

ภาคผนวก ก

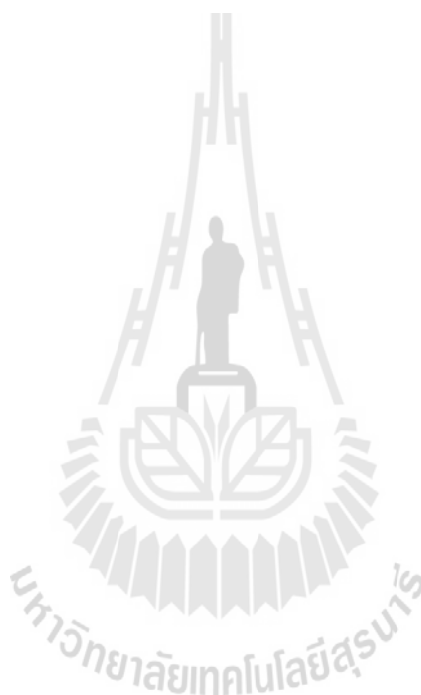
บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

ภัทรพันธุ์ ทมาตเก้ง กิริติ สุลักษณ์ (2557) การจำลองพฤติกรรมกรไหลเพื่อออกแบบหัวสุดที่เหมาะสมสำหรับถังขุบโลหะ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 (ME-NETT) 15-17 ตุลาคม 2557 จ.ขอนแก่น

ภัทรพันธุ์ ทมาตเก้ง กิริติ สุลักษณ์ (2558) การจำลองพฤติกรรมกรไหลเพื่อออกแบบช่องทางเข้าของอากาศสำหรับหัวดูดอากาศที่ใช้ในกระบวนการขุบโลหะ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 (ME-NETT) 1-3 กรกฎาคม 2558 จ.นครราชสีมา



ภาคผนวก ข

แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1. Standard k-epsilon model (k-ε)

k-epsilon (k-ε) turbulence model is the most common model used in Computational Fluid Dynamics (CFD) to simulate mean flow characteristics for turbulent flow conditions. It is a two equation model which gives a general description of turbulence by means of two transport equations (PDEs). The original impetus for the K-epsilon model was to improve the mixing-length model, as well as to find an alternative to algebraically prescribing turbulent length scales in moderate to high complexity flows.

- The first transported variable determines the energy in the turbulence and is called turbulent kinetic energy (k).
- The second transported variable is the turbulent dissipation (ε) which determines the rate of dissipation of the turbulent kinetic energy. For turbulent kinetic energy (k)

Standard k-ε turbulence model

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \varepsilon$$

For dissipation ε

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

Modeling turbulent viscosity

$$\mu_t = -\rho \bar{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j},$$

where

u_i represents velocity component in corresponding direction

E_{ij} represents component of rate of deformation

μ_t represents eddy viscosity

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Production of k

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$P_k = \mu_t S^2$$

Where S is the modulus of the mean rate-of-strain tensor, defined as :

$$S \equiv \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

Effect of buoyancy

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$$

Where Pr_t is the turbulent Prandtl number for energy and g_i is the component of the gravitational vector in the i th direction. For the standard and realizable - models, the default value of Pr_t is 0.85. The coefficient of thermal expansion, β , is defined as

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

Model constants

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0 \text{ and } \sigma_\varepsilon = 1.0$$

2. SST k- ω model (k- ω SST)

The SST k- ω turbulence model [Menter 1993] is a two-equation eddy-viscosity model which has become very popular. The shear stress transport (SST) formulation combines the best of two worlds. The use of a k- ω formulation in the inner parts of the boundary layer makes the model directly usable all the way down to the wall through the viscous sub-layer, hence the SST k- ω model can be used as a Low-Re turbulence model without any extra damping functions. The SST formulation also switches to a k- ϵ behavior in the free-stream and thereby avoids the common k- ω problem that the model is too sensitive to the inlet free-stream turbulence properties. Authors who use the SST k- ω model often merit it for its good behavior in adverse pressure gradients and separating flow. The SST k- ω model does produce a bit too large turbulence levels in regions with large normal strain, like stagnation regions and regions with strong acceleration. This tendency is much less pronounced than with a normal k- ϵ model though.

