



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์
เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี พ.ศ. 2554

เรื่อง

การศึกษาการระบายความร้อนบนผนังที่มีรอยบุ๋ม
Study Flow Characteristics of Heat Transfer on dimple surface

โดย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาณุภูมิ ศรีธรรมรินทร์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ปี พ.ศ. 2554

855	การศึกษาการระบายความร้อนบนผนังที่มีรอยบุ๋ม : รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์	ภาณุภูมิ ศรีธรรมรินทร์	621.4022 ก 414ก 2554 ร.๒	31011105380653
-----	---	------------------------	--------------------------------	----------------

การศึกษาการระบายความร้อนบนผนังที่มีรอยบุ๋ม

โดย

ผศ. ภาณุภูมิ ศรีธรรมรินทร์

บทคัดย่อ

โครงการงานวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตเป็นการศึกษาการระบายความร้อนโดยใช้หัวฉีดกระแทกผนังวัตถุโดยวัตถุที่ใช้ในการทดลองคือแผ่นทองแดง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm โดยมีพื้นผิวแตกต่างกัน คือ แบบแผ่นเรียบ แบบรอยบุ๋ม 1 cm จำนวน 2 แผ่นซึ่งมีระยะห่างระหว่างรอยบุ๋มที่แตกต่างกันคือ $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm และ $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm แบบรอยบุ๋ม 2 cm จำนวน 2 แผ่น ซึ่งมีระยะห่างระหว่างรอยบุ๋มที่แตกต่างกันคือ $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm และ $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm โดยได้แผ่นทองแดงมีเทอร์โมคัปเปิลชนิด T ผูกอยู่เพื่อวัดอุณหภูมิในแต่ละจุดที่ต้องการ การทดลองจะติดตั้งเครื่องกำเนิดความร้อนแบบรีขขนาด 110 วัตต์ สอดไว้ใต้แผ่นทองแดงเพื่อให้เกิดความร้อนอย่างต่อเนื่อง จากนั้นปรับหัวฉีดทำมุม 90° กับแผ่นทองแดง โดยหัวฉีดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1cm หัวฉีดนี้จะฉีดอากาศที่อุณหภูมิห้องที่ $1460 \leq Re \leq 14600$ มากระแทกกับแผ่นทองแดงโดยตรงในขณะที่แผ่นทองแดงได้รับความร้อนซึ่งการฉีดอากาศจะมีระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงดังนี้ ระยะ 6 cm แบบปิด, ระยะ 4 cm แบบปิด, ระยะ 2 cm แบบปิด และ ระยะ 2 cm แบบเปิด เมื่ออุณหภูมิไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา หรือเปลี่ยนแปลงน้อยมาก จึงเริ่มทำการบันทึกผลการทดลอง จากการทดลองพบว่า ในกรณีที่หัวฉีดทำมุม 90° กับแผ่นทดสอบแบบปิด แผ่นทองแดงรอยบุ๋ม 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm ในระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm มีความสามารถในการระบายความร้อนดีที่สุดและในกรณีแบบเปิดก็เช่นเดียวกับแบบปิดคือแผ่นทองแดงรอยบุ๋ม 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm ในระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm มีความสามารถในการระบายความร้อนดีที่สุด โดยทั้ง 2 กรณีสามารถระบายความร้อนได้ดีที่สุดที่ $Re = 14600$

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อน, แผ่นรอยบุ๋ม, นัสเซลนัมเบอร์

Study Flow Characteristics of Heat Transfer on dimple surface

By

Asst.Prof. Parkpoom Sriromreun

Abstract

This engineering project is a Study Flow Characteristics of Heat Transfer on dimple surface. The materials that use for experiment are sheets of copper. Their diameters are 30 centimeters and each sheet of copper is different surface: Smooth , Dimple 1 cm have 2 disc which is the distance between the dimples are different. This one is $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm and $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm, Dimple 2 cm have 2 disc which is the distance between the dimples are different. This one is $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm and $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm under sheet of copper is Thermocouple type T in order the measure temperature each point that we want. This experiment is installed with 110 watt. Heat plate under the sheet of copper in order to make heat continuously. Then adjust jet to make 90° angle with copper. This diameter of jet is 1 cm This jet will spread air at room temperature to hit the sheet of copper directly at $1460 \leq Re \leq 14600$. While the temperature of copper is continue rising, spreading air at room temperature to hit the sheet of copper, the distance of jet and sheets of copper is 6 cm close, 4 cm close, 2 cm close and 2 cm open. If the temperature is stable, we will record the result. For the experiment, it was found that when jet make 90° angle with copper. In case of Close, the copper of dimples surface 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm at the distance between jet and sheet of copper is 2 cm Is the best copper sheet that can be transfer of heat. And in case of open, is same in case close , the copper of dimples surface 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm at the distance between jet and sheet of copper is 2 cm is the best copper sheet that can be transfer of heat. In the 2 case that can be transfer of heat is the best at $Re = 14600$

Key word: Heat transfer, dimple surface, Num

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย จากเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2554 งานวิจัยนี้ได้รับการเอื้อเพื่อให้มีอุปกรณ์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในโครงการจาก อาจารย์ กิตติ สถาพรประสารณ์ และที่สำคัญขอขอบคุณ นายเทิดไทย กิจมงคลวงศ์ นายธีรวิทย์ ประทุมบัวโต และนางสาวพชรพรรณ ศรีทอง ที่ช่วยในการเก็บข้อมูลการทดลอง และสุดท้ายขอบคุณบุคลากรภายในภาควิชาเครื่องกล ที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยนี้



สารบัญ

	หน้าที่
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ณ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
 บทที่ 1 บทนำ	 1
ที่มาและความสำคัญของโครงการ	1
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับโครงการ	2
วัตถุประสงค์ของโครงการ	5
ขอบเขตของโครงการ	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	7
สมการการไหลของของไหล	7
การสูญเสียพลังงานภายในท่อ	7
การไหลภายในท่อ	10
ชนิดการไหลของของไหล(Type of flow)	11
การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน (heat Transfer by Conduction)	14
การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Heat Transfer by Convection)	17
สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน	26
(Convection Heat Transfer Coefficient)	
ปริมาณความร้อนของวัตถุ (Heat,Q)	29
วัสดุฉนวนและวัสดุทนความร้อน (Insulation and Refractory Materials)	30

สารบัญ(ต่อ)

	หน้าที่
บทที่ 3 หลักการออกแบบและวิธีการทดลอง	31
การออกแบบอุปกรณ์สำหรับชุดการทดลอง	31
การออกแบบการคำนวณ	37
บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง	42
วิธีการทดลอง	42
ผลการทดลอง	43
บทที่ 5 สรุป	52
สรุปผลการทดลอง	52
บรรณานุกรม	53
ภาคผนวก	54
ภาคผนวก ก ข้อมูลจากการทดลอง	55
ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ	80
ภาคผนวก ค เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง	83
ภาคผนวก ง ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์ทดลอง	91

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
1.1 คุณสมบัติของแผ่นทดสอบ	5
2.1 Energy and Hydraulic Grand Lines	9
2.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 0 °C	16
2.3 Constant c and the exponent	22
2.4 ค่าคงที่ของ c และ n ใช้ในสมการ 2.33 สำหรับการพาอิสระบนทรงกระบอกในแนวนอน	25
2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k)	25
3.1 การเตรียมชุดทดลองกับแผ่นทองแดงแผ่นเรียบ, รอบนูน 2 cm	37
 ภาคผนวก ก	
ก1 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบเรียบ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง ที่ 2 cm แบบปิด (Flat Plate-2)	56
ก2 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบเรียบ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่น ทองแดงที่ 4 cm แบบปิด (Flat Plate-4)	57
ก3 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบเรียบ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง ที่ 6 cm แบบปิด (Flat Plate-6)	58
ก4 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอบนูน 2 cm $E_r = 6$ cm, $E_\theta = 6$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบปิด (1/15-3d-3d)	59
ก5 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอบนูน 2 cm $E_r = 6$ cm, $E_\theta = 6$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm แบบปิด (1/15-3d-3d)	60
ก6 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอบนูน 2 cm $E_r = 6$ cm, $E_\theta = 6$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 6 cm แบบปิด (1/15-3d-3d)	61
ก7 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอบนูน 2 cm $E_r = 4$ cm, $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบปิด (1/15-2d-1.5d)	62

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้าที่
ก8 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm, $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm แบบปิด (1/15-2d-1.5d)	63
ก9 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm, $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 6 cm แบบปิด (1/15-2d-1.5d)	64
ก10 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm, $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบปิด (1/30-3d-3d)	65
ก11 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm, $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm แบบปิด (1/30-3d-3d)	66
ก12 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm, $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 6 cm แบบปิด (1/30-3d-3d)	67
ก13 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm, $E_\theta = 1.5$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบปิด (1/30-2d-1.5d)	68
ก14 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm, $E_\theta = 1.5$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm แบบปิด (1/30-2d-1.5d)	69
ก15 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm, $E_\theta = 1.5$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 6 cm แบบปิด (1/30-2d-1.5d)	70
ก16 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบเรียบ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง ที่ 2 cm แบบเปิด (Flat Plate-2)	71

สารบัญตาราง(ต่อ)

หน้าที่

ก17	อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบเปิด (1/15-3d-3d)	72
ก18	อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบเปิด (1/15-2d-1.5d)	73
ก19	อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบเปิด (1/30-3d-3d)	74
ก20	อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบเปิด (1/30-2d-1.5d)	75
ก21	ค่าตัวเลขล้นเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบเรียบ (Flat Plate) ที่มีระยะห่าง ระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B) ที่ 2, 4 และ 6 cmแบบปิด	76
ก22	ค่าตัวเลขล้นเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm, $E_\theta = 6$ cm (1/15-6-6) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B) ที่ 2, 4 และ 6 cm แบบปิด	76
ก23	ค่าตัวเลขล้นเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm, $E_\theta = 3$ cm (1/15-4-3) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B) ที่ 2, 4 และ 6 cm แบบปิด	77
ก24	ค่าตัวเลขล้นเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm, $E_\theta = 3$ cm (1/30-3-3) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B) ที่ 2, 4 และ 6 cm แบบปิด	77
ก25	ค่าตัวเลขล้นเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm, $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2-1.5) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B) ที่ 2, 4 และ 6 cm แบบปิด	78
ก26	ค่าตัวเลขล้นเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบ(Flat Plate), รอยนูน 2 cm โดยมี 2 แผ่น แตกต่างกันดังนี้ $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm (1/15-3d-3d) และ $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/15-2d-1.5d), รอยนูน 1 cm โดยมี 2 แผ่นแตกต่างกันดังนี้ $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/30-3d-3d) และ $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2d-1.5d)ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B) ที่ 2 cm แบบเปิด	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้าที่
1.1 ภาพการทดลองของ Z.B. Yan และคณะ [1]	3
1.2 ภาพการทดลองของ Z.B. Yan และคณะ [1]	3
1.3 ภาพการทดลองของ Mangesh Chaudhari และคณะ [2]	4
1.4 ภาพการทดลองของ Mangesh Chaudhari และคณะ [2]	4
2.1 แสดงตำแหน่งของชุดเทอมที่ท่อเวนจูรี	10
2.2 โพรไฟล์ความเร็วของการไหลภายในท่อ	11
2.3 การไหลแบบทิศทางเดียว สองทิศทาง และสามทิศทาง	13
2.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำแบบ 1 มิติ	16
2.5 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิบนแผ่นวัตถุร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับ	18
2.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุของการพาความร้อนแบบอิสระ	21
2.7 ชั้นขอบเขตความร้อนสำหรับการไหลบนแผ่นราบ	27
ก) ชั้นขอบเขตความร้อน	27
ข) การกระจายอุณหภูมิเมื่อ $Pr = 1.0$	28
2.8 แผนภาพอุณหภูมิของชั้นขอบเขตความร้อน	29
3.1 ตำแหน่ง Thermocouple บนแผ่นทองแดงในการวัดอุณหภูมิ	31
3.2 แผ่นทองแดงแบบเรียบ (Flat Plate Plate)	38
3.3 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm (1/15-6-6)	38
3.4 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/15-4-3)	38
3.5 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/30-3-3)	39
3.6 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2-1.5)	39
3.7 เทอร์โมคัปเปิล (Type T) วัดอุณหภูมิแผ่นทองแดง	39
3.8 ไลอะแกรมแสดงการติดตั้งอุปกรณ์	40
3.9 ไลอะแกรมแสดงอุปกรณ์บริเวณแผ่นทดสอบ	40

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้าที่
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบ	43
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm	44
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm	45
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm	46
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm	47
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของระยะห่างระหว่างหัวฉีด กับแผ่น ทองแดง ที่ 2 cm	48
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของระยะห่างระหว่างหัวฉีด กับแผ่นทองแดง ที่ 4 cm	49
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของระยะห่างระหว่างหัวฉีด กับแผ่นทองแดง ที่ 6 cm	50
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของระยะห่างระหว่างหัวฉีด กับแผ่นทองแดง ที่ 2 cm	51
ภาคผนวก ค	
ค1 แผ่นทองแดงแบบเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm (Flat Plate)	84
ค2 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm (1/15-3d-3d)	84
ค3 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/15-2d-1.5d)	85
ค4 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/30-3d-3d)	85
ค5 แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2d-1.5d)	86
ค6 Heat plate	86
ค7 Rotameter วัดอัตราการไหลของอากาศในช่วง 10-100 LPM	87
ค8 Thermocouple Type T	87

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้าที่
ค9 DATA LOCKER รุ่น MW100	88
ค10 แผ่นอะคลิลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm	88
ค11 ปืนลม	89
ค12 เกจวัดความดันและตัวรับค่าความดัน	89
ค13 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ	90
ภาคผนวก ง	
ง1 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง 2 cm แบบปิด	92
ง2 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง 4 cm แบบปิด	92
ง3 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง 6 cm แบบปิด	93
ง4 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง 2 cm แบบเปิด	93
ง5 แผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate)	94
ง6 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm (1/15-6-6)	94
ง7 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/15-4-3)	95
ง8 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/30-3-3)	95
ง9 แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2-1.5)	96

บทที่ 1

บทนำ

แนวความคิดที่สำคัญหรือสมมุติฐาน

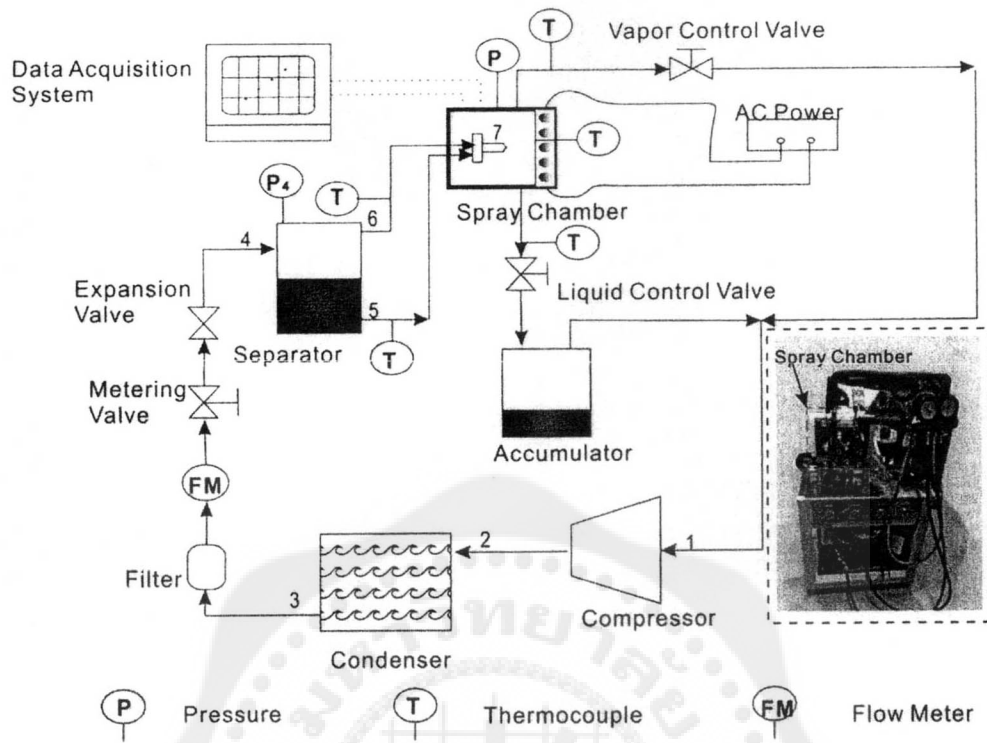
ในปัจจุบันปัญหาเรื่องการใช้พลังงานมีความสำคัญมากขึ้น ทั้งจากปัญหามลภาวะที่มีที่มาจากการผลิตพลังงาน และผลจากการนำพลังงานไปใช้ทำให้เกิดมลภาวะทั้งทางอากาศ และแหล่งน้ำเป็นต้น และปัญหาการขาดแคลนพลังงาน จากการใช้พลังงานที่เพิ่มสูงขึ้น และไม่มีประสิทธิภาพ ส่งผลให้ราคาพลังงานเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องดังนั้นการจัดการใช้พลังงานให้มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญทั้งในการลดมลภาวะทั้งทางตรงและทางอ้อม อีกทั้งยังสามารถลดต้นทุนทางพลังงานได้อีกด้วย ซึ่งอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนก็เป็นอีกหนึ่งอุปกรณ์ที่มีการใช้พลังงานอย่างมากแต่ประสิทธิภาพที่ได้ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งเพื่อป้อนให้กับของไหลเพื่อให้ไหลผ่านอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน จากการที่อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะมีความต้านทานการไหลของของไหลสูงมาก จากลักษณะอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนที่มีครีบกอยขวางการไหลเพื่อให้ของไหลเคลื่อนที่เป็นเวลานานในอุปกรณ์ ทำให้เพิ่มช่วงเวลา และพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อนทำให้ค่าความร้อนที่ได้มีค่าสูง แต่สิ่งที่ตามมาคือพลังงานที่ใช้ในการป้อนให้ของไหลก็ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นไปด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงขึ้นจึงเป็นการเพิ่มค่าการแลกเปลี่ยนความร้อน และการลดค่าพลังงานที่ป้อนให้กับของไหล

การพัฒนาอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีอยู่สองลักษณะคือ การเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน และการทำให้ลักษณะการไหลของของไหลเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อช่วยในการแลกเปลี่ยนความร้อน แต่ทั้งสองแบบจะมีอุปกรณ์ต่างๆ มาขวางการเคลื่อนที่ของของไหล ทำให้ต้องใช้พลังงานมากในการป้อนของไหลผ่านอุปกรณ์ดังกล่าว ด้วยเหตุนี้จึงมีแนวความคิดที่จะทำพื้นผิวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนเป็นรอยนูนซึ่งจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการแลกเปลี่ยนความร้อน และเป็นการทำให้การไหลของของไหลเป็นแบบปั่นป่วน แต่ไม่ขัดขวางทิศทางการไหลโดยตรงจึงจะทำให้พลังงานที่ป้อนให้ของไหลไหลผ่านอุปกรณ์มีการใช้พลังงานลดลง

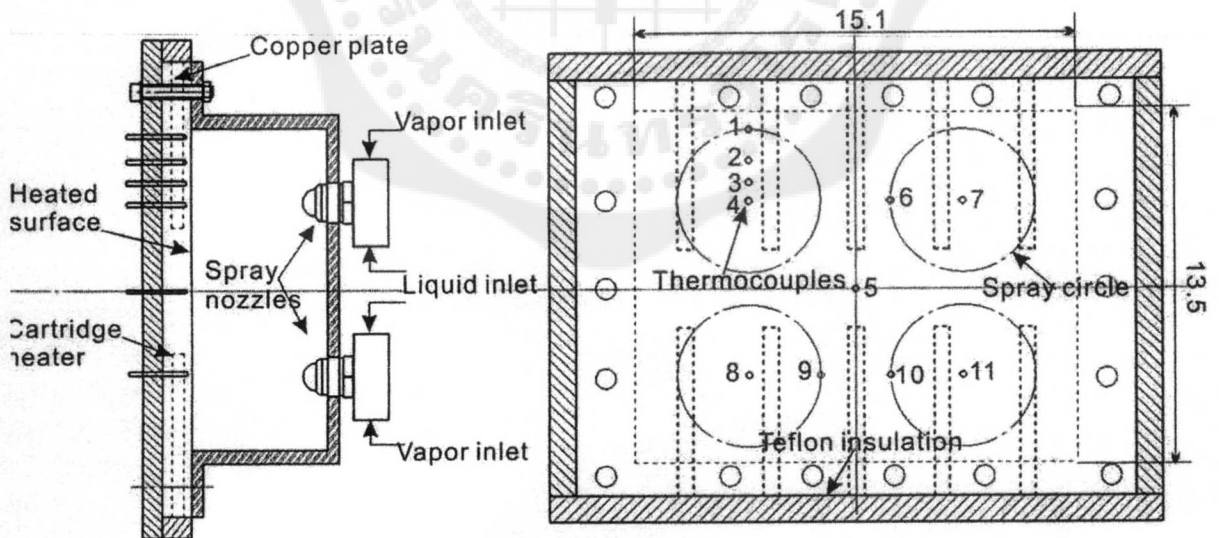
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะเป็นการศึกษาถึงผลของพื้นผิวที่เป็นรอยนูนที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อน โดยจะมีอากาศไหลมาเป็นลำเจ็ทกระทบกับพื้นผิวทั้งแบบลำเดียวว่าจะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนความร้อนสูงมากน้อยเพียงใด

เอกสารที่เกี่ยวข้องกับโครงการ (Literature review)

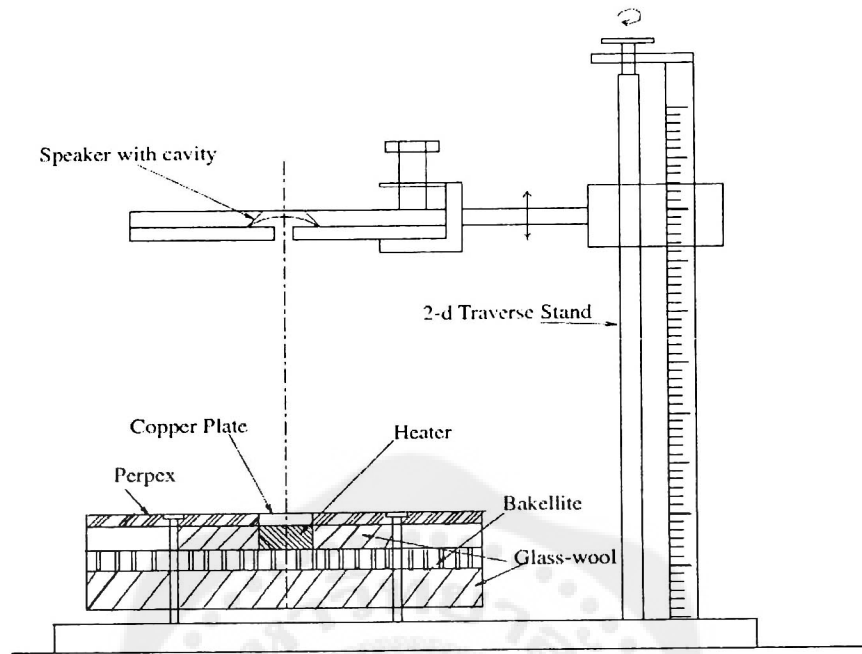
Z.B. Yan และคณะ[1] ได้ทำการศึกษาการทำความเย็นของสเปรย์แบบกระแทก ดำเนินการโดยใช้ฮีทเตอร์จำลองวงจรอิเล็กทรอนิกส์ในการทดลอง ซึ่งใช้ R134a เป็นของเหลว และมีการปรับเปลี่ยนทางออกของสเปรย์เป็นสี่ทาง เพื่อช่วยให้ไอมีการกระจายตัวได้ครอบคลุมพื้นที่ทดสอบ การทดลองจะเน้นถึงผลกระทบของอัตราการไหล, ความดันขาเข้าที่หัวฉีด และความดันห้องสเปรย์ จากผลการทดลองจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุด $5596 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ ที่ฟลักซ์ความร้อนที่ป้อนประมาณ $50,000 \text{ W/m}^2$ ซึ่งในการศึกษานี้ พบว่าการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำความเย็นให้ดีขึ้นนั้นสามารถทำได้โดยการเพิ่มอัตราการไหล, ความดันขาเข้าที่หัวฉีด และความดันห้องสเปรย์ Mangesh Chaudhari และคณะ [2] ได้ทำการศึกษาเรื่องลักษณะลำเจ็ทของของไหล ที่มีการปรับปรุงลักษณะของลำเจ็ทโดยให้มีทางเข้าหลายทางเพื่อปรับปรุงการถ่ายเทความร้อนโดยวิธีการกระแทก การทดลองทำที่ค่า Reynolds number ของเส้นผ่านศูนย์กลางลำเจ็ทในช่วง 1000-2600 ระยะทางตามแนวแกนปกติจะอยู่ในช่วง 1-30 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสูงสุดมีค่าประมาณ 12 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนแบบ free convection และสูงถึง 30% เมื่อเทียบกับลำเจ็ทที่มีทางเข้าเดียว



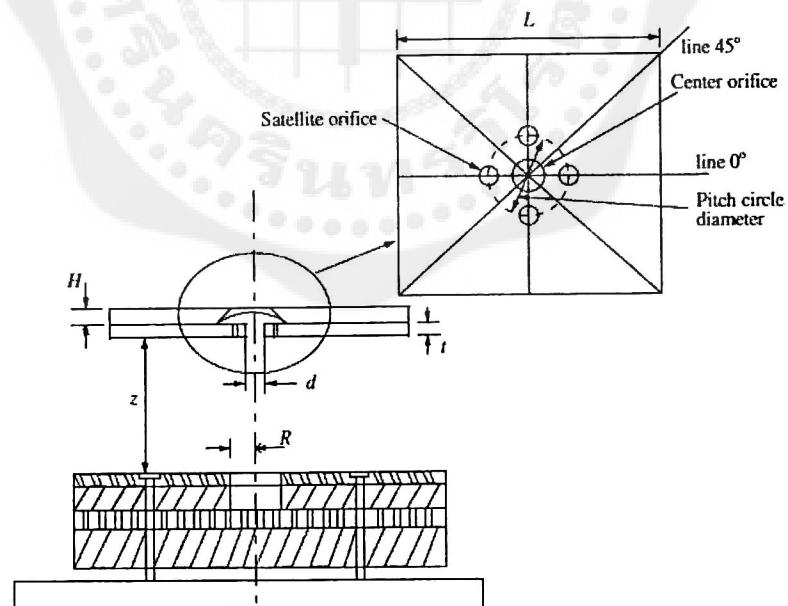
รูปที่ 1.1 ภาพการทดลองของ Z.B. Yan และคณะ [1]



รูปที่ 1.2 ภาพการทดลองของ Z.B. Yan และคณะ [1]



รูปที่ 1.3 ภาพการทดลองของ Mangesh Chaudhari และคณะ [2]



รูปที่ 1.4 ภาพการทดลองของ Mangesh Chaudhari และคณะ [2]

วัตถุประสงค์

1. ออกแบบและสร้างพื้นผิวที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบมีรอยนูน
2. ออกแบบและสร้างชุดทดลองหาประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนของพื้นผิวที่มีรอยนูน
3. ทดลองเพื่อหาค่าการแลกเปลี่ยนความร้อน Nu_m
4. เปรียบเทียบความสามารถระหว่างการระบายความร้อนของแผ่นทดลองที่มีผิวอากาศสัมผัส ระยะห่างหัวฉีด และความเร็วของอากาศที่แตกต่างกัน

ขอบเขตโครงการวิศวกรรม

1. ใช้อากาศเป็นของไหลในการทดสอบ ซึ่งจะให้อากาศเคลื่อนที่กระแทกไปยังแผ่นทดสอบ
2. แผ่นทดสอบที่ใช้เป็นแผ่นทองแดงหนาประมาณ 0.4 cm มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 30 cm ประกอบด้วย 5 แผ่นทดสอบคือ
 - 2.1 แผ่นเรียบ (Flat Plate)
 - 2.2 แผ่นที่มีรอยนูนจำนวน 4 แผ่น โดยมีความแตกต่างกันดังนี้

ตารางที่ 1.1 คุณสมบัติของแผ่นทดสอบ

อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่าน ศูนย์กลางรอยนูนกับแผ่น ทดสอบ	ระยะห่างระหว่าง ศูนย์กลางของรอยนูนตาม แนวรัศมี	ระยะห่างระหว่างศูนย์กลาง ของรอยนูนตามแนว เส้นรอบวง	คำย่อ $d/D - E_r - E_\theta$
d/D	E_r	E_θ	
$2/30 = 1/15$	3d (6cm)	3d (6cm)	1/15-3d-3d
$2/30 = 1/15$	2d (4cm)	1.5d (3cm)	1/15-2d-1.5d
1/30	3d (3cm)	3d (3cm)	1/30-3d-3d
1/30	2d (2cm)	1.5d (1.5cm)	1/30-2d-1.5d

3. ช่องลำเจ็ทของอากาศมีหัวฉีดขนาด (d) 10 mm เป็นแบบลำเจ็ทเดี่ยว
4. หัวฉีดทำมุมกับแผ่นทดสอบ 90°
5. ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทดลอง (B) เท่ากับ 2, 4 และ 6 cm แบบปิด และ 2 cm แบบเปิด
6. ค่า Reynolds Number อยู่ในช่วง $1460 \leq Re \leq 14600$
7. ใช้ฮีตเตอร์แผ่นขนาดเท่าแผ่นทดสอบเป็นตัวให้ความร้อน

ประโยชน์ที่จะได้รับ

1. สามารถนำผลการทดลองไปปรับปรุงหรือประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม เพื่อใช้ในการทำนายการระบายความร้อนและเพิ่มประสิทธิภาพในอุปกรณ์ต่างๆ
2. นำความรู้ในด้านต่างๆที่ได้ศึกษามาหาการสร้างชุดอุปกรณ์การทดลองและบันทึกผลการทดลอง
3. สามารถนำความรู้เกี่ยวกับการระบายความร้อนไปสร้างอุปกรณ์อื่นๆได้ในอนาคต
4. เป็นการเพิ่มทักษะการทำงานในด้านต่างๆ



บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สมการการไหลของของไหล [3]

ในการวิเคราะห์การไหลทั้งในทฤษฎีและปฏิบัติเราได้สมการ สำหรับการแก้ปัญหาต่างๆ ซึ่งสมการที่สำคัญและเป็นพื้นฐานทางกลศาสตร์ของไหลคือ สมการของการไหลต่อเนื่อง (Equation of Continuity) ในการวิเคราะห์การไหลแบบต่อเนื่องนั้นเราใช้หลักการอนุรักษ์มวลสาร (Conservation of mass) กล่าวคือ มวลสารไม่มีสูญหายหรือเพิ่มเติมขึ้นได้แต่มวลสารสามารถเคลื่อนย้ายตำแหน่งได้

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2.1)$$

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (2.2)$$

ในกรณีของไหลอัดตัวได้ยาก(Incompressible fluid) และอุณหภูมิคงที่ทำให้ของไหลมีความหนาแน่นเท่ากันคือ $\rho_1 = \rho_2$ ดังนั้นจากสมการที่ 2.2 จะได้สมการไหลต่อเนื่องใหม่ว่า

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2.3)$$

เมื่อ $\dot{m}$ คือ อัตราการไหลเชิงมวล

Q คือ อัตราการไหล

A คือ พื้นที่หน้าตัดของของไหล

V คือ ความเร็วของของไหล

การสูญเสียพลังงานภายในท่อ [4]

สมการพลังงาน (Energy Equation) หลักของสมการนี้อาศัยหลักทฤษฎีของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation) คือพลังงานการไหลของของไหลมีค่าคงที่ไม่มีการเพิ่มหรือลดลง แต่อาจเปลี่ยนค่าพลังงานจากสภาพหนึ่งไปเป็นอีกสภาพหนึ่ง

ของไหลมีอัตราการไหลอย่างสม่ำเสมอหรือเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆที่ปราศจากแรงเสียดทาน แล้วผลของ Velocity head , Pressure head และ elevation head ในทุกจุดจะมีค่าคงที่ ดังนั้นสมการพลังงานของเบอร์นูลลีจึงใช้กับการไหลของของไหลโดยมีเงื่อนไขดังนี้

- ของไหลจินตภาพ (Ideal) คือของไหลที่ไม่มีแรงเสียดทานและอัดตัวได้ยาก (Incompressible fluid)

- การไหลคงที่ตลอดเวลา (steady flow) และเป็นการไหลอย่างต่อเนื่อง
 - การไหลเป็นไปตามเส้นแนวของการไหล
 - ความเร็วกระจายอย่างสม่ำเสมอตลอดหน้าการไหล และมีค่าความเร็วเท่ากับความเร็วเฉลี่ย
 - แรงที่กระทำต่อของไหลมีเพียงแรงโน้มถ่วงของโลก (gravity force) และแรงดัน (Pressure force)
- ซึ่งสามารถเขียนสมการได้ว่า

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (2.4)$$

เมื่อการไหลอยู่ในแนวระดับเดียวกัน ทำให้ $Z_1 = Z_2$ จากสมการที่ 2.4 จะได้สมการใหม่เป็น

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad (2.5)$$

เมื่อนำหนักจำเพาะและค่าแรงโน้มถ่วงของโลกในจุดที่ 1 และจุดที่ 2 เท่ากันจากสมการที่ 2.5 จะได้

$$\frac{(P_1 - P_2)}{\gamma} = \frac{(V_2^2 - V_1^2)}{2g} \quad (2.6)$$

เมื่อ P คือ ความดัน ณ จุดที่วิเคราะห์

Z คือ ความสูงจากระดับอ้างอิงถึงจุดวิเคราะห์

γ คือ น้ำหนักจำเพาะของน้ำ

g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

V คือ ความเร็วของของไหล ณ จุดที่วิเคราะห์

ของไหลไหลในท่อ ต่อเข้าแหล่งจ่าย มีการสูญเสียพลังงานเมื่อของไหลไหลผ่านอุปกรณ์ที่มีการสูญเสียพลังงาน จากสมการที่ 2.6 เขียนเป็นสมการใหม่ได้ว่า

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{loss} \quad (2.7)$$

เมื่อ h_{loss} คือ ค่าสูญเสียความดันที่เกิดขึ้นไรท่อระหว่างตำแหน่งที่ 1 ถึง ที่ 2 การสูญเสียพลังงานของการไหลในท่อ

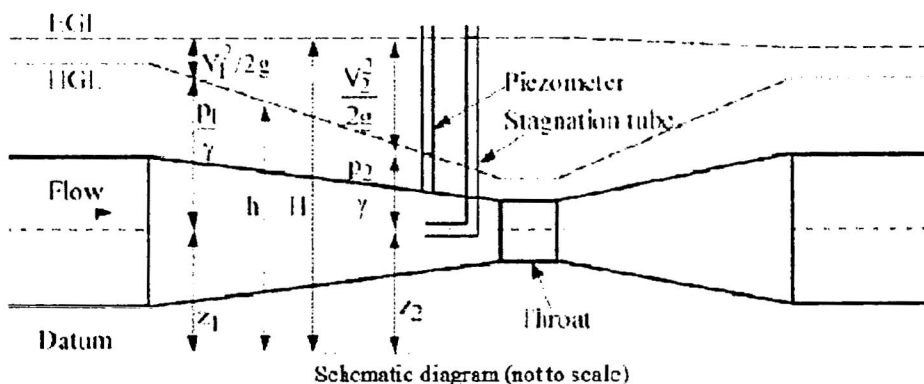
- Energy grade line (EGL) คือเส้นที่เขียนขึ้นเพื่อใช้แสดงค่าพลังงานที่พื้นที่หน้าตัดต่างๆหรือเรียกว่าเส้นระดับพลังงาน แต่ถ้าเขียนเส้น EGL เทียบกับระดับอ้างอิงที่กำหนดขึ้นอ่านค่าที่อ่านได้จากเส้นนี้จะเป็นค่าพลังงานรวมทั้งหมด (Total energy) ที่หน้าตัดต่างๆ ตามปกติแล้วเส้น EGL จะขนานกับทิศทางที่ของไหลเคลื่อนที่ไป เว้นเสียแต่จะมีการเพิ่มพลังงานจากภายนอกให้กับของไหลเช่นปั๊มน้ำ
- Hydraulic grad line (HGL) คือเส้นที่อยู่ด้านล่างของเส้น HGL เรียกว่าเส้น ระดับชลศาสตร์ ถ้าพิจารณาจากเส้นระดับอ้างอิงถึงเส้น HGL จะบอกถึงระดับของ Pressure head บวกกับ elevation head ส่วน Velocity head จะคิดจากเส้น HGL ถึงเส้น EGL เมื่อของไหลไหลในท่อ คิดจากการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหล และมีการใช้เครื่องสูบน้ำเข้ามาเกี่ยวข้องจากสมการเขียนเป็นสมการใหม่ ได้ว่า

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + H_p = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_{loss} \quad (2.8)$$

เมื่อ H_p คือ เสดความดันของเครื่องสูบน้ำที่ใช้สูบของเหลว

ตารางที่ 2.1 Energy and Hydraulic Grand Lines [4]

Head	Terms	Grade line and position
Elevation head	Z	Centerline of pipe
Pressure head	$\frac{\rho}{\gamma}$	Between centerline of pipe
Velocity head	$\frac{V_2^2}{2g}$	Between EGL and HGL
Piezometric head	$h = \frac{\rho}{\gamma} + Z$	HGL
Total head	$H = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{\rho}{\gamma} + Z$	EHL



รูปที่ 2.1 แสดงตำแหน่งของไฮโดรเมตริกที่ท่อเวนจูรี [4]

การไหลภายในท่อ [4]

การไหลในท่อการไหลในท่อจะเป็นการไหลแบบลามินาร์หรือเทอร์บิวเลนต์นั้นขึ้นอยู่กับ ค่าของเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number ; Re) ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ของการไหลในท่อนั้นมีค่าเป็น

$$Re_j = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (2.9)$$

เมื่อ Re_j คือ เรย์โนลด์นัมเบอร์ที่หาได้จากเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) ของท่อ

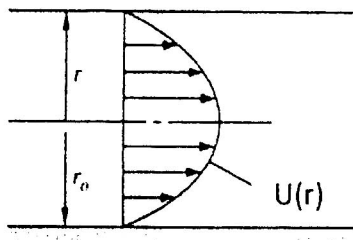
V คือ ความเร็วเฉลี่ยของของไหล , m/s

D คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ , m

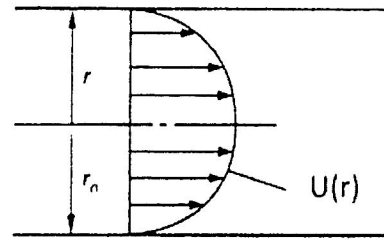
μ คือ ความหนืดของของไหล

ν คือ ความหนืดเชิงจลน์ของของไหล

ในกรณีของการไหลในท่อนั้น การไหลจะเปลี่ยนจากลามินาร์เมื่อมีค่า $Re_j = 2300$ และเมื่อ $Re_j = 6000$ แล้วการไหลก็จะเป็นเทอร์บิวเลนต์ที่สมบูรณ์ ปกติแล้วค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์นี้จะขึ้นอยู่กับความเร็วของผิวด้านในท่อและระดับความเทอร์บิวเลนต์ของของไหล



(ก.)



(ข.)

ก. แบบลามินาร์ ข. แบบเทอร์บิวเลนต์

รูปที่ 2.2 โปรไฟล์ความเร็วของการไหลภายในท่อ [4]

รูปที่ 2.2 แสดงให้เห็น โปรไฟล์ความเร็วการไหลภายในท่อ ที่มีการไหลเป็นแบบลามินาร์และแบบเทอร์บิวเลนต์ จะเห็นว่าชั้นบาวคาร์เลเยอร์จะเริ่มเกิดขึ้นที่ปากทางเข้าของท่อและจะค่อยๆเพิ่มความหนาขึ้นเมื่อลึกเข้าไปในท่อ ถ้าหากการไหลเป็นแบบลามินาร์แล้วโปรไฟล์ความเร็วของการไหลก็จะเป็นรูปพาราโบลา แต่เมื่อการไหลเป็นแบบเทอร์บิวเลนต์โปรไฟล์ความเร็วก็จะมีลักษณะเป็นพาราโบลาขดป้าน ดังรูป และค่าความเร็วเฉลี่ยจะมีค่าเท่ากับ 83 % ของความเร็วที่กลางท่อ

ชนิดการไหลของของไหล (Types of flow) [5]

ชนิดการไหลของของไหลขึ้นอยู่กับสมมติฐานที่แตกต่างกัน การไหลของของไหลจึงมีการแบ่งอยู่หลายลักษณะ ดังต่อไปนี้

1. การไหลแบบคงตัว (Steady Flow) การไหลของของไหลจะคงตัวก็ต่อเมื่อของไหลนั้นมี คุณสมบัติต่างๆเช่น ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น อุณหภูมิ และอื่นๆที่จุดใดจุดหนึ่งไม่เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา หรืออีกนัยหนึ่ง การไหลแบบคงตัวคือคุณสมบัติต่างๆของของไหลในขณะใดที่เคลื่อนที่ จะเป็นอิสระกับกาลเวลาในแต่ละจุดที่เคลื่อนที่ไป การไหลแบบนี้จึงเป็นการไหลของของไหลที่ผ่านท่อทางในอัตราการไหลที่คงที่
2. การไหลแบบไม่คงตัว (Unsteady Flow) การไหลของของไหลจะไม่คงตัวต่อเมื่อคุณสมบัติของของไหลตัวหนึ่งหรือทั้งหมดขณะที่เกิดการเคลื่อนที่เปลี่ยนแปลงไปตามกาลเวลา ที่จุดต่างๆในของไหล การไหลแบบนี้จึงเป็นการไหลของของไหลที่ผ่านท่อทางในอัตราการไหลไม่คงที่

การไหลแบบคงตัวจะวิเคราะห์ได้ง่ายกว่าการไหลแบบไม่คงตัว ถึงอย่างไรก็ตาม ในงานจริงทางด้านวิศวกรรมของของไหล มักจะนิยมแก้ไขปัญหให้เป็นของไหลแบบคงตัวเสมอ

3. การไหลแบบเอกภาพ (Uniform Flow) ขณะที่ความเร็วในการไหลของของไหลไม่มีการเปลี่ยนแปลงทั้งขนาดและทิศทาง จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในช่วงเวลาที่กำหนดให้ในของไหลแล้วเราเรียกว่าเป็นการไหลเอกภาพ และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

เมื่อเวลา t และ S เป็นระยะทางในทิศทางใดๆ สมการดังกล่าวได้กำหนดไว้ว่าจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเร็วในทุกทิศทางในของไหลภายใต้ช่วงเวลาที่กำหนดตัวอย่างเช่น การไหลของของเหลว (ภายใต้ความดัน) ไหลผ่านท่อขนาดยาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ เรียกว่าการไหลเอกภาพ

4. การไหลแบบอนเอกภาพ (Non-Uniform Flow) ถ้าความเร็วของการไหลของของไหลเปลี่ยนแปลงจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในช่วงเวลาที่กำหนดให้ในของไหล เราเรียกว่าเป็นการไหลแบบอนเอกภาพ

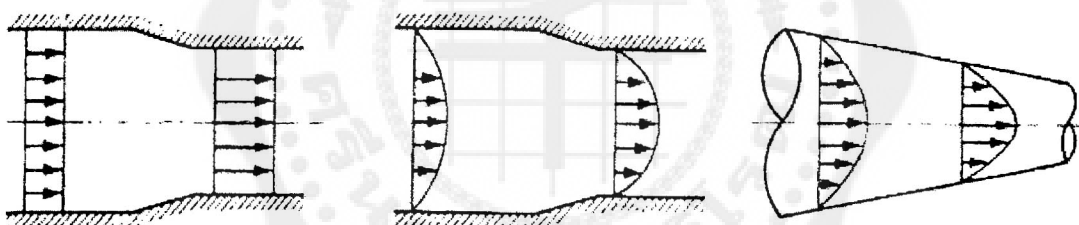
ตัวอย่างของการไหลแบบอนเอกภาพ เช่น การไหลของของเหลวภายใต้ความดันไหลผ่านท่อขนาดยาวที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางไม่คงที่

การไหลทุกแบบดังกล่าวไว้จะเป็นการไหลอิสระซึ่งกันและกัน แต่บางครั้งอาจจะเกิดร่วมกันได้ดังนี้

1. การไหลแบบเอกภาพที่คงตัว (Steady-Uniform Form) เช่น การไหลของของเหลวผ่านท่อยาวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันตลอดและมีอัตราการไหลคงที่
2. การไหลแบบอนเอกภาพที่คงตัว (Steady Non-Uniform Flow) เช่นการไหลของของเหลวผ่านท่อเรียวที่อัตราการไหลคงที่
3. การไหลแบบเอกภาพไม่คงตัว (Unsteady-Uniform Form) เช่นการไหลของของเหลวผ่านท่อยาวที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันตลอดที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลง
4. การไหลแบบอนเอกภาพที่ไม่คงตัว (Unsteady-Non uniform Form) เช่นการไหลของของเหลวผ่านท่อเรียวที่อัตราการไหลเพิ่มขึ้นหรือลดลง
5. การไหลแบบทิศทางเดียว สองทิศทาง และสามทิศทาง (One = Two and Three Dimensional Flow) คุณสมบัติหลายๆอย่างที่เกิดจากการไหลของของไหล เช่น ความเร็ว ความดัน ความหนาแน่น อุณหภูมิ และอื่นๆโดยปกติแล้วจะเป็นฟังก์ชันของช่วงขนาดและเวลา นั่นคือจะแปรค่ากับแกนของจุดใดๆ x, y, z และเวลา t การไหลแบบนี้เรียกว่าการไหลแบบสามทิศทาง แต่ถ้าคุณลักษณะการไหลของไหลไม่ได้เปรียบเทียบกับเวลา ก็จะเป็นการไหลแบบสามทิศทางคงตัว

เมื่อคุณลักษณะหลายๆอย่างที่เกิดจากการไหลของของไหลฟังก์ชันเฉพาะกับทิศทางในสองแกนและเวลา t ซึ่งจะไม่แปรค่ากับอีกทิศทางหนึ่งแล้ว การไหลนี้เรียกว่าการไหลแบบสองทิศทาง ตัวอย่างเช่น ถ้าเงื่อนไขการไหลไม่ได้แปรค่ากับทิศทาง Z ดังนั้นจึงเป็นการไหลแบบสองทิศทางที่มีเงื่อนไข การไหลในแกนต่างๆที่ได้ตั้งฉากกับแกน Z แต่ถ้ามีเงื่อนไขการไหลที่ไม่ได้แปรค่ากับเวลา t ก็เป็นการไหลแบบสองทิศทางประเภทคงตัว

เมื่อคุณลักษณะหลายๆอย่างที่เกิดจากการไหลของของไหลฟังก์ชันเฉพาะกับทิศทางในสองแกนและเวลา t แล้ว การไหลนี้เรียกว่า การไหลแบบทิศทางเดียว ในทำนองเดียวกัน ถ้าเงื่อนไขการไหลไม่ได้แปรค่ากับเวลา t ก็เป็นการไหลแบบทิศทางเดียวประเภทคงตัว ถ้าพิจารณาคุณลักษณะ ในการไหลของของไหลเพียงอย่างเดียวคือ ความเร็วของการไหล ก็สามารถเขียนกระจายถึงลักษณะการไหลได้ เพื่อให้เข้าใจดียิ่งขึ้นเกี่ยวกับความแตกต่างของการไหลทั้ง 3 ลักษณะ คือการไหลแบบทิศทางเดียว สองทิศทาง และสามทิศทาง ได้แสดงไว้ดังรูป



(ก.) การไหลแบบทิศทางเดียว (ข.) การไหลแบบ 2 ทิศทาง (ค.) การไหลแบบ 3 ทิศทาง

รูปที่ 2.3 การไหลแบบทิศทางเดียว สองทิศทาง และสามทิศทาง [5]

6. การไหลแบบหมุนวน (Rotational Flow) คือการไหลของของไหล ซึ่งในขณะที่ไหลนั้นอนุภาคของของไหลมีการหมุนวนไปรอบๆแกนหมุน (Mass Center) ด้วยความเร็วของแต่ละอนุภาคของของไหลจะแปรค่าโดยตรงกับระยะทางจากจุดศูนย์กลางหมุน
7. การไหลแบบไม่หมุนวน (Irrotational Flow) คือการไหลของของไหล ซึ่งในขณะที่ไหลนั้นอนุภาคของของไหลมีการหมุนวนไปรอบๆแกนหมุน การไหลแบบไม่หมุนวนจะมีเฉพาะของไหลในจินตนาการเท่านั้น ซึ่งจะไม่เกิดการสัมผัสซึ่งกันและกันหรือไม่มีความเค้นเฉือนเกิดขึ้นเลย แต่สำหรับการไหลของของไหลจริงแล้ว อาจจะสมมติให้เป็นการไหลแบบไม่หมุนวนได้เหมือนกันถ้าของไหลไม่มีความหนืดหรือความหนืดน้อยมากๆเท่านั้น

8. การไหลแบบราบเรียบ (Laminar Flow) คือการไหลของของไหลที่มีอนุภาคของของไหลเคลื่อนที่ไปเป็นแผ่นบางๆหรือชั้นแผ่นเรียบบาง โดยที่ชั้นของของไหลแต่ละชั้นจะเคลื่อนที่ไปอย่างมีระเบียบราบเรียบเหนือชั้นราบเรียบอื่นซึ่งกันและกัน การไหลแบบราบเรียบเกิดจากความหนืดของของไหลที่เป็นไปตามกฎความหนืดของนิวตัน เช่น การไหลของของเหลวที่มีความหนืดมากการไหลของน้ำใต้ดิน การไหลของเลือด
9. การไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow) คือการไหลของของไหลซึ่งในขณะไหลนั้น อนุภาคของของไหลเคลื่อนตัวแบบไม่มีระเบียบ คลื่นกระแสวนความเร็วจะรุนแรงไม่มีทิศทางที่แน่นอนและมีการหมุนวนปั่นป่วนขณะไหลในระหว่างชั้นของไหล กระแสวนอนุภาคจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วตลอดเวลา ปัญหาการไหลของของไหลในงานวิศวกรรมแทบทั้งหมดจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน ในการไหลแบบปั่นป่วนนี้มักเกิดความไม่แน่นอนต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคของของไหล จึงทำให้เกิดคลื่นกระแสวนขึ้นตามจุดต่างๆในของไหลดังนั้นในทางปฏิบัติจึงนิยมสมมติให้การไหลแบบปั่นป่วนนี้รูปแบบคงตัว แล้วนำค่าเฉลี่ยต่างๆของคุณลักษณะที่ไม่ขึ้นกับเวลามาพิจารณาแทนความเป็นจริง

การถ่ายโอนความร้อนโดยการนำความร้อน (heat Transfer by Conduction) [6]

การถ่ายเทความร้อนโดยการนำหรือการนำความร้อนเป็นกลไกการแลกเปลี่ยนพลังงานภายในจากวัตถุหนึ่งไปยังวัตถุหนึ่ง หรือจากส่วนหนึ่งของวัตถุไปยังส่วนอื่นๆของวัตถุโดยการแลกเปลี่ยนพลังงานที่เกิดขึ้นจากการสั่นของโมเลกุลที่อยู่ติดกัน หรือเกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่บริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า การถ่ายเทความร้อนโดยการนำนั้น ความร้อนจะไหลจากโมเลกุลของวัตถุที่มีอุณหภูมิสูงไปสู่โมเลกุลที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าโดยที่วัตถุนั้นไม่มีการเคลื่อนที่ การนำความร้อนจะเกิดขึ้นได้ดีในวัสดุที่เป็นของแข็งส่วนวัสดุที่เป็นของเหลวหรือแก๊ส จะมีการนำความร้อนเกิดขึ้นเช่นเดียวกับการพาความร้อน การแก้ไขปัญหานี้จะมีความยุ่งยากมากกว่าการแก้ปัญหาที่มีการนำความร้อนอย่างเฉยๆ ตัวอย่างการนำความร้อนได้แก่

1. แท่งโลหะที่ถูกเผาให้ร้อนที่ปลายข้างหนึ่ง เมื่อเวลาผ่านไปปลายอีกข้างหนึ่งจะร้อนขึ้น เพราะเกิดการถ่ายเทความร้อนโดยการนำ
2. เมื่อเอาช้อนกาแฟจุ่มลงในถ้วยกาแฟที่ร้อน ตอนแรกกาแฟด้านมือจับจะเย็นแต่เมื่อเวลาผ่านไป ช้อนกาแฟทางด้านมือจับจะร้อนขึ้นเพราะว่า มีการนำความร้อนจากปลายทางด้านดักไปสู่ด้านมือจับ

สารที่มีความสามารถในการนำความร้อนสูงมักเรียกว่า ตัวนำ (Conductor) เช่น โลหะ จะมีค่า k สูง ส่วนสารที่มีความสามารถในการนำความร้อนได้ต่ำ เช่น สารพวกอโลหะจะมีค่า k ต่ำ จึงเรียกลำพวกนี้ว่า ฉนวน (Insulator) ตารางที่ 2.2 จะแสดงการนำความร้อนของโลหะ อโลหะ ของเหลว และแก๊สบางชนิด ค่าเหล่านี้ส่วนมากได้มาจากการทดลอง โดยทั่วไปค่าการนำความร้อนของวัสดุจะแปรเปลี่ยนตามอุณหภูมิ แต่ในทางปฏิบัติส่วนมากมักใช้ค่าคงที่ที่หาจากอุณหภูมิเฉลี่ยของระบบ ซึ่งจะให้ผลเป็นที่น่าพอใจ

ในตารางที่กำหนดให้จะพบว่าของเหลวเป็นตัวนำความร้อนได้ดีกว่าแก๊ส และของแข็งเป็นตัวนำความร้อนที่ดีที่สุด ทั้งนี้เพราะเมื่อสารเป็นแก๊ส โมเลกุลของสารจะอยู่ห่างกันมากและเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ทำให้การถ่ายเทพลังงานความร้อนโดยการกระแทกกันระหว่างโมเลกุลน้อยกว่าของเหลว ในของเหลวการเคลื่อนที่ไหลยังคงเป็นอิสระ แต่โมเลกุลอยู่ห่างจากกันน้อยกว่าแก๊ส การเคลื่อนที่ของความร้อนเนื่องจากการสั่นกระแทกกันของโมเลกุลจึงมากกว่าของแก๊ส ส่วนของแบ่งการสั่นกระแทกของโมเลกุลมากกว่าของเหลวจึงมีค่า k มากกว่าของเหลว

ตารางที่ 2.2 ค่าการนำความร้อนของวัสดุชนิดต่างๆที่อุณหภูมิ 0 °C [6]

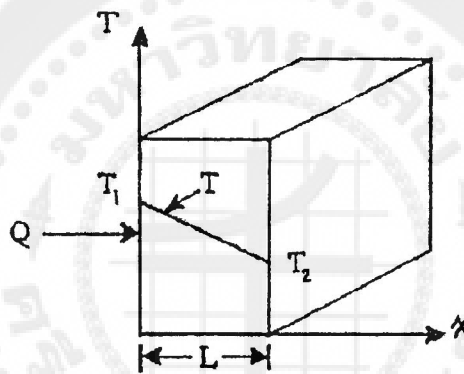
วัสดุ	ค่าการนำความร้อน kW/(m.°C)
โลหะ :	
เงิน (บริสุทธิ์)	410
ทองแดง (บริสุทธิ์)	385
อลูมิเนียม (บริสุทธิ์)	202
เหล็ก (บริสุทธิ์)	73
เหล็กกล้าคาร์บอน , 1% C	43
ตะกั่ว (บริสุทธิ์)	35
อโลหะ :	
หินเขี้ยวหนุมาน (Quartz)	41.6
หินทราย (Sandstone)	1.83
แก้ว , หน้าต่าง	0.78
ขี้เลื่อย (Sawdust)	0.059
ใยแก้ว (Glass Wool)	0.038
ของเหลว :	
ปรอท	8.21
น้ำ	0.556
แอมโมเนีย	0.54
น้ำมันหล่อลื่น SAE 50	0.147
ฟร็อน 12 (CCL ₂ F ₂)	0.073
แก๊ส :	
ไฮโดรเจน	0.175
ฮีเลียม	0.141
อากาศ	0.024
ไอน้ำ	0.0262
คาร์บอนไดออกไซด์	0.0146

การเลือกวัสดุเป็นสิ่งที่จำเป็นในการทดลอง เพราะว่า แผ่นทดลองจะต้องได้รับความร้อนโดยตรงจากฮีตเตอร์ หากวัสดุที่เราเลือกใช้มีสภาพนำความร้อนที่ดี ก็จะสามารถรับและถ่ายเทความร้อนไปยังบริเวณใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็วดังสมการ [6]

$$q = -kA \frac{dt}{dx} \quad (2.10)$$

เมื่อ q คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นที่หน้าตัดในทิศทางบวก ,watt

k คือ ค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) ของวัสดุ $W/(m^{\circ}C)$



รูปที่ 2.4 การถ่ายเทความร้อนโดยการนำแบบ 1 มิติ [3]

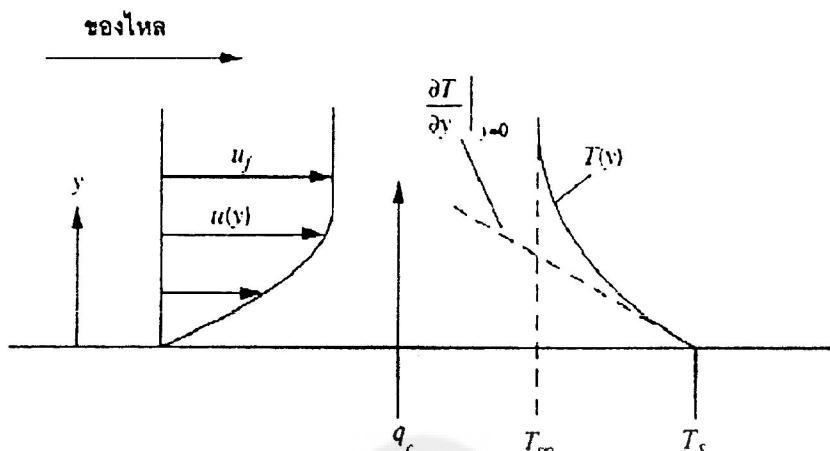
อัตราการถ่ายเทความร้อนจะเพิ่มขึ้น ก็ต่อเมื่อพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น, เวลามากขึ้น และ ค่าการนำความร้อน(Thermal conductivity) สูง

จากตารางที่ 2.2 จะเห็นว่า เงินเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงที่สุด แต่มีราคาแพงมาก ดังนั้น วัสดุที่เลือกใช้คือ ทองแดง เนื่องจากมีค่าการนำความร้อน (Thermal conductivity) สูง และราคาไม่แพงเกินไป

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Heat Transfer by Convection) [6]

การถ่ายเทความร้อนโดยการพามี 2 ลักษณะ คือ การถ่ายเทความร้อนแบบบังคับและการถ่ายเทความร้อนแบบอิสระ ซึ่งแต่ละแบบจะสามารถแบ่งตาม แบ่งลักษณะการไหลของของไหลเป็น 2 ลักษณะ ดังนี้

1. การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบบังคับ (Heat Transfer by Forced convection)



รูปที่ 2.5 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิบนแผ่นวัตถุร้อนของการพาความร้อนแบบบังคับ [6]

การไหลภายนอก คือ การไหลของของไหลที่มีได้ถูกจำกัดให้ไหลในบริเวณที่กำหนด แต่เป็นการไหลผ่านผิวนอกของของแข็ง เช่น การไหลผ่านผนังรบบ การไหลตั้งฉากกับวัตถุ การไหลของของไหลมากระทบกับของแข็งรูปร่างลักษณะต่างๆ ในทิศทางใดๆ ก็ได้ รูปแบบการไหลแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การไหลแบบลามินาร์และแบบเทอร์บิวเลนต์

- การไหลแบบลามินาร์ คือ การไหลของของไหลจะเรียงกันเป็นชั้นๆ แบบมีระเบียบ เป็นชั้นบางๆ ติดอยู่กับผนังของวัตถุที่ของไหลไหลผ่าน ซึ่งมี $Pr > 1$ และการหาตัวเลขนัสเซลล์ท์ในการไหลแบบลามินาร์ เสนอโดย Pohlhausen

$$Nu_x = Pr^{1/3} Re_x^{1/2} \quad (2.11)$$

สำหรับ $Nu_x = Pr^{1/3} Re_x^{1/2}$

เมื่อ $Re_x = \frac{V_\infty x}{\nu}$ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลให้ใช้

ที่อุณหภูมิฟิล์มเท่ากับ $T_f = \frac{T_w - T_\infty}{2}$

- การไหลแบบเทอร์บิวเลนต์ คือ ลักษณะการไหลของของไหลที่ไม่เป็นระเบียบหรือ การไหลแบบปั่นป่วน มีค่า Re จาก 2×10^5 ถึง 5×10^5 การหาตัวเลขนัสเซลล์ท์ได้จาก

$$Nu_x = 0.029 Pr^{0.43} Re_x^{0.8} \quad (2.12)$$

คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของของไหลได้ให้ที่อุณหภูมิฟิล์ม $T_f = \frac{T_w - T_\infty}{2}$

ลักษณะการไหลภายใน (Internal Flow)

เป็นการไหลที่ของไหลถูกกำหนดให้เคลื่อนที่ในบริเวณที่จำกัด เช่น การไหลของของไหลท่อลม ท่อรู้ สี่เหลี่ยมผืนผ้า และอื่นๆแบ่งตามลักษณะการไหลออกเป็น 2 แบบ คือ การไหลแบบลามินาร์และแบบเทอร์ บิวเลนซ์

- การไหลแบบลามินาร์สามารถหาตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของการไหลเสนอโดย Hausen

$$Nu_m = 3.66 + (0.0668 Gz / L + 0.04 Gz)^{2/3} \quad (2.13)$$

เมื่อ Nu_m คือ $h_m D / k$

Gz คือ $(Re.Pr)/(L/D)$

Re คือ $Nu_m D / \nu$

L คือ distance from the inlet

คุณสมบัติการของของไหลทางฟิสิกส์ให้ใช้ที่อุณหภูมิเฉลี่ย $T_m = \frac{T_{in} - T_{out}}{2}$

- การไหลแบบเทอร์บิวเลนซ์สามารถหาตัวเลขนัสเซิลต์ในท่อได้ เสนอโดยสมการของ Colburn

$$Nu_x = 0.023 Pr^{1/3} Re^{0.8} \quad (2.14)$$

โดย $Nu = \frac{hD}{k}, Re = \frac{V_m D}{\nu}, Pr = \frac{\nu}{\alpha}$

เมื่อ $0.7 < Pr < 160, Re > 10,000, L/D > 60$ Smooth pipe

สมการของ Dittus – Boelter

$$Nu_x = 0.023 Pr^n Re^{0.8} \quad (2.15)$$

เมื่อ $n=0.4 \Rightarrow heating(T_w > T_b)$

$n=0.3 \Rightarrow cooling(T_w > T_b)$

สมการของ Sieder and Tate

$$Nu_x = 0.027 Pr^{1/3} Re^{0.8} (b/w)^{0.14} \quad (2.16)$$

เมื่อ $0.7 < Pr < 160, Re > 10,000, L/D > 60$ Smooth pipe

สมการของ Retukhov

$$Nu = \frac{RePr}{[X(f/8)(\mu_b/\mu_w)]^n} \quad (2.17)$$

เมื่อ $X = 1.07 + 12.7(Pr^{(2/3)} - 1)(f/8)^{(1/2)}$

$n = 0.11 \Rightarrow$ heating with uniform T_w ($T_w > T_b$)

และ $n = 0.25 \Rightarrow$ heating with uniform T_w ($T_w < T_b$)

$N = 0 \Rightarrow$ uniform wall heat flux or gase

$$10^4 < Re < 5 \times 10^5$$

$0.5 < Pr < 200$ with 5 to 6 percent error

$0.6 < Pr < 2000$ with 10 percent error

$$0.08 < \mu_b/\mu_w < 40$$

สมการ Nusselt

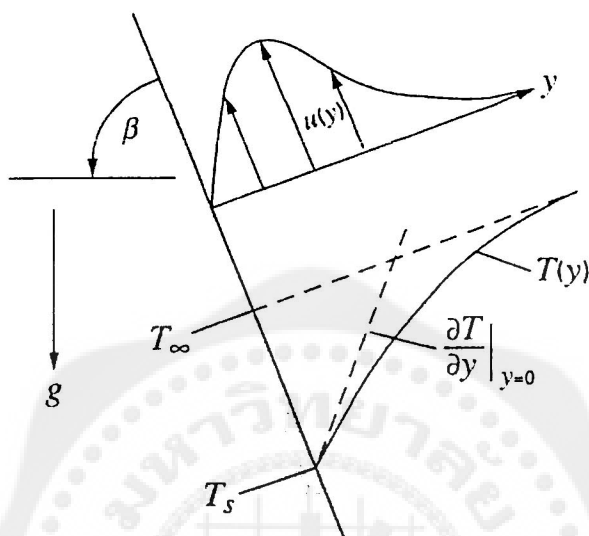
$$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{1/3} (L/D)^{0.055} \quad (2.18)$$

สำหรับ $10 < L/D < 400$

2. การถ่ายเทความร้อนโดยการพาแบบอิสระ (Heat Transfer by Free convection)[6]

การพาความร้อนแบบอิสระ (Free convection) คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของของแข็งและของไหล โดยที่ไม่มีกลไกใดๆ ที่ทำให้ของไหลเคลื่อนที่ แต่ของไหลที่อยู่ใกล้กับผิวของของแข็งก็อาจจะเคลื่อนที่ได้โดยแรงลอยตัวของของไหล แรงลอยตัวนี้เกิดจากความแตกต่างของความหนาแน่นของของไหล เมื่อเกิดความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหลขึ้น การคำนวณอัตราการเคลื่อนที่ของความร้อนโดยการพานั้นเป็นสิ่งยุ่งยากเมื่อพิจารณาแล้ว มีหลายสิ่งหลายอย่างที่มีอิทธิพลต่อการเคลื่อนที่ของความร้อน

ร้อนแบบการพาเป็นต้นว่า คุณสมบัติต่างๆ ของของไหล เช่น ความหนาแน่น ความร้อนจำเพาะ ความหนืด ฯลฯ ความเร็วของของไหล ความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของพื้นผิวของของแข็งและของไหลเป็นต้น



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงความเร็วและอุณหภูมิของของไหลบนแผ่นวัตถุของการพาความร้อนแบบอิสระ [6]

- ความสัมพันธ์ของการพาแบบอิสระบนแผ่นเพลตในแนวตั้ง (Correlation of free convection on a vertical plate)

ความสัมพันธ์ที่ได้เป็นข้อมูลที่ได้จากการทดลองตามลำดับการพัฒนาความสัมพันธ์ของการถ่ายเทความร้อนที่เชื่อถือได้ ในที่นี้เราจะแสดงผล ในรูปของเอ็มไพริคัล (Empirical) ของการพาแบบอิสระบนผนังที่ตั้งตรงในการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) และการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent) ทั้ง 2 กรณีมีอุณหภูมิที่ผนังเท่ากันหมดทุกจุด (Uniform wall temperature) และความร้อนต่อพื้นที่ที่เท่ากันหมดทุกจุด (Uniform wall heat flux) เป็นขอบเขตของเงื่อนไข

กรณีที่ 1 อุณหภูมิที่เป็นแบบสม่ำเสมอ (Uniform wall temperature) ให้โดย MCADAMS เป็นความสัมพันธ์ของเลขนัสเซิลเฉลี่ย (Average nusselt number) ในเทอมของ

$$Nu_m = c(Gr_L \cdot Pr)^n = cRe_L^n \quad (2.19)$$

โดยที่ค่า Gr_L , Pr , c และ n อยู่ในช่วงที่แสดงในตาราง ค่าคงที่ c และส่วนของ n ของสมการ

ตารางที่ 2.3 Constant c and the exponent $[6]$

ชนิดของการไหล	ช่วงของ $Gr_L \cdot Pr$	c	n
ราบเรียบ	10^4 ถึง 10^9	0.59	1/4
ปั่นป่วน	10^9 ถึง 10^{13}	0.10	1/3

Churchill และ Chu ได้เสนอมาสองสมการใช้หาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนแบบอิสระของผนังตั้งตรงที่มีอุณหภูมิคงที่ และประยุกต์ใช้งานกับการไหลแบบราบเรียบเท่านั้นและทุก ๆ ค่าของตัวเลขพรันด์เทิล (Prandtl Number) คือ

$$Nu_m = \frac{(0.68 + 0.67 Re_L^{1/4})}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (2.20)$$

สำหรับ $10^{-1} < Re_L < 10^9$

และสมการที่ใช้ได้ทั้งการไหลแบบราบเรียบและการไหลแบบปั่นป่วน คือ

$$Nu_m^{1/2} = \frac{(0.387 Re_L^{1/6})}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad (2.21)$$

สำหรับ $10^{-1} < Re_L < 10^{12}$

ใช้คุณสมบัติทางฟิสิกส์อุณหภูมิฟิล์ม (film temperature) $T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2}$

กรณีที่ 2 ความร้อนต่อพื้นที่ที่ผนังสม่ำเสมอ (Uniform wall heat flux) การพาแบบอิสระกระทำบนผนังตั้งตรงที่ Uniform heat flux at the wall surface ให้โดย Sparrow และ Gregg, Vliet และ Liu

$$Nu_x = 0.60(Gr_x Pr)^{1/5} \quad (2.22)$$

สำหรับ $10^5 < Gr_x Pr < 10^{11}$ (ราบเรียบ)

$$Nu_x = 0.568(Gr_x Pr)^{2/3} \quad (2.23)$$

สำหรับ $2 \times 10^5 < Gr_x Pr < 10^{16}$ (ปั่นป่วน)

เมื่อปรับตัวเลขเกรชอฟใหม่เป็น

$$Gr_x Nu_x = \left[\frac{g\beta(T_w + T_\infty) X^3}{\nu^2} \cdot \frac{q_w}{T_w + T_\infty} \right] \quad (2.24)$$

$$= \frac{(g\beta q_w X^4)}{\nu^2}$$

ตัวเลขนัสเซิลท์ (nusselt Number)

$$Nu_x = \frac{Xh_x}{k} \quad (2.25)$$

ตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยสำหรับการพาแบบอิสระบนแผ่นเพลตที่วางในแนวราบจะขึ้นอยู่กับผิวร้อนของเพลตที่อยู่ด้านบนหรืออยู่ด้านล่าง และผิวของเพลตนั้นร้อนหรือเย็นกว่าของไหลที่อยู่รอบ ๆ เพลตนั้น เราพิจารณากรณีที่ผนังมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ และความร้อนต่อพื้นที่สม่ำเสมอแยกกันดังนี้

กรณีที่ 1 ผนังที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอ (Uniform wall temperature)

ตัวเลขนัสเซิลท์เฉลี่ยสำหรับการพาแบบอิสระของแผ่นเพลตที่วางในแนวราบให้ความสัมพันธ์โดย Mcadams คือ

$$Nu_m = c(Gr \cdot Pr)^n \quad (2.26)$$

กรณีที่ 2 ผนังที่มีความร้อนสม่ำเสมอ (Uniform wall temperature)

การพาอิสระภายใต้ความร้อนที่ผนังสม่ำเสมอ เช่น ความร้อนทางไฟฟ้าที่ให้กับเพลตที่ตั้งตรงแนวราบ และแนวเอียง แต่ในที่นี้เป็นแผ่นเพลตที่วางในแนวราบเท่านั้น เป็นการให้ความร้อนที่ผิวด้านบน

$$Nu_L = 0.13(Gr_L \cdot Pr)^{1/3} \quad (2.27)$$

สำหรับ $Gr_L \cdot Pr < 2 \times 10^8$

$$Nu_m = 0.16(Gr_L \cdot Pr)^{1/3} \quad (2.28)$$

สำหรับ $5 \times 10^8 < Gr_L \cdot Pr < 10^{11}$

ดังนั้น การที่ยกกำลัง 1/3 นั้นคือ สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนไม่เปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งหรือแปลผันไปตามตำแหน่งหรือแปลงผันไปตามความยาวของเพลต ผลที่ได้ทั้งสองถูกพัฒนาโดยใช้แผ่น

เพลตที่ถูกให้ความร้อนยาว 30 และ 5 cm ตามลำดับ แผ่นเพลตที่มีขนาดเล็กการถ่ายเทความร้อนจะสูงกว่าแผ่นเพลตที่มีขนาดใหญ่ สำหรับแผ่นเพลตที่วางในแนวราบและให้ความร้อนกับพื้นผิวด้านล่างได้ดังนี้

$$Nu_m = 0.58(Gr_L \cdot Pr)^{1/5} \quad (2.29)$$

สำหรับ $10^6 < Gr_L \cdot Pr < 10^{11}$

สำหรับเลขยกกำลัง $1/5$ มีการไหลแบบราบเรียบเหลืออยู่ คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสมการทั้ง 3 สมการ ให้ใช้คุณสมบัติอุณหภูมิเฉลี่ย ดังนี้

$$T_m = T_w - 0.25(T_w - T_\infty) \quad (2.30)$$

และสัมประสิทธิ์การขยายตัว β ที่ $\frac{T_w + T_\infty}{2}$

การพาแบบอิสระบนทรงกระบอกยาว (Free convection on a long cylinder) การทดสอบ การพาแบบอิสระบนทรงกระบอกยาวมี 2 กรณี คือ ทรงกระบอกในแนวตั้งและทรงกระบอกในแนวนอน

- ทรงกระบอกในแนวตั้ง (Vertical cylinder)

ตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ยของการพาอิสระบนทรงกระบอกในแนวตั้งเท่ากับทางเพลตที่ตั้งในแนวตั้งเช่นกัน ถ้าความหนาของชั้นขอบเขตความร้อน (Thermal boundary layer) มีน้อยกว่ารัศมีของทรงกระบอก ถ้าไม่คิดถึงผลของความโค้ง สำหรับทรงกระบอกในแนวตั้งที่อุณหภูมิคงที่ค่าเฉลี่ยตัวเลขนัสเซิลต์ (Average Nusselt Number) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของเพลตที่ตั้งตรงในสมการที่ 2.22 กับสัมประสิทธิ์ c และ n จากสมการ 2.26 สำหรับในกรณีนี้ L ในเทอมของแกรชอฟ (Grashof) หรือเลย์โธ (Rayleigh) เป็นความสูงของทรงกระบอก สำหรับของไหลที่มี แพรนดเติล (Prandtl number) 0.7 และสูงมาก ทรงกระบอกที่ตั้งในแนวตรงอาจจะจัดให้เป็นเพลตที่ตั้งในแนวตั้งได้

- ทรงกระบอกในแนวนอน (Horizontal cylinder)

ตัวเลขนัสเซิลต์เฉลี่ย สำหรับการพาอิสระ ที่อุณหภูมิผิวของทรงกระบอกในแนวนอนคงที่ (Isothermal horizontal cylinder) สามารถหาได้จากสมการ 2.31 , 2.32 และ 2.33 ดังนี้ คือ

$$Nu_m = \frac{0.825 + 0.387 Re_D^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad (2.31)$$

สำหรับ $10^{-1} < Re_D < 10^{12}$

$$Nu_m^{1/2} = \frac{0.60 + 0.387 Re_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \quad (2.32)$$

สำหรับ $10^{-4} < Re_D < 10^{12}$

$$Nu_m = \frac{hD}{k} = c Re_D^n \quad (2.33)$$

สำหรับ $10^{-19} < Re_D < 10^{12}$

โดยที่ค่าของ c และ n หาได้จากตาราง 2.4

และค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) หาได้จากตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.4 ค่าคงที่ของ c และ n ใช้ในสมการ 2.33 สำหรับการพาอิสระบนทรงกระบอกในแนวนอน [6]

Re_D	c	n
10^{-1} ถึง 10^{-2}	0.675	0.058
10^{-2} ถึง 10^2	1.020	0.148
10^2 ถึง 10^4	0.850	0.188
10^4 ถึง 10^7	0.480	0.250
10^7 ถึง 10^{12}	0.125	0.333

ตารางที่ 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) [3]

วัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k) ($W/m^2.K$)
อากาศที่ความดันบรรยากาศ	0.026
อลูมิเนียม	237
คอนกรีต	1.82
ทองแดง	401
เพชร	2300
น้ำแข็ง	2.2
กระดาษ	0.05
ไม้	0.1-0.35
เงิน	429

เมื่อ Nu_m และ Re_D เป็นฐานบนเส้นผ่านศูนย์กลางทรงกระบอก

$$Nu_m = \frac{hD}{k} \quad (2.34)$$

$$Re_D = Gr \cdot Pr$$

$$= \left[\frac{g(T_w - T_\infty)D^3}{\nu^2} \right] Pr \quad (2.35)$$

สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน (Convection Heat Transfer Coefficient) [7]

แนวความคิดเกี่ยวกับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อน, h หาได้จากสมการ

$$h = \frac{\dot{q}''}{\Delta T} \quad W / m^2 \cdot ^\circ C \quad (2.36)$$

ฟลักความร้อนเท่ากับอัตราการถ่ายเทความร้อนจากผิวความร้อนหารด้วยพื้นที่ผิวความร้อน $\dot{q}'' = Q/A$ ผลต่างของอุณหภูมิ ΔT คือ ความแตกต่างของอุณหภูมิของผิว T_w และอุณหภูมิของไหลด้านนอก T_∞ ฟลักความร้อนและอุณหภูมิของผิวจะขึ้นอยู่กับตำแหน่งตามความยาวของผิวความร้อน สำหรับการไหลภายนอก ดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุด (h_x) คือ

$$h_x = \frac{\dot{q}''}{(T_w - T_\infty)} \bigg|_x \quad (2.37)$$

เมื่อ x เป็นตำแหน่งที่ต้องการหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุด (h_x) สามารถหาได้จากการสมดุลพลังงานที่ผิวความร้อน ($y=0$) คือ

$$\dot{q}_x'' = -k \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=0} \quad (2.38)$$

ดังนั้น

$$h_x = \frac{-k \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \big|_x}{(T_w - T_\infty)} \quad (2.39)$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนสุทธิสามารถหาได้จากค่าเฉลี่ยของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพา คือ

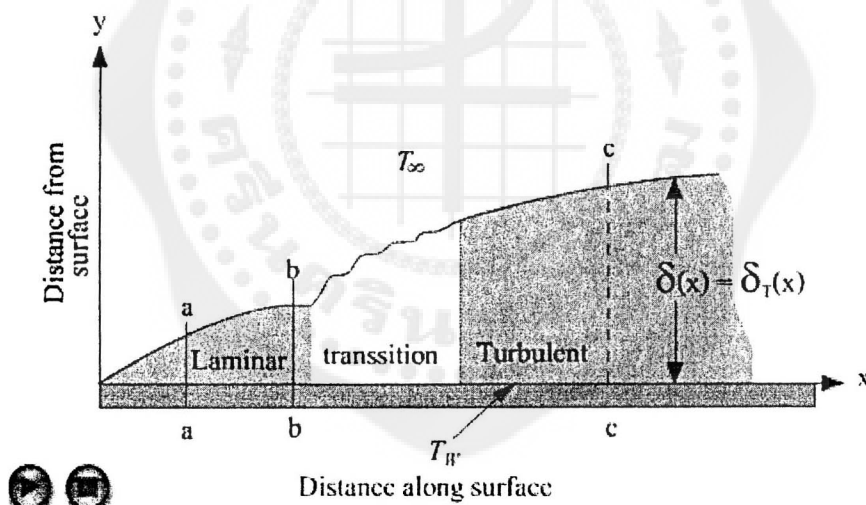
$$\bar{q} = \bar{h}A(T_w - T_\infty) \quad (2.40)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉลี่ย $\bar{h}$ ได้จากการรวมสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุดตลอดความยาว L

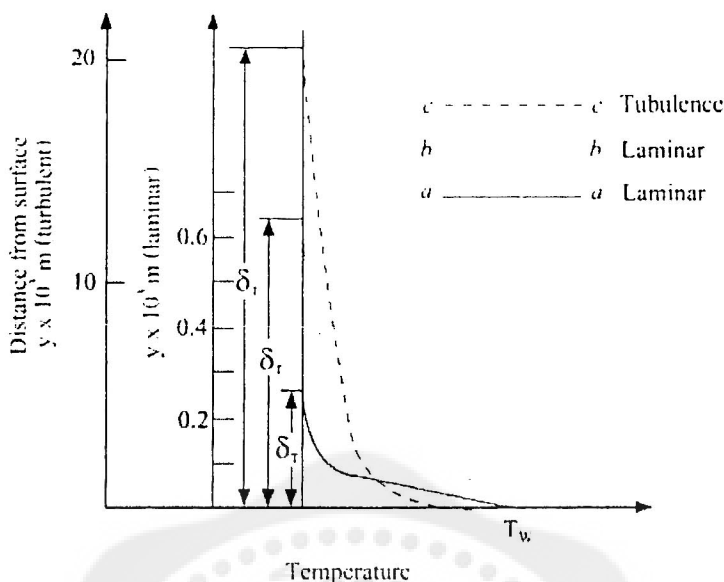
$$\bar{h} = \frac{\int_0^L h_x dx}{L} \quad (2.41)$$

ชั้นขอบเขตการไหลและขอบเขตความร้อนสำหรับแผ่นราบอุณหภูมิคงที่ จะมีค่า $Pr=1.0$, $\delta = \delta_T$ ดังแสดงในรูปที่ 1.17 การวิเคราะห์ชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ แสดงให้เห็น δ และ δ_T จะสัมพันธ์กันดังสมการต่อไปนี้

$$\frac{\delta}{\delta_T} = 1.026 Pr^{1/3} \quad (2.42)$$



(ก) ชั้นขอบเขตความร้อน [7]



(ข) การกระจายอุณหภูมิเมื่อ $Pr = 1.0$ [7]

รูปที่ 2.7 ชั้นขอบเขตความร้อนสำหรับการไหลบนแผ่นราบ [7]

ก) ชั้นขอบเขตความร้อน

ข) การกระจายอุณหภูมิเมื่อ $Pr = 1.0$

ข้อสำคัญของความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนและชั้นความหนาของขอบเขต สามารถกำหนดให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงอย่างสม่ำเสมอขวางกับชั้นขอบเขตความร้อน ซึ่งไม่เกิดการเคลื่อนที่ของของไหล ดังนั้นพลังงานความร้อนส่งผ่านชั้นความร้อนขึ้นกับตัวนำ ดังรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นว่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าการนำความร้อนดังนั้นสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุด จึงประมาณค่าได้จาก

$$h_x = \frac{k}{\delta_T} \quad (2.43)$$

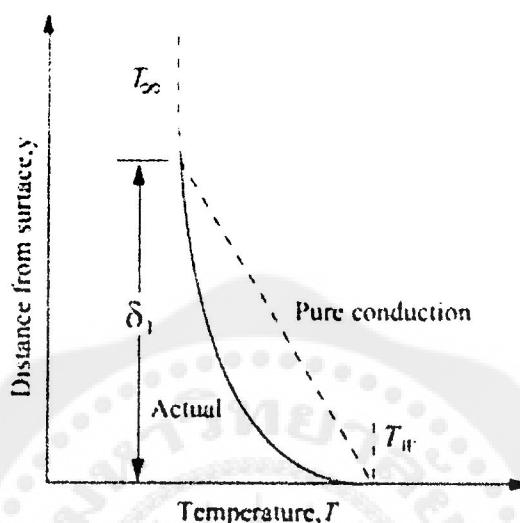
เราสามารถประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเฉพาะจุด ได้จากค่าการนำความร้อนของของไหล และความหนาของชั้นขอบเขตความร้อนจากข้างต้นสามารถแสดงได้ตามสมการ

$$\frac{h_x}{k} \approx \frac{1}{\delta_T} \quad (2.44)$$

ระยะทางจากปลายขอบของแผ่นราบ (x) ได้ว่า

$$\frac{h_x}{k} \approx \frac{x}{\delta_T} \quad (2.45)$$

ปริมาณทางซ้ายเป็นกลุ่มตัวแปรสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ซึ่งเรียกว่า นัสเซลน์มเบอร์ซึ่ง x แทนตำแหน่งที่ต้องการหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน



รูปที่ 2.8 แผนภาพอุณหภูมิของชั้นขอบเขตความร้อน [7]

$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} \quad (2.46)$$

ค่าเฉลี่ยของ นัสเซลน์มเบอร์หาได้จาก

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}x}{k} \quad (2.47)$$

เมื่อ L เป็นความยาวของแผ่นราบ โดยทั่วไปแล้วการคำนวณค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะคำนวณจากเทอมของนัสเซลน์มเบอร์

ปริมาณความร้อนของวัตถุ (Heat, Q) [7]

เป็นพลังงานความร้อนที่วัตถุรับเข้ามาหรือคายออกไป จากการศึกษาค้นคว้าของความร้อนคือสารหรือวัตถุ ในขั้นนี้จะศึกษาเพียงสองด้าน คือ

1. ความร้อนจำเพาะ (Specific heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุมีอุณหภูมิสูงขึ้นหรือต่ำลงโดยสถานะยังคงรูปเดิม
2. ความร้อนแฝง (Latent Heat) หมายถึง พลังงานความร้อนที่ทำให้วัตถุเปลี่ยนสถานะโดยอุณหภูมิคงที่

ความจุความร้อน (Heat capacity, C_p) คือความร้อนที่ทำให้สารทั้งหมดที่กำลังพิจารณามีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งหน่วย โดยสถานะไม่เปลี่ยน

ถ้าให้ปริมาณความร้อน ΔQ แก่วัตถุ ทำให้อุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนไป ΔT ดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัตถุเปลี่ยนไป 1 หน่วย จะใช้ความร้อน C_p คือ

$$C_p = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (2.48)$$

มีหน่วยเป็น จูล/เคลวิน (J/K)

ความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat capacity, c) คือความร้อนที่ทำให้สาร(วัตถุ) มวลหนึ่งหน่วยมีอุณหภูมิเปลี่ยนไปหนึ่งองศาเคลวิน คือ

$$c = \frac{\Delta Q}{m \Delta T} \quad (2.49)$$

ความจุความร้อนจำเพาะของสาร(J/kg-K)

นั่นคือ เมื่อสารมวล m มีอุณหภูมิเพิ่มจาก T_1 เป็น T_2 และความจุความร้อนจำเพาะมีค่าคงตัว ความร้อนที่สารได้รับคือ

$$\Delta Q = m c \Delta T \quad (2.50)$$

วัสดุฉนวนและวัสดุทนความร้อน (Insulation and Refractory Materials) [7]

วิศวกรมักจะใช้วัสดุฉนวน ในการต้านทานการเคลื่อนที่ของความร้อน วัสดุฉนวนที่ทั้งชนิดกั้นความร้อนได้มากและกั้นความร้อนได้น้อย วัสดุฉนวนที่กั้นความร้อนได้น้อยมักใช้ใน งานก่อสร้างที่ไม่ต้องการให้ความร้อนจากสิ่งแวดล้อมไหลผ่านเข้าไปยังอาคารที่ต้องการความเย็น เช่น ในประเทศร้อน ส่วนวัสดุที่กั้นความร้อนได้มากมักใช้ป้องกันความร้อนจากแหล่งที่มีอุณหภูมิสูงไม่ให้ออกไปยังสิ่งแวดล้อมรอบๆ

ไม้ก๊อก โยแก้ว ฯลฯ เป็นตัวอย่างของวัสดุฉนวนที่กั้นความร้อนได้น้อย ส่วนใยหิน แมกนีเซียม ฯลฯ เป็นตัวอย่างของวัสดุฉนวนที่กั้นความร้อนได้มาก และพบว่าสำหรับสารหนึ่งๆค่าการนำความร้อนของวัสดุนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของสารเช่นเดียวกับอุณหภูมิ ความหนาแน่นของวัสดุก็คือมวลของวัสดุหารด้วยปริมาตรทั้งหมดของวัสดุ (ปริมาตรที่รวมรูพรุนและปริมาตรของวัสดุ) การที่วัสดุฉนวนมีค่าการนำความร้อนต่ำก็เพราะมีอากาศ (หรือแก๊สที่เป็นตัวนำความร้อนที่เหลว) บรรจุอยู่ภายในรูพรุนมากกว่าวัสดุแข็ง ดังนั้นค่าการนำความร้อนของวัสดุเหล่านี้จึงแปรเปลี่ยนตามความหนาแน่นของวัสดุด้วย

บทที่ 3

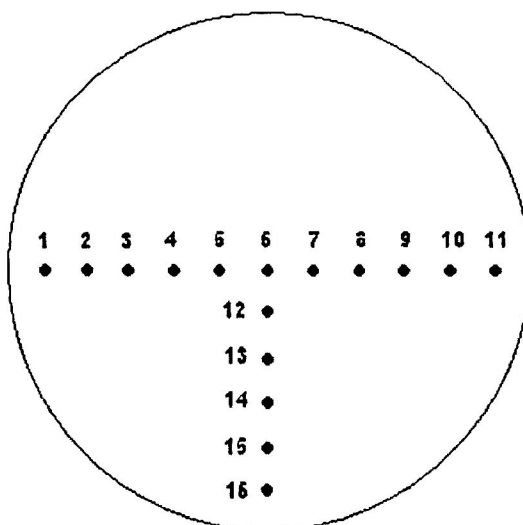
การคำนวณและการออกแบบการทดลอง

การออกแบบอุปกรณ์สำหรับชุดการทดลอง

1. ชุดทดลองจะต้องสามารถถอดและประกอบได้ง่ายเมื่อต้องการเปลี่ยนอุปกรณ์ หรือเปลี่ยนการทดลอง หรือเพื่อสะดวกในการดูแลรักษา
2. ชุดทดลองจะต้องมีมาตรวัดค่าต่างๆ ที่สามารถอ่านค่าได้สะดวก เพื่อง่ายต่อการคำนวณทางทฤษฎี
3. ใช้ Heater plate เป็นแหล่งความร้อน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm
พื้นที่ทั้งหมดของ heater plate

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{\pi D^2}{4} \\
 &= \frac{\pi \times (0.30)^2}{4} \\
 &= 0.07065 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

4. ผู้จัดทำเลือกศึกษาการถ่ายเทความร้อนจากแผ่นทองแดง ซึ่งเป็นวัสดุที่มีค่าการนำความร้อนสูงถึง $385 \text{ k W/(m}^\circ\text{C)}$
5. แผ่นทองแดงมีเทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) ฝังอยู่ ซึ่งมีระยะห่างจากแต่ละจุด 2.50 cm ซึ่งการคำนวณจะเลือกใช้อุณหภูมิที่วัดได้จากจุดตามรูปข้างล่าง



รูปที่ 3.1 ตำแหน่ง Thermocouple บนแผ่นทองแดงในการวัดอุณหภูมิ

6. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple) นำมาใช้วัดอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆบนเพลตโดยเลือกใช้

เทอร์โมคัปเปิล Type T เพราะเป็นชนิดที่สามารถวัดอุณหภูมิได้อย่างละเอียด

7. เรย์โนลด์สจำนวน (Reynolds Number) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.9

$$Re_j = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

ความหนาแน่นของอากาศ (ρ) 1.23 kg/m³

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวฉีด (D) 0.01 m

ความหนืดเชิงจลน์ของอากาศ (μ) 1.79×10^{-5} N.s/m²

ความเร็วลมที่ (V) $V = \frac{Q}{A}$ m/s

อัตราการไหล (Q) ได้จากการวัดจากโรตารี่มิเตอร์ LPM

พื้นที่ของหัวฉีด (A) $A = \frac{\pi D^2}{4}$
 $= \frac{\pi 0.01^2}{4} = 7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2$

- ที่อัตราการไหลที่ 10 LPM

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$= \frac{10}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60}$$

$$= 2.12314225 \text{ m/s}$$

$$Re_j = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$= \frac{1.23 \times 2.12314225 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}}$$

$$\approx 1500$$

- ที่อัตราการไหลที่ 20 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{20}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 4.2462845 \quad m/s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 4.2462845 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 3000
 \end{aligned}$$

- ที่อัตราการไหลที่ 30 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{30}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 6.36942675 \quad m/s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 6.36942675 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 4400
 \end{aligned}$$

- ที่อัตราการไหลที่ 40 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{40}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 8.492569 \quad m/s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 8.492569 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 5900
 \end{aligned}$$

- ที่อัตราการไหลที่ 50 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{50}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 10.6157113 \text{ m/s} \\
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 10.6157113 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 7300
 \end{aligned}$$

- ที่อัตราการไหลที่ 60 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{60}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 12.7388535 \text{ m/s} \\
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 12.7388535 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 8800
 \end{aligned}$$

- ที่อัตราการไหลที่ 70 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{70}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 14.8619958 \quad m/s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 14.8619958 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 10300
 \end{aligned}$$

- ที่อัตราการไหลที่ 80 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{80}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 16.985138 \quad m/s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 16.985138 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 11700
 \end{aligned}$$

- ที่อัตราการไหลที่ 90 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{90}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 19.1082803 \quad m/s
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 19.1082803 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 13200
 \end{aligned}$$

- ที่อัตราการไหลที่ 100 LPM

$$\begin{aligned}
 V &= \frac{Q}{A} \\
 &= \frac{100}{7.85 \times 10^{-5}} \times \frac{1}{1000} \times \frac{1}{60} \\
 &= 21.2314225 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

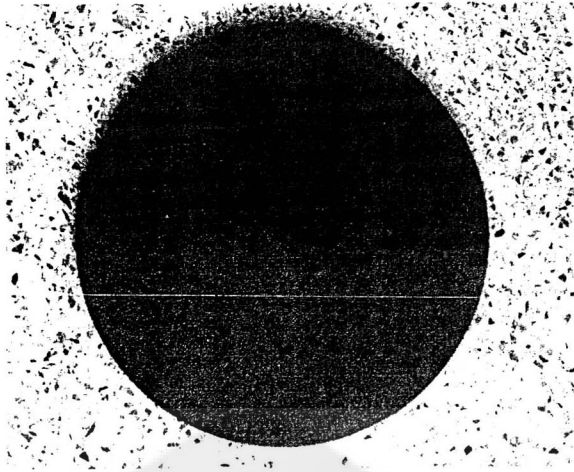
$$\begin{aligned}
 Re_j &= \frac{\rho V D}{\mu} \\
 &= \frac{1.23 \times 21.2314225 \times 0.01}{1.79 \times 10^{-5}} \\
 &\approx 14600
 \end{aligned}$$

การออกแบบการคำนวณ

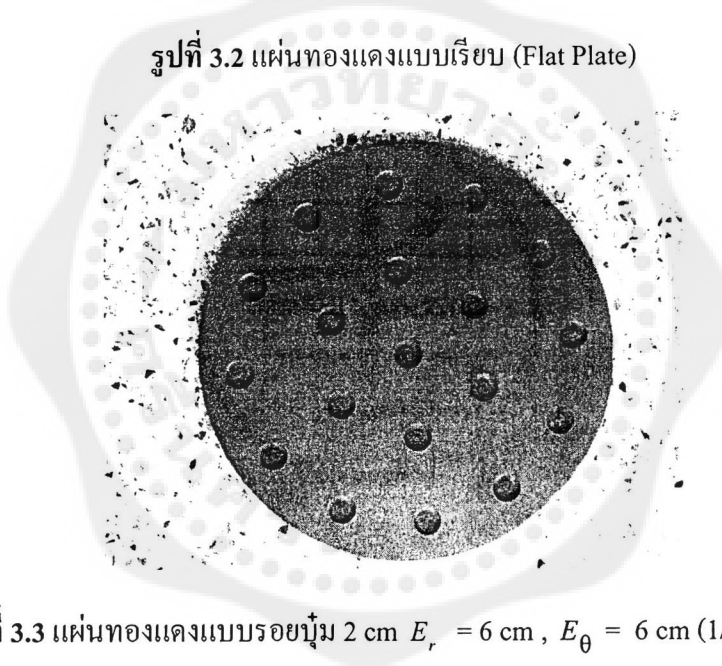
ตารางที่ 3.1 การเตรียมชุดทดลองกับแผ่นทองแดงแผ่นเรียบ รอยนูน 2 cm โดยมี 2 แผ่น แตกต่างกัน

ดังนี้ $E_r = 3d$, $E_\theta = 3d$ และ $E_r = 2d$, $E_\theta = 1.5d$, รอยนูน 1 cm โดยมี 2 แผ่น
แตกต่างกันดังนี้ $E_r = 3d$, $E_\theta = 3d$ และ $E_r = 2d$, $E_\theta = 1.5d$ จะเปลี่ยนค่าอัตราการ
ไหลที่ละ 10 LPM ตั้งแต่ 10-100 LPM

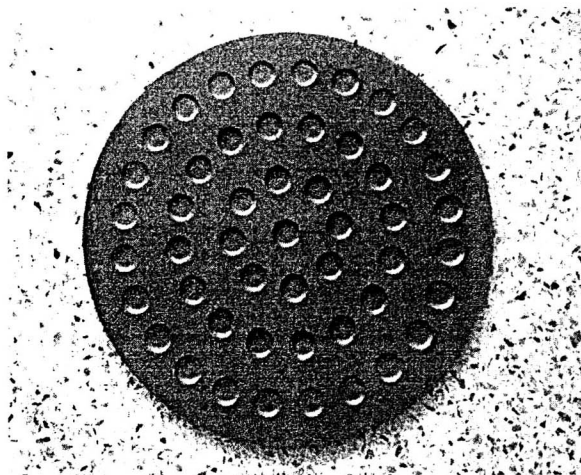
อัตราส่วนระหว่าง ระยะห่างระหว่าง ระยะห่างระหว่าง ระยะห่างระหว่าง				
เส้นผ่านศูนย์กลางศูนย์กลางของรอย ศูนย์กลางของรอย แผ่นทดสอบกับ				
รอยนูนและแผ่น นูนตามแนวรัศมี นูนตามแนวเส้น หัวฉีด				
ทดสอบ(d/D)	E_r	รอบวง E_θ	B (cm)	($d/D - E_r - E_\theta - B$)
- (Flat)	-	-	2 Close	Flat-2 Close
- (Flat)	-	-	4 Close	Flat-4 Close
- (Flat)	-	-	6 Close	Flat-6 Close
- (Flat)	-	-	2 Open	Flat-2 Open
1/15	3d	3d	2 Close	1/15-3d-3d-2Close
1/15	3d	3d	4 Close	1/15-3d-3d-4Close
1/15	3d	3d	6 Close	1/15-3d-3d-6Close
1/15	3d	3d	2 Open	1/15-3d-3d-2Open
1/15	2d	1.5d	2 Close	1/15-2d-1.5d-2Close
1/15	2d	1.5d	4 Close	1/15-2d-1.5d-4Close
1/15	2d	1.5d	6 Close	1/15-2d-1.5d-6Close
1/15	2d	1.5d	2 Open	1/15-2d-1.5d-2Open
1/30	3d	3d	2 Close	1/30-3d-3d-2Close
1/30	3d	3d	4 Close	1/30-3d-3d-4Close
1/30	3d	3d	6 Close	1/30-3d-3d-6Close
1/30	3d	3d	2 Open	1/30-3d-3d-2Open
1/30	2d	1.5d	2 Close	1/30-2d-1.5d-2Close
1/30	2d	1.5d	4 Close	1/30-2d-1.5d-4Close
1/30	2d	1.5d	6 Close	1/30-2d-1.5d-6Close
1/30	2d	1.5d	2 Open	1/30-2d-1.5d-2Open



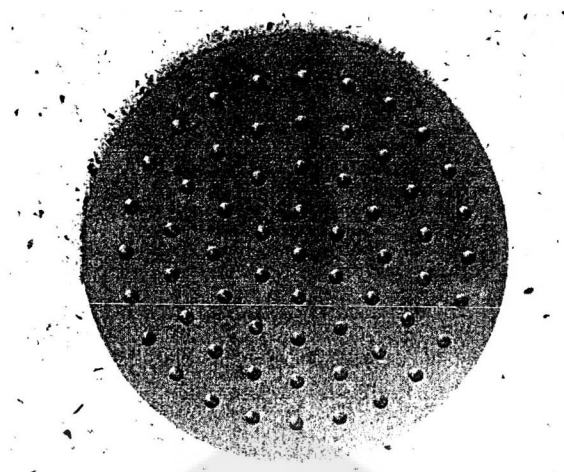
รูปที่ 3.2 แผ่นทองแดงแบบเรียบ (Flat Plate)



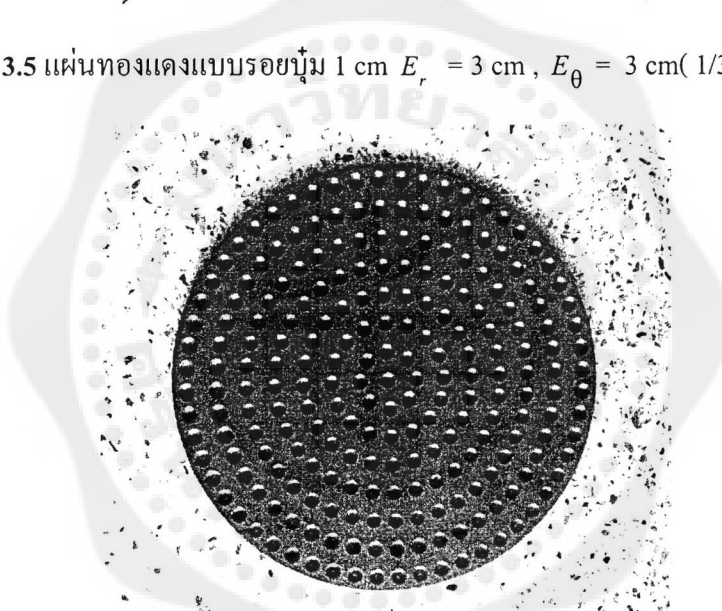
รูปที่ 3.3 แผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm (1/15-3d-3d)



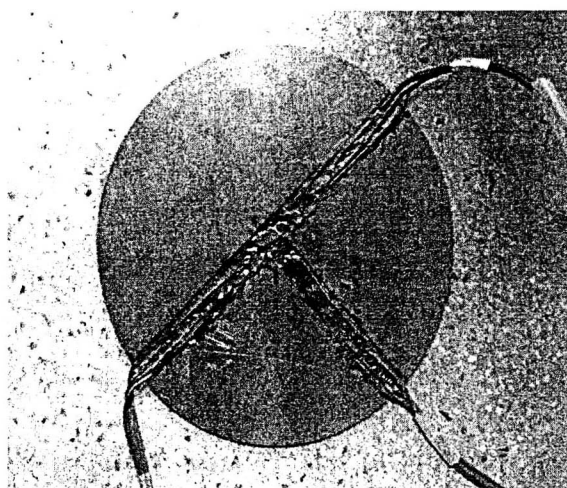
รูปที่ 3.4 แผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/15-2d-1.5d)



รูปที่ 3.5 แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/30-3d-3d)



รูปที่ 3.6 แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2d-1.5d)



รูปที่ 3.7 เทอร์โทคัปเปิล(Type T)วัดอุณหภูมิแผ่นทองแดง

2. นำค่า h มาคำนวณหาค่านัสเซิลันัมเบอร์ Nu_m จากสมการ 2.33

$$Nu_m = \frac{hD}{k}$$

โดย h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อนจากตารางที่ 2.5

D คือ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง

k คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศ



บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

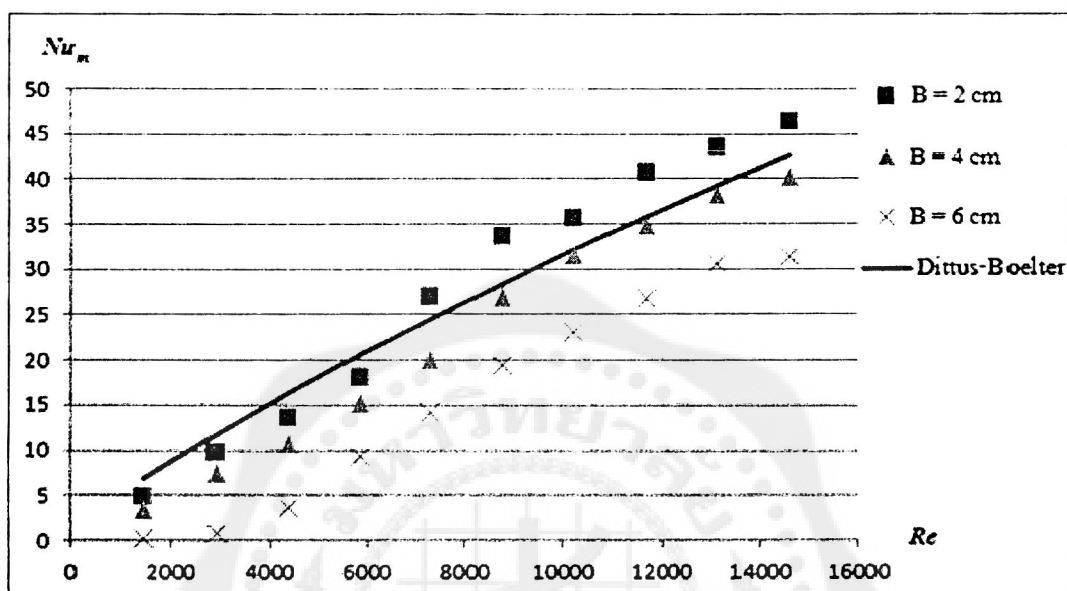
วิธีการทดลอง

การทดลองจะต้องมีการเตรียมอุปกรณ์ต่างๆให้อยู่ในสภาพพร้อมในการทดลอง ดังนี้

1. ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ โดยให้หัวฉีดทำมุม 90° กับแผ่นทดสอบ จากนั้นทำการปรับระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทดสอบตามระยะ 2, 4 และ 6 cm
2. นำแผ่นทองแดงที่ฝังเทอร์โมคัปเปิลมาวางบนฮีทเพลต จากนั้นทำการเสียบปลั๊กฮีทเพลตเพื่อเป็นการให้ความร้อนกับแผ่นทองแดง
3. เป็ดวาล์วลมเพื่อให้ลมผ่านโรตาริเตอร์ ปรับค่าอัตราการไหลของลมโดยเพิ่มขึ้นทีละ 10 LPM ตั้งแต่ 10-100 LPM จากนั้นปล่อยให้อุณหภูมิของแผ่นทดสอบที่วัดจากเทอร์โมคัปเปิลคงที่ แล้วทำการบันทึกค่าอุณหภูมิจาก DATA LOCKER

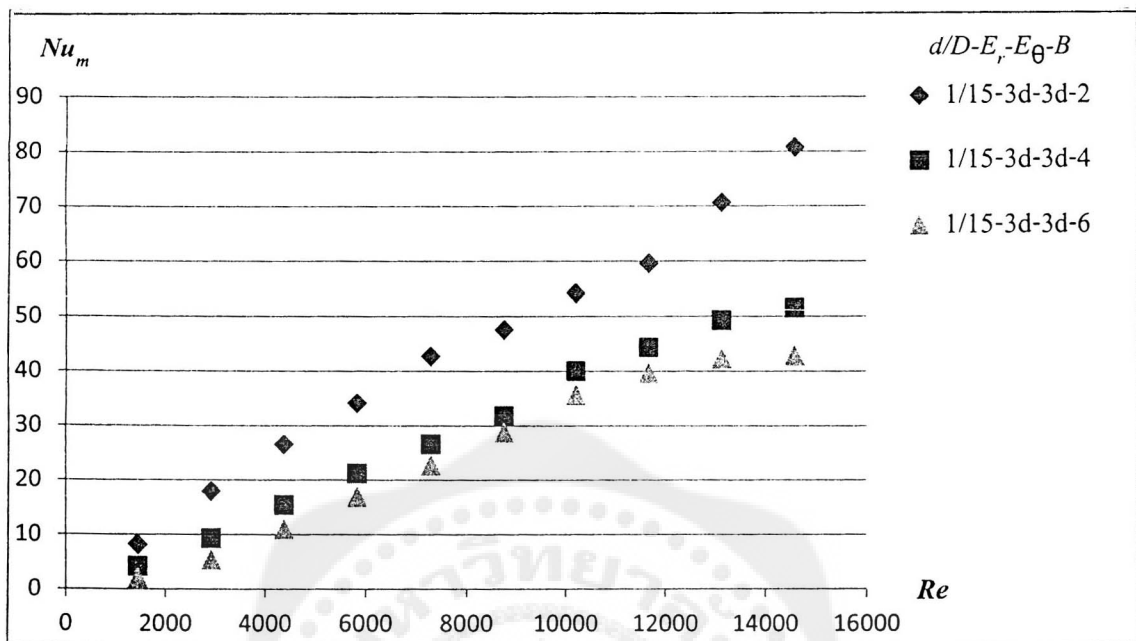
ผลการทดลอง

- กราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าระหว่างค่า Re และ Nu_m



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบแบบปิด

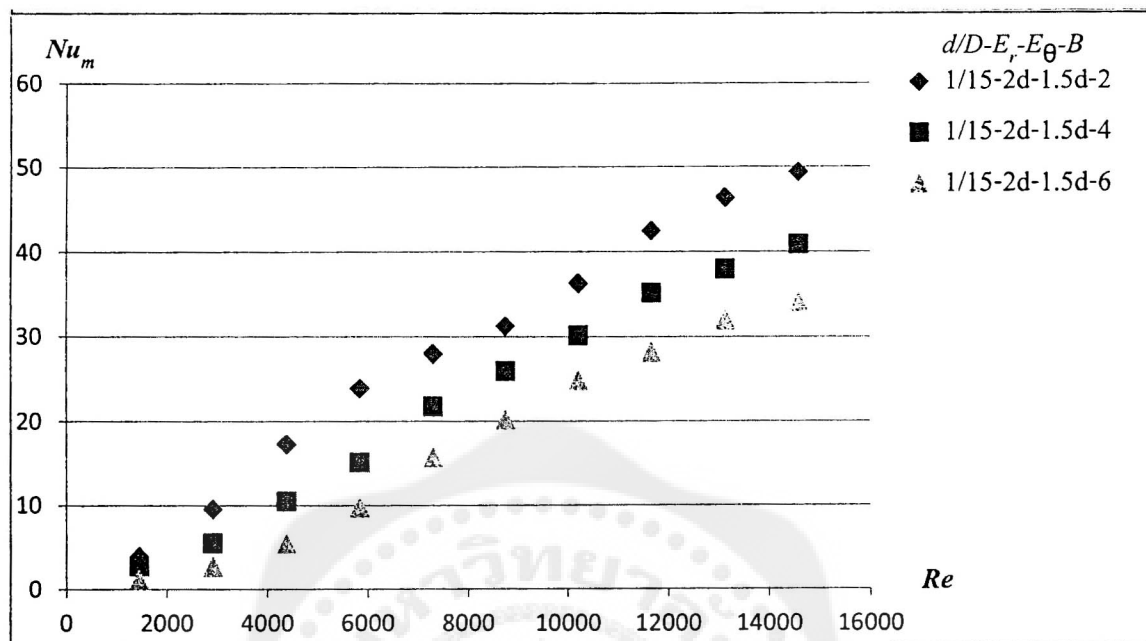
จากรูปที่ 4.1 พบว่า ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นทองแดงแบบเรียบแบบปิดที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm เพราะมีค่า Nu_m มากที่สุด รองลงมาได้แก่ระยะห่างที่ 4 cm และ 6 cm ตามลำดับ โดยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น และเมื่อเทียบกับกราฟของสมการ Dittus-Boelter (สมการที่ 2.15) พบว่าแนวโน้มของกราฟไปในทิศทางเดียวกันเพราะฉะนั้นผลการทดลองนี้จึงสามารถเชื่อถือได้ โดยที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทดสอบที่ 2 cm มีเปอร์เซ็นต์ความความคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 5.6% ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทดสอบที่ 4 cm มีเปอร์เซ็นต์ความความคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 11.5% ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทดสอบที่ 6 cm มีเปอร์เซ็นต์ความความคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 38.5%



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm

$E_r = 6 \text{ cm}$, $E_\theta = 6 \text{ cm}$ แบบปิด

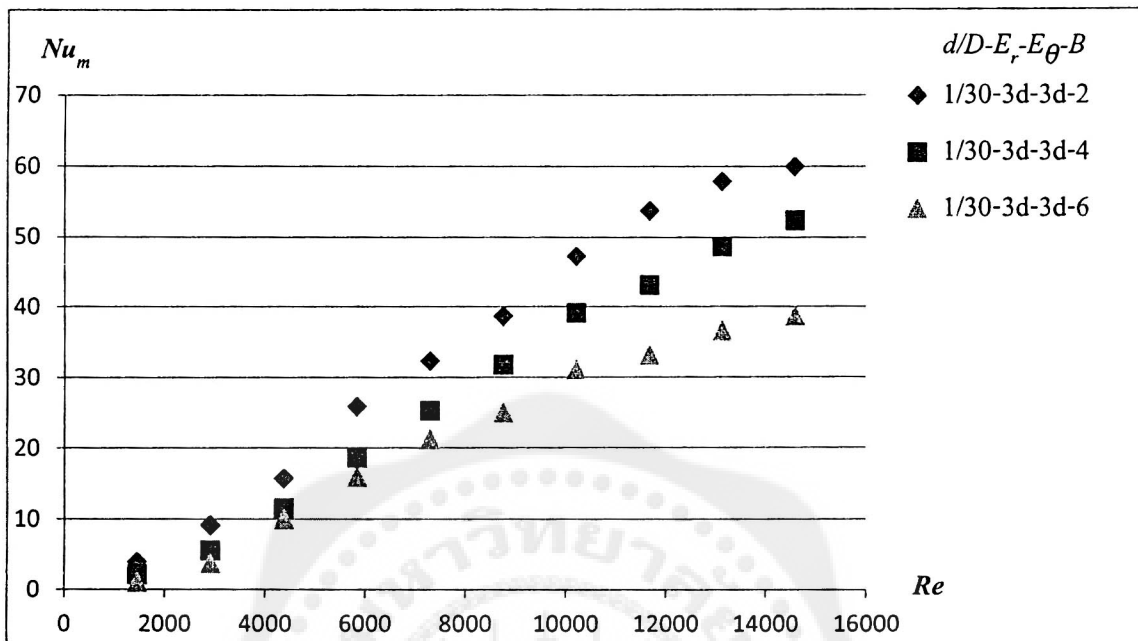
จากรูปที่ 4.2 พบว่า ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 6 \text{ cm}$, $E_\theta = 6 \text{ cm}$ แบบปิด ที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm เพราะมีค่า Nu_m มากที่สุด รองลงมาได้แก่ระยะห่างที่ 4 cm และ 6 cm ตามลำดับ โดยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm

$$E_r = 4 \text{ cm}, E_\theta = 3 \text{ cm} \text{ แบบปิด}$$

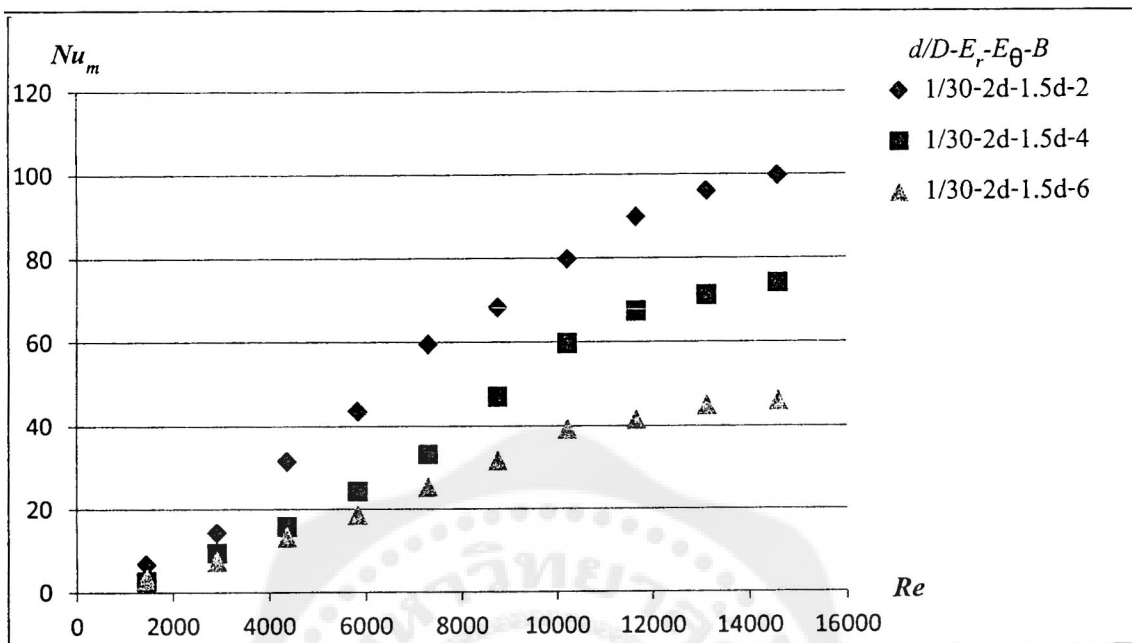
จากรูปที่ 4.3 พบว่า ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4 \text{ cm}$, $E_\theta = 3 \text{ cm}$ แบบปิด ที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm เพราะมีค่า Nu_m มากที่สุด รองลงมาได้แก่ระยะห่างที่ 4 cm และ 6 cm ตามลำดับ โดยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm

$$E_r = 3 \text{ cm}, E_\theta = 3 \text{ cm} \text{ แบบปิด}$$

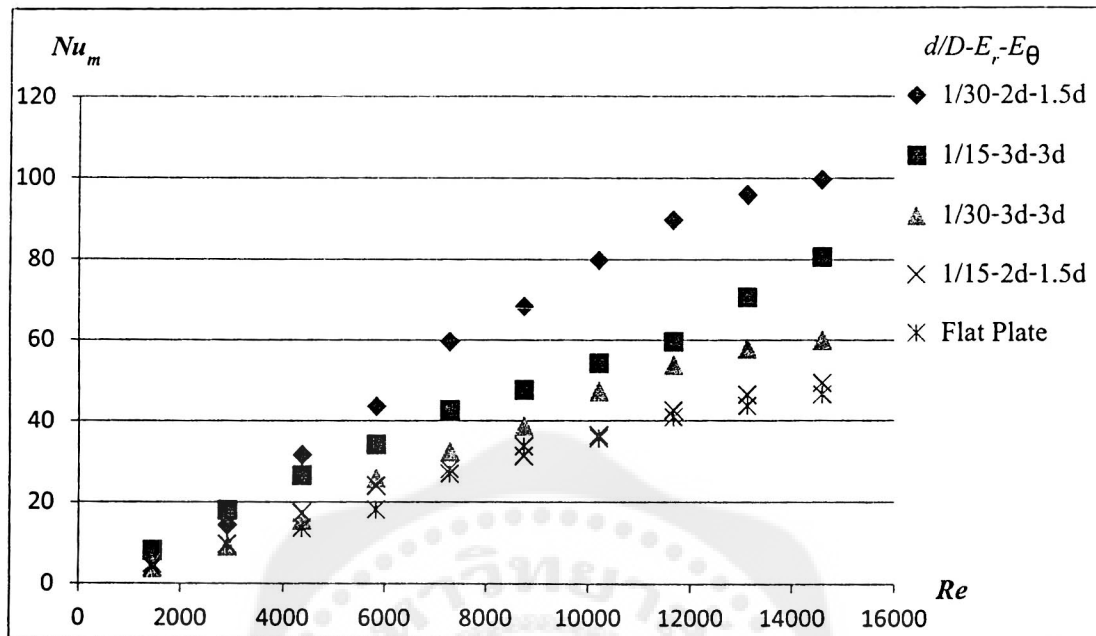
จากรูปที่ 4.4 พบว่า ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 3 \text{ cm}$, $E_\theta = 3 \text{ cm}$ แบบปิด ที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ระยะห่างระหว่างหัวนูนกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm เพราะมีค่า Nu_m มากที่สุด รองลงมาได้แก่ระยะห่างที่ 4 cm และ 6 cm ตามลำดับ โดยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของแผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm

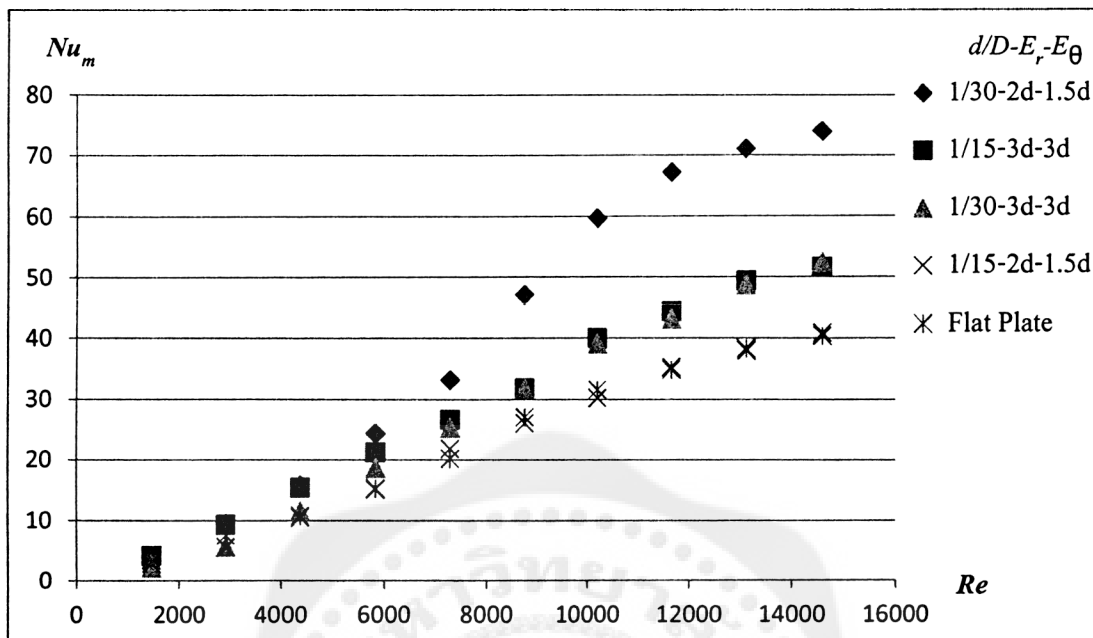
$$E_r = 2 \text{ cm}, E_\theta = 1.5 \text{ cm} \text{ แบบปิด}$$

จากรูปที่ 4.5 พบว่า ความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของแผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2 \text{ cm}$, $E_\theta = 1.5 \text{ cm}$ แบบปิด ที่ดีที่สุดจะอยู่ที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm เพราะมีค่า Nu_m มากที่สุด รองลงมาได้แก่ระยะห่างที่ 6 cm และ 4 cm ตามลำดับ โดยความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น



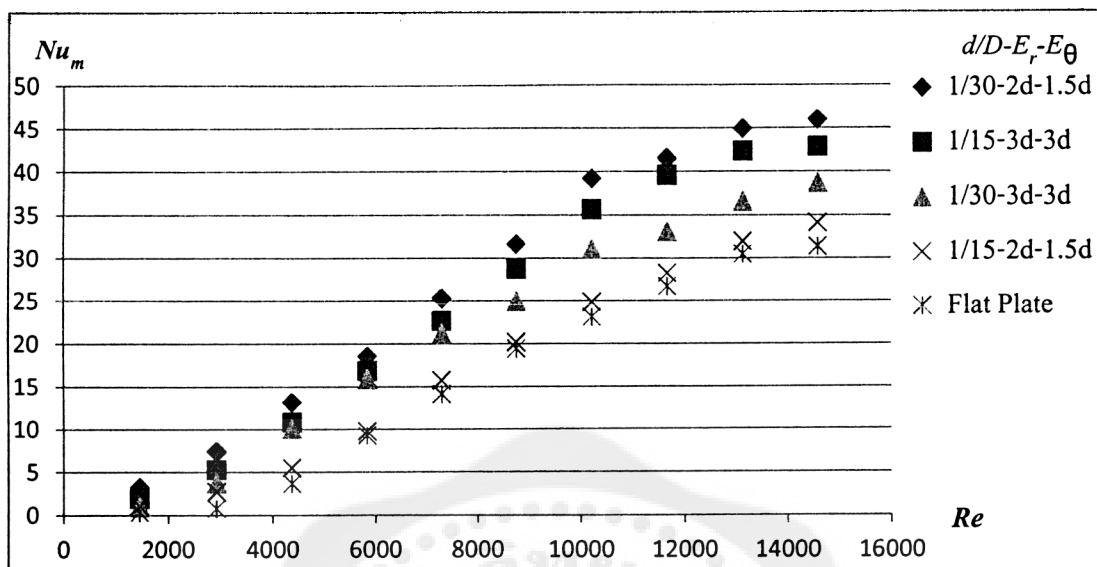
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง ที่ 2 cm แบบปิด

จากรูปที่ 4.6 พบแผ่นทองแดงที่มีความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบปิด ที่ดีที่สุด คือ แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm ค่าที่รองลงมา คือ แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm และแผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm ตามลำดับ ส่วนแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm จะมีค่าใกล้เคียงกับแผ่นทองแดงในลักษณะแผ่นเรียบ โดยค่าความสามารถในการระบายความร้อนของทุกแผ่นนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อ Re เพิ่มขึ้น



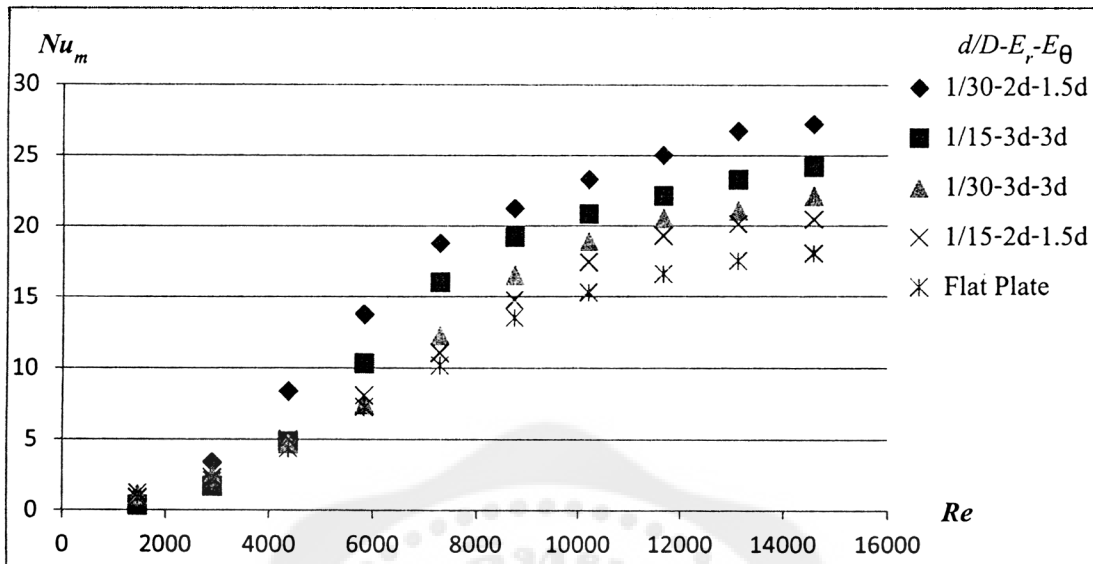
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง ที่ 4 cm แบบปิด

จากรูปที่ 4.7 พบว่า แผ่นทองแดงที่มีความสามารถในการระบายความร้อนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm แบบปิด ที่ดีที่สุด คือ แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm รองลงมาคือ แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm และ แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm ตามลำดับ ส่วนค่าความสามารถในการระบายความร้อนของแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm และแผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบมีค่าที่เกาะกลุ่มกัน โดยค่าความสามารถในการระบายความร้อนของทุกแผ่นนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อ Re เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง ที่ 6 cm แบบปิด

จากรูปที่ 4.8 พบว่า แผ่นทองแดงที่มีความสามารถในการระบายความร้อนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm แบบปิด ที่ดีที่สุด คือ แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm รองลงมาคือ แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm และ แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm ตามลำดับ ส่วนค่าความสามารถในการระบายความร้อนของแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm และแผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบมีค่าที่เกาะกลุ่มกัน โดยค่าความสามารถในการระบายความร้อนของทุกแผ่นนั้นมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อ Re เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Re และ Nu_m ของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง ที่ 2 cm แบบเปิด

จากรูปที่ 4.9 พบว่าความสามารถในการระบายความร้อนของระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทดสอบที่ 2 cm แบบเปิด ที่ดีที่สุด คือ แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm รองลงมาคือแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm, แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm, แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm และแผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบ ตามลำดับ โดยทุกแผ่นจะมีค่าความสามารถในการระบายความร้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เมื่อค่า Re เพิ่มขึ้น

บทที่ 5

สรุป

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาการระบายความร้อนบนผนังที่มีรอยบุ๋ม ผู้จัดทำได้ศึกษาในช่วงของค่าเรย์โนลด์สเบอร์ที่ $1460 \leq Re \leq 14600$ สรุปดังนี้

1. เมื่อเปรียบเทียบค่า Nu_m จากกราฟทั้งหมดในลักษณะแบบปิด พบว่า ความสามารถในการระบายความร้อนของหัวฉีด แบบปิด แผ่นทองแดงรอยบุ๋ม 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm ในระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm มีความสามารถในการระบายความร้อนดีที่สุด เนื่องจากรอยบุ๋มทำให้อากาศที่มากกระแทกเกิดการปั่นป่วน และลักษณะของแผ่นทดสอบแผ่นนี้ก็มีจำนวนรอยบุ๋มที่มากที่สุด ทำให้การระบายความร้อนดีที่สุดตามไปด้วย และที่ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทดสอบที่ 2 cm ระบายความร้อนได้ดีกว่าที่ 4 cm และ 6 cm เนื่องมาจากระยะแผ่นปิดยิ่งใกล้ก็จะยิ่งส่งเสริมให้เกิดกระแทกไปมาของอากาศที่อยู่ระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทดสอบ ทำให้เกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนดี
2. $Re = 14600$ สามารถระบายความร้อนได้ดีที่สุด เนื่องจากความเร็วลมมากที่สุด จึงทำให้อากาศเย็นพาความร้อนออกจากแผ่นทดสอบได้อย่างรวดเร็ว

คำแนะนำ

ในการทดลองนี้มีข้อจำกัดในการหาค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (f) ซึ่งไม่สามารถหาได้เนื่องจากแผ่นทดสอบมีขนาดเล็ก ทำให้ผลต่างความดันระหว่างทางเข้ากับทางออกต่างกันไม่มาก ทำให้ไม่สามารถทำการวัดค่าหามาได้ แนะนำให้ใช้วิธีคำนวณทางลักษณะการไหล (CFD) แทนเพื่อสามารถทำนายหาประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนได้

บรรณานุกรม

- [1] Z.B. Yan , K.C. Toh , F. Duan , T.N. Wong , K.F. Choo , Y.S. Chua , “Experimental study of impingement spray cooling for high power devices” , School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, 50 Nanyang Avenue, Singapore , Temasek Laboratory @ NTU, Singapore , DSO Laboratories, Singapore .
- [2] Mangesh Chaudhari , Bhalchandra Puranik, Amit Agrawal , “Multiple orifice synthetic jet for improvement in impingement heat transfer” , Department of Mechanical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai 400 076, India .
- [3] สิทธิพร พึ่งใหญ่. พื้นฐานอุณหพลศาสตร์-กลศาสตร์ของไหล (THERMO-FLUID).ศูนย์ผลิตตำรา. กรุงเทพฯ : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
- [4] สุนันท์ ศรีญานิษฐ์. (2536). กลศาสตร์ของของไหล FLUID MECHANICS. ภาควิศวกรรมเครื่องกล. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
- [5] วิศิษฐ์ จาตุรमान. (2535-2542). กลศาสตร์ของของไหล (FLUID MECHANICS). ซีเอ็ดดูเคชั่น
- [6] นักสิทธิ์ คูวัฒนาชัย. (2533). การถ่ายเทความร้อน (HEAT TRANSFER). กรุงเทพฯ : ฟิสิกส์เซ็นเตอร์
- [7] ผศ.ทวีวัฒน์ สุภารส. บทเรียนออนไลน์ผ่านอินเทอร์เน็ต เรื่องหลักการวิศวกรรมความร้อน.
Online Instruction on internet principle of Thermal Engineering



ภาคผนวก ก ข้อมูลจากการทดสอบ



ตารางภาคผนวกที่ ก1 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบเรียบ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง
ที่ 2 cm แบบปิด (Flat Plate-2)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	135.6	140.5	140.7	140.9	139.8	134.8	129.7	124.4	124.0	118.4
2	140.2	145.6	145.7	145.8	144.7	139.3	133.8	128.2	127.9	121.7
3	140.5	142.1	143.6	144.3	145.7	140.3	143.8	128.4	128.3	121.5
4	141.7	147.2	147.2	147.3	146.2	140.6	135.0	129.3	129.1	122.8
5	140.9	146.5	146.4	146.6	145.4	139.8	134.1	128.4	128.2	121.8
6	140.1	145.7	145.6	145.7	144.4	138.8	133.2	127.4	127.2	120.8
7	150.1	155.7	155.8	156.0	154.8	149.2	143.5	137.7	137.3	130.8
8	142.6	148.1	148.1	148.2	147.0	141.4	135.9	130.2	129.9	123.7
9	150.0	155.5	155.6	155.8	154.6	149.3	143.8	138.3	138.1	132.2
10	140.7	146.1	146.1	146.2	145.1	139.8	134.4	128.9	128.7	122.7
11	134.2	139.2	139.3	139.4	138.2	133.0	127.6	122.2	122.0	116.0
12	143.6	149.1	149.1	149.3	148.0	142.5	136.8	131.0	130.8	124.4
13	139.0	144.5	144.4	144.5	143.3	137.7	132.1	126.3	126.1	119.7
14	138.9	144.3	144.3	144.4	143.3	137.7	132.1	126.4	126.2	119.8
15	137.0	142.3	142.3	142.5	141.3	135.8	130.3	124.7	124.5	118.2
16	135.2	140.2	140.3	140.5	139.4	134.1	128.8	123.3	123.2	117.0
T_{in}	36.4	36.4	36.7	36.7	36.8	36.1	35.5	34.8	34.6	34.0
T_{out}	50.2	51.0	50.5	50.5	51.2	50.8	48.2	47.2	46.6	44.8

ตารางภาคผนวกที่ ก2 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบเรียบ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่น
ทองแดงที่ 4 cm แบบปิด (Flat Plate-4)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	124.6	134.8	140.4	140.9	138.6	135.7	131.3	127.6	124.3	121.7
2	128.5	139.4	145.5	146.0	143.7	140.5	135.8	131.9	128.4	125.7
3	129.1	140.1	146.3	146.8	144.4	141.2	136.4	132.4	128.9	126.1
4	129.6	140.9	147.0	147.5	145.0	141.8	136.9	132.9	129.3	126.6
5	129.6	140.9	147.0	147.5	145.0	141.8	136.9	132.9	129.3	126.6
6	127.8	139.0	145.2	145.7	143.2	139.9	135.0	131.0	127.4	124.7
7	140.0	150.7	157.0	157.6	155.1	151.8	147.0	143.1	139.6	136.7
8	130.4	141.5	147.6	148.0	145.5	142.4	137.6	133.6	130.1	127.4
9	138.5	149.2	155.2	155.7	153.4	150.4	145.9	142.1	138.7	136.2
10	128.2	138.9	144.9	145.2	142.8	139.8	135.1	131.2	127.8	125.2
11	123.1	133.6	139.4	139.8	137.4	134.5	129.9	126.0	122.5	120.0
12	131.3	142.5	148.6	149.2	146.7	143.5	138.7	134.6	131.0	128.3
13	126.7	138.0	144.1	144.5	142.0	138.7	133.8	129.7	126.1	123.3
14	126.4	137.5	143.5	143.9	141.4	138.2	133.3	129.2	125.6	122.9
15	124.2	135.2	141.1	141.4	138.9	135.7	130.9	126.8	123.3	120.6
16	122.5	133.1	138.7	139.0	136.4	133.6	128.9	124.8	121.4	118.9
T_{in}	33.6	34.3	34.3	33.2	32.5	32.1	31.5	31.3	30.9	30.7
T_{out}	42.6	45.3	45.5	45.3	45.0	45.7	44.6	44.7	44.7	44.4

ตารางภาคผนวกที่ ก3 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบเรียบ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง
ที่ 6 cm แบบปิด (Flat Plate-6)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	145.9	146.9	145.6	142.9	138.7	134.7	129.7	125.5	121.9	117.3
2	151.8	152.7	151.4	148.3	143.9	139.5	134.1	129.6	125.8	121.0
3	152.6	153.6	152.2	149.1	144.6	140.1	134.6	130.1	126.2	121.4
4	153.5	154.5	153.0	149.8	145.2	140.7	135.2	130.6	126.7	121.8
5	152.6	153.6	152.1	148.9	144.3	139.8	134.2	129.6	125.7	120.8
6	151.7	152.7	151.2	148.0	143.4	138.8	133.2	128.7	124.8	119.9
7	164.9	166.0	164.7	161.6	157.0	151.9	146.0	141.5	137.8	132.9
8	153.9	154.9	153.4	150.2	145.7	141.3	135.7	131.2	127.3	122.5
9	161.4	162.5	161.1	158.1	153.9	149.6	144.1	139.6	135.9	131.3
10	150.9	151.8	150.4	147.3	143.0	138.7	133.3	128.9	125.2	120.5
11	145.4	146.3	145.0	141.9	137.5	133.4	128.1	123.9	120.2	115.6
12	155.2	156.2	154.7	151.6	147.0	142.5	136.9	132.2	128.4	123.5
13	150.6	151.5	150.0	146.7	142.0	137.5	131.9	127.3	123.5	118.6
14	149.9	150.8	149.3	146.1	141.5	137.0	131.5	126.9	123.0	118.2
15	147.3	148.1	146.6	143.4	138.8	134.5	129.0	124.6	120.7	115.9
16	144.8	145.6	144.1	141.0	136.6	132.4	127.0	122.9	119.0	114.4
T_{in}	34.2	33.6	33.0	32.5	32.2	31.9	31.3	31.3	31.0	30.9
T_{out}	37.2	36.9	39.2	39.2	43.2	43.8	42.9	41.7	41.1	39.9

ตารางภาคผนวกที่ ก4 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 6$ cm,
 $E_\theta = 6$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบปิด
 (1/15-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	161.7	162.4	162.2	160.6	157.8	155.0	152.3	148.2	145.2	141.4
2	168.6	169.3	169.0	167.2	164.2	161.1	158.3	154.0	150.7	146.9
3	169.9	170.5	170.2	168.4	165.3	162.2	159.3	155.0	151.7	147.9
4	171.1	171.7	171.4	169.6	166.4	163.3	160.4	156.1	152.7	148.9
5	170.4	171.0	170.8	168.9	165.8	162.6	159.8	155.4	152.0	148.2
6	169.5	170.1	169.9	168.0	164.8	161.7	158.9	154.5	151.1	147.3
7	182.2	183.0	182.8	181.1	177.9	174.8	171.8	167.3	163.9	159.8
8	171.5	172.1	171.9	170.0	166.8	163.8	161.0	156.6	153.3	149.5
9	178.6	179.4	179.4	177.5	174.5	171.6	168.8	164.5	161.2	157.5
10	167.4	167.9	167.8	165.8	162.7	159.9	157.2	152.9	149.8	146.1
11	160.8	160.9	161.0	158.6	155.7	153.1	150.5	146.3	143.3	139.6
12	172.8	173.5	173.3	171.4	168.3	165.3	162.4	158.0	154.6	150.8
13	168.5	169.0	168.8	166.8	163.6	160.5	157.7	153.2	149.8	145.9
14	167.7	168.3	168.0	166.1	162.9	159.9	157.1	152.7	149.4	145.5
15	165.1	165.5	165.3	163.2	160.2	157.2	154.5	150.1	147.0	143.1
16	161.9	162.3	162.1	160.0	157.2	154.6	151.9	147.6	144.7	141.0
T_{in}	41.9	40.9	39.8	38.7	38.3	38.7	38.1	37.6	37.8	36.9
T_{out}	69.2	71.2	69.9	67.7	66.7	64.7	63.0	60.9	61.5	60.5

ตารางภาคผนวกที่ ก5 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 6$ cm,
 $E_\theta = 6$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm
 แบบปิด(1/15-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	134.9	128.9	126.6	125.3	125.8	127.2	129.3	131.8	134.9	139.2
2	139.8	133.3	130.9	129.4	130.0	131.5	133.7	136.4	139.7	144.1
3	140.8	134.2	131.8	130.2	130.8	132.3	134.6	137.2	140.6	145.1
4	141.7	135.0	132.6	131.0	131.6	133.1	135.4	138.1	141.5	146.0
5	141.0	134.2	131.7	130.1	130.7	132.2	134.5	137.2	140.6	145.2
6	140.1	133.4	130.9	129.3	129.9	131.4	133.7	136.4	139.8	144.3
7	152.6	146.2	143.8	142.2	142.7	144.2	146.3	148.7	151.9	156.3
8	142.4	135.8	133.4	131.8	132.3	133.8	136.1	138.7	142.0	146.6
9	150.6	144.2	141.8	140.2	140.6	142.1	144.1	146.6	149.7	154.0
10	139.0	132.7	130.4	128.9	129.3	130.8	132.8	135.6	138.8	143.3
11	132.6	126.5	124.2	122.8	123.2	124.6	126.5	129.4	132.8	137.2
12	143.7	137.0	134.5	132.9	133.4	134.9	137.1	139.9	143.2	147.7
13	138.6	131.9	129.5	128.0	128.5	130.0	132.3	135.2	138.6	143.2
14	138.3	131.7	129.3	127.8	128.3	129.8	132.1	134.8	138.3	142.8
15	135.9	129.4	127.1	125.6	126.2	127.6	129.9	132.6	136.1	140.6
16	134.0	127.8	125.5	124.1	124.5	125.9	128.0	130.6	134.2	138.6
T_{in}	35.9	35.6	35.5	35.2	35.2	35.3	35.2	35.2	35.9	37.2
T_{out}	49.9	50.3	50.1	50.1	51.2	51.4	51.7	52.6	53.6	55.5

ตารางภาคผนวกที่ ก6 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm,
 $E_\theta = 6$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 6 cm
 แบบปิด(1/15-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	136.9	132.1	128.8	126.0	123.1	120.8	119.0	118.8	119.6	123.2
2	142.0	136.9	133.4	130.5	127.3	124.8	122.9	122.8	123.6	127.5
3	34.9	35.9	39.3	40.6	43.6	43.1	41.5	40.8	41.4	41.7
4	143.6	138.3	134.7	131.8	128.5	125.9	123.9	123.9	124.7	128.6
5	142.8	137.4	133.8	130.9	127.6	125.0	123.0	123.0	123.8	127.8
6	142.0	136.6	133.0	130.2	126.8	124.2	122.2	122.1	122.9	126.9
7	150.7	144.9	141.2	138.3	134.9	132.2	130.3	130.3	131.2	135.3
8	144.5	139.2	135.7	132.8	129.5	126.8	125.0	124.9	125.7	129.6
9	152.4	147.3	143.9	141.2	137.9	135.4	133.7	133.6	134.4	138.3
10	142.1	137.0	133.5	130.9	127.6	125.1	123.2	123.1	123.9	127.6
11	135.6	130.5	127.1	124.3	121.1	118.7	116.8	116.4	117.4	120.9
12	145.5	140.1	136.6	133.6	130.3	127.7	125.8	125.7	126.5	130.5
13	140.9	135.5	131.9	128.9	125.6	123.0	121.0	120.9	121.7	125.6
14	140.6	135.3	131.7	128.8	125.5	122.9	120.9	120.8	121.6	125.5
15	138.6	133.3	129.8	126.8	123.6	121.1	119.1	118.9	119.8	123.5
16	136.3	131.3	127.9	125.0	121.9	119.5	117.5	117.2	118.3	121.8
T_{in}	33.1	33.4	33.7	33.7	34.4	34.4	34.0	34.0	34.8	34.7
T_{out}	34.9	35.9	39.3	40.6	43.6	43.1	41.5	40.8	41.4	41.7

ตารางภาคผนวกที่ ก7 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 4$ cm,
 $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm
 แบบปิด (1/15-2d-1.5d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	148.1	151.0	150.2	151.0	146.9	141.8	136.9	133.0	130.4	128.2
2	155.5	158.3	157.4	158.2	153.7	148.2	143.0	138.8	136.0	133.6
3	156.3	157.6	158.4	158.7	154.4	147.5	143.7	139.6	136.8	133.3
4	157.4	160.1	159.2	160.1	155.4	149.7	144.4	140.1	137.2	134.8
5	155.4	158.9	157.7	158.7	154.3	149.6	143.6	139.4	137.6	134.7
6	156.5	159.2	158.3	159.3	154.7	149.1	143.8	139.4	136.5	134.1
7	170.7	173.4	172.8	173.6	169.2	163.5	158.1	154.0	151.3	149.1
8	158.8	161.5	160.7	161.5	157.0	151.4	146.0	141.8	139.0	136.6
9	165.7	168.2	167.6	168.5	164.1	158.5	153.3	149.2	146.6	144.4
10	154.7	157.2	156.5	157.6	153.2	147.8	142.6	138.4	135.7	133.4
11	149.1	151.5	150.8	152.0	147.7	142.5	137.4	133.3	130.7	128.4
12	160.2	162.9	162.0	162.9	158.3	152.6	147.2	143.0	140.1	137.7
13	155.2	157.9	157.0	157.9	153.2	147.6	142.2	137.8	134.9	132.5
14	154.4	157.1	156.1	157.1	152.5	146.9	141.6	137.3	134.4	132.0
15	151.8	154.4	153.4	154.4	149.8	144.3	139.1	134.9	132.0	129.6
16	149.5	151.9	150.9	151.9	147.4	142.1	137.0	132.9	130.2	127.9
T_{in}	35.4	36.1	34.8	38.2	37.4	36.4	35.6	34.7	34.0	33.5
T_{out}	48.6	52.4	54.2	57.8	55.4	52.5	51.0	50.0	49.1	48.3

ตารางภาคผนวกที่ ก8 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 4$ cm,
 $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm
 แบบปิด (1/15-2d-1.5d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	150.1	147.6	143.4	139.6	135.8	131.0	126.8	126.6	125.6	124.3
2	156.7	154.1	149.7	145.5	141.5	136.5	132.0	130.7	129.7	128.3
3	157.5	154.3	150.3	146.4	142.3	137.8	131.6	131.7	130.7	129.3
4	158.2	155.6	151.1	146.8	142.7	137.5	133.0	131.3	130.4	128.9
5	158.4	155.3	150.2	145.3	141.5	137.7	132.6	130.3	129.4	127.9
6	157.4	154.9	150.4	146.0	142.0	136.8	132.3	129.4	128.4	127.0
7	171.9	169.5	165.3	161.0	157.1	152.2	147.7	137.5	136.5	135.0
8	159.7	157.2	152.7	148.4	144.4	139.4	134.9	132.5	131.5	130.1
9	166.7	164.2	160.0	155.8	152.0	147.1	142.7	141.7	140.8	139.4
10	155.8	153.2	149.0	144.8	140.9	135.9	131.6	131.4	130.5	129.2
11	150.0	147.5	143.4	139.4	135.5	130.7	126.5	125.2	124.3	123.1
12	160.9	158.4	154.0	149.7	145.6	140.5	136.0	132.9	132.0	130.6
13	156.1	153.5	149.0	144.7	140.5	135.4	130.9	127.9	126.9	125.6
14	155.3	152.8	148.3	144.1	140.0	134.9	130.4	127.4	126.5	125.1
15	152.6	150.1	145.7	141.5	137.5	132.4	128.0	125.1	124.2	122.8
16	150.0	147.6	143.4	139.4	135.5	130.6	126.4	123.0	122.0	120.7
T_{in}	35.3	33.8	32.9	32.8	32.2	31.5	31.3	30.3	30.5	30.4
T_{out}	44.9	43.4	47.5	47.8	45.6	43.3	42.5	42.6	42.1	41.6

ตารางภาคผนวกที่ ก9 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 4$ cm,
 $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 6 cm
 แบบปิด (1/15-2d-1.5d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	142.4	136.0	130.0	123.5	117.5	111.2	106.2	101.5	98.4	96.1
2	148.7	142.0	135.4	128.5	121.9	115.3	109.9	104.8	101.5	99.0
3	145.5	139.0	132.7	126.0	119.7	113.3	108.0	103.1	99.9	97.6
4	151.4	144.6	137.8	130.7	124.0	117.2	111.7	106.5	103.1	100.6
5	144.8	153.6	138.1	147.8	139.7	105.7	109.9	104.8	101.5	99.1
6	150.1	143.4	136.6	129.5	122.8	116.0	110.5	105.3	101.9	99.5
7	164.5	157.8	151.0	144.1	137.2	130.3	124.5	118.8	115.2	112.7
8	152.6	145.9	139.1	132.2	125.6	118.8	113.4	108.3	104.9	102.5
9	160.3	153.8	147.1	140.7	134.4	127.8	122.7	117.8	114.7	112.6
10	149.2	142.8	136.2	129.5	123.0	116.5	111.4	106.4	103.2	101.0
11	143.7	137.5	131.1	124.4	118.1	111.5	106.6	101.7	98.5	96.3
12	153.7	146.9	140.2	133.2	126.5	119.7	114.3	109.1	105.7	103.3
13	148.9	142.0	135.2	128.1	121.4	114.6	109.2	104.0	100.5	98.1
14	148.2	141.5	134.8	127.7	121.1	114.3	108.9	103.7	100.2	97.8
15	145.6	139.0	132.3	125.3	118.7	112.1	106.8	101.7	98.3	95.8
16	143.1	136.7	130.3	123.5	117.2	110.7	105.6	100.6	97.2	94.9
T_{in}	35.0	33.1	32.3	31.6	31.4	30.9	30.4	30.1	29.8	29.7
T_{out}	38.6	37.4	36.8	37.0	38.7	38.9	38.5	38.7	37.6	37.1

ตารางภาคผนวกที่ ก10 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 3$ cm ,
 $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm
 แบบปิด (1/30-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	150.4	152.6	151.1	149.5	148.3	146.1	142.8	139.5	136.6	133.9
2	156.8	159.0	157.5	155.6	154.3	151.9	148.4	144.8	141.7	138.8
3	158.8	161.1	159.6	157.6	156.3	153.8	150.3	146.6	143.4	140.5
4	159.1	161.4	159.8	157.9	156.5	154.0	150.4	146.7	143.5	140.6
5	158.5	160.9	159.3	157.3	156.0	153.5	149.9	146.1	142.9	140.0
6	157.9	160.1	158.7	156.7	155.3	152.8	149.2	145.4	142.2	139.3
7	169.0	171.3	169.9	167.7	166.3	163.8	159.4	155.1	151.7	148.5
8	160.4	162.6	161.2	159.1	157.8	155.3	151.8	148.2	145.1	142.1
9	168.2	170.5	169.1	167.0	165.8	163.4	160.1	156.6	153.7	150.8
10	157.9	160.0	158.6	156.7	155.5	153.1	149.7	146.2	143.2	140.4
11	151.3	153.0	151.9	150.1	148.8	146.5	143.1	139.6	136.6	133.8
12	161.6	163.9	162.4	160.3	159.0	156.5	152.9	149.1	145.9	142.9
13	157.0	159.2	157.7	155.6	154.3	151.7	148.0	144.2	141.0	138.1
14	156.6	158.7	157.3	155.3	153.9	151.4	147.8	144.0	140.9	137.9
15	154.3	156.4	155.0	153.1	151.7	149.3	145.7	142.0	138.8	136.0
16	151.6	153.4	152.2	150.5	149.2	146.8	143.4	139.8	136.8	134.0
T_{in}	36.0	35.0	34.3	34.4	34.2	33.8	33.3	32.8	32.5	32.2
T_{out}	49.3	50.9	52.2	62.8	61.4	61.6	58.5	55.4	52.7	50.8

ตารางภาคผนวกที่ ก11 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 3$ cm ,
 $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm
 แบบปิด (1/30-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	150.9	149.5	146.8	141.6	138.5	134.3	128.3	123.6	120.2	115.9
2	157.3	155.7	152.9	147.1	143.8	139.4	133.1	128.1	124.5	119.9
3	159.3	157.7	154.8	149.0	145.6	141.2	134.7	129.7	126.2	121.6
4	159.6	158.0	155.1	149.2	145.8	141.3	134.7	129.7	126.1	121.5
5	159.1	157.5	154.5	148.6	145.2	140.6	134.1	129.0	125.4	120.8
6	158.5	156.9	153.9	147.9	144.5	140.0	133.5	128.4	124.8	120.2
7	169.7	168.0	165.1	158.9	154.9	149.9	143.1	137.8	134.0	129.3
8	160.9	159.3	156.3	150.5	147.2	142.8	136.3	131.3	127.8	123.2
9	168.6	167.1	164.2	158.7	155.6	151.3	145.0	140.3	136.9	132.4
10	158.6	157.0	153.8	148.4	145.3	140.9	134.6	129.8	126.6	122.2
11	151.9	150.4	147.0	141.8	138.9	134.6	128.2	123.6	120.3	116.0
12	162.1	160.5	157.5	151.6	148.2	143.8	137.2	132.1	128.5	123.9
13	157.5	155.8	152.8	146.8	143.4	138.9	132.3	127.2	123.7	119.1
14	157.1	155.5	152.4	146.6	143.2	138.7	132.1	127.1	123.6	119.0
15	154.9	153.3	150.3	144.5	141.2	136.7	130.1	125.2	121.8	117.2
16	152.2	150.6	147.8	142.1	139.0	134.5	128.2	123.5	120.2	115.8
T_{in}	34.3	34.0	33.5	32.8	32.8	31.9	31.2	31.0	30.7	30.2
T_{out}	41.9	43.7	46.4	47.8	48.5	45.7	44.9	44.2	42.8	41.3

ตารางภาคผนวกที่ ก12 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 3$ cm ,
 $E_\theta = 3$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 6 cm
 แบบปิด (1/30-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	155.8	154.5	151.6	148.4	144.3	138.4	131.0	123.5	119.0	114.1
2	162.1	160.6	157.5	154.1	149.7	143.5	135.8	127.7	123.0	117.9
3	164.2	162.7	159.5	156.0	151.6	145.3	137.5	129.3	124.6	119.5
4	164.5	163.0	159.8	156.3	151.7	145.4	137.5	129.3	124.6	119.4
5	163.9	162.4	159.2	155.7	151.1	144.8	136.9	128.6	123.9	118.7
6	163.2	161.8	158.6	155.0	150.5	144.2	136.3	128.0	123.3	118.1
7	174.7	173.3	170.2	166.8	162.2	155.2	146.9	138.3	133.5	128.7
8	165.5	164.1	161.0	157.5	153.1	146.9	139.0	130.9	126.1	120.9
9	173.2	171.9	169.1	165.9	161.7	155.7	147.9	139.9	135.2	129.8
10	162.7	161.4	158.4	155.0	150.7	144.8	136.9	129.3	124.8	119.5
11	156.1	154.8	151.8	148.5	144.2	138.3	130.0	122.9	118.5	113.0
12	166.9	165.4	162.3	158.8	154.3	148.0	140.0	131.7	127.0	121.7
13	162.3	160.8	157.5	153.9	149.3	143.0	134.9	126.8	122.1	116.8
14	161.8	160.3	157.1	153.6	149.0	142.7	134.8	126.7	122.0	116.8
15	159.5	158.0	154.8	151.3	146.8	140.6	132.7	124.8	120.2	115.1
16	156.7	155.3	152.2	148.9	144.5	138.6	130.5	123.3	118.8	113.7
T_{in}	36.6	36.1	35.6	35.3	34.7	33.8	32.7	32.3	31.9	31.5
T_{out}	40.2	42.8	47.2	48.6	48.5	45.7	43.2	42.4	41.4	40.0

ตารางภาคผนวกที่ ก13 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 2$ cm ,

$E_\theta = 1.5$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm

แบบปิด (1/30-2d-1.5d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	138.3	144.2	146.3	146.0	143.5	139.6	133.6	129.6	127.2	123.5
2	143.3	149.3	151.6	151.2	148.5	144.4	138.0	133.6	131.1	127.1
3	143.9	149.9	152.2	151.8	148.9	144.8	138.3	133.9	131.3	127.3
4	144.5	150.5	152.7	152.3	149.4	145.2	138.7	134.1	131.5	127.5
5	143.4	149.4	151.6	151.1	148.2	144.0	137.4	132.8	130.2	126.1
6	142.6	148.6	150.8	150.3	147.4	143.1	136.6	132.0	129.3	125.2
7	153.0	159.3	161.6	160.9	157.5	153.0	146.1	141.3	138.5	134.4
8	145.4	151.3	153.6	153.2	150.2	146.1	139.5	135.0	132.3	128.4
9	153.6	159.5	162.0	161.7	158.8	154.8	148.5	144.2	141.5	138.0
10	143.8	149.6	151.8	151.5	148.7	144.7	138.4	134.1	131.6	127.8
11	138.1	143.7	145.9	145.6	142.9	139.1	132.9	128.5	126.1	122.5
12	146.1	152.1	154.4	154.0	151.1	146.9	140.2	135.6	132.9	129.0
13	141.5	147.4	149.6	149.1	146.1	141.9	135.3	130.6	127.9	124.0
14	141.0	146.8	148.9	148.4	145.5	141.3	134.8	130.1	127.5	123.5
15	138.5	144.2	146.2	145.7	142.7	138.6	132.1	127.6	124.9	121.0
16	136.1	141.6	143.5	143.0	140.2	136.2	129.9	125.5	122.9	119.1
T_{in}	38.3	39.1	38.6	38.2	37.6	36.9	35.7	34.8	34.6	34.3
T_{out}	57.3	60.1	69.0	69.6	70.8	67.8	65.2	62.9	60.8	58.1

ตารางภาคผนวกที่ ก14 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 2$ cm ,

$E_g = 1.5$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 4 cm

แบบปิด (1/30-2d-1.5d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	154.8	145.0	140.2	137.9	132.3	113.7	110.6	108.1	106.8	106.8
2	160.5	150.1	144.9	142.5	136.4	116.7	113.3	110.9	109.6	109.6
3	161.2	150.7	145.4	143.0	136.8	116.8	113.4	110.9	109.6	109.6
4	161.9	151.3	145.9	143.4	137.1	116.9	113.4	111.0	109.7	109.6
5	160.9	150.1	144.7	142.2	135.8	115.5	112.0	109.6	108.3	108.1
6	159.9	149.2	143.8	141.2	134.9	114.6	111.1	108.6	107.3	107.2
7	171.6	160.5	154.8	151.8	145.0	122.7	119.2	116.8	115.5	115.5
8	162.6	151.9	146.6	144.1	137.9	117.9	114.4	112.1	110.7	110.6
9	171.0	160.1	155.1	152.8	146.9	127.8	124.5	122.4	121.2	121.1
10	160.6	150.3	145.2	142.8	136.9	117.3	114.0	111.9	110.7	110.6
11	154.5	144.5	139.5	137.1	131.2	112.0	108.7	106.5	105.3	105.3
12	163.6	152.8	147.5	144.9	138.6	118.0	114.5	112.2	110.9	110.8
13	158.8	148.0	142.5	139.9	133.6	113.3	109.7	107.3	105.9	105.8
14	158.0	147.5	142.0	139.4	133.1	112.9	109.3	106.9	105.5	105.4
15	155.2	144.8	139.4	136.8	130.6	110.7	107.1	104.7	103.3	103.1
16	152.3	142.2	137.0	134.5	128.4	109.2	105.8	103.2	101.8	101.6
T_{in}	43.2	39.4	37.8	37.1	36.8	32.6	31.2	30.8	30.7	30.6
T_{out}	51.4	47.9	45.3	47.4	48.7	43.0	41.5	40.4	40.1	40.5

ตารางภาคผนวกที่ ก15 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 2$ cm ,

$E_\theta = 1.5$ cm ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 6 cm

แบบปิด (1/30-2d-1.5d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	146.9	147.2	144.4	139.7	133.8	128.9	124.7	120.9	116.2	112.7
2	152.1	152.4	149.3	144.2	137.9	132.5	128.1	124.0	119.1	115.4
3	152.7	153.0	149.8	144.6	138.2	132.7	128.2	124.1	119.2	115.3
4	153.4	153.6	150.3	145.0	138.5	133.0	128.4	124.2	119.2	115.3
5	152.2	152.4	149.1	143.7	137.1	131.6	127.0	122.8	117.8	113.9
6	151.3	151.5	148.1	142.8	136.2	130.7	126.1	121.9	116.8	112.9
7	162.7	162.9	159.6	153.9	146.7	140.9	136.1	131.7	126.4	122.3
8	154.0	154.2	150.9	145.7	139.3	133.8	129.2	125.1	120.1	116.2
9	162.1	162.4	159.3	154.4	148.3	143.1	138.8	134.8	130.1	126.4
10	152.3	152.6	149.5	144.5	138.3	133.1	128.8	124.8	120.0	116.4
11	146.4	146.6	143.6	138.6	132.6	127.4	123.1	119.2	114.4	110.8
12	154.9	155.1	151.8	146.4	139.9	134.4	129.8	125.6	120.5	116.7
13	150.1	150.2	146.8	141.4	134.8	129.2	124.6	120.4	115.3	111.4
14	149.5	149.6	146.3	140.9	134.3	128.8	124.2	120.0	115.0	111.1
15	146.9	147.0	143.7	138.3	131.8	126.3	121.7	117.6	112.7	108.8
16	144.2	144.3	141.1	135.9	129.6	124.3	119.9	115.8	111.0	107.2
T_{in}	40.7	40.4	39.9	39.1	38.1	37.5	37.0	36.6	36.0	35.5
T_{out}	53.8	53.0	55.2	58.1	56.2	53.2	50.8	49.0	47.3	46.6

ตารางภาคผนวกที่ ก16 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบเรียบ ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่น
ทองแดงที่ 2 cm แบบ เปิด (Flat Plate-2 เปิด)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	124.2	126.9	126.1	120.8	113.4	107.3	101.0	99.2	104.2	91.8
2	128.8	131.6	130.7	125.0	117.1	110.6	103.8	102.1	107.5	94.4
3	129.5	132.2	131.3	125.6	117.6	111.0	104.2	102.5	108.0	94.7
4	130.1	132.9	132.0	126.1	118.1	111.5	104.7	102.9	108.5	95.1
5	129.1	131.9	131.0	125.1	117.1	110.4	103.6	101.8	107.5	49.0
6	128.3	131.1	130.1	124.2	116.1	109.5	102.8	100.9	106.6	93.3
7	135.8	138.8	137.9	132.0	123.9	117.2	110.6	108.6	114.1	101.4
8	131.0	133.8	132.9	127.1	119.0	112.4	105.6	103.9	109.4	96.1
9	139.1	142.1	141.4	136.1	128.4	121.8	115.2	113.7	118.9	105.9
10	129.8	132.6	131.8	126.3	118.6	112.2	105.7	104.1	109.3	96.6
11	123.5	126.3	125.4	119.7	112.1	105.8	99.3	97.5	102.8	90.2
12	131.6	134.6	133.7	127.8	119.8	113.1	106.4	104.5	110.3	97.0
13	127.3	130.2	129.1	123.2	115.1	108.5	101.7	99.8	105.5	92.1
14	127.3	130.2	129.2	123.3	115.3	108.7	101.9	100.1	105.7	92.4
15	125.5	128.4	127.4	121.6	113.7	107.2	100.5	98.7	104.3	91.1
16	123.8	126.6	125.7	120.1	112.5	106.2	99.8	97.9	103.4	90.6
T_{in}	36.3	36.1	35.2	33.3	32.9	32.5	31.8	31.2	30.9	29.7
T_{out}	37.3	40.7	46.8	45.2	42.8	40.8	38.9	37.6	37.4	34.7

ตารางภาคผนวกที่ ก17 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm
ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบ เปิด (1/15-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	119.1	123.9	126.0	125.5	123.2	120.1	114.5	111.8	109.2	110.5
2	123.3	128.4	130.6	129.9	127.4	124.2	118.1	115.3	112.5	113.9
3	123.7	128.8	131.0	130.2	127.7	124.4	118.2	115.4	112.6	114.0
4	124.1	129.2	131.4	130.6	128.0	124.6	118.3	115.5	112.7	114.1
5	122.7	127.9	130.0	129.1	126.5	123.1	116.8	114.0	111.1	112.5
6	121.3	126.5	128.7	127.7	124.9	121.5	115.2	112.3	109.5	110.9
7	126.5	131.8	134.1	133.1	130.4	126.9	120.5	117.6	114.6	116.1
8	123.9	129.0	131.2	130.2	127.4	124.1	117.7	114.9	112.0	113.5
9	133.4	138.4	140.5	139.8	137.4	134.2	128.3	125.6	122.9	124.3
10	123.7	128.6	130.6	129.8	127.3	124.1	118.1	115.4	112.7	114.0
11	116.9	121.8	123.9	122.9	120.3	117.1	111.1	108.4	105.7	107.0
12	124.7	129.9	132.1	131.2	128.5	125.1	118.8	115.9	113.0	114.5
13	120.4	125.5	127.6	126.6	123.9	120.5	114.1	111.3	108.4	109.8
14	120.1	125.1	127.2	126.3	123.6	120.2	113.9	111.0	108.1	109.6
15	117.8	122.7	124.7	123.7	121.0	117.6	111.4	108.5	105.7	107.1
16	115.6	120.3	122.3	121.3	118.6	115.3	109.3	106.5	103.8	105.2
T_{in}	32.8	33.0	31.8	30.7	30.1	29.9	29.2	28.9	28.5	28.7
T_{out}	33.7	35.3	35.4	37.9	38.3	38.7	37.0	36.0	34.9	34.7

ตารางภาคผนวกที่ ก18 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงแบบรอยขั้วม 2 cm $E_r = 4\text{ cm}$, $E_\theta = 3\text{ cm}$
ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบ เปิด (1/15-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	141.2	139.3	136.0	130.7	122.7	116.2	111.6	107.0	116.9	113.6
2	147.6	145.4	141.8	136.2	127.8	120.9	116.2	111.2	122.0	118.6
3	148.8	146.6	143.0	137.2	128.8	121.8	117.1	112.1	123.0	119.6
4	150.0	147.7	144.1	138.3	129.7	122.8	118.0	113.0	124.0	120.6
5	149.3	147.0	143.4	137.5	129.0	121.9	117.1	112.1	123.1	119.7
6	148.5	146.1	142.4	136.6	128.0	120.9	116.1	111.1	122.2	118.7
7	155.6	153.2	149.3	143.2	134.2	126.9	121.9	116.7	128.0	124.5
8	150.9	148.7	145.0	139.3	130.7	123.6	118.8	113.8	124.7	121.3
9	158.8	156.7	153.4	148.1	140.1	133.2	128.6	123.8	134.2	130.7
10	148.6	146.4	142.9	137.4	129.3	122.7	118.1	113.3	123.7	120.3
11	141.3	139.1	135.5	130.0	121.9	115.2	110.7	105.9	116.1	112.8
12	152.2	149.8	146.2	140.4	131.7	124.6	119.8	114.7	125.8	122.4
13	147.8	145.4	141.7	135.9	127.2	120.2	115.4	110.3	121.4	118.0
14	147.6	145.2	141.6	135.8	127.3	120.3	115.5	110.5	121.5	118.2
15	145.4	143.1	139.5	133.8	125.4	118.6	113.8	108.9	119.7	116.4
16	142.8	140.5	137.2	131.8	123.7	117.1	112.5	107.6	118.0	114.8
T_{in}	34.0	33.6	32.2	31.7	30.6	29.9	29.5	29.1	29.5	29.1
T_{out}	39.8	38.3	37.7	40.3	39.3	37.8	36.5	35.3	35.8	34.7

ตารางภาคผนวกที่ ก19 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงรอยบุ๋ม 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm
ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบเปิด (1/15-3d-3d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	111.8	120.7	123.6	122.4	120.8	116.3	111.5	109.6	103.8	98.4
2	115.7	125.3	128.6	127.2	125.4	120.7	115.6	113.5	107.5	102.0
3	116.4	126.2	129.6	128.1	126.3	121.5	116.4	114.3	108.2	102.7
4	117.2	127.1	130.5	129.0	127.2	122.4	117.2	115.1	109.0	103.4
5	116.1	125.9	129.5	127.9	126.1	121.2	116.0	113.9	107.8	102.2
6	114.9	124.9	128.3	126.7	124.9	119.9	114.7	112.7	106.5	100.9
7	119.9	130.1	133.8	132.2	130.3	125.3	120.0	117.9	111.7	105.9
8	117.6	127.4	130.9	129.3	127.4	122.5	117.3	115.3	109.1	103.5
9	127.5	136.7	140.1	138.7	136.9	132.5	127.6	125.6	119.8	114.5
10	117.9	127.0	130.4	128.9	127.0	122.4	117.5	115.5	109.7	104.3
11	110.7	119.8	123.1	121.4	119.6	114.8	109.9	108.1	102.0	96.6
12	118.4	128.4	132.1	130.5	128.7	123.8	118.6	116.5	110.4	104.8
13	114.5	124.4	128.0	126.4	124.6	119.7	114.5	112.4	106.3	100.7
14	114.6	124.5	128.1	126.5	124.7	119.8	114.7	112.6	106.6	101.0
15	113.0	122.7	126.2	124.6	122.9	118.1	113.0	111.0	105.0	99.5
16	111.4	120.9	124.2	122.8	121.1	116.4	111.6	109.7	103.9	98.5
T_{in}	31.5	31.4	30.2	30.1	29.7	29.1	28.8	28.5	27.7	27.3
T_{out}	34.1	34.6	34.6	35.3	37.5	37.0	35.6	34.4	32.8	31.8

ตารางภาคผนวกที่ ก.20 อุณหภูมิจากแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm
ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm แบบ เปิด (1/30-2d-1.5d)

จุดที่	Re									
	1500	3000	4400	5900	7300	8800	10300	11700	13200	14600
1	116.2	120.9	122.8	121.8	120.4	115.1	110.2	105.8	108.0	111.3
2	119.9	124.8	126.9	125.8	124.4	118.6	113.3	108.8	111.1	114.6
3	120.1	125.1	127.1	125.9	124.5	118.5	113.2	108.6	111.0	114.5
4	120.3	125.3	127.3	126.0	124.7	118.5	113.1	108.5	110.9	114.5
5	118.8	123.8	125.8	124.5	123.2	116.9	111.5	106.9	109.3	112.9
6	117.6	122.5	124.4	123.1	121.9	115.5	110.1	105.4	107.9	111.3
7	122.8	128.0	130.1	128.9	127.5	121.2	115.7	111.0	113.3	116.9
8	120.5	125.5	127.4	126.2	124.9	118.6	113.3	108.7	111.0	114.5
9	130.4	135.2	137.2	136.2	134.7	129.3	124.4	120.0	122.0	125.3
10	121.0	125.8	127.8	126.7	125.3	119.7	114.7	110.3	112.5	115.8
11	114.5	119.1	121.1	120.1	118.7	113.0	108.0	103.6	105.8	109.0
12	120.7	125.7	127.7	126.4	125.1	118.7	113.3	108.7	111.1	114.6
13	116.3	121.2	123.0	121.6	120.5	113.9	108.5	103.9	106.3	109.7
14	115.9	120.8	122.6	121.2	120.1	113.5	108.1	103.5	106.0	109.4
15	113.7	118.4	120.2	118.7	117.7	111.0	105.6	101.1	103.6	106.9
16	111.6	116.1	117.8	116.4	115.5	108.9	103.6	99.2	101.7	104.8
T_{in}	32.7	32.5	31.5	31.0	30.9	29.5	28.8	28.4	28.7	28.7
T_{out}	35.8	35.2	36.4	36.9	36.7	35.3	35.0	34.2	34.2	33.9

ตารางภาคผนวกที่ ก21 คำนวณเชลล์นัมเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบเรียบ (Flat Plate) ที่มี
ระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B) ที่ 2, 4 และ 6 cm แบบปิด

Re	$B=2\text{ cm}$	$B=4\text{ cm}$	$B=6\text{ cm}$
1500	4.772	3.336	0.265
3000	9.606	7.432	0.723
4400	13.587	10.670	3.632
5900	18.085	15.255	9.228
7300	26.840	20.103	14.069
8800	33.627	26.959	19.401
10200	35.553	31.531	23.107
11700	40.723	34.793	26.665
13200	43.608	38.293	30.457
14600	46.410	40.307	31.321

ตารางภาคผนวกที่ ก22 คำนวณเชลล์นัมเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 6\text{ cm}$,
 $E_\theta = 6\text{ cm}$ (1/15-3d-3d) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B)
ที่ 2, 4 และ 6 cm แบบปิด

Re	$B=2\text{ cm}$	$B=4\text{ cm}$	$B=6\text{ cm}$
1500	8.097	4.092	1.909
3000	17.923	9.270	5.247
4400	26.455	15.411	10.825
5900	34.049	21.233	16.830
7300	42.621	26.603	22.664
8800	47.577	31.804	28.701
10200	54.203	39.993	35.648
11700	59.552	44.365	39.564
13200	70.608	49.321	42.313
14600	80.678	51.560	42.829

ตารางภาคผนวกที่ ก23 คำนวณเชลล์นัมเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 4$ cm,
 $E_\theta = 3$ cm (1/15-2d-1.5d) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด
 (B) ที่ 2, 4 และ 6 cmแบบปิด

Re	$B=2$ cm	$B=4$ cm	$B=6$ cm
1500	3.886	2.761	1.062
3000	9.524	5.520	2.667
4400	17.212	10.449	5.444
5900	23.890	15.082	9.708
7300	27.956	21.748	15.679
8800	31.170	25.962	20.143
10200	36.255	30.134	24.837
11700	42.398	35.161	28.198
13200	46.317	37.938	31.925
14600	49.279	40.861	34.065

ตารางภาคผนวกที่ ก24 คำนวณเชลล์นัมเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 3$ cm ,
 $E_\theta = 3$ cm (1/30-3d-3d) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด (B)
 ที่ 2, 4 และ 6 cmแบบปิด

Re	$B=2$ cm	$B=4$ cm	$B=6$ cm
1500	3.852	2.126	0.960
3000	9.079	5.552	3.679
4400	15.627	11.480	9.983
5900	25.769	18.615	15.857
7300	32.293	25.248	21.135
8800	38.587	31.757	24.912
10200	47.172	39.104	31.052
11700	53.718	43.077	33.062
13200	57.806	48.615	36.528
14600	59.894	52.365	38.653

ตารางภาคผนวกที่ ก25 คำนวณเซลนัมเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 2$ cm ,
 $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2d-1.5d) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและหัวฉีด
 (B) ที่ 2, 4 และ 6 cm แบบปิด

Re	$B=2$ cm	$B=4$ cm	$B=6$ cm
1500	6.709	2.737	3.203
3000	14.192	9.426	7.338
4400	31.467	15.759	13.100
5900	43.482	24.230	18.512
7300	59.474	33.134	25.247
8800	68.250	46.987	31.617
10200	79.759	59.639	39.170
11700	89.690	67.215	41.473
13200	95.916	71.029	44.870
14600	99.638	73.903	45.917

ตารางภาคผนวกที่ ก26 คำนวณเชลล์นัมเบอร์ Nu_m จากแผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบ(Flat Plate), รอบ
 บั้ม 2 cm โดยมี 2 แผ่น แตกต่างกันดังนี้ $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm (1/15-
 3d-3d) และ $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/15-2d-1.5d), รอบบั้ม 1 cm โดยมี
 2 แผ่น แตกต่างกันดังนี้ $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/30-3d-3d) และ $E_r =$
 2 cm , $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2d-1.5d) ที่มีระยะห่างระหว่างแผ่นทองแดงและ
 หัวฉีด (B) ที่ 2 cm แบบ เปิด

Re	Flat Plate	1/15-6-6	1/15-4-3	1/30-3-3	1/30-2-1.5
1500	0.827	0.317	1.157	1.057	0.385
3000	1.996	1.668	2.255	2.310	3.320
4400	4.306	4.808	4.960	4.641	8.364
5900	7.240	10.319	8.055	7.419	13.734
7300	10.150	15.983	11.031	12.226	18.747
8800	13.486	19.194	14.725	16.486	21.237
10200	15.258	20.852	17.383	18.883	23.291
11700	16.543	22.133	19.265	20.525	24.994
13200	17.468	23.296	20.115	21.078	26.682
14600	18.006	24.182	20.443	22.090	27.173

ภาคผนวก ข ตัวอย่างการคำนวณ



วิธีการคำนวณ

หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน h ของที่้อตราการไหลที่ 10 LPM ของแผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบ ที่ระหว่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดงที่ 2 cm จากสมการ

โดย รัศมีท่อ = 0.005 m

รัศมีแผ่นทองแดง = 0.15 m.)

ρ ของอากาศ = 1.23 Kg/m³

V ความเร็วที่ได้จากการคำนวณในบทที่ 2 ที่้อตราการไหล 10 LPM = 2.12314225 m/s

$T_{out} = 50.2^{\circ}C$ (จากตารางภาคผนวก ก1)

$T_{in} = 36.4^{\circ}C$

$T_w = 140.6^{\circ}C$

$T_b = 43.3^{\circ}C$

$C_p = 1.005 \times 1000 \text{ J}$

$k = 0.026 \text{ W/(m}^{\circ}C)$ จากตารางที่ 2.5

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T = h A_s \Delta T_w$$

โดย $\left(\dot{m}\right) = \rho V A_c$ เมื่อ A_c = พื้นที่ท่อ

$$\begin{aligned} A_c &= \pi r^2 \\ &= \pi 0.005^2 \\ &= 7.85 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \left(\dot{m}\right) &= 1.23 \times 2.12314225 \times (7.85 \times 10^{-5}) \\ &= 2.05 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\Delta T = (T_{out} - T_{in})$$

$$\Delta T = (50.2 - 36.4)$$

$$= 13.8$$

$$A_s = \text{พื้นที่ผิวของแผ่นทองแดง } (\pi r^2)$$

$$A_s = (\pi r^2)$$

$$= \pi 0.15^2$$

$$= 0.07068$$

$$\Delta T_w = (T_w - T_b)$$

$$\Delta T_w = (140.6 - 43.3)$$

$$= 97.3$$

$$\therefore h = \frac{\dot{m} C_p \Delta T}{A_s \Delta T}$$

$$= \frac{2.05 \times 10^{-5} \times 1.005 \times 1000 \times 13.8}{0.07068 \times 97.3}$$

$$= 0.413533$$

คำนวณหาค่านัสเซิลนัมเบอร์ Nu_m จากสมการ 2.33

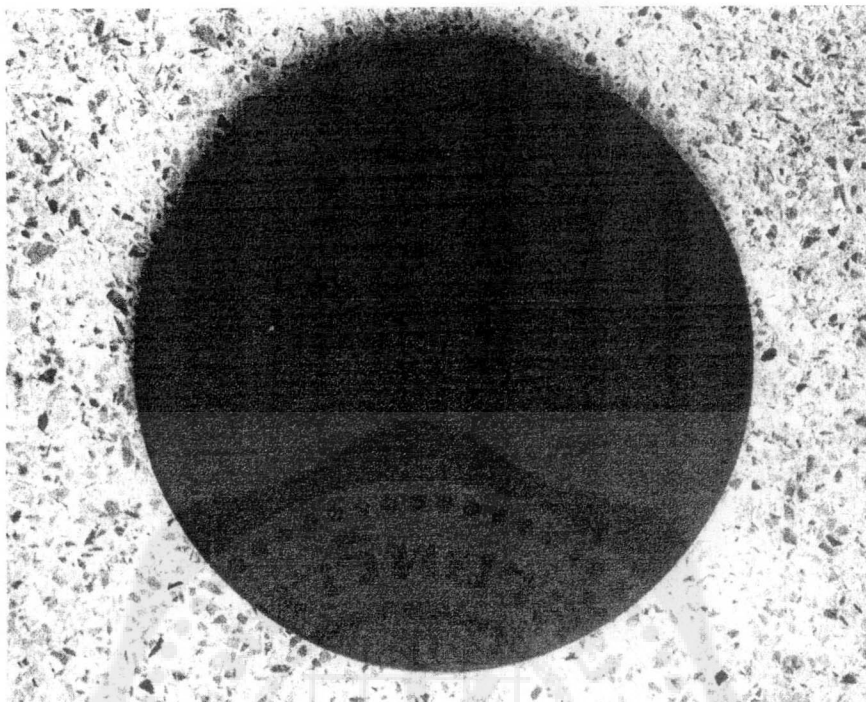
$$Nu_m = \frac{hD}{k}$$

$$= \frac{0.413533 \times 0.30}{0.026}$$

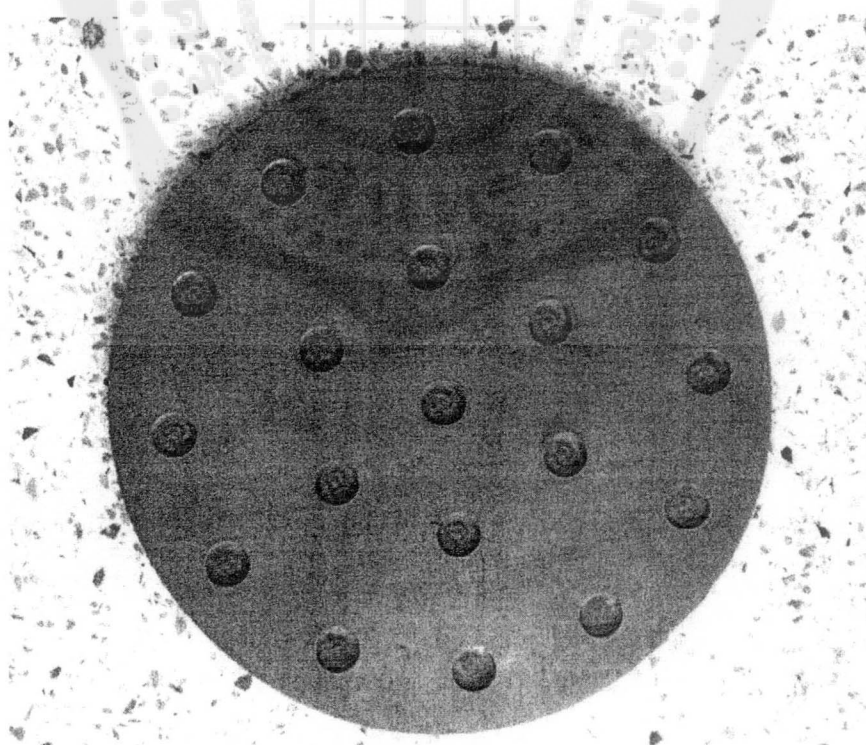
$$= 4.771535$$

ภาคผนวก ค เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง

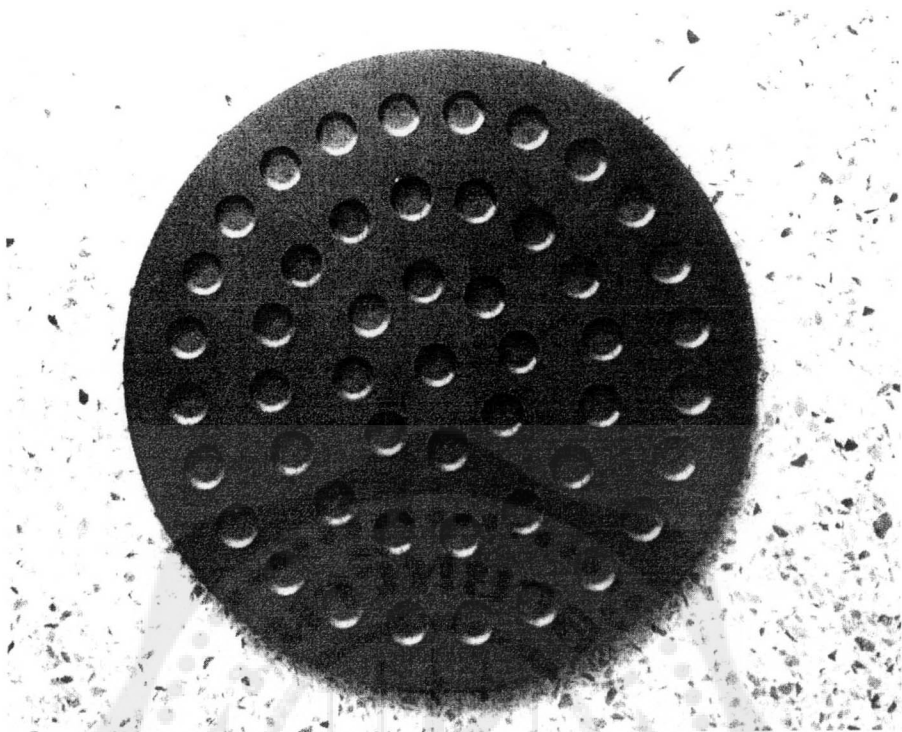




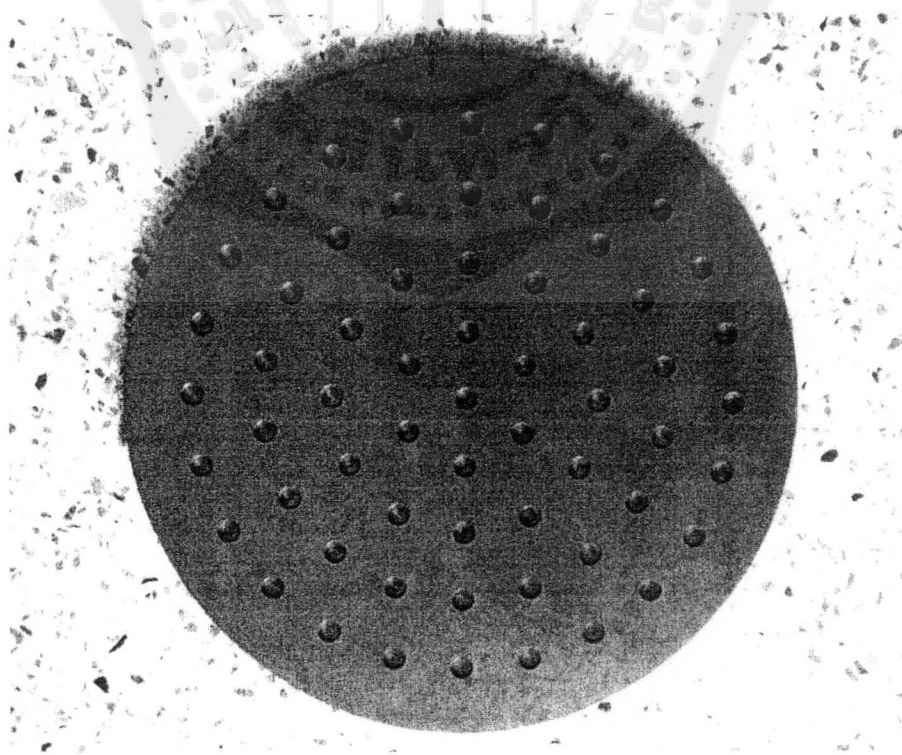
รูปผนวกที่ ค1 แผ่นทองแดงแบบเรียบ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm (Flat Plate)



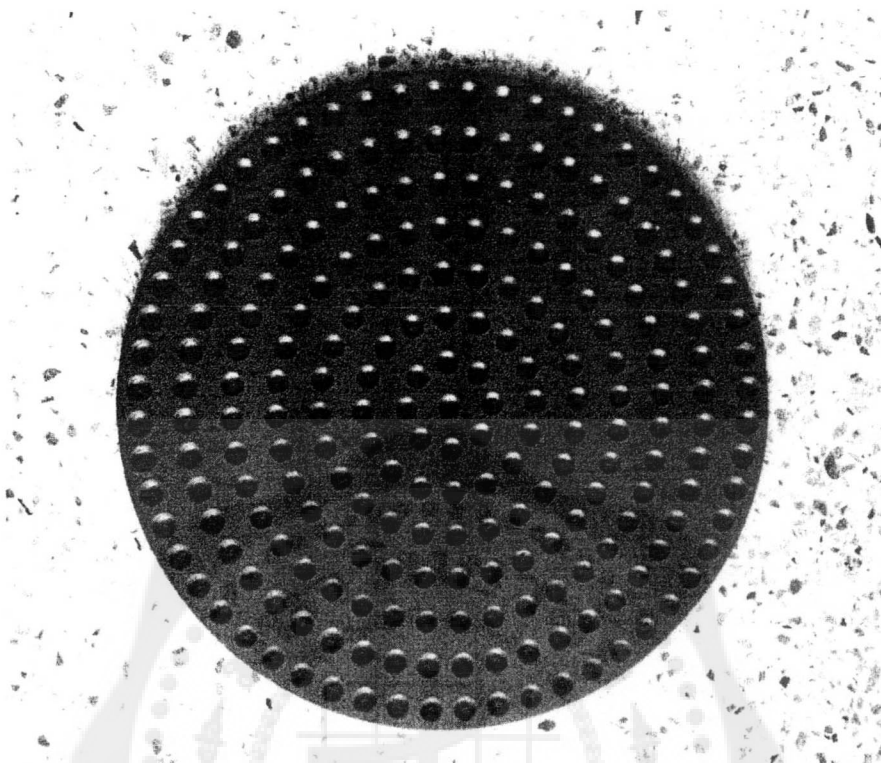
รูปผนวกที่ ค2 แผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm (1/15-3d-3d)



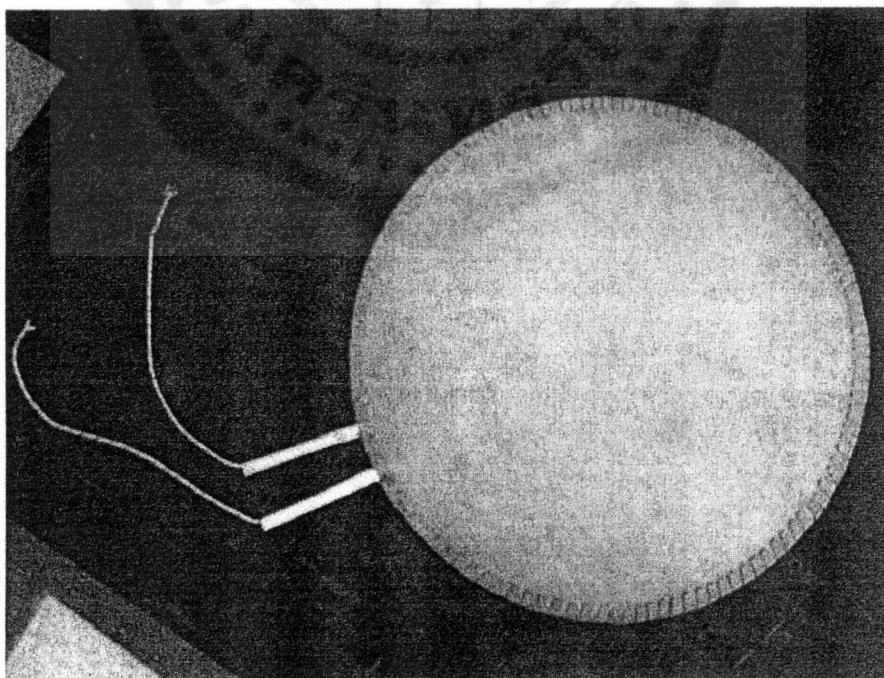
รูปผนวกที่ ค3 แผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/15-2d-1.5d)



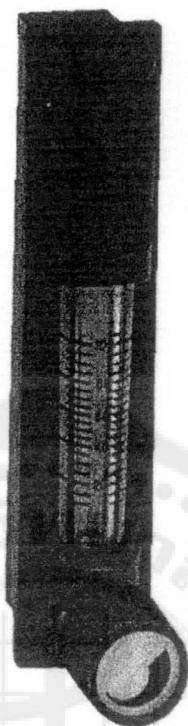
รูปผนวกที่ ค4 แผ่นทองแดงแบบรอยปุ่ม 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/30-3d-3d)



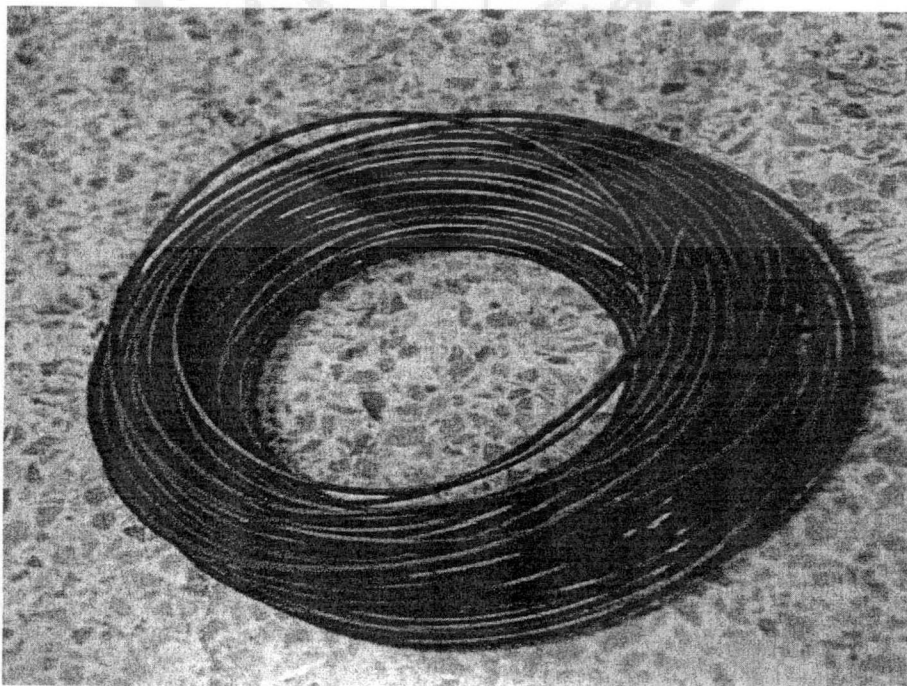
รูปผนวกที่ ค5 แผ่นทองแดงรอยนูน 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2d-1.5d)



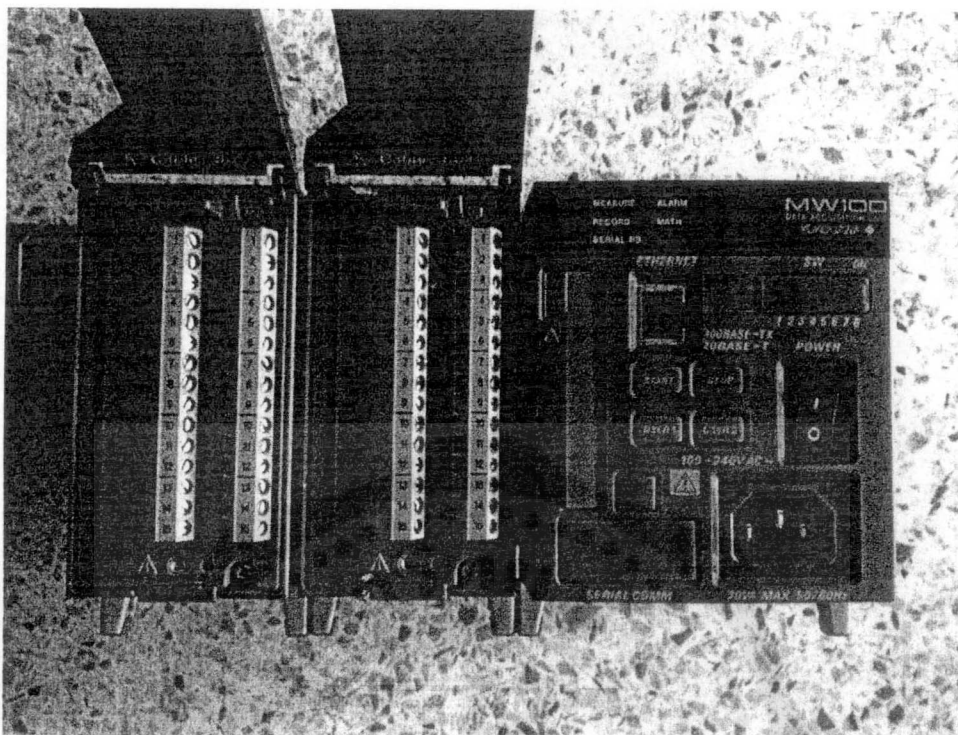
รูปผนวกที่ ค6 Heat plate



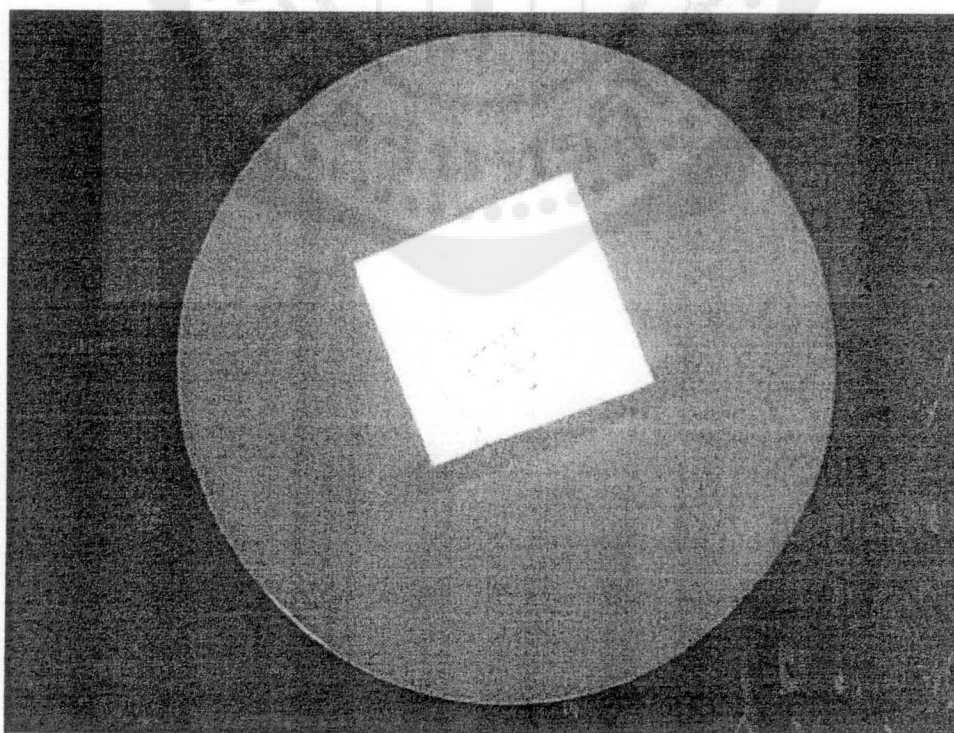
รูปผนวกที่ ค7 Rotameter วัดอัตราการไหลของอากาศในช่วง 10-100 LPM



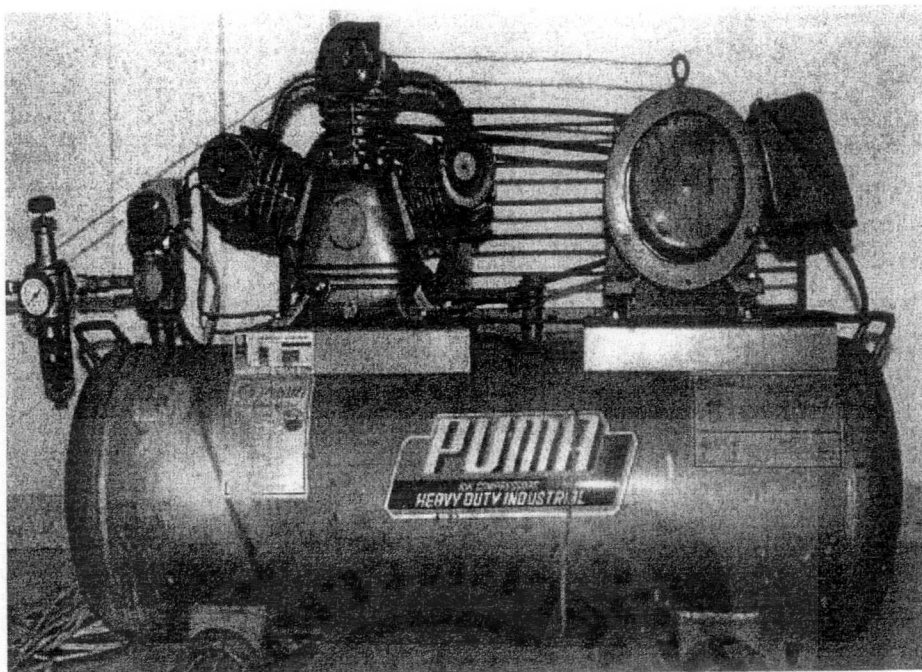
รูปผนวกที่ ค8 Thermocouple Type T



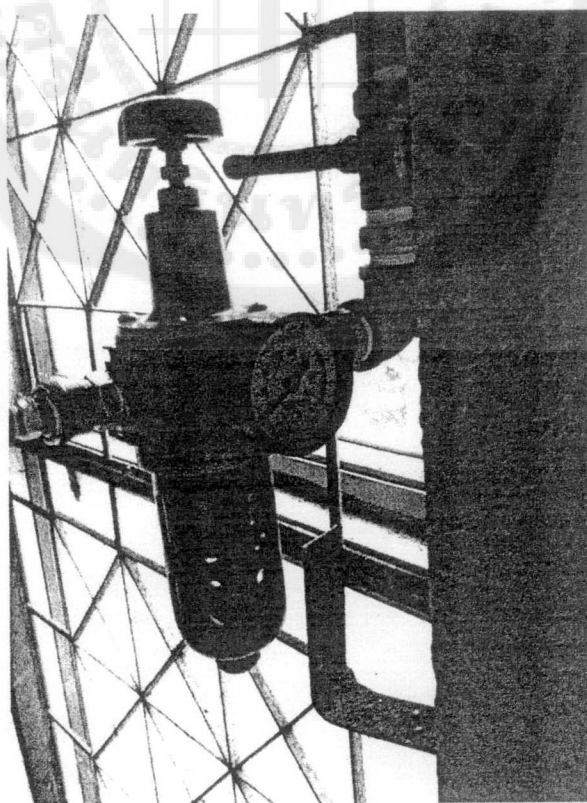
รูปผนวกที่ ค9 DATA LOCKER รุ่น MW100



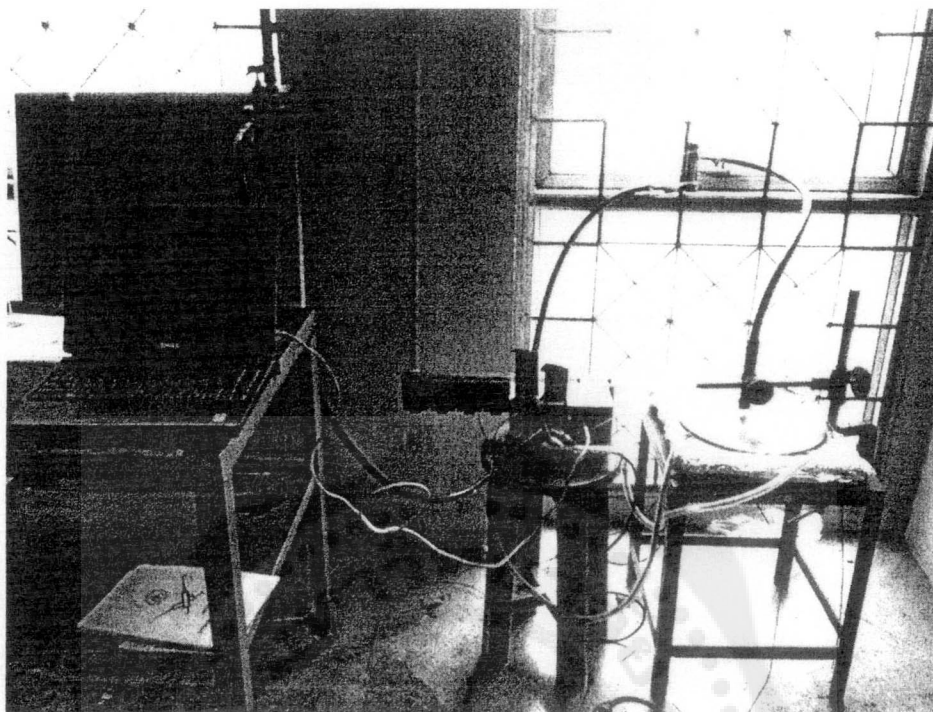
รูปผนวกที่ ค10 แผ่นอะคลิลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 cm



รูปผนวกที่ ค11 ปัมลม



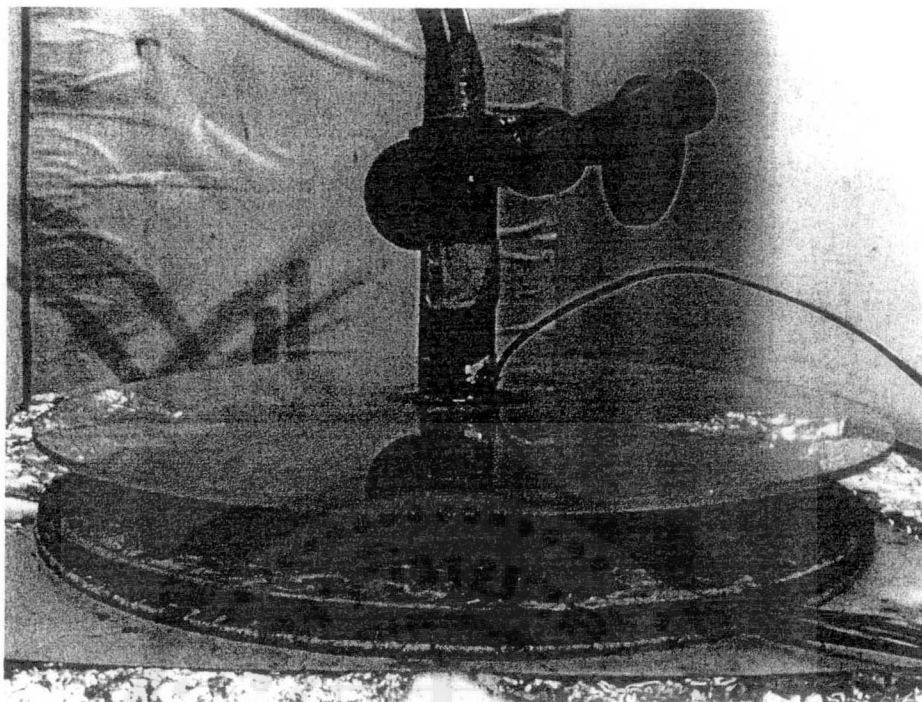
รูปผนวกที่ ค12 เกจวัดความดันและตัวปรับค่าความดัน



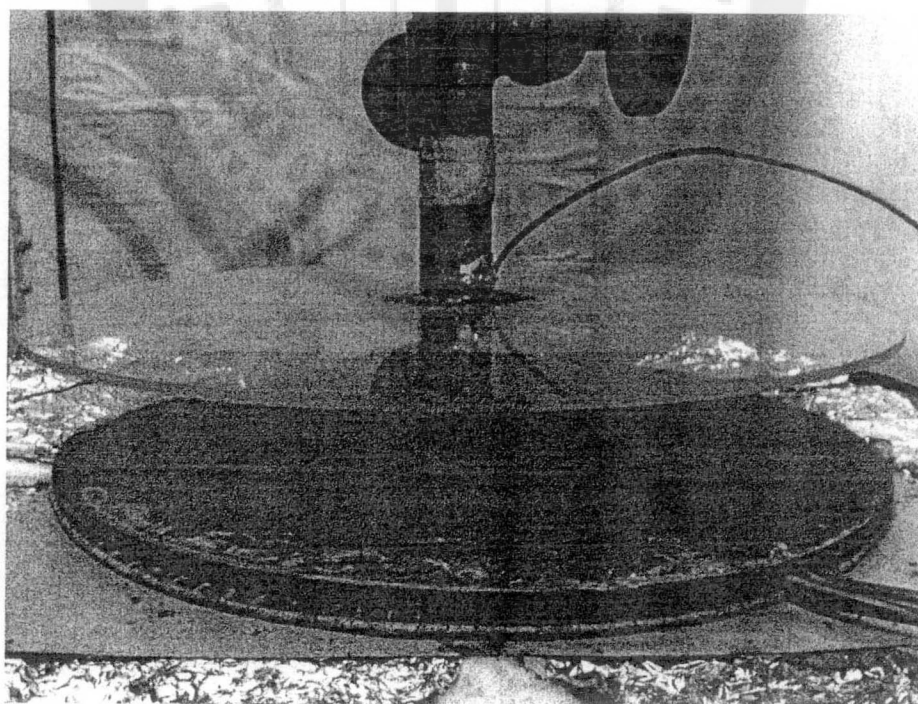
รูปผนวกที่ ค13 ภาพการติดตั้งอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ

ภาคผนวก ง ตัวอย่างการติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง

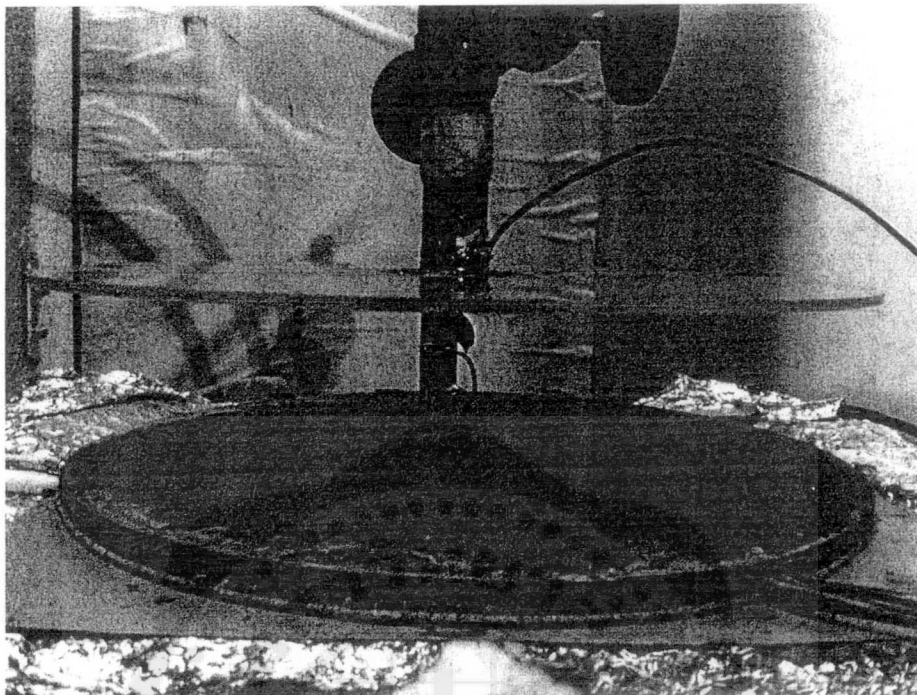




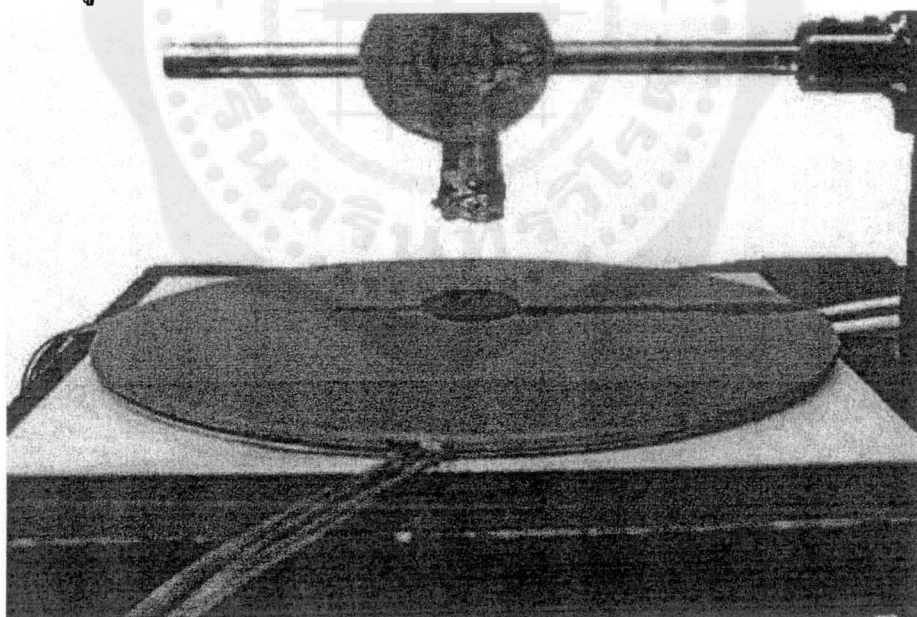
รูปผนวกที่ ง1 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง 2 cm แบบปิด



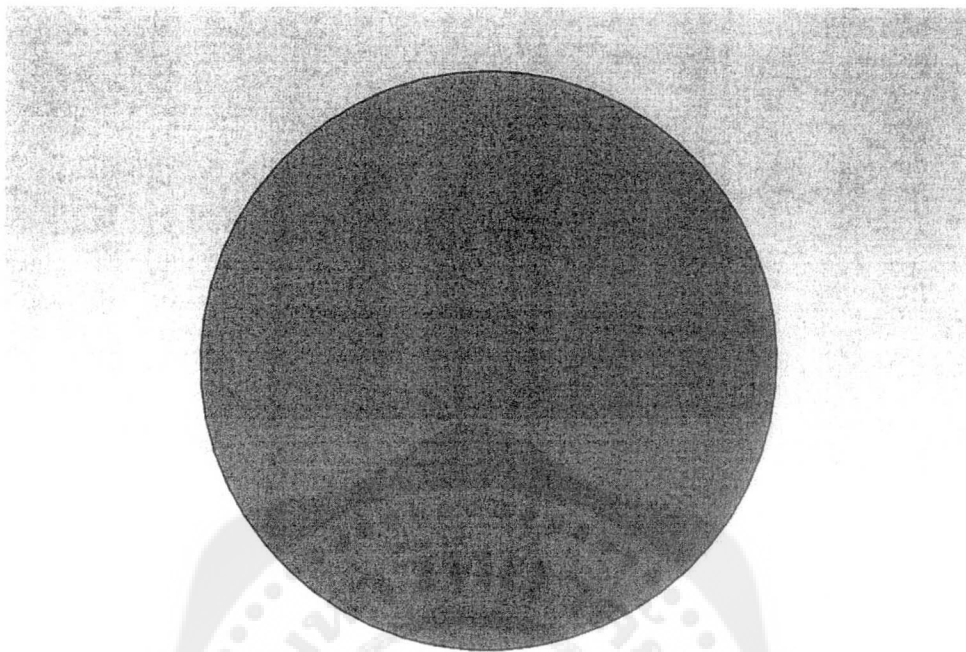
รูปผนวกที่ ง2 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง 4 cm แบบปิด



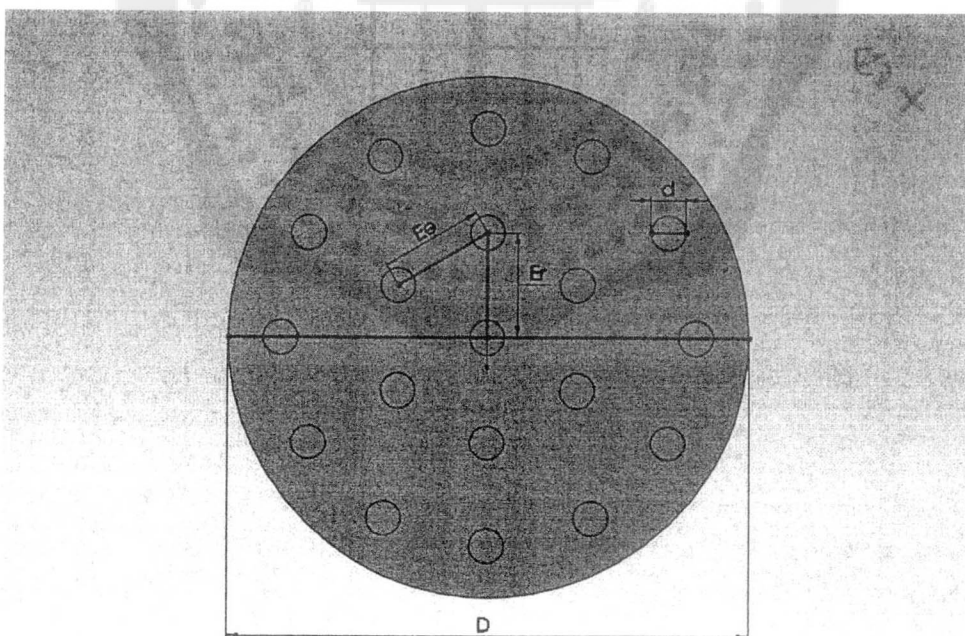
รูปผนวกที่ 3 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง 6 cm แบบปิด



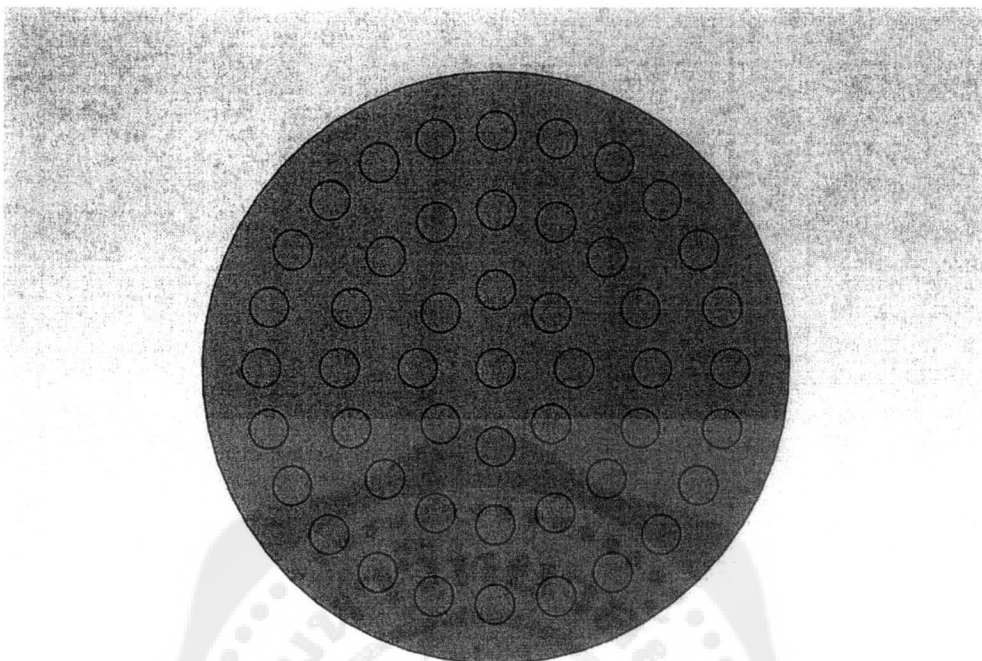
รูปผนวกที่ 4 ระยะห่างระหว่างหัวฉีดกับแผ่นทองแดง 2 cm แบบเปิด



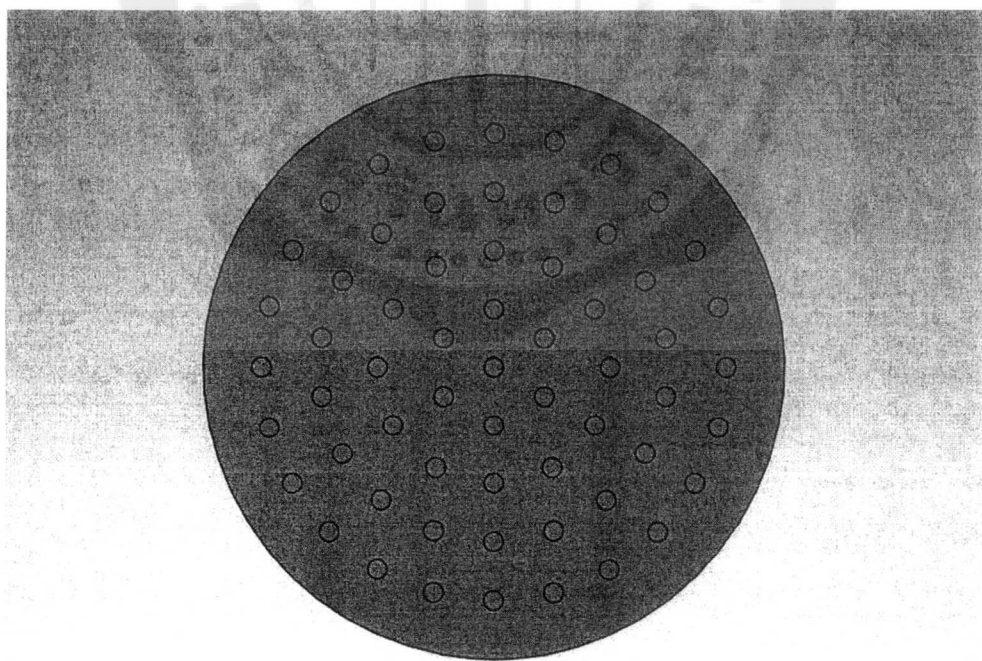
รูปผนวกที่ ๕ แผ่นทองแดงแบบแผ่นเรียบ (Flat Plate)



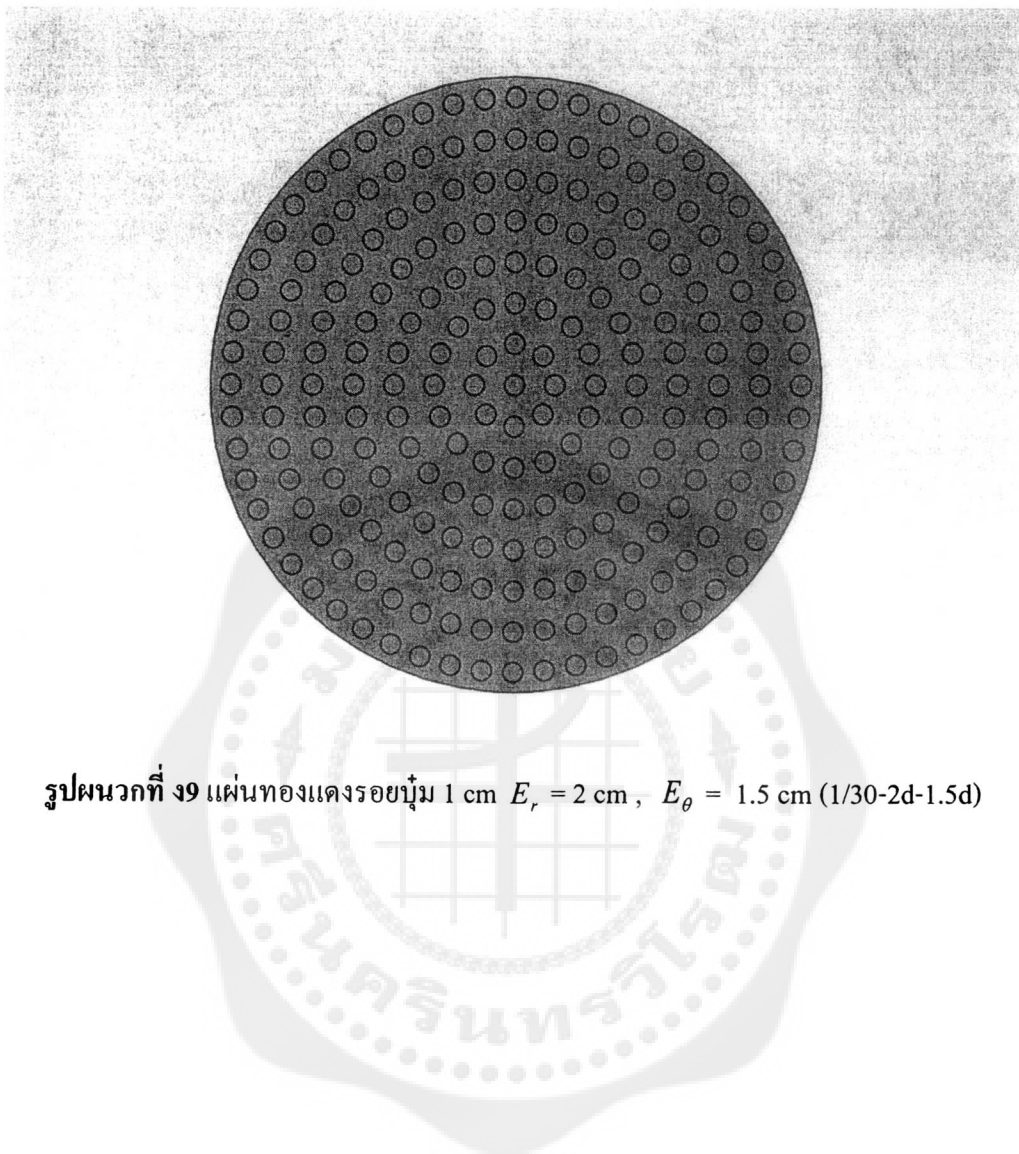
รูปผนวกที่ ๖ แผ่นทองแดงแบบรอยนูน 2 cm $E_r = 6$ cm , $E_\theta = 6$ cm (1/15-3d-3d)



รูปผนวกที่ ๗7 แผ่นทองแดงแบบรอยขุ่น 2 cm $E_r = 4$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/15-2d-1.5d)



รูปผนวกที่ ๗8 แผ่นทองแดงแบบรอยขุ่น 1 cm $E_r = 3$ cm , $E_\theta = 3$ cm (1/30-3d-3d)



รูปผนวกที่ ๑๑ แผ่นทองแดงรอยรู 1 cm $E_r = 2$ cm , $E_\theta = 1.5$ cm (1/30-2d-1.5d)