Kinematic eddy viscosity

$$\nu_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)}$$

Turbulence kinetic energy

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_k \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]$$

Specific Dissipation Rate

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}$$

Closure coefficients and auxiliary relations

$$F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2} \right) \right]^2 \right]$$

$$P_k = \min \left(\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10\beta^* k \omega \right)$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\}$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho\sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$$

$$\phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$$

Constants

k- ω Closure

$$\sigma_{k1} = 0.85, \sigma_{\omega 1} = 0.65, \beta_1 = 0.075$$

k- ε Closure

$$\sigma_{k2} = 1.00, \sigma_{\omega 2} = 0.856, \beta_2 = 0.0828$$

SST Closure constants

$$\beta^* = 0.09, a_1 = 0.31$$

Boundary and far field conditions

Far Field

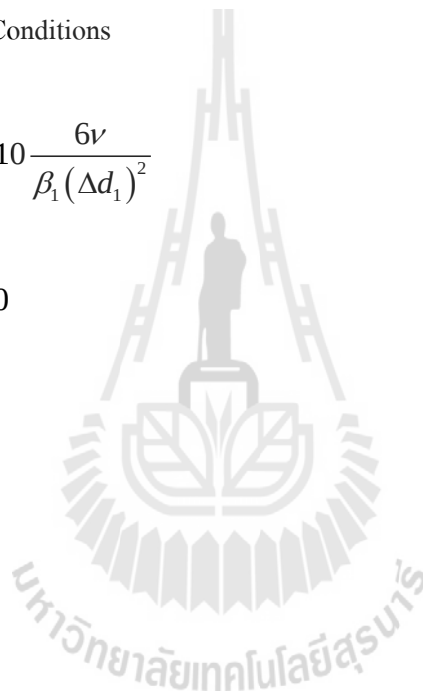
$$\frac{U_{\infty}}{L} < \omega_{farfield} < 10 \frac{U_{\infty}}{L}$$

$$\frac{10^{-5} U_{\infty}^2}{\text{Re}_L} < k_{farfield} < \frac{0.1 U_{\infty}^2}{\text{Re}_L}$$

Boundary/Wall Conditions

$$\omega_{wall} = 10 \frac{6\nu}{\beta_1 (\Delta d_1)^2}$$

$$k_{wall} = 0$$



ประวัติผู้เขียน

นายภัทรพันธุ์ ทมตัง เกิดเมื่อวันที่ 25 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2533 เริ่มศึกษาชั้นประถมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนบ้านขาด ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 1-6 ที่โรงเรียนศรีเมืองวิทยาคาร จังหวัดอุบลราชธานี และสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมอากาศยาน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในปีการศึกษา 2555 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาตรีแล้วได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในขณะที่เรียนได้มีโอกาสเป็นวิทยากรในการฝึกอบรมการใช้คอมพิวเตอร์ช่วยวิเคราะห์ในงานออกแบบงานวิศวกรรม(กลศาสตร์ของไหล) สำหรับนักศึกษาและบุคคลทั่วไป และได้มีโอกาสสอนในรายวิชาปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล เขียนแบบวิศวกรรม และเขียนแบบทางกล

ผลงานวิจัยได้เข้าร่วมนำเสนอบทความในการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 28 พ.ศ. 2557 เรื่องการจำลองพฤติกรรมการไหลเพื่อออกแบบหัวดูดอากาศที่เหมาะสมสำหรับถังชุบโลหะ และการประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 29 พ.ศ. 2558 เรื่องการจำลองพฤติกรรมการไหลเพื่อออกแบบช่องทางเข้าของอากาศสำหรับหัวดูดอากาศที่ใช้ในกระบวนการชุบโลหะ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี