

การพัฒนาแบบจำลองของทอสมที่คำนึงถึงการรั่วและการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อ

นายตุลยวัต แสงวิเชียรกิจ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2559

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

THE DEVELOPMENT OF AIR DUCT SIMULATION WITH AIR LEAKAGE AND HEAT LOSS

Mr. Tulyawat Sangvixienkit



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2016

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแบบจำลองของท่อลมที่คำนึงถึงการรั่วและการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อ
โดย	นายตุลย์วัต แสงวิเชียรกิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ธร จรรย์ญาณ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตุลย์ มณีวัฒนา)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทสพล เขตเจนการ)

ตุลยวัต แสงวิเชียรภิก : การพัฒนาแบบจำลองของท่อลมที่คำนึงถึงการรั่วและการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อ (THE DEVELOPMENT OF AIR DUCT SIMULATION WITH AIR LEAKAGE AND HEAT LOSS) อ.ที่ ป รีก ก ข ๑
วิทยานิพนธ์หลัก: อ. ดร.เชิดพันธ์ วิทยุภรณ์, 278 หน้า.

ในปัจจุบันการออกแบบท่อลมตามมาตรฐานของ ASHRAE มีระบุไว้จำนวน 4 วิธีด้วยกันคือ วิธี Equal Friction,วิธี Static Regain,วิธี T-Method และ วิธี Velocity Reduction โดยวิธีเหล่านี้ ไม่มีการคำนึงถึงการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนของลมภายในท่อ ซึ่งมักจะเกิดขึ้นกับท่อลมเมื่อมีการใช้งานไประยะหนึ่ง โดยผลของทั้งคู่ทำให้เกิดความดันลดเพิ่มขึ้นภายในท่อลม ทำให้สมรรถนะการส่งลมของท่อลมลดลงและมีผลต่อพลังงานที่ใช้ในการส่งลมในท่อ

งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษา และ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลมโดยคำนึงถึงผลกระทบของการรั่ว และ การถ่ายเทความร้อนที่มีต่อความดันลดในท่อ โดยทำการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่า Reynold No. ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้ความดันรวมลดในท่อเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิส่งผลให้ความดันรวมลดเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ ยังพบว่าค่า Friction Factor จากการไหลในท่อที่มีการรั่ว มีค่าสูงกว่าท่อที่ไม่มีการรั่ว ผลการทดลองได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาสมการในการหาค่า Friction Factor สำหรับการไหลในท่อที่มีการรั่ว เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองถูกพัฒนาขึ้นบนแนวคิดของการได้ความดันสถิตในท่อลมขึ้นมา โดยมีการคำนึงถึงการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนเข้าไปในแบบจำลองด้วยทั้งนี้ แบบจำลองที่พัฒนาประกอบด้วย 3 แบบจำลอง ได้แก่ 1. แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม ซึ่งได้พัฒนาขึ้นจากสมการอนุรักษ์มวล สมการอัตราการรั่วไหล และ สมการพลังงาน โดยคำนึงถึงผลกระทบจากการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อน 2.แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม และมีการจ่ายลมสู่บริเวณปรับอากาศ ซึ่งได้พัฒนาขึ้นจากสมการอนุรักษ์มวล สมการอัตราการรั่วไหล สมการพลังงาน และ สมการระยะส่งลม โดยคำนึงถึงผลกระทบจากการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อน 3. แบบจำลองสำหรับข้อต่อ ซึ่งได้พัฒนาขึ้นจากสมการอนุรักษ์มวล และ สมการพลังงาน โดยไม่มีการนำเอาการรั่วและการถ่ายเทความร้อนเข้ามาพิจารณาด้วย เนื่องจากความยาวของข้อต่อที่น้อยเมื่อเทียบกับความยาวท่อลม โดยขั้นตอนการแก้สมการในแบบจำลอง จะเริ่มต้นด้วยการแก้สมการในแบบจำลองทั้งสามไปพร้อม ๆ กัน ผลลัพธ์ที่ได้คือ ขนาดความดันสถิตของพัดลม และ ข้อมูลขาออกจากท่อลมท่อนแรก ซึ่งได้แก่ ความดันสถิตขาออก, ความเร็วของลม, อัตราการไหล และ อุณหภูมิขาออก จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้มาคำนวณต่อบนแบบจำลองท่อตรงที่มีการจ่ายลม หรือ แบบจำลองข้อต่อ โดยใช้ข้อมูลขาออกที่ได้จากท่อลมท่อนแรก เป็นข้อมูลขาเข้าของการคำนวณในแบบจำลองท่อตรงที่มีการจ่ายลม หรือ แบบจำลองข้อต่อ โดยขึ้นกับลักษณะของท่อลมท่อนถัดไปว่าเป็นอะไร และ เพื่อลดความซับซ้อนในการแก้สมการจากแบบจำลอง งานวิจัยนี้จึงสร้างโมเดลที่พัฒนาขึ้นจากแบบจำลอง เพื่อเป็นเครื่องมือสำหรับการคำนวณและออกแบบท่อลม ทำให้สามารถหาขนาดความดันสถิตของพัดลม,ขนาดความดันสถิตขาเข้าและออกของท่อลม, ขนาดท่อลม, ความเร็วของลมในท่อทั้งเข้าและออก, อุณหภูมิขาเข้าและออกของลมในท่อ และ อัตราการรั่วไหลของท่อลมทั้งระบบได้อย่างไม่ยุ่งยาก

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2559

5670205821 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: STATIC REGAIN / AIR LEAKAGE / AIR DUCT DESIGN

TULYAWAT SANGVIXIENKIT: THE DEVELOPMENT OF AIR DUCT SIMULATION WITH AIR LEAKAGE AND HEAT LOSS. ADVISOR: CHIRDPUN VITTOORAPORN, Ph.D., 278 pp.

At present, there are four air duct design methods as mentioned in ASHRAE standard. They are the equal friction method, the static regain method, the T-method, and the velocity method. However, effects from air leakage and heat transfer which normally occurred in air duct system after using for a certain period of time have never been taken into consideration in all of these four duct design methods. Both of these effects results in additional pressure drop inside air ducts. This causes air duct performance reduction and hence the energy of air flow inside the duct.

The objective of this research is to study and develop the mathematical model of air duct that include the effect from both air leakage and heat transfer to the pressure drop inside the air duct. The experiment was set up in order to study the behavior of parameters involved. Results show that as Reynold no. increases, amount of heat transfer and total pressure drop inside the duct increases while increase in air temperature results in total pressure drop inside the duct increase. Moreover, it was found that friction factors in a leakage duct were higher than those obtained from duct with no leakage. Results are then used to develop friction factor equation suitable for air flow through a leakage duct. The developed equation is then used in the mathematical model. The mathematical model is developed based on the concept of regaining the static pressure inside the duct and considers also the air leakage and heat transfer effects in the duct. Basically, the mathematical model developed consists of 3 models which are 1) the straight duct with seams and joints model, this model is developed by applying conservation of mass equation, leakage rate equation and energy equation together with the effects of air leakage and heat transfer. 2) the straight duct with seams and joints model that supply air to conditioned spaces, this model is developed by applying conservation of mass equation, leakage rate equation, energy equation and throw equation together with the effects of air leakage and heat transfer. 3) the duct fitting model, this model is developed by applying conservation of mass equation and energy equation. The leakage and heat transfer effects are not put into consideration in this model due to shortage of the duct fitting compared with other duct sections. In order to solve the developed mathematical model, firstly, these three models are solved simultaneously. Results obtained are fan static pressure as well as other outlet information from the duct's first section such as outlet static pressure, outlet velocity, air leakage rate and outlet temperature. After that, this outlet information is used as input data for the straight duct with air supply model or duct fitting model depend on the next duct section characteristic. In order to simplify solving processes of this mathematical model, the nomograms are developed as tools for calculating and designing air duct system. By using the developed nomograms, the required fan static pressure, inlet and outlet static pressure, duct size, inlet and outlet air velocity, inlet and outlet temperature as well as air leakage rate of whole duct system can be easily obtained.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2016

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา และ แนะนำแนวทางการทำงานวิจัย รวมทั้งเสนอแนวทางการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้น อันนำมาซึ่งความสมบูรณ์ในการทำงานวิจัยนี้ และ ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้สั่งสอน และ ให้ความรู้แก่ข้าพเจ้า ทำให้ข้าพเจ้าสามารถรวบรวมความรู้ต่างๆ เพื่อใช้ในการทำงานวิจัยนี้

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ รศ.ดร. พงษ์ธร จริญญาภรณ์ ประธานกรรมการ ผศ.ดร. ตุลย์ มณีวัฒนา กรรมการ และ ผศ.ดร. ทสพล เขตเจนการ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำ และ ตรวจสอบวิทยานิพนธ์นี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ดร.สมเกียรติ ดีกระจ่างเพชร กัลยาณมิตรทั้งหลาย นาย ทวีพงศ์ สิริคุตตานนท์ และ รุ่งพี รุ่งน่องของข้าพเจ้า ที่คอยช่วยเหลือ และ ให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้ ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นอกจากนี้ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณบิดาของข้าพเจ้า นาย พงศ์สิริ แสงวิเชียรกิจ มารดาของข้าพเจ้า นาง นันทพันธ์ แสงวิเชียรกิจ และ ครอบครัวแสงวิเชียรกิจ ผู้ซึ่งอบรม สั่งสอน และคอยช่วยเหลือข้าพเจ้าเสมอมา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูปภาพ.....	ต
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ป
บทที่ 1.....	1
บทนำ	1
1.1 ที่มา และ ความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขต และ แนวทางของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2.....	4
วรรณกรรมปริทัศน์.....	4
2.1 ตำแหน่งของการรั่วไหล	4
2.2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อระดับการรั่ว	6
2.3 แบบจำลองในอดีตที่ใช้วิเคราะห์หาการรั่วไหล	7
2.3.1 แบบจำลองเลขยกกำลัง (Power Law Model)	7
2.3.2 แบบจำลองชั้นการรั่วไหล (Leakage Class).....	9
2.4 วิธีการทดสอบท่อลมเพื่อหาอัตราการรั่วไหล	11
2.4.1 Air Injection Method	11

2.4.2 Pressurization.....	12
2.4.3 พื้นที่การรั่วไหลประสิทธิผล (Effective Leakage Area: ELA)	12
2.5 ปัญหาของวิธีการออกแบบท่อลมแบบ Static Regain	13
บทที่ 3.....	15
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	15
3.1 การนำความร้อน (Conduction).....	15
3.1.1 กฎของฟูรีเยร์ (Fourier’s Law).....	15
3.1.2 การนำความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady State Heat Conduction)	16
3.2 การพาความร้อน (Convection).....	18
3.2.1 ชั้นขอบเขตความเร็ว (Velocity Boundary Layer).....	18
3.2.2 ชั้นขอบเขตอุณหภูมิ (Thermal Boundary Layer).....	18
3.2.3 การไหลแบบราบเรียบ และ การไหลแบบปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flow)	19
3.2.4 ตัวเลขนัสเซลส์ (Nusselt Number).....	20
3.2.5 ตัวเลขพรันด์ทิลด์ (Prandtl Number)	21
3.2.6 ตัวเลขเรย์ลี (Rayleigh Number)	21
3.2.7 การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection).....	22
3.2.7.1 การพาความร้อนแบบบังคับภายนอก (External Forced Convection)	22
3.2.7.2 การพาความร้อนแบบบังคับภายใน (Internal Forced Convection)	23
3.2.8 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection)	26
3.2.8.1 การพาความร้อนแบบอิสระภายนอก.....	26
3.3 ความต้านทานเชิงความร้อน (Thermal Resistance)	29
3.3.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังหลายชั้น	32

3.4 การเพิ่มขึ้น หรือ การลดของอุณหภูมิขาออกของท่อลม	32
3.5 สมการการไหลแบบต่อเนื่อง	33
3.6 สมการพลังงานของการไหลภายในท่อ	34
3.7 สมการสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง	37
3.8 อัตราการไหลผ่านช่องเปิด	39
3.9 ระยะการส่งลม	40
3.10 การออกแบบท่อลมด้วยวิธี Static Regain	40
3.11 ปริมาตรของอากาศ และ มวลที่รั่วไหลผ่านแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ	44
3.12 การวิเคราะห์เชิงมิติ	45
3.12.1 ทฤษฎีบท Buckingham Pi	45
บทที่ 4	47
การทดลอง	47
4.1 กรณีที่ทำการทดลอง	47
4.2 ชุดทดลอง และ ส่วนประกอบ	48
4.2.1 ส่วนทางเข้าท่อทดสอบ	49
4.2.2 ท่อลมทดสอบ	53
4.2.3 อุปกรณ์การวัดที่เกี่ยวข้อง	54
4.3 รายละเอียดการทดลอง	57
4.4 การวิเคราะห์เชิงมิติ	58
4.5 ผลลัพธ์จากการทดลอง	61
4.6 พัฒนาสมการความเสียดทาน (สมการ Friction Factor) ที่ได้จากการทดลอง	73
4.6.1 การพัฒนาสมการความเสียดทานเมื่อมีการรั่วไหลตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ	73
4.6.2 การพัฒนาสมการความเสียดทานเมื่อมีการรั่วไหลบริเวณรูรั่ว	75

บทที่ 5.....	80
การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	80
5.1 บทนำ.....	80
5.2 แนวคิดในการพัฒนาแบบจำลอง และ สมการหลักในแบบจำลอง	81
5.2.1 แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม	81
5.2.1.1 สมการหลักที่เกี่ยวข้อง.....	81
5.2.1.2 การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากมวลที่รั่วไหล	82
5.2.1.3 การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ	83
5.2.2 แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม ที่มีการจ่ายลมสู่บริเวณ ปรับอากาศ	86
5.2.2.1 สมการหลักในแบบจำลอง	86
5.2.3 แบบจำลองสำหรับข้อต่อ	87
5.2.3.1 แบบจำลองข้อต่อแยก ในเส้นทางการไหล 2 – 3	88
5.2.3.2 แบบจำลองข้อต่อแยก ในเส้นทางการไหล 2 – 4 (พิจารณารูปที่ 5 – 3)	89
5.2.3.3 แบบจำลองการไหลผ่านข้อต่อ	89
5.3 การใช้แบบจำลองวิเคราะห์ระบบท่อลม	91
5.3.1 ลำดับการคำนวณท่อตรงท่อนแรก (ท่อ A หรือ ท่อตรงที่ต่อจากพัดลม), ข้อต่อแยก เส้นทางการไหล 2 – 4 (ข้อต่อ A – B) และ ท่อตรงที่มีการจ่ายลม (ท่อ B)	91
5.3.2 ลำดับการคำนวณข้อต่อแยก เส้นทางการไหล 2 – 3 (ข้อต่อ A - C)	95
5.3.3 ลำดับการคำนวณแบบจำลองท่อตรง C	96
5.3.4 ลำดับการคำนวณข้อต่อแยก เส้นทางการไหล 2 – 4 (ข้อต่อ C - D)	97
5.3.5 ลำดับการคำนวณข้อต่อ	97
5.4 การแก้สมการในแบบจำลอง	98
5.5 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง และ จากการทดลอง	98

5.5.1 ผลการทดลองเมื่อไม่ฝึกตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ เทียบกับผลจากแบบจำลอง..	99
5.5.2 ผลการทดลองเมื่อมีการรั่วไหล และ มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ.....	100
บทที่ 6.....	101
การออกแบบระบบท่อลมด้วยโปรแกรม.....	101
6.1 บทนำ.....	101
6.2 การสร้างโปรแกรมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์	101
6.2.1 โปรแกรมสำหรับหาความดันสถิตเข้าท่อ A.....	102
6.2.1.1 ชุดโปรแกรมสำหรับการหาความต้านทานเชิงความร้อน.....	106
6.3 วิธีการออกแบบท่อลมด้วยโปรแกรม.....	123
6.3.1 การใช้โปรแกรมเพื่อหาความดันสถิตเข้าท่อตรงท่อนแรก	123
6.3.2 การใช้โปรแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกของท่อตรงท่อนแรก	128
6.3.3 การใช้โปรแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ B.....	128
6.3.4 การใช้โปรแกรมเพื่อหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อตรง.....	128
6.3.5 โปรแกรมสำหรับหาอุณหภูมิขาออกจากท่อตรง	129
6.3.6 โปรแกรมสำหรับหาความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนถัดไป หรือ ท่อ C	130
6.3.7 การใช้โปรแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากท่อ B.....	131
6.3.8 การใช้โปรแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากตรงท่อนถัดไป หรือ ท่อ C.....	134
6.3.9 การใช้โปรแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากข้องอ.....	134
บทที่ 7.....	136
สรุปผล และ ข้อเสนอแนะ	136
7.1 สรุปผลการวิจัย.....	136
7.1.1. พฤติกรรมของกลุ่มตัวแปรที่สำคัญ.....	136
7.1.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์	136

7.1.1.2 ผลกระทบจากการไหลในท่อที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บต่อค่า Friction Factor	137
7.1.1.3 อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางรูรั่วต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D/D) ..	137
7.1.2. การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์	137
7.1.2.1 แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม	137
7.1.2.2 แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม ที่มีการจ่ายลม สู่บริเวณปรับอากาศ	138
7.1.2.3 แบบจำลองสำหรับข้อต่อ	138
7.1.3. วิธีการออกแบบท่อลม	139
7.2 เปรียบเทียบผลการออกแบบ	139
7.2.1 เปรียบเทียบความดันรวมที่ลดลงในท่อแต่ละท่อน	140
7.2.2 เปรียบเทียบความดันสถิตของพัดลม	141
7.2.3 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม	142
7.2.4 การกระจายของความดัน	143
7.2.4.2 การกระจายของความดันสถิตในท่อแยก B,D,F	144
7.2.4.3 การกระจายตัวของความดันรวมภายในท่อตรง A,C,E,G	146
7.2.4.4 ความดันรวมลดในท่อแยก B,D,F	147
7.2.5 เปรียบเทียบอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรในท่อลมแต่ละท่อน	149
7.2.6 เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อลมแต่ละท่อน	150
7.2.7 การทดลองเมื่อมีการผนึกแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ และ เจาะรูรั่วขนาด 10 มิลลิเมตร โดยมีการเปลี่ยนอุณหภูมิของลมขาเข้า โดยความดันขาเข้า และ ความเร็วคงที่ (การทดลองกรณี 4)	152
7.3 ข้อเสนอแนะ	155
รายการอ้างอิง	157

ภาคผนวก ก.....	160
ตัวอย่างการออกแบบท่อลมด้วยโนโมแกรม และ ด้วยวิธี Static Regain แบบเดิม	160
ก.1 การออกแบบระบบท่อลมด้วยโนโมแกรม	161
ก.1.1 ท่อ A.....	161
ก.1.1.1 ใช้โนโมแกรมหาความดันสถิตขาเข้าท่อ A.....	161
ก.1.1.2 ใช้โนโมแกรมหาความดันสถิตขาออกของท่อ A.....	163
ก.1.1.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ A	164
ก.1.1.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ A.....	164
ก.1.2 ท่อ B.....	164
ก.1.2.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ B.....	164
ก.1.2.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากท่อ B.....	165
ก.1.2.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ B.....	167
ก.1.2.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ B	167
ก.1.3 ท่อ C.....	167
ก.1.3.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ C	167
ก.1.3.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ C	168
ก.1.3.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ C	170
ก.1.3.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ C.....	170
ก.1.4 ท่อ D.....	170
ก.1.4.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ D	170
ก.1.4.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ D.....	171
ก.1.4.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ D	173
ก.1.4.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ D.....	173

ก.1.5 ท่อ E	173
ก.1.5.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ E	173
ก.1.5.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ E	174
ก.1.5.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ E	176
ก.1.5.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ E	176
ก.1.6 ท่อ F	176
ก.1.6.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ F	176
ก.1.6.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ F	177
ก.1.6.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ F	179
ก.1.6.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ F	179
ก.1.7 ท่อ G	179
ก.1.7.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหา	179
ก.1.7.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ G	180
ก.1.7.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ G	182
ก.1.7.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ G	182
ก.2 การคำนวณความร้อนที่ถ่ายเทในท่อลมแต่ละท่อน	184
ก.3 การออกแบบด้วยวิธี Static Regain	186
ก.3.1 หาขนาดความดันของพัดลม	187
ก.3.2 หาขนาด และ ความเร็วของท่อลมส่วนที่เหลือ	188
ก.3.3.1. หาความเร็วขาเข้าท่อ B และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B	189
ก.3.3.2. หาความเร็วขาเข้าท่อ C และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C	189
ก.3.3.3. หาความเร็วขาเข้าท่อ D และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D	190
ก.3.3.4. หาความเร็วขาเข้าท่อ E และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E	190

ก.3.2.5. หาความเร็วขาเข้าท่อ F และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F.....	190
ก.3.2.6. หาความเร็วขาเข้าท่อ G และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G.....	190
ภาคผนวก ข.....	192
ตารางที่เกี่ยวข้อง.....	192
ภาคผนวก ค.....	193
ชุดคำสั่งของโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง.....	193
ภาคผนวก ง.....	240
รวมรูปโน้ตแกรม.....	240
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	278



สารบัญตาราง

ตารางที่ 2 - 1 ตารางแสดงระดับการผืนึก ตำแหน่งที่ต้องมีการผืนึก และ ความดันภายในท่อลม	10
ตารางที่ 2 - 2 ตารางแสดงระดับการผืนึก, ความดันภายในท่อลม และ ชั้นการรื้อไหลตามรูปทรงของท่อลม.....	10
ตารางที่ 3 - 1 แสดงค่าคงตัวในสมการ 3.21	28
ตารางที่ 3 - 2 สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองของการไหลผ่านข้อต่อแบบขยาย	38
ตารางที่ 3 - 3 ค่า C_o' สำหรับการไหลผ่านข้อต่อ	39
ตารางที่ 3 - 4 ค่า K สำหรับการไหลผ่านข้อต่อ	39
ตารางที่ 4 - 1 การแจกแจงมิติของพารามิเตอร์	59
ตารางที่ 4 - 2 Dimensional Matrix	59
ตารางที่ 4 - 3 ผลการทดลองเมื่อมีการผืนึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม.....	63
ตารางที่ 4 - 4 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการผืนึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม.....	65
ตารางที่ 4 - 5 ผลการทดลองเมื่อมีการผืนึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม และมี การเจาะรูรั่วขนาด 3 ม.ม. บริเวณกึ่งกลางของท่อลม	71
ตารางที่ 4 - 6 ผลการทดลองเมื่อมีการผืนึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม และมี การเจาะรูรั่วขนาด 6 ม.ม. บริเวณกึ่งกลางของท่อลม	71
ตารางที่ 4 - 79 แสดงค่า Friction Factor จากการทดลอง และ จากสมการที่ 4.8 ที่ D_i/D และ Re ค่าต่างๆ.....	79
ตารางที่ 5 - 1 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการผืนึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม เทียบ กับแบบจำลอง.....	99
ตารางที่ 5 - 2 ผลการทดลองเมื่อมีการรื้อไหล และ การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทียบกับผลจาก แบบจำลอง.....	100
ตารางที่ 7 - 1 เปรียบเทียบความดันรวมที่ลดลงจากการออกแบบด้วยโนโมแกรม และ วิธี Static Regain	140
ตารางที่ 7 - 2 เปรียบเทียบความเร็วเข้าท่อแยก ได้แก่ ท่อ B, D และ F.....	141

ตารางที่ 7 - 3 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม	142
ตารางที่ 7 - 4 แสดงอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร ความยาวและอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อ ต่อความยาวคำนวณจากกราฟรูป 7-1 ของท่อลมแต่ละท่อน	149
ตารางที่ 7 - 5 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อน ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่ผิวและ ความเร็วขาเข้าของท่อแต่ละท่อน	150
ตารางที่ ก - 1 ความยาวของท่อลมแต่ละส่วน	160
ตารางที่ ก - 2 อัตราการไหลของน้ำจากจ่ายลม	161
ตารางที่ ก - 3 ผลการออกแบบท่อลมด้วยโนโมแกรม	183
ตารางที่ ก - 4 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อลมแต่ละท่อน	184
ตารางที่ ก - 5 อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อแต่ละท่อน	185
ตารางที่ ก - 6 ผลการออกแบบท่อลมด้วยวิธี Static Regain	191
ตารางที่ ข - 1 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ	192

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 2 - 1 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมทรงกระบอก.....	4
รูปที่ 2 - 2 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมทรงกระบอก.....	5
รูปที่ 2 - 3 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมสี่เหลี่ยม.....	5
รูปที่ 2 - 4 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมสี่เหลี่ยม.....	5
รูปที่ 2 - 5 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมที่มีการแยกเป็นท่อย่อย	6
รูปที่ 2 - 6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และ Discharge Coefficient	7
รูปที่ 2 - 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Leakage Class, Leakage Factor และ ความดันสถิต	10
รูปที่ 2 - 8 ส่วนประกอบของ Test Section สำหรับวิธี Air Injection Method.....	11
รูปที่ 2 - 9 แสดงความดันรวมที่ลดลง และ ความดันสถิตที่เพิ่มขึ้น ณ จุดแยกที่ 2	13
รูปที่ 2 - 10 แสดงความดันสถิตที่เพิ่มขึ้น และ ความดันสถิตที่ลดลงตามเส้นทางการไหล c-s-c'	14
รูปที่ 3 - 1 แสดงลักษณะ และ บริเวณต่างๆของชั้นขอบเขตความเร็ว	18
รูปที่ 3 - 2 แสดงลักษณะ และ บริเวณต่างๆของชั้นขอบเขตอุณหภูมิ	19
รูปที่ 3 - 3 แสดงการไหลในชั้นขอบเขตความเร็วเหนือแผ่นราบ.....	19
รูปที่ 3 - 4 การกระจายตัวของความเร็ว และ อุณหภูมิของของไหลที่ไหลบนแผ่นเรียบ	22
รูปที่ 3 - 5 การกระจายตัวของความเร็วของการไหลภายในท่อ.....	23
รูปที่ 3 - 6 การกระจายตัวของอุณหภูมิของการไหลภายในท่อ.....	24
รูปที่ 3 - 7 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทาน	30
รูปที่ 3 - 8 แสดงการนำความร้อนผ่านผนัง	30
รูปที่ 3 - 9 แสดงการพาความร้อนที่พื้นผิวของผนัง	31
รูปที่ 3 - 10 แสดงการนำความร้อนผ่านพื้นผิวทรงกระบอก.....	31
รูปที่ 3 - 11 แสดงการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวทรงกระบอกหลายชั้น.....	32

รูปที่ 3 - 12 แสดงลักษณะการไหลจากท่อหลักไปท่อสาขา และ จากท่อหลักไปท่อหลัก	37
รูปที่ 3 - 13 แสดงการไหลผ่านข้อต่อแบบขยาย	38
รูปที่ 3 - 14 แสดงการไหลผ่านข้องอ	39
รูปที่ 3 - 15 แสดงแบบของท่อลมซึ่งใช้ในงานวิจัยของ	43
รูปที่ 4 - 1 ขนาดชุดท่อลมทดสอบ และ อุปกรณ์การวัด	49
รูปที่ 4 - 2 ชุดท่อลมทดสอบ และ อุปกรณ์การวัด.....	49
รูปที่ 4 - 3 ชุดพัดลม Model FSA 315 CM CW 90	50
รูปที่ 4 - 4 Inverter รุ่น VF-A3 ยี่ห้อ Toshiba	50
รูปที่ 4 - 5 โครงสร้างของตัวเชื่อมต่อ.....	51
รูปที่ 4 - 6 ขนาดของใบปรับลม.....	52
รูปที่ 4 - 7 รูปร่างของใบปรับลม.....	53
รูปที่ 4 - 8 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ และ ความดันของลมภายในท่อ	55
รูปที่ 4 - 9 เทอร์โมคัปเปิลยี่ห้อ Digicon รุ่น DP-77	55
รูปที่ 4 - 10 เครื่องมือวัดความดันยี่ห้อ Alnor รุ่น AXD 510	56
รูปที่ 4 - 11 มานอมิเตอร์แบบเอียง	56
รูปที่ 4 - 12 เครื่องวัดความชื้นยี่ห้อ Digicon รุ่น HT-765	57
รูปที่ 4 - 13 กราฟแสดงค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ และ Re ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 1	61
รูปที่ 4 - 14 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 1 และ ค่า Friction Factor จากสมการ Haaland.....	62
รูปที่ 4 - 15 กราฟแสดงค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ และ Re ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 2.....	64
รูปที่ 4 - 16 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 2 และ ค่า Friction Factor จากสมการ Haaland.....	64
รูปที่ 4 - 17 กราฟแสดงค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ และ Re ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 3 ที่ D_t/D ค่าต่างๆ	66
รูปที่ 4 - 18 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor และ Re ที่ D_t/D ค่าต่างๆ.....	67

รูปที่ 4 - 19 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor และ D_L/D ที่ Re ค่าต่างๆเมื่อ	68
รูปที่ 4 - 20 กราฟ $\log(m_L)$ และ $\log(\Delta P_S/\Delta P_{ref})$ ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 3.....	68
รูปที่ 4 - 21 กราฟ ELA ที่ m_L และ P_S ค่าต่างๆ	69
รูปที่ 4 - 22 กราฟ c_L ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 3 เมื่อรูรั่วเท่ากับ 3 ,6 ,10 และ 14 มม. และ $n = 0.65$	70
รูปที่ 4 - 23 กราฟผลต่างของค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองที่ 2 และ ค่า Friction Factor จากสมการ Haaland ที่ Re ค่าต่าง ๆ	74
รูปที่ 4 - 24 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 2 และ ค่า Friction Factor จากสมการที่ 4.5 ที่ Re ค่าต่าง ๆ	75
รูปที่ 4 - 25 กราฟผลต่างของค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 3 กับ ค่า Friction Factor จากสมการ Haaland และ กราฟจากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น.....	76
รูปที่ 4 - 26 กราฟการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นของความชันของเส้นตรงแต่ละเส้นในรูปที่ 4 - 25 ..	76
รูปที่ 4 - 27 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor จากสมการที่ 4.8 และ จากการทดลองกรณี ที่ 3.....	77
รูปที่ 5 - 1 แบบจำลองท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บ	81
รูปที่ 5 - 2 แบบจำลองท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บ ที่มีการจ่ายลม	86
รูปที่ 5 - 3 แบบจำลองข้อต่อแยก	87
รูปที่ 5 - 4 ระบบท่อลม	91
รูปที่ 5 - 5 แสดงความร้อนที่ถ่ายเทผ่านการพาความร้อนในท่อ ผ่านการนำความร้อนผ่านผนังท่อ การนำความร้อนผ่านฉนวน และการพาความร้อนภายนอกท่อ	92
รูปที่ 7 - 1 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาว	143
รูปที่ 7 - 2 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาวของท่อ B.....	144
รูปที่ 7 - 3 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาวของท่อ D	144
รูปที่ 7 - 4 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาวของท่อ F.....	145
รูปที่ 7 - 5 การกระจายของความดันรวมตามแนวความยาวของท่อ A,C,E,G.....	146

รูปที่ 7 - 6 ความดันรวมลดของท่อ A,C,E,G.....	146
รูปที่ 7 - 7 ความดันรวมลดของท่อ B.....	147
รูปที่ 7 - 8 ความดันรวมลดของท่อ D.....	148
รูปที่ 7 - 9 ความดันรวมลดของท่อ F.....	148
รูปที่ 7 - 10 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อลม.....	149
รูปที่ 7 - 11 อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อลม.....	151
รูปที่ 7 - 12 กราฟแสดงค่า Friction Factor กับอุณหภูมิของลมภายในท่อ.....	152
รูปที่ 7 - 13 กราฟแสดงความดันลดจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูล Friction Factor จากรูป 7 - 12 และ จากการทดลองกรณีที่ 4 กับอุณหภูมิของลมภายในท่อ.....	152
รูปที่ 7 - 14 กราฟอัตราการรั่วไหลของมวลกับอุณหภูมิของลมภายในท่อ.....	153
รูปที่ 7 - 15 กราฟสำหรับหาค่า Friction Factor กรณีที่มีรูรั่ว 10 มม.....	153
รูปที่ ก - 1 แบบท่อลมที่ใช้ในการออกแบบ.....	160
รูปที่ ง - 1 โนโมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนของท่อ (R_D).....	240
รูปที่ ง - 2 โนโมแกรมสำหรับการหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวน (R_{ins}).....	241
รูปที่ ง - 3 โนโมแกรมสำหรับหา f_{sm} ($\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ และ $\mu = 1.8 \times 10^5 \text{ kg/m.s}$).....	242
รูปที่ ง - 4 กราฟสำหรับหาค่า Friction Factor ($\epsilon = 0.00015 \text{ m.}$, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ และ $\mu = 1.8 \times 10^5 \text{ kg/m.s}$).....	243
รูปที่ ง - 5 ก โนโมแกรมสำหรับการหาค่า J ในช่วง 60 ถึง 500.....	244
รูปที่ ง - 5 ข โนโมแกรมสำหรับการหาค่า J ในช่วง 500 ถึง 2500.....	245
รูปที่ ง - 6 ก โนโมแกรมสำหรับการหา $R_{h,i}$ ในช่วง $L = 1 \text{ m}$ ถึง 8 m	246
รูปที่ ง - 6 ข โนโมแกรมสำหรับการหา $R_{h,i}$ ในช่วง $L = 8 \text{ m}$ ถึง 20 m	247
รูปที่ ง - 7 ก โนโมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.0002 ถึง 0.001 K/W.....	248
รูปที่ ง - 7 ข โนโมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.001 ถึง 0.01 K/W.....	249

รูปที่ ง - 7 ค โนโมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.01 ถึง 0.12
 K/W250

รูปที่ ง - 8 ก โนโมแกรมสำหรับหาอุณหภูมิภายนอกของฉนวน (T_{ins}) สำหรับ $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.8 K/W251

รูปที่ ง - 8 ข โนโมแกรมสำหรับหาอุณหภูมิภายนอกของฉนวน (T_{ins}) สำหรับ $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ ในช่วง 0.8 K/W ถึง 2.5 K/W252

รูปที่ ง - 9 โนโมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อน
 ภายนอกท่อ ($R_{h,o}$)253

รูปที่ ง - 10 โนโมแกรม R_{13} สำหรับหาค่าอ้างอิง $Term_{v1}$254

รูปที่ ง-11 ก โนโมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 0.01 ถึง 0.1.....255

รูปที่ ง-11 ข โนโมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 0.1 ถึง 1.....256

รูปที่ ง-11 ค โนโมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 1 ถึง 7.5.....257

รูปที่ ง-12 ก โนโมแกรม R_{16} สำหรับ $Q_{1,B}$ ในช่วง 0.1 m³/s ถึง 5 m³/s.....258

รูปที่ ง-12 ข โนโมแกรม R_{16} สำหรับ $Q_{1,B}$ ในช่วง 5 m³/s ถึง 20 m³/s.....259

รูปที่ ง-13 ก โนโมแกรม $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 0.1 ถึง 1.....260

รูปที่ ง-13 ข โนโมแกรม $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 1 ถึง 20..... 261

รูปที่ ง-13 ค โนโมแกรม $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 20 ถึง 85.....262

รูปที่ ง - 14 โนโมแกรมสำหรับหา $(P_{s,1})_A$263

รูปที่ ง - 15 ก โนโมแกรมสำหรับหาค่า $(P_{s,2})_A$ สำหรับ R_{tot}
 ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.4 K/W.....264

รูปที่ ง - 15 ข โนโมแกรมสำหรับหาค่า $(P_{s,2})_A$ สำหรับ R_{tot}
 ในช่วง 0.4 K/W ถึง 1.2 K/W.....265

รูปที่ ง - 15 ค โนโมแกรมสำหรับหาค่า $(P_{s,2})_A$ สำหรับ R_{tot}
 ในช่วง 1.2 K/W ถึง 3 K/W.....266

รูปที่ ง - 16 โนโมแกรมสำหรับหาค่า $v_{1,B}$267

รูปที่ ง - 17 ก โนมแกรมสำหรับการหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร (Q_L) สำหรับ P_{s1A}
 ในช่วง 10 Pa ถึง 150 Pa.....268

รูปที่ ง - 17 ข โนมแกรมสำหรับการหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร (Q_L) สำหรับ P_{s1A}
 ในช่วง 150 Pa ถึง 380 Pa.....269

รูปที่ ง - 18 ก. โนมแกรมสำหรับการหา y สำหรับ Q_L/Q_1 ในช่วง 5×10^{-5} ถึง 0.01.....270

รูปที่ ง - 18 ข. โนมแกรมสำหรับการหา y สำหรับ Q_L/Q_1 ในช่วง 0.01 ถึง 0.4.....271

รูปที่ ง - 19 กราฟสำหรับการหาค่า Z_1272

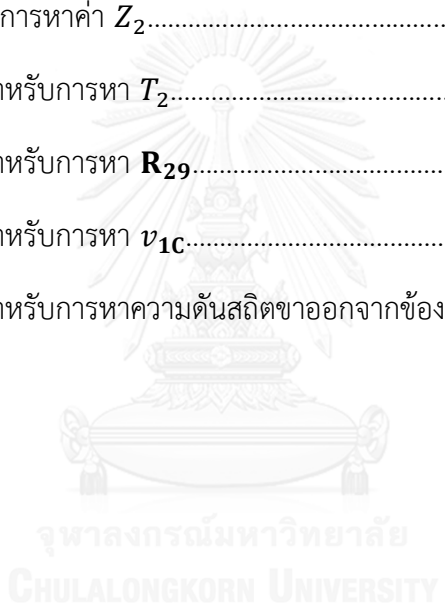
รูปที่ ง - 20 กราฟสำหรับการหาค่า Z_2 273

รูปที่ ง - 21 โนมแกรมสำหรับการหา T_2 274

รูปที่ ง - 22 โนมแกรมสำหรับการหา R_{29}275

รูปที่ ง - 23 โนมแกรมสำหรับการหา v_{1c}276

รูปที่ ง - 24 โนมแกรมสำหรับการหาความดันสถิตขาออกจากช่องอ P_{s2}277



รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

ตัวแปร

A	=	พื้นที่ [m^2]
b	=	ความหนาของฉนวน [m]
c	=	สัมประสิทธิ์การสูญเสีย
c_l	=	Leakage Class
c_p	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงตัว [$J/kg.K$]
c_v	=	ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงตัว [$J/kg.K$]
D	=	เส้นผ่านศูนย์กลาง [m]
ϵ	=	ความขรุขระของผนังท่อ [m]
E	=	ศักย์ไฟฟ้า [V]
g	=	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วงโลก [m/s^2]
h	=	สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [$J/m^2.K$]
h_l	=	การสูญเสียหลัก [W]
h_{lm}	=	การสูญเสียรอง [W]
I	=	กระแสไฟฟ้า [A]
k	=	ค่าการนำความร้อน [$J/m.K$]
L	=	ความยาว [m]
\dot{m}	=	อัตราการไหลเชิงมวล [kg/s]
P_s	=	ความดันสถิต [Pa]
P_t	=	ความดันรวม [Pa]
\dot{q}	=	อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]
Q	=	อัตราการไหลเชิงปริมาตร [m^3/s]
Q_L	=	อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร [m^3/s]
r	=	รัศมี [m]
R_D	=	ความต้านทานเชิงความร้อนของท่อ [K/W]
R_{ins}	=	ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวน [K/W]
t	=	ความหนาของผนังท่อลม [W]

T	=	อุณหภูมิ [K]
$T_{ins,o}$	=	อุณหภูมิพื้นผิวนอกของฉนวน [K]
u	=	พลังงานภายใน [J/kg]

กลุ่มไร้มิติ

Re	=	ตัวเลขเรโนลด์
Nu	=	ตัวเลขนัสเซลส์
Pr	=	ตัวเลขพรันเดิลท์
Ra	=	ตัวเลขเรย์ลี
f	=	ค่าความเสียดทาน
f_{sm}	=	ค่าความเสียดทานของการไหลผ่านท่อเรียบ

ตัวอักษรกรีก

μ	=	ความหนืดพลศาสตร์ [kg/m.s]
ν	=	ความหนืดคินเนมาติกส์ [m ² /s]
ρ	=	ความหนาแน่น [kg/m ³]
β	=	การขยายตัวทางความร้อน [1/K]
α	=	การแพร่ทางความร้อน [m ² /s]
ϕ	=	แนวเส้นรอบวง
Δ	=	ผลต่าง

ตัวห้อยท้าย

cyl	=	ทรงกระบอก
i	=	ภายในท่อลม
$inlet$	=	ขาเข้า
m	=	เฉลี่ย
o	=	ภายนอก
$outlet$	=	ขาออก

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มา และ ความสำคัญ

ระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System) เป็นระบบที่ทำหน้าที่ปรับอากาศ และ ควบคุมสภาพอากาศให้มีความเหมาะสมตามสถานที่ปรับอากาศ และ ตามความต้องการของผู้ที่อาศัยในสถานที่นั้นๆ โดยในปัจจุบันระบบปรับอากาศมีหลากหลายรูปแบบ เช่น ระบบปรับอากาศแบบแยกส่วน (Split Type) , รูฟท็อป (Roof Top) ,ระบบแปรเปลี่ยนอัตราการไหลของสารทำความเย็น (VRV) , ระบบระบายความร้อนด้วยน้ำ (Water Cooled Package) , ระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็น (Chiller) เป็นต้น โดยรูปแบบของระบบปรับอากาศดังที่ยกตัวอย่างมาโดยส่วนใหญ่ นั้น ต้องมีระบบกระจายลม (Air Distribution System) และ ระบบระบายอากาศ (Ventilation) เข้ามาเกี่ยวข้อง โดยหน้าที่ของระบบกระจายลมในระบบปรับอากาศ มีหน้าที่เป็นเส้นทางลำเลียงลมไปแจกจ่ายตามบริเวณที่ถูกปรับอากาศ ส่วนระบบระบายอากาศจะนำอากาศออกจากบริเวณที่ถูกปรับอากาศไประบายออกนอกอาคาร หรือนำอากาศจากภายนอกอาคารเข้าสู่ภายในอาคาร หรือ บริเวณปรับอากาศ

ระบบท่อลมจะใช้ท่อลมเป็นตัวนำอากาศไปกระจายยังที่ต่างๆ โดยในกระบวนการออกแบบระบบท่อลมนั้นจะประกอบด้วยวิธีหลัก 4 วิธี ได้แก่

1. Equal Friction Method
2. Static Regain Method
3. T-Method
4. Velocity Reduction Method

ในการออกแบบระบบท่อลมที่ดีนั้น จะต้องออกแบบให้ท่อลมสามารถรักษาสภาพของลมภายในท่อลมให้อยู่ในสถานะที่ผู้ออกแบบระบบปรับอากาศต้องการ ซึ่งปัจจัยทางวิศวกรรมที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบระบบท่อลมนั้น ประกอบด้วย การสูญเสียพลังงานความร้อน, ความสมดุล, ระบบความปลอดภัย, อัตราการไหล, อุณหภูมิ และ ความดันของลมภายในท่อลม และ ปัจจัยอื่นๆประกอบด้วย พื้นที่บริเวณที่ถูกปรับอากาศ, ระดับเสียง, มูลค่าในการติดตั้ง และ มูลค่าในการใช้งานระบบ

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัตินั้น การติดตั้งระบบท่อลมส่วนใหญ่จะดำเนินการติดตั้ง และ ขึ้นรูป ณ บริเวณสถานที่ก่อสร้างอาคาร ซึ่งการติดตั้งลักษณะนี้อาจก่อให้เกิดการรั่วซึม ณ บริเวณตะเข็บ และ แนวนรอยต่อของท่อลมแต่ละท่อน ซึ่งเหตุการณ์เหล่านี้ย่อมเป็นสาเหตุต่อการ สูญเสียความดันของลมภายในท่อ นอกจากนี้ ในกรณีที่ต้องการรักษาอุณหภูมิของลมภายในท่อ จะต้องมีการหุ้มฉนวนเข้ามาเกี่ยวข้อง และในการหุ้มฉนวนนั้น จะกระทำบริเวณสถานที่ก่อสร้าง อาคารเช่นเดียวกับท่อลม ซึ่งอาจก่อให้เกิดการหุ้มฉนวนที่ไม่เรียบร้อย ซึ่งส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อลม

เมื่อพิจารณาถึงการสูญเสียความร้อน และ การรั่วไหลดังที่กล่าวไว้ข้างต้น พบว่า นอกจากจะส่งผลกระทบต่อค่าใช้จ่ายในการใช้งานระบบปรับอากาศแล้ว ยังส่งผลกระทบต่อพลังงาน ของระบบท่อลม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษา และ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลมที่ คำนึงถึงผลกระทบของการสูญเสียลมจากการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อน รวมทั้งสร้างชุด ทดสอบท่อลมเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น โดยแบบจำลอง ทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการพัฒนาวิธีการออกแบบท่อลมที่คำนึงถึงผลกระทบ ของการสูญเสียลม และ ความร้อน โดยทำการปรับปรุงวิธีการออกแบบท่อลมแบบ Static Regain เพื่อให้รองรับผลกระทบดังกล่าว

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆที่มีอิทธิพลต่อการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อนของลม
2. สร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อนของลม
3. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อน
4. ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาพัฒนาวิธีการออกแบบท่อลมที่คำนึงถึงการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อน

1.3 ขอบเขต และ แนวทางของงานวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีการไหลของของไหลแบบอัดตัวไม่ได้
2. ศึกษาทฤษฎีการรั่วไหลของลมและการสูญเสียความร้อนในท่อลม
3. ทำการศึกษาพารามเทริก (Parametric Study) เพื่อเข้าใจพฤติกรรมของตัวแปรต่างๆที่ส่งผลกระทบต่อ การรั่วไหล และ สูญเสียความร้อน
4. วิเคราะห์เชิงมิติของกลุ่มตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อน
5. สร้างชุดทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของกลุ่มตัวแปรที่มีผลกระทบต่อ การรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อน
6. พัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อน
7. นำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาพัฒนาวิธีการออกแบบท่อลมที่คำนึงถึงการรั่วไหลของลม และ การสูญเสียความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลม โดยคำนึงถึงการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อ เพื่อใช้ทำนายการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนของท่อลม
2. สามารถนำแบบจำลองที่ได้ไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบท่อลมแบบ Static Regain ที่ตรงกับสภาพการใช้งานจริง ซึ่งจะมีการรั่วไหล และ การสูญเสีย หรือ การเพิ่มขึ้นของความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องกับการออกแบบ และ ทำให้สามารถคำนวณความเร็วที่เหมาะสม และ หาขนาดของท่อลมที่เหมาะสมได้

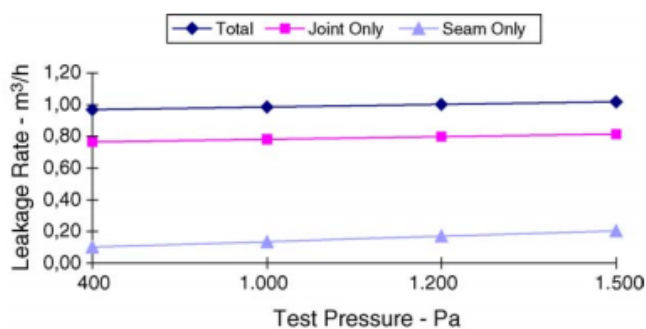
บทที่ 2

วรรณกรรมปริทัศน์

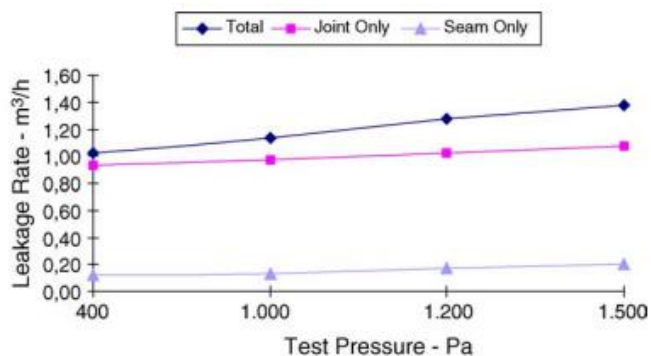
จากการศึกษาเอกสาร และ ผลงานวิจัยต่างๆในอดีต ซึ่งมีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ได้ข้อสรุปในประเด็นต่างๆ ดังนี้

2.1 ตำแหน่งของการรั่วไหล

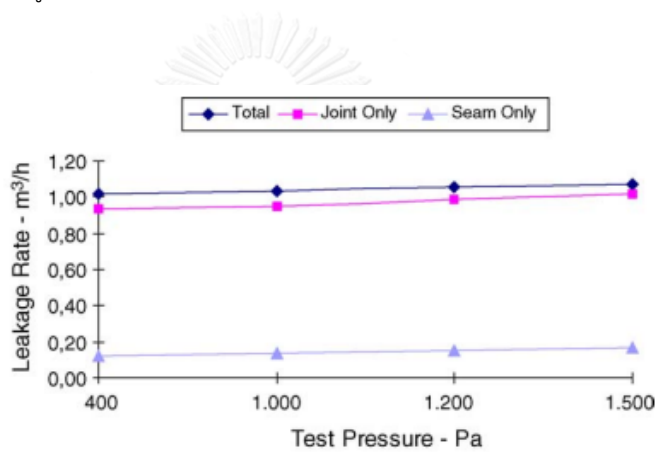
จากการศึกษาของงานวิจัยในอดีตพบว่า การรั่วไหลนั้น จะเกิดขึ้นตามบริเวณแนวรอยต่อ (Joint) และ ในบริเวณแนวตะเข็บ (Seam) โดยจากงานวิจัยของ C. Aydin และ B. Ozerdem 2006 [1] ได้ทำการศึกษาท่อลมเดี่ยวทรงกระบอก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร และ 1000 มิลลิเมตร และ ระบบท่อทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มิลลิเมตร และ 630 มิลลิเมตร โดยแต่ละท่อนเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อแบบเลื่อน (Slip Joint) และ ท่อลมเดี่ยวหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 1000×500 มิลลิเมตร และ ขนาด 300×250 มิลลิเมตร และ ระบบท่อลมสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 300×200 มิลลิเมตร และ ขนาด 500×300 มิลลิเมตร และ ท่อลมที่มีการแยกเป็นท่อย่อย โดยแต่ละท่อนเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อแบบเลื่อน พบว่าการรั่วไหลของลมภายในท่อจะเกิดขึ้นที่บริเวณแนวรอยต่อ มากกว่าแนวตะเข็บ ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ถึง รูปที่ 2-5 และ จากการศึกษาค้นคว้าของ M. Modera (2005)[7] ศึกษาการรั่วไหลของอากาศภายในท่อลมของอาคารพาณิชย์ และ อาคารขนาดใหญ่ โดยพบว่าการรั่วไหลของท่อกลมนั้นมักเป็นประเด็นที่ไม่ค่อยได้รับความสนใจ ทั้งๆที่การรั่วไหลนั้นจะส่งผลกระทบต่อพลังงานของพัดลม และ ภาระความร้อนของระบบ โดยการรั่วไหลนั้นจะเกิดที่บริเวณแนวรอยต่อ ณ ตำแหน่งต่างๆ ของท่อลม



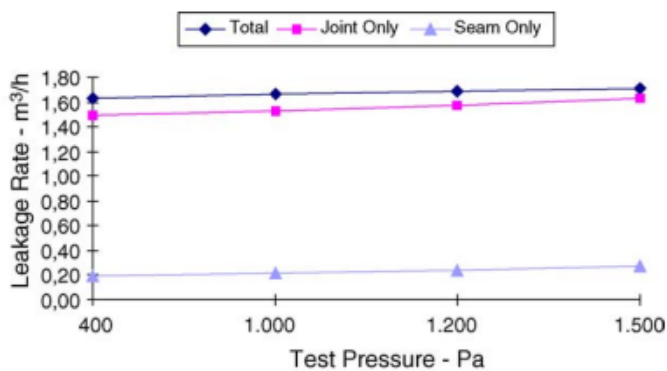
รูปที่ 2 - 1 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมทรงกระบอก
เส้นผ่านศูนย์กลาง 300 มม. (C. Aydin และ B. Ozerdem [1])



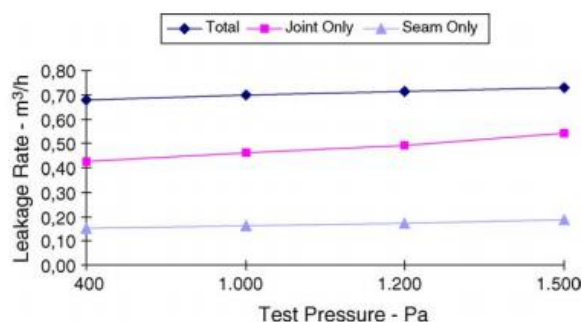
รูปที่ 2 - 2 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 630 มม. (C. Aydin and B. Ozerdem 2006[1])



รูปที่ 2 - 3 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมสี่เหลี่ยม ขนาด 300 x 200 มม.(C. Aydin and B. Ozerdem 2006[1])



รูปที่ 2 - 4 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมสี่เหลี่ยม ขนาด 500 x 300 มม.(C. Aydin and B. Ozerdem 2006[1])

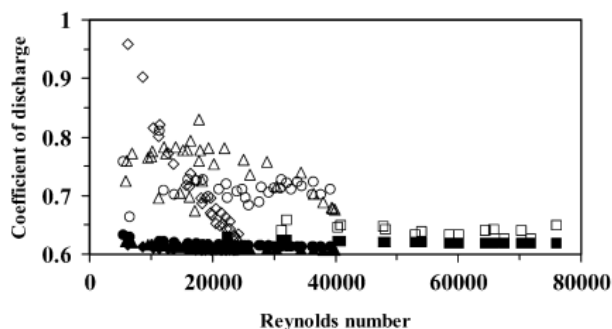


รูปที่ 2 - 5 ระดับการรั่วไหลที่แนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลมที่มีการแยกเป็นท่อย่อย

(C. Aydin and B. Ozerdem 2006[1])

2.2 ตัวแปรที่ส่งผลต่อระดับการรั่ว

จากงานวิจัยของ F.Carrie, A. Bossaer et al 2005[2] ได้ศึกษาการรั่วไหลของระบบท่อลมภายในอาคาร 42 แห่งในประเทศฝรั่งเศส และ เบลเยียม และ พบว่าระดับการรั่วไหลนั้นจะขึ้นอยู่กับระดับความดันของลมภายในท่อ การผนึกท่อ รวมทั้งขึ้นอยู่กับฝีมือการติดตั้งของผู้รับเหมา และ จากงานวิจัยของ K. Srinivasan (2004)[3] ซึ่งได้ศึกษา และ ทดลองวัดปริมาณการรั่วไหลที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ต่างๆในระบบปรับอากาศว่ามีความสัมพันธ์กับระดับความดันของลมภายในท่ออย่างไร โดยใช้ออริฟิสที่มีอัตราส่วนระหว่างรัศมีของออริฟิสต่อรัศมีภายในท่อ เท่ากับ 0.405, 0.418, 0.613 และ 0.525 โดยทำการปรับเปลี่ยนตัวเลขเรย์โนลด์์ในช่วง 5,600 ถึง 76,000 โดยพบว่าอัตราการรั่วไหลจะมีความสัมพันธ์กับความดันตกคร่อมรูรั่วแบบยกกำลังสาม และ พบว่าที่ตัวเลขเรย์โนลด์์ต่างๆ จะส่งผลต่อ Discharge Coefficient คือ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์์สูงค่า Discharge Coefficient มีค่าต่ำ และ ค่อนข้างคงที่ ดังแสดงในรูปที่ 2-6 และ จากงานวิจัยของ C. Aydin และ B. Ozerdem (2006)[1] ได้แสดงให้เห็นว่าความดันในระบบท่อลมยิ่งเพิ่มยิ่งส่งผลต่อระดับการรั่วไหล ดังแสดงในรูปที่ 2-1 ถึงรูปที่ 2-5 และ ในงานวิจัยของ D.Parker, P. Fairey และ L.Gu [4] ได้ทำการศึกษาผลกระทบของการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อนของระบบท่อลม โดยพบว่าอัตราการรั่วไหลของอากาศนั้นจะขึ้นอยู่กับ พื้นที่การรั่วไหล ระดับความดันของท่อลม และ การสูญเสียความร้อนได้รับอิทธิพลมาจากการรั่วไหลมากกว่าจากการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ



รูปที่ 2 - 6 ความสัมพันธ์ระหว่างตัวเลขเรย์โนลด์ และ Discharge Coefficient
(K. Srinivasan 2004[3])

2.3 แบบจำลองในอดีตที่ใช้วิเคราะห์หาการอัตราการรั่วไหล

2.3.1 แบบจำลองเลขยกกำลัง (Power Law Model)

แบบจำลองเลขยกกำลังมีที่มาจากหลักการว่าการรั่วไหลนั้นจะเกิดขึ้นเนื่องมาจากเกิดความแตกต่างของความดันภายในท่อ และ ภายนอกท่อ และการรั่วไหลส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณแนวตะเข็บ และ แนวรอยต่อของท่อลม และ อัตราการรั่วไหลนั้นจะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดันภายในท่อ และ ภายนอกท่อ รูปแบบของรอยต่อ และ ลักษณะการผนึกท่อ โดยในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองเลขยกกำลังจะอาศัยสมการแบร์นูลลีที่คำนึงถึงสูญเสียพลังงาน ดังแสดงในสมการที่ 2.1

$$\frac{P_{s1}}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_{s2}}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + \sum losses \quad (2.1)$$

เมื่อ v_1 คือ อัตราเร็วของการรั่วไหลภายในท่อ และ v_2 อัตราเร็วของการรั่วไหลที่ผิวนอกท่อ และ P_{s1} และ P_{s2} คือ ความดันภายใน และ ภายนอกท่อลม ตามลำดับ

โดยสมการนี้มีสมมติฐาน คือ เป็นการไหลใน 1 มิติ, เป็นการไหลในสภาวะคงตัว และ เป็นการไหลที่ไม่อัดตัว โดยหากกำหนดให้ อัตราเร็วของการรั่วไหลภายในท่อ มีค่าเป็นศูนย์ จะได้อัตราเร็วของการรั่วไหล คือ

$$v_2 = \sqrt{2 \left[\frac{P_{s1} - p_{s2}}{\rho} - \sum losses \right]} \quad (2.2)$$

โดยการสูญเสีย จะขึ้นอยู่กับลักษณะพื้นผิว เส้นทางการไหล และ ตัวเลขเรย์โนลด์ และ นอกจากนี้การสูญเสียยังขึ้นอยู่กับลักษณะการไหลภายในท่อว่าเป็นแบบราบเรียบ (Laminar) หรือปั่นป่วน (Turbulent) ดังนั้น สมการที่ 2.2 จึงถูกจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$v_2^2 + e_l v_2^2 + e_t v_2^2 = 2 \left[\frac{p_1 - p_2}{\rho} \right] \quad (2.3)$$

เมื่อ e_l และ e_t คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียแบบราบเรียบ และ แบบปั่นป่วนตามลำดับ โดยจากสมการที่ 2.3 จะพบว่าอัตราเร็วของการรั่วไหลนั้นจะแปรผันโดยตรงกับความแตกต่างของความดันแบบยกกำลัง และ ปริมาณของอากาศที่รั่วไหลออกมานั้นจะสามารถคำนวณได้โดยใช้ กฎอนุรักษ์มวล ดังสมการที่ 2.4

$$Q = \oint v_{avg} dA = \sum_{i=1}^m v_i A_i \quad (2.4)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร และ A_i คือ พื้นที่หน้าตัดการรั่วไหล และ เนื่องจากอัตราเร็วของการรั่วไหล (v_i) ขึ้นอยู่กับความแตกต่างของความดัน ดังนั้น หากจัดรูปสมการที่ 2.4 ใหม่ จะได้

$$Q = kA(\Delta P_s)^n \quad (2.5)$$

เมื่อ k คือ ค่าคงที่ และ เพื่อเป็นการรักษารูปแบบของสมการที่ 2.5 เมื่อพิจารณาต่อลมที่มีความดันแตกต่างกัน ดังนั้น จึงสามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการที่ 2.6

$$Q = c(\Delta P_{s,norm})^n \quad (2.6)$$

โดย $\Delta P_{s,norm}$ มีค่าตามสมการที่ 2.7

$$\Delta P_{s,norm} = \frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} \quad (2.7)$$

ค่า c จากสมการที่ 2.6 เป็นค่าคงที่ โดยสมการที่ 2.6 นั้นคือแบบจำลองเลขยกกำลัง ซึ่งในการใช้แบบจำลองนี้ในการทำนายอัตราการรั่วไหล จำเป็นต้องหาค่า c และ เลขชี้กำลัง n ที่มีความเหมาะสม โดยแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองที่ถูกนำไปใช้ในการอ้างอิงงานวิจัยค่อนข้างมาก เช่น งานวิจัยของ D. Parker, P. Fairey และ L. Gu (1993)[4] ได้อาศัยแบบจำลองเลขยกกำลังในการ

วิเคราะห์หาปริมาณการรั่วไหล โดยให้เลขชี้กำลัง n จากสมการที่ 2.6 มีค่าเท่ากับ 0.72 และ ให้ค่าคงตัว c มีค่าเท่ากับ สองเท่าของความยาวท่อหารด้วยความหนาแน่นของอากาศ และ จากงานวิจัยของ M.I. Montoya (2009) [5] ทำการประมาณการรั่วไหลของอากาศจากที่อยู่อาศัยแบบบ้านเดี่ยวสำหรับครอบครัวเดียวในฝรั่งเศส โดยอาศัยสมการที่ 2.6 และ ใช้เลขชี้กำลัง n ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 0.6 ถึง 0.7 และ จากงานวิจัยของ C. Aydin และ B. Ozerdem (2006)[1] ได้ทำนายการรั่วไหลของอากาศจากระบบท่อลม โดยใช้แบบจำลองเลขยกกำลัง ใช้เลขชี้กำลัง n ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.66 สำหรับท่อที่มีการผนังสองด้าน, 0.58 สำหรับท่อที่มีการผนังท่อเดียว และ 0.32 สำหรับท่อที่ไม่มีการผนัง และ ได้ผลลัพธ์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับการทดลอง

2.3.2 แบบจำลองชั้นการรั่วไหล (Leakage Class)

แบบจำลองชั้นของการรั่วไหลมีรูปแบบของสมการใกล้เคียงกับแบบจำลองเลขยกกำลัง โดย SMACNA (1992)[6] ศึกษาวิธีการทำนายการรั่วไหลของลมภายในท่อผ่านบริเวณรอยเชื่อมต่อต่างๆ โดยเชื่อมโยงระดับการรั่วไหลให้ขึ้นอยู่กับความดันเฉลี่ยของลมภายในท่อ และ พื้นที่ผิวของระบบท่อลม ดังสมการที่ 2.8

$$F = C_l \times (\Delta P_s)^{0.65} \quad (2.8)$$

เมื่อ F คือ อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่อพื้นที่ผิวท่อลม 100 ตารางฟุต, C_l คือ ชั้นการรั่วไหล (Leakage Class) และ ΔP_s คือ ความแตกต่างระหว่างความดันสถิตภายใน และ ภายนอกท่อลม

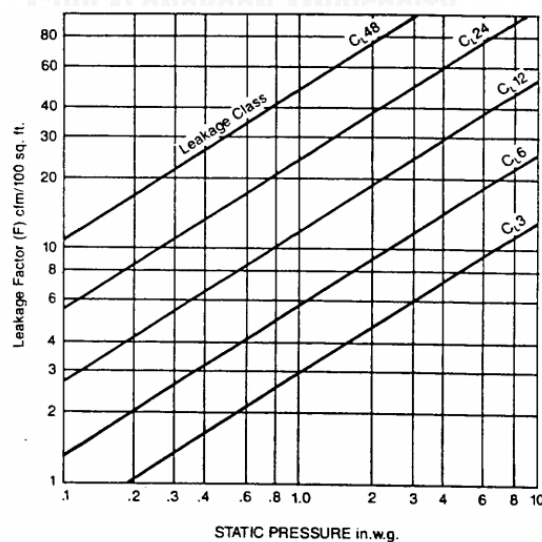
โดยค่า C_l จะถูกแบ่งตามระดับความดันภายในท่อลม และ ตามลักษณะของการผนังท่อ ดังแสดงในตารางที่ 2-1 และ ตารางที่ 2-2 โดยพบว่าลักษณะของการผนังท่อ และ ความดันภายในท่อส่งผลกระทบต่ออัตราการรั่วไหล หากที่ระดับการผนังเดียวกันถ้าความดันเพิ่มขึ้นอัตราการรั่วไหลต่อพื้นที่ผิวของท่อจะเพิ่มขึ้นตาม

ตารางที่ 2 - 1 ตารางแสดงระดับการผนึก ตำแหน่งที่ต้องมีการผนึก และ ความดันภายในท่อลม (SMACNA[6])

DUCT SEALING REQUIREMENTS		
Seal Class	Sealing Required	Static Pressure Construction Class
A	All transverse joints, longitudinal seams and duct wall penetrations	4" w.g. and up
B	All transverse joints and longitudinal seams	3" w.g.
C	Transverse joints	2" w.g.
In addition to the above any variable air volume system duct of 1" and 1/2" w.g. construction class that is upstream of the VAV boxes shall also meet Seal Class C.		

ตารางที่ 2 - 2 ตารางแสดงระดับการผนึก, ความดันภายในท่อลม และ ชั้นการรั่วไหลตามรูปทรงของท่อลม (SMACNA[6])

APPLICABLE LEAKAGE CLASSES			
DUCT CLASS	1/2", 1", 2" W.G.	3" W.G.	4", 6", 10" W.G.
SEAL CLASS	C	B	A
SEALING APPLICABLE	TRANSVERSE JOINTS ONLY	TRANSVERSE JOINTS AND SEAMS	JOINTS, SEAMS AND ALL WALL PENETRATIONS
LEAKAGE CLASS			
RECTANGULAR METAL	24	12	6
ROUND METAL	12	6	3



รูปที่ 2 - 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Leakage Class, Leakage Factor และ ความดันสถิต (SMACNA[6])

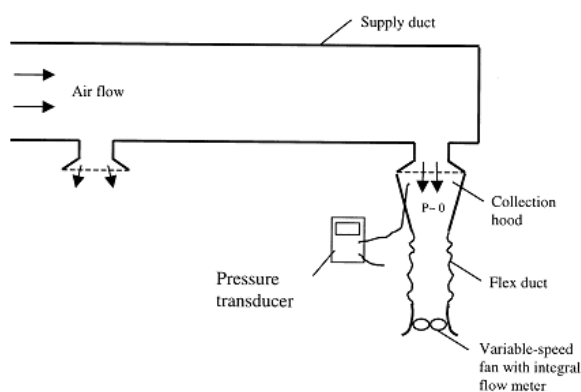
2.4 วิธีการทดสอบท่อลมเพื่อหาอัตราการรั่วไหล

2.4.1 Air Injection Method

จากงานวิจัยของ M.P. Modera, D.J. Dickerhoff, W.W. Delp, W.J. Fisk, R. Levinson, M. Nematollahi และ D. Wang (1999) [7] ได้ศึกษาลักษณะทางกายภาพของการรั่วไหล และการพาความร้อนผ่านผนังท่อ โดยในการทดลองเพื่อวัดอัตราการรั่วไหลของอากาศได้ใช้วิธี Air Injection Method ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ประมาณการรั่วไหลโดยการวัดปริมาณอัตราการไหลเข้า Test Section ลบด้วยปริมาณอัตราการไหลที่วัดได้ ณ บริเวณทางออกของท่อลม ซึ่งใน Test Section นี้ จะใช้หน้ากักจ่ายลมเป็นบริเวณทางออกของลม โดยอุปกรณ์หลักใน Test Section ประกอบด้วย พัดลม, อุปกรณ์วัดความดัน, อุปกรณ์วัดอัตราการไหล และ ท่อลมทดสอบ

พัดลมที่ใช้เป็นพัดลมชนิดที่ปรับความเร็วลมได้ 2 ตัว โดยติดตั้งบริเวณ ขาเข้าท่อลม และ ที่หน้ากักจ่ายลม ดังแสดงในรูปที่ 2-8 และ พัดลมที่ติดตั้งบริเวณขาออกของท่อลมนั้น จะถูกควบคุมความเร็วของลมเพื่อให้ความดันเกจที่กระจายตัวบริเวณหน้ากักจ่ายลมมีค่าเป็น 0 Pa ซึ่งจะสอดคล้องกับสภาพความดันในบรรยากาศจริง

วิธี Air Injection Method มีข้อดี คือ สามารถทำการทดลองเพื่อประมาณปริมาณอากาศที่รั่วไหลได้โดยไม่ต้องคำนึงถึงรูปร่างของท่อลม แต่การทดลองด้วยวิธีนี้จะมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงเนื่องจากต้องใช้พัดลม ถึง 2 ตัวในการทดลอง



รูปที่ 2 - 8 ส่วนประกอบของ Test Section สำหรับวิธี Air Injection Method (W. J. Fisk , W. Delp, R.

Diamond, D. Dickerhoff , R. Levinson , M. Modera , M. Nematollahi and D. Wang 1999 [7])

2.4.2 Pressurization

จากงานวิจัยของ K. Srinivasan (2004)[3] ได้ทำการทดลองวัดอัตราการรั่วไหลของอากาศจากระบบท่อลมของระบบปรับอากาศโดยอาศัยวิธี Pressurization ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการประมาณการรั่วไหลของอากาศ โดยมีหลักการ คือ แบ่งการทดลองเป็น 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ให้ทำการผนึก (Seal) บริเวณทุกบริเวณที่อาจเกิดการรั่วไหลได้ และ วัดอัตราการไหลของอากาศที่บริเวณขาออกของท่อ และ ขั้นตอนที่ 2 ให้ทำการทดลองในลักษณะเดิม แต่ไม่มีการผนึก ณ บริเวณที่อาจเกิดการรั่ว และ วัดปริมาณการไหลของอากาศที่บริเวณขาออกของท่อ และ นำค่าทั้งสองที่ได้มาลบกัน เพื่อหาอัตราการรั่วไหลโดยประมาณ

2.4.3 พื้นที่การรั่วไหลประสิทธิผล (Effective Leakage Area: ELA)

การรั่วไหลของอากาศจากระบบท่อลมที่บริเวณแนวรอยต่อต่างๆ สามารถประมาณพื้นที่ของการรั่วไหลเหล่านั้นให้อยู่ในรูปพื้นที่การรั่วประสิทธิผล ซึ่งเป็นวิธีหนึ่งที่ถูกใช้ในการประมาณการรั่วไหล โดยมีรูปแบบของสมการดังนี้

$$Q_L = ELA \times \sqrt{\frac{2\Delta p_{ref}}{\rho}} \left(\frac{\Delta p}{\Delta p_{ref}} \right)^n \quad (2.9)$$

เมื่อ ELA คือ Effective Leakage Area

n คือ เลขชี้กำลัง และ มีค่า 0.65 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

โดยจากงานวิจัยของ M.P. Modera, D.J. Dickerhoff, W.W. Delp, W.J. Fisk, R. Levinson, M. Nematollahi และ D. Wang(1999)[7] ได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของการรั่วไหล และ การพาความร้อนผ่านผนังท่อ โดยในการศึกษานั้นได้อาศัยสมการที่ 2.9 ในการประมาณพื้นที่การรั่วไหลของอากาศจากระบบท่อลมของอาคารขนาดใหญ่

จากงานวิจัยของ C. Aydin และ B. Ozerdem[1] ได้ทำการทดลองวัดการรั่วไหลของอากาศจากระบบท่อลมด้วยวิธี Effective Leakage Area เป็นวิธีประมาณการรั่วไหลของอากาศจากท่อลม โดยสร้างรูรั่วขึ้นใหม่ ซึ่งขนาดของรูรั่วที่สร้างขึ้นนั้นจะมีพื้นที่เสมือนพื้นที่ของรอยต่อ (Joint), พื้นที่ตะเข็บ (Seam) และ พื้นที่จากการสึกกร่อน โดยในขั้นตอนการหาพื้นที่ของรูรั่วนั้น จะอาศัยสมการของ Delp[8] ซึ่งมี รูปแบบตามสมการที่ 2.9 และ อาศัยแบบจำลองเลขยกกำลัง ซึ่งมี

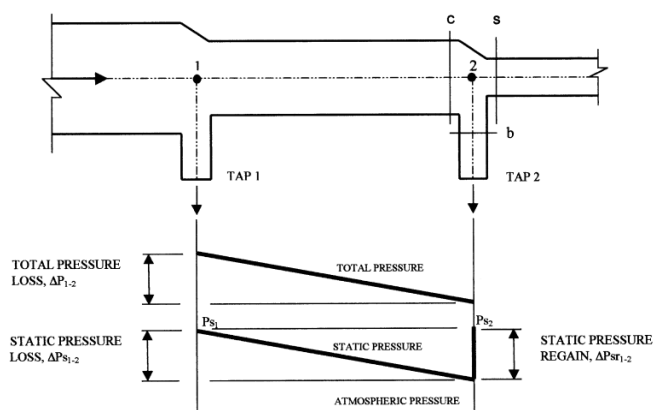
รูปแบบดังสมการ 2.6 เมื่อแทนค่า Q ในสมการที่ 2.6 ลงใน สมการที่ 2.9 จะได้สมการหาพื้นที่การรั่วไหลได้ โดยพื้นที่ ELA (Effective Leakage Area) นั้นจะเปรียบเสมือนพื้นที่ของออริฟิสเดี่ยว ดังนั้น รูรั่วที่สร้างขึ้นจะมีหน้าตัดเป็นวงกลม

2.5 ปัญหาของวิธีการออกแบบท่อลมแบบ Static Regain

จากงานวิจัยของ E.H. Mathews (1999)[9] ได้อ้างอิงถึงงานวิจัยของ Tsal และ Behls (1988)[10] ซึ่งได้กล่าวถึงปัญหาของการรักษาสมดุลของความดันลมเมื่อออกแบบด้วยวิธี Static Regain โดยจากรูปที่ 2-9 พบว่าลักษณะของท่อแยกที่ 1 และ ท่อแยกที่ 2 เหมือนกันทุกประการ และ ความดันสถิตในจุดที่ 1 และ จุดที่ 2 มีขนาดเท่ากัน สถานการณ์นี้ทำให้ผู้ออกแบบจำนวนหนึ่งเข้าใจว่าอัตราการไหลของลมในแต่ละท่อย่อยจะเท่ากันด้วย และ หากระบบมีความสมดุลจริง ความดันลดในท่อแยกที่ 1 จะเท่ากับความดันลดในท่อส่วน 1-2 รวมกับความดันลดในท่อแยกที่ 2 ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$\Delta P_{tot,1-atm} = \Delta P_{tot,1-2} + \Delta P_{tot,2-atm} \quad (2.10)$$

เมื่อ $\Delta P_{tot,n-atm}$ คือ ความดันรวมที่ลดจากตำแหน่ง n ถึงบรรยากาศ



รูปที่ 2 - 9 แสดงความดันรวมที่ลดลง และ ความดันสถิตที่เพิ่มขึ้น ณ จุดแยกที่ 2 (Tsal RJ, 1988[10])

จากสมการที่ 2.10 พบว่าพจน์ $\Delta P_{tot,1-atm}$ และ $\Delta P_{tot,2-atm}$ มีขนาดที่เท่ากัน อันเนื่องมาจากลักษณะของท่อที่เหมือนกัน และ มีอัตราการไหลที่เท่ากัน ดังนั้น ทั้งสองพจน์สามารถหักล้างกันได้ ส่งผลให้ $\Delta P_{tot,1-2}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ดังนั้น E.H Mathews และ D.T. Claassen[9] จึงเสนอให้ใช้รูปที่ 2-10 ซึ่งเหมาะสมมากกว่ารูปที่ 2-9 จากรูปที่ 2-10 หากกำหนดให้

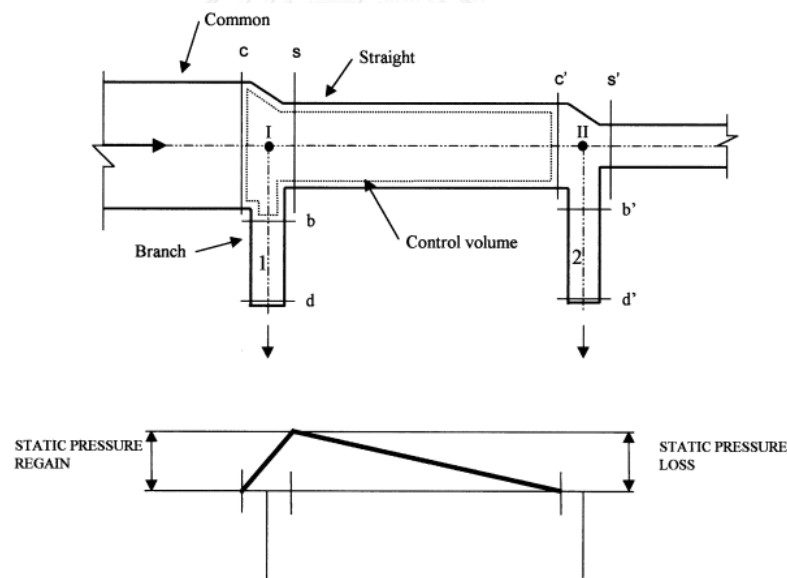
ท่อแยกที่ 1 และ 2 เหมือนกันทุกประการ และ กำหนดให้ความดันสถิตที่จุด c และ จุด c' มีค่าเท่ากัน โดยความดันสมมูลเป็นไปตามสมการที่ 2.11

$$\Delta P_{tot,c-b} + \Delta P_{tot,b-d} = \Delta P_{tot,c-s} + \Delta P_{tot,s-c'} + \Delta P_{tot,c'-b'} + \Delta P_{tot,b'-d'} \quad (2.11)$$

จากสมการที่ 2.11 พบว่าหากท่อแยกที่ 1 และ 2 มีขนาด และ อัตราการไหลที่เท่ากัน ความดันลดย่อมเท่ากันด้วย ดังนั้นพจน์ของ $\Delta P_{tot,b-d}$ กับพจน์ $\Delta P_{tot,b'-d'}$ จึงมีขนาดเท่ากันซึ่งสามารถหักล้างกันได้ สมการที่ 2.11 จึงถูกจัดรูปได้เป็นสมการที่ 2.12

$$\Delta P_{tot,c-b} = \Delta P_{tot,c-s} + \Delta P_{tot,s-c'} + \Delta P_{tot,c'-b'} \quad (2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 พบว่าความดันลดจากจุด c-c' จึงมีค่าไม่เท่ากับศูนย์ ซึ่งตรงกับความเป็นจริงมากกว่าสมการที่ 2.10



รูปที่ 2 - 10 แสดงความดันสถิตที่เพิ่มขึ้น และ ความดันสถิตที่ลดลงตามเส้นทางการไหล c-s-c'

(E.H Mathews, D.T. Claassen ,1999[9])

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การถ่ายเทความร้อนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิระหว่างตำแหน่งสองตำแหน่งในบริเวณใด ๆ มีความแตกต่างกัน โดยความร้อนจะถูกถ่ายเทจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าไปยังตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าเสมอ โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนสามารถแบ่งออกเป็น 3 วิธี ได้แก่

1. การนำความร้อน (Conduction) คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่ความร้อนจากตำแหน่งหนึ่งถูกส่งผ่านเนื้อสารไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งโดยสารอยู่นิ่งกับที่
2. การพาความร้อน (Convection) คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่ความร้อนจากตำแหน่งหนึ่งในสารถูกถ่ายไปอีกตำแหน่งหนึ่งโดยติดไปกับสารที่เกิดการเคลื่อนที่
3. การแผ่รังสี (Radiation) คือ กระบวนการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงแผ่รังสีเป็นกลุ่มของพลังงานรูปแบบหนึ่งในอวกาศการจ่ายพลังงานที่มากกว่าไปให้ตำแหน่งอีกตำแหน่งหนึ่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า โดยการแผ่รังสีนั้นเป็นกระบวนการที่ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ของความร้อน

3.1 การนำความร้อน (Conduction) วิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

3.1.1 กฎของฟูรีเยร์ (Fourier's Law)

กฎของฟูรีเยร์สามารถอธิบายได้ว่า ฟลักซ์ของความร้อนที่ถูกถ่ายเท ณ ตำแหน่งหนึ่ง จะแปรผันโดยตรงกับค่าเกรเดียนต์ของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ที่ติดลบ ณ ตำแหน่งที่เกิดการถ่ายเทความร้อนนั้น หรือ เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$q'' = -k\nabla T$$

เมื่อ	q''	คือ	ฟลักซ์ของพลังงานความร้อน [W/m^2]
	k	คือ	ค่าสภาพการนำความร้อน [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]
	T	คือ	อุณหภูมิ [K]

3.1.2 การนำความร้อนในสภาวะคงตัว (Steady State Heat Conduction)

การนำความร้อนในสภาวะคงตัว คือ การถ่ายเทความร้อนในขณะที่อุณหภูมิของวัสดุในตำแหน่งต่างๆของระบบไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา แต่อุณหภูมิจะมีการกระจายตัว กล่าวคือ ณ ตำแหน่งต่างๆในระบบจะมีอุณหภูมิไม่เท่ากันทุกจุด โดยความแตกต่างของอุณหภูมิก่อให้เกิดการถ่ายเทความร้อนในลักษณะของการนำความร้อนเกิดขึ้น

ในกรณีที่เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังที่สภาวะคงตัว, ไม่มีการกำเนิดความร้อน (Heat Generation) ภายในระบบ และ เป็นการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน X

จากสมการพลังงาน

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}_{gen}}{k} = 0 \quad (3.1)$$

เมื่อ \dot{q}_{gen} คือ ความร้อนที่กำเนิดขึ้นในระบบ [W/m^3]

สามารถลดรูปสมการได้เป็น

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = 0$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการข้างต้นจะได้

$$T = C_1 x + C_2$$

เมื่อแทนค่าสมการการกระจายตัวของอุณหภูมิลงในสมการฟูเรียร์ หรือ สมการ 3.2 จะสามารถหาปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังได้

$$\dot{q}_x = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3.2)$$

เมื่อ \dot{q}_x คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน X [W]
 A คือ พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการถ่ายเทความร้อน [m^2]

ในกรณีที่เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านผิวทรงกระบอก ในสภาวะคงตัว ไม่มีการกำเนิดความร้อนภายในระบบ และ เป็นการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน r

จากสมการที่ 3.1 หากพิจารณาเป็นการนำความร้อนในระบบพิกัดทรงกระบอกจะ
ได้สมการดังนี้

$$q'' = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial r} + j \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \phi} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

หากพิจารณาอัตราการถ่ายเทความร้อนในแนวรัศมี (\dot{q}_r) สมการจะถูกลดรูปเป็น

$$\dot{q}_r = -k(2\pi rL) \frac{dT}{dr}$$

จากสมการพลังงานจะได้

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q}_{gen} = 0$$

เนื่องจากการพิจารณากรณีไม่มีการกำเนิดความร้อนภายในระบบสภาวะคงตัว
และ เป็นการถ่ายเทความร้อนในแนวแกน r ดังนั้น สมการข้างต้นจะถูกลดรูปเป็น

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(kr \frac{dT}{dr} \right) = 0$$

เมื่อทำการอินทิเกรตสมการข้างต้น

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2$$

เมื่อแทนค่าเงื่อนไขขอบเขต คือ $T(r_1) = T_{s,1}$ และ $T(r_2) = T_{s,2}$ จะได้การ
กระจายตัวของอุณหภูมิดังนี้

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln(r_1/r_2)} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) + T_{s,2}$$

เมื่อแทนค่าสมการการกระจายตัวของอุณหภูมิลงในสมการฟูเรียร์จะได้สมการการ
ถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมีทรงกระบอก ดังนี้

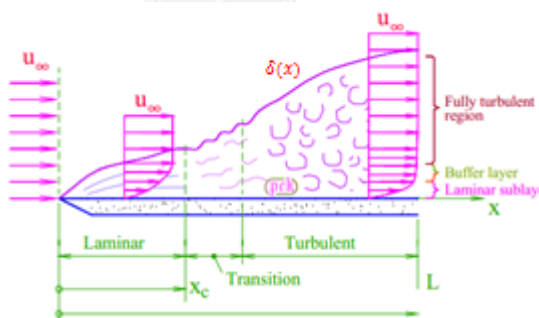
$$\dot{q}_r = \frac{2\pi Lk(T_{s,1} - T_{s,2})}{\ln(r_2/r_1)} \quad (3.3)$$

3.2 การพาความร้อน (Convection)

การพาความร้อนจะประกอบด้วยกลไกหลัก 2 กลไก ได้แก่ การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการแพร่ของโมเลกุลของของไหล และ การถ่ายเทความร้อนเนื่องจากการเคลื่อนที่ของของไหล โดยปัจจัยหลักที่มีผลต่อกระบวนการพาความร้อน คือ ชั้นขอบเขตการพาความร้อน (Convection Boundary Layer) ซึ่งชั้นขอบเขตที่สำคัญจะประกอบด้วย ชั้นขอบเขตความเร็ว (Velocity Boundary Layer) และ ชั้นขอบเขตอุณหภูมิ (Thermal Boundary Layer)

3.2.1 ชั้นขอบเขตความเร็ว (Velocity Boundary Layer)

หากพิจารณาการไหลผ่านแผ่นราบดังรูปที่ 3 - 1 จะพบว่าความหนืดจะทำให้อนุภาคของของไหลที่บริเวณติดกับแผ่นราบมีความเร็วเป็นศูนย์ โดยอนุภาคเหล่านี้จะหน่วงให้ของไหลที่อยู่ในชั้นที่ติดกันไหลช้าลง โดยสภาพการไหลลักษณะนี้จะเกิดขึ้นที่บริเวณภายในชั้นขอบเขตความเร็ว และหากพิจารณาที่บริเวณเหนือระยะ $\delta(x)$ ขึ้นไปจะพบว่า ลักษณะของความเร็วจะไม่มีการเปลี่ยนแปลง และมีขนาดเท่ากับความเร็วของกระแสอิสระ (u_∞)

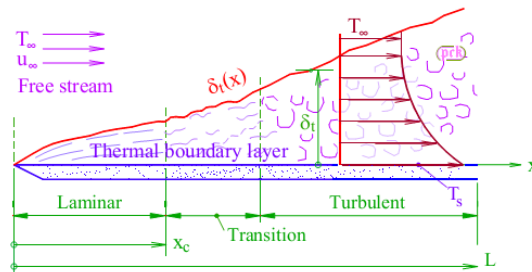


รูปที่ 3 - 1 แสดงลักษณะ และ บริเวณต่างๆของชั้นขอบเขตความเร็ว (พงษ์ธร จริญญากรณ์,สไลด์[11])

3.2.2 ชั้นขอบเขตอุณหภูมิ (Thermal Boundary Layer)

เป็นชั้นที่เกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิของของไหลมีค่าแตกต่างกับอุณหภูมิพื้นผิวของแผ่นราบ โดยเมื่อของไหลไหลผ่านแผ่นราบ อนุภาคของของไหลที่ติดกับแผ่นราบจะมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิพื้นผิวของแผ่นราบ และ อนุภาคเหล่านี้จะถ่ายเทพลังงานความร้อนให้กับของไหลในชั้นที่ติดกัน ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ในของไหล ดังแสดงในรูปที่ 3 - 2 โดย

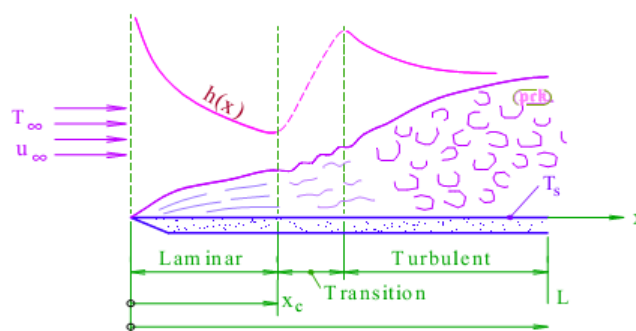
หากพิจารณาที่ระยะห่างจากผนังในแนวตั้งเป็นระยะ $\delta_t(x)$ จะพบว่าอุณหภูมิของของไหลจะเท่ากับอุณหภูมิของกระแสอิสระ (T_∞)



รูปที่ 3 - 2 แสดงลักษณะ และ บริเวณต่างๆของชั้นขอบเขตอุณหภูมิ (พงษ์ธร จริญญากรณ์,สไลด์[11])

3.2.3 การไหลแบบราบเรียบ และ การไหลแบบปั่นป่วน (Laminar and Turbulent Flow)

ในการวิเคราะห์ปัญหาพาความร้อนนั้น จำเป็นต้องพิจารณาลักษณะการไหลในชั้นขอบเขตการไหล ว่าเป็นแบบราบเรียบ หรือ แบบปั่นป่วน เนื่องจากความเค้นเฉือนที่พื้นผิว และ กลไกการพาความร้อนจะมีความแตกต่างกัน โดยรูปที่ 3 - 3 จะแสดงลักษณะการไหลที่เป็นแบบราบเรียบ และ แบบปั่นป่วน ผ่านแผ่นเรียบที่วางตัวในแนวนอน จากรูปจะเห็นได้ว่าการไหลแบบราบเรียบ ของไหลจะมีการไหลอย่างเป็นระเบียบ ในขณะที่การไหลแบบปั่นป่วนของไหลจะเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบทำให้มีความสามารถในการถ่ายเทโมเมนตัม และ พลังงานได้มากขึ้น



รูปที่ 3 - 3 แสดงการไหลในชั้นขอบเขตความเร็วเหนือแผ่นราบ(พงษ์ธร จริญญากรณ์,สไลด์[11])

ในการพิจารณาว่าของไหลมีการไหลในลักษณะใด สามารถพิจารณาได้โดยใช้ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds Number, Re) เป็นตัวแบ่งลักษณะการไหล และ ค่า Re สามารถหาได้จากสมการที่ 3.4

$$Re = \frac{\rho v x}{\mu} \quad (3.4)$$

โดย	ρ	คือ	ความหนาแน่นของของไหล [kg/m^3]
	v	คือ	ความเร็วของของไหล [m/s^2]
	x	คือ	ระยะจากขอบหน้าของแผ่นราบ [m]
	μ	คือ	ความหนืดพลศาสตร์ [kg/m.s]

การไหลจะมีการเปลี่ยนแปลงจากการไหลแบบราบเรียบ เป็นการไหลแบบปั่นป่วนที่ระยะ x_c โดยสำหรับการไหลภายนอกค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์วิกฤต (Critical Reynolds Number) จะมีค่าประมาณ 5×10^5 และ ณ ตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงการไหลจากแบบราบเรียบไปเป็นแบบปั่นป่วนจะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันของความหนาของชั้นขอบเขต และสัมประสิทธิ์การพาความร้อน โดยสามารถพิจารณาได้ที่รูป 3.3

3.2.4 ตัวเลขนัสเซลส์ (Nusselt Number)

ตัวเลขนัสเซลส์ (Nu) เป็นตัวเลขไร้มิติที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อน (Convection Coefficient, h) และ ค่าการนำความร้อน (Conductivity) โดยตัวเลขนัสเซลส์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.5

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad \text{หรือ} \quad Nu = \frac{hD}{k} \quad (3.5)$$

โดย	L	คือ	Characteristic Length [m]
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ [m]

3.2.5 ตัวเลขพรันทิลด์ (Prandtl Number)

ตัวเลขพรันทิลด์ (Pr) เป็นตัวเลขไร้มิติที่ใช้แสดงความสามารถในการถ่ายเทโมเมนตัม เมื่อเทียบกับการส่งผ่านความร้อนในของไหล โดยตัวเลขพรันทิลด์สามารถหาได้จากสมการที่ 3.6

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad (3.6)$$

โดย c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะ [J/kg.K]
 μ คือ ความหนืดพลศาสตร์ [kg/m.s]

3.2.6 ตัวเลขเรย์ลี (Rayleigh Number)

ตัวเลขเรย์ลี (Ra) เป็นตัวเลขไร้มิติที่แสดงให้เห็นถึงผลของแรงลอยตัวเมื่อเทียบกับแรงจากความหนืดของของไหล โดยสามารถหาได้จากสมการที่ 3.7

$$Ra = \frac{g\beta(T_{In,s,o} - T_{\infty,o})D^3}{\nu\alpha} \quad (3.7)$$

โดย g คือ ค่าความเร่งจากแรงโน้มถ่วง [m/s^2]
 β คือ การขยายตัวทางความร้อน [1/K]
 $T_{s,o}$ คือ อุณหภูมิพื้นผิว [K]
 $T_{\infty,o}$ คือ อุณหภูมิของของไหล [K]
 ν คือ ความหนืดคินมาติกส์ [m^2/s]
 α คือ การแพร่ทางความร้อน [m^2/s]

หากพิจารณาการพาความร้อนจะสามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection)
2. การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection) หรือ การพาความร้อนแบบธรรมชาติ (Natural Convection)

3.2.7 การพาความร้อนแบบบังคับ (Force Convection)

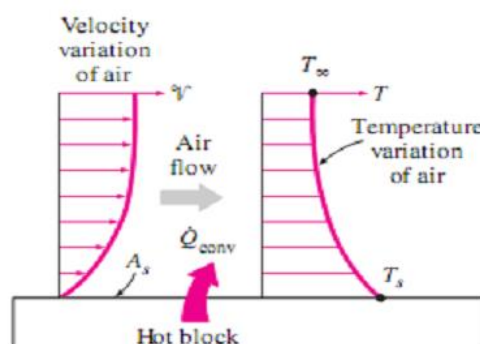
การพาความร้อนแบบบังคับ คือ การพาความร้อนที่เกิดขึ้นเมื่อของไหลถูกบังคับให้เคลื่อนไปสัมผัสกับผิวของของแข็งที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันด้วยกลไกภายนอก เช่น พัดลม หรือ เครื่องสูบน้ำ โดยทั่วไปการพาความร้อนแบบบังคับจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทตามลักษณะบริเวณการไหลของของไหล ได้แก่ การพาความร้อนภายนอก (External Forced Convection) และ การพาความร้อนภายใน (Internal Forced Convection)

3.2.7.1 การพาความร้อนแบบบังคับภายนอก (External Forced Convection)

หากพิจารณารูปที่ 3 - 4 คือ การพาความร้อนที่เกิดขึ้นในของไหลที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของแข็งที่มีอุณหภูมิต่างกัน โดยจะพบว่าในการไหลจะเกิดการเปลี่ยนแปลงลักษณะของความเร็ว และ อุณหภูมิ โดยที่บริเวณใกล้ผนังจะเห็นว่าความเร็วจะลดน้อยลง อันเนื่องมาจากการสูญเสียโมเมนตัม ของของไหลที่บริเวณใกล้ผนัง และ หากพิจารณาที่การกระจายตัวของอุณหภูมิของของไหลจะพบว่าที่บริเวณใกล้ผนังจะมีอุณหภูมิแตกต่างจากบริเวณที่อยู่ไกลจากผนัง และ ยิ่งของไหลมีความเร็วสูงมากขึ้นความลาดชันของอุณหภูมิก็น่าจะเพิ่มมากขึ้นทำให้อัตราการพาความร้อนเพิ่มขึ้นตาม โดยในการคำนวณหาอัตราการพาความร้อนจะอาศัยสมการ Newton's Law of Cooling ซึ่งมีรูปแบบสมการคือ

$$\dot{q}_{conv} = A_s h (T_s - T_\infty)$$

โดย \dot{q}_{conv} คือ อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]

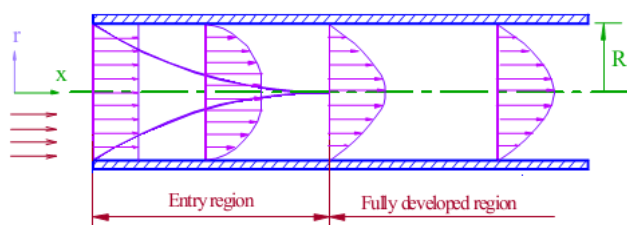


รูปที่ 3 - 4 การกระจายตัวของความเร็ว และ อุณหภูมิของของไหลที่ไหลบนแผ่นเรียบ
(พงษ์ธร จริญญาการณ์, สไลด์[11])

3.2.7.2 การพาความร้อนแบบบังคับภายใน (Internal Forced Convection)

เมื่อของไหลไหลเข้าสู่ท่อด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอที่ทางเข้าท่อ เมื่อของไหลไหลไปตามท่อการกระจายตัวของความเร็วจะมีการเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอิทธิพลของความหนืด และการเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นเรื่อยๆจนถึงระยะหนึ่ง การเปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ทำให้การกระจายตัวของความเร็วไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามแนวแกนของการไหล และ หากพิจารณารูปที่ 3 - 5 จะพบการไหลภายในท่อจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ

1. บริเวณทางเข้า (Entry Region) ซึ่งเป็นบริเวณที่การกระจายตัวของความเร็วมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะครอบคลุมตั้งแต่ปากทางเข้าท่อไปถึงจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างสมบูรณ์
2. ช่วงการพัฒนาอย่างเต็มที่ (Fully Developed Region) ซึ่งเป็นบริเวณที่อยู่ห่างจากบริเวณทางเข้า โดยการกระจายตัวของความเร็วจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป



รูปที่ 3 - 5 การกระจายตัวของความเร็วของการไหลภายในท่อ (พงษ์ธร จรรย์ญาณกรณ์, สไลด์[11])

สำหรับการไหลภายในท่อ ตัวเลขเรย์โนลด์สามารถหาได้จากสมการ ดังนี้

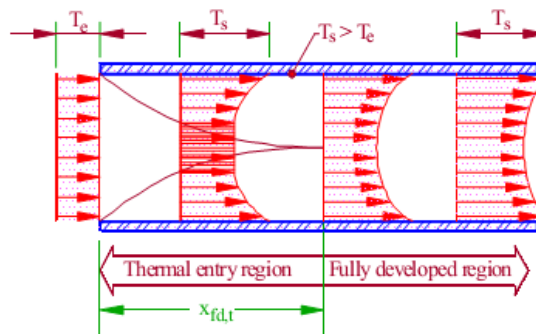
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.8)$$

การไหลภายในท่อจะมีลักษณะเป็นการไหลแบบราบเรียบเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ มีค่าน้อยกว่า 2300 และ จะเป็นการไหลแบบปั่นป่วนเมื่อตัวเลขเรย์โนลด์ มีค่ามากกว่า 2300

หากพิจารณาในส่วนของอุณหภูมิจะพบว่าเมื่อของไหลที่มีอุณหภูมิสม่ำเสมอไหลเข้าท่อที่มีอุณหภูมิพื้นผิวแตกต่างจากของไหล การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจะมีลักษณะคล้ายการ

เปลี่ยนแปลงความเร็ว ดังแสดงในรูปที่ 3 - 6 กล่าวคือ สามารถแบ่งช่วงของการกระจายของอุณหภูมิ ออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่

1. อุณหภูมิบริเวณทางเข้า (Thermal Entry Region) เป็นช่วงการไหลที่การกระจายตัวของอุณหภูมิมิมีการเปลี่ยนรูป
2. ช่วงที่อุณหภูมิมิมีการพัฒนาอย่างเต็มที่ (Thermally Fully Developed) เป็นสภาวะที่การกระจายตัวของอุณหภูมิมิมีการเปลี่ยนแปลงเต็มที่แล้ว



รูปที่ 3 - 6 การกระจายตัวของอุณหภูมิของการไหลภายในท่อ (พงษ์ธร จรรย์ญาณ, สไลด์[11])

ในการหาอุณหภูมิเฉลี่ย (T_m) ในการไหลนั้น สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 3.9 โดยสมการจะสามารถใช้ในกรณีของไหลที่มีการไหลแบบอัดตัวไม่ได้, เป็นการไหลในท่อทรงกระบอก และมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific Heat Capacity) ที่คงที่

$$T_m = \frac{2}{v_m r_o^2} \int_0^{r_o} v T r dr \quad (3.9)$$

สามารถหาปริมาณอัตราการพาความร้อนได้โดยใช้สมการ Newton's Law of Cooling ซึ่งมีรูปแบบสมการคือ

$$\dot{q}_{conv} = A_s h (T_s - T_m)$$

สำหรับการไหลแบบราบเรียบในท่อทรงกระบอก ค่าตัวเลขนัสเซลส์จะถูกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี คือ

1. เมื่อฟังก์ชันของความร้อนที่พื้นผิวคงที่ ตัวเลขนัสเซลส์หาได้จากสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} = 4.36 \quad (3.10)$$

2. เมื่ออุณหภูมิของพื้นผิวมีค่าคงที่ ตัวเลขเลขนัสเซลส์หาได้จากสมการ

$$Nu = 3.66 \quad (3.11)$$

สำหรับการไหลแบบปั่นป่วนในท่อทรงกระบอก จะมีสมการที่ใช้ในการหาค่าตัวเลขนัสเซลส์ คือ สมการกนิลินสกี (Gnielinski[17]) มีรูปแบบสมการ

$$Nu_{sm} = \frac{(f_{sm}/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_{sm}/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} (1 + (D/L)^{2/3}) \quad (3.12)$$

โดย f_{sm} คือ ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ
 Pr คือ ตัวเลขพรันเทิลด์
 Nu_{sm} คือ ตัวเลขนัสเซลส์สำหรับท่อเรียบ

โดยสมการที่ 3.12 มีข้อจำกัดการใช้งาน ดังนี้

ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน จะใช้สำหรับท่อเรียบ

$$f_{sm} = (0.79 \log Re - 1.64)^{-2}$$

T_s คงที่ และ q'' คงที่

$$0.5 < Pr < 2,000$$

$$3000 < Re < 5 \times 10^6$$

คุณสมบัติของไหลหาที่อุณหภูมิเฉลี่ย

เนื่องจากสมการที่ 3.12 เป็นสมการที่ใช้สำหรับการไหลในท่อเรียบ ดังนั้น เพื่อให้สมการสอดคล้องกับสภาพปัญหาการไหลที่ผนังท่อมีความขรุขระ จึงอาศัยสมการของนอร์ริส (Norris) เพื่อทำการปรับแก้ค่าตัวเลขนัสเซลส์

$$\frac{Nu}{Nu_{sm}} = \left(\frac{f}{f_{sm}}\right)^n \quad (3.13)$$

โดย f คือ ค่า Friction Factor สามารถหาได้จากสมการของ Haaland[18]

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} \quad (3.14)$$

โดยสมการของนอร์สตัน มีเงื่อนไขการใช้งาน คือ $\frac{f}{f_{sm}} \leq 4$

และ $n = 0.68Pr^{0.215}$ เมื่อ $Pr < 6$

$n = 1$ เมื่อ $Pr > 6$

หากค่า f/f_{sm} มีค่ามากกว่า 4 ตัวเลขนัสเซลส์จะไม่ได้รับผลกระทบจากความขรุขระ

3.2.8 การพาความร้อนแบบอิสระ (Free Convection)

การพาความร้อนแบบอิสระ หรือ แบบธรรมชาติ คือ การเคลื่อนที่ของความร้อนระหว่างผิวของแข็ง และ ของไหล โดยไม่มีกลไกภายนอกที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ แต่การเคลื่อนที่จะเกิดจากแรงลอยตัวของของไหล ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความหนาแน่น อันเป็นผลมาจากความแตกต่างของอุณหภูมิในชั้นของของไหล

3.2.8.1 การพาความร้อนแบบอิสระภายนอก

การพาความร้อนแบบอิสระภายนอกจะอาศัยสมการที่ได้จากการทดลอง โดยมีรูปสมการทั่วไป คือ

$$Nu = \frac{hL}{k} = CRa_L^n \quad (3.15)$$

โดยทั่วไปค่า n ที่ปรากฏในสมการ 3.15 จะมีค่า $n = 1/4$ และ $1/3$ เมื่อการไหลเป็นการไหลแบบราบเรียบ และ แบบปั่นป่วนตามลำดับ และ สมบัติต่างๆของของไหลประมาณที่อุณหภูมิฟิล์ม (Film Temperature) $T_f = (T_s + T_\infty)/2$

การพาความร้อนแบบอิสระภายนอกมีสมการสำหรับวิเคราะห์หาตัวเลขนัสเซลส์ที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของพื้นผิวที่มีการถ่ายเทความร้อน โดยสามารถแบ่งได้เป็น

1. แผ่นเรียบวางตัวในแนวตั้ง (Vertical Plate)

มีสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาตัวเลขนัสเซลส์ ดังนี้

สมการเซอร์ซิล และ ชู (Churchill and Chu) มีรูปแบบสมการ คือ

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1+(0.429/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.16)$$

ในกรณีที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบ จะใช้สมการที่ 3.17 ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่าสมการของเซอร์ซิล และ ชู โดยมีรูปแบบของสมการ คือ

$$Nu = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{[1+(0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (3.17)$$

โดยสมการมีข้อจำกัด คือ $Ra \leq 10^9$

2. แผ่นเรียบที่วางตัวในแนวนอน (Horizontal Plates)

สมการที่ใช้หาตัวเลขนัสเซลส์สำหรับแผ่นเรียบที่วางตัวในแนวนอนจะแบ่งเป็น 2 กรณี

- ผิวด้านบนเป็นผิวร้อน หรือ ผิวด้านล่างเป็นผิวเย็น ซึ่งมีสมการ คือ

$$Nu = 0.54Ra^{1/4} \quad (3.18)$$

เมื่อ $10^4 \leq Ra \leq 10^7$

หรือ สมการ

$$Nu = 0.15Ra^{1/3} \quad (3.19)$$

เมื่อ $10^7 \leq Ra \leq 10^{11}$

- ผิวด้านล่างเป็นผิวร้อน หรือ ผิวด้านบนเป็นผิวเย็น ซึ่งมีสมการ คือ

$$Nu = 0.27Ra^{1/4} \quad (3.20)$$

เมื่อ $10^5 \leq Ra \leq 10^{10}$

3. ทรงกระบอกวางตัวในแนวราบ

สมการที่ใช้หาตัวเลขนัสเซลส์สำหรับการพาความร้อนแบบอิสระผ่านทรงกระบอกวางตัวในแนวราบมีค่อนข้างมาก โดยมอร์แกน (Morgan)[17] ได้สรุปความสัมพันธ์ต่างๆไว้ ดังสมการ

$$Nu = \frac{hD}{k} = CRa^n \quad (3.21)$$

โดยค่าคงตัว C และ n สามารถหาได้จากตาราง 3-1

ตารางที่ 3 - 1 แสดงค่าคงตัวในสมการ 3.21

Ra	C	n
$10^{-10} - 10^{-2}$	0.675	0.058
$10^{-2} - 10^2$	1.02	0.148
$10^2 - 10^4$	0.850	0.188
$10^4 - 10^7$	0.480	0.250
$10^7 - 10^{12}$	0.125	0.333

สมการของเซอร์ซิล และ ชู[17] ซึ่งครอบคลุมตัวเลขเรย์ลีในช่วงกว้าง มีสมการคือ

$$Nu = \left\{ 0.60 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1+(0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.22)$$

โดยสมการมีข้อจำกัดการใช้งาน คือ $Ra \leq 10^{12}$

4. ทรงกลม

สมการที่ใช้หาตัวเลขนัสเซลส์ของการพาความร้อนแบบอิสระผ่านทรงกลมจะสามารถใช้สมการของเซอร์ซิล และ ชู ได้เมื่อตัวเลขเรย์ลีมีค่า $Ra \leq 10^{12}$ และ ในกรณีที่ของไหลมีค่าตัวเลข พรันเทิลด์ $Pr \geq 0.7$ และ $Ra \leq 10^{11}$ จะใช้สมการที่ 3.23 ในการวิเคราะห์หาตัวเลขนัสเซลส์

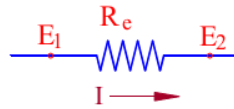
$$Nu = 2 + \frac{0.589Ra^{1/4}}{[1+(0.469/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (3.23)$$

3.3 ความต้านทานเชิงความร้อน (Thermal Resistance)

การนำความร้อนในตัวกลางใดๆ สามารถพิจารณาได้โดยการเปรียบเทียบให้มีลักษณะเช่นเดียวกับการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทาน ดังรูปที่ 3 - 7 ซึ่งการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทานสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการ ดังนี้

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_e}$$

โดย	I	คือ	ปริมาณกระแสไฟฟ้า [A]
	E_1, E_2	คือ	ศักย์ไฟฟ้าจุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับ [V]
	R_e	คือ	ความต้านทานทางไฟฟ้า [Ω]



รูปที่ 3 - 7 แสดงการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านตัวต้านทาน

สำหรับอัตราการถ่ายเทปริมาณใดๆ สามารถเขียนสมการในรูปทั่วไปได้เป็น

$$\text{Transfer Rate} = \frac{\text{Driving Potential}}{\text{Resistance}}$$

โดยสำหรับการถ่ายเทความร้อนสามารถเขียนได้เป็น

$$\dot{q}_x = \frac{\Delta T}{R}$$

โดย ΔT คือ ผลต่างของอุณหภูมิ [K]

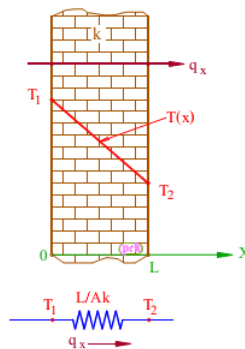
R คือ ความต้านทานเชิงความร้อน [K/W]

หากพิจารณารูปที่ 3 - 8 การนำความร้อนนั้นสามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$\dot{q}_x = \frac{T_1 - T_2}{(L/Ak)} \quad (3.24)$$

โดยจะเห็นได้ว่าในกรณีที่เป็นการนำความร้อนผ่านผนัง ความต้านทานเชิงความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R_{cond} = L/Ak$$



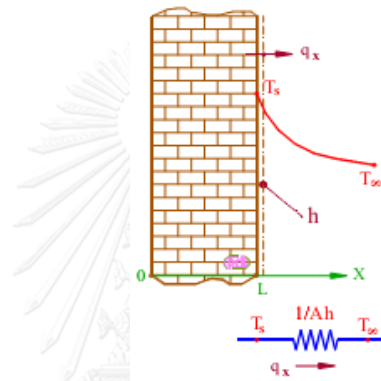
รูปที่ 3 - 8 แสดงการนำความร้อนผ่านผนัง (พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์, สไลด์[11])

สำหรับการพาความร้อนสามารถพิจารณาได้ในลักษณะเดียวกับการนำความร้อน โดยมีลักษณะแสดง ดังรูปที่ 3 - 9 และ มีสมการคือ

$$\dot{q}_x = \frac{T_s - T_\infty}{1/Ah} \quad (3.25)$$

ความต้านทานเชิงความร้อนสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R_{conv} = 1/Ah$$



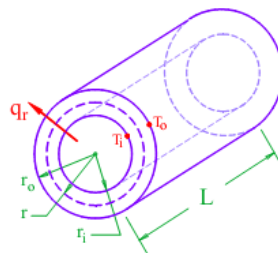
รูปที่ 3 - 9 แสดงการพาความร้อนที่พื้นผิวของผนัง (พงษ์ธร จริญญากรณ์,สไลด์[11])

สำหรับการถ่ายเทความร้อนตามแนวรัศมี ดังรูปที่ 3 - 10 และ จากสมการที่ 3.3 จะสามารถจัดรูปสมการได้เป็น

$$\dot{q}_r = 2\pi Lk \frac{T_o - T_i}{\ln(r_o/r_i)} \quad (3.26)$$

ความต้านทานเชิงความร้อนจะสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R_{cyl} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk} \quad (3.27)$$



รูปที่ 3 - 10 แสดงการนำความร้อนผ่านพื้นผิวทรงกระบอก (พงษ์ธร จริญญากรณ์,สไลด์[11])

3.3.1 การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังหลายชั้น

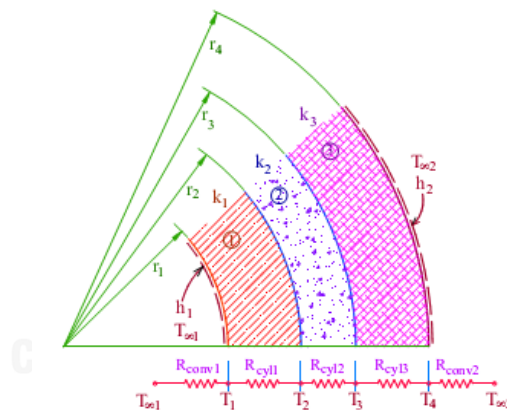
ในกรณีที่เป็นการถ่ายเทความร้อนผ่านทรงกระบอกหลายชั้นจะพิจารณาให้แต่ละชั้นมีลักษณะเป็นความต้านทานที่ต่ออนุกรมกัน ดังนั้น จากรูปที่ 3 - 11 ความต้านทานเชิงความร้อนรวมสามารถเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$R_{tot} = R_{conv,1} + R_{cond,1} + R_{cond,2} + R_{conv,2} \quad (3.28)$$

โดย R_{tot} คือ ความต้านทานเชิงความร้อนรวม [K/W]

และ สมการการถ่ายเทความร้อนมีรูปแบบ คือ

$$\dot{q}_{tot} = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{tot}} \quad (3.29)$$



รูปที่ 3 - 11 แสดงการถ่ายเทความร้อนผ่านพื้นผิวทรงกระบอกหลายชั้น (พงษ์ธร จริญญากรณ์,สไลด์[11])

3.4 การเพิ่มขึ้น หรือ การลดของอุณหภูมิขาออกของท่อลม

อิทธิพลของความร้อนที่ถ่ายเทผ่านผนังท่อที่ย่อมส่งผลกระทบต่ออุณหภูมิภายในท่อลม โดย จาก Shan K. Wang, Handbook of Air Conditioning and Refrigeration (USA. : McGraw-Hill,2001)[12] ได้สร้างสมการหาอุณหภูมิขาออกจากท่อลมที่มีการถ่ายเทความร้อนไว้ ดังนี้

1. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อลมสามารถคำนวณได้ด้วยสมการ 3.30

$$\dot{q}_D = \frac{T_{\infty,o} - \left(\frac{T_{en} + T_{lv}}{2}\right)}{R_{tot}} \quad (3.30)$$

โดย T_{en} คือ อุณหภูมิขาเข้าท่อลม [K]
 T_{lv} คือ อุณหภูมิขาออกจากท่อลม [K]
 $T_{\infty,o}$ คือ อุณหภูมิของอากาศภายนอกท่อลม [K]

2. อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อทำให้ของไหลภายในท่อได้รับความร้อน หรือสูญเสียความร้อนและอุณหภูมิเปลี่ยนไปตามสมการ 3.31

$$\dot{q}_D = \rho \frac{\pi D^2}{4} v c_p (T_{lv} - T_{en}) \quad (3.31)$$

3. นำสมการที่ 3.30 แทนค่าลงในสมการ 3.31

$$\frac{T_{\infty,o} - \left(\frac{T_{en} + T_{lv}}{2}\right)}{R_{tot}} = \rho \frac{\pi D^2}{4} v c_p (T_{lv} - T_{en})$$

และ จัดรูปสมการจะได้สมการที่ 3.32

$$T_{lv} = \frac{2T_{\infty,o} + T_{en}(y-1)}{y+1} \quad (3.32)$$

โดย $y = 2R_{tot}\rho\pi\frac{D^2}{4}c_p v$

3.5 สมการการไหลแบบต่อเนื่อง

สมการการไหลแบบต่อเนื่องเป็นสมการที่แสดงถึงกฎการอนุรักษ์มวลในการไหล โดยสมการการไหลแบบต่อเนื่องที่สภาวะคงตัวมีรูปแบบตามสมการที่ 3.33 ซึ่งเป็นสมการที่แสดง

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของอากาศ (ρ) ความเร็วของการไหล (v) และ พื้นที่หน้าตัด การไหล (A)

$$\begin{aligned}\int \rho v \cdot dA &= 0 \\ \rho A_i v_i - \rho A_j v_j &= 0 \\ \rho A_i v_i &= \rho A_j v_j\end{aligned}\quad (3.33)$$

โดย ρAv นั้นมีค่าเท่ากับอัตราการไหลเชิงมวล (\dot{m}) หรือ $\rho Av = \dot{m}$ สมการที่ 3.33 จึงจัดรูปได้เป็น

$$\dot{m} = \rho A_i v_i = \rho A_j v_j$$

โดย A_i, A_j คือ พื้นที่หน้าตัด ณ ตำแหน่ง i และ j ตามลำดับ [m²]

v_i, v_j คือ อัตราเร็วของการไหล ณ ตำแหน่ง i และ j ตามลำดับ [m/s]

3.6 สมการพลังงานของการไหลภายในท่อ

จากรูปแบบการกระจายตัวของความเร็วในรูปที่ 3 - 5 จะพบว่าความเร็วที่บริเวณ ศูนย์กลางท่อจะมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับบริเวณอื่น และ ความเร็วที่ผนังท่อจะมีค่าเป็นศูนย์เนื่องจาก อิทธิพลความเค้นเฉือนที่ผนัง (Wall Shear Stress) และ อิทธิพลของความเค้นเฉือนก่อให้เกิดการ สูญเสียพลังงานในการไหล ซึ่งในการหาขนาดพลังงานที่สูญเสียนี้ สามารถหาได้โดยอาศัยสมการ พลังงาน ซึ่งมีรูปแบบดังนี้

$$\frac{\partial}{\partial t} \int e \rho dV + \int \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz \right) \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = \dot{q} - \dot{W}_s - \dot{W}_{shear} - \dot{W}_{other}$$

โดย	P	คือ	ความดันสถิตของของไหลภายในท่อ [Pa]
	\vec{v}	คือ	ความเร็วของการไหล [m/s]
	g	คือ	ความเร่งจากแรงโน้มถ่วง [m/s ²]
	z	คือ	ระดับความสูงของการไหล [m]
	\vec{A}	คือ	เวกเตอร์แนวฉากของพื้นที่หน้าตัด [m ²]
	e	คือ	พลังงานรวมของของไหลในระบบ [J/kg]
	u	คือ	พลังงานภายในของของไหล [J/kg]
	\dot{q}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]

\dot{W}_s	คือ	อัตราของงานที่ถ่ายเทจากเพลลา [W]
\dot{W}_{shear}	คือ	อัตราของงานจากความเค้นเฉือน [W]
\dot{W}_{other}	คือ	อัตราของงานจากแหล่งอื่นๆ [W]

จากสมการข้างต้นหากพิจารณาร่วมกับสมมติฐานว่า

1. ไม่มีงานจากแหล่งอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง
2. เป็นการไหลที่สภาวะคงตัว
3. เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้
4. พลังงานภายใน และความดันมีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

จะสามารถลดรูปของสมการได้เป็น

$$\left(u + \frac{P}{\rho} + gz\right) \dot{m}_{outlet} - \left(u + \frac{P}{\rho} + gz\right) \dot{m}_{inlet} + \left(\int \frac{\rho v^2}{2} v dA\right)_{outlet} - \left(\int \frac{\rho v^2}{2} v dA\right)_{inlet} = \dot{q} - \dot{W}_{shear}$$

จากสมการข้างต้นสามารถเขียนในรูปแบบที่ง่ายขึ้นได้เป็น

$$\dot{q} - \dot{W}_{shear} = \dot{m}(u_2 - u_1) + \dot{m}\left(\frac{P_2}{\rho} - \frac{P_1}{\rho}\right) + \dot{m}g(z_2 - z_1) + \dot{m}\left(\frac{\alpha_2 v_2^2}{2} - \frac{\alpha_1 v_1^2}{2}\right)$$

หากหารสมการข้างต้นด้วยอัตราการไหลเชิงมวล และ จัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + gz_2\right) = (u_2 - u_1) - \frac{d\dot{q}}{dm} + \frac{\dot{W}_{shear}}{\dot{m}} \quad (3.34)$$

โดยค่า สัมประสิทธิ์พลังงานจลน์ (Kinetic Energy Coefficient, α) ในกรณีที่มีการไหลเป็นแบบราบเรียบจะมีค่า เท่ากับ 2 และ กรณีที่มีการไหลเป็นแบบปั่นป่วนจะมีค่าประมาณ 1 และ จากสมการที่ 3.34 จะสังเกตได้ว่าพจน์ทางขวามือของสมการ จะมีขนาดเท่ากับการสูญเสียพลังงาน

กลที่เกิดขึ้น ดังนั้น หากรวมพจน์ทางขวาให้อยู่ในรูปพลังงานที่สูญเสียต่อหน่วยมวล จะสามารถเขียนสมการได้เป็น

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + gz_1\right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + gz_2\right) = h_{lt} \quad (3.35)$$

ในการคำนวณค่าพลังงานกลสูญเสีย (Head Loss) จะแบ่งการสูญเสียออกเป็น 2 ส่วนได้แก่

1. การสูญเสียหลัก (Major Losses, h_l) ซึ่งจะถูกแบ่งการพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ

1.1 การไหลแบบราบเรียบ จะใช้สมการที่ 3.36 ในการคำนวณหาการสูญเสียหลัก

$$h_l = \left(\frac{64}{Re}\right) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \quad (3.36)$$

1.2 การไหลแบบปั่นป่วน จะใช้สมการที่ 3.37 ในการคำนวณหาการสูญเสียหลัก

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2} \quad (3.37)$$

โดย f คือ ค่า Friction Factor สามารถหาได้จากสมการของ Haaland

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2}$$

2. การสูญเสียรอง (Minor Losses, h_{lm}) คือ การสูญเสียพลังงานที่บริเวณข้อต่อ, ข้องอ หรือ บริเวณที่มีการเปลี่ยนพื้นที่การไหล โดยการสูญเสียรองมีสมการที่ใช้ในการคำนวณ คือ

$$h_{lm} = C \frac{v^2}{2} \quad (3.38)$$

โดย C คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง

3.7 สมการสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง

3.7.1 สมการสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลจากท่อหลักไปท่อสาขา และจากท่อหลักไปท่อหลัก

การไหลจากท่อหลักไปท่อสาขา (c ไป b) โดยมีมุมของท่อสาขามีค่า 90 องศา และอัตราส่วนของ $r/w_b = 1$ ดังแสดงในรูปที่ 3 - 12 ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองสามารถหาได้โดยใช้สมการของ Idelchik, I.E.[13] ซึ่งเป็นสมการที่ ASHARE ใช้อ้างอิง ซึ่งมีรูปแบบตามสมการที่ 3.39

$$C_{c-b} = A' \left[0.34 + \left(\frac{v_b}{v_c} \right)^2 \right] \quad (3.39)$$

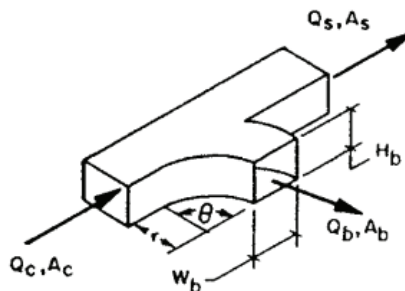
เมื่อ	v_c	คือ	ความเร็วในท่อหลัก [m/s]
	v_b	คือ	ความเร็วในท่อสาขา [m/s]
	C_{c-b}	คือ	สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลจากท่อหลักไปท่อสาขา

จากสมการที่ 3.39 ค่าสัมประสิทธิ์ A' มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $v_b/v_c \leq 0.8$ และ A' มีค่าเท่ากับ 0.9 เมื่อ $v_b/v_c > 0.8$ และ สมการที่ 3.39 จะใช้สำหรับการไหลที่มีอัตราส่วนของ $r/w_b = 1$

สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลจากท่อหลักไปท่อหลัก (c ไป s) ดังแสดงในรูปที่ 3 - 12 สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 3.40

$$C_{c-s} = 0.4 \left(1 - \frac{v_s}{v_c} \right)^2 \quad (3.40)$$

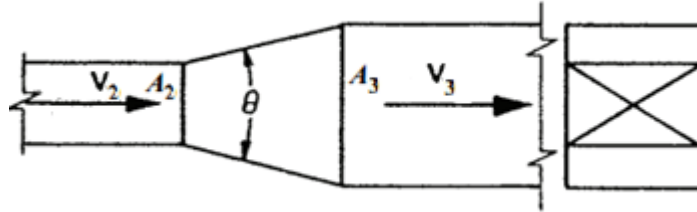
เมื่อ	C_{c-s}	คือ	สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลจากท่อหลักไปท่อหลัก
	v_c	คือ	ความเร็วในท่อหลัก [m/s]
	v_s	คือ	ความเร็วในท่อหลักที่อนัดจากท่อ c [m/s]



รูปที่ 3 - 12 แสดงลักษณะการไหลจากท่อหลักไปท่อสาขา และ จากท่อหลักไปท่อหลัก (Idelchik, I.E. 1960[13])

3.7.2 สมการสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลผ่านข้อต่อแบบขยาย

สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลผ่านข้อต่อแบบขยายดังแสดงในรูปที่ 3 - 13 สามารถหาได้โดยใช้ตารางที่ 3 - 2



รูปที่ 3 - 13 แสดงการไหลผ่านข้อต่อแบบขยาย (ASHRAE Handbook,2009[14])

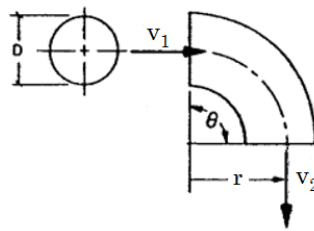
ตารางที่ 3 - 2 สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองของการไหลผ่านข้อต่อแบบขยาย (ASHRAE Handbook,2009[14])

A_2/A_3	C_o									
	θ , degrees									
	10	15	20	30	45	60	90	120	150	180
0.06	0.26	0.27	0.40	0.56	0.71	0.86	1.00	0.99	0.98	0.98
0.1	0.24	0.26	0.36	0.53	0.69	0.82	0.93	0.93	0.92	0.91
0.25	0.17	0.19	0.22	0.42	0.60	0.68	0.70	0.69	0.67	0.66
0.5	0.14	0.13	0.15	0.24	0.35	0.37	0.38	0.37	0.36	0.35
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

3.7.3 สมการสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลผ่านข้อต่อ

สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองที่เกิดจากการไหลผ่านข้อต่อดังแสดงในรูปที่ 3 - 14 สามารถหาได้โดยใช้สมการที่ 3.41 และ ตารางที่ 3 - 3 และ 3 - 4

$$C_{1-2} = KC'_o \quad (3.41)$$



รูปที่ 3 - 14 แสดงการไหลผ่านข้องอ (ASHRAE Handbook, 2009[14])

ตารางที่ 3 - 3 ค่า C'_o สำหรับการไหลผ่านข้องอ (ASHRAE Handbook, 2009[14])

Coefficients for 90° Elbows						
r/D	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5
C'_o	0.71	0.33	0.22	0.15	0.13	0.12

ตารางที่ 3 - 4 ค่า K สำหรับการไหลผ่านข้องอ (ASHRAE Handbook, 2009[14])

θ , degrees	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
K_θ	0	0.31	0.45	0.60	0.78	0.90	1.00	1.13	1.20	1.28	1.40

3.8 อัตราการไหลผ่านช่องเปิด

ในการพิจารณาการไหลผ่านช่องเปิดรูปทรงต่างๆ พบว่าอัตราการไหลผ่านช่องเปิดนั้นจะขึ้นอยู่กับความดันสถิตที่ตกคร่อมบริเวณช่องเปิด พื้นที่หน้าตัดช่องเปิด และ รูปร่างของช่องเปิด โดยสามารถหาความสัมพันธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดได้จากสมการ 3.42

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2P_{gs}}{\rho}} \quad (3.42)$$

โดย C_d คือ สัมประสิทธิ์การจ่ายมีค่าประมาณ 0.5 (อ้างอิงงานวิจัย การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ, ณัฐวุฒิ วลัยกนก, 2544[15])

A คือ พื้นที่หน้าตัดช่องเปิด [m^2]

P_s คือ ความดันสถิตตกคร่อมช่องเปิด [Pa]

3.9 ระยะการส่งลม

ในการออกแบบระบบปรับอากาศจำเป็นต้องคำนึงถึงความเร็วปลายทางของลมที่ออกจากหัวจ่ายที่เหมาะสม โดยความเร็วที่เหมาะสมมีค่าอยู่ในช่วง 50 fpm ถึง 150 fpm และ จากงานวิจัยของ Schlichting[16] จะสามารถจัดรูปสมการระยะส่งลมผ่านช่องสี่เหลี่ยมได้เป็นสมการ 3.43

$$T_{50} = \frac{0.187}{v_T^2} \sqrt{Q_2 \bar{C}_d^3 \sqrt{\left(\frac{2P_{gs,2}}{\rho}\right)^3}} \quad (3.43)$$

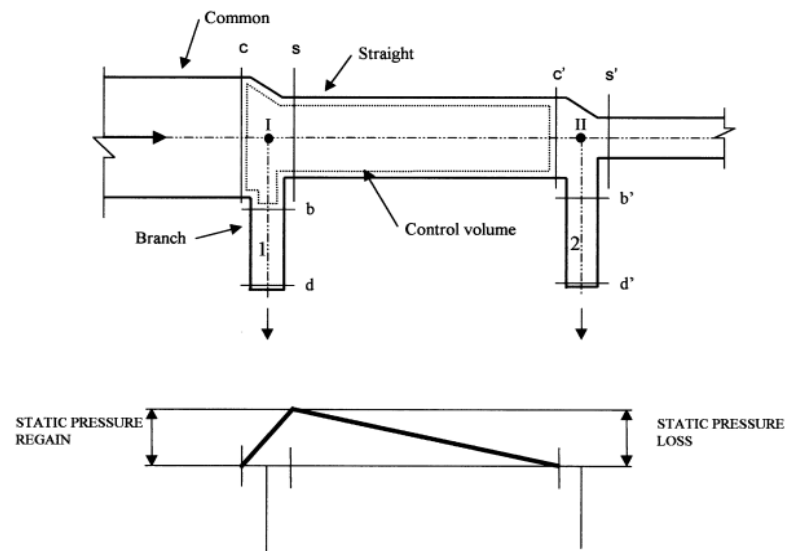
โดย	T_{50}	คือ	ระยะส่งลมเฉลี่ย [m] ที่ความเร็วปลายทาง 50 FPM
	v_T	คือ	ความเร็วปลายทางที่บริเวณปรับอากาศ (50 FPM หรือ 0.25 m/s)
	\bar{C}_d	คือ	สัมประสิทธิ์การจ่าย
	$P_{gs,2}$	คือ	ความดันเกจสถิตที่คร่อมหัวจ่าย [Pa]

3.10 การออกแบบท่อลมด้วยวิธี Static Regain

การออกแบบด้วยวิธี Static Regain มีหลักการที่สำคัญ คือ ต้องเลือกขนาดของท่อลมที่พิจารณาอยู่ให้เหมาะสมเพื่อเพิ่มความดันสถิตให้สามารถเอาชนะความดันลดยที่เกิดขึ้นในท่อส่วนที่พิจารณาอยู่ได้ และ ต้องรักษาความดันสถิตที่จุดแยกในบริเวณต่างๆของท่อลมให้เท่ากันตลอด ดังแสดงในรูปที่ 2-10 จากรูปพบว่าความดันสถิตถูกทำให้เพิ่มขึ้นโดยการลดความเร็วของลมภายในท่อ หรือ ลดความดันพลศาสตร์ของลม โดยการออกแบบด้วยวิธีนี้ได้อาศัยสมการที่ 3.44

$$\Delta P = R \frac{\rho}{2} (v_i^2 - v_{i+1}^2) \quad (3.44)$$

ค่า	R	คือ	ค่า Regain Factor
	v_i, v_{i+1}	คือ	อัตราเร็วของลมในท่อส่วนที่ i และ $i + 1$ ตามลำดับ [m/s]



รูปที่ 2-10 แสดงความดันสถิตที่เพิ่มขึ้น และ ความดันสถิตที่ลดลงตามเส้นทางไหล c-s-c'
(E.H Mathews, D.T. Claassen ,1999[9])

โดยสมการที่ 3.44 มีที่มาจากสมการพลังงาน ซึ่งมีรูปสมการ คือ

$$\left(P_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g z_1 \right) - \left(P_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g z_2 \right) = \Delta P$$

เมื่อการไหลอยู่ในระดับเดียวกัน ($\rho g z_1 = \rho g z_2$) และ จากรูปที่ 2-10 ความดันสถิตแต่ละจุดแยกมีค่าเท่ากัน จะได้สมการในรูปแบบใหม่ คือ

$$\rho \frac{v_c^2}{2} - \rho \frac{v_s^2}{2} = \Delta P$$

$$\rho \left(\frac{v_c^2}{2} - \frac{v_s^2}{2} \right) = \Delta P$$

แต่เนื่องจากในกระบวนการเปลี่ยนความดันพลศาสตร์เป็นความดันสถิต จะมีความดันที่สูญเสียไปเนื่องจากความเสียดทานภายในท่อ และ กระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนขนาดท่อ โดยค่า Regain Factor, R จะถูกคูณเข้าไปกับพจน์ผลต่างของความดันพลศาสตร์ ดังแสดงในสมการ 3.44 และ ค่า Regain Factor เป็นค่าที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมักถูกกำหนดให้เป็นค่าคงที่ และ แต่ละองค์กรนั้นได้กำหนดค่า Regain Factor ไว้แตกต่างกัน เช่น จาก Carrier's System Design Manual แนะนำ Regain Factor = 0.75 , จาก ASHARE[14] แนะนำ Regain Factor = 0.75 ,

จาก Shan K. Wang, Handbook of Air Condition and Refrigeration [12] แนะนำ Regain Factor = 0.5 ถึง 0.8

โดยค่า ΔP ที่ปรากฏในสมการ 3.44 นั้น คือ พจน์ที่แสดงความดันลดจากการสูญเสียหลัก และ ความดันสูญเสียรอง โดย ΔP มีค่าตามสมการที่ 3.45

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho f_s \frac{L_s}{D_s} v_s^2 + \frac{1}{2} \rho C_s v_s^2 \quad (3.45)$$

โดย C คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง

D คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่พิจารณาอยู่ และ จากสมการ

$$Q = Av \text{ จะจัดรูปเส้นผ่านศูนย์กลางได้เป็น } D = \sqrt{\frac{4Q}{v_s \pi}}$$

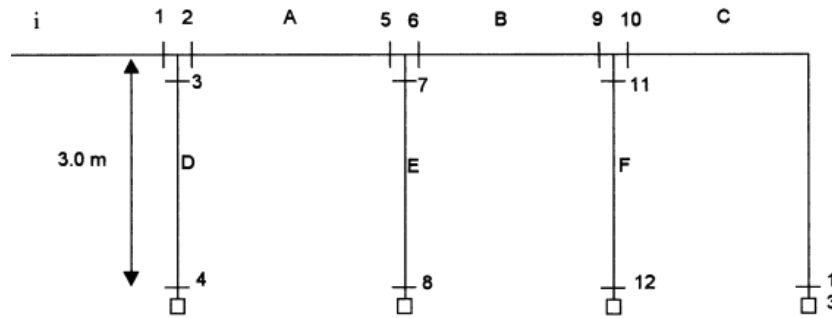
เมื่อแทนค่า ΔP และ D ลงในสมการที่ 3.44 จะได้สมการที่ 3.46

$$R \frac{\rho}{2} (v_c^2 - v_s^2) = \frac{1}{2} \rho f_s L_s \sqrt{\frac{v_s \pi}{4Q}} v_s^2 + \frac{1}{2} \rho C_s v_s^2 \quad (3.46)$$

สำหรับขั้นตอนการออกแบบ เริ่มต้นจากการกำหนดความเร็วในท่อนแรก จากนั้นใช้สมการที่ 3.44 และ ใช้กระบวนการทำซ้ำ โดยขั้นตอนการทำซ้ำนั้น จากงานวิจัยของ E.H. Mathew and D.T. Claassen ,1999[9] ได้ยกตัวอย่างอย่างกระบวนการทำซ้ำเพื่อหาขนาดท่อ A, B และ C โดยใช้แบบท่อลมจากรูปที่ 3-15 และ จัดรูปสมการที่ 3.46 ใหม่เพื่อนำไปใช้ในการทำซ้ำซึ่งจะได้สมการที่ 3.47

$$\frac{1}{2} \rho f_s L_s \sqrt{\frac{v_s \pi}{4Q}} v_s^2 + \frac{1}{2} \rho C_s v_s^2 - R \frac{\rho}{2} (v_c^2 - v_s^2) = 0$$

$$d = v_s^2 \left(f_s L_s \sqrt{\frac{v_s \pi}{4Q}} + C_s + R \right) - R v_c^2 = 0 \quad (3.47)$$



รูปที่ 3 - 15 แสดงแบบของท่อลมซึ่งใช้ในงานวิจัยของ (E.H. Mathew and D.T. Claassen ,1999[9])

จากสมการที่ 3.47 เมื่อนำมาประยุกต์ใช้กับท่อ A,B และ C จะได้ สมการที่ 3.48 ถึง 3.50

$$d_1 = v_A^2 \left(f_A L_A \sqrt{\frac{v_A \pi}{4Q_A}} + C_A + R \right) - R v_i^2 = 0 \quad (3.48)$$

$$d_2 = v_B^2 \left(f_B L_B \sqrt{\frac{v_B \pi}{4Q_B}} + C_B + R \right) - R v_A^2 = 0 \quad (3.49)$$

$$d_3 = v_C^2 \left(f_C L_C \sqrt{\frac{v_C \pi}{4Q_C}} + C_C + R \right) - R v_B^2 = 0 \quad (3.50)$$

โดยกระบวนการทำซ้ำจะเริ่มจากการสุ่มเลือกค่า v_A และ จากการสุ่มค่า v_A ทำให้สามารถคำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อได้ เมื่อทราบเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ และ จากการสุ่มค่าความเร็วทำให้ทราบค่า Re และ สามารถใช้ Re ในการคำนวณหา f_A ได้ และ จากการสุ่มค่าความเร็วจึงทำให้สามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองได้ เนื่องจากค่า C_A ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของความเร็ว ดังแสดงในสมการที่ 3.40 และ ค่า R เป็นค่าคงตัว รวมทั้ง Q_A และ L_A เป็นสิ่งที่ทราบค่าตั้งแต่เริ่มการออกแบบ ดังนั้น หากแทนค่าตัวแปรที่กล่าวถึงลงในสมการ 3.48 จะได้ค่า d_1 ออกมา โดยหากค่า v_A ที่ใช้ในการคำนวณถูกต้อง ค่า d_1 จะต้องมามีค่าประมาณศูนย์ แต่หากค่า v_A ที่ใช้ไม่ถูกต้อง จะต้องทำการคำนวณซ้ำโดยลดค่า v_A ลง โดยใช้วิธี Steepest Descent ในการหา Step Size ที่ดีที่สุดในการลดค่า v_A โดยเมื่อได้ค่า v_A ที่ถูกต้อง ก็สามารถนำ v_A ไปแทนค่าลงในสมการที่ 3.49 แล้วดำเนินการคำนวณด้วยวิธีเดียวกันกับสมการ 3.48 และ สุดท้ายเมื่อทราบความเร็วของท่อแต่ละส่วนจะสามารถคำนวณหาขนาดของท่อในแต่ละส่วนได้

3.11 ปริมาตรของอากาศ และ มวลที่รั่วไหลผ่านแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ

ในการหาอัตราการรั่วไหลผ่านบริเวณรอยต่อ และ ตะเข็บนั้น สามารถหาได้จากงานวิจัยของ ASHRAE[14] ซึ่งใช้วิธีหาอัตราการรั่วไหลผ่านบริเวณรอยต่อโดยแบ่งตามระดับการรั่วไหล และ ความดันของลมภายในห้อง (Leakage Class) ดังแสดงในสมการที่ 3.51 และ หากพิจารณาว่าพื้นที่การรั่วไหลตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บเปรียบเสมือนการรั่วไหลผ่านรูหนึ่งรู จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่การรั่วไหลประสิทธิผล กับอัตราการรั่วไหลตามสมการที่ 2.9

$$Q_l = C_l \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} \right)^n \times A_s \quad (3.51)$$

โดย	A_s	คือ	พื้นที่ผิวของห้องลม [m^2]
	ΔP	คือ	ผลต่างของความดันสถิตภายในห้องลมกับความดันบรรยากาศ [Pa]
	Q_l	คือ	อัตราการรั่วไหลของอากาศ [m^3]
	Δp_{ref}	คือ	ความดันอ้างอิงมีค่า 250 Pa
	n	คือ	ตัวเลขยกกำลังมีค่า 0.65

โดยค่าระดับการรั่วไหล (C_l) สามารถหาได้จากตาราง 2 - 2

สมการ 2.9

$$Q_l = ELA \times \sqrt{\frac{2\Delta p_{ref}}{\rho}} \left(\frac{\Delta P}{\Delta P_{ref}} \right)^n$$

3.12 การวิเคราะห์เชิงมิติ

ปรากฏการณ์ของของไหลส่วนมากนั้นมักเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์จำนวนมาก และ มีความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน และ ต้องใช้เวลานาน และ การทดลองจำนวนมากเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านั้น ดังนั้น เพื่อเป็นการลดจำนวนครั้งของการทดลองลง โดยยังสามารถศึกษาความสัมพันธ์ทางกายภาพได้ จึงจำเป็นต้องมีการวิเคราะห์เชิงมิติ (Dimensional Analysis)

3.12.1 ทฤษฎีบท Buckingham Pi

ทฤษฎีบท Buckingham Pi สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงมิติได้โดยการพิจารณาตัวแปรพารามิเตอร์ (q) ที่เกี่ยวข้องกับการไหลทั้งหมดซึ่งมี n ตัว และ สามารถเขียนเป็นสมการอย่างคร่าวๆได้เป็น

$$q_1 = f(q_2, q_3, q_4, \dots, q_n) \quad (3.52)$$

โดยสามารถจัดรูปสมการให้เหมาะกับทฤษฎีบท Buckingham Pi ได้เป็น

$$0 = f(q_1, q_2, q_3, q_4 \dots, q_n) \quad (3.53)$$

ในการระบุความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรทฤษฎีบท Buckingham Pi ได้กำหนดว่า ให้รวมกลุ่มพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องให้อยู่ในรูปไร้มิติ หรือ π โดยความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มพารามิเตอร์จะออกมาอยู่ในรูปของสมการดังนี้

$$0 = f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \dots, \pi_{n-m}) \quad (3.54)$$

จากสมการจะพบว่าทฤษฎีบท Buckingham Pi จะช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ลงไปได้ m ตัว โดย m คือ จำนวนของตัวพารามิเตอร์ซ้ำ (Repeating Parameter) ซึ่งค่าของ m จะเท่ากับขนาดของมิติที่ใหญ่ที่สุดของดีเทอร์มิแนนต์ที่ไม่เท่ากับกับศูนย์จากเมทริกซ์เชิงมิติ (Dimensional Matrix)

โดยขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีบท Buckingham Pi มีขั้นตอน ดังนี้

1. ระบุพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง
2. ระบุมิติปฐมภูมิ เช่น M, L, t, T (Mass-Length-Time-Temperature)
3. แจกแจงมิติของพารามิเตอร์แต่ละตัวให้อยู่ในรูปมิติปฐมภูมิ
4. เลือกเซตพารามิเตอร์ซ้ำ โดยจำนวนพารามิเตอร์ซ้ำทั้งหมด m ตัว โดยจำนวน m หาได้จากมิติที่ใหญ่ที่สุดของดีเทอร์มิแนนต์ที่ไม่เท่ากับกับศูนย์จาก Dimensional Matrix ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น และ ในเซตของพารามิเตอร์ซ้ำต้องมีมิติปฐมภูมิครบทุกตัว โดยมีมิติของตัวแปรซ้ำแต่ละตัวต้องไม่อยู่ในรูปเลขยกกำลังของมิติของตัวแปรซ้ำตัวอื่นๆ เช่น หากเลือกพื้นที่เป็นตัวแปรซ้ำ จะไม่สามารถเลือกโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่เป็นตัวแปรซ้ำได้ เนื่องจากพื้นที่มีมิติ L^2 ส่วนโมเมนต์ความเฉื่อยของพื้นที่มีมิติ L^4 ซึ่งมีมิติเป็นกำลังสองของมิติพื้นที่
5. สร้างกลุ่มพารามิเตอร์ไร้มิติโดยนำพารามิเตอร์ซ้ำที่เลือกไว้ในขั้นที่ 4 มาคูณกัน และ นำกลุ่มพารามิเตอร์ซ้ำที่ได้ไปคูณเข้ากับพารามิเตอร์ที่ไม่ได้เลือกไว้ในขั้นที่ 4 โดยคูณทีละหนึ่งพารามิเตอร์ จากขั้นตอนนี้จะได้กลุ่มพารามิเตอร์จำนวน $n - m$ กลุ่ม (เมื่อ n คือ พารามิเตอร์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้อง) จากนั้นทำให้กลุ่มพารามิเตอร์เป็นกลุ่มไร้มิติ (π_i) ดังสมการ

$$\pi_i = M^0 L^0 t^0 T^0$$

โดย i คือ ลำดับของกลุ่มไร้มิติ ตั้งแต่ 1 ถึง $n-m$

6. ตรวจสอบกลุ่มไร้มิติทั้งหมดจากขั้นตอนที่ 5 ว่าไร้มิติจริงหรือไม่

บทที่ 4

การทดลอง

4.1 กรณีที่ทำการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ จะทำการทดลองทั้งหมด 4 กรณีด้วยกัน โดยที่กรณีที่ 1 ถึง 3 เป็นการทดลอง เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามวัตถุประสงค์ในงานวิจัย ส่วนกรณีที่ 4 เป็นกรณีศึกษาเพิ่มเติมสำหรับแนวทางการวิจัยที่ต่อยอดจากวิจัยนี้ในอนาคต โดยที่ทั้ง 4 กรณีมีดังนี้

กรณีที่ 1 การทดลองเมื่อมีการพ่นไปตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม โดยมีจุดประสงค์ของการทดลอง คือ เพื่อตรวจสอบสมการ Friction Factor ของ Haaland หรือ สมการ 3.14
$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2}$$
 ว่ามีความเหมาะสมในการนำมาใช้กับการไหลภายในท่อลมหรือไม่

โดยการทดลองนี้จะทดลองที่ความถี่ของพัดลมเป็น 80 , 70 , 60 , 50 และ 40 เฮิรตซ์ และ อุณหภูมิของอากาศ 31.7 องศาเซลเซียส หรือ 304.7 เคลวิน

กรณีที่ 2 การทดลองเมื่อไม่มีการพ่นไปตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม โดยมีจุดประสงค์ คือ เพื่อตรวจสอบว่าการรั่วไหลที่เกิดขึ้นกับท่อลมได้ส่งผลกระทบต่อสมการ Friction Factor ที่ได้รับการยืนยันจากการทดลองกรณีที่ 1 หรือไม่ โดยถ้าได้รับผลกระทบจะต้องทำการปรับแก้สมการ Friction Factor เพื่อให้มีความเหมาะสมกับสภาพการไหลที่มีการรั่วตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ

โดยการทดลองนี้จะทดลองที่ความถี่ของพัดลมเป็น 80 , 70 , 60 , 50 และ 40 เฮิรตซ์ และ อุณหภูมิของอากาศ 31.7 องศาเซลเซียส หรือ 304.7 เคลวิน

กรณีที่ 3 การทดลองเมื่อมีการพ่นไปตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม แต่มีการเจาะรูรั่วนาน 3 ม.ม. , 6 ม.ม., 10 ม.ม. และ 14 ม.ม. บริเวณกึ่งกลางของท่อลม

โดยการทดลองมีจุดประสงค์ คือ

1. เพื่อพัฒนาสมการ Friction Factor ในกรณีที่ไม่มีการรั่วไหลตามรอยต่อ และ ตะเข็บ แต่เป็นการรั่วไหลผ่านรู ซึ่งอาจมาจากการสึกกร่อนของท่อลม

2. เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของสมการพื้นที่การรั่วไหลประสิทธิผล (ELA) หรือ สมการ 2.9 ว่าสามารถใช้แทนการรั่วไหลตามแนวรอยต่อ หรือ แนวตะเข็บได้หรือไม่

โดยการทดลองในกรณีที่ 3 จะทดลองที่ความถี่ของพัลซมเป็น 80 , 70 , 60 , 50 และ 40 เฮิรตซ์ และ อุณหภูมิของอากาศ 31.7 องศาเซลเซียส หรือ 304.7 เคลวิน

กรณีที่ 4 การทดลองเมื่อมีการผ่นึกแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ และ เจาะรูรั่วขนาด 10 มิลลิเมตร บริเวณกึ่งกลางท่อลม โดยมีการเปลี่ยนอุณหภูมิของลมขาเข้าตั้งแต่ 31.7 องศาเซลเซียส ถึง 48 องศาเซลเซียส (304.7 เคลวิน ถึง 321 เคลวิน) โดยความดันขาเข้า และ ความเร็วคงที่ 6.44 m/s และ อากาศภายนอกท่อลมมีอุณหภูมิ 31.7 องศาเซลเซียส หรือ 304.7 เคลวิน

การทดลองนี้มีจุดประสงค์ คือ

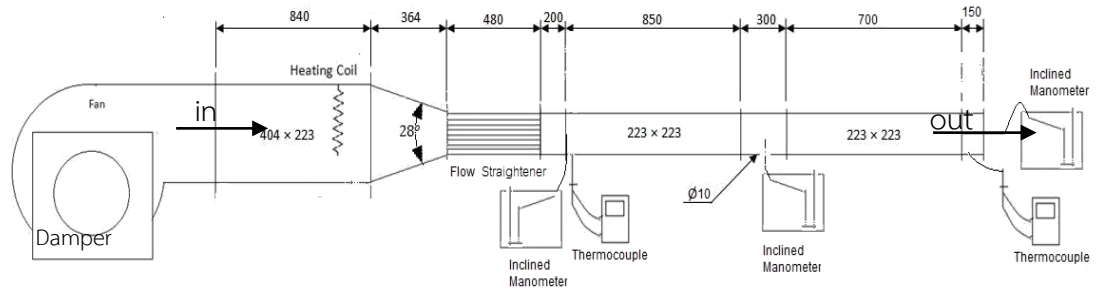
1. เพื่อสังเกตว่าค่า Friction Factor ได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือ ไม่

2. เพื่อสังเกตว่ามวลที่รั่วไหล ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิหรือไม่

อย่างไรก็ตามข้อสรุป และ การอภิปรายผลการทดลองในกรณีที่ 4 จะอยู่ในบทที่ 7 ซึ่งมี ประเด็น และ ข้อเสนอแนะสำหรับการศึกษาในอนาคต ดังที่กล่าวไว้ในขั้นต้น

4.2 ชุดทดลอง และ ส่วนประกอบ

ชุดทดลองนั้นประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ได้แก่ ส่วนทางเข้าท่อทดสอบ และ ท่อลมทดสอบ โดยแผนภาพของชุดทดสอบถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4-1 และ 4 - 2



รูปที่ 4 - 1 ขนาดชุดท่อลมทดสอบ และ อุปกรณ์การวัด



รูปที่ 4 - 2 ชุดท่อลมทดสอบ และ อุปกรณ์การวัด

4.2.1 ส่วนทางเข้าท่อทดสอบ

บริเวณทางเข้าเป็นส่วนที่ถูกติดตั้งอยู่ด้านหน้าสุดของชุดทดสอบท่อลม โดย บริเวณทางเข้านี้เป็นเส้นทางการไหลเข้าของอากาศ และเป็นบริเวณที่อากาศจะถูกปรับสภาพให้ เป็นไปตามเงื่อนไขของการทดลอง โดยในบริเวณทางเข้าจะมีส่วนประกอบหลัก ดังนี้

1. ชุดพัดลม (Fan)

พัดลมที่ใช้เป็นพัดลมชนิดแรงเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งไปด้านหน้า (Forward Curve Centrifugal Fan) โดยมีชื่อรุ่นว่า Model FSA 315 CM CW 90 ซึ่งเป็นพัดลมที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ครูเกอร์ เวนทิลเลชั่น อินดัสทรีส์(ไทยแลนด์) จำกัด และ ชุดพัดลมนี้ประกอบด้วยด้วยมอเตอร์อีตาซีขนาด 0.37 กิโลวัตต์ ชนิด 3 เฟส แรงดัน 380 โวลต์ ควบคุมความถี่ของพัดลมด้วย Inverter รุ่น VF-A3 ยี่ห้อ Toshiba โดยชุดพัดลมนี้ถูกแสดงไว้ในรูปที่ 4 -3 และ 4 -4

ชุดพัดลมจะถูกติดตั้งบริเวณด้านหน้าสุดของบริเวณทางเข้าท่อทดสอบ และมีหน้าที่ในการดูด และ ให้แรงดันแก่อากาศที่เข้าสู่ท่อลม



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 4 - 3 ชุดพัดลม Model FSA 315 CM CW 90



รูปที่ 4 - 4 Inverter รุ่น VF-A3 ยี่ห้อ Toshiba

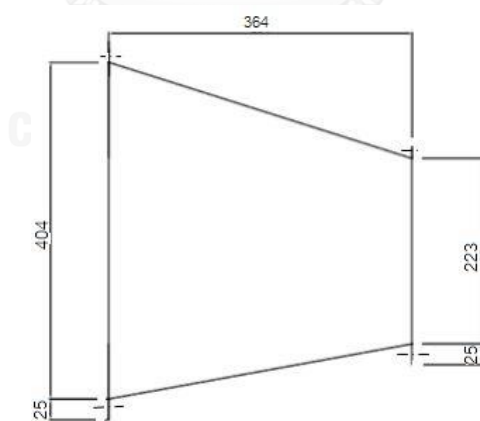
2. ท่อลมตรง (Straight Duct)

ท่อลมตรงที่ใช้มีหน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า โดยมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 40.4×22.3 ตารางเซนติเมตร โดยท่อลมจะทำจากแผ่นโลหะชุบสังกะสี (Galvanized Steel) ซึ่งมีความหนาเท่ากับ 1.2 มิลลิเมตร และ วางตัวในแนวเส้นตรงขนานกับพื้นราบโดยมีความยาว 84 เซนติเมตร ซึ่งเป็นความยาวตามคำแนะนำของคู่มือจากผู้ผลิตพัดลม โดยท่อลมตรงจะถูกติดตั้งต่อจากด้านปล่อยลมของพัดลม

3. ตัวเชื่อมต่อ (Duct Connector)

ตัวเชื่อมต่อจะติดตั้งต่อจากส่วนท่อตรง โดยตัวเชื่อมต่อจะทำจากแผ่นโลหะชุบสังกะสี ที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร มีความยาว 36.4 เซนติเมตร โดยลักษณะของตัวเชื่อมต่อนั้นจะแสดงในรูปที่ 4 - 5

ตัวเชื่อมต่อมีหน้าที่เชื่อมต่อจากทางออกของท่อตรงมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 40.4×22.3 ตารางเซนติเมตร และ ต่อเข้ากับทางเข้าของชุดจัดเรียงการไหล (Flow Straightener) ซึ่งมีพื้นที่หน้าตัด 22.3×22.3 ตารางเซนติเมตร



รูปที่ 4 - 5 โครงสร้างของตัวเชื่อมต่อ

4. ชุดจัดเรียงการไหล (Flow Straightener)

ชุดจัดเรียงการไหลจะสร้างจากหลอดพลาสติก และ นำมาจัดเรียงให้มีลักษณะเป็นรังผึ้ง (Honey Comb) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดเท่ากับ 0.5 เซนติเมตร และ มีความยาวเท่ากับ 48 เซนติเมตร ซึ่งคิดเป็น 92 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางหลอด ซึ่งในการออกแบบได้ทำตามขั้นตอนจากงานวิจัยของ Reid F.Stearns et al.(1951)[20] และ เนื่องจากผนังของหลอดพลาสติกนั้นมีความหนาน้อย ดังนั้น จึงถือว่าพื้นที่หน้าตัดทั้งหมดของชุดจัดเรียงการไหลมีค่าเท่ากับ 22.3×22.3 ตารางเซนติเมตร โดยชุดจัดเรียงการไหลจะมีหน้าที่จัดเรียงการไหลของอากาศ ให้เป็นระเบียบ และ ลดการหมุนวนของอากาศก่อนเข้าท่อทดสอบ

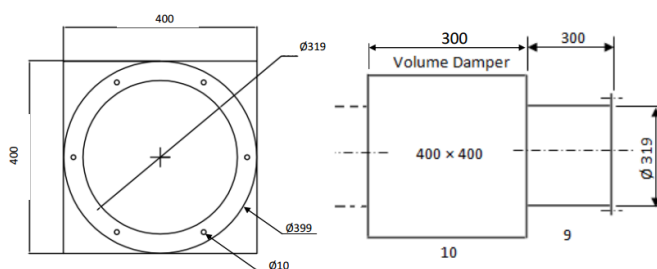
5. ขดลวดทำความร้อน (Heating Coil)

ขดลวดทำความร้อนที่ใช้ในการทดลองเป็นขดลวดความร้อนในลักษณะของ ครีบ และ ขดลวดชนิดไฟฟ้า (Electronic Heating Coils) โดยมีกำลัง 1.5 kW. จำนวน 2 ขดลวด โดยแต่ละขดลวดมีความยาว 30 ซม. และ ถูกติดตั้งอยู่ในส่วนของท่อตรงดังแสดงใน รูปที่ 4 - 1

ขดลวดทำความร้อนมีหน้าที่ให้พลังงานความร้อนแก่อากาศภายในท่อ ทำให้อุณหภูมิของอากาศภายในท่อสูงกว่าภายนอกท่อลม

6. ไบปรับลม (Volume Damper)

ไบปรับลมที่ใช้ในงานวิจัยเป็นไบปรับลมแบบขนาน 2 ไบ โดยมีขนาดดังแสดงในรูปที่ 4 - 6 และ 4 - 7 โดยไบปรับลมจะถูกติดตั้งในด้านดูดเข้าของพัดลมเพื่อทำหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลของอากาศที่ไหลเข้าพัดลม



รูปที่ 4 - 6 ขนาดของไบปรับลม



รูปที่ 4 - 7 รูปร่างของใบปรับลม

4.2.2 ท่อลมทดสอบ

ท่อลมทดสอบเป็นท่อลมที่ถูกใช้ในการศึกษาผลกระทบจากการรั่วไหล และการสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อ โดยท่อลมทดสอบถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ ท่อลดอิทธิพลของลมขาเข้า, ท่อทดสอบ และ ท่อลดอิทธิพลจากอากาศภายนอก

1. ท่อลดอิทธิพลของลมขาเข้า

เนื่องจากท่อลมทดสอบถูกติดตั้งต่อจากชุดจัดเรียงการไหล และ เพื่อการลดผลกระทบจากลมขาออกจากชุดจัดเรียงการไหลที่อาจส่งผลกระทบต่อความเร็วของลม และการวัดความดัน ดังนั้น ทางผู้วิจัยจึงได้สร้างท่อตรงที่ทำจากแผ่นโลหะชุบสังกะสี ที่มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร มีพื้นที่หน้าตัด 22.3×22.3 ตารางเซนติเมตร และ มีความยาว 20 เซนติเมตร โดยติดตั้งไว้ก่อนทางเข้าของท่อลมทดสอบเพื่อลดอิทธิพลจากขาออกของชุดจัดเรียงการไหล โดยที่บริเวณขาออกของท่อลมในส่วนนี้จะมีการติดตั้งอุปกรณ์การวัดต่างๆ ได้แก่ มานอมิเตอร์แบบเอียง (Inclined Manometer) เครื่องวัดความดันแบบดิจิตอล (Pressure Transducer) และ เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

2. ท่อลมทดสอบ

ท่อลมทดสอบเป็นท่อลมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22.3×22.3 ตารางเซนติเมตร ซึ่งทำจากแผ่นโลหะชุบสังกะสี มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร มีความยาวทั้งหมด 185

เซนติเมตร และมีลักษณะการขึ้นรูปตามแบบมาตรฐาน C โดยท่อลมนี้ถูกติดตั้งถัดจากท่อลดอิทธิพลของลมขาเข้า และ ที่บริเวณขาออกของท่อลมทดสอบ จะมีการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิล, ,มานอมิเตอร์แบบเอียง และ เครื่องวัดความดันแบบดิจิตอล เพื่อทำการวัดอุณหภูมิ ความดันพลศาสตร์ของลมขาออก และ ความดันสถิต ตามลำดับ

3. ท่อลดอิทธิพลจากอากาศภายนอก

ที่บริเวณขาออกของท่อลมทดสอบจะมีการติดตั้งอุปกรณ์ และ ทำการวัดค่าต่างๆ ดังนั้น เพื่อป้องกันอิทธิพลของอากาศภายนอกที่อาจส่งผลกระทบต่ออากาศภายในท่อทางผู้วิจัยจึงทำการติดตั้งท่อลดอิทธิพลจากอากาศภายนอก โดยท่อในส่วนนี้จะเป็นท่อท่อลมหน้าตัดสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 22.3×22.3 ตารางเซนติเมตร ซึ่งทำจากแผ่นโลหะชุบสังกะสี มีความหนา 1.2 มิลลิเมตร มีความยาวทั้งหมด 15 เซนติเมตร

4. ฉนวนความร้อน

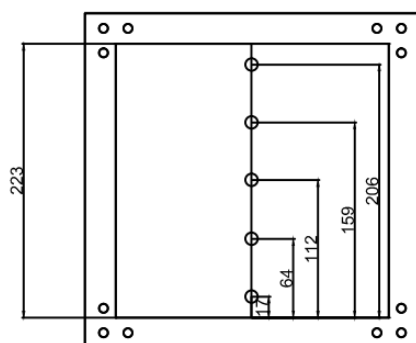
ฉนวนที่ใช้กันการสูญเสียความร้อนของท่อทดสอบ เป็นฉนวนที่ทำจากใยแก้ว และ มีความหนา 2.5 เซนติเมตร และ มีค่าการนำความร้อนเท่ากับ 0.04 W/m.K

4.2.3 อุปกรณ์การวัดที่เกี่ยวข้อง

1. เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อยี่ห้อ Digicon รุ่น DP-77 โดยเป็นเทอร์โมคัปเปิลแบบดิจิตอล ชนิดเค โดยเป็นอุปกรณ์ที่มี Resolution เท่ากับ 0.01 องศาเซลเซียส ความแม่นยำเท่ากับ $\pm 0.1\%$ และ สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง 100 องศาเซลเซียส ถึง 1370 องศาเซลเซียส โดยเทอร์โมคัปเปิลจะถูกใช้งานควบคู่ไปกับหัวโพรบ (Probe) ซึ่งทำมาจากเส้นลวดโลหะหุ้มฉนวน

โดยเทอร์โมคัปเปิลถูกติดตั้ง 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ทางออกของท่อลดอิทธิพลของลมขาเข้า และ ที่ทางออกของท่อลมทดสอบ และ ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิของลมภายในท่อมีตำแหน่งดังรูปที่ 4- 8 และ เทอร์โมคัปเปิลมีลักษณะดังรูปที่ 4 - 9



รูปที่ 4 - 8 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ และความดันของลมภายในท่อ



รูปที่ 4 - 9 เทอร์โมคัปเปิลยี่ห้อ Digicon รุ่น DP-77

2. เครื่องวัดความดันแบบดิจิตอล (Pressure Transducer)

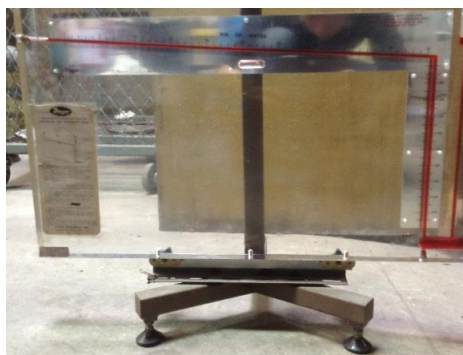
เครื่องมือวัดความดันแบบดิจิตอลที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อยี่ห้อว่า Alnor รุ่น AXD 510 โดยเป็นเครื่องมือวัดความดันที่แสดงผลเป็นตัวเลขดิจิตอล โดยเป็นอุปกรณ์ที่มี Resolution เท่ากับ 0.01 นิ้วน้ำ และ มีช่วงการวัดความดันอยู่ในช่วง 0 – 19.99 นิ้วน้ำ โดยเครื่องมือวัดความดันแบบดิจิตอลจะถูกใช้งานควบคู่ไปกับหัวโพรบ (Probe) ซึ่งทำมาจากหัวเข็มชีดยา ซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8 มิลลิเมตร เพื่อเป็นการตรวจสอบความสม่ำเสมอของการไหล จึงทำการติดตั้งหัวโพรบไว้ทุกด้านของผนังท่อ โดยเครื่องมือวัดความดันแบบดิจิตอล มีหน้าที่ในการวัดความดันสถิตของลมที่ไหลภายในท่อ โดยเครื่องมือวัดความดันแบบดิจิตอลถูกติดตั้งไว้ 2 ตำแหน่ง ได้แก่ ทางออกของท่อลดอิทธิพลของลมขาเข้า และ ทางออกของท่อลมทดสอบ โดยเครื่องมือวัดความดันแบบดิจิตอลมีลักษณะดังรูปที่ 4 - 10



รูปที่ 4 - 10 เครื่องมือวัดความดันยี่ห้อ Alnor รุ่น AXD 510

3. มานอมิเตอร์แบบเอียง (Inclined Manometer)

มานอมิเตอร์แบบเอียงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นของยี่ห้อ Dwyer โดยมานอมิเตอร์ที่ใช้มี Resolution เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตรน้ำ มีความคลาดเคลื่อน 5% ของค่าที่อ่านได้ และมีช่วงการวัดความดันอยู่ในช่วง 0 ถึง 245 มิลลิเมตรน้ำ โดยมานอมิเตอร์นี้จะถูกใช้งานควบคู่ไปกับหัวโพรบ (Probe) ซึ่งทำมาจากหัวเข็มชิตยาซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร โดยมานอมิเตอร์แบบเอียงถูกติดตั้งไว้ 3 ตำแหน่ง ได้แก่ ทางออกของท่อลดอิทธิพลของลมขาเข้า, ทางออกของท่อลมทดสอบ และ ปากทางออกของรูรั่วที่ถูกเจาะไว้ในส่วนท่อลมทดสอบ โดยมานอมิเตอร์ที่ติดบริเวณทางออกของท่อลดอิทธิพลของลมขาเข้า และ ทางออกของท่อลมทดสอบมีหน้าที่วัดความดันรวม ส่วนมานอมิเตอร์ที่ติดไว้ ณ ปากทางออกของรูรั่วมีหน้าที่วัดความดันพลศาสตร์ โดยตำแหน่งการวัดอยู่ห่างจากผนังท่อเป็นระยะทางดังนี้ เท่ากับ 0.074D, 0.288D, 0.5D, 0.712D และ 0.926D ดังแสดงในรูป 4 - 8 และ มานอมิเตอร์แบบเอียงมีลักษณะดังรูปที่ 4-11



รูปที่ 4 - 11 มานอมิเตอร์แบบเอียง

4. เครื่องวัดความชื้น (Humidity Meter)

เครื่องวัดความชื้นที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีชื่อยี่ห้อว่า Digicon รุ่น HT-765 โดยเป็นเครื่องมือวัดความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่แสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัล โดยเป็นอุปกรณ์ที่มี Resolution เท่ากับ 0.1%RH และ มีช่วงการวัดความชื้นอยู่ในช่วง 10%RH ถึง 95%RH โดยเครื่องมือวัดความชื้นแบบดิจิทัลจะถูกติดตั้งภายนอกท่อลมใกล้บริเวณขาเข้าของใบปรับลมเพื่อวัดความชื้นของอากาศที่พัดลมดูดเข้าไปในท่อโดยเครื่องวัดความชื้นมีลักษณะดังรูปที่ 4 - 12



รูปที่ 4 - 12 เครื่องวัดความชื้นยี่ห้อ Digicon รุ่น HT-765

4.3 รายละเอียดการทดลอง

การทดลองนี้จะทำการวัดความดันสถิต และ ความดันรวมที่ทางเข้าท่อลมทดสอบ (ทางออกของท่อลมหักของลมขาเข้า) และ ใกล้ทางออกของท่อลมทดสอบ โดยในการวัดความดันรวมจะใช้மானอมิเตอร์แบบเอียงในการวัด และ นำผลที่ได้จากการวัดไปคำนวณหาความดันลดที่เกิดขึ้นในช่วงระหว่างทางเข้า และ ทางออกของท่อลมทดสอบ

การวัดความเร็วจะใช้மானอมิเตอร์แบบเอียง ทำการวัดความดันรวมที่หน้าตัดทางเข้าท่อลมทดสอบ และ หน้าตัดทางออกของท่อลมทดสอบ และ นำค่าที่ได้ไปลบกับความดันสถิตที่วัดได้จากเครื่องวัดความดันแบบดิจิทัล ณ หน้าตัดเดียวกัน เพื่อหาความดันพลศาสตร์ (P_d) ที่เกิดขึ้น และ อาศัยสมการ $v = \sqrt{(2P_d)/\rho}$ ในการวิเคราะห์หาความเร็วของการไหล โดยตำแหน่งการวัดความดันรวมของลมภายในท่อมีตำแหน่งตามที่แสดงในรูปที่ 4 - 8

ในการหาอัตราการรั่วไหลของอากาศในกรณีที่ไม่มีการเจาะรู จะใช้สมการ 4.1 ในการคำนวณ

$$\dot{m}_l = \rho A(v_1 - v_2) \quad (4.1)$$

โดย \dot{m}_l คือ อัตราการรั่วไหลเชิงมวลของอากาศ [kg/s]
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อลม [m^2]
 v_1, v_2 คือ ความเร็วขาเข้า และ ขาออก [m/s]

ในกรณีที่มีการเจาะรูจะการวัดปริมาณของอากาศที่รั่วไหลจากท่อโดยใช้มาตรมิเตอร์แบบเอียงวัดความดันพลศาสตร์ของอากาศที่รั่วออกผ่านรูที่เจาะ และ อาศัยสมการ $v_l = \sqrt{(2P_d)/\rho}$ และ $\dot{m}_l = \rho A v_l$ เพื่อคำนวณหาความเร็วของการรั่วไหล และ อัตราการรั่วไหลเชิงมวลของอากาศ

การวัดอุณหภูมิของลมภายในท่อจะใช้เทอร์โมคัปเปิลในการวัดหาอุณหภูมิที่หน้าตัดขาเข้า และ ขาออกของท่อลมทดสอบ และ นำผลที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหาความร้อนสูญเสียด้วยสมการ $\dot{q} = \dot{m} c_p \Delta T$

4.4 การวิเคราะห์เชิงมิติ

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาผลกระทบของการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อนที่มีต่อความดันของลมภายในท่อ โดยศึกษาผลกระทบเนื่องจากพารามิเตอร์ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการไหล และ การถ่ายเทความร้อนว่าส่งผลต่อการลดของความดันอย่างไร โดยการวิเคราะห์เชิงมิติมีขั้นตอนดังนี้

1. ระบุพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ในการทดลองนี้มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 8 พารามิเตอร์ ได้แก่ $\Delta P, D, l, v, \rho, \mu, \epsilon$ และ

D_l

2. ระบุมิติปฐมภูมิ

ในการทดลองนี้ได้มีการกำหนดมิติปฐมภูมิไว้ 3 มิติ ได้แก่ M, L, t

เมื่อ M คือ มิติของมวล , L คือ มิติของความยาว, t คือ มิติของเวลา

3. แจกแจงมิติของพารามิเตอร์แต่ละตัวให้อยู่ในรูปมิติปฐมภูมิ

ตารางที่ 4 - 1 การแจกแจงมิติของพารามิเตอร์

ตัวแปร	มิติ
ΔP	$ML^{-1}t^{-2}$
D	L
L	L
ρ	ML^{-3}
μ	$ML^{-1}t^{-1}$
ϵ	L
D_i	L
v	Lt^{-1}

4. เลือกเซตพารามิเตอร์ซ้ำ

ในการเลือกพารามิเตอร์ซ้ำจะเริ่มจากการหาจำนวนของพารามิเตอร์ซ้ำจาก Dimensional Matrix มีลักษณะตามตารางที่ 4 - 2

ตารางที่ 4 - 2 Dimensional Matrix

MLt	ΔP	D	L	ρ	μ	ϵ	D_i	v
M	1	0	0	1	1	0	0	0
L	-1	1	1	-3	-1	1	1	1
t	-2	0	0	0	-1	0	0	-1

จากตารางที่ 4 - 2 จะสามารถเลือกขนาดมิติที่ใหญ่ที่สุดที่ทำให้ดีเทอร์มิแนนต์ที่ไม่เท่ากับศูนย์ คือ 3×3

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 \\ -3 & -1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = -1$$

จากดีเทอร์มิแนนต์มิติ 3×3 จะได้จำนวนพารามิเตอร์ซ้ำเท่ากับ 3 และ เลือกความหนาแน่น (ρ), ความเร็ว (v), เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D) เป็นพารามิเตอร์ซ้ำ

5. สร้างกลุ่มพารามิเตอร์ไร้มิติ

ในการทดลองนี้มีพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 8 ตัว และเป็นพารามิเตอร์ซ้ำทั้งหมด 3 ตัว ดังนั้น จำนวนกลุ่มพารามิเตอร์ไร้มิติจึงมีทั้งหมด เท่ากับ $8 - 3 = 5$ กลุ่ม ได้แก่

$$\pi_1 = \frac{\Delta P}{\rho v^2}$$

$$\pi_2 = \frac{L}{D}$$

$$\pi_3 = \frac{\rho v D}{\mu}$$

$$\pi_4 = \frac{\epsilon}{D}$$

$$\pi_5 = \frac{D_l}{D}$$

ดังนั้น จึงพบว่าความดันที่สูญเสียเป็นฟังก์ชันของพารามิเตอร์ไร้มิติ ดังแสดงในสมการที่ 4.2

$$\frac{\Delta P}{\rho v^2} = f\left(\frac{l}{D}, \frac{\rho v D}{\mu}, \frac{\epsilon}{D}, \frac{D_l}{D}\right) \quad (4.2)$$

6. ตรวจสอบกลุ่มไร้มิติทั้งหมดจากขั้นตอนที่ 5 ว่าไร้มิติจริงหรือไม่

$$[\pi_1] = \left[\frac{\Delta P}{\rho v^2} \right] = \frac{ML^{-1}t^{-2}}{ML^{-3}(Lt^{-1})^2} = M^0L^0t^0$$

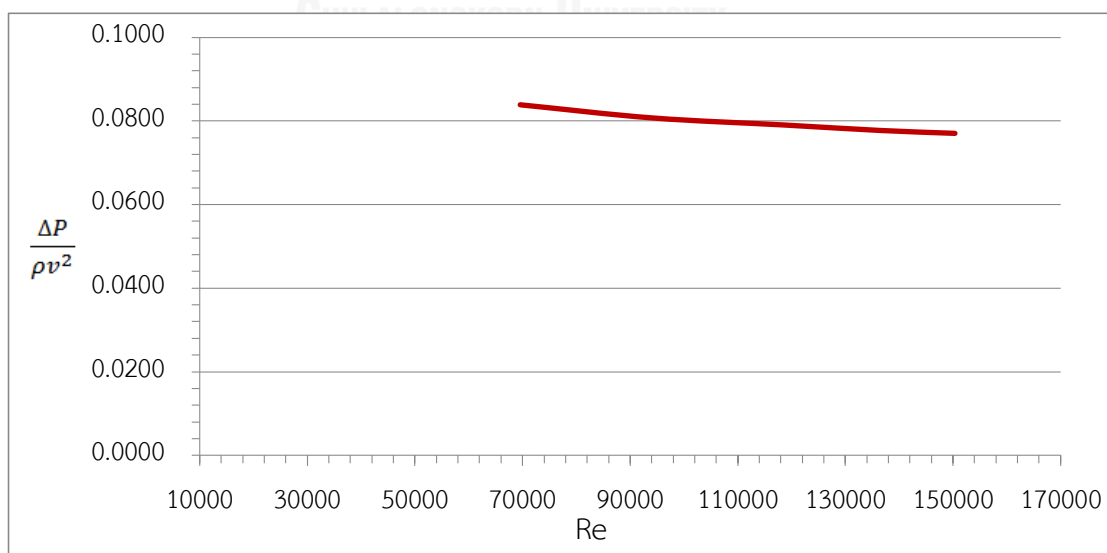
$$\begin{aligned}
 [\pi_2] &= \left[\frac{L}{D} \right] = \frac{L}{L} = L^0 \\
 [\pi_3] &= \left[\frac{\rho v D}{\mu} \right] = \frac{ML^{-3}Lt^{-1}L}{ML^{-1}t^{-1}} = M^0L^0t^0 \\
 [\pi_4] &= \left[\frac{\epsilon}{D} \right] = \frac{M}{M} = M^0 \\
 [\pi_5] &= \left[\frac{D_l}{D} \right] = \frac{M}{M} = M^0
 \end{aligned}$$

4.5 ผลลัพธ์จากการทดลอง

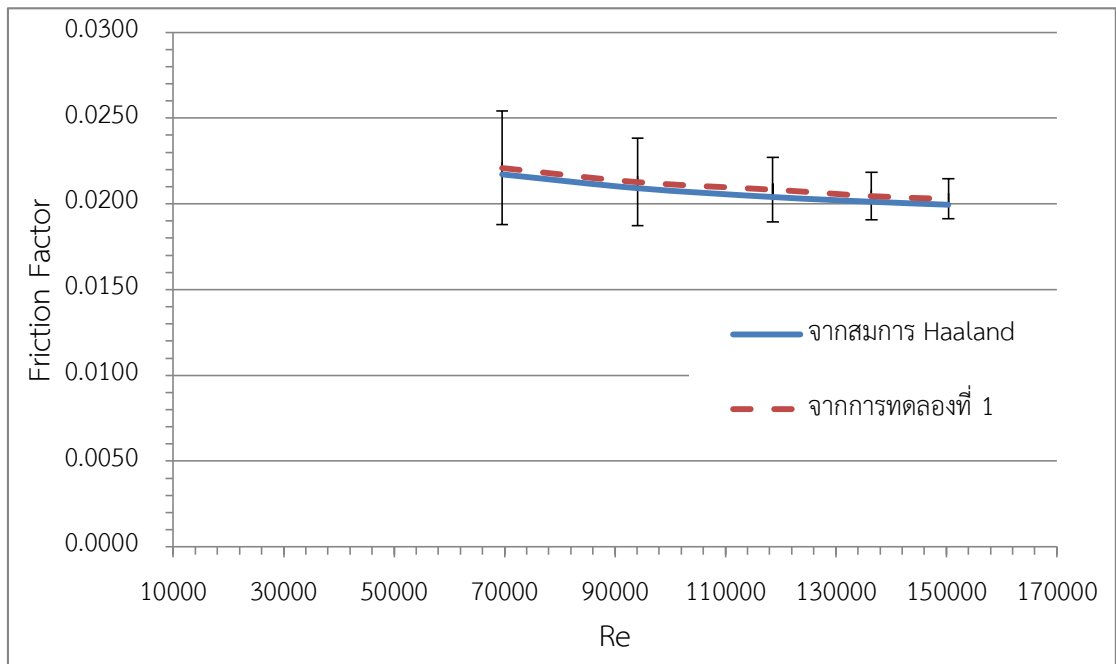
กรณีที่ 1 : การทดลองเมื่อมีการพ่นิกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม

จากตารางที่ 4 - 3 พบว่าเมื่อเพิ่ม Re จะทำให้ความดันรวมที่ลดมีค่าเพิ่มมากขึ้น และ จาก รูปที่ 4 - 13 พบว่าเมื่อเพิ่ม Re ให้สูงขึ้นจะทำให้ค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ นั้นลดลง อันเนื่องจากการเพิ่ม Re เกิดจากความเร็วมวลเพิ่มขึ้น และ ค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ แปรผกผันกับความเร็วกำลังสองดังนั้น ค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ จึงลดลง

จากรูปที่ 4 - 14 พบว่าค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลอง และ ที่ได้จากสมการ Haaland มีแนวโน้มในทิศทางเดียวกัน และ ค่า Friction Factor นั้นแตกต่างกันเล็กน้อย ดังนั้น ค่า Friction Factor จากสมการของ Haaland[18] จึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้งานกับท่อลมที่ได้รับการพ่นิกตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บท่อ



รูปที่ 4 - 13 กราฟแสดงค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ และ Re ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 1

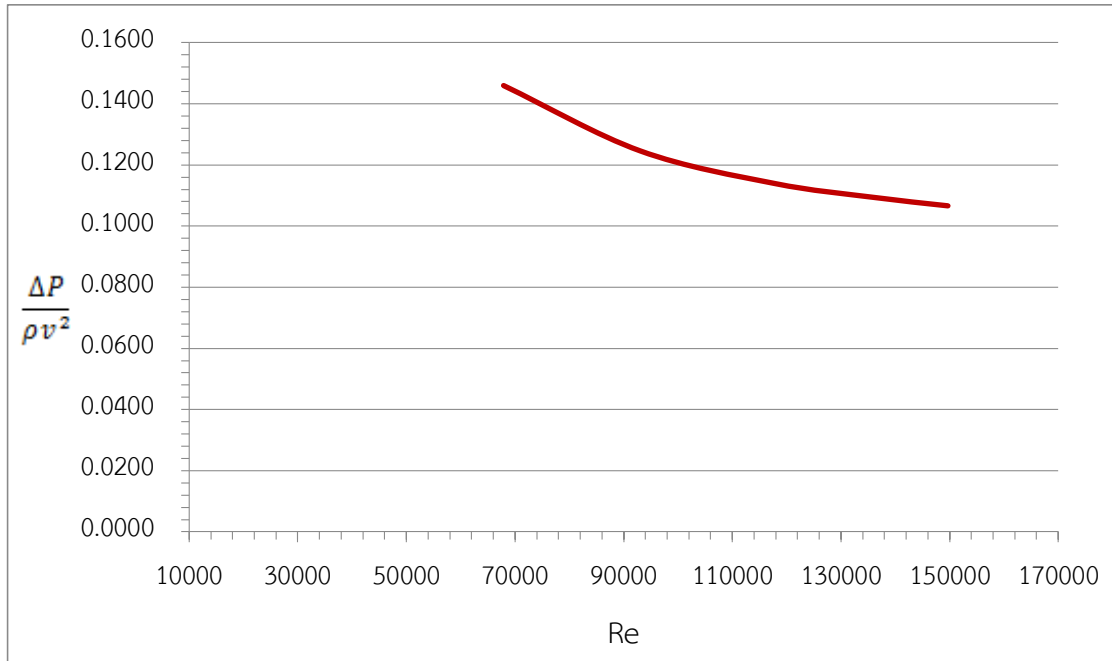


รูปที่ 4 - 14 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 1 และ ค่า Friction Factor จากสมการ Haaland $\left[f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} \right]$ เมื่อ $\epsilon/D = 6.74 \times 10^{-4}$

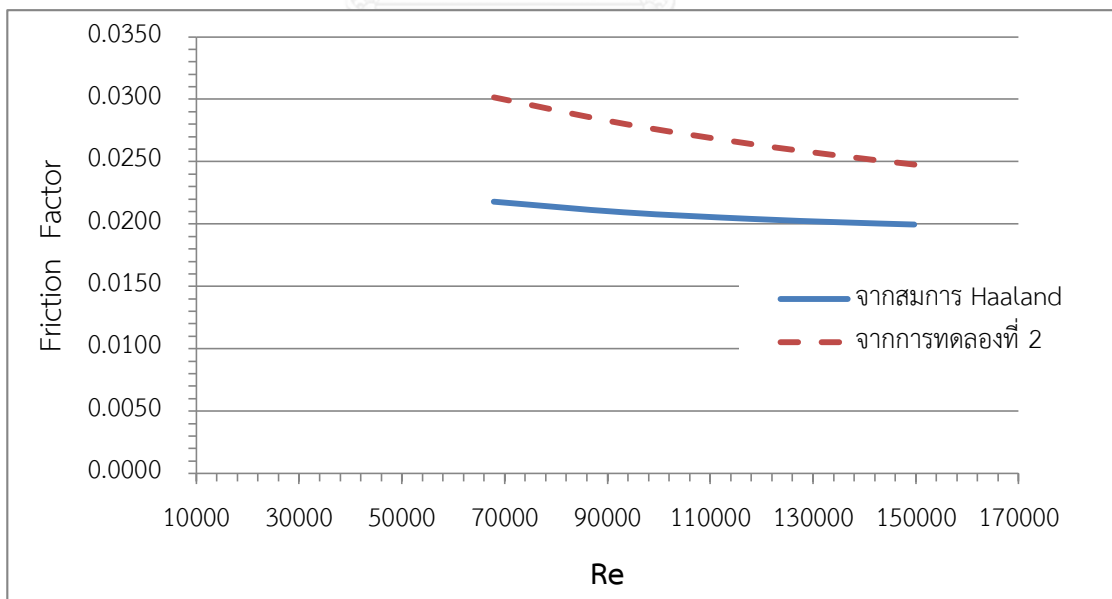
ตารางที่ 4 - 3 ผลการทดลองเมื่อมีการฝึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข้ของท่อลม

ความถี่ (Hz)	Re	ความดันสถิต (Pa)		อุณหภูมิ (C)		ความเร็ว (m/s)		มวลอากาศ รั่วไหล (kg/s)	ความร้อนสูญเสีย จากการรั่วไหล (W)	ความดันรวมลด (Pa)	Friction Factor
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
80	150364	44.99	36.19	31.7	31.7	9.98	9.97	0	0	8.80	0.02029
70	136433	38.14	30.73	31.7	31.7	9.06	9.05	0	0	7.41	0.02045
60	118580	29.34	23.72	31.7	31.7	7.87	7.87	0	0	5.62	0.02083
50	94075	21.52	17.91	31.7	31.7	6.25	6.24	0	0	3.61	0.02127
40	69565	14.67	12.62	31.7	31.7	4.62	4.61	0	0	2.05	0.02209

กรณีที่ 2 : การทดลองเมื่อไม่มีการผันผวนตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม



รูปที่ 4 - 15 กราฟแสดงค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ และ Re ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 2



รูปที่ 4 - 16 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 2 และ ค่า Friction Factor จากสมการ Haaland เมื่อ $\epsilon/D = 6.74 \times 10^{-4}$

ตารางที่ 4 - 4 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการปรับตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม

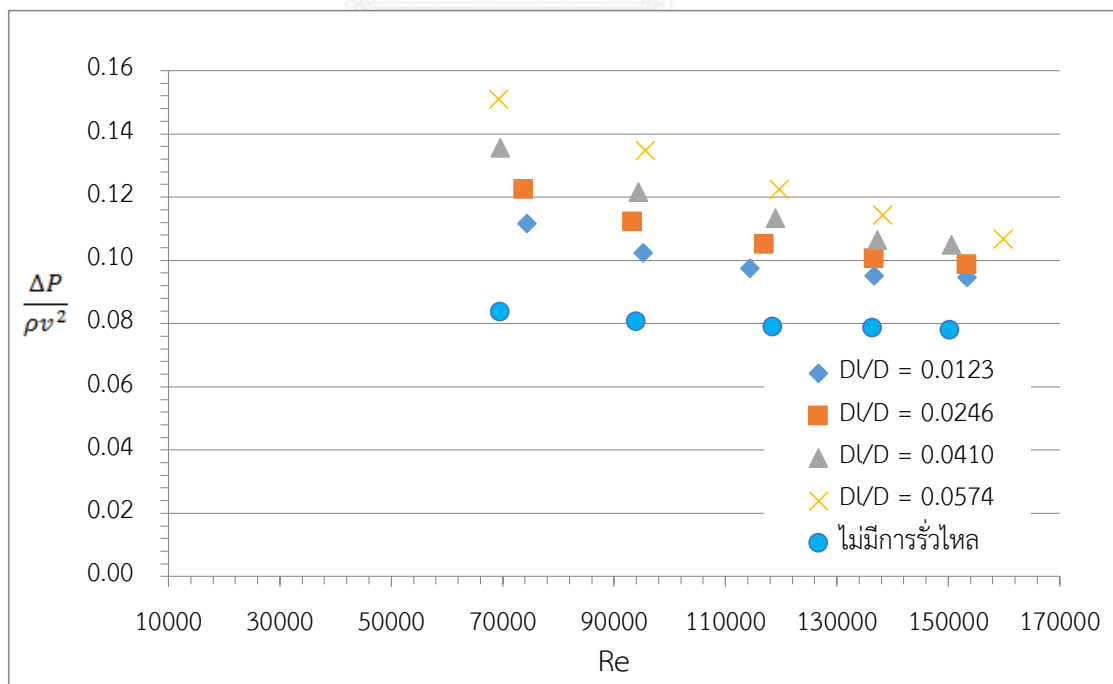
ความถี่ (Hz)	Re	ความถี่ต้นสถิต (Pa)		อุณหภูมิ (C)		ความเร็ว (m/s)		มวลอากาศ รั่วไหล (kg/s)	ความร้อนสูญเสีย จากการรั่วไหล (W)	ความดันรวมลด (Pa)	Friction Factor
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
80	150364	46.95	35.38	31.7	31.7	9.98	9.89	0.00098	69.10	12.09	0.02475
70	136433	36.19	26.80	31.7	31.7	9.06	8.96	0.00064	45.69	10.20	0.02543
60	118580	27.39	20.06	31.7	31.7	7.87	7.77	0.00049	35.04	8.00	0.02642
50	94075	18.58	14.06	31.7	31.7	6.25	6.11	0.00047	33.13	5.46	0.02804
40	69565	10.76	8.50	31.7	31.7	4.62	4.40	0.00042	29.87	3.41	0.03015

จากตารางที่ 4 - 4 พบว่าเมื่อเพิ่ม Re จะทำให้มวลอากาศที่รั่วไหล และ ความร้อนสูญเสียเพิ่มมากขึ้น และ ทำให้ความดันรวมลดเพิ่มมากขึ้นอันเนื่องมาจากอากาศสูญเสียพลังงานจากการรั่วไหล และ นอกจากนี้การเพิ่ม Re ยังทำให้ความดันรวมลดเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าเพิ่มขึ้น และ เมื่อเปรียบเทียบความดันลดที่เกิดขึ้นกับ ตารางที่ 4 - 3 พบว่าเมื่อมีการรั่วไหลเข้ามาเกี่ยวข้องกับความดันรวมที่ลดจะเพิ่มมากขึ้น

จากรูปที่ 4 - 15 พบว่าเมื่อเพิ่มค่า Re จะทำให้ค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ ลดลง เนื่องจากการเพิ่ม Re เกิดจากการเพิ่มขึ้นของความเร็ว และ เนื่องจากค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ แปรผกผันกับความเร็วยกกำลังสองดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ จึงลดลง

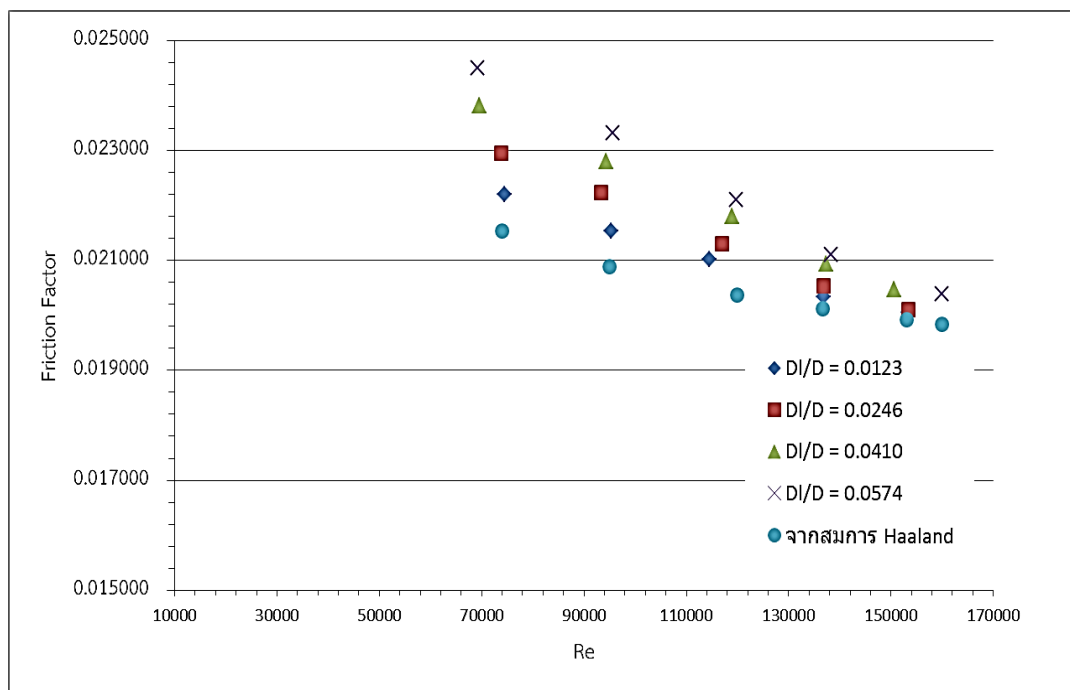
จากรูปที่ 4 - 16 พบว่าค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 2 และ ที่ได้จากสมการของ Haaland นั้นมีความแตกต่างกัน ดังนั้น การรั่วไหลที่เกิดขึ้นตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บส่งผลกระทบต่อค่า Friction Factor โดยการพัฒนาสมการ Friction Factor จะแสดงไว้ในหัวข้อ 4.6

กรณีที่ 3 การทดลองเมื่อมีการฉีกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม แต่มีการเจาะรูรั่วขนาด 3 มม. , 6 มม. , 10 มม. และ 14 มม. บริเวณกึ่งกลางของท่อลม



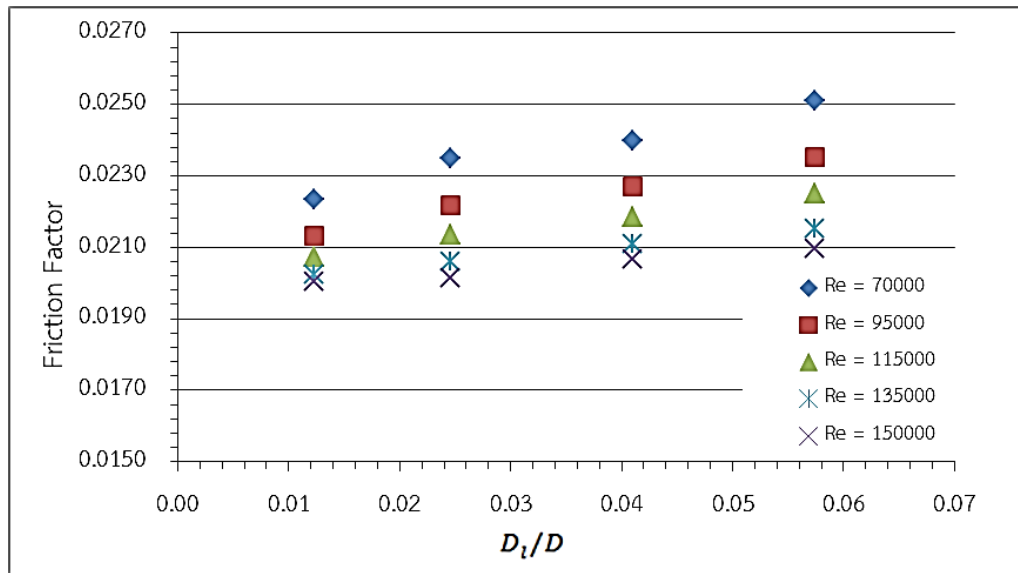
รูปที่ 4 - 17 กราฟแสดงค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ และ Re ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 3 ที่ D_1/D ค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4 - 17 พบว่าที่ D_I/D คงที่ เมื่อเพิ่มค่า Re จะทำให้ค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ ลดลง เนื่องจากการเพิ่ม Re เกิดจากการเพิ่มขึ้นของความเร็ว และ เนื่องจากค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ แปรผกผันกับความเร็วยกกำลังสอง ดังนั้นเมื่อเพิ่มความเร็วค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ จึงลดลง และ พิจารณาที่ค่า Re เดียวกัน แต่ D_I/D เพิ่มขึ้นจะพบว่าที่ D_I/D สูงขึ้น ค่า $\frac{\Delta P}{\rho v^2}$ จะมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องมาจากที่ D_I/D สูงความดันลด (ΔP) จะมีค่าเพิ่มขึ้น เพราะมีมวลอากาศที่รั่วไหลเพิ่มมากขึ้น



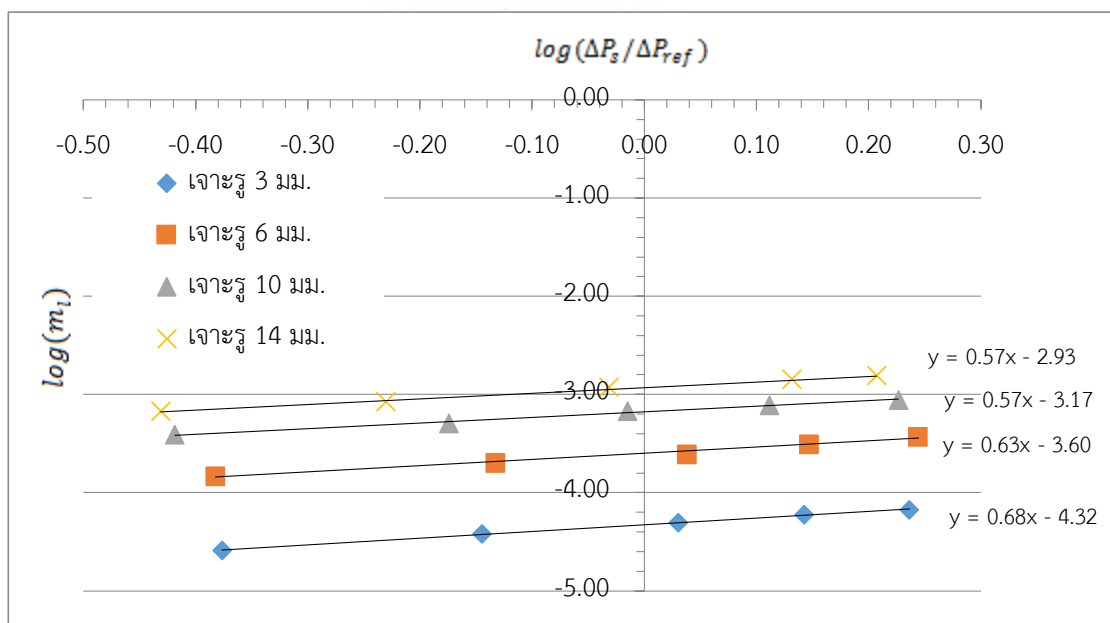
รูปที่ 4 - 18 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor และ Re ที่ D_I/D ค่าต่างๆ เมื่อ $\epsilon/D = 6.74 \times 10^{-4}$

จากรูปที่ 4 - 18 พบว่าการกระจายตัวของค่า Friction Factor ที่มีอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางรูรั่วต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D_I/D) ต่างกัน มีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายกัน แต่มีค่า Friction Factor ไม่เท่ากัน และ ค่า Friction Factor ในกรณีที่มีรูรั่วมีค่าแตกต่างจากค่า Friction Factor จากสมการ Haaland[18]



รูปที่ 4 - 19 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor และ D_1/D ที่ Re ค่าต่างๆเมื่อ $\epsilon/D = 6.74 \times 10^{-4}$

จากรูปที่ 4 - 19 พบว่าที่ค่า Re เดียวกัน ค่า D_1/D ที่มากขึ้นจะทำให้ค่า Friction Factor มากขึ้น และ การกระจายตัวของค่า Friction Factor มีลักษณะการแปรผันตรงกับขนาดของ D_1/D และ การกระจายตัวของ Friction Factor ที่ Re ต่างกัน มีลักษณะการกระจายตัวที่คล้ายกัน แต่มีค่า Friction Factor ไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงต้องมีการพัฒนาสมการ Friction Factor โดยขั้นตอนการพัฒนาได้แสดงไว้ในหัวข้อ 4.6



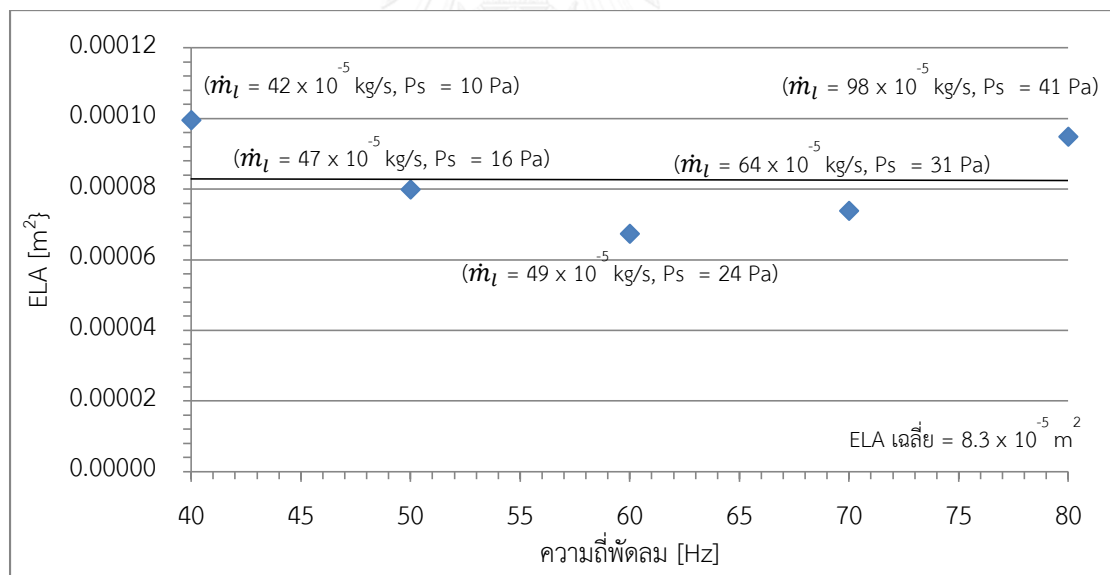
รูปที่ 4 - 20 กราฟ $\log(m_i)$ และ $\log(\Delta P_s/\Delta P_{ref})$ ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 3

จากรูป 4 – 20 เป็นกราฟที่เกิดจากการใช้ฟังก์ชันลอการิทึมกับสมการที่ 4.3 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนสมการที่ 2.9 ให้อยู่ในรูปอัตราการรั่วไหลเชิงมวล

$$Q_l = ELA \times \sqrt{\frac{2\Delta p_{ref}}{\rho}} \left(\frac{\Delta p_s}{\Delta p_{ref}} \right)^n \quad (2.9)$$

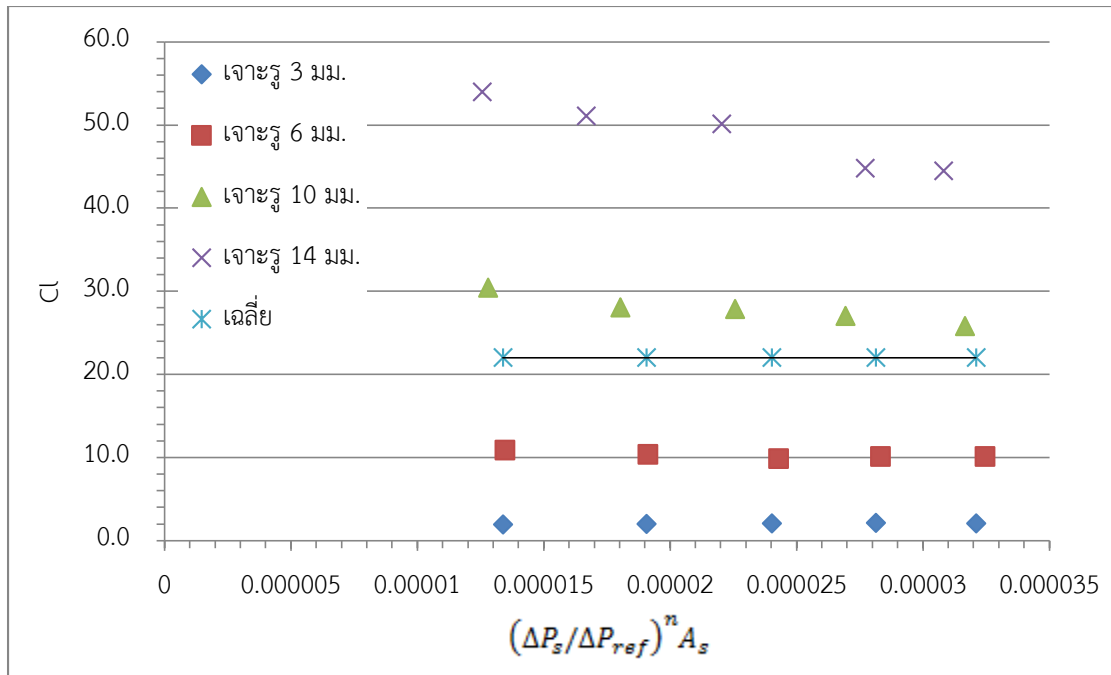
$$m_l = ELA \times \sqrt{2\Delta p_{ref}\rho} \left(\frac{\Delta p_s}{\Delta p_{ref}} \right)^n \quad (4.3)$$

โดยกราฟเส้นตรงที่เกิดจากการวิเคราะห์แบบถดถอยเชิงเส้น มีค่า R – Square (R^2) ดังนี้ แบบเจาะรู 3 มม. $R^2 = 0.998$ แบบเจาะรู 6 มม. $R^2 = 0.981$ แบบเจาะรู 10 มม. $R^2 = 0.991$ และแบบเจาะรู 14 มม. $R^2 = 0.992$ และ ความชันของกราฟ คือ ค่า n ในสมการ 2.9 และ 4.3 และเนื่องจากความชันของกราฟแต่ละเส้นนั้นมีค่าไม่เท่ากัน จึงทำการเฉลี่ยและได้ความชันเท่ากับ 0.65 ดังนั้น ค่า n ที่ใช้ในแบบจำลองเท่ากับ 0.65



รูปที่ 4 - 21 กราฟ ELA ที่ m_l และ P_s ค่าต่างๆ

จากรูป 4 – 21 ค่า ELA แต่ละค่าเกิดจากการนำค่าอัตราการรั่วไหลเชิงมวล (m_l) และความดันสถิต (P_s) จากการทดลองกรณีนี้ที่ 2 มาแทนลงในสมการที่ 4.3 โดยใช้ค่า $n = 0.65$ โดยจากกราฟจะได้ค่า ELA เฉลี่ย เท่ากับ $8.3 \times 10^{-5} \text{ m}^2$



รูปที่ 4 - 22 กราฟ c_l ที่ได้จากการทดลองกรณีนี้ที่ 3 เมื่อรูรั่วเท่ากับ 3 , 6 , 10 และ 14 มม. และ $n = 0.65$

จากรูป 4 - 22 พบว่าค่า c_l เฉลี่ยของการทดลองเมื่อเจาะรูรั่ว 3 , 6 , 10 และ 14 มม. มีค่าเท่ากับ 22

ค่า n และ ค่า c_l จะถูกนำมาใช้กับสมการ 3.48 เพื่อใช้ทำนายอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

$$Q_l = c_l \left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_{ref}} \right)^n \times A_s \quad (3.48)$$

ตารางที่ 4 - 5 ผลการทดลองเมื่อมีการฝึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม และ มีการเจาะรูรั่วขนาด 3 ม.ม. บริเวณกึ่งกลางของท่อลม

ความถี่ (Hz)	Re	ความดันสถิต (Pa)		อุณหภูมิ (C)		ความเร็ว (m/s)		มวลอากาศรั่วไหล (kg/s)	ความร้อนสูญเสียจากการรั่วไหล(W)	ความดันรวมสถิต (Pa)	Friction Factor
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
80	153442	44.99	41.18	31.7	31.7	10.19	9.53	0.000067	79.58	11.28	0.02006
70	136787	36.19	33.21	31.7	31.7	9.08	8.48	0.000060	53.89	9.01	0.02033
60	114454	27.68	25.92	31.7	31.7	7.60	7.04	0.000049	42.01	6.47	0.02101
50	95302	19.07	17.61	31.7	31.7	6.33	5.86	0.000038	37.80	4.71	0.02153
40	74399	10.76	9.78	31.7	31.7	4.94	4.67	0.000026	31.66	3.13	0.02220

ตารางที่ 4 - 6 ผลการทดลองเมื่อมีการฝึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม และ มีการเจาะรูรั่วขนาด 6 ม.ม. บริเวณกึ่งกลางของท่อลม

ความถี่ (Hz)	Re	ความดันสถิต (Pa)		อุณหภูมิ (C)		ความเร็ว (m/s)		มวลอากาศรั่วไหล (kg/s)	ความร้อนสูญเสียจากการรั่วไหล(W)	ความดันรวมสถิต (Pa)	Friction Factor
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
80	153442	44.99	42.80	31.7	31.7	10.19	9.34	0.00033	95.08	11.76	0.02011
70	136787	36.19	34.04	31.7	31.7	9.08	8.35	0.00029	70.87	9.52	0.02054
60	117004	27.68	26.92	31.7	31.7	7.77	7.00	0.00024	55.93	7.28	0.02130
50	93371	19.07	17.81	31.7	31.7	6.20	5.66	0.00020	49.01	4.95	0.02224
40	73793	10.80	9.94	31.7	31.7	4.90	4.43	0.00015	40.73	3.35	0.02295

ตารางที่ 4 - 7 ผลการทดลองเมื่อมีการผันตามแวนรอยต่อ และ แนวตะเข้ของท่อลม และมีกำลังกลางของท่อลม 10 ม.ม. บริเวณกึ่งกลางของท่อลม

ความถี่ (Hz)	Re	ความดันสถิต (Pa)		อุณหภูมิ (C)		ความเร็ว (m/s)		มวลอากาศรั่วไหล (kg/s)	ความร้อนสูญเสียจากการรั่วไหล(W)	ความดันรวมลด (Pa)	Friction Factor
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
80	150598	47.00	37.24	31.7	31.7	10.00	9.80	0.00082	127.65	12.06	0.02047
70	137356	36.28	28.38	31.7	31.7	9.12	8.90	0.00073	97.99	10.17	0.02093
60	118987	27.39	20.94	31.7	31.7	7.90	7.71	0.00063	79.93	8.12	0.02180
50	94398	18.58	14.89	31.7	31.7	6.27	6.01	0.00051	69.44	5.49	0.02280
40	69576	10.76	8.32	31.7	31.7	4.62	4.45	0.00039	57.76	3.32	0.02381

ตารางที่ 4 - 8 ผลการทดลองเมื่อมีการผันตามแวนรอยต่อ และ แนวตะเข้ของท่อลม และมีกำลังกลางของท่อลม 14 ม.ม. บริเวณกึ่งกลางของท่อลม

ความถี่ (Hz)	Re	ความดันสถิต (Pa)		อุณหภูมิ (C)		ความเร็ว (m/s)		มวลอากาศรั่วไหล (kg/s)	ความร้อนสูญเสียจากการรั่วไหล(W)	ความดันรวมลด (Pa)	Friction Factor
		ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก	ขาเข้า	ขาออก				
80	159922	44.99	35.56	31.7	31.7	10.62	10.25	0.00137	167.78	13.17	0.02039
70	138249	37.17	30.52	31.7	31.7	9.18	8.75	0.00124	135.04	11.31	0.02110
60	119685	26.41	20.10	31.7	31.7	7.95	7.66	0.00111	113.49	8.88	0.02211
50	95630	16.43	13.01	31.7	31.7	6.35	5.95	0.00085	94.90	6.24	0.02331
40	69275	10.32	8.21	31.7	31.7	4.60	4.30	0.00068	78.64	3.67	0.02450

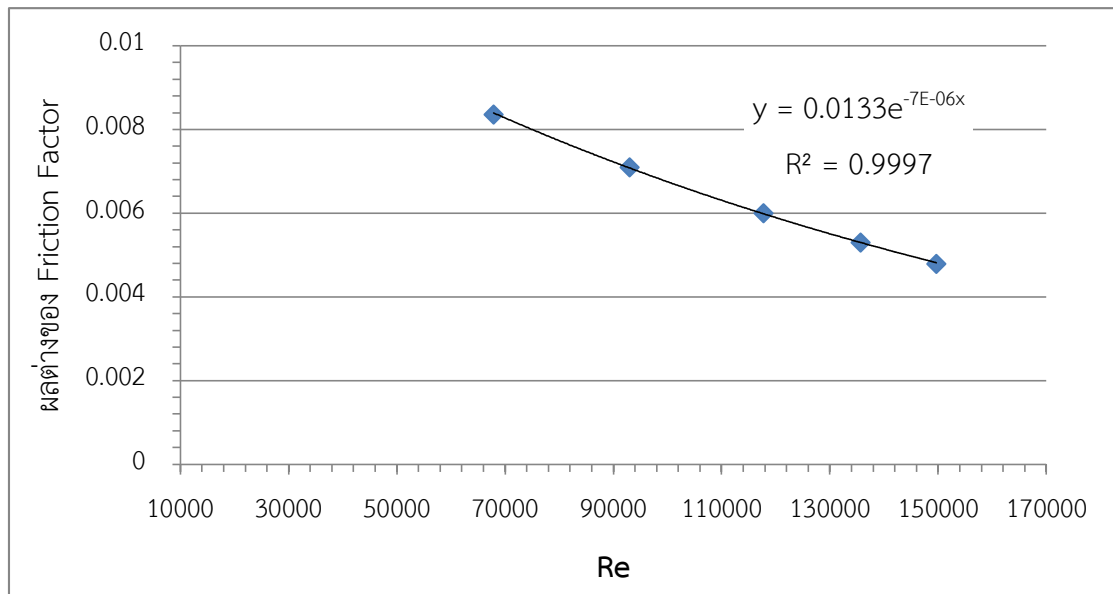
หากพิจารณาตารางที่ 4 – 5 ถึง 4 – 8 พบว่าเมื่อเพิ่ม Re ทำให้มวลอากาศรั่วไหล และความร้อนสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งความดันลดที่เกิดขึ้นมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากอากาศที่ไหลภายในท่อสูญเสียพลังงานจากการรั่วไหล รวมทั้งการเพิ่มของ Re ทำให้ความดันลดเนื่องจากแรงเสียดทานมีค่าสูงขึ้น และ ที่ Re เดียวกันเมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางรูรั่วเพิ่มขึ้นจะทำให้ความดันลดมีค่าเพิ่มขึ้น โดยเกิดขึ้นเนื่องมาจากการรั่วไหลมีค่ามากขึ้นทำให้อากาศที่ไหลภายในท่อสูญเสียพลังงานจากการรั่วไหลจึงทำให้ความดันลดมีค่ามากขึ้น

4.6 พัฒนาสมการความเสียดทาน (สมการ Friction Factor) ที่ได้จากทดลอง

4.6.1 การพัฒนาสมการความเสียดทานเมื่อมีการรั่วไหลตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ

เมื่อพิจารณารูปที่ 4 – 16 พบว่าการรั่วไหลที่บริเวณรอยต่อ และ ตะเข็บส่งผลต่อค่า Friction Factor ดังนั้น เพื่อให้สมการ Friction Factor มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้กับการไหลภายในท่อลมที่มีการรั่วตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ จึงจำเป็นต้องปรับสมการ Friction Factor ของ Haaland ซึ่งเป็นสมการที่ได้รับการยืนยันจากการทดลองกรณีที่ 1 ว่าสามารถใช้งานได้กับการไหลที่ไม่มี การรั่ว

โดยขั้นตอนการพัฒนาสมการ Friction Factor เริ่มจากการพิจารณาว่าความแตกต่างของค่า Friction Factor ซึ่งถึงแม้ว่าจะเป็นผลโดยตรงจากการรั่วไหลที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ค่า Re ที่เกิดขึ้นในท่อไม่คงที่ แต่อย่างไรก็ตาม ค่าการเปลี่ยนแปลง Re ในท่อนั้นขึ้นอยู่กับค่า Re ขาเข้า ดังนั้น ในขั้นตอนการปรับแก้สมการ Friction Factor นั้นจะสร้างกราฟความแตกต่างของค่า Friction Factor ในกรณีการทดลองกรณีที่ 2 กับค่า Friction Factor จากสมการ Haaland[18] ดังรูปที่ 4 – 23 กับค่า Re ขาเข้า



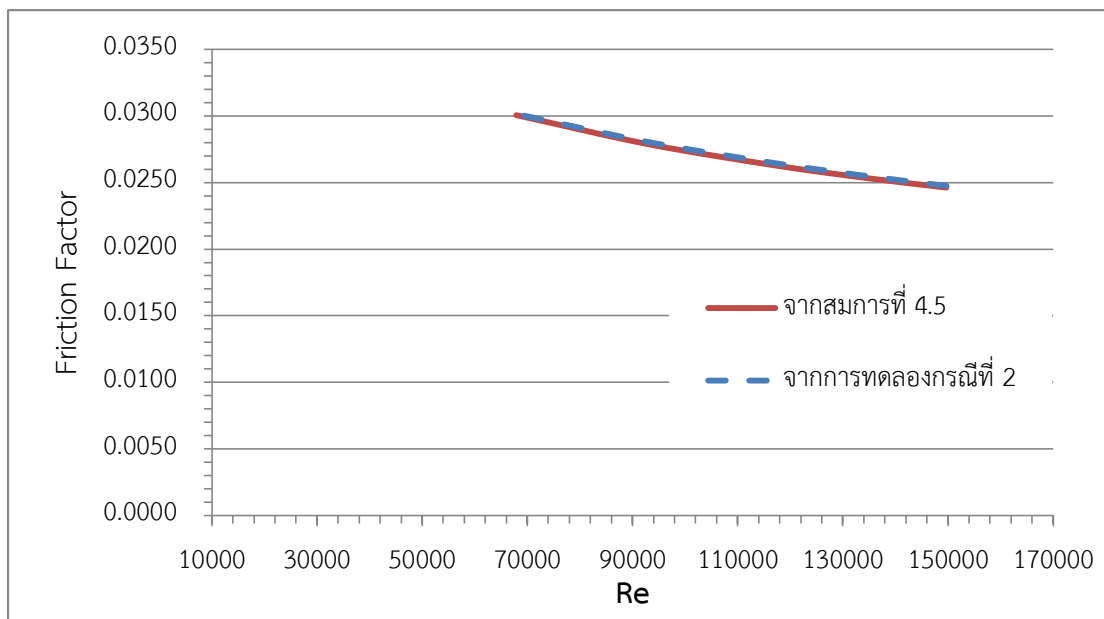
รูปที่ 4 - 23 กราฟผลต่างของค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองที่ 2 และ ค่า Friction Factor จากสมการ Haaland ที่ Re ค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 4 - 23 เมื่อทำการวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น โดยพิจารณาการกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบเลขยกกำลัง จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของค่า Friction Factor (Δf) กับ Re ตามสมการที่ 4.4 โดยค่า R-Square เท่ากับ 0.9997 จากนั้นจะทำการปรับแก้สมการ Friction Factor ของ Haaland[18] โดยนำค่าผลต่างของ Friction Factor รวมเข้าไปด้วยสมการของ Haaland ดังแสดงในสมการที่ 4.5 และ ทำการเปรียบเทียบค่า Friction Factor จากสมการที่ 4.5 กับค่า Friction Factor จากการทดลองกรณีที่ 2 ดังแสดงในรูปที่ 4 - 24

$$\Delta f = 0.0133e^{-7 \times 10^{-6} Re} \quad (4.4)$$

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} + 0.0133e^{-7 \times 10^{-6} Re} \quad (4.5)$$

เมื่อ	ϵ	คือ	ค่าความขรุขระของผนังท่อ [m]
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ [m]
	Re	คือ	ค่าตัวเลขเรย์โนลด์
	e	คือ	ค่าคงตัวมีค่าประมาณ 2.718



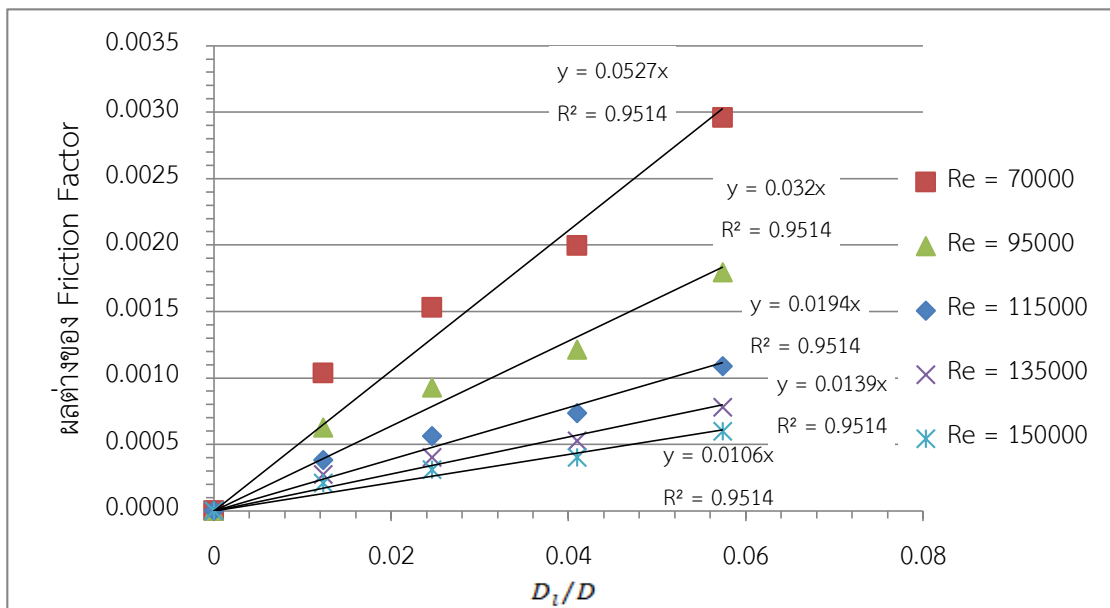
รูปที่ 4 - 24 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 2 และ ค่า Friction Factor จากสมการที่ 4.5 ที่ Re ค่าต่าง ๆ

4.6.2 การพัฒนาสมการความเสียดทานเมื่อมีการรั่วไหลบริเวณรูรั่ว

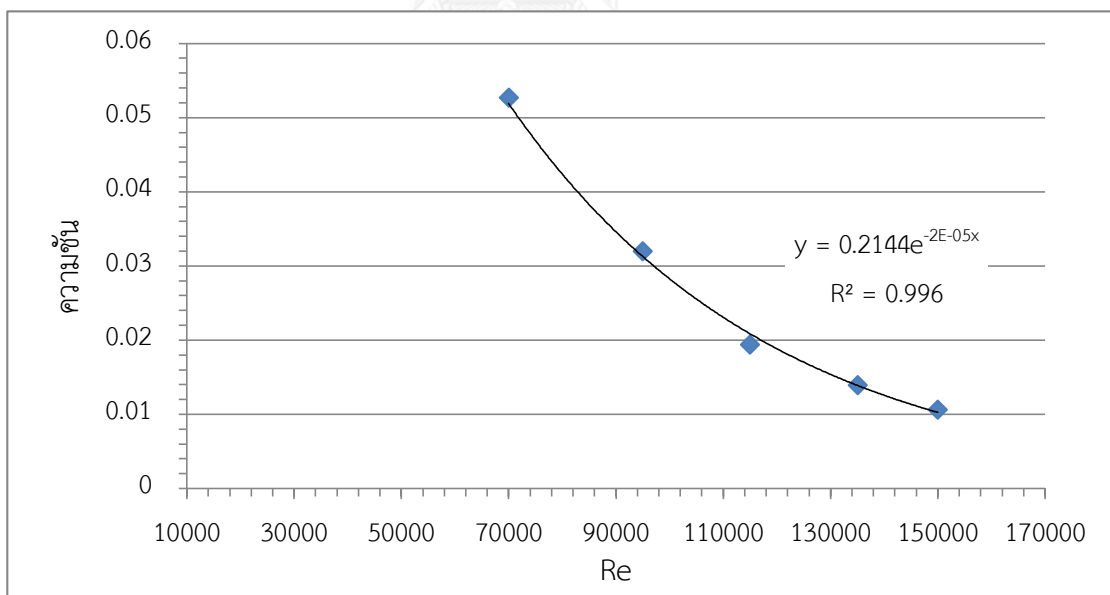
เมื่อพิจารณารูปที่ 4 - 18 และ 4 - 19 พบว่าค่า D_I/D ส่งผลต่อค่า Friction Factor และ เพื่อพัฒนาสมการ Friction Factor ให้เหมาะกับสภาพการไหลของท่อลมที่มีรูรั่วจากการสึกกร่อน จึงได้นำความแตกต่างของค่า Friction Factor จากการทดลองในกรณีที่ 3 กับค่า Friction Factor จากสมการ Haaland[18] มาสร้างกราฟดังแสดงในรูปที่ 4 - 25

จากรูปที่ 4 - 25 พบว่าที่ Re ต่างกัน กราฟเชิงเส้นที่ได้จะมีความชันแตกต่างกัน โดยความชัน เปลี่ยนไปตาม Re ดังนั้น จึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความชันกับค่า Re ดังรูปที่ 4 - 26 และ จากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นโดยพิจารณาว่าข้อมูลกระจายตัวแบบเอกซ์โพเนนเชียล จะได้สมการความชันดังสมการที่ 4.6 ซึ่งมีค่า R-Square = 0.996

$$\text{ความชัน} = 0.2144e^{-2 \times 10^{-5} Re} \quad (4.6)$$



รูปที่ 4 - 25 กราฟผลต่างของค่า Friction Factor ที่ได้จากการทดลองกรณีที่ 3 กับ ค่า Friction Factor จากสมการ Haaland และ กราฟจากการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้น



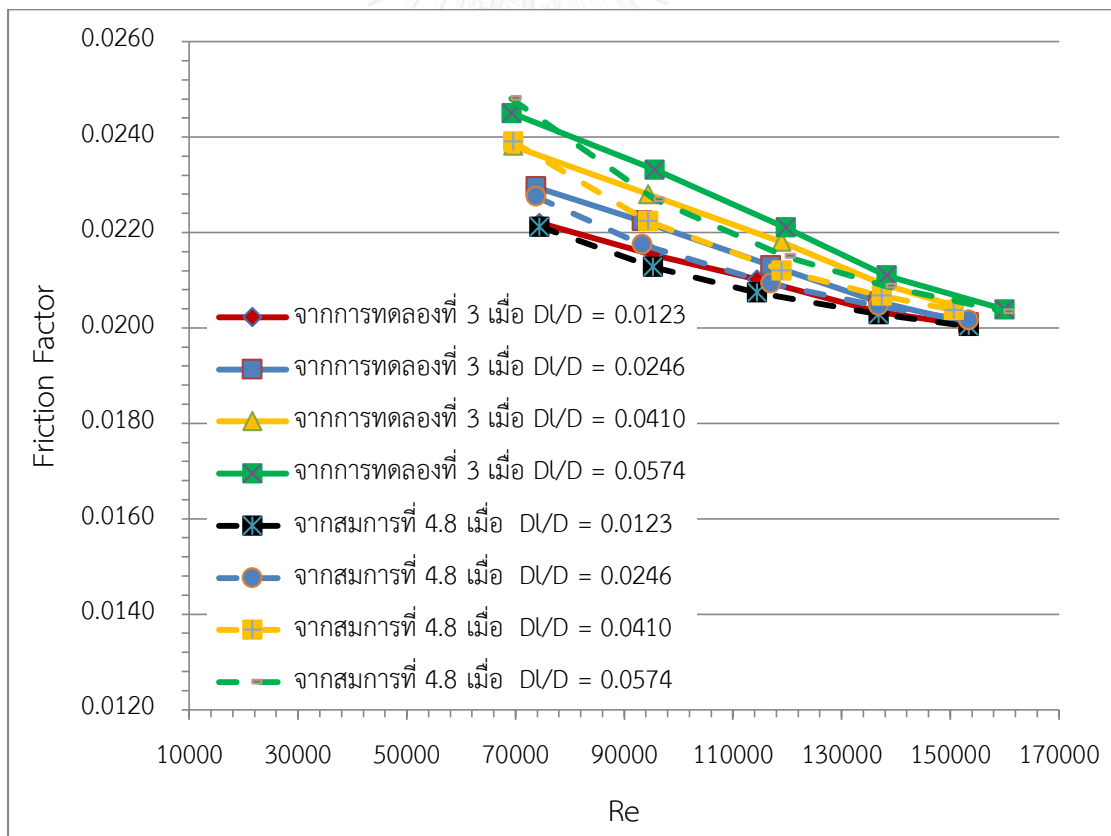
รูปที่ 4 - 26 กราฟการวิเคราะห์ถดถอยเชิงเส้นของความชันของเส้นตรงแต่ละเส้นในรูปที่ 4 - 25

เมื่อนำสมการความชันคูณเข้ากับค่า D_l/D จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของค่า Friction Factor กับค่า D_l/D ตามสมการที่ 4.7 และ นำไปรวมเข้าไปด้วยสมการ Haaland[18] จะได้สมการ Friction Factor ที่คำนึงถึงอิทธิพลของรูรั้ว ดังสมการที่ 4.8

$$\Delta f = \left(0.2144e^{-2 \times 10^{-5} Re}\right) \frac{D_l}{D} \quad (4.7)$$

เมื่อ	Δf	คือ	ผลต่างของค่า Friction Factor
	D_l	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของรูรั้ว [m]
	D	คือ	เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อที่พิจารณาอยู่ [m]
	e	คือ	ค่าคงตัวมีค่าประมาณ 2.718

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} + \left(0.2144 e^{-2 \times 10^{-5} Re} \right) \frac{D_l}{D} \quad (4.8)$$



รูปที่ 4 - 27 กราฟเปรียบเทียบค่า Friction Factor จากสมการที่ 4.8 และ จากการทดลองกรณีที่มี 3

จากรูปที่ 4 - 27 และ จากตารางที่ 4 - 9 พบว่าค่า Friction Factor ที่ได้จากสมการที่ 4.8 และ ที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน และ ต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ดังนั้นสมการที่ 4.8 จึงมีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับการไหลภายในท่อลมที่มีการฉีกตามรอยต่อ และ ตะเข็บแต่มีรูรั่วจากการสึกกร่อน



ตารางที่ 4 - 79 แสดงค่า Friction Factor จากการทดลอง และ จากสมการที่ 4.8 ที่ D_i/D และ Re ค่าต่างๆ

D_i/D	Re	Friction Factor		Error (%)	Uncertainty (%)
		การทดลอง กรณี 3	จากสมการที่ 4.8		
0.0123	74399	0.0222	0.0221	0.4	16.4
	95302	0.0215	0.0213	1.2	10.8
	114454	0.0210	0.0207	1.3	7.9
	136787	0.0203	0.0203	0.2	5.6
	153442	0.0201	0.0200	0.1	4.5
0.0246	73793	0.0230	0.0228	0.9	15.4
	93371	0.0222	0.0217	2.2	15.0
	117004	0.0213	0.0209	1.7	7.0
	136787	0.0205	0.0205	0.4	5.4
	153442	0.0201	0.0202	-0.3	4.3
0.0410	69576	0.0238	0.0239	-0.4	15.6
	94398	0.0228	0.0222	2.5	15.0
	118987	0.0218	0.0212	2.8	6.3
	137356	0.0209	0.0207	1.2	5.0
	150598	0.0205	0.0204	0.5	4.2
0.0574	69275	0.0245	0.0248	-1.2	14.2
	95630	0.0233	0.0227	2.7	15.0
	119685	0.0221	0.0215	2.7	5.8
	138249	0.0211	0.0209	1.1	4.5
	159922	0.0204	0.0203	0.2	3.9

บทที่ 5

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

5.1 บทนำ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา และ สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้น เพื่อใช้วิเคราะห์ผลกระทบเนื่องจากการรั่วไหลตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ และ ผลจากการถ่ายเทความร้อนว่ามีผลต่อความดันลดยังไร โดยในส่วนของ การถ่ายเทความร้อนนั้น ได้แยกคิดการสูญเสียความร้อนออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การสูญเสียความร้อนผ่านผนังท่อ และ การสูญเสียความร้อนเนื่องจากการรั่วไหลของท่อลม ทั้งนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมีข้อสมมติฐานดังต่อไปนี้

- ก. การไหลเป็นแบบแบบอัดตัวไม่ได้
- ข. การไหลอยู่ในสภาวะคงตัว
- ค. สภาพการไหลเป็นแบบปั่นป่วน

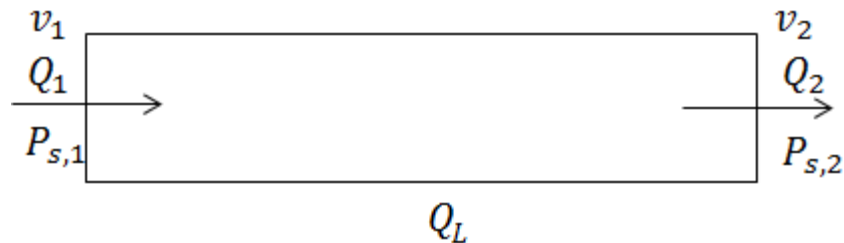
ซึ่งจาก Sadik et al [19] ได้กำหนดขอบเขตของตัวเลขเรย์โนลด์ให้อยู่ในช่วง 25,000 – 1,200,000

โดยในบทนี้จะกล่าวถึงสมการต่างๆ ที่ต้องใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อให้บรรลุถึงวัตถุประสงค์ดังกล่าวข้างต้นพร้อมทั้งแสดงขั้นตอนการคำนวณของสมการต่างๆ เหล่านั้นเพื่อนำไปสู่การทำนายความดันลดย ที่เป็นผลมาจากการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อน

แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำไปประยุกต์ใช้กับการออกแบบท่อลมด้วยวิธี Static Regain ที่คำนึงถึงการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อน โดยนำผลกระทบจากการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นในระบบท่อลม ซึ่งส่งผลกระทบต่อความดันในระบบท่อลมไปพิจารณาร่วมกับความเสียดทานที่เกิดขึ้นในระบบท่อลมปกติซึ่งส่งผลกระทบต่อความดันในระบบท่อลมเช่นเดียวกัน

5.2 แนวคิดในการพัฒนาแบบจำลอง และ สมการหลักในแบบจำลอง

5.2.1 แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม



รูปที่ 5 - 1 แบบจำลองท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บ

แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บเป็นแบบจำลองที่ใช้สำหรับวิเคราะห์ท่อตรงที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความยาว โดยในการวิเคราะห์นั้นจะรวมผลกระทบของการรั่วไหลตามรอยต่อ และ ตะเข็บ และ พิจารณาผลของการถ่ายเทความร้อนเข้าไปในแบบจำลอง โดยมีสมการหลักที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

5.2.1.1 สมการหลักที่เกี่ยวข้อง

1. สมการอนุรักษ์มวล

$$Q_1 = Q_2 + Q_{L,1-2} \quad (5.1)$$

โดย Q_1, Q_2 คือ อัตราการไหลที่หน้าตัด 1 และ 2 ตามลำดับ [m^3/s]

$Q_{L,1-2}$ คือ อัตราการรั่วไหลของอากาศในช่วง 1 - 2 [m^3/s]

2. สมการทำนายอัตราการรั่วไหลของอากาศ(Q_L)

สมการ 3.51

$$Q_L = C_l \left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_{ref}} \right)^n \times A_s \times 5.077 \times 10^{-5}$$

โดย ΔP_s คือ ผลต่างของความดันสถิตภายในท่อลมกับความดันบรรยากาศ ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{P_{s,1} + P_{s,2}}{2} - P_{atm}$

ΔP_{ref} คือ ความดันอ้างอิงมีค่า 250 Pa
 n คือ ตัวเลขยกกำลังมีค่า 0.65
 C_l คือ Leakage Class มีค่า 22
 โดย ค่า n และ C_l มีที่มาจากผลการทดลองในหัวข้อ 4.5

3. สมการพลังงาน

$$P_{s,1} + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \frac{Q_2}{Q_1}\left(P_{s,2} + \frac{1}{2}\rho v_2^2\right) + \frac{1}{2}f\frac{L}{D}\rho v_1^2 - \frac{q_{D,1-2}}{Q_1} + \rho\left(\frac{Q_2}{Q_1}u_2 - u_1\right) - \frac{q_{L,1-2}}{Q_1} \quad (5.2)$$

โดย $P_{s,1}, P_{s,2}$ คือ ความดันสถิตที่หน้าตัด 1 และ 2 [Pa]
 $q_{D,1-2}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ [W]
 $q_{L,1-2}$ คือ อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการรั่วไหล [W]
 u_1, u_2 คือ พลังงานภายในต่อหน่วยมวลที่หน้าตัด 1 และ 2 [J/kg]
 f คือ Friction Factor หาได้จากสมการ 4.5

สมการ 4.5

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} + 0.0133 e^{-7 \times 10^{-6} Re}$$

5.2.1.2 การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากมวลที่รั่วไหล

อัตราการการถ่ายเทความร้อนจากมวลที่รั่วไหล ($q_{L,1-2}$) สามารถหาได้จากสมการที่ 5.3

$$q_{L,1-2} = \rho Q_L c_p \left(T_{\infty,o} - \frac{T_1 + T_2}{2} \right) \quad (5.3)$$

โดย c_p คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ความดันคงที่ ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของสมภายในท่อ [J/kg.K]

5.2.1.3 การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ

ในการคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ ($\dot{q}_{D,1-2}$) จะใช้หลักความต้านทานเชิงความร้อนในการคำนวณ โดยแบ่งความต้านทานเชิงความร้อนออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ความต้านทานเชิงความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนผ่านผนังท่อ, ความต้านทานเชิงความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน, ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ

1. ความต้านทานเชิงความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนผ่านผนังท่อ

จากแนวคิดในการสร้างแบบจำลองที่จะพิจารณาท่อรูปทรงอื่นๆ ให้เทียบเท่ากับท่อทรงกระบอก ดังนั้น การหาค่าความต้านทานเชิงความร้อนในส่วนนี้จะใช้สมการที่ 3.27 ในการคำนวณ

สมการ 3.27

$$R_D = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi L k_D}$$

โดย r_o, r_i คือ รัศมีภายนอก และ ภายในของท่อลม [m]
 k_D คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของท่อ [W/m.K]

2. ความต้านทานเชิงความร้อนเนื่องจากการนำความร้อนผ่านฉนวน

ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนจะพิจารณาให้เป็นความต้านทานเชิงความร้อนของทรงกระบอก โดยรัศมีภายนอกของฉนวนจะเท่ากับรัศมีภายนอกของท่อลมรวมกับความหนาของฉนวน และ รัศมีภายในของฉนวนจะเท่ากับรัศมีภายนอกของท่อลมที่ถูกท่อหุ้ม เมื่อแทนค่ารัศมี และ ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวนลงสมการ 3.27 จะได้

$$R_{Ins} = \frac{\ln([r_o+b]/r_o)}{2\pi L k_{Ins}} \quad (5.4)$$

โดย b คือ ความหนาของฉนวน [m]
 k_{Ins} คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวน [W/m.K]

3. ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ

การหาความต้านทานเชิงความร้อนในส่วนนี้จะเริ่มจากการคำนวณหาตัวเลขนัสเซิลส์ โดยใช้สมการ 3.12 และ 3.13 โดยค่า Friction Factor ในสมการ 3.13 สามารถหาได้จากสมการ 4.5

$$\text{สมการ 3.12} \quad Nu_{sm} = \frac{(f_{sm}/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_{sm}/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} (1 + (D/L)^{2/3})$$

$$\text{โดย} \quad f_{sm} = (0.79 \log Re - 1.64)^{-2}$$

$$\text{สมการ 3.13} \quad \frac{Nu}{Nu_{sm}} = \left(\frac{f}{f_{sm}}\right)^n$$

$$\text{โดย} \quad n = 0.68 Pr^{0.215} \quad \text{เมื่อ} \quad Pr \leq 6$$

$$n = 1 \quad \text{เมื่อ} \quad Pr > 6$$

$$\text{สมการ 4.5} \quad f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} + 0.0133 e^{-7 \times 10^{-6} Re}$$

เมื่อได้ตัวเลขนัสเซิลส์จะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อ (h_i) ได้ด้วยสมการ 5.5

$$h_i = \frac{k_{air,i} Nu_i}{D} \quad (5.5)$$

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายในท่อจะสามารถคำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อได้ด้วยสมการ 5.6

$$R_{h,i} = \frac{1}{2\pi r_i L h_i} \quad (5.6)$$

4. ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ

การหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อจะเริ่มต้นด้วยการคำนวณหาตัวเลขนัสเซลส์ ด้วยสมการ 3.22

$$\text{สมการ 3.22} \quad Nu = \left\{ 0.60 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.559/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2$$

โดยตัวเลขเรย์ลีสามารถหาได้จากสมการ 3.7

$$\text{สมการ 3.7} \quad Ra = \frac{g\beta(T_{Ins,o} - T_{\infty,o})D^3}{\nu\alpha}$$

โดย $T_{\infty,o}$ ในงานวิจัยนี้จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

เมื่อได้ตัวเลขนัสเซลส์จะสามารถคำนวณหาสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อ (h_o) ได้ด้วยสมการ 5.7

$$h_o = \frac{k_{air,o}Nu_o}{D_o} \quad (5.7)$$

เมื่อได้ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนภายนอกท่อจะสามารถคำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อได้ด้วยสมการ 5.8

$$R_{h,o} = \frac{1}{2\pi r_o L h_o} \quad (5.8)$$

5. ความต้านทานเชิงความร้อนรวม

ความต้านทานเชิงความร้อนรวมสามารถหาได้จากสมการ 5.9

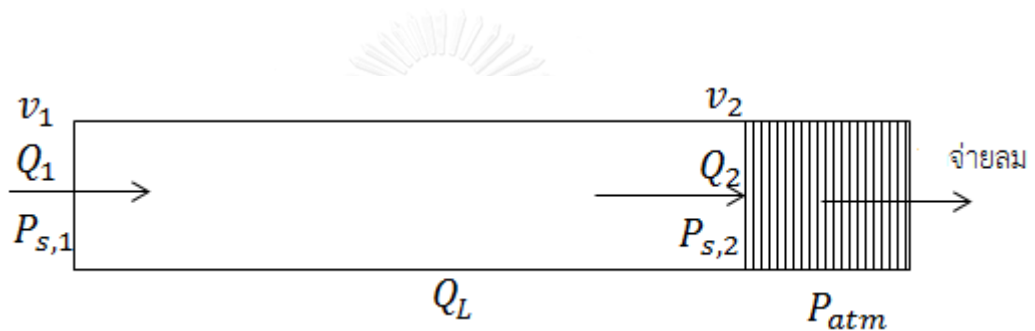
$$R_{tot} = R_D + R_{Ins} + R_{h,i} + R_{h,o} \quad (5.9)$$

เมื่อได้ความต้านทานเชิงความร้อนรวมจะสามารถคำนวณหาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังได้จากสมการ 5.10

$$\dot{q}_{D,1-2} = \frac{T_{\infty,o} - ((T_1+T_2)/2)}{R_{tot}} \quad (5.10)$$

โดย $T_2 = \frac{2T_{\infty,o} + T_1(y-1)}{y+1}$ และ $y = 2R_{tot}\rho\pi \frac{D^2}{4} c_p \left(\frac{v_1+v_2}{2}\right)$

5.2.2 แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม ที่มีการจ่ายลมสู่บริเวณปรับอากาศ



รูปที่ 5 - 2 แบบจำลองท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บ ที่มีการจ่ายลม

แบบจำลองนี้จะใช้สำหรับการวิเคราะห์ท่อตรงที่จ่ายลมเข้าบริเวณที่มีการปรับอากาศ โดยจะคำนึงความดันสถิต และ ความเร็ว ที่ปลายทางท่อลมเพื่อให้สามารถส่งลมเย็นให้มีความเร็ว และ ระยะที่เหมาะสมเข้าสู่บริเวณปรับอากาศ โดยมีสมการหลักที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

5.2.2.1 สมการหลักในแบบจำลอง

1. สมการอนุรักษ์มวล

สมการ 5.1
$$Q_1 = Q_2 + Q_{L,1-2}$$

2. สมการทำนายอัตราการรั่วไหลของอากาศ(Q_L)

สมการ 3.51
$$Q_L = C_l \left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_{ref}}\right)^n \times A_s \times 5.077 \times 10^{-5}$$

3. สมการพลังงาน

$$\text{สมการ 5.2} \quad P_{s,1} + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = \frac{Q_2}{Q_1} \left(P_{s,2} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 \right) + \frac{1}{2} f \frac{L}{D} \rho v_1^2 - \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_1} \\ + \rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right) - \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_1}$$

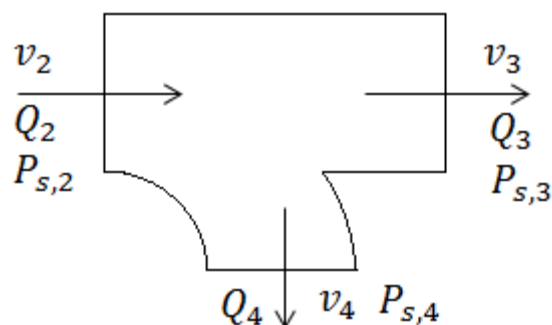
4. สมการระยะส่งลม (Throw)

$$\text{สมการ 3.43} \quad T_{50} = \frac{0.187}{v_T^2} \sqrt{Q_2 \bar{C}_d^3 \sqrt{\left(\frac{2P_{gs,2}}{\rho} \right)^3}}$$

โดย	\bar{T}_{50}	คือ	ระยะส่งลมเฉลี่ย [m] ที่ความเร็วปลายทาง 50 FPM
	v_T	คือ	ความเร็วปลายทางที่บริเวณปรับอากาศ (50 FPM หรือ 0.25 m/s)
	\bar{C}_d	คือ	สัมประสิทธิ์การจ่ายมีค่าประมาณ 0.5 (อ้างอิงงานวิจัย การระบายอากาศด้วยวิธีธรรมชาติ, ญัฐวุฒิ วลัยกนก, 2544[15])
	$P_{gs,2}$	คือ	ความดันเกจสถิตที่คร่อมหัวจ่าย [Pa]

การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนจากมวลที่รั่วไหล ($\dot{q}_{L,1-2}$) และ การหาอัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ ($\dot{q}_{D,1-2}$) จะใช้สมการเช่นเดียวกับหัวข้อ 5.2.1.2 และ 5.2.1.3 ตามลำดับ

5.2.3 แบบจำลองสำหรับข้อต่อ



รูปที่ 5 - 3 แบบจำลองข้อต่อแยก

ข้อต่อแยกมีหน้าที่เป็นตัวเชื่อมในเส้นทางการไหลจากท่อตรงไปท่อสาขา และ ไปท่อตรงท่อนถัดไป รวมทั้งมีหน้าที่ที่สำคัญ คือ เพิ่มความดันสถิตให้มีค่าเพียงพอที่จะเอาชนะความดันลดจากแรงเสียดทาน จากการรั่วไหล และ จากการถ่ายเทความร้อน รวมทั้งต้องทำให้อากาศเหลือความดันสถิตเพียงพอเพื่อให้อากาศสามารถถูกส่งไปยังระบบปรับอากาศได้ในระยะที่เหมาะสม

5.2.3.1 แบบจำลองข้อต่อแยก ในเส้นทางการไหล 2 – 3

ก.1 สมการหลักในการสร้างแบบจำลองข้อต่อในเส้นทางการไหล 2 – 3

ก.1.1. สมการอนุรักษ์มวล

$$Q_2 = Q_4 + Q_3 \quad (5.11)$$

โดย Q_2 , Q_3 และ Q_4 คือ อัตราการไหลที่หน้าตัด 2, 3 และ 4 ตามลำดับ [m^3/s]

ก.1.2. สมการพลังงาน

เนื่องจากข้อต่อสั้น ดังนั้น จึงพิจารณาว่าไม่มีการค้ำเนินรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ สมการพลังงานจึงมีรูปแบบ คือ

$$P_{s,2} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = P_{s,3} + \frac{1}{2}\rho v_3^2 + \frac{1}{2}\rho C_{2-3} v_2^2 \quad (5.12)$$

โดย $P_{s,2}$, $P_{s,3}$ คือ ความดันสถิตที่หน้าตัด 2 และ 3 [Pa]
 C_{2-3} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองใช้สมการ 3.40 ในการคำนวณ

สมการ 3.40

$$C_{2-3} = 0.4 \left(1 - \frac{v_3}{v_2}\right)^2$$

5.2.3.2 แบบจำลองข้อต่อแยก ในเส้นทางการไหล 2 – 4 (พิจารณารูปที่ 5 – 3)

ข.1. สมการหลักในการแบบจำลองข้อต่อแยก ในเส้นทางการไหล 2 – 4

สมการพลังงาน

เนื่องจากข้อต่อสั้น ดังนั้น จึงพิจารณาว่าไม่มีการคำนึงถึงการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ ดังนั้นสมการพลังงานจึงมีรูปแบบ คือ

$$P_{s,2} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = P_{s,4} + \frac{1}{2}\rho v_4^2 + \frac{1}{2}\rho C_{2-4} v_2^2 \quad (5.13)$$

โดย $P_{s,2}, P_{s,4}$ คือ ความดันสถิตที่หน้าตัด 2 และ 4 [Pa]
 C_{2-4} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองใช้สมการ 3.39 ในการคำนวณ

สมการ 3.39

$$C_{2-4} = A' \left[0.34 + \left(\frac{v_4}{v_2} \right)^2 \right]$$

โดย A' มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $v_4/v_2 \leq 0.8$ และ A' มีค่าเท่ากับ 0.9 เมื่อ $v_4/v_2 > 0.8$

5.2.3.3 แบบจำลองการไหลผ่านข้องอ

แบบจำลองนี้ใช้ในกรณีที่เส้นทางการไหลมีข้องอ

ค.1. สมการหลักในการแบบจำลองข้องอ

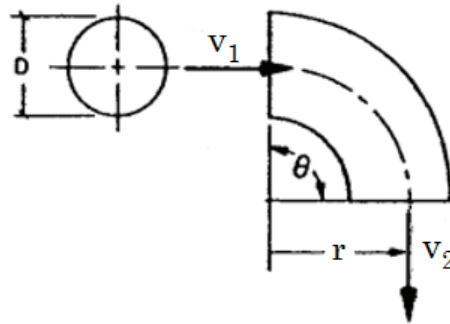
สมการพลังงาน

เนื่องจากข้องอนั้นสั้น จึงพิจารณาว่าไม่มีการคำนึงถึงการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อ ดังนั้น สมการพลังงานจึงมีรูปแบบเช่นเดียวกับสมการ 5.12 คือ

สมการ 5.12
$$P_{s,1} + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_{s,2} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \frac{1}{2}\rho C_{1-2} v_1^2$$

โดย $P_{s,1}, P_{s,2}$ คือ ความดันสถิตที่หน้าตัด 1 และ 2 [Pa]
 C_{1-2} คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรองใช้สมการ 3.41 และ ตารางที่ 3 - 3 และ 3 - 4 ในการคำนวณ โดยในทางปฏิบัติมักใช้ข้องอ 90 องศา และมีค่า $r/D = 1$ (อ้างอิง จาก Principles for Air Conditioning Practice by Wilbert F. Stoecker)

สมการ 3.41
$$C_{1-2} = KC'_o$$



รูปที่ 3 - 14 แสดงการไหลผ่านข้องอ (ASHRAE Handbook, 2009[14])

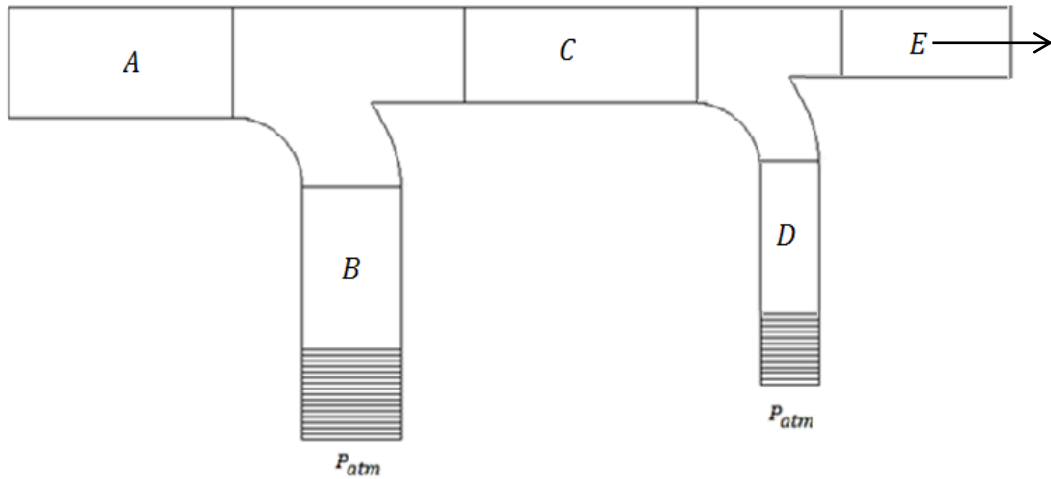
ตาราง 3 - 3 ค่า C'_o สำหรับการไหลผ่านข้องอ (ASHRAE Handbook, 2009[14])

Coefficients for 90° Elbows						
r/D	0.5	0.75	1.0	1.5	2.0	2.5
C'_o	0.71	0.33	0.22	0.15	0.13	0.12

ตาราง 3 - 4 ค่า K สำหรับการไหลผ่านข้องอ (ASHRAE Handbook, 2009[14])

θ , degrees	0	20	30	45	60	75	90	110	130	150	180
K_θ	0	0.31	0.45	0.60	0.78	0.90	1.00	1.13	1.20	1.28	1.40

5.3 การใช้แบบจำลองวิเคราะห์ระบบท่อลม



รูปที่ 5 - 4 ระบบท่อลม

การวิเคราะห์ระบบท่อลมจะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ท่อตรง A (ท่อที่ต่อพัดลม), ข้อต่อ A-B และ ท่อตรง B โดยจะทำการแก้แบบจำลองทั้งสามไปพร้อมๆกัน ผลจากการแก้แบบจำลองจะทำให้สามารถหา $P_{s,1}, P_{s,2}, v_2, Q_2$ ของท่อ A และ สามารถหา $P_{s,2}, v_2$ ของท่อ B ได้ จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ในการคำนวณแบบจำลองข้อต่อ A – C ซึ่งจะมีหน้าที่เพิ่มความดันสถิตให้มีความเท่ากับ $P_{s,1}$ ของท่อ A โดยผลจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง A – C จะทำให้ได้ความเร็วขาเข้าท่อ C หรือ v_1 ของท่อ C และ ทำให้สามารถหาขนาดของท่อ C ได้ จากนั้นจะใช้แบบจำลองท่อตรงเพื่อวิเคราะห์ท่อตรง C ซึ่งผลจากการคำนวณจะทำให้สามารถหา $P_{s,2}, v_2, Q_2$ ของท่อ C จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณแบบจำลองข้อต่อ C- D และ ท่อตรง D และ คำนวณแบบจำลองข้อต่อ C – E และ ท่อตรง E จะทำให้สามารถหาขนาดของท่อตรงแต่ละท่อนได้ รวมทั้งสามารถวิเคราะห์หาความดันสถิตขาออกของท่อแต่ละท่อนได้ เมื่อทำการคำนวณเช่นนี้ไปทั้งระบบท่อลมจะสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ความดันสถิตขาออก และ ความเร็วของท่อแต่ละท่อนได้ทั้งระบบได้

5.3.1 ลำดับการคำนวณท่อตรงท่อนแรก (ท่อ A หรือ ท่อตรงที่ต่อจากพัดลม), ข้อต่อแยกเส้นทางไหล 2 – 4 (ข้อต่อ A – B) และ ท่อตรงที่มีการจ่ายลม (ท่อ B)

1. กำหนดพารามิเตอร์ ได้แก่

$$Q_1, Q_4, L, T_1, b, T_{\infty,0}, k_D, \mu_{air}, \rho_{air}, c_{p,air}, c_{v,air}, k_{ins}, k_{air}, \beta_{air}, \alpha_{air}, \nu_{air}, \epsilon$$

โดยค่าคุณสมบัติต่างๆของอากาศสามารถหาได้จากตาราง ข - 3 ในภาคผนวก ข

$$2. \text{ คำนวณหาค่า } Pr \text{ จากสมการ } Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

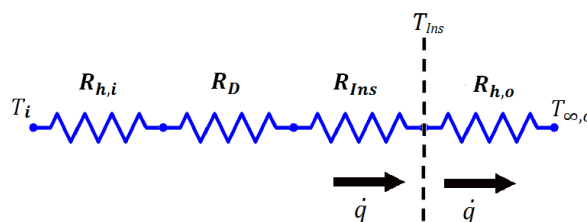
3. พิจารณาท่อ A เลือกค่า v_1 โดยคำนึงถึงระดับความเข้มเสียง และการสั่นสะเทือน และ เนื่องจาก Q_1 เป็นค่าที่ทราบอยู่แล้วจึงคำนวณหา D_1 ได้จากสมการ $D_1 = \sqrt{4Q_1/\pi v_1}$ และ เนื่องจากท่อตรงมีขนาดคงที่ ดังนั้น $D_1 = D_2$

4. พิจารณาท่อ A เนื่องจากทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ ,ทราบความหนาของท่อลม และ ทราบความหนาของฉนวน (b) (ในทางปฏิบัตินั้นมักใช้ความหนาของฉนวน คือ 1 นิ้ว) จึงสามารถคำนวณหา R_D และ R_{Ins} ได้จากสมการ 3.27 และ 5.4

5. พิจารณาท่อ A เนื่องจากทราบค่า D, L และ v_1 จึงคำนวณหา Re ได้ เมื่อทราบค่า Re จะสามารถหาค่า f_{sm} ได้ และสามารถหาค่า f ได้จากสมการ 4.5 และ เนื่องจากทราบค่า Nu_{sm} จะสามารถคำนวณหา Nu_i จากสมการ 3.13 และ หา h_i และ $R_{h,i}$ ได้จากสมการ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ

6. พิจารณาท่อ A เนื่องจากยังไม่ทราบค่าอุณหภูมิที่ผิวนอกของฉนวน(T_{Ins}) ดังนั้นจึงพิจารณาว่าความร้อนที่ถ่ายเทจากลมภายในท่อผ่านกระบวนการพาความร้อนจากในท่อ จากนั้นผ่านการนำความร้อนผ่านผนังท่อ และ ฉนวน จะมีค่าเท่ากับความร้อนที่ถ่ายเทด้วยกระบวนการพาความร้อนภายนอกท่อ ดังรูปที่ 5 - 5 จากหลักการดังกล่าวจะสามารถสร้างสมการเพื่อหาค่า T_{Ins} ได้ดังแสดงในสมการที่ 5.14

$$\frac{T_1 - T_{Ins}}{R_{h,i} + R_D + R_{Ins}} = \frac{T_{Ins} - T_{\infty,o}}{\frac{1}{2\pi r_o L h_o}} \quad (5.14)$$



รูปที่ 5 - 5 แสดงความร้อนที่ถ่ายเทผ่านการพาความร้อนในท่อ ผ่านการนำความร้อนผ่านผนังท่อ การนำความร้อนผ่านฉนวน และ การพาความร้อนภายนอกท่อ

โดยหากพิจารณาสมการที่ 5.7 ,สมการที่ 3.22 และ 3.7 จะพบว่าค่า h_o เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับ T_{Ins} และ เนื่องจาก T_1 และ $T_{\infty,o}$ เป็นสิ่งที่ทราบค่าจากเงื่อนไขของการออกแบบ และ R_{Ins} , R_D และ $R_{h,i}$ เป็นสิ่งที่หาค่าได้จากลำดับการคำนวณข้อที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ดังนั้นสมการ 5.14 จึงเป็นสมการที่ไม่ทราบค่า 1 ตัวแปร คือ T_{Ins} จึงสามารถแก้สมการเพื่อหา T_{Ins} ได้

เมื่อทราบค่า T_{Ins} จะสามารถคำนวณหา Ra ได้จากสมการ 3.7 และ เมื่อแทนค่า Ra ลงสมการ 3.22 จะสามารถหาค่า Nu_o และ เนื่องจากทราบค่า D_o จะสามารถคำนวณหา h_o และ $R_{h,o}$ ได้จากสมการ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ

7. หา R_{tot} ของท่อ A จากสมการ 5.9

8. พิจารณา \dot{q}_D ของท่อ A จากสมการ 5.10 เนื่องจากยังไม่ทราบค่า T_2 โดย T_2 เป็นฟังก์ชันของ y และ ค่า y เป็นฟังก์ชันของ v_2 ดังนั้น พจน์ \dot{q}_D จึงเป็นฟังก์ชันของ v_2 และ เนื่องจาก $v_2 = \frac{4Q_2}{\pi D^2}$ และ จากสมการ 5.1 จะพบว่า Q_2 เป็นฟังก์ชันของ Q_L และ จากสมการ 3.51 พบว่า Q_L เป็นฟังก์ชันของ $P_{s,1}, P_{s,2}$ ดังนั้น \dot{q}_D จึงเป็นฟังก์ชันของ $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A$ หรือ เขียนได้เป็น $\dot{q}_D((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A)$

9. พิจารณาพจน์ $\rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right)$ ของท่อ A จากสมการ 5.2 โดยพจน์ดังกล่าวสามารถหาได้โดยอาศัยสมการ $u = \int_{T_{ref}}^T c_v dT$ ซึ่ง $T_{ref} = T_{\infty,o}$ ($T_{\infty,o}$ มีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม) ดังนั้น

$$\rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right) = \rho c_v \left(\frac{Q_2}{Q_1} (T_2 - T_{\infty,o}) - (T_1 - T_{\infty,o}) \right) \quad (5.15)$$

โดย c_v คือ ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ปริมาตรคงที่ที่อุณหภูมิเฉลี่ยของลมภายในท่อ

แต่เนื่องจาก Q_2 และ T_2 เป็นฟังก์ชันของ $P_{s,1}, P_{s,2}$ ดังนั้น พจน์ $\rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right)$ จึงเขียนในรูปโดเมนของ $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A$ ได้เป็น $\rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right) ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A)$

10. พิจารณาพจน์ $\dot{q}_{L,1-2}$ ของท่อ A ด้วยสมการ 5.3 เนื่องจาก Q_L และ T_2 เป็นฟังก์ชันของ $P_{s,1}, P_{s,2}$ ดังนั้น $\dot{q}_{L,1-2}$ จึงเป็นฟังก์ชันของ $P_{s,1}, P_{s,2}$ เขียนได้เป็น $\dot{q}_{L,1-2}((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A)$ ดังนั้น จากสมการ 5.2 จึงเขียนพจน์ต่างๆ ในรูปโดเมน $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A$ ได้เป็น

$$\begin{aligned} (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_1^2)_A &= \frac{Q_2((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A)}{Q_1} \left((P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho(v_2^2)_A \right) + \frac{1}{2}f \frac{L}{D} \rho(v_1^2)_A \\ &\quad - \frac{\dot{q}_{D,1-2}((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A)}{Q_1} + \rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right) ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A) \\ &\quad - \frac{\dot{q}_{L,1-2}((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A)}{Q_1} \end{aligned} \quad (5.16)$$

จากขั้นตอนที่ 1 ถึง 10 จะพบว่ายังมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า 2 ตัว ได้แก่ $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A$ แต่มีเพียง 1 สมการ ดังนั้น จึงยังไม่สามารถแก้สมการได้ จึงต้องพิจารณาแบบจำลองข้อต่อแยกเส้นทางการไหล 2 - 4 (ข้อต่อ A - B)

11. พิจารณาสมการ 5.13 กำหนดให้ $P_{s,4} = (P_{s,1})_A$ และ $v_4 = (v_1)_B$ ดังนั้น สมการ 5.13 จึงจัดรูปได้เป็น

$$(P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho(v_2^2)_A = (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_1^2)_B + \frac{1}{2}\rho C_{2-4}(v_2^2)_A \quad (5.17)$$

เนื่องจาก $(v_2)_A$ เป็นฟังก์ชันของ $P_{s,1}$ และ $P_{s,2}$ ดังนั้น จากสมการ 5.16 และ 5.17 จึงมีตัวแปรไม่ทราบค่า คือ $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A$ และ $(v_1)_B$ แต่มีเพียง 2 สมการ จึงยังไม่สามารถแก้ได้ จึงต้องใช้แบบจำลองท่อตรงที่มีการจ่ายลม (ท่อ B) เข้ามาช่วยในการแก้สมการ

12. พิจารณาสมการ 5.2 กับท่อตรง B โดยกำหนดให้ $P_{s,1} = (P_{s,1})_A$ จะพบว่า มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B$ และ $(v_1)_B$ หรือ มีรูปแบบตามสมการ 5.18

$$\begin{aligned} (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_1^2)_B &= \frac{Q_2((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B)}{Q_1} \left((P_{s,2})_B + \frac{1}{2}\rho(v_2^2)_B \right) + \frac{1}{2}f \frac{L}{D} \rho(v_1^2)_B \\ &\quad - \frac{\dot{q}_{D,1-2}((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B)}{Q_1} + \rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right) ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B) \\ &\quad - \frac{\dot{q}_{L,1-2}((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B)}{Q_1} \end{aligned} \quad (5.18)$$

13. พิจารณาสมการ 3.43 เนื่องจากทราบระยะ T_{50} จากสภาพของบริเวณที่ต้องการปรับอากาศ และ Q_{2B} เป็นฟังก์ชันของ $(P_{s,1})_B, (P_{s,2})_B$ และ เนื่องจาก $(P_{s,1})_B = (P_{s,1})_A$ ดังนั้น สมการ 3.43 จึงมีเพียง 2 ตัวแปรที่ไม่ทราบค่า คือ $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B$ ซึ่งสามารถจัดรูปสมการ 3.43 ให้อยู่ในรูป $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B$ ได้เป็น

$$T_{50} = \frac{0.187}{v_T^2} \sqrt{Q_2((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B) \bar{C}_d^3 \sqrt{\left(\frac{2((P_{s,2})_B - P_{atm})}{\rho}\right)^3}} \quad (5.19)$$

จากขั้นตอนที่ 1 ถึง 13 พบว่ามีตัวแปรที่ไม่ทราบค่า ได้แก่ $(P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A, (P_{s,2})_B$ และ $(v_1)_B$ โดยตัวแปรทั้ง 4 สามารถ แก้ได้ด้วยระบบสมการ 5.16, 5.17, 5.18 และ 5.19 โดย $(P_{s,1})_A$ ที่ได้นั้นจะมีค่าเท่ากับความดันสถิตของพัดลม

5.3.2 ลำดับการคำนวณข้อต่อแยก เส้นทางไหล 2 - 3 (ข้อต่อ A - C)

1. พารามิเตอร์ที่กำหนด ได้แก่ ρ_{air}
2. เนื่องจากทราบค่า Q_4 จากเงื่อนไขของการออกแบบ และ ทราบค่า $(Q_2)_A$ จากหัวข้อ 5.3.1 จึงคำนวณหา Q_3 ได้จากสมการ 5.11
3. จากสมการ 5.12 กำหนดให้ $P_{s,3} = (P_{s,1})_A$ รวมทั้งค่า $P_{s,2}$ และ v_2 สามารถคำนวณได้จากหัวข้อ 5.3.1 ทำให้สมการ 5.12 เป็นสมการ 1 ตัวแปร คือ v_3 ซึ่งสามารถแก้สมการ 5.19 เพื่อหา v_3 ได้

$$P_{s,2} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 = (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho v_3^2 + \frac{1}{2}\rho C_{2-3} v_2^2 \quad (5.19)$$

4. คำนวณหาขนาดของท่อ C ด้วยสมการ $D_C = \sqrt{4Q_3/\pi v_3}$

5.3.3 ลำดับการคำนวณแบบจำลองท่อตรง C

1. กำหนดพารามิเตอร์ ได้แก่

$$L, T_1, b, T_{\infty,0}, k_D, \mu_{air}, \rho_{air}, c_{p,air}, c_{v,air}, k_{ins}, k_{air}, \beta_{air}, \alpha_{air}, \nu_{air}, \epsilon$$

โดยค่าคุณสมบัติต่างๆของอากาศสามารถหาได้จากตาราง ข - 3 ในภาคผนวก ข

2. คำนวณหาค่า Pr จากสมการ $Pr = \frac{\mu C_p}{k}$

3. เนื่องจากทราบค่า D_C จากหัวข้อ 5.3.2 ,ทราบความหนาของท่อลม และ ทราบความหนาของฉนวน (b) ในทางปฏิบัตินั้นมักใช้ความหนาของฉนวน คือ 1 นิ้ว) จึงสามารถใช้สมการ 3.27 และ 5.4 คำนวณหาค่า R_D และ R_{Ins} ได้ตามลำดับ

4. เนื่องจากทราบค่า $(v_1)_C$ จึงคำนวณหา Re ได้ และสามารถหาค่า f_{sm} ได้ และสามารถหาค่า f ได้จากสมการ 4.5 และ เนื่องจากทราบค่า Nu_{sm} จะสามารถคำนวณหา Nu_i จากสมการ 3.13 และ คำนวณหาค่า h_i และ $R_{h,i}$ ได้จากสมการ 5.5 และ 5.6 ตามลำดับ

5. เนื่องจากยังไม่ทราบค่าอุณหภูมิที่ผิววนอกของฉนวน (T_{Ins}) ดังนั้น จึงใช้สมการ 5.14 ในการคำนวณหา T_{Ins}

สมการ 5.14

$$\frac{T_i - T_{Ins}}{R_{h,i} + R_D + R_{Ins}} = \frac{T_{Ins} - T_{\infty,0}}{\frac{1}{2\pi r_o L h_o}}$$

เมื่อทราบค่า T_{Ins} จะสามารถคำนวณหา Ra ได้จากสมการ 3.7 และ เมื่อแทนค่า Ra ลงสมการ 3.22 จะสามารถหาค่า Nu_o และ เนื่องจากทราบค่า D_o จะสามารถคำนวณหา h_o และ $R_{h,o}$ ได้จากสมการ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ

6. หา R_{tot} ของท่อ C จากสมการ 5.9

7. พิจารณา \dot{q}_D , $\rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right)$ และ $\dot{q}_{L,1-2}$ ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นฟังก์ชันของ $P_{s,1}, P_{s,2}$ แต่เนื่องจาก $P_{s,1} = (P_{s,1})_A$ ซึ่งคำนวณได้จากหัวข้อ 5.3.1 ดังนั้น \dot{q}_D , $\rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - \right.$

u_1) และ $\dot{q}_{L,1-2}$ จึงเป็นฟังก์ชันของ $P_{s,2}$ เพียงตัวเดียว หรือ เขียนได้เป็น $\dot{q}_D((P_{s,2})_C)$,เป็น $\rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right) ((P_{s,2})_C)$ และ $\dot{q}_{L,1-2}((P_{s,2})_C)$

8. จากขั้นตอนที่ 1 ถึง 7 พบว่าในสมการ 5.2 มีตัวแปรไม่ทราบค่า 1 ตัวแปร ได้แก่ $(P_{s,2})_C$ ซึ่งสามารถแก้สมการเพื่อหา $(P_{s,2})_C$ ได้

5.3.4 ลำดับการคำนวณข้อต่อแยก เส้นทางไหล 2 - 4 (ข้อต่อ C - D)

1. พารามิเตอร์ที่กำหนด ได้แก่ ρ_{air}
2. จากสมการ 5.12 กำหนดให้ $P_{s,4} = (P_{s,1})_A$ รวมทั้งค่า $(P_{s,2})_C$ และ $(v_2)_C$ สามารถคำนวณได้จากหัวข้อ 5.3.3 ทำให้สมการ 5.13 เป็นสมการ 1 ตัวแปร คือ v_4 ซึ่งสามารถแก้สมการ 5.20 เพื่อหา v_4 ได้

$$P_{s,2} + \frac{1}{2} \rho v_2^2 = (P_{s,1})_A + \frac{1}{2} \rho v_4^2 + \frac{1}{2} \rho C_{2-4} v_2^2 \quad (5.20)$$

3. คำนวณหาขนาดของท่อ D ด้วยสมการ $D_D = \sqrt{4Q_4/\pi v_4}$

จากนั้นจะทำการคำนวณแบบจำลองท่อตรง D ซึ่งในแบบจำลองจะมีตัวแปรไม่ทราบค่าเพียง 1 ตัว คือ $P_{s,2}$ และมีสมการ 5.2 หรือ สมการพลังงาน 1 สมการ จึงสามารถแก้สมการหา $P_{s,2}$ ได้ จากนั้นจะใช้แบบจำลองข้อต่อแยก และ แบบจำลองท่อตรงคำนวณกับท่อลมทั้งระบบ ทำให้สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ,ความเร็วของลมในแต่ละท่อ รวมทั้งสามารถคำนวณหาความดันสถิตขาออกของท่อแต่ละท่อนได้

5.3.5 ลำดับการคำนวณข้องอ

1. พารามิเตอร์ที่กำหนด ได้แก่ ρ_{air}
2. จากสมการ 5.12 เนื่องจากขนาดข้องอไม่มีการเปลี่ยนแปลง และ ข้องอสั้นจึงไม่คำนึงถึงการรั่วไหล ดังนั้น ความเร็วลมขาเข้าข้องอเท่ากับความเร็วลมขาออกจากข้องอ $v_1 = v_2$ รวมทั้งค่าความดันสถิตขาเข้าข้องอ $P_{s,1}$ จะเท่ากับค่าความดันสถิตขาออกจากท่อตรงที่ต่อเข้าข้องอ รวมทั้งค่า C_{1-2} สามารถหาได้เนื่องจากในทางปฏิบัติมักใช้ข้องอ 90 องศา และ มีค่า $r/D = 1$ จะได้

$C_{1-2} = 0.22$ ทำให้สมการ 5.12 ถูกจัดรูปเป็นสมการ 5.21 ซึ่งเป็นสมการ 1 ตัวแปร คือ ความดันสถิตขาออก $P_{s,2}$ ซึ่งสามารถแก้สมการ 5.21 เพื่อหา $P_{s,2}$ ได้

$$P_{s,1} + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_{s,2} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \frac{1}{2}\rho(0.22)v_1^2 \quad (5.21)$$

จากลำดับการคำนวณทั้งหมดจะพบว่าในการแก้ปัญหานั้นมีวิธีที่ค่อนข้างซับซ้อน ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเสนอโปรแกรมเพื่อช่วยให้การออกแบบให้ง่ายขึ้นในทางปฏิบัติ โดยหัวข้อโปรแกรมนี้จะนำเสนอไว้ในบทที่ 6

5.4 การแก้สมการในแบบจำลอง

เนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีชุดสมการที่เป็นสมการอดิศัย ดังนั้น ในการแก้ระบบสมการในแบบจำลองนั้น จึงอาศัยโปรแกรม MATLAB โดยขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมซึ่งเป็นผังงานสำหรับการสร้างโปรแกรมจะถูกแสดงไว้ในบทที่ 6 และ ชุดคำสั่งถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค.

5.5 การเปรียบเทียบผลจากแบบจำลอง และ จากการทดลอง

เนื่องจากในการทดลองจะมีการวัดค่า $P_{s,1}$ และ v_1 ดังนั้น จึงสามารถแทนค่าเหล่านี้ลงในแบบจำลองได้โดยตรง และ ทำให้สามารถแก้สมการในแบบจำลองให้เป็นไปตามลำดับขั้นได้ โดยไม่ต้องแก้ระบบสมการในแบบจำลองไปพร้อมๆกัน หรือ ในขั้นตอนการแก้สมการนั้นไม่จำเป็นต้องใช้สมการที่ 3.43 แต่ในทางปฏิบัติความดันพัลลัม ($P_{s,1}$) ยังเป็นสิ่งที่ไม่ทราบค่า ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องใช้สมการ 3.43 และ แก้ระบบสมการในแบบจำลองไปพร้อมๆกัน ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 5.3

ผลที่ได้จากแบบจำลอง และ จากการทดลอง จะถูกเปรียบเทียบไว้ดังตารางต่อไปนี้

5.5.1 ผลการทดลองเมื่อไม่ผ่นึกตามแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ เทียบกับผลจากแบบจำลอง

ตารางที่ 5 - 1 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการผ่นึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม เทียบกับแบบจำลอง

ความถี่ (Hz)	Re	ความดันสถิต (Pa)			Error (%)	Uncertainty (%)	อุณหภูมิ (C)	
		ขาเข้า	ขาออก (การทดลอง)	ขาออก (แบบจำลอง)			ขาเข้า	ขาออก
80	150364	46.95	35.38	37.09	-4.63	11.71	31.7	31.7
70	136433	36.19	26.80	27.82	-3.65	13.94	31.7	31.7
60	118580	27.39	20.06	20.81	-3.62	16.95	31.7	31.7
50	94075	18.58	14.06	14.16	-0.70	22.57	31.7	31.7
40	69565	10.76	8.50	8.15	4.29	35.51	31.7	31.7

ตาราง 5-1 ผลการทดลองเมื่อไม่มีการผ่นึกตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บของท่อลม เทียบกับแบบจำลอง (ต่อ)

ความถี่ (Hz)	ความเร็ว (m/s)			Error (%)	Uncertainty (%)	มวลอากาศ รั่วไหล (kg/s) (แบบจำลอง)	มวลอากาศ รั่วไหล (kg/s) (การทดลอง)	Error (%)	Uncertainty (%)
	ขาเข้า	ขาออก (การทดลอง)	ขาออก (แบบจำลอง)						
80	9.98	9.97	9.97	0.00	2.93	0.000890	0.000975	-9	12
70	9.06	9.05	9.05	0.01	3.23	0.000601	0.000605	-1	14
60	7.87	7.87	7.86	-0.05	3.71	0.000500	0.000494	1	21
50	6.25	6.24	6.24	0.07	4.68	0.000389	0.000391	-1	28
40	4.62	4.61	4.62	0.07	6.33	0.000310	0.000274	13	41

จากตารางที่ 5 - 1 พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลอง และ ผลที่ได้จากการทดลอง ต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ

5.5.2 ผลการทดลองเมื่อมีการรั่วไหล และ มีการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิ

ตารางที่ 5 - 2 ผลการทดลองเมื่อมีการรั่วไหล และ การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทียบกับผลจากแบบจำลอง

อุณหภูมิ (C)			Error (%)	Uncertainty (%)	ความดันสถิต (Pa)			Error (%)	Uncertainty (%)
ขาเข้า	ขาออก (การทดลอง)	ขาออก (แบบจำลอง)			ขาเข้า	ขาออก (การทดลอง)	ขาออก (แบบจำลอง)		
32.80	32.80	32.80	0.000	1.624	17.61	13.32	12.84	-3.60	21.12
34.50	34.15	34.49	1.009	1.564	17.61	13.56	12.42	-8.41	20.79
35.97	35.60	35.96	1.008	1.504	17.61	13.19	11.85	-10.16	23.80
38.85	38.00	38.85	2.229	1.416	17.61	12.20	11.02	-9.67	25.33
41.10	39.90	41.07	2.926	1.353	17.61	11.57	10.40	-10.11	26.43
42.60	42.60	42.56	-0.091	1.274	17.61	11.22	9.51	-15.20	27.11

ตาราง 5 – 2 ผลการทดลองเมื่อมีการรั่วไหล และ การปรับเปลี่ยนอุณหภูมิเทียบกับผลจากแบบจำลอง (ต่อ)

อุณหภูมิ (C)	ความเร็ว (m/s)			Error (%)	Uncertainty (%)	มวลอากาศรั่วไหล (kg/s)		Error (%)	Uncertainty (%)
	ขาเข้า	ขาออก (การทดลอง)	ขาออก (แบบจำลอง)			การทดลอง	แบบจำลอง		
32.80	6.44	6.41	6.43	0.31	3.55	0.00051	0.00039	24.02	24.47
34.50	6.44	6.28	6.43	2.44	3.62	0.00050	0.00038	24.65	25.50
35.97	6.44	6.32	6.43	1.77	3.60	0.00049	0.00037	25.35	25.86
38.85	6.44	6.32	6.43	1.76	3.60	0.00048	0.00035	26.51	26.67
41.10	6.44	6.47	6.43	-0.63	3.51	0.00046	0.00034	26.72	27.26
42.60	6.44	6.28	6.43	2.44	3.62	0.00046	0.00033	27.71	27.88

จากตาราง 5 – 2 พบว่าผลที่ได้จากแบบจำลอง และ ผลที่ได้จากการทดลองต่างกัน
อย่างไม่มีนัยสำคัญ

บทที่ 6

การออกแบบระบบท่อลมด้วยโนโมแกรม

6.1 บทนำ

ในการใช้งานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งได้ระบุขั้นตอนไว้ในบทที่ 5 จะพบว่าชุดสมการต่างๆ ในแบบจำลองนั้นมีรูปแบบ และมีขั้นตอนการแก้สมการที่ค่อนข้างยาก และไม่สามารถแก้สมการได้โดยตรงจำเป็นต้องสร้างชุดโปรแกรมคอมพิวเตอร์ หรือ ใช้เครื่องมืออื่นเพื่อช่วยในการคำนวณ การสร้างโนโมแกรม (Nomogram) เป็นวิธีหนึ่งซึ่งช่วยในการหาคำตอบจากชุดสมการที่มีความซับซ้อนได้ แต่มีข้อจำกัดในการหาคำตอบ เนื่องจากจำเป็นต้องกำหนดช่วงของตัวแปรต่าง ๆ ในชุดสมการขึ้นมา ทำให้การหาคำตอบถูกจำกัดจากช่วงของตัวแปรต่างๆที่กำหนด วิธีการของโนโมแกรมจะเป็นการสร้างสมการต่าง ๆ ในชุดสมการให้อยู่ในรูปแผนภาพเชิงเส้นที่มีค่าตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งหากกำหนดค่าตัวแปรขึ้นมา ก็จะสามารถหาค่าตัวแปรตัวที่ไม่ทราบได้ในแผนภาพเชิงเส้นนั้นๆ ทำให้มีความสะดวกในการใช้งานทางด้านปฏิบัติเป็นอย่างมาก เพราะสามารถช่วยให้ผู้ใช้งานทราบคำตอบได้ทันที ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของการสร้างโนโมแกรมสำหรับการออกแบบท่อลมที่คำนึงถึงการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนต่อไป

หมายเหตุ รูปโนโมแกรมทั้งหมดสามารถดาวน์โหลดได้ที่ลิงค์

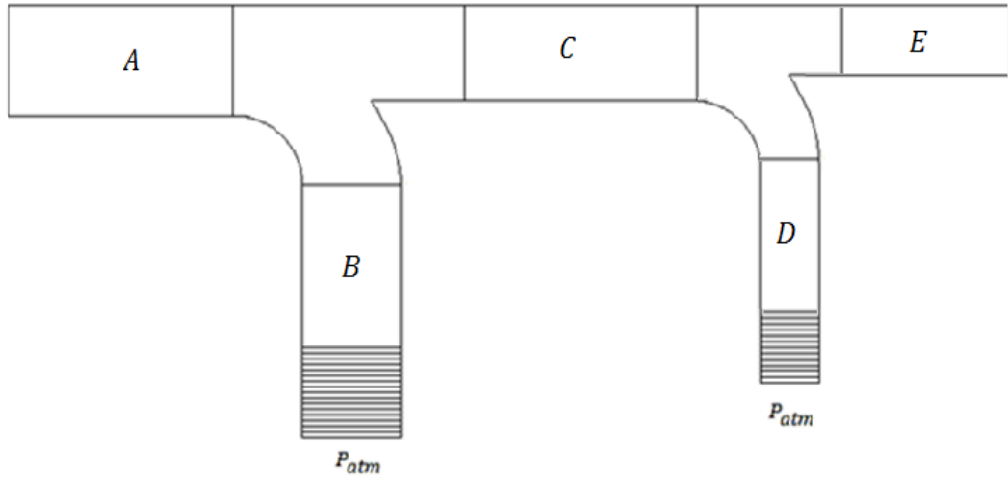
https://www.dropbox.com/sh/fn17yxs9oqqnmv/AADIRNerVl2uOkxV2_BfAiL2a?dl=0

6.2 การสร้างโนโมแกรมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการใช้งานท่อลมโดยทั่ว ๆ ไป ขนาดของท่อลมที่ใช้งานส่วนใหญ่จะไม่เกิน 60 นิ้ว โดยมีขนาดเล็กสุดใช้งานอยู่ที่ 6 นิ้ว ดังนั้น ในการทำโนโมแกรมจึงกำหนดขนาดของท่อลมให้อยู่ในช่วงตั้งแต่ 6 – 60 นิ้ว โดยกำหนดความยาวท่อให้อยู่ในช่วงระหว่าง 1 ถึง 20 เมตร ซึ่งครอบคลุมการใช้งานโดยทั่วไป นอกจากนี้ การใช้งานท่อลมจะใช้ในการปรับสภาพอากาศเพื่อทำความเย็น ซึ่งมีช่วงของอุณหภูมิอากาศในท่อระหว่าง 12 – 18 °C ทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของอากาศ มีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย และวัสดุที่ใช้ทำท่อลมจะเป็นแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ดังนั้น ในขั้นตอนการสร้างโนโมแกรมจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ จะกำหนดให้คุณสมบัติของอากาศ และ คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำท่อลม มีค่าคงที่ ดังนี้ $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 1.8 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, $c_p = 1006.8 \text{ J/kg.K}$, $c_v = 717 \text{ J/kg.K}$, $\epsilon = 0.00015 \text{ m.}$, $k_{air} = 2.53 \times 10^{-2} \text{ K.m/W}$, $k_D = 16.3 \text{ K.m/W}$, $k_{ins} = 0.04 \text{ K.m/W}$ และ จากสมการ $Pr = \frac{\mu c_p}{k}$ จะได้ $Pr =$

0.710 โดยชุดโนโมแกรมที่สร้างขึ้นจะนำไปสู่การหาค่า $(P_{s,1})_A$, $(P_{s,2})_A$, $(P_{s,2})_B$, $(v_1)_B$ และ $(v_1)_C$ ซึ่งค่าทั้งห้านี้จะมีผลต่อการหาขนาด และ หาความเร็วของลมในท่อแยก และ ในท่อท่อนถัด ๆ ไป

6.2.1 โนโมแกรมสำหรับหาความดันสถิตขาเข้าท่อ A



รูปที่ 5 - 4 ระบบท่อลม

การสร้างโนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาเข้าท่อ A $(P_{s,1})_A$ จะอาศัยระบบสมการที่ 5.16 ถึง 5.19

$$\begin{aligned} \text{สมการ 5.16} \quad (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_1^2)_A &= \frac{Q_{2,A}((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A)}{Q_{1,A}} \left((P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho(v_2^2)_A \right) \\ &+ \frac{1}{2}f \frac{L}{D} \rho(v_1^2)_A - \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A) \\ &+ \rho \left(\frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} u_2 - u_1 \right) ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A) \\ &- \frac{\dot{q}_{L,1-2}((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_A)}{Q_1} \end{aligned}$$

$$\text{สมการ 5.17} \quad (P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho(v_2^2)_A = (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_1^2)_B + \frac{1}{2}\rho C_{2-4}(v_2^2)_A$$

$$\text{สมการ 5.18} \quad (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_1^2)_B = \frac{Q_{2,B}((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B)}{Q_{1,B}} \left((P_{s,2})_B + \frac{1}{2}\rho(v_2^2)_B \right)$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{1}{2} f \frac{L}{D} \rho (v_1^2)_B - \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,B}} ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B) \\
& + \rho \left(\frac{Q_{2,B}}{Q_{1,B}} u_2 - u_1 \right) ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B) \\
& - \frac{\dot{q}_{L,1-2} ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B)}{Q_{1,B}}
\end{aligned}$$

สมการ 5.19
$$T_{50} = \frac{0.187}{v_T^2} \sqrt{Q_2 ((P_{s,1})_A, (P_{s,2})_B) \bar{C}_d^3 \sqrt{\left(\frac{2((P_{s,2})_B - P_{atm})}{\rho} \right)^3}}$$

โดยจะเริ่มต้นจากการจัดรูปสมการ 5.16 ซึ่งสามารถจัดรูปได้เป็นสมการที่ 6.1 ก่อน โดยแทนค่าสมการที่ 5.15 $\left[\rho \left(\frac{Q_2}{Q_1} u_2 - u_1 \right) = \rho c_v \left(\frac{Q_2}{Q_1} (T_2 - T_{\infty,o}) - (T_1 - T_{\infty,o}) \right) \right]$, $v_{2,A} = \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} v_{1,A}$, $\frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} = \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right)$ ลงสมการ 5.16 แล้วย้ายข้างพจน์ต่างๆเพื่อให้อีกฝั่งเป็นศูนย์

$$\begin{aligned}
& (P_{s,1})_A + \left(\frac{1}{2} \rho - \frac{1}{2} f \frac{L}{D} \rho - \frac{1}{2} \rho \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right)^3 \right) (v_1^2)_A - \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) (P_{s,2})_A + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} - \\
& \left(\rho c_v \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) (T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v (T_1 - T_{\infty,o}) \right) + \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} = 0
\end{aligned} \tag{6.1}$$

$$\begin{aligned}
\text{โดย } \dot{q}_{L,1-2} &= \rho Q_L c_p (T_{\infty,o} - \frac{T_1 + T_2}{2}) \\
\dot{q}_{D,1-2} &= \frac{T_{\infty,o} - ((T_1 + T_2)/2)}{R_{tot}} \\
Q_{L,A} &= 22 \times \pi D_A L_A \times 5.077 \times 10^{-5} \times \left(\frac{(P_{s,1})_A + (P_{s,2})_A}{250} \right)^{0.65} \\
T_2 &= \frac{2T_{\infty,o} + T_1 \left(\left(2R_{tot} \rho \pi \frac{D_1^2}{4} c_p \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \right) - 1 \right)}{\left(2R_{tot} \rho \pi \frac{D_1^2}{4} c_p \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \right) + 1}
\end{aligned}$$

เนื่องจากไม่สามารถถึง $(P_{s,1})_A$ จากสมการ 6.1 ออกมาเป็นตัวร่วมได้ ดังนั้น ในการสร้างโปรแกรมต้องอาศัยโปรแกรม Pynomio ซึ่งมีส่วนโปรแกรมย่อย Numpy ซึ่งใช้ในการแก้ระบบสมการ 5.16 ถึง 5.19 โดยเริ่มต้นจากการจัดรูปตัวแปร $(P_{s,2})_A$, $(v_1)_B$ และ $(P_{s,2})_B$ จากสมการ

5.17, 5.18 และ 5.19 ตามลำดับ จากสมการ 5.17 สามารถจัดรูป $(P_{s,2})_A$ และแทนค่า $C_{2-4} = A' \left[0.34 + \left(\frac{v_{1,B}}{v_{2,A}} \right)^2 \right]$ และ $v_{2,A} = \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} v_{1,A}$ และ $\frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} = \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right)$ ลงสมการ 5.17 โดยสมการ 5.17 ถูกจัดรูปเป็นสมการ 6.2

$$(P_{s,2})_A = -\frac{1}{2} \rho \left(\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) v_{1,A} \right)^2 + (P_{s,1})_A + \frac{1}{2} \rho (v_1^2)_B + \frac{1}{2} \rho A' \left[0.34 + \left(\frac{v_{1,B}}{\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) v_{1,A}} \right)^2 \right] \left(\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) v_{1,A} \right)^2 \quad (6.2)$$

จากสมการ 5.18 สามารถแทน $v_{2,B} = \frac{Q_{2,B}}{Q_{1,B}} v_{1,B}$ และ $\frac{Q_{2,B}}{Q_{1,B}} = \left(1 - \frac{Q_{L,B}}{Q_{1,B}} \right)$ จัดรูป $(v_1)_B$ ได้เป็นสมการที่ 6.3

$$v_{1,B} = \left\{ \left[\frac{1}{2} \rho \left(1 - \left(1 - \frac{Q_{L,B}}{Q_{1,B}} \right)^3 - f \frac{L}{D} \right) \right]^{-1} \left[-(P_{s,1})_A + \left(1 - \frac{Q_{L,B}}{Q_{1,B}} \right) (P_{s,2})_B - \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,B}} - \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,B}} + \left(\rho c_v \left(1 - \frac{Q_{L,B}}{Q_{1,B}} \right) (T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v (T_1 - T_{\infty,o}) \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (6.3)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } \dot{q}_{L,1-2} &= \rho Q_L c_p (T_{\infty,o} - \frac{T_1 + T_2}{2}) \\ \dot{q}_{D,1-2} &= \frac{T_{\infty,o} - ((T_1 + T_2)/2)}{R_{tot}} \\ Q_{L,B} &= 22 \times \pi D_B L_B \times 5.077 \times 10^{-5} \times \left(\frac{(P_{s,1})_A + (P_{s,2})_B}{250} \right)^{0.65} \\ T_2 &= \frac{2T_{\infty,o} + T_1 \left(\left(2R_{tot} \rho \pi \frac{D_1^2}{4} c_p \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \right) - 1 \right)}{\left(2R_{tot} \rho \pi \frac{D_1^2}{4} c_p \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \right) + 1} \end{aligned}$$

จากสมการ 5.19 สามารถแทนค่า $\bar{C}_d = 0.5$ และ $v_T = 0.25$ m/s จัดให้อยู่ในรูป $(P_{s,2})_B$ ได้เป็นสมการที่ 6.4

$$(P_{s,2})_B = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{0.5 Q_{2,B}} \right)^{2/3} \left(\frac{T_{50}}{2.992} \right)^{4/3} \quad (6.4)$$

จากนั้นจัดรูปสมการ 6.1 ให้อยู่ในรูปดีเทอร์มิแนนต์ โดยตัวแปร $(P_{s,2})_A$, $(v_1)_B$ และ $(P_{s,2})_B$ มีรูปแบบตามสมการ 6.2, 6.3 และ 6.4 ตามลำดับ

$$\begin{vmatrix} (P_{s,1})_A & 1 & 0 \\ -Term_{v1} & 1 & 1 \\ Term_X & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (6.5)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } Term_{v1} &= \left(\frac{1}{2}\rho - \frac{1}{2}f\frac{L}{D}\rho - \frac{1}{2}\rho\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)^3 \right) (v_1^2)_A \\ Term_X &= -\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right) (P_{s,2})_A - \left(\rho c_v \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} (T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v (T_1 - T_{\infty,o})\right) \\ &\quad + \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} \end{aligned}$$

จากสมการ 6.5 พจน์ $Term_{v1}$ และ $Term_X$ จะสามารถจัดให้อยู่ในรูปดีเทอร์มิแนนต์ย่อยได้ ดังสมการ 6.6 และ 6.7 แล้วนำดีเทอร์มิแนนต์ย่อยแทนลงสมการ 6.5 ได้เป็นสมการ 6.8

$$\begin{vmatrix} (v_1^2)_A & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho - \frac{1}{2}f\frac{L}{D}\rho & 1 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)^3 & 1 \end{vmatrix} = Term_{v1} \quad (6.6)$$

$$\begin{vmatrix} \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} & 1 & 1 \\ \left(\rho c_v \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} (T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v (T_1 - T_{\infty,o})\right) & 1 & 0 \\ \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right) (P_{s,2})_A & 0 & 1 \end{vmatrix} = Term_X \quad (6.7)$$

$$R_D = \frac{\ln(((D_1/2)+t)/(D_1/2))}{2\pi Lk_D} \quad (6.9)$$

โนโมแกรมสำหรับการหาความต้านทานเชิงความร้อนของท่อลมได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ง. รูปที่ ง -1 และ ชุดคำสั่งสำหรับการสร้างโนโมแกรมได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.1 อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสมการประกอบด้วยพจน์ 2 พจน์ จึงต้องหาค่าผลลัพธ์ของพจน์ตัวใดตัวหนึ่งก่อนเพื่อโยงไปสู่อีกพจน์หนึ่งจึงจะได้คำตอบของสมการขึ้นมา ดังนั้น ในการสร้างโนโมแกรม จึงต้องมีการสร้างแกนผลลัพธ์ของพจน์ใดพจน์หนึ่งขึ้นมา ซึ่งในที่นี้ แกนดังกล่าว นั้นจะถูกเรียกเป็นแกนอ้างอิง (Reference Axis) เพื่อใช้เชื่อมโยงค่าของพจน์ต่าง ๆ จากตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกันจนนำไปสู่คำตอบของสมการนั้น ๆ



2. โนโมแกรมสำหรับการหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวน (R_{ins})

การคำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนจะใช้สมการที่ 5.4 โดย รัศมีภายนอก (r_o) มีค่าเท่ากับ $D_1/2 + t$ m. และ ความหนาของฉนวน (b) ถูกกำหนดไว้ที่ 1, 1.5, 2, 2.5 และ 3 นิ้ว เมื่อแทนค่า r_o, b ลงสมการที่ 5.4 จะได้สมการ 6.10 ซึ่งเป็นสมการสำหรับการสร้างโนโมแกรม

สมการ 5.4

$$R_{ins} = \frac{\ln([r_o+b]/r_o)}{2\pi L k_{ins}}$$

โดย b คือ ความหนาของฉนวน [m]
 k_{ins} คือ ค่าสภาพการนำความร้อนของฉนวน [W/m.K]

$$R_{ins} = \frac{\ln([(D/2)+t)+b]/((D/2)+t))}{2\pi L k_{ins}} \quad (6.10)$$

โนโมแกรมสำหรับการหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ง. รูปที่ ง - 2 และ ชุดคำสั่งสำหรับการสร้างโนโมแกรมได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.2 ทั้งนี้โนโมแกรม จะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน

3. โนโมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อน
ภายในท่อ ($R_{h,i}$)

ในการคำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนในส่วนนี้จะเกี่ยวข้องกับสมการหลายสมการได้แก่ สมการ 3.12 สมการ 3.13 สมการ 4.5 สมการ 5.5 และ สมการ 5.6 ดังนั้น ในการหา $R_{h,i}$ จำเป็นต้องใช้หลายโนโมแกรมร่วมกัน และ ต้องจัดรูปสมการเหล่านี้ให้ง่ายแก่การสร้างโนโมแกรม

$$\text{สมการ 3.12} \quad Nu_{sm} = \frac{(f_{sm}/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7(f_{sm}/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} (1 + (D/L)^{2/3})$$

$$\text{โดย} \quad f_{sm} = (0.79 \ln(Re) - 1.64)^{-2}$$

f_{sm} คือ ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ

Pr คือ ตัวเลขพรันเทิลด์

Nu_{sm} คือ ตัวเลขนัสเซลส์สำหรับท่อเรียบ

$$\text{สมการ 3.13} \quad \frac{Nu}{Nu_{sm}} = \left(\frac{f}{f_{sm}}\right)^n$$

$$\text{โดย} \quad n = 0.68Pr^{0.215} \quad \text{เมื่อ} \quad Pr \leq 6$$

$$n = 1 \quad \text{เมื่อ} \quad Pr > 6$$

f คือ ค่า Friction Factor f

Nu คือ ตัวเลขนัสเซลส์

$$\text{สมการ 4.5} \quad f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} + 0.0133 e^{-7 \times 10^{-6} Re}$$

$$\text{สมการ 5.5} \quad h_i = \frac{k_{air,i} Nu_i}{D}$$

โดย h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [$W/m^2.K$]

i คือ ตัวห้อยระบุว่าเป็นการไหลภายในท่อ

k_{air} คือ สภาพการนำความร้อนของอากาศ [$W/m.K$]

สมการ 5.6

$$R_{h,i} = \frac{1}{2\pi r_i L h_i}$$

โดย $R_{h,i}$ คือ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อน
ภายในท่อ [K/W]

ในการจัดรูปสมการเพื่อสร้างโนโมแกรม จะเริ่มจากการแทน Nu_{sm} จากสมการที่ 3.12 ลงในสมการ 3.13 โดยหากแทน f_{sm}, f, Nu_{sm} และ คุณสมบัติของ อากาศลงสมการ 3.13 จะได้สมการที่ 6.11 ซึ่งเป็นสมการลือกการิทึม และ เอกซ์โพเนนเชียลผสมกัน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ซับซ้อน ดังนั้น จึงต้องจัดรูปสมการใหม่เพื่อลดความซับซ้อนของสมการลง โดยให้ Nu แสดงในรูปฟังก์ชันของ Re, D_1, L, f_{sm} และ f ดังสมการ 6.12 ซึ่งเป็นสมการที่มีความซับซ้อน น้อยลง อย่างไรก็ตาม สมการที่ได้ยังเป็นสมการที่เกี่ยวข้องกับ 5 ตัวแปร (Nu, Re, D_1, L, f_{sm} และ f) ดังนั้น ในการสร้างโนโมแกรมจึงต้องแยกสมการ 6.12 ออกเป็นสองส่วน ส่วนแรกแสดงในสมการที่ 6.13 และ ส่วนที่สองคือ เทอม D และ L เมื่อนำ J ที่ได้จากสมการ 6.13 ไปคูณกับเทอม D และ L จะมีค่าเท่ากับ Nu และ Nu จะถูกแทนค่าลงสมการ 5.5 และ แทนค่า h_i จากสมการ 5.5 ลงสมการ 5.6 จะได้สมการ 6.14 ซึ่งสามารถนำไปสร้างโนโมแกรมได้

$$Nu = \left(\frac{\left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{0.00015/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2} + 0.0133 e^{-7 \times 10^{-6} Re}}{(0.79 \ln(Re) - 1.64)^{-2}} \right)^{0.68(0.707)^{0.215}} \times \left(\frac{\left(\frac{(0.79 \ln(Re) - 1.64)^{-2}}{8} \right) (Re - 1000)(0.707)}{1 + 12.7 \left(\frac{(0.79 \ln(Re) - 1.64)^{-2}}{8} \right)^{1/2} (0.707^{2/3} - 1)} (1 + (D_1/L)^{2/3}) \right) \quad (6.11)$$

$$Nu = \left(\frac{(f_{sm}/8)(Re - 1000)(0.707)}{1 + 12.7 (f_{sm}/8)^{1/2} (0.707^{2/3} - 1)} \right) (1 + (D_1/L)^{2/3}) \left(\frac{f}{f_{sm}} \right)^{0.68(0.707)^{0.215}} \quad (6.12)$$

$$J = \left(\frac{(f_{sm}/8)(Re - 1000)(0.707)}{1 + 12.7 (f_{sm}/8)^{1/2} (0.707^{2/3} - 1)} \right) \left(\frac{f}{f_{sm}} \right)^{0.68(0.707)^{0.215}} \quad (6.13)$$

$$R_{h,i} = \frac{1}{\pi L J (2.75 \times 10^{-2}) (1 + (D/L)^{2/3})} \quad (6.14)$$

โดยค่า f_{sm} สามารถหาได้จากโนโมแกรมในภาคผนวก ง. รูปที่ ง-3 และ ค่า f สามารถหาได้จากภาคผนวก ง รูปที่ ง - 4 ส่วนโนโมแกรมสำหรับการหา J จะถูกแยกไว้เป็น 2 แผ่น คือ รูปที่ ง-5 ก,ง-5 ข สำหรับค่า J ที่มีค่าในช่วง 60 ถึง 500 และ ในช่วง 500 ถึง 2500 เพื่อความชัดเจนของสเกลแสดงค่า J ทำนองเดียวกัน โนโมแกรมสำหรับการหา $R_{h,i}$ จะถูกแยกไว้เป็น 2 แผ่นเช่นเดียวกัน โดยแสดงไว้ในรูปที่ ง-6 ก และ ง-6 ข สำหรับความยาวท่อลม ตั้งแต่ 1 ถึง 8 เมตรและตั้งแต่ 8 ถึง 20 เมตร ทั้งนี้ ชุดคำสั่งสำหรับการสร้างโนโมแกรมรูปที่ ง-3 ,ง-5 และ ง-6 ได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.3 ถึง ค.5 โดยในโนโมแกรม จะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน



4. โนโมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ ($R_{h,o}$)

การคำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนภายนอกท่อลมจะใช้สมการ 3.22, สมการ 3.7, สมการ 5.7, สมการ 5.8 และ สมการ 5.14

สมการ 3.22

$$Nu = \left\{ 0.60 + \frac{0.387Ra^{1/6}}{[1+(0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

โดย Ra คือ ตัวเลขตัวเลขเรย์ลีสามารถหาได้จากสมการ 3.7

สมการ 3.7

$$Ra = \frac{g\beta(T_{ins,o}-T_{\infty,o})D^3}{\nu\alpha}$$

โดย β คือ การขยายตัวทางความร้อน [1/K]
 $T_{ins,o}$ คือ อุณหภูมิพื้นผิวนอกของฉนวน [K]
 $T_{\infty,o}$ คือ อุณหภูมิของของไหลภายนอก ในงานวิจัยนี้จะมีค่าเท่ากับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม [K]
 ν คือ ความหนืดคิเนมาติกส์ [m^2/s]
 α คือ การแพร่ทางความร้อน [m^2/s]

สมการ 5.7

$$h_o = \frac{k_{air,o}Nu_o}{D_o}$$

โดย h คือ สัมประสิทธิ์การพาความร้อน [$W/m^2.K$]
 O คือ ตัวห้อยระบุว่าเป็นการไหลภายนอกท่อ

สมการ 5.8

$$R_{h,o} = \frac{1}{2\pi r_o L h_o}$$

สมการ 5.14

$$\frac{T_1 - T_{Ins}}{R_{h,i} + R_D + R_{Ins}} = \frac{T_{Ins} - T_{\infty,o}}{\frac{1}{2\pi r_o L h_o}}$$

ในการสร้างโนโมแกรมจะเริ่มจากการวิเคราะห์สมการ 3.7 ก่อน โดยพบว่าค่า Ra จะขึ้นอยู่กับตัวแปร D และ T_{ins} โดยในการหา T_{ins} จากสมการ 5.14 ต้องจัดรูปสมการโดยแทนค่าสมการ 3.22, 3.7, 5.7 และ 5.8 และ แทนค่าคุณสมบัติของอากาศลงสมการ 5.14 และ รวมพจน์ที่มีตัวแปร T_{ins} ไว้ด้วยกัน ดังแสดงในสมการ 6.15

$$\left\{ \frac{T_1}{0.0864L[0.6+6.86(T_{ins}-298)^{1/6}D^{1/2}]^2} - T_{ins} \left[\frac{1}{0.0864L[0.6+6.86(T_{ins}-298)^{1/6}D^{1/2}]^2} + (R_{h,i} + R_D + R_{Ins}) \right] \right\} + (R_{h,i} + R_D + R_{Ins})T_{\infty,o} = 0 \quad (6.15)$$

จากสมการ 6.15 สามารถสร้างโนโมแกรมหาผลรวมของ $R_{h,i} + R_D + R_{Ins}$ ได้ดังแสดงในภาคผนวก ง รูปที่ ง - 7 ก, ง - 7 ข และ ง - 7 ค ตามช่วงของค่า $R_{h,i}$ ตั้งแต่ 0.0002 ถึง 0.001 K/W, 0.001 ถึง 0.01 K/W และ 0.01 ถึง 0.12 K/W ตามลำดับ ส่วนโนโมแกรมสำหรับหา T_{ins} ถูกแสดงในรูปที่ ง - 8 ก และ ง - 8 ข ตามช่วงของค่าผลรวม $R_{h,i} + R_D + R_{Ins}$ ตั้งแต่ 0.02 K/W ถึง 0.8 K/W และ 0.8 K/W ถึง 2.5 K/W ตามลำดับ โดยชุดค่าสั่งถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค. หัวข้อ ค.6 และ ค.7 โดยเมื่อได้ T_{ins} จะสามารถหา $R_{h,o}$ ได้โดยแทนค่า Ra จากสมการ 3.7 ลงสมการ 3.22 และ นำ Nu จากสมการ 3.22 แทนลงสมการ 5.7 และ นำค่า h_o จากสมการ 5.7 แทนลงสมการ 5.8 จะได้สมการที่ 6.16

$$R_{h,o} = \frac{1}{\pi L k_{air,o} \left\{ 0.60 + \frac{0.387 \left(\frac{g\beta(T_{ins,o}-T_{\infty,o})D^3}{\nu\alpha} \right)^{1/6}}{[1+(0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2} \quad (6.16)$$

จากสมการ 6.16 จะพบว่าค่า $R_{h,o}$ ขึ้นอยู่กับตัวแปร T_{ins} , D และ L และ สามารถใช้ค่าสั่งจากโปรแกรม Pynomo สร้างโนโมแกรมได้ โดยโนโมแกรมสำหรับหา $R_{h,o}$ ถูกแสดงไว้ในรูป ง - 9 และ ชุดค่าสั่งสำหรับการสร้างโนโมแกรมได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.8 ทั้งนี้โนโมแกรม จะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน

6.2.1.2 โนโมแกรมรวมสำหรับหาความดันสถิตขาเข้าท่อ A $(P_{s,1})_A$

การสร้างโนโมแกรมสำหรับหาค่า $(P_{s,1})_A$ ใช้สมการ 6.8 เป็นสมการหลักในการสร้างชุดคำสั่ง

$$\text{สมการ 6.8} \quad \left| \begin{array}{ccc|cc} & & (P_{s,1})_A & & 1 & 0 \\ & (v_1^2)_A & 0 & 0 & & \\ & 0 & \frac{1}{2}\rho - \frac{1}{2}f\frac{L}{D}\rho & 1 & & \\ & 0 & \frac{1}{2}\rho\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)^3 & 1 & & \\ \hline & \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} & & & 1 & 1 \\ \hline & \left(\rho c_v \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)(T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v(T_1 - T_{\infty,o})\right) & & & 1 & 0 \\ & \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)(P_{s,2})_A & & & 0 & 1 \end{array} \right| = 0$$

$$\begin{aligned} \text{โดย} \quad \dot{q}_{L,1-2} &= \rho Q_L c_p (T_{\infty,o} - \frac{T_1 + T_2}{2}) \\ \dot{q}_{D,1-2} &= \frac{T_{\infty,o} - ((T_1 + T_2)/2)}{R_{tot}} \\ Q_{L,A} &= 22 \times \pi D_A L_A \times 5.077 \times 10^{-5} \times \left(\frac{(P_{s,1})_A + (P_{s,2})_A}{2} \right)^{0.65} \\ T_2 &= \frac{2T_{\infty,o} + T_1 \left(\left(2R_{tot} \rho \pi \frac{D_1^2}{4} c_p \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \right) - 1 \right)}{\left(2R_{tot} \rho \pi \frac{D_1^2}{4} c_p \left(\frac{v_1 + v_2}{2} \right) \right) + 1} \end{aligned}$$

สมการ 6.2

$$\begin{aligned} (P_{s,2})_A &= -\frac{1}{2}\rho \left(\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) v_{1,A} \right)^2 + (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_1^2)_B + \frac{1}{2}\rho A' \left[0.34 + \right. \\ &\left. \left(\frac{v_{1,B}}{\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) v_{1,A}} \right)^2 \right] \left(\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) v_{1,A} \right)^2 \end{aligned}$$

สมการ 6.4

$$v_{1,B} = \left\{ \left[\frac{1}{2} \rho \left(1 - \left(1 - \frac{Q_{L,B}}{Q_{1,B}} \right)^3 - f \frac{L}{D} \right) \right]^{-1} [-(P_{s,1})_A + \left(1 - \frac{Q_{L,B}}{Q_{1,B}} \right) (P_{s,2})_B - \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,B}} - \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,B}} + \left(\rho c_v \left(1 - \frac{Q_{L,B}}{Q_{1,B}} \right) (T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v (T_1 - T_{\infty,o}) \right) \right]^{1/2} \right.$$

สมการ 6.5

$$(P_{s,2})_B = \frac{\rho}{2} \left(\frac{1}{0.5 Q_{2,B}} \right)^{2/3} \left(\frac{T_{50}}{2.992} \right)^{4/3}$$

จากสมการ 6.8 ประกอบด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ได้แก่ $v_{1,A}, f_A, D_A, L_A, T_{1,A}, R_{tot,A}, Q_{1,B}, L_B$ และ T_{50} จึงทำให้โนโมแกรมที่ได้จากสมการ 6.8 ไม่เหมาะสมแก่การใช้งาน ในงานวิจัยนี้จึงแยกโนโมแกรมจากสมการ 6.8 ออกเป็น 3 รูป ได้แก่ รูปที่ ง - 10 และ ง - 11 ก, ง - 11 ข และ ง - 11 ค สำหรับกรณีที่ได้ค่าจากแกนอ้างอิง R_{13} ในช่วงตั้งแต่ 0.01 ถึง 0.1, 0.1 ถึง 1.0 และ 1 ถึง 7.5 ตามลำดับ ซึ่งเป็นโนโมแกรมสำหรับหาค่าอ้างอิง ($Term_{v1}$) ที่เกิดจากดิเทอร์มิแนนต์ย่อยดังสมการ 6.6 และ รูป ง - 12 ก, ง - 12 ข สำหรับ $Q_{1,B}$ ในช่วง 0.1 m^3 ถึง 5 m^3 และ ในช่วง 5 m^3 ถึง 20 m^3 ซึ่งเป็นโนโมแกรมสำหรับหาค่าอ้างอิง R_{16} ที่ใช้เชื่อมโยงค่าของตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ 6.7 เข้าด้วยกัน โดยค่าอ้างอิง R_{16} จะถูกนำไปใช้หาค่า $Term_X$ จากดิเทอร์มิแนนต์ย่อยดังสมการ 6.7 โดยใช้ รูป ง - 13 ก, ง - 13 ข และ ง - 13 ค สำหรับค่า R_{16} ในช่วง 0.1 ถึง 5, 5 ถึง 20 และ 20 ถึง 85 ตามลำดับในการหา $Term_X$ และ รูป ง - 14 เป็นรูปที่เกิดจากสมการ 6.8 โดยใช้ค่าอ้างอิง $Term_{v1}$ และ $Term_X$ เป็นตัวเชื่อมโยงตัวแปรจากดิเทอร์มิแนนต์ย่อยเข้าด้วยกัน และ นำไปสู่การหาค่า $(P_{s,1})_A$ โดยชุดคำสั่งที่ใช้ในการสร้างโนโมแกรมถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค. หัวข้อ ค.9 ถึง ค.13 ทั้งนี้โนโมแกรม จะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน

สมการ 6.6

$$\begin{vmatrix} (v_1^2)_A & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \rho - \frac{1}{2} f \frac{L}{D} \rho & 1 \\ 0 & \frac{1}{2} \rho \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right)^3 & 1 \end{vmatrix} = Term_{v1}$$

สมการ 6.7

$$\begin{vmatrix} \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} & 1 & 1 \\ \left(\rho c_v \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} (T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v (T_1 - T_{\infty,o}) \right) & 1 & 0 \\ \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}} \right) (P_{s,2})_A & 0 & 1 \end{vmatrix} = Term_X$$

6.2.2 โนโมแกรมสำหรับหาความดันสถิตขาออกท่อ A $(P_{s,2})_A$

ในการสร้างโนโมแกรมเพื่อหา $(P_{s,2})_A$ จะอาศัยสมการ 6.1 โดยนำสมการมาจัดรูปเป็นดิเทอร์มิแนนต์ตั้งเป็นสมการที่ 6.17

$$\begin{vmatrix} -\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)(P_{s,2})_A & 1 & 0 \\ -Term_{v1} & 1 & 1 \\ Term_y & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0 \quad (6.17)$$

$$\begin{aligned} \text{โดย } Term_{v1} &= \left(\frac{1}{2}\rho - \frac{1}{2}f\frac{L}{D}\rho - \frac{1}{2}\rho\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)^3\right)(v_1^2)_A \\ Term_y &= (P_{s,1})_A - \left(\rho c_v \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}}(T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v(T_1 - T_{\infty,o})\right) + \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} \\ &\quad + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} \end{aligned}$$

จากสมการ 6.17 $Term_{v1}$ ถูกจัดเป็นดิเทอร์มิแนนต์ย่อยได้เช่นเดียวกับสมการ 6.6 และ $Term_y$ สามารถจัดรูปเป็นสมการ 6.18 และ สามารถนำสมการ 6.6 และ 6.18 แทนลงในสมการ 6.17 ได้เป็นสมการ 6.19

$$\begin{vmatrix} \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} & 1 & 1 \\ \left(\rho c_v \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}}(T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v(T_1 - T_{\infty,o})\right) & 1 & 0 \\ -(P_{s,1})_A & 0 & 1 \end{vmatrix} = Term_y \quad (6.18)$$

$$\text{สมการ 6.6} \quad \begin{vmatrix} (v_1^2)_A & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho - \frac{1}{2}f\frac{L}{D}\rho & 1 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)^3 & 1 \end{vmatrix} = Term_{v1}$$

$$\begin{vmatrix} -\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right) (P_{s,2})_A & & & 1 & 0 \\ \left. \begin{array}{ccc} (v_1^2)_A & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho - \frac{1}{2}f\frac{L}{D}\rho & 1 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)^3 & 1 \end{array} \right\} & & & 1 & 1 \\ \left. \begin{array}{ccc} \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} & & 1 & 1 \\ \left(\rho c_v \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} (T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v (T_1 - T_{\infty,o})\right) & & 1 & 0 \\ -(P_{s,1})_A & & 0 & 1 \end{array} \right\} & & & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0$$

(6.19)

จากสมการ 6.19 ทีเทอร์มิแนนต์หลักมีทีเทอร์มิแนนต์ย่อยซึ่งมีรูปแบบดังสมการ 6.6 ดังนั้นในโนโมแกรมจึงใช้ค่าอ้างอิง $Term_{v1}$ ซึ่งสามารถหาค่าได้จากภาคผนวก ง รูปที่ ง - 10 และ ง - 11 และ โนโมแกรมจากสมการ 6.19 ถูกแสดงไว้ในรูปที่ ง - 15 ก, ง - 15 ข และ ง - 15 ค. สำหรับค่า R_{tot} ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.4 K/W, 0.4 K/W ถึง 1.2 K/W และ 1.2 K/W ถึง 3 K/W ตามลำดับ โดยชุดค่าสั่งได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.14 ทั้งนี้ในโนโมแกรม จะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน

6.2.3 โนโมแกรมสำหรับหาความเร็วขาเข้าท่อ B $v_{1,B}$

การสร้างโนโมแกรมเพื่อหาขนาดของ $v_{1,B}$ จะเริ่มจากการวิเคราะห์สมการ 5.17 และ สมการ 3.39

$$\text{สมการ 5.17} \quad (P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho(v_2^2)_A = (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_1^2)_B + \frac{1}{2}\rho C_{2-4}(v_2^2)_A$$

$$\text{สมการ 3.39} \quad C_{2-4} = A' \left[0.34 + \left(\frac{v_{1,B}}{v_{2,A}} \right)^2 \right]$$

โดย A' มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อ $v_4/v_2 \leq 0.8$ และ A' มีค่าเท่ากับ 0.9 เมื่อ $v_4/v_2 > 0.8$

จากสมการ 5.17 พบว่าค่า $(P_{s,1})_A$ และ $(P_{s,2})_A$ เป็นสิ่งที่หาค่าได้จากโนโมแกรมในภาคผนวก ง รูปที่ ง - 14 และ ง - 15 ตามลำดับ ดังนั้น สมการ 5.17 จึงมีเพียงหนึ่งตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จึงสามารถนำมาสร้างโนโมแกรมได้ เมื่อแทนค่า C_{2-4} ลงสมการ 5.17 และ จัดรูปสมการเพื่อสร้างโนโมแกรมจะได้รูปแบบเป็นสมการที่ 6.20

$$(P_{s,2})_A - (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(1 - 0.34A')(v_2^2)_A - \frac{1}{2}\rho(1 + A')(v_1^2)_B = 0 \quad (6.20)$$

จากสมการ 6.20 จะสามารถสร้างโนโมแกรมได้ โดยโนโมแกรมสำหรับการหา $v_{1,B}$ ถูกแสดงไว้ในรูป ง - 16 และ ชุดคำสั่งได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.15 ทั้งนี้โนโมแกรมจะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน

6.2.4 โนโมแกรมสำหรับหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร Q_L

การสร้างโนโมแกรมสำหรับหา Q_L จะเริ่มจากการพิจารณาสมการ 3.51 โดยแทน $A_s = \pi DL$ และ ค่า $C_l = 22$ และ $n = 0.65$ ลงสมการ 3.51 ได้เป็นสมการที่ 6.21

$$\begin{aligned} \text{สมการ 3.51} \quad Q_L &= C_l \left(\frac{\Delta P_s}{\Delta P_{ref}} \right)^n \times A_s \times 5.077 \times 10^{-5} \\ Q_L &= 22 \times \pi DL \times 5.077 \times 10^{-5} \times \left(\frac{(P_{s,1})_A + P_{s,2}}{250} \right)^{0.65} \end{aligned} \quad (6.21)$$

จากสมการ 6.21 จะสามารถนำไปสร้างโนโมแกรมได้ โดยโนโมแกรมถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ง รูปที่ ง - 17 ก และ ง - 17 ข สำหรับ P_{s1A} ในช่วง 10 Pa ถึง 150 Pa และ 150 Pa ถึง 380 Pa โดย ชุดค่าสั่งถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.16 ทั้งนี้โนโมแกรม จะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน

6.2.5 โนโมแกรมสำหรับหาอุณหภูมิขาออกจากท่อตรง T_2

การสร้างโนโมแกรมสำหรับหา T_2 จะเริ่มจากการพิจารณาสมการที่ 3.32 โดยแทนค่า $v_{2,A} = \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)v_{1,A}$ ลงไปในตัว y จะได้สมการ 6.22

สมการ 3.32

$$T_2 = \frac{2T_{\infty,0} + T_1(y-1)}{y+1}$$

$$y = 2R_{tot}\rho\pi\frac{D_1^2}{4}c_p\left(\frac{v_1 + \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)v_1}{2}\right) \quad (6.22)$$

โดย T_1 คือ อุณหภูมิขาเข้าท่อลม [K]
 T_2 คือ อุณหภูมิขาออกจากท่อลม [K]

จากสมการ 3.32 สามารถจัดรูปใหม่ได้เป็นสมการ 6.23

$$T_2 = \frac{2T_{\infty,0}}{y+1} + \frac{T_1(y-1)}{y+1} \quad (6.23)$$

จากสมการ 6.23 กำหนดให้

$$Z_1 = \frac{y-1}{y+1} \quad \text{และ} \quad Z_2 = \frac{2T_{\infty,0}}{y+1}$$

เมื่อแทนค่า z_1 และ z_2 ลงสมการ 6.23 จะได้สมการ 6.24 ซึ่งเป็นสมการที่ใช้สำหรับการสร้างโนโมแกรมเพื่อหาค่า T_2

$$T_2 = \frac{2T_{\infty,0}}{y+1} + T_1 Z \quad (6.24)$$

โดยโนโมแกรมสำหรับค่า y ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ง รูปที่ ง - 18 ก และ ง - 18 ข สำหรับ Q_L/Q_1 ในช่วง 5×10^{-5} ถึง 0.01 และ 0.01 ถึง 0.4 โดยกราฟสำหรับหาค่า Z_1 และ Z_2 ถูกแสดงไว้ในรูปที่ ง - 19 และ ง - 20 ตามลำดับ และ โนโมแกรมสำหรับค่า T_2 ถูกแสดงไว้ในรูป ง - 21 และ ชุดคำสั่งในการสร้างโนโมแกรมถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค. หัวข้อ ค.17 และ ค.18 ทั้งนี้ในโนโมแกรมรูปที่ ง - 18 ก, ง - 18 ข และ ง - 21 จะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน

6.2.6 โนโมแกรมสำหรับหาความเร็วขาเข้าท่อ C ($v_{1,C}$)

การสร้างโนโมแกรมเพื่อหาขนาดของ $v_{1,C}$ จะเริ่มจากการวิเคราะห์สมการ 5.12 และ สมการ 3.40

$$\text{สมการ 5.12} \quad (P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho v_{2,A}^2 = (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho v_{1,C}^2 + \frac{1}{2}\rho C_{2-3} v_{2,A}^2$$

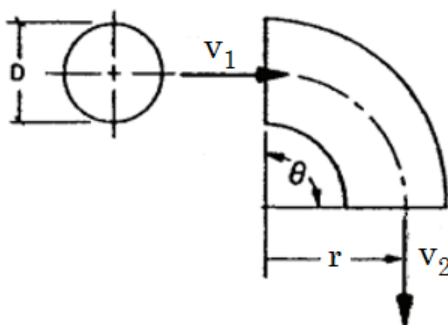
$$\text{สมการ 3.40} \quad C_{2-3} = 0.4 \left(1 - \frac{v_{1,C}}{v_{2,A}}\right)^2$$

จากสมการ 5.12 เมื่อแทนค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง และ แทนค่า C_{2-3} ลงสมการ 5.12 และ จัดรูปสมการจะได้สมการที่ 6.25

$$\begin{aligned} (P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho(v_{2,A}^2) &= (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_{1,C}^2) + \frac{1}{2}\rho \left(0.4 \left(1 - \frac{v_{1,C}}{v_{2,A}}\right)^2\right) (v_{2,A}^2) \\ (P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho(v_{2,A}^2) &= (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(v_{1,C}^2) + \frac{1}{2}\rho(0.4)(v_{2,A}^2) \left(1 - \frac{2v_{1,C}}{v_{2,A}} + \frac{(v_{1,C}^2)}{(v_{2,A}^2)}\right) \\ (P_{s,2})_A + \frac{1}{2}\rho(0.6v_{2,A}^2) - (P_{s,1})_A + \frac{1}{2}\rho(1.4)(v_{1,C}^2) + \rho(0.4)v_{2,A}v_{1,C} &= 0 \quad (6.25) \end{aligned}$$

จากสมการที่ 6.25 จะสามารถนำไปสร้างโนโมแกรมได้ โดยรูปโนโมแกรมนั้นถูกแบ่งเป็นสองรูปย่อยได้แก่ รูปที่ ง - 22 ซึ่งใช้แสดงค่าอ้างอิง R_{29} ซึ่งใช้เชื่อมโยงตัวแปรในสมการ 6.25 เข้าด้วยกัน และ รูป ง - 23 ซึ่งใช้ในการหา $v_{1,C}$ และ ชุดคำสั่งได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ค หัวข้อ ค.19 และ ค.20 ทั้งนี้โนโมแกรมรูปที่ ง - 22 และ ง - 23 จะมีแกนอ้างอิงเพื่อใช้เชื่อมโยงค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการเข้าด้วยกัน

6.2.7 โนโมแกรมสำหรับหาความดันสถิตขาออกจากช่องอ ($P_{s,2}$)



รูปที่ 3 - 14 แสดงการไหลผ่านช่องอ (ASHRAE Handbook, 2009)

การสร้างโนโมแกรมเพื่อหาขนาดของความดันสถิตขาออกจากช่องอ ($P_{s,2}$) ซึ่งมีค่าเท่ากับความดันสถิตขาเข้าท่อตรงที่ต่อจากช่องอ จะเริ่มต้นจากการวิเคราะห์สมการ 5.12 และสมการ 3.41 โดยจากรูป 3 - 14 ความเร็วขาออกจากช่องอ (v_2) จะมีค่าเท่ากับความเร็วขาเข้าท่อตรงที่ต่อกับขาออกของช่องอ (v_1) ดังนั้น $v_1 = v_2$

สมการ 5.12

$$P_{s,1} + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_{s,2} + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \frac{1}{2}\rho C_{1-2} v_1^2$$

สมการ 3.41

$$C_{1-2} = KC'_o$$

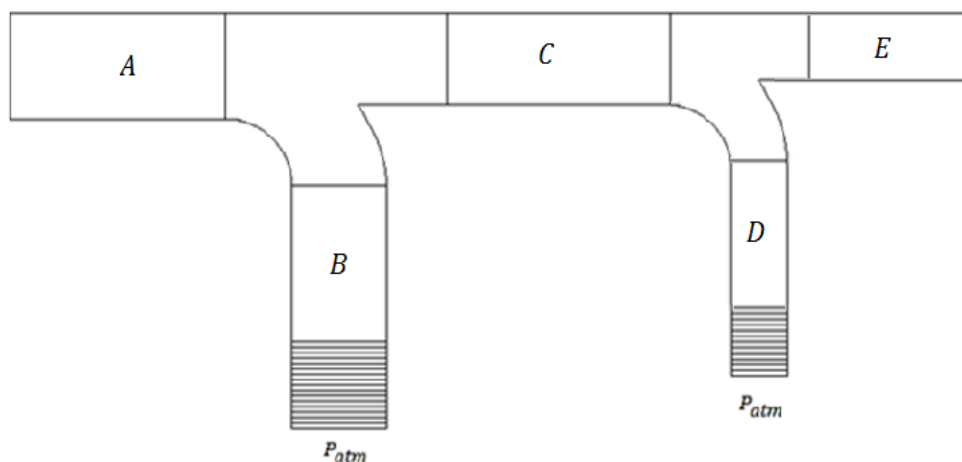
เนื่องจากในทางปฏิบัติมักใช้ช่องอ 90 องศา และมีค่า $r/D = 1$ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 5 หัวข้อ 5.2.3.2 ดังนั้น ค่า K เท่ากับ 1 และ ค่า C'_o เท่ากับ 0.22 ทำให้ได้ค่า C_{1-2} จากสมการ 3.41 จะมีค่าเท่ากับ 0.22 และ เนื่องจากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของช่องอมีค่าเท่าเดิมทั้งขาเข้า และ ขาออก ทำให้ความเร็วขาเข้า และ ขาออกจากช่องอมีค่าเท่ากัน $v_1 = v_2$ นอกจากนี้การที่ช่องอมีความยาวน้อยเมื่อคิดเทียบกับความยาวของท่อ จึงไม่คำนึงถึงการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นที่ช่องอ เมื่อแทนค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องลงในสมการ 5.12 และ จัดรูปสมการจะได้สมการ 6.26

$$P_{s,1} + \frac{1}{2}(1.2)v_1^2 = P_{s,2} + \frac{1}{2}(1.2)v_1^2 + \frac{1}{2}(1.2)(0.22)v_1^2$$

$$P_{s,1} - P_{s,2} - (0.132)v_1^2 = 0 \quad (6.26)$$

จากสมการที่ 6.26 จะสามารถนำไปสร้างโนโมแกรมได้ โดยรูปโนโมแกรมนั้นถูกแสดงไว้ในรูปที่ ง - 24 โดยชุดคำสั่งถูกแสดงไว้ในหัวข้อ ค.21

6.3 วิธีการออกแบบท่อลมด้วยโนโมแกรม



รูปที่ 5 - 4 ระบบท่อลม

ในการออกแบบท่อลมจะเริ่มต้นด้วยการใช้โนโมแกรมของท่อตรงท่อนแรก (ท่อ A) เพื่อหาความดันสถิตเข้าท่อ A ($P_{s,1}$)_A ซึ่งเท่ากับความดันสถิตของพัดลม, หาความดันสถิตขาออกของท่อ A ($P_{s,2}$)_A หาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร ($Q_{L,A}$) และ หาอุณหภูมิขาออกของท่อ A ($T_{2,A}$) จากนั้นจะใช้โนโมแกรมสำหรับข้อต่อแยกเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ B หรือ ความเร็วขาเข้าท่อตรงที่ต่อแยกจากท่อ A ($v_{1,B}$) และ หาความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนถัดไป หรือ ท่อ C ($v_{1,C}$) เมื่อทราบค่าความเร็วขาเข้าของท่อแต่ละท่อน และ ทราบอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร จะสามารถคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแต่ละท่อนได้ จากนั้นจะใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกของท่อตรง ($P_{s,2}$)_C และ ความดันสถิตขาออกท่อตรงที่ต่อแยก ($P_{s,2}$)_B โดยขั้นตอนการออกแบบท่อลมด้วยโนโมแกรมมีรายละเอียด ดังนี้

6.3.1 การใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาเข้าท่อตรงท่อนแรก

1. ทราบค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรในท่อตรงท่อนแรก หรือ ท่อ A ($Q_{1,A}$) จากเงื่อนไขของการออกแบบ และ กำหนดค่าความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนแรก หรือ ท่อ A ($v_{1,A}$) ให้อยู่ในช่วง 2.54 m/s ถึง 10.5 m/s อ้างอิงจาก ASHRAE Handbook-Fundamentals 2009 โดยต้องคำนึงถึงระดับความเข้มของเสียงควรมีค่าไม่เกิน 50 เดซิเบล อ้างอิงจากมาตรฐานระบบปรับอากาศ และ ระบายอากาศ วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์ พ.ศ. 2558 จากนั้นคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตรงท่อนแรก หรือ ท่อ A (D_A) จากสมการ $D_A = \sqrt{\frac{4Q_{1,A}}{\pi v_{1,A}}}$

2. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตรงท่อนแรก (D_A) และ ความยาวท่อตรงท่อนแรก (L_A) จะสามารถหาความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_{D,A}$) ได้จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 1 โดยให้ลากเส้นตรงจากแกนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อท่อนแรก ($D = D_A$) ไปยังแกนอ้างอิง R_1 โดยให้เส้นตรงตัดผ่านความหนาของท่อตรงท่อนแรก ($t = t_A$) จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_1 ตัดผ่านความยาวท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) ไปยังค่าความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) และ ใช้รูปที่ ง - 2 เพื่อหาค่าความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins,A}$) โดยเริ่มต้นลากเส้นตรงจากความหนาของท่อตรงท่อนแรก ($t = t_A$) ตัดผ่านค่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตรงท่อนแรก ($D = D_A$) ไปยังแกนอ้างอิง R_2 จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างแกนอ้างอิง แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_2 ที่อยู่ถัดไปทางขวา ให้ตัดผ่านค่าความหนาของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($b = b_A$) ไปยังแกนอ้างอิง R_3 จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างแกนอ้างอิง แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_3 ที่อยู่ถัดไปด้านขวา โดยให้เส้นตรงตัดผ่านความยาวของท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) ไปยังค่าความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins} = R_{ins,A}$)

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ (f_{sm}) โดยลากเส้นตรงจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตรงท่อนแรก ($D = D_A$) ตัดผ่านความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนแรก ($v_1 = v_{1,A}$) ไปยังค่า Friction Factor ของท่อเรียบ (f_{sm})

4. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อตรงท่อนแรก (f_A)

5. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตรงท่อนแรก (D_A) และ ความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนแรก (v_1) ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ได้ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 5 ก เมื่อค่า J อยู่ในช่วง 60 ถึง 500 และ ใช้รูป ง - 5 ข เมื่อค่า J อยู่ในช่วง 500 ถึง 2500 และ ขั้นตอนการหาค่า J ในสมการ 6.13 จะเริ่มต้นลากเส้นจากค่า Friction Factor ของท่อตรงท่อนแรก ($f = f_A$) ตัดผ่านตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ไปยังแกนอ้างอิง R_4 จากนั้นลากเส้นตรงจากค่า Friction Factor ของท่อเรียบ (f_{sm}) ย้อนกลับมายังแกนอ้างอิง R_4 เส้นตรงที่ลากจะตัดผ่านค่า J

สมการ 6.13

$$J = \left(\frac{(f_{sm}/8)(Re - 1000)(0.707)}{1 + 12.7(f_{sm}/8)^{1/2}(0.707^{2/3} - 1)} \right) \left(\frac{f}{f_{sm}} \right)^{0.68} (0.707)^{0.215}$$

6. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i,A}$) โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 6 ก เมื่อความยาวท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) มีค่าอยู่ในช่วง 1 m. ถึง 8 m. และ ใช้รูป ง - 6 ข เมื่อความยาวท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) มีค่าอยู่ในช่วง 8 m. ถึง 20 m โดยลากเส้นจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A ($D = D_A$) ตัดผ่านความยาวท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) ไปยังแกนอ้างอิง R_5 จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างแกนอ้างอิง แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_5 ซึ่งอยู่ถัดไปทางขวา ตัดผ่านค่า J ซึ่งหาได้จากรูปที่ ง - 5 ไปยังแกนอ้างอิง R_6 แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_6 ตัดผ่านความยาวท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) ไปยังค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ A ($R_{h,i,A}$)

7. หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins} = R_{ins,A}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,A}$) ($R_{D,A} + R_{ins,A} + R_{h,i,A}$) จากรูปที่ ง - 7 โดยถ้าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,A}$) อยู่ในช่วง 0.0002 K/W ถึง 0.001 K/W จะใช้รูปที่ ง - 7 ก และ ถ้า $R_{h,i,A}$ อยู่ในช่วง 0.001 K/W ถึง 0.01 K/W จะใช้รูปที่ ง - 7 ข และ ถ้า $R_{h,i,A}$ อยู่ในช่วง 0.01 K/W ถึง 0.12 K/W จะใช้รูปที่ ง - 7 ค โดยเริ่มต้นลากเส้นตรงจากความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,A}$) ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins} = R_{ins,A}$) ไปยังแกนอ้างอิง R_7 จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_7 ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) ไปยังแกนอ้างอิง R_8 จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_8 ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) ที่อยู่ด้านขวาไปยังค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins} = R_{ins,A}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,A}$) ($R_{D,A} + R_{ins,A} + R_{h,i,A}$)

8. หาค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($T_{ins,A}$) จากรูปที่ ง - 8 โดยรูปที่ ง - 8 ก หรือ ง - 8 ข จะใช้ในกรณีค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins} = R_{ins,A}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,A}$) ($R_{D,A} + R_{ins,A} + R_{h,i,A}$) อยู่ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.8 K/W , 0.8 K/W ถึง 2.5 K/W ตามลำดับ โดยลากเส้นตรงจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตรงท่อนแรก ($D = D_A$) ตัดผ่านค่า

ผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins} = R_{ins,A}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,A}$) ($R_{D,A} + R_{ins,A} + R_{h,i,A}$) ซึ่งหาค่าได้จากรูปที่ ง - 7 ไปยังแกนอ้างอิง R_9 จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_9 ตัดผ่านความยาวของท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) ไปยังแกนอ้างอิง R_{10} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกน R_{10} ตัดผ่านอุณหภูมิขาเข้าท่อตรงท่อนแรก ($T_1 = T_{1,A}$) ไปยังค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($T_{ins,A}$)

9. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,o,A}$) จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 9 โดยลากเส้นตรงจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อตรงท่อนแรก ($D = D_A$) ตัดผ่านค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($T_{ins} = T_{ins,A}$) ไปยังแกนอ้างอิง R_{11} จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมไปยังแกนอ้างอิง R_{11} ที่อยู่ทางขวา แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{11} ตัดผ่านค่าความยาวของท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) ไปยังความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,o,A}$)

10. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อตรงท่อนแรก ($R_{tot,A}$) โดยนำความต้านทานเชิงความร้อนแต่ละส่วนมาบวกกันตามสมการ 5.9

สมการ 5.9

$$R_{tot} = R_D + R_{ins} + R_{h,i} + R_{h,o}$$

11. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนอ้างอิง R_{13} โดยลากเส้นจากความยาวของท่อตรงท่อนแรก ($L = L_A$) ตัดผ่านค่า Friction Factor ($f = f_A$) ไปบรรจบที่แกนอ้างอิง R_{12} จากนั้นลากเส้นตรงจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตรงท่อนแรก ($D = D_A$) ย้อนกลับไปทางซ้ายไปยังแกนอ้างอิง R_{12} โดยเส้นตรงที่ลากจะตัดผ่านแกนอ้างอิง R_{13} โดยค่าจากแกนอ้างอิง R_{13} จะถูกนำไปใช้ต่อในรูป ง - 11 เพื่อหาค่า $Term_{v1}$

12. หาค่า $Term_{v1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 โดยจะใช้รูป ง - 11 ก , ง - 11 ข หรือ ง - 11 ค ก็ต่อเมื่อค่าอ้างอิง R_{13} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.1, 0.1 ถึง 1 และ 1 ถึง 7.5 ตามลำดับ โดยเริ่มลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{13} ให้ตัดผ่านค่าความเร็วขาเข้าของท่อตรงท่อนแรก ($v_1 = v_{1,A}$) ไปยังค่า $Term_{v1}$ โดยค่า $Term_{v1}$ จะถูกนำไปใช้ต่อในรูป ง - 13 และ ง - 14

สมการ 6.6

$$\begin{vmatrix} (v_1^2)_A & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho - \frac{1}{2}f\frac{L}{D}\rho & 1 \\ 0 & \frac{1}{2}\rho\left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right)^3 & 1 \end{vmatrix} = Term_{v1}$$

13. หาค่าอ้างอิง R_{16} โดยใช้รูป ง - 12 ก. หรือ ง - 12 ข. เมื่อค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าท่อตรงที่ต่อแยกจากท่อ A หรือ ท่อ B ($Q_{1,B}$) อยู่ในช่วง 0.1 m^3 ถึง 5 m^3 และ 5 m^3 ถึง 20 m^3 ตามลำดับ โดยเริ่มต้นลากเส้นตรงจากค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าท่อตรงที่ต่อแยกจากท่อ A หรือ ท่อ B ($Q_{1,B}$) ให้ตัดผ่านระยะ Throw (T_{50}) ไปยังแกนอ้างอิง R_{14} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{14} ตัดผ่านค่าความยาวของท่อ B (L_B) ไปยังแกนอ้างอิง R_{15} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกน R_{15} ให้ตัดผ่านค่าความยาวของท่อ B (L_B) ไปยังแกนอ้างอิง R_{16}

14. หาค่า $Term_x$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการสมการ 6.7 โดยใช้รูป ง - 13 ก , ง - 13 ข หรือ ง - 13 ค เมื่อค่าอ้างอิง R_{16} อยู่ในช่วง 0.1 ถึง 5 , 5 ถึง 20 และ 21 ถึง 85 ตามลำดับ โดยเริ่มต้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{16} โดยเส้นตรงที่ลากจะตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อตรงท่อนแรก ($R_{tot} = R_{tot,A}$) ไปยังแกนอ้างอิง R_{17} และ ลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{17} ตัดผ่านค่าอุณหภูมิขาเข้าท่อตรงท่อนแรก ($T_1 = T_{1,A}$) ไปยังค่า $Term_x$

สมการ 6.7

$$\begin{vmatrix} \frac{\dot{q}_{L,1-2}}{Q_{1,A}} + \frac{\dot{q}_{D,1-2}}{Q_{1,A}} & 1 & 1 \\ \left(\rho c_v \frac{Q_{2,A}}{Q_{1,A}} (T_2 - T_{\infty,o}) - \rho c_v (T_1 - T_{\infty,o})\right) & 1 & 0 \\ \left(1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}}\right) (P_{s,2})_A & 0 & 1 \end{vmatrix} = Term_x$$

15. หาค่าความดันสถิตขาเข้าท่อตรงท่อนแรก หรือ ท่อ A ($P_{s,1})_A$ โดยใช้รูป ง - 14 โดยลากเส้นตรงจากค่า $Term_x$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 14 ตัดผ่านค่า $Term_{v1}$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 12 ไปยังค่าความดันสถิตขาเข้าของท่อตรงท่อนแรก หรือ ท่อ A ($P_{s,1})_A$

6.3.2 การใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกของท่อตรงท่อนแรก

ใช้รูปที่ ง - 15 ในการหาความดันสถิตขาออกของท่อตรงท่อนแรก $(P_{s,2})_A$ โดยถ้าความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อตรงท่อนแรก $(R_{tot} = R_{tot,A})$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.4 K/W จะใช้รูปที่ ง - 15 ก, ถ้า $R_{tot,A}$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.4 K/W ถึง 1.2 K/W จะใช้รูปที่ ง - 15 ข และ ถ้า $R_{tot,A}$ มีค่าอยู่ในช่วง 1.2 K/W ถึง 3 K/W จะใช้รูปที่ ง - 15 ค เริ่มต้นลากเส้นตรงจากอัตราการไหลขาเข้าของท่อตรงท่อนแรก $(Q_1 = Q_{1,A})$ ให้ตัดผ่านค่าอุณหภูมิขาเข้าท่อตรงท่อนแรก $(T_1 = T_{1,A})$ ไปยังแกนอ้างอิง **R18** และ ลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง **R18** ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อตรงท่อนแรก $(R_{tot} = R_{tot,A})$ ไปยังแกนอ้างอิง **R19** จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง **R19** ตัดผ่านค่า $Term_{v1}$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 12 หัวข้อ 6.3.1 ไปยังแกนอ้างอิง **R20** จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง **R20** ตัดผ่านค่าความดันสถิตขาเข้าท่อตรงท่อนแรก $(P_{s,1})_A$ ไปยังค่าความดันสถิตขาออกของท่อตรงท่อนแรก $P_{s,2} = (P_{s,2})_A$

6.3.3 การใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ B

ใช้รูปที่ ง - 16 โดยลากเส้นตรงจากค่าความดันสถิตขาเข้าท่อตรงท่อนแรก $(P_{s,1})_A$ ตัดผ่านค่าความดันสถิตขาออกของท่อตรงท่อนแรก $(P_{s,2})_A$ ไปยังแกนอ้างอิง **R21** จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง **R21** ตัดผ่านค่าความเร็วขาออกจากท่อตรงท่อนแรก $(v_{2,A})$ $(v_{2,A} = (1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}})v_{1,A})$ เมื่อ $Q_{L,A}$ อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อตรง และ $Q_{1,A}$ คือ อัตราการไหลขาเข้าท่อตรง และ $v_{1,A}$ คือ อัตราเร็วขาเข้าของท่อตรง A) ไปยังค่าความเร็วขาออกของท่อตรงที่ต่อแยก หรือ ท่อ B $(v_{1,B})$ เมื่อทราบค่าความเร็วขาออกของท่อ B จะสามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ B ได้ ด้วยสมการ $D_B = \sqrt{\frac{4Q_{1,B}}{\pi v_{1,B}}}$ เมื่อ $Q_{1,B}$ คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าท่อ B

6.3.4 การใช้โนโมแกรมเพื่อหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อตรง

ใช้รูปที่ ง - 17 ถ้าความดันสถิตขาเข้าท่อตรงท่อนแรก $(P_{s,1})_A$ มีค่าอยู่ในช่วง 10 Pa ถึง 150 Pa จะใช้รูป ง - 17 ก และ ถ้าความดันสถิตขาเข้าท่อตรงท่อนแรก $(P_{s,1})_A$ มีค่าอยู่ในช่วง 150 Pa ถึง 380 Pa จะใช้รูป ง - 17 ข โดยลากเส้นตรงจากความดันสถิตขาเข้าของท่อตรง

$(P_{s,1})_A$ ตัดผ่านค่าความดันสถิตขาออกของท่อตรง $(P_{s,2})$ ไปยังแกนอ้างอิง R_{22} จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างแกนอ้างอิง แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{22} ที่อยู่ถัดไปทางขวา ตัดผ่านค่าความยาวของท่อตรง (L) ไปยังแกนอ้างอิง R_{23} จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างแกนอ้างอิง แล้วลากเส้นตรงจากเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อตรง (D) ย้อนกลับมาทางซ้ายไปยังแกนอ้างอิง R_{23} โดยเส้นตรงที่ลากจะตัดผ่านค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อตรง (Q_L)

6.3.5 โนมแกรมสำหรับหาอุณหภูมิขาออกจากท่อตรง

1. ใช้รูปที่ ง - 18 ก ถ้าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อตรง $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right)$ มีค่าอยู่ในช่วง 5×10^{-5} ถึง 0.01 และ ใช้รูป ง - 18 ข ถ้าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อตรง $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right)$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.4 โดยลากเส้นตรงจากเส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อตรง (D) ตัดผ่านค่าความเร็วขาเข้าท่อตรง (v_1) ไปยังแกนอ้างอิง R_{24} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{24} ตัดผ่านค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อตรง $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right)$ ไปยังแกนอ้างอิง R_{25} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{25} ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อตรง (R_{tot}) ไปยังแกนอ้างอิง R_{26} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{26} ตัดผ่านค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อตรง $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right)$ ไปยังค่า y ซึ่งมีค่าตามสมการ 6.22

$$\text{สมการ 6.22} \quad y = 2R_{tot}\rho\pi\frac{D^2}{4}c_p\left(\frac{v_1 + \left(1 - \frac{Q_{LA}}{Q_{1A}}\right)v_1}{2}\right)$$

2. นำค่า y ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปใช้ในการหาค่า Z_1 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 19 โดยลากเส้นตรงจากแกนนอนซึ่งแสดงค่าของ y ขึ้นไปสัมผัสเส้นโค้ง จากนั้นลากเส้นตรงจากจุดสัมผัสให้ขนานแกนนอนไปยังค่า Z_1 ซึ่งอยู่ในแนวแกนตั้ง

3. นำค่า y ที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ไปใช้ในการหาค่า Z_2 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 20 โดยลากเส้นตรงจากแกนนอนซึ่งแสดงค่าของ y ขึ้นไปสัมผัสเส้นโค้ง จากนั้นลากเส้นตรงจากจุดสัมผัสให้ขนานแกนนอนไปยังค่า Z_2 ซึ่งอยู่ในแนวแกนตั้ง

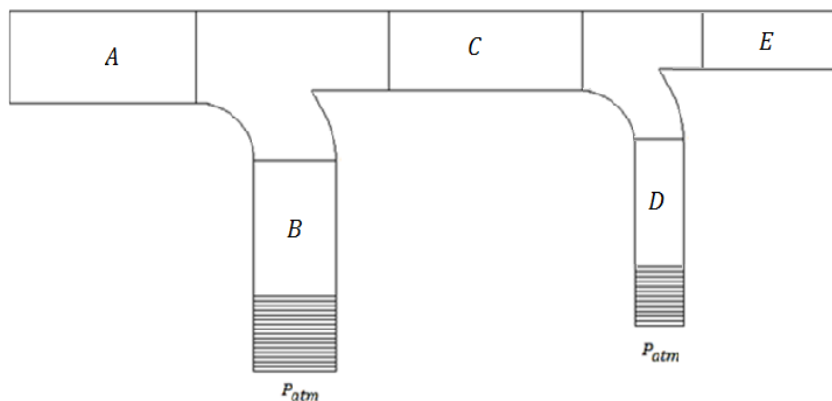
4. นำค่า Z_1 และ Z_2 ที่ได้จากขั้นตอนที่ 2 และ 3 ไปใช้ในการหาอุณหภูมิขาออก จากท่อตรง (T_2) โดยใช้รูปที่ ง - 21 โดยลากเส้นตรงจากแกนอุณหภูมิขาเข้าท่อตรง (T_1) ตัดผ่านค่า Z_1 ไปยังแกนอ้างอิง R_{27} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{27} ตัดผ่านค่า Z_2 ไปยังค่าอุณหภูมิขาออกจากท่อตรง T_2

6.3.6 โนมแกรมสำหรับหาความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนัดไป หรือ ท่อ C

1. ใช้โนมแกรมรูปที่ ง - 22 หาค่าอ้างอิง R_{29} โดยลากเส้นตรงจากความเร็วขาออกจากท่อตรง A หรือ ท่อตรงท่อนก่อนหน้าท่อ C ($v_{2,A}$) ตัดผ่านค่าความดันสถิตขาเข้าของท่อตรง ($P_{s,1}$)_A ไปยังแกนอ้างอิง R_{28} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{28} ตัดผ่านค่าความดันสถิตขาออกจากท่อ A หรือ ท่อตรงท่อนก่อนหน้าท่อ C ($P_{s,2}$)_A ไปยังค่าอ้างอิง R_{29}

2. ใช้โนมแกรมรูปที่ ง - 23 ในการหาอัตราเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนัดไป หรือ ท่อ C ($v_{1,C}$) โดยลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{29} ไปยังค่าความเร็วขาออกจากท่อตรง A หรือ ท่อตรงท่อนก่อนหน้าท่อ C ($v_{2,A}$) โดย $v_{2,A} = (1 - \frac{Q_{L,A}}{Q_{1,A}})v_{1,A}$ โดยเส้นตรงที่ลากจะตัดผ่านความเร็วขาเข้าท่อตรง C ($v_{1,C}$) เมื่อทราบค่า $v_{1,C}$ จะสามารถหาขนาดของท่อ C ได้ด้วยสมการ $D_C = \sqrt{\frac{4Q_{1,C}}{\pi v_{1,C}}}$ โดย $Q_{1,C} = Q_{2,A} - Q_{1,B}$ โดย $Q_{2,A}$ อัตราการไหลเชิงปริมาตรขาออกจากท่อตรง A และ $Q_{1,B}$ อัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าท่อ B

6.3.7 การใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากท่อ B



รูปที่ 5 - 4 ระบบท่อลม

1. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B (D_B) และ ความยาวท่อ B (L_B) จะสามารถหาความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อ B ($R_{D,B}$) ได้จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 1 โดยให้ลากเส้นตรงจากแกนเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B ($D = D_B$) ไปยังแกนอ้างอิง R_1 โดยให้เส้นตรงตัดผ่านความหนาของท่อ B ($t = t_B$) จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_1 ตัดผ่านความยาวท่อ B ($L = L_B$) ไปยังค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อ B ($R_D = R_{D,B}$) และ ใช้รูปที่ ง - 2 เพื่อหาค่าความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวน (R_{ins}) โดยเริ่มต้นลากเส้นตรงจากความหนาของท่อ B ($t = t_B$) ตัดผ่านค่าเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B ($D = D_B$) ไปยังแกนอ้างอิง R_2 จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างแกนอ้างอิง แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_2 ที่อยู่ถัดไปทางขวา ให้ตัดผ่านค่าความหนาของฉนวนหุ้มท่อ B ($b = b_B$) ไปยังแกนอ้างอิง R_3 จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างแกนอ้างอิง แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_3 ที่อยู่ถัดไปด้านขวา โดยให้เส้นตรงตัดผ่านความยาวของท่อ B ($L = L_B$) ไปยังค่าความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวน ($R_{ins} = R_{ins,B}$)

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ (f_{sm}) โดยลากเส้นตรงจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B ($D = D_B$) ตัดผ่านความเร็วขาเข้าท่อ B ($v_1 = v_{1,B}$) ไปยังค่า Friction Factor ของท่อเรียบ ($f_{sm} = f_{sm,B}$)

4. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อ B ($f = f_B$)

5. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ B (D_B) และ ความเร็วขาเข้าท่อ B ($v_{1,B}$) ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ได้ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 5 ก เมื่อค่า J อยู่ในช่วง 60 ถึง 500 และ ใช้รูป ง - 5 ข เมื่อค่า J อยู่ในช่วง 500 ถึง 2500 และ ขั้นตอนการหาค่า J ในสมการ 6.13 จะเริ่มต้นลากเส้นจากค่า Friction Factor ของท่อ B ($f = f_B$) ตัดผ่านตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) ไปยังแกนอ้างอิง R_4 ไปยังแกนอ้างอิง R_4 จากนั้นลากเส้นตรงจากค่า Friction Factor ของท่อเรียบ (f_{sm}) ย้อนกลับมายังแกนอ้างอิง R_4 เส้นตรงที่ลากจะตัดผ่านค่า J

6. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i,B}$) โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 6 ก เมื่อความยาวท่อ B ($L = L_B$) มีค่าอยู่ในช่วง 1 m. ถึง 8 m. และ ใช้รูป ง - 6 ข เมื่อความยาวท่อตรง B ($L = L_B$) มีค่าอยู่ในช่วง 8 m. ถึง 20 m โดยลากเส้นจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B ($D = D_B$) ตัดผ่านความยาวท่อ B ($L = L_B$) ไปยังแกนอ้างอิง R_5 จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างแกนอ้างอิง แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_5 ซึ่งอยู่ถัดไปทางซ้าย ตัดผ่านค่า J ซึ่งหาได้จากรูปที่ ง - 5 ไปยังแกนอ้างอิง R_6 แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_6 ตัดผ่านความยาวท่อ B ($L = L_B$) ไปยังค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i,B}$)

7. หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อ B ($R_D = R_{D,B}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ B ($R_{ins} = R_{ins,B}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i} = R_{h,i,B}$) ($R_{D,B} + R_{ins,B} + R_{h,i,B}$) จากรูปที่ ง - 7 โดยถ้าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i} = R_{h,i,B}$) อยู่ในช่วง 0.0002 K/W ถึง 0.001 K/W จะใช้รูปที่ ง - 7 ก และ ถ้า $R_{h,i,B}$ อยู่ในช่วง 0.001 K/W ถึง 0.01 K/W จะใช้รูปที่ 6 - 7 ข และ ถ้า $R_{h,i,B}$ อยู่ในช่วง 0.01 K/W ถึง 0.12 K/W จะใช้รูปที่ ง - 7 ค โดยเริ่มต้นลากเส้นตรงจากความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i} = R_{h,i,B}$) ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ B ($R_{ins} = R_{ins,B}$) ไปยังแกนอ้างอิง R_7 จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_7 ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อ B ($R_D = R_{D,A}$) ไปยังแกนอ้างอิง R_8 จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_8 ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อ B ($R_D = R_{D,B}$) ที่อยู่ด้านขวาไปยังค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อ B ($R_D = R_{D,B}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ B ($R_{ins} = R_{ins,B}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงก่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,B}$) ($R_{D,B} + R_{ins,B} + R_{h,i,B}$)

8. หาค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อลม B ($T_{ins,B}$) จากรูปที่ ง - 8 โดยรูปที่ ง - 8 ก หรือ ง - 8 ข จะใช้ในกรณีค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ B ($R_D = R_{D,B}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ B ($R_{ins} = R_{ins,B}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i} = R_{h,i,B}$) ($R_{D,B} + R_{ins,B} + R_{h,i,B}$) อยู่ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.8 K/W , 0.8 K/W ถึง 2.5 K/W ตามลำดับ โดยลากเส้นตรงจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B ($D = D_B$) ตัดผ่านค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ B ($R_{D,B}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ B ($R_{ins,B}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i,B}$) ($R_{D,B} + R_{ins,B} + R_{h,i,B}$) ไปยังแกนอ้างอิง **R₉** จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง **R₉** ตัดผ่านความยาวของท่อ B ($L = L_B$) ไปยังแกนอ้างอิง **R₁₀** จากนั้นลากเส้นตรงจากแกน **R₁₀** ตัดผ่านอุณหภูมิขาเข้าท่อ B ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิขาออก จากท่อ A ($T_1 = T_{1,B} = T_{2,A}$) ไปยัง ค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อลม B ($T_{ins} = T_{ins,B}$)

9. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ B ($R_{h,o,B}$) จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 9 โดยลากเส้นตรงจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B ($D = D_B$) ตัดผ่านค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อลม B ($T_{ins} = T_{ins,B}$) ไปยังแกนอ้างอิง **R₁₁** จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง **R₁₁** จากนั้นลากเส้นตรงเชื่อมไปยังแกนอ้างอิง **R₁₁** ที่อยู่ทางขวา แล้วลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง **R₁₁** ตัดผ่านค่าความยาวของท่อ b ($L = L_B$) ไปยังความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,o,B}$)

10. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ B ($R_{tot,B}$) โดยนำความต้านทานเชิงความร้อนแต่ละส่วนมาบวกกันตามสมการ 5.9

สมการ 5.9

$$R_{tot} = R_D + R_{ins} + R_{h,i} + R_{h,o}$$

11. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนอ้างอิง **R₁₃** โดยลากเส้นจากความยาวของท่อ B ($L = L_B$) ตัดผ่านค่า Friction Factor ท่อ B ($f = f_B$) ไปบรรจบที่แกนอ้างอิง **R₁₂** จากนั้นลากเส้นตรงจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ B ($D = D_B$) ย้อนกลับไปทางซ้ายไปยังแกนอ้างอิง **R₁₂** โดยเส้นตรงที่ลากจะตัดผ่านแกนอ้างอิง **R₁₃** โดยค่าจากแกนอ้างอิง **R₁₃** จะถูกนำไปใช้ต่อในรูป ง - 11 เพื่อหาค่า $Term_{v1}$

12. หาค่า $Term_{v_1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 โดยจะใช้รูป ง - 11 ก , ง - 11 ข หรือ ง - 11 ค ก็ต่อเมื่อค่าอ้างอิง R_{13} อยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.1, 0.1 ถึง 1 และ 1 ถึง 7.5 ตามลำดับ โดยเริ่มลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{13} ให้ตัดผ่านค่าความเร็วขาเข้าของท่อ B ($v_1 = v_{1,B}$) ไปยังค่า $Term_{v_1}$

13. ใช้รูปที่ ง - 15 ในการหาความดันสถิตขาออกจากท่อ B ($P_{s,2}$)_B โดยถ้าความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ B ($R_{tot} = R_{tot,A}$) มีค่าอยู่ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.4 K/W จะใช้รูปที่ ง - 15 ก, ถ้า $R_{tot,B}$ มีค่าอยู่ในช่วง 0.4 K/W ถึง 1.2 K/W จะใช้รูปที่ ง - 15 ข และ ถ้า $R_{tot,B}$ มีค่าอยู่ในช่วง 1.2 K/W ถึง 3 K/W จะใช้รูปที่ ง - 15 ค เริ่มต้นลากเส้นตรงจากอัตราการใช้พลังงานเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อ B ($Q_1 = Q_{1,B}$) ให้ตัดผ่านค่าอุณหภูมิขาเข้าท่อตรงท่อ B ($T_1 = T_{1,B} = T_{2,A}$) ไปยังแกนอ้างอิง R_{18} และ ลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{18} ตัดผ่านค่าความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ B ($R_{tot} = R_{tot,B}$) ไปยังแกนอ้างอิง R_{17} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{19} ตัดผ่านค่า $Term_{v_1}$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 12 ไปยังแกนอ้างอิง R_{20} จากนั้นลากเส้นตรงจากแกนอ้างอิง R_{20} ตัดผ่านค่าความดันสถิตขาเข้าท่อตรง B ($P_{s,1}$)_B = ($P_{s,1}$)_A ไปยังค่าความดันสถิตขาออกของท่อ B ($P_{s,2}$)_B

6.3.8 การใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากตรงท่อนัดไป หรือ ท่อ C

การหาความดันสถิตขาออกจากท่อตรง C ($P_{s,2,C}$) มีขั้นตอนทั้งหมดเช่นเดียวกับหัวข้อ 6.3.7 โดยเปลี่ยนตัวแปรในขั้นตอน 1 ถึง 13 จากของท่อ B มาเป็นตัวแปรของท่อ C

6.3.9 การใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากข้อง

ใช้รูปที่ ง - 24 ในการหาความดันสถิตขาออกจากข้อง ($P_{s,2}$) โดยลากเส้นตรงจากความดันสถิตขาเข้าข้อง $P_{s,1}$ หรือ ความดันขาออกจากท่อตรงที่ต่อเข้าข้อง ไปยังความเร็วขาเข้าข้อง v_1 หรือ ความเร็วขาออกจากท่อตรงที่ต่อเข้าข้อง โดยเส้นตรงที่ลากจะตัดผ่านค่าความดันสถิตขาออกจากข้อง ($P_{s,2}$) ซึ่งมีค่าเท่ากับความดันสถิตขาเข้าท่อตรงที่ต่อกับขาออกของข้อง

ในการพิจารณาเพื่อหาขนาดของความดันสถิตขาออก ($P_{s,2}$), ความเร็วขาเข้า (v_1), อัตราการใช้พลังงานเชิงปริมาตร (Q_L) และ อุณหภูมิขาออก (T_2) ของท่อตรง และ ท่อแยกท่อนอื่นๆ จะมีวิธีเช่นเดียวกับขั้นตอนในหัวข้อ 6.3.2 - 6.3.8 โดยความดันสถิตขาเข้า ($P_{s,1}$) ของท่อแต่

ละทอนมีค่าเท่ากับความดันสถิตขาเข้าท่อตรงทอนแรก $(P_{s,1})_A$ เมื่อใช้โนโมแกรมกับท่อลมทั้งระบบ จะทำให้ทราบขนาด และ ความเร็ว รวมทั้งความดันสถิตขาออกของท่อลมแต่ละทอน



บทที่ 7

สรุปผล และ ข้อเสนอแนะ

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบท่อลม ที่คำนึงถึงการรั่วไหลทั้งที่มาจากรอยต่อ รอยตะเข็บและการสึกกร่อนของท่อ และการสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อนจากผนังท่อลม เพื่อศึกษาถึงพฤติกรรมของกลุ่มตัวแปรที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการไหลของอากาศภายในท่อลมเมื่อคำนึงถึงผลกระทบของการสูญเสียจากการรั่วไหลต่าง ๆ และการสูญเสียจากการถ่ายเทความร้อน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้สอดคล้องกับสภาพระบบท่อลมที่เกิดขึ้นจริง ทั้งนี้แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือ เพื่อการออกแบบท่อลมที่คำนึงถึงการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อน โดยพัฒนาจากวิธีการออกแบบท่อลมด้วยวิธี Static Regain ทำให้ได้การออกแบบท่อลมใหม่ที่คำนึงถึงการรั่วไหล และการถ่ายเทความร้อน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากชุดสมการในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีความซับซ้อนสูง ดังนั้นเพื่อให้วิธีการออกแบบท่อลมที่พัฒนาขึ้นสามารถนำมาใช้งานในทางปฏิบัติได้สะดวก งานวิจัยนี้จึงได้ใช้วิธีการสร้างโมเดลเพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการออกแบบ แทนการการสร้างโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อการออกแบบท่อลม

โมเดลที่สร้างขึ้นได้ถูกนำมาใช้ในการออกแบบระบบท่อลมตัวอย่างและเปรียบเทียบกับ การออกแบบท่อลมโดยวิธี Static Regain เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างของผลลัพธ์ที่ได้ซึ่งจะสะท้อนถึงผลของการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อขนาดท่อลม

7.1.1. พฤติกรรมของกลุ่มตัวแปรที่สำคัญ

7.1.1.1 ตัวเลขเรย์โนลด์

จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของตัวเลขเรย์โนลด์ส่งผลให้ความดันรวมลดลงเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งส่งผลให้อัตราการถ่ายเทความร้อนของลมภายในท่อเพิ่มมากขึ้น

7.1.1.2 ผลกระทบจากการไหลในท่อที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บต่อค่า Friction Factor

การรบกวนที่เพิ่มขึ้นตามแนวรอยต่อ และ แนวตะเข็บ จะส่งผลกระทบต่อความดันรวมที่ลดลง และ ส่งผลต่อค่า Friction Factor ของการไหลภายในท่อที่มีรอยร้าวจากรอยต่อ และ รอยตะเข็บ ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อพัฒนาสมการ Friction Factor สำหรับการไหลภายในท่อลมที่มีการร้าวจากรอยต่อและรอยตะเข็บ ดังสมการ 4.5

$$\text{สมการ 4.5} \quad f = \{-1.8 \log\left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re}\right]\}^{-2} + 0.0133e^{-7 \times 10^{-6} Re}$$

7.1.1.3 อัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางรูร้าวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ (D_v/D)

ในกรณีที่ท่อลมมีรูร้าวเนื่องจากการสึกกร่อน ผลจากรูร้าวเหล่านั้นย่อมส่งผลกระทบต่อค่า Friction Factor ของการไหลภายในท่อที่มีรอยร้าว งานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองเพื่อพัฒนาสมการ Friction Factor สำหรับการไหลภายในท่อลมที่มีการร้าวจากการสึกกร่อน ดังสมการ 4.8

$$\text{สมการ 4.8} \quad f = \{-1.8 \log\left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7}\right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re}\right]\}^{-2} + (0.2144e^{-2 \times 10^{-5} Re}) \frac{D_v}{D}$$

7.1.2. การพัฒนาแบบจำลองคณิตศาสตร์

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้นำพื้นฐานวิธีการออกแบบท่อลมแบบ Static Regain มาพัฒนา โดยให้มีการคำนึงถึงผลกระทบของการสูญเสียจากการรบกวน และ การถ่ายเทความร้อน ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาความดันสถิตของพัลลม, ความดันสถิตขาออก, อุณหภูมิขาออก และ ความเร็วขาออก ได้สอดคล้องกับสภาพจริงมากขึ้น และ ทำให้คำนวณหาขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลมในระบบได้อย่างเหมาะสมยิ่งขึ้น โดยแบบจำลองที่พัฒนานั้น ประกอบด้วยแบบจำลอง 3 รูปแบบ ได้แก่

7.1.2.1 แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม

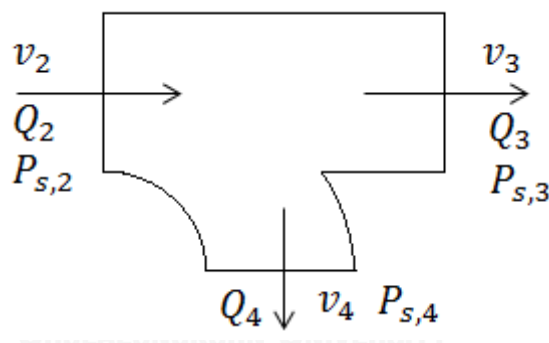
แบบจำลองในส่วนนี้เป็นแบบจำลองเพื่อใช้ในการหาขนาดของความดันสถิตขาเข้าของท่อท่อนแรก รวมทั้งใช้คำนวณหาความดันสถิตปลายทางของท่อตรงทุก ๆ ท่อน และ

ใช้หาอัตราเร็วของลม และ อุณหภูมิขาออกของท่อตรง โดยในแบบจำลองนี้ได้พัฒนาขึ้นจากสมการอนุรักษ์มวล สมการอัตราการรั่วไหล และ สมการพลังงาน โดยรวมเอาผลกระทบจากการรั่วไหล และการถ่ายเทความร้อนเข้าไปไว้ในสมการพลังงาน

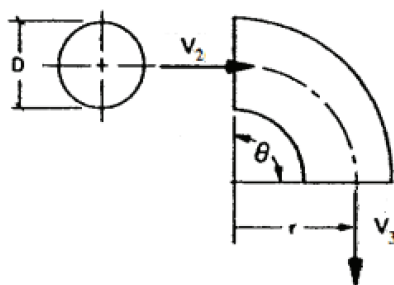
7.1.2.2 แบบจำลองสำหรับท่อตรงที่มีรอยต่อ และ ตะเข็บในท่อลม ที่มีการจ่ายลมสู่บริเวณปรับอากาศ

แบบจำลองนี้จะใช้สำหรับการวิเคราะห์ท่อตรงที่มีส่วนของท่อที่ใช้จ่ายลมเข้าพื้นที่ที่มีการปรับอากาศ โดยในการพัฒนาแบบจำลองนี้ได้อาศัยสมการอนุรักษ์มวล สมการอัตราการรั่วไหล สมการพลังงาน และ สมการระยะส่งลม เป็นสมการหลักในแบบจำลอง โดยในสมการพลังงานจะคำนึงถึงผลกระทบจากการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนเข้าไปในสมการด้วย

7.1.2.3 แบบจำลองสำหรับข้อต่อ



รูปที่ 5 - 3 แบบจำลองข้อต่อแยก



รูปที่ 3 - 14 แสดงการไหลผ่านข้องอ (ASHRAE Handbook, 2009)

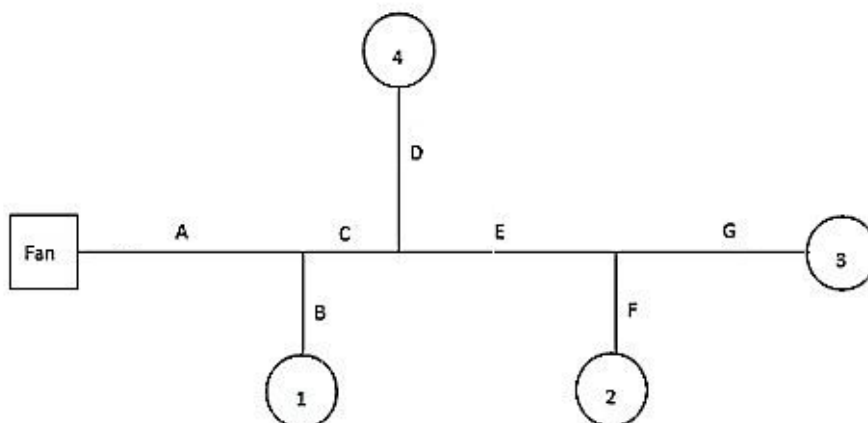
แบบจำลองนี้จะแบ่งข้อต่อออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ข้อต่อแยก และ ข้อต่อ โดยแบบจำลองข้อต่อแยกจะถูกแบ่งเป็นแบบจำลองย่อยอีก 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบจำลองในเส้นทางการไหล 2 – 3 และ แบบจำลองในเส้นทางการไหล 2 – 4 โดยแบบจำลองย่อยทั้งสองมีสมการหลักได้แก่ สมการอนุรักษ์มวล และ สมการพลังงาน ส่วนแบบจำลองย่อยสำหรับข้อต่อจะอาศัยสมการพลังงานเป็นสมการหลักในการคำนวณ ทั้งนี้ในแบบจำลองทั้ง 2 แบบนี้ไม่มีการนำเอาการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนเข้ามาพิจารณาด้วย เนื่องจากความยาวของข้อต่อที่น้อยเมื่อเทียบกับความยาวท่อลม

7.1.3. วิธีการออกแบบท่อลม

การแก้ปัญหาในแบบจำลองนั้นจะเริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ และ แก้มสมการจากแบบจำลองทั้งสาม โดยจากการแก้ระบบสมการจะทำให้ทราบขนาดของความดันสถิตพัคตัมที่ต้องใช้รวมทั้งทำให้ทราบถึงอัตราการรั่วไหล อัตราเร็ว อุณหภูมิขาออก และ ขนาดของท่อตรงที่มีการจ่ายลม จากนั้นจะนำความดันสถิต ความเร็ว และ อุณหภูมิขาออกที่คำนวณได้ไปใช้ในการคำนวณกับท่อท่อนถัด ๆ ไป ทำให้ทราบขนาด ความเร็ว และ ความดันของท่อลมทั้งระบบ โดยในการแก้ระบบสมการในแบบจำลองนั้นจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการแก้สมการ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของชุดสมการ จากนั้น จึงทำการสร้างโนโมแกรมซึ่งพัฒนามาจากการหาคำตอบจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยให้สามารถออกแบบระบบท่อลมได้โดยสะดวก

7.2 เปรียบเทียบผลการออกแบบ

ผลการออกแบบท่อลมด้วยโนโมแกรมที่พัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เมื่อเปรียบเทียบกับผลการออกแบบจากวิธี Static Regain ซึ่งผลการออกแบบจากวิธีทั้งสองได้ถูกแสดงไว้ในภาคผนวก ก. และ สามารถสรุปผลการออกแบบได้ ดังนี้



รูปที่ ก - 1 แบบท่อลมที่ใช้ในการออกแบบ

7.2.1 เปรียบเทียบความดันรวมที่ลดลงในท่อแต่ละท่อน

ตารางที่ 7 - 1 เปรียบเทียบความดันรวมที่ลดลงจากการออกแบบด้วยโนโมแกรม และ วิธี Static Regain

ท่อ	ความดันรวมลด (Pa)	
	โนโมแกรม	Static Regain
A	9.80	9.05
B	4.08	7.02
C	6.08	5.64
D	3.07	6.73
E	9.13	7.37
F	2.05	6.05
G	10.17	8.02

จากตาราง 7 - 1 พบว่าการออกแบบท่อลมด้วยโนโมแกรมจะมีความดันรวมที่ลดลงในท่อตรงได้แก่ ท่อ A, C, E และ G มากกว่าการออกแบบด้วยวิธี Static Regain ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีการคำนึงถึงความดันพลศาสตร์ที่ลดลงเนื่องจากการรั่วไหลผ่านรอยต่อและตะเข็บ ทำให้ค่า Friction Factor ในท่อบางค่าสูงกว่าค่า Friction Factor ที่ใช้ในการออกแบบด้วย Static Regain รวมทั้งยังคำนึงถึงความดันลดที่มาจากจากการถ่ายเทความร้อนด้วย ผลจากปัจจัยทั้งสองนี้จึงทำให้ความดันรวมที่ลดลงมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับค่าความดันรวมที่ลดลงที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี Static Regain ซึ่งไม่ได้คิดถึง การรั่ว ทำให้ความดันพลศาสตร์ในท่อที่ไม่มีการจ่ายลมไม่มีการเปลี่ยนแปลง ความดันรวมลดลงที่ได้จึงเป็นผลมาจากความดันสถิตที่ลดลงเพียงอย่างเดียวจากผลของความเสียดทานภายในท่อ

เมื่อมาพิจารณาที่ท่อแยก ได้แก่ ท่อ B, D และ F กลับพบว่าความดันรวมที่ลดลงจากการออกแบบด้วยวิธี Static Regain จะมีค่ามากกว่าการออกแบบด้วยโนโมแกรม สาเหตุหลักมาจากการที่ความเร็วขาเข้าท่อแยกจากการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี Static Regain ดังแสดงในตาราง 7 - 2 โดยมีความเร็วน้อยกว่าผลจากการออกแบบด้วยวิธี Static Regain โดยเฉลี่ยเท่ากับ 40% ทำให้ขนาดท่อที่ใช้มีขนาดมากกว่า ดังแสดงในตาราง 7-3

สำหรับการส่งผ่านมวลอากาศที่เท่ากัน ส่งผลให้ความเสียดทานมีค่าน้อยลง ทำให้ความดันรวมที่ลดมีค่าน้อยลง ซึ่งความเร็วที่ลดลงนี้เป็นผลมาจากการไปชดเชยให้กับความดันสถิตนั่นเอง

ตารางที่ 7 - 2 เปรียบเทียบความเร็วขาเข้าท่อแยก ได้แก่ ท่อ B, D และ F

ท่อ	ความเร็วขาเข้าท่อแยก (m/s)	
	โนโมแกรม	Static Regain
B	4.20	7.10
D	3.75	6.34
F	3.20	5.64

7.2.2 เปรียบเทียบความดันสถิตของพัดลม

จากหัวข้อ ก.1 และ ก.2 ในภาคผนวก ก. พบว่าขนาดความดันสถิตของพัดลมที่ได้จากการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีขนาด 33 Pa ซึ่งมีขนาดมากกว่าขนาดพัดลมที่ได้จากวิธี Static Regain ซึ่งมีค่า 27 Pa ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผล 2 ประการดังนี้

- ก. ผลของความดันลดที่เกิดจากการรั่วไหลผ่านรอยต่อและรอยตะเข็บรวมถึงการสึกกร่อนที่เกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าความเสียดทานในท่อลมสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าความเสียดทานในกรณีที่ไม่มีการรั่วไหล ถึงแม้ว่า จะมีการลดลงของความดันพลศาสตร์ตั้งแต่ท่อลมก่อนแรกอันเนื่องจากการรั่วไหลผ่านรอยต่อและรอยตะเข็บรวมถึงการสึกกร่อนที่เกิดขึ้น และในท่อลมก่อนอื่น ๆ นอกเหนือจากบริเวณข้อต่อแยกในท่อลม มาช่วยให้ความดันสถิตขาออกในท่อลมเพิ่มขึ้น ทำให้ลดภาระของความดันสถิตขาเข้า แต่โดยรวมแล้ว ผลของความเสียดทานมีสูงกว่า จึงทำให้ความดันสถิตขาเข้าหรือความดันสถิตของพัดลมมีค่าสูงกว่าเมื่อเทียบกับความดันสถิตของพัดลมที่ได้จากวิธี Static Regain ซึ่งคำนึงถึงผลจากความเสียดทานเพียงอย่างเดียว หรืออาจจะสรุปได้ว่าความเสียดทานในท่อลมยังเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญต่อค่าความดันสถิตขาเข้าของท่อหรือความดันสถิตของพัดลมไม่ว่าจะเป็นการคำนวณโดยโนโมแกรมหรือวิธี Static Regain
- ข. ความดันลดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียความร้อนผ่านท่อลม ในขณะที่วิธี Static Regain ไม่ได้คำนึงถึงความดันลดส่วนนี้

ข้อสังเกตอีกประการหนึ่งก็คือ เนื่องจากในการทำงานทางวิศวกรรมโดยทั่วไป มักจะมีการใส่ค่าตัวประกอบความปลอดภัยหลังจากได้ค่าจากการคำนวณมาแล้ว โดยค่าตัวประกอบความปลอดภัยที่ใช้มักจะมีค่าประมาณ 10% หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับวิธีที่ใช้ในการคำนวณว่ามีความถูกต้องและแม่นยำมากน้อยแค่ไหน หากเรานำเอาค่าความดันสถิตที่ได้จากวิธี Static Regain มาใส่ค่าความปลอดภัยที่ 20% จะพบว่าค่าความดันสถิตของพัดลมจากทั้ง 2 วิธีจะมีความใกล้เคียงกันมาก กล่าวคือความดันสถิตของพัดลมจากวิธี Static Regain เมื่อรวมค่าตัวประกอบความปลอดภัย จะเป็น 32.4 Pa หรือมากกว่า ดังนั้น ค่าที่ได้จากการออกแบบโดยโนโมแกรมจึงเป็นค่าที่สามารถนำไปใช้ได้โดยตรงโดยไม่ต้องใส่ค่าตัวประกอบความปลอดภัยเข้าไป เนื่องจากได้คำนึงถึงผลกระทบอื่น ๆ ที่มีต่อความดันลดแล้วนั่นเอง นอกจากนี้ท่อลมที่ใช้งานไประยะเวลาหนึ่งจะเกิดการเสื่อมสภาพมากขึ้น ทำให้เกิดการรั่ว และการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ดังนั้น การออกแบบท่อลมจึงจำเป็นต้องรวมผลกระทบจากการรั่ว และการถ่ายเทความร้อนไปตั้งแต่ต้น เพื่อให้ท่อลมสามารถทำงานได้อย่างเต็มสมรรถนะตลอดการใช้งาน

7.2.3 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม

ตารางที่ 7 - 3 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม

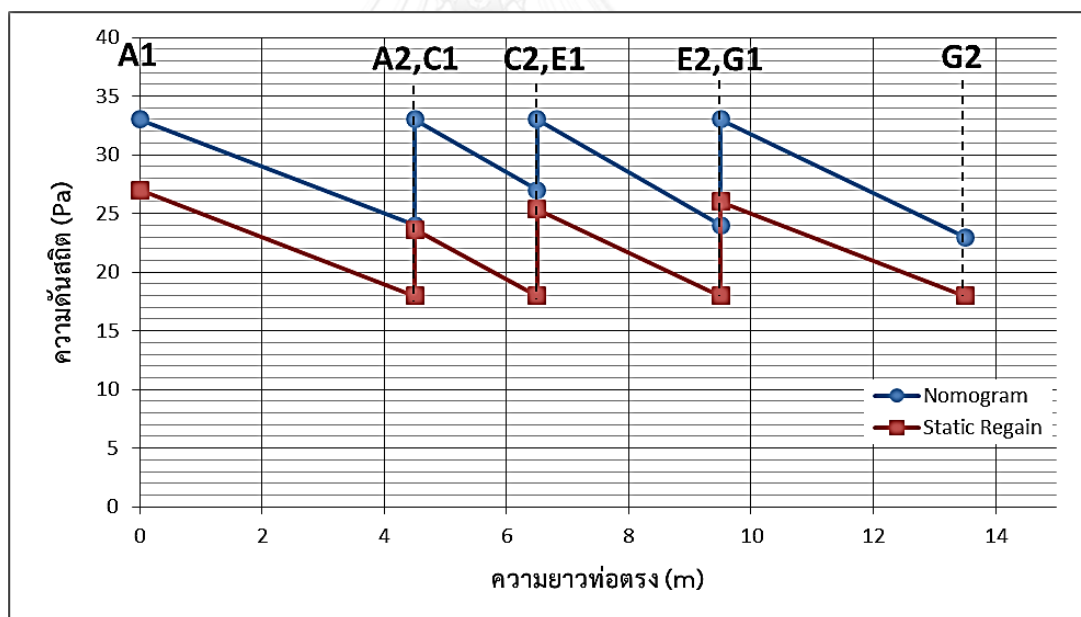
ท่อ	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลม (m)	
	โนโมแกรม	Static Regain
A	0.287	0.287
B	0.206	0.158
C	0.264	0.261
D	0.218	0.168
E	0.225	0.230
F	0.236	0.178
G	0.171	0.184

จากการเปรียบเทียบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตรงที่ได้จากการออกแบบด้วยโนโมแกรม ได้แก่ ท่อ A,C,E และ G มีขนาดใกล้เคียงกับผลจากการออกแบบด้วยวิธี Static Regain ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแยกที่ได้จากการ

ออกแบบด้วยโนโมแกรม ได้แก่ ท่อ B,D และ F มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากวิธี Static Regain ทั้งนี้เป็นเพราะทั้ง 2 วิธี จะเริ่มต้นการคำนวณโดยการกำหนดความเร็วขาเข้าแบบเดียวกัน ถึงแม้ว่าในการคำนวณโดยใช้โนโมแกรมจะมีการคำนึงถึงการรั่วไหลอันส่งผลกระทบต่อความดันพลศาสตร์ที่เกิดขึ้นในท่อ ทำให้ความเร็วที่ปลายทางของท่อที่ได้จะต่างกัน แต่ก็ไม่ต่างกันมากอันเนื่องจากปริมาณการรั่วไหลที่ไม่มาก ดังแสดงไว้ในตารางที่ ก - 4 ทำให้ความเร็วขาเข้าของท่อลมท่อนัดไปใกล้เคียงกัน ขนาดของท่อลมในส่วนที่เป็นท่อหลักจึงมีขนาดต่างกันไม่มาก แต่ในส่วนของท่อแยก ขนาดของท่อที่แตกต่างกันเป็นผลโดยตรงจากความเร็วขาเข้าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 7-2 โดยความเร็วขาเข้าท่อแยกที่คำนวณโดยโนโมแกรมจะน้อยกว่า ทำให้ต้องใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มากกว่า เมื่อคำนึงถึงมวลอากาศที่เท่ากัน

7.2.4 การกระจายของความดัน

7.2.4.1 การกระจายของความดันสถิตในท่อตรง A,C,E,F

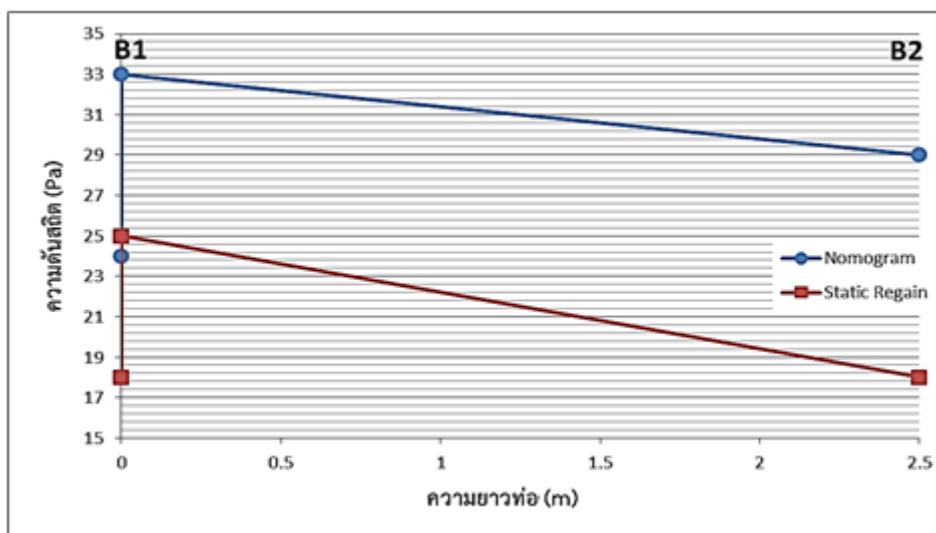


รูปที่ 7 - 1 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาว
(เลข 1 และ 2 ใช้แสดงตำแหน่งขาเข้า และ ขาออกของท่อตามลำดับ)

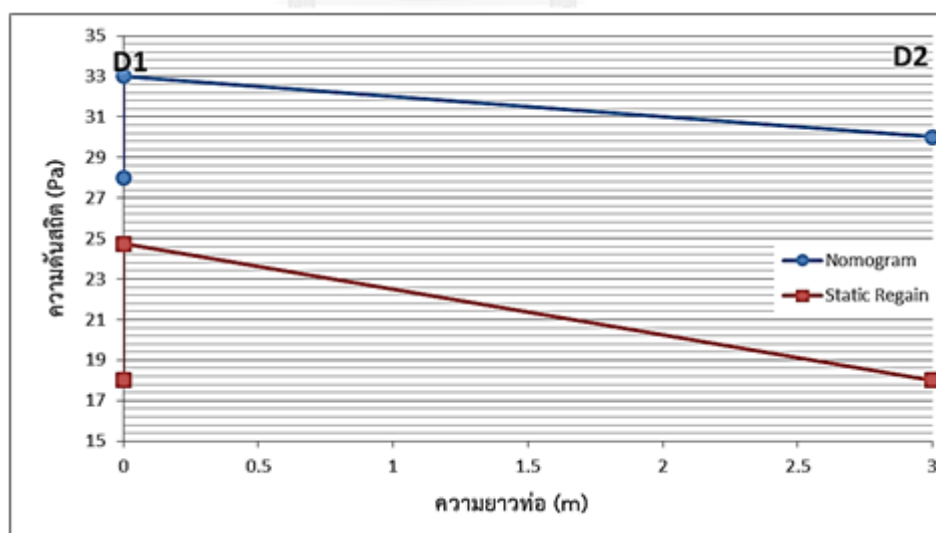
จากรูปที่ 7 - 1 พบว่าการกระจายตัวของความดันสถิตภายในท่อตรงของการออกแบบจากทั้งสองวิธีมีลักษณะเหมือนกัน รวมทั้งการลดลงของค่าความดันสถิตภายในท่อก็มีค่าใกล้เคียงกัน โดยค่าความดันสถิตภายในท่อตรงที่ออกแบบด้วยโนโมแกรมจะมีค่าสูงกว่าวิธี Static

Regain โดยเป็นผลมาจากอิทธิพลของแรงเสียดทานในท่อตรงที่มีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันสถิตอันเป็นผลจากการรั่วไหลภายในท่อตรง

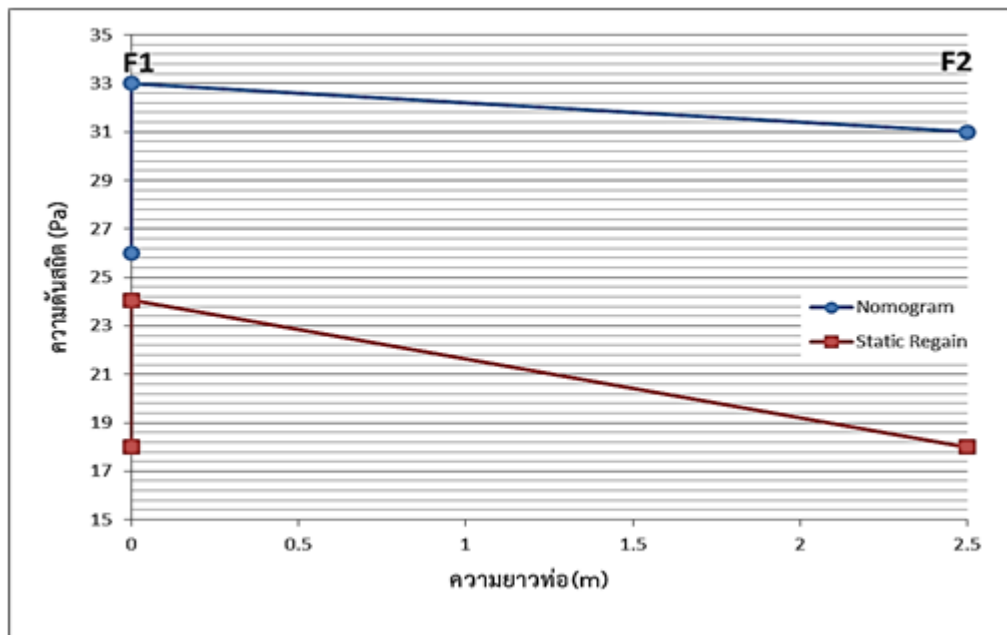
7.2.4.2 การกระจายของความดันสถิตในท่อแยก B,D,F



รูปที่ 7 - 2 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาวของท่อ B (เลข 1 และ 2 ใช้แสดงตำแหน่งขาเข้า และ ขาออกของท่อตามลำดับ)



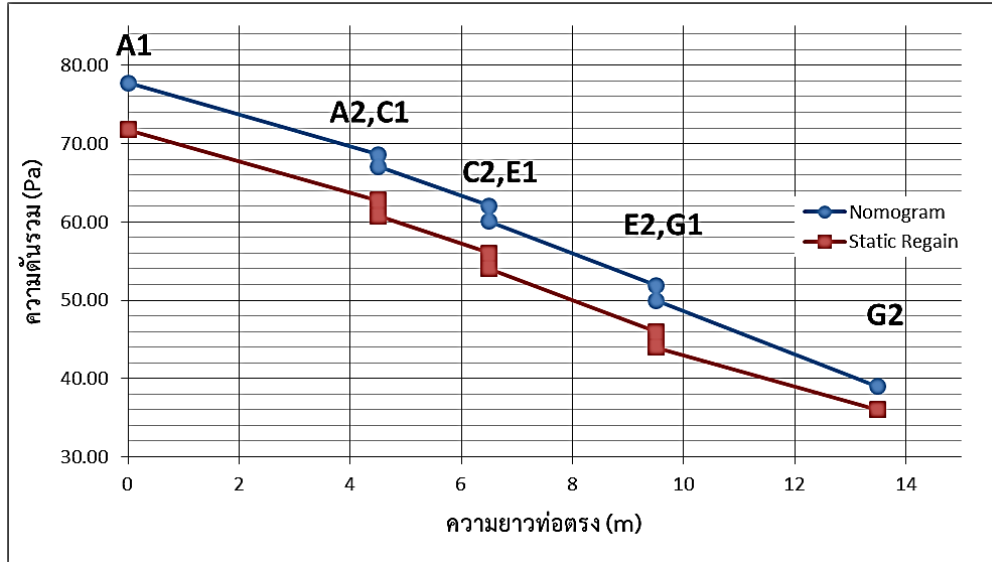
รูปที่ 7 - 3 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาวของท่อ D (เลข 1 และ 2 ใช้แสดงตำแหน่งขาเข้า และ ขาออกของท่อตามลำดับ)



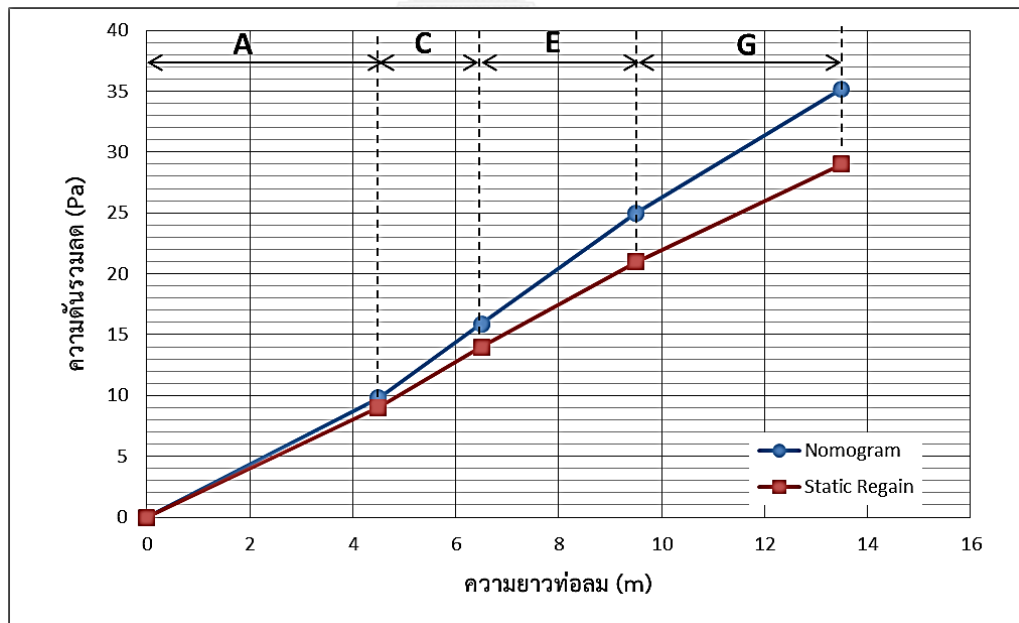
รูปที่ 7 - 4 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาวของท่อ F
(เลข 1 และ 2 ใช้แสดงตำแหน่งขาเข้า และ ขาออกของท่อตามลำดับ)

จากรูปที่ 7 - 2 ถึง 7 - 4 พบว่าความดันสถิตที่ลดลงในท่อแยกจากวิธี Static Regain มีค่ามากกว่าผลจากการออกแบบด้วยโนโมแกรม เนื่องจากความเร็วขาเข้าที่สูงกว่าส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ใช้น้อยกว่า ทำให้ความเสียดทานสูง นอกจากนี้จากการที่ความดันสถิตขาออกที่ได้จากวิธีการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีค่ามากกว่าวิธี Static Regain ซึ่งความดันสถิตขาออกของท่อแยกเป็นความดันที่ใช้ในการส่งลมเข้าสู่บริเวณปรับอากาศ ส่งผลให้การออกแบบด้วยโนโมแกรมจึงมีความดันสถิตเหลือเพียงพอในการส่งลม และ ทำให้ได้ระยะส่งลมมากขึ้น ทำให้การกระจายลมในบริเวณปรับอากาศเป็นไปอย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้น

7.2.4.3 การกระจายตัวของความดันรวมภายในท่อตรง A,C,E,G



รูปที่ 7 - 5 การกระจายของความดันรวมตามแนวความยาวของท่อ A,C,E,G (เลข 1 และ 2 ใช้แสดงตำแหน่งขาเข้า และ ขาออกของท่อตามลำดับ)

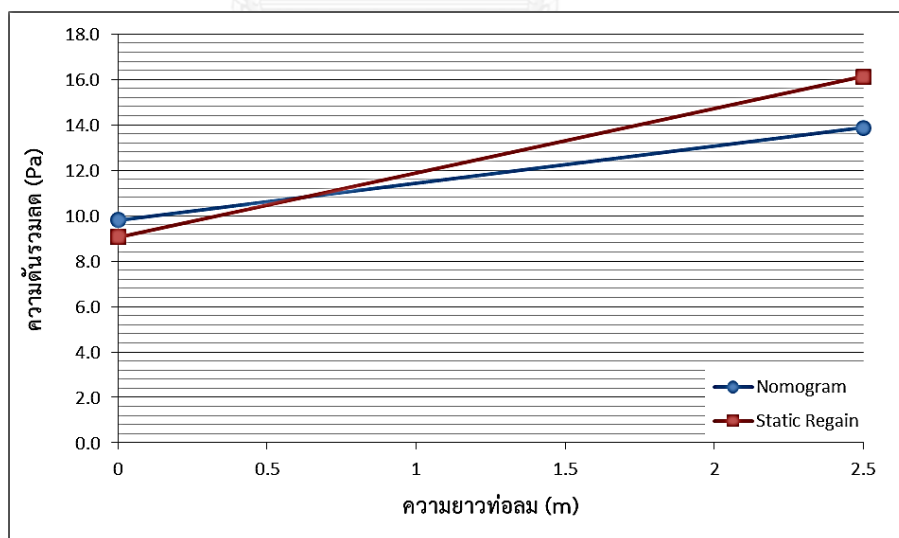


รูปที่ 7 - 6 ความดันรวมลดของท่อ A,C,E,G

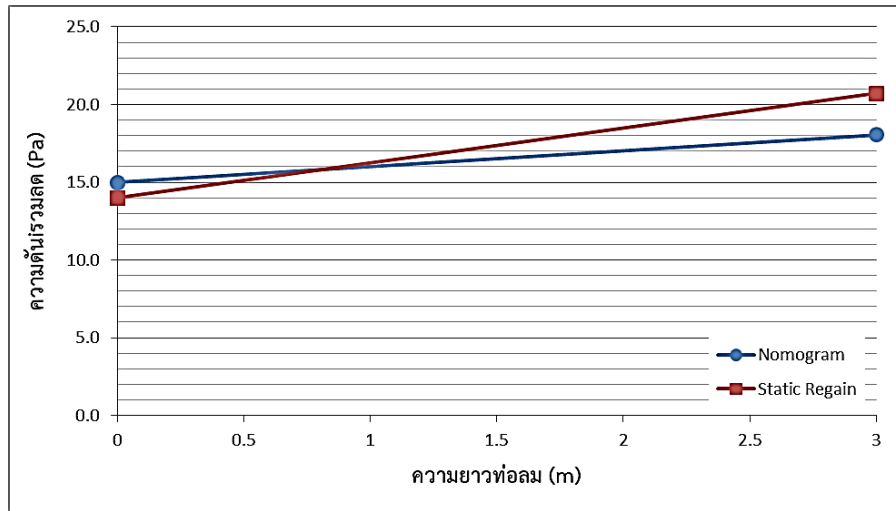
จากรูปที่ 7-5 พบว่าค่าความดันรวมภายในท่อตรงของทั้ง 2 วิธีลดลงตามความยาวของท่อที่เพิ่มขึ้น โดยความดันรวมที่ได้จากโนโมแกรมจะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากวิธี Static Regain สำหรับท่อลมที่เป็นทางเข้า และ หลังจากนั้นจะค่อย ๆ มีค่าลดลงด้วยอัตราที่สูงกว่าวิธี Static Regain ทั้งนี้เป็นผลมาจากการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนดังที่กล่าวมาในตอนต้น นอกจากนี้ รูปที่ 7-6 ยังชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลของการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อค่าความดันรวมลด โดยยิ่งท่อมีความยาวมากขึ้นเท่าไร ค่าความดันรวมลดที่เกิดจากการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อน จะยิ่งมีค่ามากขึ้น ทำให้ได้ข้อสรุปว่า สำหรับท่อที่มีความยาวมาก ๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงความดันรวมลดที่มาจาก การรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อน

7.2.4.4 ความดันรวมลดในท่อแยก B,D,F

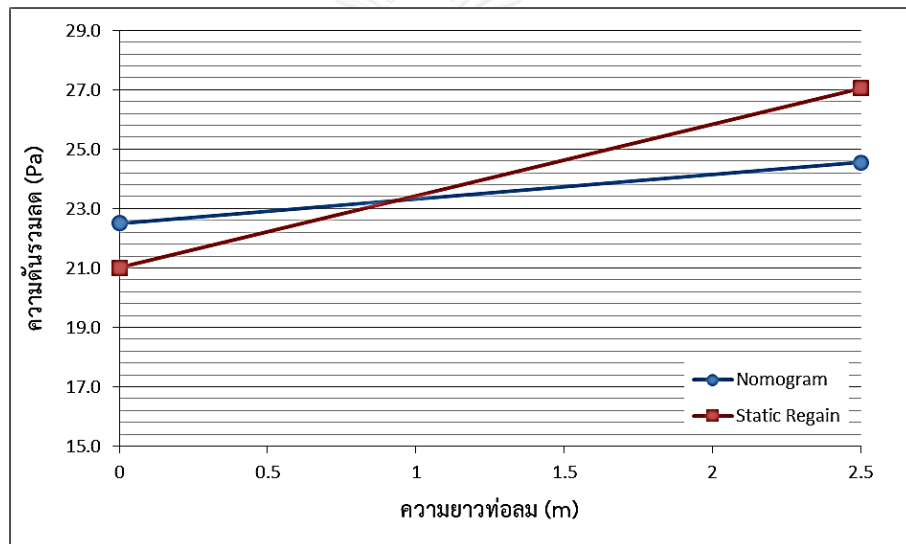
จากรูปที่ 7 - 7 ถึง 7 - 9 พบว่าความดันรวมลดในท่อแยกจากวิธี Static Regain มีค่ามากกว่าความดันรวมลดที่ลดลงจากการออกแบบด้วยโนโมแกรม อันเนื่องมาจากเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธี Static Regain มีค่าน้อยกว่า ทำให้ความเสียดทานมีค่ามากขึ้นตาม ซึ่งรูปที่ 7 - 7 ถึง 7 - 9 มีความสอดคล้องกับรูปที่ 7 - 2 ถึง 7 - 4 ที่แสดงให้เห็นว่าความดันสถิตที่ลดลงในท่อแยกจากวิธี Static Regain มีค่ามากกว่าการออกแบบด้วยโนโมแกรม



รูปที่ 7 - 7 ความดันรวมลดของท่อ B



รูปที่ 7 - 8 ความดันรวมลดของท่อ D

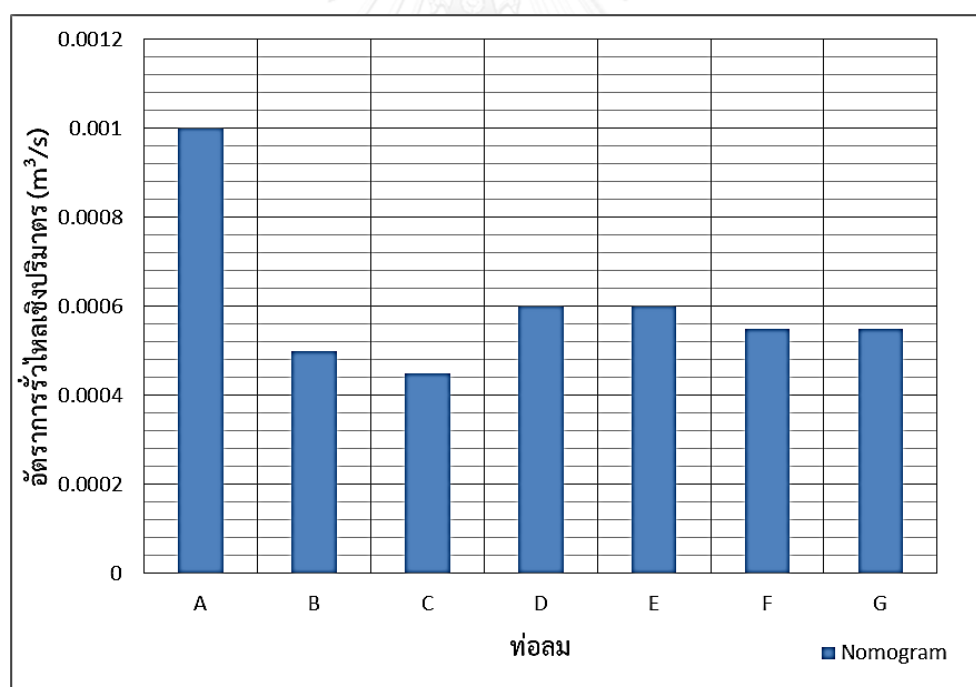


รูปที่ 7 - 9 ความดันรวมลดของท่อ F

7.2.5 เปรียบเทียบอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรในท่อลมแต่ละท่อน

ตารางที่ 7 - 4 แสดงอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร ความยาวและอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวคำนวณจากกราฟรูป 7-1 ของท่อลมแต่ละท่อน

ท่อ	อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร [m^3/s]	ความยาว (เมตร)	$\Delta P/L$
A	0.00100	4.5	2.0
B	0.00050	2.5	1.6
C	0.00045	2.0	3.0
D	0.00060	3.0	1.0
E	0.00060	3.0	3.0
F	0.00055	2.5	0.8
G	0.00055	4.0	2.5



รูปที่ 7 - 10 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อลม

จากรูป 7 - 10 จะเห็นว่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรจะมีค่าสูงที่ท่อตรงบริเวณต้นทางคือ ท่อ A มากกว่าท่อตรงท่อนอื่น ๆ ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวของท่อ A มีค่าน้อยกว่าท่อตรงท่อนอื่น ๆ ทำให้ความดันสถิตในท่อตรง A ลดลงไม่มาก

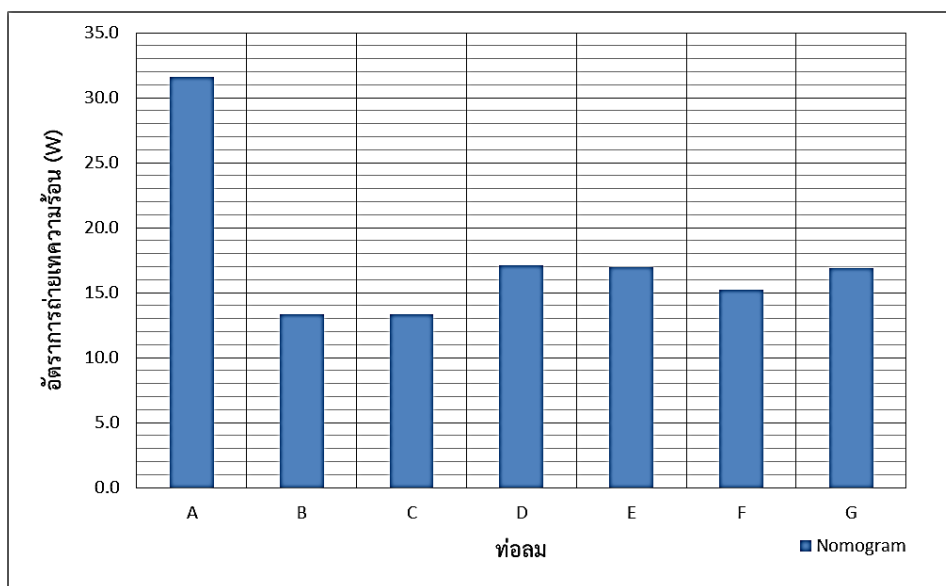
ประกอบกับท่อมีความยาวสูง ทำให้มีพื้นที่ผิวประสิทธิผลของการรั่วสูง จึงทำให้อัตราการรั่วไหลสูง ในขณะที่ ท่อตรง C มีค่าอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวสูงกว่า แต่มีความยาวท่อน้อย ทำให้มีพื้นที่ผิวประสิทธิผลของการรั่วต่ำ ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรจึงต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในส่วนของท่อ E และ G พบว่า ท่อ E กลับมีอัตราการรั่วเชิงปริมาตรที่สูงกว่าท่อ G ทั้ง ๆ ที่มีอัตราส่วนความดันลดต่อความยาวสูงกว่าและมีความยาวท่อน้อยกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะการไหลในท่อตรง G เป็นการไหลส่วนปลายสุดของท่อออกสู่ภายนอกโดยตรง ไม่เกิดการได้คืบมาของความดันสถิตอีก ทำให้สภาพความต้านทานการไหลที่เกิดขึ้นน้อย อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรที่เกิดขึ้นในตัวท่อจึงน้อย

ในส่วนของท่อแยก B, D, F พบว่าท่อแยก B มีค่าอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวสูง ทำให้ความดันสถิตในท่อลดลงส่งผลให้อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ำ เมื่อเทียบกับท่อแยก D และ F ในขณะที่ท่อแยก D มีค่าอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวน้อยกว่าแต่มีความยาวท่อนานกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวประสิทธิผลของการรั่วไหลสูง จึงมีอัตราการรั่วไหลสูงกว่าท่อแยกอื่น ๆ

7.2.6 เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อลมแต่ละท่อน

ตารางที่ 7 - 5 แสดงอัตราการถ่ายเทความร้อน ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง พื้นที่ผิวและความเร็วขาเข้าของท่อแต่ละท่อน

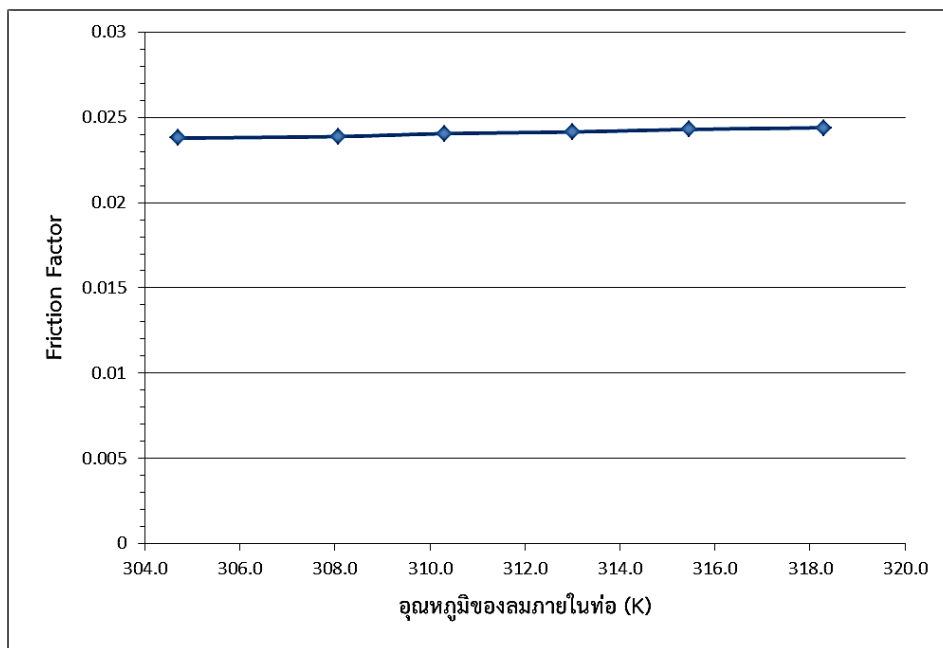
ท่อ	อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]	ความยาว (เมตร)	เส้นผ่านศูนย์กลาง (เมตร)	พื้นที่ผิว (ตารางเมตร)	ความเร็วขาเข้า (m/s)
A	31.6	4.5	0.287	4.059	8.64
B	13.4	2.5	0.206	1.619	4.20
C	13.3	2.0	0.264	1.659	7.65
D	17.1	3.0	0.218	2.055	3.75
E	16.9	3.0	0.225	2.121	7.00
F	15.2	2.5	0.236	1.854	3.20
G	16.9	4.0	0.171	2.150	6.00



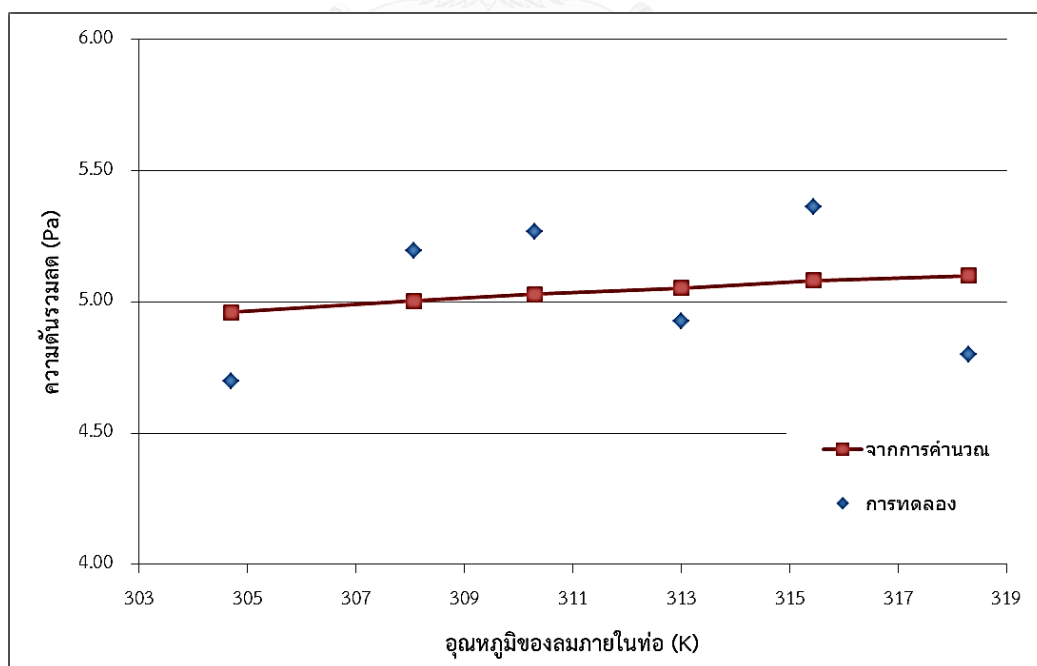
รูปที่ 7 - 11 อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อลม

จากรูปที่ 7-11 จะเห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงที่ท่อตรงบริเวณต้นทางคือ ท่อ A มากกว่าท่อตรงท่อนอื่น ๆ ทั้งนี้เป็นผลมาจากความยาวและหน้าตัดของท่อ A ที่สูงกว่าท่อท่อนอื่น ๆ ทำให้มีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทความร้อนสูง อีกทั้งการที่ภายในท่อมีความเร็วสูงกว่าท่อตรงท่อนอื่น ๆ ด้วย จึงเป็นปัจจัยเสริมให้มีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ในขณะที่ท่อลมท่อนอื่น ๆ ถึงแม้บางท่อนจะมีค่าความเร็วในท่อที่สูงกว่า แต่จากการที่มีพื้นที่ผิวท่อต่างกันไม่มาก ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่ต่างกันมากและมีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตว่า ถึงแม้ความเร็วลมภายในท่อจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน แต่ขนาดของความเร็วนั้นถูกจำกัด เพราะต้องคำนึงถึงระดับความเข้มเสียง ความเร็วของลมจึงมีอิทธิพลไม่มากต่อการถ่ายเทความร้อน เมื่อเทียบกับอิทธิพลจากพื้นที่ผิว ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า พื้นที่ผิวท่อเป็นปัจจัยสำคัญในการส่งถ่ายความร้อนออกจากตัวท่อ โดยท่อลมที่ยาวและมีขนาดใหญ่มาก จำเป็นจะต้องคำนึงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลถึงความดันลดที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้น

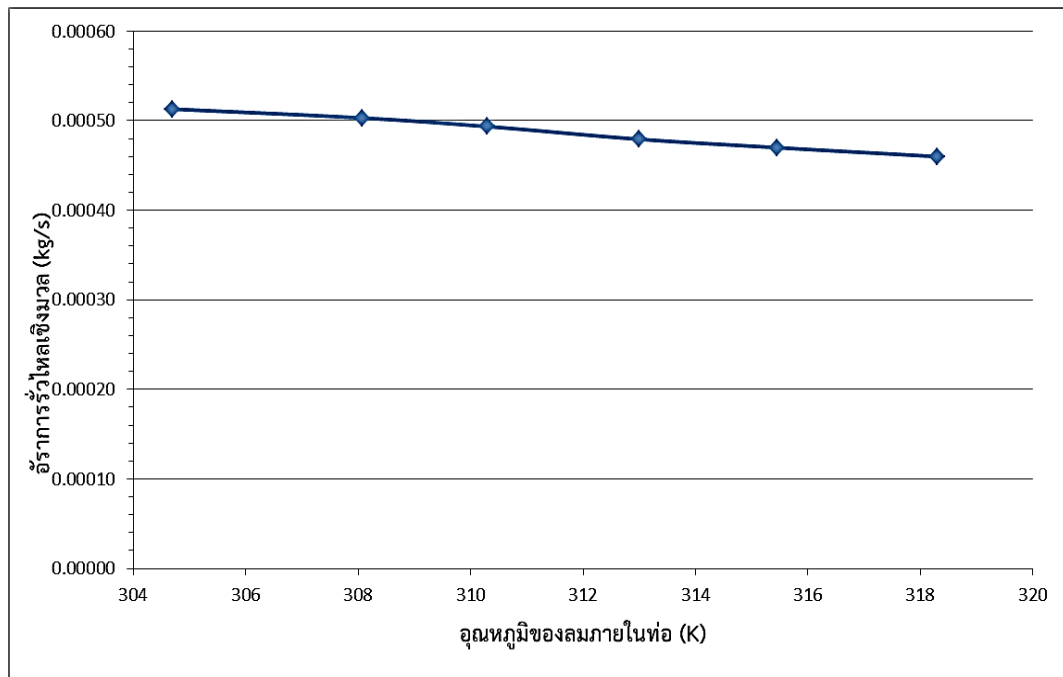
7.2.7 การทดลองเมื่อมีการพ่นแก๊สแนวรอยต่อ และ ตะเข็บ และ เจาะรูรั้วขนาด 10 มิลลิเมตร โดยมีการเปลี่ยนอุณหภูมิของลมขาเข้า โดยความดันขาเข้า และ ความเร็วคงที่ (การทดลองกรณีที่ 4)



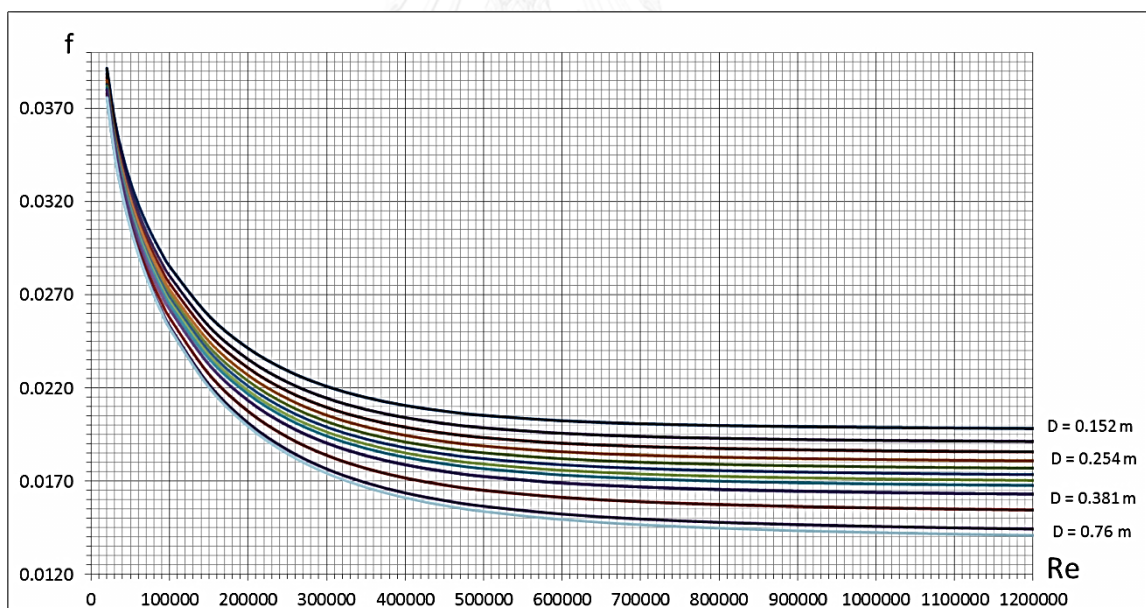
รูปที่ 7 - 12 กราฟแสดงค่า Friction Factor กับอุณหภูมิของลมภายในท่อ



รูปที่ 7 - 13 กราฟแสดงความดันลดจากการคำนวณโดยใช้ข้อมูล Friction Factor จากรูป 7 - 12 และ จากการทดลองกรณีที่ 4 กับอุณหภูมิของลมภายในท่อ



รูปที่ 7 - 14 กราฟอัตราการรั่วไหลของมวลกับอุณหภูมิของลมภายในท่อ



รูปที่ 7 - 15 กราฟสำหรับหาค่า Friction Factor กรณีที่มีรูรั่ว 10 มม.
 ($\epsilon = 0.00015$ m., $\rho = 1.2$ kg/m³ และ $\mu = 1.8 \times 10^5$ kg/m.s)

การทดลองที่ 4 มีจุดประสงค์ คือ

1. เพื่อสังเกตว่าค่า Friction Factor ได้รับผลกระทบเนื่องจากการเปลี่ยนอุณหภูมิหรือไม่
2. เพื่อสังเกตว่าอัตราการรั่วไหลเชิงมวล ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิหรือไม่

จากรูปที่ 7 - 12 พบว่าค่า Friction Factor มีการเปลี่ยนแปลงในทิศทางที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลมภายในท่อ มีสาเหตุเนื่องมาจากค่า Friction Factor ขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) และ การเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ความหนาแน่นของอากาศลดลงทำให้ค่า Re ลดลงตามไปด้วย และ เมื่อพิจารณารูปที่ 7 - 15 พบว่าเมื่อ Re มีค่าน้อยลง ค่า Friction Factor จะมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าอุณหภูมิจึงมีผลต่อค่า Friction Factor โดยอุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ค่า Friction Factor มีค่าสูงขึ้นตาม และ จากรูปที่ 7 - 13 เมื่อเปรียบเทียบค่าความดันรวมลดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ โดยกำหนดให้ความดันสถิตเข้า และ ความเร็วลมเข้าเท่ากัน พบว่าค่าความดันรวมลดมีการแปรผันตามอุณหภูมิ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากค่าตรวจวัดที่ได้จากการทดลองแสดงถึงการแปรผันที่ไม่อยู่ในทิศทางเดียวกัน ดังนั้น จึงยังไม่สามารถนำมาสรุปผลเพื่อแสดงทิศทางของการแปรผันได้ กระนั้นก็ดี จากค่าที่ได้พบว่า อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันรวมลดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งสังเกตจากค่าตรวจวัดที่ได้ทุกค่าจะมีค่าสูงกว่าค่าความดันรวมลดในตอนเริ่มต้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากการที่ค่า Friction Factor เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลม รวมทั้งผลจากการที่ค่าความหนาแน่นของอากาศลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณ ดังแสดงในรูปที่ 7-13 ดังนั้น การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิจะทำให้ค่าความดันรวมลดมีการเปลี่ยนแปลง โดยมีค่าสูงขึ้นกว่าค่าความดันรวมลดในตอนเริ่มต้นและ จากรูปที่ 7 - 14 พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการรั่วไหลเชิงมวลจะลดลงเนื่องจากการรั่วไหลเชิงมวลนั้นขึ้นอยู่กับระดับความดันสถิตภายในท่อ ความหนาแน่น และ พื้นที่ผิวท่อลม แต่เนื่องจากท่อลมที่ใช้ทดลองมีพื้นที่ผิวคงที่ และ ความดันสถิตได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อยจากการเปลี่ยนอุณหภูมิของลม แต่ความหนาแน่นของอากาศจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลม ดังนั้นการรั่วไหลเชิงมวลจึงลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของลมที่ไหลภายในท่อ โดยความแตกต่างของอัตราการรั่วไหลของมวลเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิในช่วงที่ทดลอง (304.7 เคลวิน ถึง 321 เคลวิน) กับอัตราการรั่วไหลของมวลที่อุณหภูมิก่อนหน้านั้นต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่มีแนวโน้มที่จะต่างกันมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

จากการวิเคราะห์ที่ทั้งหมดกล่าวมาข้างต้น ชี้ให้เห็นถึงผลกระทบของการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนที่มีต่อทั้งความดันทั้งหมดในระบบท่อลมอันส่งผลถึงความเร็วลมและขนาดของท่อลมในระบบท่อลม โดยที่

1. ค่าความดันสถิตของพัดลมที่ใช้สำหรับระบบท่อลมที่ออกแบบโดยใช้โนโมแกรม จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบโดยวิธี Static Regain
2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตรงหรือท่อเมนในระบบท่อลมที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีความแตกต่างกันไม่มาก ในขณะที่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแยกจะมีขนาดแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยขนาดท่อลมที่ได้จากการใช้โนโมแกรมจะมีขนาดมากกว่า
3. การรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อลม มีผลทำให้เกิดความเสียหายมากขึ้น โดยผลกระทบจะเพิ่มมากขึ้นตามความยาวของท่อตรงที่เพิ่มขึ้น
4. ท่อลมที่ได้จากการออกแบบโดยใช้โนโมแกรมจะมีการกระจายลมที่ดีกว่า อันเนื่องมาจากความดันสถิตในท่อแยกที่สูงกว่า ทำให้มีระยะส่งลมที่ไกลกว่า

7.3 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีพื้นฐานการพัฒนาจากท่อลมที่มีหน้าตัดเป็นวงกลม ดังนั้น การเปลี่ยนหน้าตัดท่อลมจากวงกลมเป็นสี่เหลี่ยมซึ่งมีการใช้งานกันมากในทางปฏิบัติยังต้องอาศัยโนโมแกรมที่ใช้เปลี่ยนขนาดจากท่อลมกลมเป็นท่อลมสี่เหลี่ยมซึ่งพัฒนามาจากกฎทรงมวล โดยมีได้คำนึงถึงพฤติกรรมสภาพการไหลที่แปรเปลี่ยนไปจากสภาพทางกายภาพที่เปลี่ยนไปของท่อลม ดังนั้น เพื่อให้ผลลัพธ์มีความแม่นยำมากขึ้น จึงควรสร้างแบบจำลองสำหรับท่อลมสี่เหลี่ยมที่ Aspect Ratio ค่าต่าง ๆ

2. แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นได้รวมเอาผลกระทบการสูญเสียจากการรั่วไหล และ การถ่ายเทความร้อนโดยได้พัฒนาแบบจำลองจากวิธีการออกแบบท่อลมแบบ Static Regain ซึ่งคำนึงถึงสมรรถนะของท่อลมเพียงอย่างเดียว โดยมีได้คำนึงถึงทางด้านต้นทุนในการสร้างท่อลมด้วย ดังนั้น หากนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปพัฒนาร่วมกับวิธีการออกแบบท่อลมแบบ T-method ก็จะทำให้ได้ การออกแบบท่อลมที่มีความเหมาะสมที่ดีที่สุด (optimization) บนเงื่อนไขของสมรรถนะและต้นทุนในการสร้าง

3. แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้ได้กับระบบท่อที่มีความเร็วลมต่ำถึงปานกลาง และความดันภายในท่อลมต่ำถึงปานกลาง (อ้างอิงขนาดความเร็วและความดันลมตามมาตรฐานท่อลมของ SMACNA) ซึ่งในการใช้งานบางประเภทจำเป็นต้องใช้ท่อลมที่มีความเร็วลมสูงและความดันสูง ซึ่งมีผล

ทำให้การรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนสูงขึ้นตามไปด้วย ดังนั้น การนำแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในกรณีดังกล่าว จะช่วยให้ได้ขนาดท่อลมที่คำนึงถึงการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อน ทั้งนี้สามารถกระทำได้โดยการพัฒนาสมการความเสียดทานที่เหมาะสมและครอบคลุมถึงสถานะความเร็วสูงและความดันสูงภายในท่อลมผ่าน การทดลองในช่วงความดัน และ ความเร็วลมที่สูงขึ้นเพื่อให้ได้ข้อมูลสำหรับการพัฒนาสมการความเสียดทานให้มีช่วงการใช้งานที่กว้างขึ้น



รายการอ้างอิง

1. C. Aydin and B. Ozerdem *Air Leakage Measurement and Analysis in Duct Systems* Energy and Building 2006. **38**: p. 207-213.
2. F. Carrie, et al., *Duct leakage in European buildings: status and perspectives.* Energy and Buildings, 2005. **32**: p. 235-243.
3. K. Srinivasan, *Measurement of air leakage in air-handling units and air conditioning ducts.* Energy and Buildings, 2004. **37**: p. 273-277.
4. D. Parker , P. Fairey , and L. Gu, *Simulation of the Effects of Duct Leakage and Heat Transfer on Residential Space-Cooling Energy Use* Energy and Building 1993. **20**: p. 97 – 113
5. M. I. Montoya, et al., *Air leakage in Catalan dwellings: Developing an airtightness model and leakage airflow predictions.* Building and Environment, 2009. **45**: p. 1458-1469.
6. SMACNA, *HVAC Air Duct Leakage Test Manual in Conjunction with the HVAC Duct Construction Standards.* 1985. p. 1-8.
7. M.P. Modera, et al., *Sealing Ducts in Large Commercial Buildings with Aerosolized Sealant Particles.* energy and Buildings, 2002. **34**: p. 705-714.
8. W. J. Fisk , et al., *Duct Systems in Large Commercial Buildings: Physical Characterization, Air Leakage and Heat Conduction Gains* Energy and Building 2000. **32**: p. 109-119.
9. E. H. Mathews , et al., *Problems with Static Regain Method,* Energy and Building 1999. : p. 391 – 400.
10. Tsal RJ, Bhels HF. , et al., *Fallacy of the Static Regain Duct Design Method,* ASHRAE Transactions 1988. : p. 76-89.
11. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์, สไลด์ Convection Heat Transfer.
12. Shan K. Wang *.Handbook of Air Condition and Refrigeration.* United States of America : McGraw-Hill , 2000.
13. I.E. Idel'chik , *Handbook of Hydraulic Resistance,* The U.S. Atomic Energy Commission and the National Science Foundation, 1966.

14. R.L. Howell,W.J. Coad and H.J. Sauer. *Principles of Heating Ventilating and Air Conditioning*. Atlanta, United States of America : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers,Inc., 2009.
15. อนุรักษ์ วัลย์กนก , การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ : การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของอัตรา
การไหลในช่องเปิดที่ซับซ้อน(การไหลแบบราบเรียบ).วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต.
วิศวกรรมเครื่องกล.จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
16. H. Schlichting. *Boundary-Layer Theory*. United States of America :McGraw-Hill,
1979.
17. F. P. Incropera , D. P. Dewitt , T. L. Bergman , A. S. Lavine . *Introduction to
Heat Transfer* . 5th edition . New York : John Wiley inc., 2007 .
18. R. W. Fox , P. J. Pritchard and A. T. Mcdonald . *Introduction to Fluid
Mechanics* . 7th edition . New York : John Wiley inc., 2010 .
19. S. Kakac,R. K. Shan and W. Aung . *Handbook of Single-Phase Convective Heat
Transfer*.1st edition : Wiley-Interscience, 1987 .
20. R.F. Stearns,R.R. Johnson, R.M. Jackson and C.A. Larson. *Flow Measurement
with Orifice Meter*. New Jersey : D. Van Nostrand Company.,1951



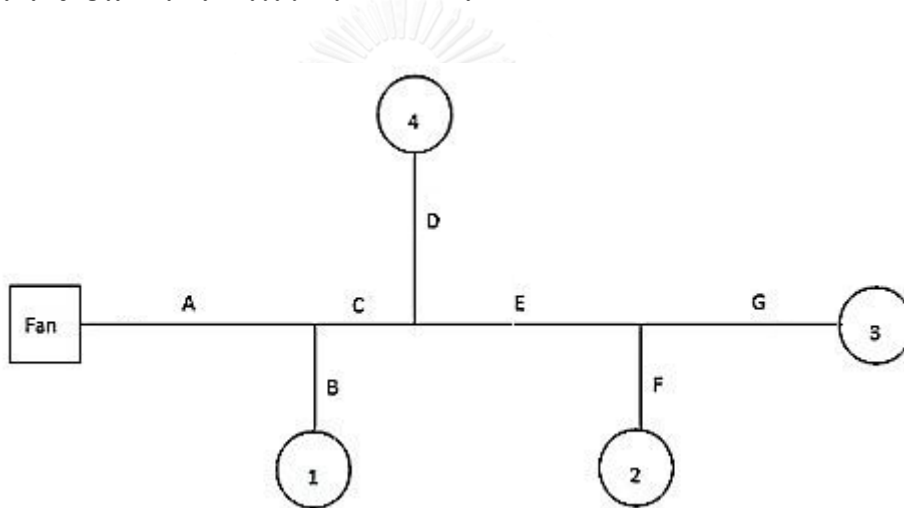
ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการออกแบบท่อลมด้วยโปรแกรม และ ด้วยวิธี Static Regain แบบเดิม

ในภาคผนวก ก ได้แสดงตัวอย่างการออกแบบท่อลมโดยใช้โปรแกรมซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่คำนึงถึงการรั่วไหล และ การสูญเสียความร้อน โดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการออกแบบท่อลมด้วยโปรแกรม กับผลจากการใช้วิธี Static Regain ได้ถูกกล่าวไว้ในบทที่ 7 หัวข้อ 7.2 โดยแบบของระบบท่อลมถูกแสดงไว้ในรูปที่ ก - 1 และ เงื่อนไขความยาวอัตราการไหลเชิงปริมาตร แสดงไว้ในตาราง ก - 1 และ ก - 2



รูปที่ ก - 1 แบบท่อลมที่ใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ ก - 1 ความยาวของท่อลมแต่ละส่วน

ท่อลม	ความยาว (เมตร)
A	4.5
B	2.5
C	2.0
D	3.0
E	3.0
F	2.5
G	4.0

ตารางที่ ก - 2 อัตราการไหลของน้ำจากจ่ายลม

หน้าจากจ่ายลม	อัตราการไหล		ระยะ Throw m.
	CFM	m ³ /s	
1	300	0.14	5
2	300	0.14	5
3	300	0.14	5
4	300	0.14	5

ก.1 การออกแบบระบบท่อลมด้วยโนโมแกรม

ก.1.1 ท่อ A

ก.1.1.1 ใช้โนโมแกรมหาความดันสถิตเข้าท่อ A

1. ทราบค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรเข้าท่อ A $Q_{1,A} = 0.56$ m³/s และ กำหนดความเร็วเข้าท่อ A $v_{1,A} = 8.64$ m/s (1700 fpm) และ คำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ A จากสมการ $D_A = \sqrt{\frac{4(0.56)}{\pi(8.64)}} = 0.287$ m. หรือ ประมาณ 11.3 นิ้ว

2. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 1 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อของท่อตรง A R_D โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว ,ความยาวท่อ A $L_A = 4.5$ m และท่อลมมีความหนา $t = 0.45$ mm. จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อของท่อตรง A $R_{D,A} = 0.0000068$ K/W และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 2 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ A โดยท่อลมมีความหนา $t = 0.45$ mm, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว, ความหนาฉนวน(b) = 1.5 นิ้ว และ ความยาวท่อ A $L_A = 4.5$ m จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ A $R_{ins} = 0.2$ K/W

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} โดยความเร็วเข้าท่อ A $v_{1,A} = 8.64$ m/s และ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $D_A = 11.3$ นิ้ว จะได้ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} เท่ากับ 0.0163

4. ใช้โน้มนแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อตรง A (f_A) โดย $Re = 164,463$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว จะได้ Friction Factor ของท่อ A เท่ากับ 0.0233

5. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว และ ความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนแรก $v_{1,A} = 8.64$ m/s ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = 164,463$ ได้ และ ใช้โน้มนแกรมรูปที่ ง - 5 ก เพื่อหาค่า J โดยค่า Friction Factor $f_A = 0.0233$ และ Friction Factor ของท่อเรียบ $f_{sm} = 0.0167$ จะได้ค่า $J = 335$

6. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i,A}$) โดยใช้โน้มนแกรมรูปที่ ง - 6 ก ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว , ค่า $J = 335$ และ ความยาวท่อ A $L_A = 4.5$ m จะได้ค่า $R_{h,i,A}$ มีค่าเท่ากับ 0.0071 K/W

7. หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins} = R_{ins,A}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,A}$) ($R_{D,A} + R_{ins,A} + R_{h,i,A}$) จากรูปที่ ง - 7 ข โดย $R_{D,A} = 0.0000068$ K/W, $R_{ins} = 0.2$ K/W และ $R_{h,i,A} = 0.0071$ K/W จะได้ $R_{D,A} + R_{ins,A} + R_{h,i,A} = 0.207$ K/W

8. หาค่าอุณหภูมิผิวนอกของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($T_{ins,A}$) จากรูปที่ ง - 8 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว , ค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อตรงท่อนแรก ($R_D = R_{D,A}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อตรงท่อนแรก ($R_{ins} = R_{ins,A}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อตรงท่อนแรก ($R_{h,i} = R_{h,i,A}$) $R_{D,A} + R_{ins,A} + R_{h,i,A} = 0.207$ K/W , ความยาวท่อ A $L_A = 4.5$ m, อุณหภูมิขาเข้าท่อ A $T_1 = 291$ K จะได้อุณหภูมิผิวนอกของฉนวนหุ้มท่อ A $T_{ins,A} = 295.4$ K

9. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ A $R_{h,o,A}$ จากโน้มนแกรมรูปที่ ง - 9 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว, อุณหภูมิขาเข้าท่อ A $T_1 = 291$ K และ ความยาวท่อ A $L_A = 4.5$ m จะได้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ A $R_{h,o,A}$ มีค่าเท่ากับ 0.105 K/W

10. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ

0.31 K/W

11. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนอ้างอิง R_{13} โดยความยาวท่อ A $L_A = 4.5$ m, ค่า Friction Factor $f_A = 0.0233$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว จะได้ค่า R_{13} เท่ากับ 0.36

12. หาค่า $Term_{v1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 ข โดย $R_{13} = 0.36$, ความเร็วขาเข้าของท่อ A $v_{1,A} = 8.64$ m/s จะได้ค่า $Term_{v1} = -13$

13. หาค่า R_{16} โดยใช้รูปที่ ง - 12 ก โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตรของท่อ B $Q_{1B} = 0.14$ m³/s, ระยะส่งลม (Throw) $T_{50} = 5$ m., ความยาวของท่อ B $L_B = 2.5$ m จะได้ $R_{16} = 19$

14. หาค่า $Term_x$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการสมการ 6.7 โดยใช้รูป ง - 13 ข โดย $R_{16} = 19$, ค่าความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ A $R_{tot} = 0.31$ K/W และ อุณหภูมิขาเข้าท่อ A $T_{1,A} = 291$ K จะได้ค่า $Term_x = 274.5$

15. หาค่าความดันสถิตขาเข้าท่อ A $(P_{s,1})_A$ โดยใช้รูป ง - 14 โดย $Term_{v1} = -13$ และ $Term_x = 275$ จะได้ค่าความดันสถิตขาเข้าท่อ A $(P_{s,1})_A = 33$ Pa ซึ่งเป็นความดันสถิตของพัดลม

ก.1.1.2 ใช้โนโมแกรมหาความดันสถิตขาออกของท่อ A

ใช้รูปที่ ง - 15 ก ในการหาความดันสถิตขาออกของท่อ A $(P_{s,2})_A$ โดย อัตราการไหลขาเข้าของท่อ A $Q_{1,A} = 0.56$ m³/s, อุณหภูมิขาเข้าท่อ A $T_1 = 291$ K, ความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ A (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.31 K/W ค่า $Term_{v1} = -13$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 12 หัวข้อ ก.1.1.1 และ ความดันสถิตขาเข้าท่อ A $(P_{s,1})_A = 33$ Pa จะได้ความดันสถิตขาออกท่อ A $(P_{s,2})_A = 24$ Pa

ก.1.1.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ A

ใช้รูปที่ ง - 17 ก โดยความดันสถิตขาเข้าท่อ A $(P_{s,1})_A = 33$ Pa ความดันสถิตขาออกจากท่อ A $(P_{s,2})_A = 24$ Pa , ความยาวท่อ A $L_A = 4.5$ m และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว จะได้ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อตรง A $Q_{L,A} = 0.0095$ m³/s

ก.1.1.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ A

1. ใช้รูปที่ ง - 18 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A $D_A = 11.3$ นิ้ว ความเร็วขาเข้าท่อ A $v_{1,A} = 8.64$ m/s, ค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อตรง $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right) = 0.0017$, ความต้านทานเชิงความร้อนรวม $(R_{tot}) = 0.31$ K/W จะได้ค่า $y = 435$

2. หาค่า Z_1 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 19 โดย $y = 435$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_1 = 0.9955$

3. หาค่า Z_2 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 20 โดย $y = 435$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_2 = 1.3$

4. หาอุณหภูมิขาออกจากท่อตรง A $(T_{2,A})$ โดยใช้รูปที่ ง - 21 โดยอุณหภูมิขาเข้าท่อ A $T_{1,A} = 291$ K ,ค่า $Z_1 = 0.9955$, $Z_2 = 1.3$ และ ค่า $y = 430$ จะได้ $T_{2,A} = 291.05$ K

ก.1.2 ท่อ B

ก.1.2.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ B

ใช้รูปที่ ง - 16 โดย ความดันสถิตขาเข้าท่อลม B $(P_{s,1})_B = (P_{s,1})_A = 33$ Pa, ความดันสถิตขาออกจากท่อ A $(P_{s,2})_A = 24$ Pa และ ความเร็วขาออกจากท่อ A $v_{2,A} = 8.62$ m/s ทำให้ได้ค่าความเร็วขาเข้าท่อ B $v_{1,B} = 4.2$ m/s และ เนื่องจาก $Q_{1,B} = 0.14$ m³/s เมื่อแทน

ค่าลงสมการ $D_B = \sqrt{\frac{4Q_{1,B}}{\pi v_{1,B}}}$ ทำให้ได้ค่า $D_B = 0.206$ m หรือ ประมาณ 8.1 นิ้ว

ก.1.2.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากท่อ B

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 1 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อของท่อตรง B R_D โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว. , ความยาวท่อ B $L_B = 2.5$ m และท่อลมมีความหนา $t = 0.45$ mm. จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อ B $R_{D,B} = 0.0000170$ K/W และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 2 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ B โดยท่อลมมีความหนา $t = 0.45$ mm, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว, ความหนาฉนวน(b) = 1.5 นิ้ว และ ความยาวท่อ B $L_B = 2.5$ m จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ A $R_{ins} = 0.50$ K/W

2. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} โดยความเร็วขาเข้าท่อ B $v_{1,B} = 4.2$ m/s และ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $D_B = 8.1$ นิ้ว จะได้ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} เท่ากับ 0.0204

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อตรง B (f_B) โดย $Re = 57,333$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว จะได้ Friction Factor ของท่อ B เท่ากับ 0.0314

4. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว และ ความเร็วขาเข้าท่อ B $v_{1,B} = 4.2$ m/s ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = 57,333$ ได้ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 5 ก เพื่อหาค่า J โดยค่า Friction Factor $f_B = 0.0314$ และ Friction Factor ของท่อเรียบ $f_{sm} = 0.0204$ จะได้ค่า $J = 155$

5. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i,B}$) โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 6 ก ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว ค่า $J = 155$ และ ความยาวท่อ B $L_B = 2.5$ m จะได้ค่า $R_{h,i,B}$ มีค่าเท่ากับ 0.026 K/W

6. ใช้รูปที่ ง - 7 ค หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ B ($R_D = R_{D,B}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ B ($R_{ins} = R_{ins,B}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i} = R_{h,i,B}$) ($R_{D,B} + R_{ins,B} + R_{h,i,B}$) จากรูปที่ ง - 7 โดย $R_D = 0.0000170$ K/W, $R_{ins} = 0.48$ K/W และ $R_{h,i,B} = 0.026$ K/W จะได้ $R_{D,B} + R_{ins,B} + R_{h,i,B} = 0.53$ K/W

7. หาค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ B ($T_{ins,B}$) จากรูปที่ ง - 8 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว, ค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ B ($R_D = R_{D,B}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ B ($R_{ins} = R_{ins,B}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ B ($R_{h,i} = R_{h,i,B}$) $R_{D,B} + R_{ins,B} + R_{h,i,B} = 0.026$ K/W , ความยาวท่อ B $L_B = 2.5$ m, อุณหภูมิขาเข้าท่อ B $T_1 = T_{2,A} = 291.05$ K จะได้อุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ B $T_{ins,B} = 295.1$ K

8. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ B $R_{h,o,B}$ จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 9 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว, อุณหภูมิขาเข้าท่อ $T_1 = 291.05$ K และ ความยาวท่อ B $L_B = 2.5$ m จะได้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ B $R_{h,o,B}$ มีค่าเท่ากับ 0.29 K/W

9. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.82 K/W

10. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนอ้างอิง R_{13} โดยความยาวท่อ B $L_B = 2.5$ m, ค่า Friction Factor $f_B = 0.0314$ และ ศูนย์กลางท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว จะได้ค่า R_{13} เท่ากับ 0.38

11. หาค่า $Term_{v1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 ข โดย $R_{13} = 0.38$, ความเร็วขาเข้าของท่อ B $v_{1,B} = 4.2$ m/s จะได้ค่า $Term_{v1} = -3.5$

12. ใช้รูปที่ ง - 15 ข ในการหาความดันสถิตขาออกของท่อ B ($P_{s,2}$)_B โดยอัตราการไหลขาเข้าของท่อ B $Q_{1,B} = 0.14$ m³/s, อุณหภูมิขาเข้าท่อ B $T_1 = 291.05$ K , ความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ B (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.82 K/W ค่า $Term_{v1} = -3.5$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 11 และ ความดันสถิตขาเข้าท่อ B ($P_{s,1}$)_B = ($P_{s,1}$)_A = 33 Pa จะได้ความดันสถิตขาออกท่อ B ($P_{s,2}$)_B = 29 Pa

ก.1.2.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ B

ใช้รูปที่ ง - 17 ก โดยความดันสถิตขาเข้าท่อ B $(P_{s,1})_B = 33$ Pa ความดันสถิตขาออกจากท่อ B $(P_{s,2})_B = 29$ Pa, ความยาวท่อ B $L_B = 2.5$ m และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว จะได้ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ B $Q_{L,B} = 0.0005$ m³/s

ก.1.2.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ B

1. ใช้รูปที่ ง - 18 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B $D_B = 8.1$ นิ้ว , ความเร็วขาเข้าท่อ B $v_{1,B} = 4.2$ m/s, ค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อ B $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right) = 0.0035$, ความต้านทานเชิงความร้อนรวม $(R_{tot}) = 0.82$ K/W จะได้ค่า $y = 275$

2. หาค่า Z_1 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 19 โดย $y = 275$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_1 = 0.9928$

3. หาค่า Z_2 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 20 โดย $y = 275$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_2 = 2.2$

4. หาอุณหภูมิขาออกจากท่อ B $(T_{2,B})$ โดยใช้รูปที่ ง - 21 โดยอุณหภูมิขาเข้าท่อ B $T_{1,B} = 291.05$ K , ค่า $Z_1 = 0.9928$, $Z_2 = 2.2$ และ ค่า $y = 275$ จะได้ $T_{2,B} = 291.1$ K

ก.1.3 ท่อ C

ก.1.3.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ C

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 22 เพื่อหาค่าอ้างอิง R_{29} โดย $(P_{s,1})_C = (P_{s,1})_A = 33$ Pa, $(P_{s,2})_A = 24$ Pa และ $v_{2,A} = 8.62$ m/s จะได้ค่า $R_{29} = 17.5$

2. หา $v_{1,C}$ โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 23 โดย $R_{29} = 17.5$ $v_{2,A} = 8.62$ m/s ทำให้ได้ค่า $v_{1,C} = 7.65$ m/s และ เนื่องจาก $Q_{2,A} = Q_{1,A} - Q_{L,A} = 0.559$ m³/s

ดังนั้น $Q_{1,C} = Q_{2,A} - Q_{1,B} = 0.419 \text{ m/s}^3$ เมื่อแทนค่าลงสมการ $D_C = \sqrt{\frac{4Q_{1,C}}{\pi v_{1,C}}}$ ทำให้ได้ค่า $D_C = 0.264 \text{ m}$ หรือ 10.4 นิ้ว

ก.1.3.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ C

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 1 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อของท่อตรง C R_D โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C $D_C = 10.4$ นิ้ว, ความยาวท่อ C $L_C = 2 \text{ m}$ และ ท่อลมนี้ออกหน้า $t = 0.45 \text{ mm}$. จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อ C $R_{D,C} = 0.0000168 \text{ K/W}$ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 2 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ C โดยท่อลมนี้ออกหน้า $t = 0.45 \text{ mm}$, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C $D_C = 10.4$ นิ้ว , ความหนาฉนวน(b) = 1.5 นิ้ว และ ความยาวท่อ C $L_C = 2 \text{ m}$ จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ C $R_{ins} = 0.49 \text{ K/W}$

2. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} โดยความเร็วขาเข้าท่อ C $v_{1,C} = 7.65 \text{ m/s}$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ $D_C = 10.4$ นิ้ว จะได้ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} เท่ากับ 0.0168

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อตรง C (f_C) โดย $Re = 133,861$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ C $D_C = 10.4$ นิ้ว จะได้ Friction Factor ของท่อ C เท่ากับ 0.025

4. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ C $D_C = 10.4$ นิ้ว และ ความเร็วขาเข้าท่อ C $v_{1,C} = 7.65 \text{ m/s}$ ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = 133,861$ ได้ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ 6 - 5 ก เพื่อหาค่า J โดยค่า Friction Factor $f_C = 0.025$ และ Friction Factor ของท่อเรียบ $f_{sm} = 0.0168$ จะได้ค่า $J = 290$

5. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ C ($R_{h,i,C}$) โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 6 ก ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C $D_C = 10.4$ นิ้ว ค่า $J = 290$ และ ความยาวท่อ C $L_C = 2 \text{ m}$ จะได้ค่า $R_{h,i,C}$ มีค่าเท่ากับ 0.0165 K/W

6. ใช้รูปที่ ง - 7 ค หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ C ($R_D = R_{D,C}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ C ($R_{ins} = R_{ins,C}$) และความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ C ($R_{h,i} = R_{h,i,C}$) ($R_{D,C} + R_{ins,C} + R_{h,i,C}$) จากรูปที่ ง - 7 โดย $R_D = 0.0000168$ K/W, $R_{ins} = 0.49$ K/W และ $R_{h,i,C} = 0.0165$ K/W จะได้ $R_{D,C} + R_{ins,C} + R_{h,i,C} = 0.5$ K/W

7. หาค่าอุณหภูมิผิวนอกของฉนวนหุ้มท่อ C ($T_{ins,C}$) จากรูปที่ ง - 8 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C $D_C = 10.4$ นิ้ว, ค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ C ($R_D = R_{D,C}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ C ($R_{ins} = R_{ins,C}$) และความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ C ($R_{h,i} = R_{h,i,C}$) $R_{D,C} + R_{ins,C} + R_{h,i,C} = 0.0165$ K/W, ความยาวท่อ C $L_C = 2$ m, อุณหภูมิขาเข้าท่อ C $T_1 = T_{2,A} = 291.05$ K จะได้อุณหภูมิผิวนอกของฉนวนหุ้มท่อ C $T_{ins,C} = 295$ K

8. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ C $R_{h,o,C}$ จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 9 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C $D_C = 10.4$ นิ้ว, อุณหภูมิขาเข้าท่อ $T_1 = 294.05$ K และ ความยาวท่อ C $L_C = 2$ m จะได้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ C $R_{h,o,C}$ มีค่าเท่ากับ 0.245 K/W

9. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.75 K/W

10. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนอ้างอิง R_{13} โดยความยาวท่อ C $L_C = 2$ m, ค่า Friction Factor $f_C = 0.025$ และ ศูนย์กลางท่อ C $D_C = 10.4$ นิ้ว จะได้ค่า R_{13} เท่ากับ 0.19

11. หาค่า $Term_{v1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 ข โดย $R_{13} = 0.19$, ความเร็วขาเข้าของท่อ C $v_{1,C} = 7.65$ m/s จะได้ค่า $Term_{v1} = -5.5$

12. ใช้รูปที่ ง - 15 ข ในการหาความดันสถิตขาออกของท่อ C ($P_{s,2}$)_C โดยอัตราการไหลขาเข้าของท่อ C $Q_{1,C} = 0.419$ m³/s, อุณหภูมิขาเข้าท่อ C $T_1 = 291.05$ K, ความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ C (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.75 K/W ค่า $Term_{v1} = -5.5$ ซึ่งหาได้

จากขั้นตอนที่ 11 และ ความดันสถิตขาเข้าท่อ C $(P_{s,1})_C = (P_{s,1})_A = 33 \text{ Pa}$ จะได้ความดันสถิตขาออกท่อ C $(P_{s,2})_C = 27 \text{ Pa}$

ก.1.3.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ C

ใช้รูปที่ ง - 17 ก โดยความดันสถิตขาเข้าท่อ C $(P_{s,1})_C = 33 \text{ Pa}$ ความดันสถิตขาออกจากท่อ C $(P_{s,2})_C = 27 \text{ Pa}$, ความยาวท่อ C $L_C = 2 \text{ m}$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ C $D_C = 10.4 \text{ นิ้ว}$ จะได้ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ C $Q_{L,C} = 0.00045 \text{ m}^3/\text{s}$

ก.1.3.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ C

1. ใช้รูปที่ ง - 18 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C $D_C = 10.4 \text{ นิ้ว}$, ความเร็วขาเข้าท่อ C $v_{1,C} = 7.65 \text{ m/s}$, ค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อ C $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right) = 0.001$, ความต้านทานเชิงความร้อนรวม $(R_{tot}) = 0.75 \text{ K/W}$ จะได้ค่า $y = 780$

2. หาค่า Z_1 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 19 โดย $y = 780$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_1 = 0.9974$

3. หาค่า Z_2 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 20 โดย $y = 780$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_2 = 0.8$

4. หาอุณหภูมิขาออกจากท่อ C $(T_{2,C})$ โดยใช้รูปที่ ง - 21 โดยอุณหภูมิขาเข้าท่อ C $T_{1,C} = 291.05 \text{ K}$, ค่า $Z_1 = 0.9974$, $Z_2 = 0.7$ และ ค่า $y = 780$ จะได้ $T_{2,C} = 291.07 \text{ K}$

ก.1.4 ท่อ D

ก.1.4.1 ใช้โน้มนแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ D

ในการหา $v_{1,D}$ จะใช้โน้มนแกรมรูปที่ ง - 16 โดย $(P_{s,1})_D = 33 \text{ Pa}$, $(P_{s,2})_C = 27 \text{ Pa}$ และ $v_{2,C} = 7.64 \text{ m/s}$ ทำให้ได้ค่า $v_{1,D} = 3.75 \text{ m/s}$ และ เนื่องจาก $Q_{1,D} = 0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ เมื่อ

แทนค่าลงสมการ $D_D = \sqrt{\frac{4Q_{1,D}}{\pi v_{1,D}}}$ ทำให้ได้ค่า $D_D = 0.218 \text{ m}$ หรือ 8.6 นิ้ว

ก.1.4.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ D

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 1 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อของท่อตรง D R_D โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว , ความยาวท่อ D $L_D = 3$ m และ ท่อลมมีความหนา $t = 0.45$ mm. จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อ D $R_{D,D} = 0.0000135$ K/W และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 2 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ D โดยท่อลมมีความหนา $t = 0.45$ mm, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว , ความหนาฉนวน (b) = 1.5 นิ้ว และ ความยาวท่อ D $L_D = 3$ m จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ D $R_{ins} = 0.39$ K/W

2. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} โดยความเร็วขาเข้าท่อ D $v_{1,D} = 3.75$ m/s และ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว จะได้ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} เท่ากับ 0.00205

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อตรง D (f_D) โดย $Re = 54,174$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว จะได้ Friction Factor ของท่อ D เท่ากับ 0.0317

4. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว และ ความเร็วขาเข้าท่อ D $v_{1,D} = 3.75$ m/s ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = 54,174$ ได้ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 5 ก เพื่อหาค่า J โดยค่า Friction Factor $f_D = 0.0317$ และ Friction Factor ของท่อเรียบ $f_{sm} = 0.0205$ จะได้ค่า $J = 148$

5. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ D ($R_{h,i,D}$) โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 6 ก ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว ค่า $J = 148$ และ ความยาวท่อ D $L_D = 3$ m จะได้ค่า $R_{h,i,D}$ มีค่าเท่ากับ 0.023 K/W

6. ใช้รูปที่ ง - 7 ค หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ D ($R_D = R_{D,D}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ D ($R_{ins} = R_{ins,D}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ D ($R_{h,i} = R_{h,i,D}$) ($R_{D,D} + R_{ins,D} +$

$R_{h,i,D}$) จากรูปที่ ง - 7 โดย $R_D = 0.0000130 \text{ K/W}$, $R_{ins} = 0.39 \text{ K/W}$ และ $R_{h,i,D} = 0.023 \text{ K/W}$ จะได้ $R_{D,D} + R_{ins,D} + R_{h,i,D} = 0.41 \text{ K/W}$

7. หาค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ D ($T_{ins,D}$) จากรูปที่ ง - 8 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว, ค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ D ($R_D = R_{D,D}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ D ($R_{ins} = R_{ins,D}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ D ($R_{h,i} = R_{h,i,D}$) $R_{D,D} + R_{ins,D} + R_{h,i,D} = 0.41 \text{ K/W}$, ความยาวท่อ D $L_D = 3 \text{ m}$, อุณหภูมิขาเข้าท่อ D $T_1 = T_{2,C} = 291.07 \text{ K}$ จะได้อุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ D $T_{ins,D} = 295.2 \text{ K}$

8. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ D $R_{h,o,D}$ จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 9 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว, อุณหภูมิขาเข้าท่อ $T_1 = 291.07 \text{ K}$ และ ความยาวท่อ D $L_D = 3 \text{ m}$ จะได้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ D $R_{h,o,D}$ มีค่าเท่ากับ 0.2 K/W

9. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.613 K/W

10. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนวังอิง R_{13} โดยความยาวท่อ D $L_D = 3 \text{ m}$, ค่า Friction Factor $f_D = 0.0317$ และ ศูนย์กึ่งกลางท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว จะได้ค่า R_{13} เท่ากับ 0.43

11. หาค่า $Term_{v1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 ข โดย $R_{13} = 0.43$, ความเร็วขาเข้าของท่อ D $v_{1,D} = 3.75 \text{ m/s}$ จะได้ค่า $Term_{1v} = -3$

12. ใช้รูปที่ ง - 15 ข ในการหาความดันสถิตขาออกของท่อ D ($P_{s,2}$)_D โดยอัตราการไหลขาเข้าของท่อ D $Q_{1,D} = 0.14 \text{ m}^3/\text{s}$, อุณหภูมิขาเข้าท่อ D $T_1 = 291.07 \text{ K}$, ความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ D (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.613 K/W ค่า $Term_{1v} = -3$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 11 และ ความดันสถิตขาเข้าท่อ D ($P_{s,1}$)_D = ($P_{s,1}$)_A = 33 Pa จะได้ความดันสถิตขาออกท่อ D ($P_{s,2}$)_D = 30 Pa

ก.1.4.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ D

ใช้รูปที่ ง - 17 ก โดยความดันสถิตขาเข้าท่อ D $(P_{s,1})_D = 33$ Pa ความดันสถิตขาออกจากท่อ D $(P_{s,2})_D = 30$ Pa , ความยาวท่อ D $L_D = 3$ m และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว จะได้ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ D $Q_{L,D} = 0.0006$ m³/s

ก.1.4.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ D

1. ใช้รูปที่ ง - 18 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D $D_D = 8.6$ นิ้ว, ความเร็วขาเข้าท่อ D $v_{1,D} = 3.75$ m/s, ค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อ D $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right) = 0.0043$, ความต้านทานเชิงความร้อนรวม $(R_{tot}) = 0.613$ K/W จะได้ค่า $y = 215$

2. หาค่า Z_1 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 19 โดย $y = 215$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_1 = 0.9907$

3. หาค่า Z_2 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 20 โดย $y = 215$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_2 = 2.8$

4. หาอุณหภูมิขาออกจากท่อ D $(T_{2,D})$ โดยใช้รูปที่ 6 - 21 โดยอุณหภูมิขาเข้าท่อ D $T_{1,D} = 291.07$ K, ค่า $Z_1 = 0.9907$, $Z_2 = 2.8$ และ ค่า $y = 215$ จะได้ $T_{2,D} = 291.1$ K

ก.1.5 ท่อ E

ก.1.5.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ E

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 22 เพื่อหาค่าอ้างอิง R_{29} โดย $(P_{s,1})_E = (P_{s,1})_C = 33$ Pa, $(P_{s,2})_C = 27$ Pa และ $v_{2,C} = 7.64$ m/s จะได้ค่า $R_{29} = 15.5$

2. หา $v_{1,C}$ โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 23 โดย $R_{29} = 15.5$ $v_{2,C} = 7.74$ m/s ทำให้ได้ค่า $v_{1,E} = 7$ m/s และ เนื่องจาก $Q_{2,C} = Q_{1,C} - Q_{L,C} = 0.4186$ m³/s ดังนั้น

$Q_{1,E} = Q_{2,C} - Q_{1,D} = 0.2786 \text{ m}^3/\text{s}^3$ เมื่อแทนค่าลงสมการ $D_E = \sqrt{\frac{4Q_{1,E}}{\pi v_{1,E}}}$ ทำให้ได้ค่า $D_E = 0.225 \text{ m}$ หรือ 8.9 นิ้ว

ก.1.5.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ E

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 1 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อ E $R_{D,E}$ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E เท่ากับ 8.9 นิ้ว, ความยาวท่อ E $L_E = 3 \text{ m}$ และ ท่อลมมีความหนา $t = 0.45 \text{ mm}$. จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อ E $R_{D,E} = 0.0000130 \text{ K/W}$ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 2 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ E โดยท่อลมมีความหนา $t = 0.45 \text{ mm}$, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว, ความหนาฉนวน(b) = 1.5 นิ้ว และ ความยาวท่อ E $L_E = 3 \text{ m}$ จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ E $R_{ins} = 0.39 \text{ K/W}$

2. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} โดยความเร็วขาเข้าท่อ E $v_{1,E} = 7 \text{ m/s}$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว จะได้ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} เท่ากับ 0.0179

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อตรง E (f_E) โดย $Re = 104,357$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว จะได้ Friction Factor ของท่อ E เท่ากับ 0.027

4. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว และ ความเร็วขาเข้าท่อ D $v_{1,E} = 7 \text{ m/s}$ ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = 104,357$ ได้ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 5 ก เพื่อหาค่า J โดยค่า Friction Factor $f_E = 0.027$ และ Friction Factor ของท่อเรียบ $f_{sm} = 0.0179$ จะได้ค่า $J = 244$

5. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ E ($R_{h,i,E}$) โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 6 ก ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว ค่า $J = 244$ และ ความยาวท่อ E $L_E = 3 \text{ m}$ จะได้ค่า $R_{h,i,E}$ มีค่าเท่ากับ 0.0148 K/W

6. ใช้รูปที่ ง - 7 ค หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ E ($R_D = R_{D,E}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ E ($R_{ins} = R_{ins,E}$) และความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ E ($R_{h,i} = R_{h,i,E}$) ($R_{D,E} + R_{ins,E} + R_{h,i,E}$) จากรูปที่ ง - 7 โดย $R_{D,E} = 0.0000130$ K/W, $R_{ins} = 0.39$ K/W และ $R_{h,i,E} = 0.0148$ K/W จะได้ $R_{D,E} + R_{ins,E} + R_{h,i,E} = 0.40$ K/W

7. หาค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ E ($T_{ins,E}$) จากรูปที่ ง - 8 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว, ค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ E ($R_D = R_{D,E}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ E ($R_{ins} = R_{ins,E}$) และความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ E ($R_{h,i} = R_{h,i,E}$) $R_{D,E} + R_{ins,E} + R_{h,i,E} = 0.4$ K/W, ความยาวท่อ E $L_E = 3$ m, อุณหภูมิขาเข้าท่อ E $T_1 = T_{2,C} = 291.07$ K จะได้ อุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ E $T_{ins,E} = 295.2$ K

8. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ E $R_{h,o,E}$ จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 9 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว, อุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ E $T_{ins,E} = 295.2$ K และ ความยาวท่อ E $L_E = 3$ m จะได้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ E $R_{h,o,E}$ มีค่าเท่ากับ 0.19 K/W

9. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.6 K/W

10. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนอ้างอิง R_{13} โดยความยาวท่อ E $L_E = 3$ m, ค่า Friction Factor $f_E = 0.027$ และ ศูนย์กลางท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว จะได้ค่า R_{13} เท่ากับ 0.36

11. หาค่า $Term_{v1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 ข โดย $R_{13} = 0.36$, ความเร็วขาเข้าของท่อ E $v_{1,E} = 7$ m/s จะได้ค่า $Term_{v1} = -9$

12. ใช้รูปที่ ง - 15 ข ในการหาความดันสถิตขาออกของท่อ E ($P_{s,2}$)_E โดยอัตราการไหลขาเข้าของท่อ E $Q_{1,E} = 0.14$ m³/s, อุณหภูมิขาเข้าท่อ E $T_1 = 291.07$ K, ความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ E (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.60 K/W ค่า $Term_{v1} = -9$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 11 และ ความดันสถิตขาเข้าท่อ E ($P_{s,1}$)_E = ($P_{s,1}$)_A = 33 Pa จะได้ความดันสถิตขาออกท่อ E ($P_{s,2}$)_E = 24 Pa

ก.1.5.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ E

ใช้รูปที่ ง - 17 ก โดยความดันสถิตขาเข้าท่อ E $(P_{s,1})_E = 33$ Pa ความดันสถิตขาออกจากท่อ E $(P_{s,2})_E = 24$ Pa , ความยาวท่อ E $L_E = 3$ m และ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อ E $D_E = 8.9$ นิ้ว จะได้ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ E $Q_{L,E} = 0.0006$ m³/s

ก.1.5.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ E

1. ใช้รูปที่ ง - 18 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E $D_E = 8.8$ นิ้ว, ความเร็วขาเข้าท่อ E $v_{1,E} = 7$ m/s, ค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อ E $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right) = 0.0022$, ความต้านทานเชิงความร้อนรวม $(R_{tot}) = 0.60$ K/W จะได้ค่า $y = 425$

2. หาค่า Z_1 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 19 โดย $y = 425$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_1 = 0.9953$

3. หาค่า Z_2 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 20 โดย $y = 215$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_2 = 1.4$

4. หาอุณหภูมิขาออกจากท่อ E $(T_{2,E})$ โดยใช้รูปที่ ง - 21 โดยอุณหภูมิขาเข้าท่อ E $T_{1,E} = 291.07$ K ,ค่า $Z_1 = 0.9954$, $Z_2 = 1.4$ และ ค่า $y = 425$ จะได้ $T_{2,E} = 291.1$ K

ก.1.6 ท่อ F

ก.1.6.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อ F

ในการหาความเร็วขาเข้าท่อ F $v_{1,F}$ จะใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 16 โดย $(P_{s,1})_F = 33$ Pa, $(P_{s,2})_E = 24$ Pa และ $v_{2,E} = 6.98$ m/s ทำให้ได้ค่า $v_{1,F} = 3.20$ m/s และเนื่องจาก $Q_{1,F} = 0.14$ m³/s เมื่อแทนค่าลงสมการ $D_F = \sqrt{\frac{4Q_{1,F}}{\pi v_{1,F}}}$ ทำให้ได้ค่า $D_F = 0.236$ m หรือ 9.3 นิ้ว

ก.1.6.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ F

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 1 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อของท่อตรง F $R_{D,F}$ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F เท่ากับ 9.3 นิ้ว, ความยาวท่อ F $L_F = 2.5$ m และท่อลมมีความหนา $t = 0.45$ mm. จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อ F $R_{D,F} = 0.000015$ K/W และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 2 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ F โดยท่อลมมีความหนา $t = 0.45$ mm, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว, ความหนาฉนวน(b) = 1.5 นิ้ว และ ความยาวท่อ F $L_F = 2.5$ m จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ F $R_{ins} = 0.44$ K/W

2. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} โดยความเร็วขาเข้าท่อ F $v_{1,F} = 3.2$ m/s และ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว จะได้ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} เท่ากับ 0.0211

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อตรง F (f_F) โดย $Re = 50,044$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว จะได้ Friction Factor ของท่อ F เท่ากับ 0.032

4. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว และ ความเร็วขาเข้าท่อ F $v_{1,F} = 3.2$ m/s ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = 50,044$ ได้ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 5 ก เพื่อหาค่า J โดยค่า Friction Factor $f_F = 0.032$ และ Friction Factor ของท่อเรียบ $f_{sm} = 0.0211$ จะได้ค่า $J = 138$

5. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ F ($R_{h,i,F}$) โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 6 ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว ค่า $J = 138$ และ ความยาวท่อ F $L_F = 2.5$ m จะได้ค่า $R_{h,i,F}$ มีค่าเท่ากับ 0.03 K/W

6. ใช้รูปที่ ง - 7 ค หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ F ($R_D = R_{D,F}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ F ($R_{ins} = R_{ins,F}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ F ($R_{h,i} = R_{h,i,F}$) ($R_{D,F} + R_{ins,F} +$

$R_{h,i,F}$) จากรูปที่ ง - 7 โดย $R_{D,F} = 0.000015$ K/W, $R_{ins,F} = 0.44$ K/W และ $R_{h,i,F} = 0.03$ K/W จะได้ $R_{D,F} + R_{ins,F} + R_{h,i,F} = 0.47$ K/W

7. หาค่าอุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ F ($T_{ins,F}$) จากรูปที่ ง - 8 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว, ค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อ F ($R_D = R_{D,F}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ F ($R_{ins} = R_{ins,F}$) และ ความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ F ($R_{h,i} = R_{h,i,F}$) $R_{D,F} + R_{ins,F} + R_{h,i,F} = 0.47$ K/W , ความยาวท่อ F $L_F = 2.5$ m, อุณหภูมิขาเข้าท่อ F $T_1 = T_{2,E} = 291.1$ K จะได้อุณหภูมิผิววนอกของฉนวนหุ้มท่อ F $T_{ins,F} = 295.1$ K

8. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ F $R_{h,o,F}$ จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 9 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว, อุณหภูมิขาเข้าท่อ $T_1 = 291.1$ K และ ความยาวท่อ F $L_F = 2.5$ m จะได้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ F $R_{h,o,F}$ มีค่าเท่ากับ 0.22 K/W

9. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.69 K/W

10. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนอ้างอิง R_{13} โดยความยาวท่อ F $L_F = 2.5$ m, ค่า Friction Factor $f_F = 0.032$ และ ศูนย์กลางท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว จะได้ค่า R_{13} เท่ากับ 0.34

11. หาค่า $Term_{v1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 ข โดย $R_{13} = 0.34$ ความเร็วขาเข้าของท่อ F $v_{1,F} = 3.2$ m/s จะได้ค่า $Term_{v1} = -1.5$

12. ใช้รูปที่ ง - 15 ข ในการหาความดันสถิตขาออกของท่อ F ($P_{s,2}$)_F โดยอัตราการไหลขาเข้าของท่อ F $Q_{1,F} = 0.14$ m³/s, อุณหภูมิขาเข้าท่อ F $T_1 = 291.1$ K, ความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ F (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.69 K/W ค่า $Term_{v1} = -1.5$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 11 และ ความดันสถิตขาเข้าท่อ F ($P_{s,1}$)_F = ($P_{s,1}$)_A = 33 Pa จะได้ความดันสถิตขาออกท่อ F ($P_{s,2}$)_F = 31 Pa

ก.1.6.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ F

ใช้รูปที่ ง - 17 ก โดยความดันสถิตขาเข้าท่อ F $(P_{s,1})_F = 33$ Pa ความดันสถิตขาออกจากท่อ F $(P_{s,2})_F = 31$ Pa, ความยาวท่อ F $L_F = 2.5$ m และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว จะได้ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ F $Q_{L,F} = 0.00055$ m³/s

ก.1.6.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ F

1. ใช้รูปที่ ง - 18 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F $D_F = 9.3$ นิ้ว, ความเร็วขาเข้าท่อ F $v_{1,F} = 3.2$ m/s, ค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อ F $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right) = 0.0039$, ความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot}) = 0.69 K/W จะได้ค่า $y = 235$

2. หาค่า Z_1 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 19 โดย $y = 235$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_1 = 0.9915$

3. หาค่า Z_2 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 20 โดย $y = 235$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_2 = 2.5$

4. หาอุณหภูมิขาออกจากท่อ F ($T_{2,F}$) โดยใช้รูปที่ ง - 21 โดยอุณหภูมิขาเข้าท่อ $T_{1,F} = 291.1$ K, ค่า $Z_1 = 0.9915$, $Z_2 = 2.5$ และ ค่า $y = 235$ จะได้ $T_{2,F} = 291.11$ K

ก.1.7 ท่อ G

ก.1.7.1 ใช้โนโมแกรมเพื่อหา

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 22 เพื่อหาค่าอ้างอิง R_{29} โดย $(P_{s,1})_A = (P_{s,1})_G = 33$ Pa, $(P_{s,2})_E = 24$ Pa และ $v_{2,E} = 6.98$ m/s จะได้ค่า $R_{29} = 10$

2. หา $v_{1,C}$ โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 23 โดย $R_{29} = 10$, $v_{2,E} = 6.98$ m/s ทำให้ได้ค่า $v_{1,G} = 6.0$ m/s และ เนื่องจาก $Q_{2,E} = Q_{1,E} - Q_{L,E} = 0.278$ m³/s³ ดังนั้น

$Q_{1,G} = Q_{2,E} - Q_{1,F} = 0.138 \text{ m/s}^3$ เมื่อแทนค่าลงสมการ $D_G = \sqrt{\frac{4Q_{1,G}}{\pi v_{1,G}}}$ ทำให้ได้ค่า $D_G = 0.171 \text{ m}$ หรือ 6.7 นิ้ว

ก.1.7.2 ใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อ G

1. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 1 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อของท่อตรง G $R_{D,G}$ โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G เท่ากับ 6.7 นิ้ว, ความยาวท่อ G $L_G = 4 \text{ m}$ และท่อลมนี้อาจมีความหนา $t = 0.45 \text{ mm}$. จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของผนังท่อ G $R_{D,G} = 0.0000128 \text{ K/W}$ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 2 เพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ G โดยท่อลมนี้อาจมีความหนา $t = 0.45 \text{ mm}$, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว, ความหนาฉนวน (b) = 1.5 นิ้ว และ ความยาวท่อ G $L_G = 4 \text{ m}$ จะได้ความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ G $R_{ins} = 0.37 \text{ K/W}$

2. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 3 หา Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} โดยความเร็วขาเข้าท่อ G $v_{1,G} = 6.0 \text{ m/s}$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว จะได้ค่า Friction Factor ของท่อเรียบ f_{sm} เท่ากับ 0.0196

3. ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 4 หาค่า Friction Factor ของท่อตรง G (f_G) โดย $Re = 68,035$ และ เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว จะได้ Friction Factor ของท่อ G เท่ากับ 0.0307

4. ทราบค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว และ ความเร็วขาเข้าท่อ G $v_{1,G} = 6 \text{ m/s}$ ทำให้คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ $Re = 68,035$ ได้ และ ใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 5 ก เพื่อหาค่า J โดยค่า Friction Factor $f_G = 0.0307$ และ Friction Factor ของท่อเรียบ $f_{sm} = 0.0196$ จะได้ค่า $J = 180$

5. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ G ($R_{h,i,G}$) โดยใช้โนโมแกรมรูปที่ ง - 6 ก ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว ค่า $J = 180$ และ ความยาวท่อ G $L_G = 4 \text{ m}$ จะได้ค่า $R_{h,i,G}$ มีค่าเท่ากับ 0.015 K/W

6. ใช้รูปที่ ง - 7 ค หาค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อ G ($R_D = R_{D,G}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ G ($R_{ins} = R_{ins,G}$) และความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ G ($R_{h,i} = R_{h,i,G}$) ($R_{D,G} + R_{ins,G} + R_{h,i,G}$) จากรูปที่ ง - 7 โดย $R_{D,G} = 0.0000128$ K/W, $R_{ins,G} = 0.37$ K/W และ $R_{h,i,G} = 0.015$ K/W จะได้ $R_{D,G} + R_{ins,G} + R_{h,i,G} = 0.39$ K/W

7. หาค่าอุณหภูมิผิวนอกของฉนวนหุ้มท่อ G ($T_{ins,G}$) จากรูปที่ ง - 8 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว, ค่าผลรวมของความต้านทานเชิงความร้อนจากผนังท่อของท่อ G ($R_D = R_{D,G}$) กับความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวนหุ้มท่อ G ($R_{ins} = R_{ins,G}$) และความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ G ($R_{h,i} = R_{h,i,G}$) $R_{D,G} + R_{ins,G} + R_{h,i,G} = 0.39$ K/W, ความยาวท่อ G $L_G = 4$ m, อุณหภูมิขาเข้าท่อ G $T_1 = T_{2,E} = 291.11$ K จะได้อุณหภูมิผิวนอกของฉนวนหุ้มท่อ G $T_{ins,G} = 295.4$ K

8. หาค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ G $R_{h,o,G}$ จากโนโมแกรมรูปที่ ง - 9 โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว, อุณหภูมิขาเข้าท่อ $T_1 = 291.11$ K และ ความยาวท่อ G $L_G = 4$ m จะได้ค่าความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ G $R_{h,o,G}$ มีค่าเท่ากับ 0.19 K/W

9. คำนวณหาความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.58 K/W

10. ใช้รูป ง - 10 เพื่อหาค่าของแกนอ้างอิง R_{13} โดยความยาวท่อ G $L_G = 4$ m, ค่า Friction Factor $f_G = 0.0307$ และ ศูนย์กกลางท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว จะได้ค่า R_{13} เท่ากับ 0.71

11. หาค่า $Term_{v1}$ ซึ่งเป็นค่าอ้างอิงจากสมการ 6.6 จากรูปที่ ง - 11 ข โดย $R_{13} = 0.71$, ความเร็วขาเข้าของท่อ G $v_{1,G} = 6$ m/s จะได้ค่า $Term_{v1} = -12.5$

12. ใช้รูปที่ ง - 15 ข ในการหาความดันสถิตขาออกของท่อ G ($P_{s,2}$)_G โดยอัตราการไหลขาเข้าของท่อ G $Q_{1F} = 0.138$ m³/s, อุณหภูมิขาเข้าท่อ G $T_1 = 291.11$ K, ความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อ G (R_{tot}) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.58 K/W ค่า $Term_{v1} = -12.5$ ซึ่งหาได้จากขั้นตอนที่ 11 และ ความดันสถิตขาเข้าท่อ G ($P_{s,1}$)_G = ($P_{s,1}$)_A = 33 Pa จะได้ความดันสถิตขาออกท่อ G ($P_{s,2}$)_G = 23 Pa

ก.1.7.3 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ G

ใช้รูปที่ ง - 17 ก โดยความดันสถิตขาเข้าท่อ G $(P_{s,1})_G = 33$ Pa ความดันสถิตขาออกจากท่อ G $(P_{s,2})_G = 23$ Pa, ความยาวท่อ G $L_G = 4$ m และ เส้นผ่านศูนย์กลางกลางของท่อ G $D_G = 6.7$ นิ้ว จะได้ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อ G $Q_{L,G} = 0.00055$ m³/s

ก.1.7.4 อุณหภูมิขาออกของท่อ G

1. ใช้รูปที่ ง - 18 ก โดยเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G $D_G = 6.6$ นิ้ว, ความเร็วขาเข้าท่อ G $v_{1,G} = 6$ m/s, ค่าอัตราส่วนของอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ออัตราการไหลเชิงปริมาตรขาเข้าของท่อตรง $\left(\frac{Q_L}{Q_1}\right) = 0.004$, ความต้านทานเชิงความร้อนรวม $(R_{tot}) = 0.58$ K/W จะได้ค่า $y = 190$

2. หาค่า Z_1 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 19 โดย $y = 190$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_1 = 0.9895$

3. หาค่า Z_2 โดยใช้กราฟรูปที่ ง - 20 โดย $y = 210$ ดังนั้น จะได้ค่า $Z_2 = 3.1$

4. หาอุณหภูมิขาออกจากท่อ G $(T_{2,G})$ โดยใช้รูปที่ ง - 21 โดยอุณหภูมิขาเข้าท่อ $T_{1,G} = 291.11$ K, ค่า $Z_1 = 0.9895$, $Z_2 = 3.1$ และ ค่า $y = 190$ จะได้ $T_{2,G} = 291.12$ K

ตารางที่ ก - 3 ผลการออกแบบท่อลมด้วยโปรแกรม

ท่อลม	Q_1 (m ³ /s)	Q_2 (m ³ /s)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	Ps1 (Pa)	Ps2 (Pa)	ΔP_T (Pa)	T ₁ [K]	T ₂ [K]	D (in.)	D (m.)
A	0.560	0.559	8.64	8.62	33	24	9.8	291.0	291.05	11.3	0.287
B	0.140	0.140	4.20	4.19	33	29	4.08	291.05	291.1	8.1	0.206
C	0.419	0.419	7.65	7.64	33	27	6.08	291.05	291.07	10.4	0.264
D	0.140	0.139	3.75	3.73	33	30	3.07	291.07	291.1	8.6	0.218
E	0.278	0.278	7.00	6.98	33	24	9.13	291.07	291.1	8.9	0.225
F	0.140	0.139	3.20	3.19	33	31	2.05	291.1	291.11	9.3	0.236
G	0.138	0.137	6.00	5.98	33	23	10.17	291.1	291.12	6.7	0.171

ตารางที่ ก - 4 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อลมแต่ละท่อน

ท่อ	อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร [m^3/s]
A	0.00100
B	0.00050
C	0.00045
D	0.00060
E	0.00060
F	0.00055
G	0.00055

ก.2 การคำนวณความร้อนที่ถ่ายเทในท่อลมแต่ละท่อน

การคำนวณความร้อนที่ถ่ายเทจากท่อลมแต่ละท่อนจะอาศัยโปรแกรม MATLAB R2014a ในการคำนวณ โดยนำเงื่อนไขของการออกแบบซึ่งแสดงไว้ในตาราง ก - 1 และ ก - 2 และ นำผลที่ได้จากการออกแบบด้วยโปรแกรมของท่อแต่ละท่อนซึ่งแสดงไว้ในตาราง ก - 3 แทนลงสมการ ก.1

$$\dot{q} = \rho Q_L c_p \left(T_{\infty, o} - \frac{T_1 + T_2}{2} \right) + \frac{T_{\infty, o} - ((T_1 + T_2)/2)}{R_{tot}} \quad (\text{ก.1})$$

โดย	\dot{q}	คือ	อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]
	Q_L	คือ	อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร [m^3/s]
	R_{tot}	คือ	ความต้านทานเชิงความร้อนรวมของท่อลม [K/W]
	T_1	คือ	อุณหภูมิขาเข้าท่อลม [K]
	T_2	คือ	อุณหภูมิขาออกจากท่อลม [K]
	$T_{\infty, o}$	คือ	อุณหภูมิของอากาศภายนอกท่อลม [K]

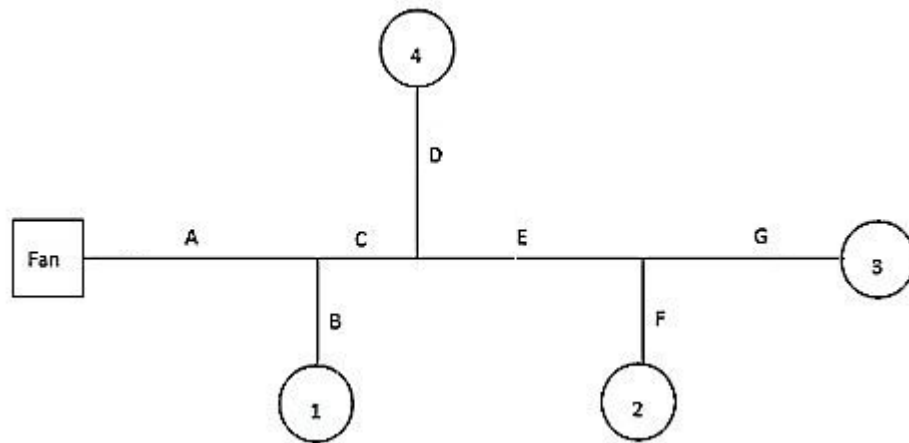
ผลลัพธ์ที่ได้ถูกแสดงไว้ในตาราง ก - 5

ตารางที่ ก - 5 อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อแต่ละท่อน

ท่อ	อัตราการถ่ายเทความร้อน [W]
A	31.6
B	13.4
C	13.3
D	17.1
E	16.9
F	15.2
G	16.9



ก.3 การออกแบบด้วยวิธี Static Regain



รูปที่ ก - 1 แบบท่อลมที่ใช้ในการออกแบบ

ตารางที่ ก-1 ความยาวของท่อลมแต่ละส่วน

ท่อลม	ความยาว (เมตร)
A	4.5
B	2.5
C	2.0
D	3.0
E	3.0
F	2.5
G	4.0

ตารางที่ ก-2 อัตราการไหลของหน้าจากจ่ายลม

หน้ากักจ่ายลม	อัตราการไหล		ระยะ Throw
	CFM	m ³ /s	
1	300	0.14	5
2	300	0.14	5
3	300	0.14	5
4	300	0.14	5

ก.3.1 หาขนาดความดันของพัดลม

1. กำหนดความเร็วลมในท่อ A (v_A) เท่ากับ 8.64 m/s
2. ทราบค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรของท่อ A $Q_A = 0.56 \text{ m}^3/\text{s}$, ความยาวท่อ A $L_A = 4.5 \text{ m}$. สามารถคำนวณหาเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ A จากสมการ $D_A = \sqrt{(4Q_A)/(\pi v_A)}$ ดังนั้น ได้เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.287 m. หรือ ประมาณ 12 นิ้ว
3. คำนวณหาความดันรวมที่ลดลงในท่อ A โดย $\Delta P_{t,A} = \frac{1}{2} f \frac{L}{D} \rho v_A^2$ และ ค่า Friction Factor f หาได้จากสมการ 3.14 โดย $\epsilon = 0.00015 \text{ m}$, $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $\mu = 0.000018 \text{ kg.m/s}$ และ $Re = 164,463$

สมการ 3.14

$$f = \left\{ -1.8 \log \left[\left(\frac{\epsilon/D}{3.7} \right)^{1.11} + \frac{6.9}{Re} \right] \right\}^{-2}$$

ดังนั้น ความดันรวมลดในท่อ A $\Delta P_{t,A}$ มีค่าเท่ากับ 9 Pa

4. หาความดันที่ใช้ในการส่งลมจากสมการ 3.43 โดยอัตราการไหลเชิงปริมาตรในท่อ B $Q_B = 0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ และ ระยะส่งลม $T_{50} = 5 \text{ m}$.

สมการ 3.43

$$T_{50} = \frac{0.187}{v_T^2} \sqrt{Q_2 \bar{C}_d^3 \sqrt{\left(\frac{2P_{s,2}}{\rho} \right)^3}}$$

โดย v_T คือ ความเร็วปลายทางที่บริเวณปรับอากาศ (50 FPM หรือ 0.25 m/s)

\bar{C}_d คือ สัมประสิทธิ์การจ่ายมีค่าประมาณ 0.5

จากสมการ 3.45 จะได้ค่าความดันสถิตขาออก $P_{s,2}$ เท่ากับ 18 Pa

5. หาความดันสถิตของพัดลมจากค่าความดันรวมลดในท่อแรกรวมกับความดันที่ต้องใช้ส่งลมให้ได้ระยะตามเงื่อนไขที่กำหนด คือ 5 เมตร $\Delta P_A + P_{s,2} = 9 + 18 = 27 \text{ Pa}$

ก.3.2 หาขนาด และ ความเร็วของท่อลมส่วนที่เหลือ

ในการหาขนาดของท่อลมส่วนที่เหลืออาศัยสมการ ก.1 เป็นสมการหลักในการออกแบบ โดยค่า Regain Factor (R) จะใช้ค่า 0.75 ตามคำแนะนำของ ASHRAE Guide (1958)

$$R \frac{\rho}{2} (v_{i-1}^2 - v_i^2) = \frac{1}{2} \rho f_i L_i \sqrt{\frac{v_i \pi}{4 Q_i}} v_i^2 \quad (\text{ก.1})$$

โดย i คือ ท่อส่วนที่พิจารณาอยู่
 $i - 1$ คือ ท่อส่วนก่อนหน้า

โดยสมการที่ ก.1 สามารถจัดให้อยู่ในรูปตัวแปร v_i ได้ ซึ่ง v_i คือความเร็วลมในท่อส่วนที่พิจารณาอยู่ซึ่งเป็นที่ที่ยังไม่ทราบค่า ดังนั้น สมการ ก.1 เป็นสมการอดิศัยตัวแปรเดียวซึ่งในงานวิจัยนี้ได้อาศัยโปรแกรม MATLAB 2014a ในการแก้สมการโดยมีขั้นตอน คือ

1. ใส่ค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ อัตราเร็วขาเข้าท่อก่อนหน้า (v_{i-1}) , ความยาวท่อส่วนที่พิจารณาอยู่ (L_i) , อัตราการไหลในท่อที่สนใจ (Q_i) , ความหนาแน่นของอากาศ (ρ) = 1.2 kg/m³ , Regain Factor (R) = 0.75 และ กำหนดความเร็วลมขาเข้าท่อที่พิจารณา ($v_{i,1}$) เพื่อใช้ในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1

2. เริ่มกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ $n = 1$ (กระบวนการทำซ้ำจะทำต่อไปเรื่อยๆ จนเข้าเงื่อนไขตามสมการ ก.3)

3. คำนวณหาตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) จากสมการ $Re = \frac{\rho v D}{\mu}$ และ คำนวณค่า Friction Factor (f) จากสมการ 3.14 และ คำนวณความเร็วลมในท่อส่วนที่พิจารณาอยู่ ($v_{i,n}$) จากสมการ ก.1

4. ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของค่าความเร็วลมในท่อที่พิจารณาอยู่ ตาม

$$\text{อสมการ} \quad \frac{|v_{i,n} - v_{i,n-1}|}{v_{i,n}} \times 100\% < 0.00001 \quad (\text{ก.2})$$

เมื่อ $v_{i,n-1}$ คือ ความเร็วที่ได้จากกระบวนการทำซ้ำครั้งก่อนหน้า
 $v_{i,n}$ คือ ความเร็วที่ได้จากกระบวนการทำซ้ำครั้งปัจจุบัน

5. ถ้าความคลาดเคลื่อนเป็นไปตามสมการที่ ก.3 ให้หยุดกระบวนการทำซ้ำแล้ว แสดงผล $v_{i,n}$ และ ทำขั้นตอนที่ 6 ต่อไป, ถ้าความคลาดเคลื่อนไม่เป็นไปตามสมการ ก.2 ให้ย้อนกลับไปทำขั้นตอนที่ 2 ใหม่ เป็นการทำซ้ำครั้งที่ $n + 1$

6. คำนวณเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมจากสมการ $D_i = \sqrt{\frac{v_i \pi}{4Q_i}}$ และ คำนวณความดันรวมลด (ΔP_t) จากสมการ $\Delta P_t = \frac{1}{2} f_i \frac{L_i}{D_i} \rho v_i^2$ แสดงผล D_i และ $\Delta P_{t,i}$ และ ความดันสถิตขาเข้า (P_{s1}) และ ความดันสถิตขาออก (P_{s2})

7. จบการทำงาน

ก.3.3.1. หาความเร็วขาเข้าท่อ B และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B

ใส่ค่าความยาวท่อ B $L_B = 2.5$ m., อัตราการไหลเชิงปริมาตรท่อ B $Q_B = 0.14$ m³/s , ความเร็วลมท่อก่อนหน้า $v_A = 8.64$ m/s และ กำหนดความเร็วลมขาเข้าท่อที่พิจารณา ($v_{B,1}$) เพื่อใช้ในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1 เท่ากับ 8.64 m/s จากการใช้โปรแกรม MATLAB 2014a ในการแก้สมการ จะได้ค่าความเร็วขาเข้าท่อ B $v_B = 7.10$ m/s, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ B $D_B = 0.158$ m. หรือ 6.2 นิ้ว และ ความดันรวมลด = 10.77 Pa และ ความดันสถิตขาเข้า (P_{s1}) = 25 Pa และ ความดันสถิตขาออก (P_{s2}) = 18 Pa

ก.3.3.2. หาความเร็วขาเข้าท่อ C และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C

ใส่ค่าความยาวท่อ C $L_C = 2$ m., อัตราการไหลเชิงปริมาตรท่อ C $Q_C = 0.42$ m³/s , ความเร็วลมท่อก่อนหน้า $v_A = 8.64$ m/s และ กำหนดความเร็วลมขาเข้าท่อที่พิจารณา ($v_{C,1}$) เพื่อใช้ในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1 เท่ากับ 8.64 m/s จากการใช้โปรแกรม MATLAB 2014a ในการแก้สมการ จะได้ค่าความเร็วขาเข้าท่อ C $v_C = 7.87$ m/s, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ C $D_C = 0.261$ m. หรือ 10.3 นิ้ว และ ความดันรวมลด = 5.64 Pa และ ความดันสถิตขาเข้า (P_{s1}) = 23.64 Pa และ ความดันสถิตขาออก (P_{s2}) = 18 Pa

ก.3.2.3. หาความเร็วขาเข้าท่อ D และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D

ใส่ค่าความยาวท่อ $D L_D = 3 \text{ m.}$, อัตราการไหลเชิงปริมาตรท่อ D $Q_D = 0.14 \text{ m}^3/\text{s}$, ความเร็วลมท่อก่อนหน้า $v_C = 7.87 \text{ m/s}$ และ กำหนดความเร็วลมขาเข้าท่อที่พิจารณา ($v_{D,1}$) เพื่อใช้ในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1 เท่ากับ 7.87 m/s จากการใช้โปรแกรม MATLAB 2014a ในการแก้สมการ จะได้ค่าความเร็วขาเข้าท่อ D $v_D = 6.34 \text{ m/s}$, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ D $D_D = 0.168 \text{ m.}$ หรือ 6.6 นิ้ว และ ความดันรวมลด = 9.73 Pa และ ความดันสถิตขาเข้า (P_{s1}) = 24.73 Pa และ ความดันสถิตขาออก (P_{s2}) = 18 Pa

ก.3.2.4. หาความเร็วขาเข้าท่อ E และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E

ใส่ค่าความยาวท่อ E $L_E = 3 \text{ m.}$, อัตราการไหลเชิงปริมาตรท่อ E $Q_E = 0.28 \text{ m}^3/\text{s}$, ความเร็วลมท่อก่อนหน้า $v_C = 7.87 \text{ m/s}$ และ กำหนดความเร็วลมขาเข้าท่อที่พิจารณา ($v_{E,1}$) เพื่อใช้ในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1 เท่ากับ 7.87 m/s จากการใช้โปรแกรม MATLAB 2014a ในการแก้สมการ จะได้ค่าความเร็วขาเข้าท่อ E $v_E = 6.74 \text{ m/s}$, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ E $D_E = 0.230 \text{ m.}$ หรือ 9.0 นิ้ว และ ความดันรวมลด = 7.37 Pa และ ความดันสถิตขาเข้า (P_{s1}) = 25.37 Pa และ ความดันสถิตขาออก (P_{s2}) = 18 Pa

ก.3.2.5. หาความเร็วขาเข้าท่อ F และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F

ใส่ค่าความยาวท่อ F $L_F = 2.5 \text{ m.}$, อัตราการไหลเชิงปริมาตรท่อ F $Q_F = 0.14 \text{ m}^3/\text{s}$, ความเร็วลมท่อก่อนหน้า $v_E = 6.74 \text{ m/s}$ และ กำหนดความเร็วลมขาเข้าท่อที่พิจารณา ($v_{F,1}$) เพื่อใช้ในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1 เท่ากับ 6.74 m/s จากการใช้โปรแกรม MATLAB 2014a ในการแก้สมการ จะได้ค่าความเร็วขาเข้าท่อ F $v_F = 5.64 \text{ m/s}$, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ F $D_F = 0.178 \text{ m.}$ หรือ ประมาณ 7.0 นิ้ว และ ความดันรวมลด = 6.05 Pa และ ความดันสถิตขาเข้า (P_{s1}) = 24.05 Pa และ ความดันสถิตขาออก (P_{s2}) = 18 Pa

ก.3.2.6. หาความเร็วขาเข้าท่อ G และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G

ใส่ค่าความยาวท่อ G $L_G = 4 \text{ m.}$, อัตราการไหลเชิงปริมาตรท่อ G $Q_G = 0.14 \text{ m}^3/\text{s}$, ความเร็วลมท่อก่อนหน้า $v_E = 6.74 \text{ m/s}$ และ กำหนดความเร็วลมขาเข้าท่อที่พิจารณา

($v_{G,1}$) เพื่อใช้ในกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1 เท่ากับ 6.74 m/s จากการใช้โปรแกรม MATLAB 2014a ในการแก้สมการ จะได้ค่าความเร็วขาเข้าท่อ G $v_G = 5.23$ m/s, เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ G $D_G = 0.184$ m. หรือ 7.3 นิ้ว และ ความดันรวมลด = 8.02 Pa และ ความดันสถิตขาเข้า (P_{s1}) = 26.02 Pa และ ความดันสถิตขาออก (P_{s2}) = 18 Pa

ตารางที่ ก - 6 ผลการออกแบบท่อลมด้วยวิธี Static Regain

ท่อลม	Q (m ³ /s)	v (m/s)	P _{s1} (Pa)	P _{s2} (Pa)	ΔP _T (Pa)	D (m.)	D (in.)
A	0.56	8.64	27.00	18	9.05	0.287	11.3
B	0.14	7.1	25.02	18	7.02	0.158	6.2
C	0.42	7.87	23.64	18	5.64	0.261	10.3
D	0.14	6.34	24.73	18	6.73	0.168	6.6
E	0.28	6.74	25.37	18	7.37	0.230	9.0
F	0.14	5.64	24.05	18	6.05	0.178	7.0
G	0.14	5.23	26.02	18	8.02	0.184	7.3

ภาคผนวก ข

ตารางที่เกี่ยวข้อง

ตารางที่ ข - 1 คุณสมบัติของอากาศที่อุณหภูมิต่างๆ ที่ความดันบรรยากาศ

(F. P. Incropera , D. P. Dewitt , T. L. Bergman , A. S. Lavine . Introduction to Heat Transfer . 5th edition . New York : John Wiley , inc. 2007)

อุณหภูมิ (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg.K)	c_v (kJ/kg.K)	$\mu \cdot 10^{-7}$ (N.s/m ²)	$\nu \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	$k \cdot 10^{-3}$ (W/m.K)	$\alpha \cdot 10^{-6}$ (m ² /s)	Pr
200	1.7458	1.0070	0.7153	132.5	7.590	18.10	10.30	0.737
250	1.3947	1.0060	0.7160	159.6	11.440	22.30	15.90	0.720
300	1.1614	1.0070	0.7177	184.6	15.890	26.30	22.50	0.707
350	0.995	1.0090	0.7212	208.2	20.920	30.00	29.90	0.700
400	0.8711	1.0140	0.7262	230.1	26.410	33.80	38.30	0.690
450	0.774	1.0210	0.7334	250.7	32.390	37.30	47.20	0.686
500	0.6964	1.0300	0.7432	270.1	38.790	40.70	56.70	0.684
550	0.6329	1.0400	0.7526	288.4	45.570	43.90	66.70	0.683
600	0.5804	1.0510	0.7638	305.8	52.690	46.90	76.90	0.685
650	0.5356	1.0630	0.7756	322.5	60.210	49.70	87.30	0.690
700	0.4975	1.0750	0.7876	338.8	68.100	52.40	98.00	0.695
750	0.4643	1.0870	0.7997	354.6	76.370	54.90	109.00	0.702
800	0.4354	1.0990	0.8114	369.8	84.930	57.30	120.00	0.709

ภาคผนวก ค


ชุดคำสั่งของโปรแกรมที่เกี่ยวข้อง

ค.1 โนโมแกรมสำหรับการหาความต้านทานเชิงความร้อนของท่อ (R_D) (รูปที่ ง -1)

<pre> ### Type1-Example.py ### from pynomo.nomographer import * b_params={ 'u_min':0.45, 'u_max':0.90, 'function':lambda u:log10(0.001*u), 'title':r'\$b\thinspace[mm]\$', 'tick_levels':1, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 0.45:'0.45',0.55:'0.55',0.65:',0.70:'0.70', 0.75:',0.80:',0.85:',0.90:'0.90',}} D_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:- log10((0.5*0.0254*u)), 'title':r'\$D\thinspace[m]\$', 'tick_levels':1, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 6:'0.152(6)', 7:', 8:'0.203 (8)', 9:', 10:'0.254 (10)', 11:', 12:'0.305 (12)', 13:', </pre>	<pre> 14:'0.356 (14)',15:', 16:'0.406 (16)',17:', 14:'0.356 (14)',15:', 16:'0.406 (16)',17:', 18:'0.457 (18)',19:', 20:'0.508 (20)',21:', 22:'0.559 (22)',23:', 24:'0.610 (24)', 26:' ',28:' ',30:'0.762(30)', 32:' ',34:' ',36:'0.914(36)', 38:' ',40:' ',42:'1.067(42)', 44:' ',46:' ',48:' ',50:' 0.127 (50)', 52:' ',54:' ',56:' ',58:' ',60:'1.524 (60)', } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:log10(2*3.14*u*16.3), 'title':r'\$Length\thinspace[m]\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } RD_params={ 'u_min':0.000002, 'u_max':0.00015, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'linear smart', </pre>	<pre> 'title':r'\$R_D[K/W]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_3', 'width':29.7, 'height':42, 'reference_titles':['R1'], 'f_params':['D_params,b_params, L_params,RD_params], } main_params={ 'filename':'RD.pdf', 'paper_height':42.0, 'paper_width':29.7, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01), ('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 10.0, } Nomographer(main_params </pre>
--	--	---

ค.2 โนโมแกรมสำหรับการหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวน (R_{ins}) (รูปที่ ง-2)

<pre> ### Type2-Example.py ### from pynomo.nomographer import * t_params={ 'u_min':0.45, 'u_max':0.90, 'function':lambda u:-(2*0.001*u), 'title':r'\$t\thinspace[mm]\$', 'tick_levels':1, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 0.45:'0.45',0.55:'0.55',0.65:', 0.70:'0.70',0.75:',0.80:',0.85:', 0.90:'0.90'},} D_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:-0.0254*u), 'title':r'\$D\$', 'tick_levels':1, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 6:'0.152(6)',8:'0.203 (8)',10:'0.254 (10)', 12:'0.305 (12)',14:'0.356 (14)', 16:'0.406 (16)',18:'0.457 (18)', 20:'0.508 (20)',22:'0.559 (22)', 24:'0.610 (24)',26:' ',28:' ',30:'0.762(30)', 32:' ',34:' ',36:'0.914(36)',38:' ',40:' ', 42:'1.067(42)',44:' ',46:' ',48:' ', 50:' 0.127 (50)',52:' ',54:' ',56:' ',58:' ', 60:'1.524 (60)},} X_params={ 'u_min':0.152, 'u_max':1.533, 'function':lambda u:(u), </pre>	<pre> 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$X_{2}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.0, 'height':15.0, 'f1_params':t_params, 'f2_params':X_params, 'f3_params':D_params, } ### Type2-Example.py ### from pynomo.nomographer import * b_params={ 'u_min':1, 'u_max':3, 'function':lambda u:log10(2*u*0.0254), 'title':r'\$b\thinspace[m\thinspace(in.)]\$', 'title_y_shift':0.3, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 1:'0.0254(1)', 1.5:'0.0381(1.5)', 2:'0.0508 (2)', 2.5:'0.0635 (2.5)', 3:'0.0762 (3)}, } Y_params={ 'u_min':0.03, </pre>	<pre> 'u_max':1, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$Y\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } X_params={ 'u_min':0.152, 'u_max':1.533, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } } X_params={ 'u_min':0.152, 'u_max':1.533, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':5.0, 'height':15.0, 'f1_params':X_params, 'f2_params':b_params, 'f3_params':Y_params, } ### Type1-Example.py ### from pynomo.nomographer import * Y_params={ 'u_min':0.03, 'u_max':1, 'function':lambda u:- log10(log(1+u)), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$Y\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, </pre>
--	---	--

<pre>'tick_side':'right', } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:log10(2*3.14*u*0.04), 'title':r'\$L\thinspace[m]\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } Rins_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':1.20, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{ins}[K/W]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':10.0, 'height':35.0, 'f1_params':Y_params, 'f2_params':L_params, 'f3_params':Rins_params, } main_params={ 'filename':'Rins3rev2.pdf', 'paper_height':15.0, 'paper_width':5.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0,</pre>	<pre>'title_box_width': 5.0, 'title_str':r'\$R_{ins}=\ln(r_o+b/r_i)/(2* pi*L*k)\$\$' } Nomographer(main_params)</pre>	
--	---	---

ค.3 โนโมแกรมสำหรับหา f_{sm} (รูปที่ ง-3)

<pre> ### Type1-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * v1_params={ 'u_min':2.5, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:- log10((1.2*u)/(1.846*(10**-5))), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$v_1\thinspace[m/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } fsm_params={ 'u_min':0.0100, 'u_max':0.0250, 'function':lambda u:log10((exp(((u**(- 0.5))+1.64)/0.79))), 'title':r'\$f_{sm}\$', 'scale_type':'log smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':4, 'tick_side':'left', } D1_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:-log10(0.0254*u), 'title':r'\$D\thinspace[m\thinspace(in.)] \$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 6:0.152(6), 8:0.203 (8), 10:0.254 (10), </pre>	<pre> 12:0.305 (12)', 14:0.356 (14)', 16:0.406 (16)', 18:0.457 (18)', 20:0.508 (20)', 22:0.559 (22)', 24:0.610 (24)', 26:0.660 (26)', 28:0.711 (28)', 30:0.762 (30)', 32:0.813 (32)', 34:0.864 (34)', 36:0.914 (36)', 38:", 40:1.016 (40)', 42:", 44:1.118 (44)', 46:", 48:1.219 (48)', 50:", 52:1.321 (52)', 54:", 56:1.422 (56)', 58:", 60:1.524 (60)'} } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':29.7, 'height':42, 'f1_params':fsm_params, 'f2_params':v1_params, 'f3_params':D1_params, } main_params={ 'filename':'find-fsm(1).pdf', 'paper_height':42.0, 'paper_width':29.7, </pre>	<pre> 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 10.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01) ,'(scale paper',), ('polygon',)], } Nomographer(main_params) </pre>
---	--	---

ค.4.ก โนโมแกรมสำหรับการหาค่า J ในช่วง $J = 60$ ถึง 500 (รูปที่ ง - 5 ก)

<pre> ### Type3-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * friction_params={ 'u_min':0.010, 'u_max':0.060, 'function':lambda u:-log10(u**0.63115)), 'title':r'\$f\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } fsm_params={ 'u_min':0.0100, 'u_max':0.0250, 'function':lambda u:- log10(((u/8)*((1/u)**0.63115))/(1+(12.7*((u /8)**(0.5))*(-0.20638))))), 'title':r'\$f_{sm}\$', 'scale_type':'log smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Re_params={ 'u_min':25000, 'u_max':1200000, 'function':lambda u:-log10((u- 1000)*0.707), 'title':r'\$Re\$', 'scale_type':'log smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } X_params={ </pre>	<pre> 'u_min':60, 'u_max':1600, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$J\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'log smart', } fsm_params={ 'u_min':0.0100, 'u_max':0.0250, 'function':lambda u:log10(((u/8)*((1/u)**0.63115))/(1+(12.7*((u/8)**(0.5))*(- 0.20638))))), 'title':r'\$f_{sm}\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } X_params={ 'u_min':60, 'u_max':500, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$J\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'log smart', } R_params={ 'u_min':10000, 'u_max':70000, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$R4\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, </pre>	<pre> 'scale_type':'log smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':55, 'height':40, 'f1_params':R_params, 'f2_params':X_params, 'f3_params':fsm_params, } main_params={ 'filename':Rhi1rev1scale2(2).p df, 'paper_height':40.0, 'paper_width':55.0, 'block_params':[block_1_para ms], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], 'title_x':10.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 5.0, 'title_str':r", } Nomographer(main_params) </pre>
---	--	---

ค.4.ข โนโมแกรมสำหรับการหาค่า J ในช่วง $J = 500$ ถึง 2500 (รูปที่ ง - 5 ข)

<pre> ### Type3-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * friction_params={ 'u_min':0.010, 'u_max':0.060, 'function':lambda u:-log10(u**0.63115)), 'title':r'\$f\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } fsm_params={ 'u_min':0.0100, 'u_max':0.0250, 'function':lambda u:- log10(((u/8)*((1/u)**0.63115))/(1+(12.7*((u /8)**(0.5))*(-0.20638))))), 'title':r'\$f_{sm}\$', 'scale_type':'log smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Re_params={ 'u_min':25000, 'u_max':1200000, 'function':lambda u:-log10((u- 1000)*0.707), 'title':r'\$Re\$', 'scale_type':'log smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } X_params={ </pre>	<pre> 'u_min':60, 'u_max':1600, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$J\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'log smart', } fsm_params={ 'u_min':0.0100, 'u_max':0.0250, 'function':lambda u:log10(((u/8)*((1/u)**0.63115))/(1+(12.7*((u/8)**(0.5))*(- 0.20638))))), 'title':r'\$f_{sm}\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } X_params={ 'u_min':500, 'u_max':2500, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$J\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'log smart', } R_params={ 'u_min':10000, 'u_max':70000, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$R4\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, </pre>	<pre> 'scale_type':'log smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':55, 'height':40, 'f1_params':R_params, 'f2_params':X_params, 'f3_params':fsm_params, } main_params={ 'filename':Rhi1rev1scale2(2).p df, 'paper_height':40.0, 'paper_width':55.0, 'block_params':[block_1_para ms], 'transformations':[('rotate',0.01),(scale paper',)], 'title_x':10.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 5.0, 'title_str':r", } Nomographer(main_params) </pre>
---	--	--

ค.5.ก โนโมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ ($R_{h,i}$)
ในช่วง $L = 1 \text{ m}$ ถึง 8 m (รูปที่ ง-6ก)

<pre> ### Type6-Isopleths.py ### from pynomo.nomographer import * R4_params={ 'tag':'r4-scale', 'u_min':0.00760, 'u_max':1.524, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'\$R5\$', 'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } D1_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:-log(0.0254*u), 'title':r'\$D\thinspace[m]\thinspace[in.]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'manual line', 'tick_side':'left', 'manual_axis_data': { 6:'0.152(6)', 8:'0.203 (8)', 10:'0.254 (10)', 12:'0.305 (12)', 14:'0.356 (14)', 16:'0.406 (16)', 18:'0.457 (18)', 20:'0.508 (20)', 22:'0.559 (22)', 24:'0.610 (24)', 26:'0.660 (26)', 28:'0.711 (28)', 30:'', </pre>	<pre> 32:'0.813 (32)', 34:', 36:'0.914 (36)', 38:', 40:'1.016 (40)', 42:', 44:'1.118 (44)', 46:', 48:'1.219 (48)', 50:', 52:'1.321 (52)', 54:', 56:'1.422 (56)', 58:', 60:'1.524 (60)'} } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':8, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'L', 'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':10, 'height':25.0, 'f1_params':R4_params, 'f2_params':L_params, 'f3_params':D1_params, } ### Type 6 Ladder Block with Aligned Scales ### </pre>	<pre> R4_Ladder_params={ 'tag':'r4-scale', 'u_min':0.00760, 'u_max':1.524, 'function':lambda u:log(u), 'title':r' ', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } R5_Ladder_params={ 'tag':'r5-scale', 'u_min':0.00760, 'u_max':1.524, 'function':lambda u:log(1+(u**(0.67))), 'title':r' ', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } Ladder_params={ 'block_type':'type_6', 'f1_params':R4_Ladder_params, 'f2_params':R5_Ladder_params, 'width':3.0, 'height':25.0, 'mirror_x':True, } ### Type 2 Block ### R5_params={ 'tag':'r5-scale', 'u_min':0.00760, 'u_max':1.524, 'function':lambda u:- log(1+(u**(0.67))), 'title':r'\$Z\$', </pre>
---	---	--

<pre>'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } Y_params={ 'u_min':60, 'u_max':1600, 'function':lambda u:-log(u), 'title':r'\$Y\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'linear smart', } R6_params={ 'tag':r'6-scale', 'u_min':100, 'u_max':3400, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'\$R6\$', 'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_2_params={ 'block_type':'type_1', 'width':5, 'height':25, 'f1_params':R5_params, 'f2_params':Y_params, 'f3_params':Nu_params, }</pre>	<pre>### Type1-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * Rhi_params={ 'u_min':0.000183, 'u_max':0.124, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$R_{hi}[K/W]\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } R6_params={ 'tag':r'6-scale', 'u_min':100, 'u_max':3400, 'function':lambda u:log10(25.65*(10**-3)*u), 'title':r'\$R6\$', 'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:log10(3.14*u), 'title':r'\$L\thinspace[m]\$', 'scale_type':'linear', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2,</pre>	<pre>'title_y_shift':0.3, } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':55, 'height':40, 'f1_params':Nu_params, 'f2_params':Rhi_params, 'f3_params':L_params, } main_params={ 'filename':Rhi1rev1.jpg', 'paper_height':40.0, 'paper_width':55.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),(' scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 5.0, 'title_str':r'\$R_{hi}\$', } Nomographer(main_params)</pre>
--	---	--

ค.5.ข โนโมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายในท่อ ($R_{h,i}$)
ในช่วง $L = 8 \text{ m}$ ถึง 20 m (รูปที่ ง-6ข)

<pre> ### Type6-Isopleths.py ### from pynomo.nomographer import * R4_params={ 'tag':'r4-scale', 'u_min':0.00760, 'u_max':1.524, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'\$R5\$', 'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } D1_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:-log(0.0254*u), 'title':r'\$D\thinspace[m]\thinspace[in.]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'manual line', 'tick_side':'left', 'manual_axis_data': { 6:'0.152(6)', 8:'0.203 (8)', 10:'0.254 (10)', 12:'0.305 (12)', 14:'0.356 (14)', 16:'0.406 (16)', 18:'0.457 (18)', 20:'0.508 (20)', 22:'0.559 (22)', 24:'0.610 (24)', 26:'0.660 (26)', 28:'0.711 (28)', 30:'', </pre>	<pre> 32:'0.813 (32)', 34:', 36:'0.914 (36)', 38:', 40:'1.016 (40)', 42:', 44:'1.118 (44)', 46:', 48:'1.219 (48)', 50:', 52:'1.321 (52)', 54:', 56:'1.422 (56)', 58:', 60:'1.524 (60)'} } L_params={ 'u_min':8, 'u_max':20, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'L', 'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':10, 'height':25.0, 'f1_params':R4_params, 'f2_params':L_params, 'f3_params':D1_params, } ### Type 6 Ladder Block with Aligned Scales ### </pre>	<pre> R4_Ladder_params={ 'tag':'r4-scale', 'u_min':0.00760, 'u_max':1.524, 'function':lambda u:log(u), 'title':r' ', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } R5_Ladder_params={ 'tag':'r5-scale', 'u_min':0.00760, 'u_max':1.524, 'function':lambda u:log(1+(u**(0.67))), 'title':r' ', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } Ladder_params={ 'block_type':'type_6', 'f1_params':R4_Ladder_params, 'f2_params':R5_Ladder_params, 'width':3.0, 'height':25.0, 'mirror_x':True, } ### Type 2 Block ### R5_params={ 'tag':'r5-scale', 'u_min':0.00760, 'u_max':1.524, 'function':lambda u:- log(1+(u**(0.67))), 'title':r'\$Z\$', </pre>
---	--	--

<pre>'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } Y_params={ 'u_min':60, 'u_max':1600, 'function':lambda u:-log(u), 'title':r'\$Y\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'linear smart', } R6_params={ 'tag':r'6-scale', 'u_min':100, 'u_max':3400, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'\$R6\$', 'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_2_params={ 'block_type':'type_1', 'width':5, 'height':25, 'f1_params':R5_params, 'f2_params':Y_params, 'f3_params':Nu_params, }</pre>	<pre>### Type1-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * Rhi_params={ 'u_min':0.000183, 'u_max':0.124, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$R_{hi}[K/W]\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } R6_params={ 'tag':r'6-scale', 'u_min':100, 'u_max':3400, 'function':lambda u:log10(25.65*(10**-3)*u), 'title':r'\$R6\$', 'title_y_shift':0.3, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } L_params={ 'u_min':8, 'u_max':20, 'function':lambda u:log10(3.14*u), 'title':r'\$L\thinspace[m]\$', 'scale_type':'linear', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2,</pre>	<pre>'title_y_shift':0.3, } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':55, 'height':40, 'f1_params':Nu_params, 'f2_params':Rhi_params, 'f3_params':L_params, } main_params={ 'filename':'Rhi1rev1.jpg', 'paper_height':40.0, 'paper_width':55.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),(' scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 5.0, 'title_str':r'\$R_{hi}\$', } Nomographer(main_params)</pre>
--	---	---

ค.6 ก โนโมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.0002 ถึง 0.001 K/W
(รูปที่ ง - 7 ก)

<pre> #### Type3-Example1.py #### from pynomo.nomographer import * Rins_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':1.20, 'function':lambda u:(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{ins}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Rhi_params={ 'u_min':0.0002, 'u_max':0.001, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$R_{hi}[K/W]\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } R7_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':1.324, 'function':lambda u:(-u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } </pre>	<pre> Rho_params={ 'u_min':0.004, 'u_max':0.6, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$\rho[K/W]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'log smart', } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:- log10(0.08635*u), 'title':r'\$L\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', } R_params={ 'u_min':0.0035, 'u_max':21, 'function':lambda u:- 2*log10(0.6+(6.89*(u**0.17))), 'title':r'\$R_{11}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'log smart', } RD_params={ 'u_min':0.02, 'u_max':1.5, 'function':lambda u:(-u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_D[K/W]\$', 'tick_levels':3, </pre>	<pre> 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', }X_params={ 'u_min':0.03, 'u_max':2.5, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$X\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', }Rtot_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':2.2, 'function':lambda u:(-u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', }block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':40,'height':55, 'f1_params':X_params, 'f2_params':RD_params, 'f3_params':Rtot_params, }main_params={ 'filename':'Rtotstep3.pdf', 'paper_height':25,'paper_width':7, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper'),('polygon',)], 'title_x':5.0,'title_y':-1.0, 'title_box_width': 4.0, 'title_str':r'\$R_D=\ln(D_o/D_i)/(2*\pi*L*k)\$' Nomographer(main_params) </pre>
--	---	---

ค.6 ข โนโมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.001 ถึง 0.01 K/W
(รูปที่ ง - 7 ข)

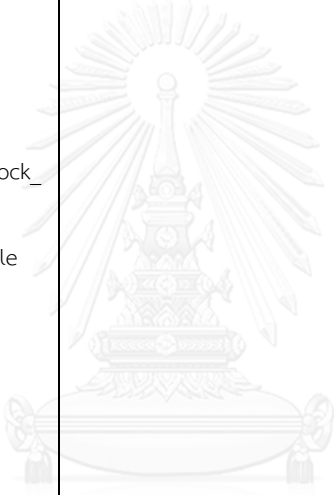
<pre> ### Type3-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * Rins_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':1.20, 'function':lambda u:(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{ins}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Rhi_params={ 'u_min':0.001, 'u_max':0.01, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$R_{hi}[K/W]\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } R7_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':1.324, 'function':lambda u:(-u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } </pre>	<pre> Rho_params={ 'u_min':0.004, 'u_max':0.6, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$\rho[K/W]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'log smart', } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:- log10(0.08635*u), 'title':r'\$L\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', } R_params={ 'u_min':0.0035, 'u_max':21, 'function':lambda u:- 2*log10(0.6+(6.89*(u**0.17))), 'title':r'\$R_{11}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'log smart', } RD_params={ 'u_min':0.02, 'u_max':1.5, 'function':lambda u:(-u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_D[K/W]\$', 'tick_levels':3, </pre>	<pre> 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', }X_params={ 'u_min':0.03, 'u_max':2.5, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$X\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', }Rtot_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':2.2, 'function':lambda u:(-u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', }block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':40,'height':55, 'f1_params':X_params, 'f2_params':RD_params, 'f3_params':Rtot_params, }main_params={ 'filename':'Rtotstep3.pdf', 'paper_height':25,'paper_width':7, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper'),('polygon',)], 'title_x':5.0,'title_y':-1.0, 'title_box_width': 4.0, 'title_str':r'\$R_D=\ln(D_o/D_i)/(2*\pi*L*k)\$' Nomographer(main_params) </pre>
--	---	---

ค.6 ค โนโมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.01 ถึง 0.12 K/W
(รูปที่ ง - 7 ค)

<pre> #### Type3-Example1.py #### from pynomo.nomographer import * Rins_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':1.20, 'function':lambda u:(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{ins}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Rhi_params={ 'u_min':0.01, 'u_max':0.121, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$R_{hi}[K/W]\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } R7_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':1.324, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } </pre>	<pre> Rho_params={ 'u_min':0.004, 'u_max':0.6, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$\rho[K/W]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'log smart', } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:- log10(0.08635*u), 'title':r'\$L\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', } R_params={ 'u_min':0.0035, 'u_max':21, 'function':lambda u:- 2*log10(0.6+(6.89*(u**0.17))), 'title':r'\$R_{11}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'log smart', } RD_params={ 'u_min':0.02, 'u_max':1.5, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_D[K/W]\$', 'tick_levels':3, </pre>	<pre> 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', }X_params={ 'u_min':0.03, 'u_max':2.5, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$X\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', }Rtot_params={ 'u_min':0.018, 'u_max':2.2, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', }block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':40,'height':55, 'f1_params':X_params, 'f2_params':RD_params, 'f3_params':Rtot_params, }main_params={ 'filename':'Rtotstep3.pdf', 'paper_height':25,'paper_width':7, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper'),('polygon',)], 'title_x':5.0,'title_y':-1.0, 'title_box_width': 4.0, 'title_str':r'\$R_D=\ln(D_o/D_i)/(2*\pi*L*k)\$' Nomographer(main_params) </pre>
--	---	---

ค.7.ก โนโมแกรมสำหรับหาอุณหภูมิภายนอกของฉนวน (T_{ins}) สำหรับ R_{ins} ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.8 K/W (รูปที่ ง - 8 ก)

<pre> D_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:-(0.0254*u*10), 'title':r'\$D[m]\$', 'tick_levels':8, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } T_params={ 'tag':'Tem', 'u_min':285.0, 'u_max':300.0, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$T_1[K]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$L[m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear', } R_params={ 'u_min':0.02, 'u_max':0.8, 'function':lambda u:-(u*3), 'title':r'\$R\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, </pre>	<pre> 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } Tins_params={ 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:-(u), 'title':r'\$T_{ins}\$\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_3', 'width':15.0, 'height':40.0, 'reference_titles':['X','Y'], 'f_params':[D_params,R_params, L_params,T_params,Tins_param s], } ### TYPE 8 SINGLE-SCALE BLOCK ### T_params={ 'tag':'Tem', 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:(u), 'scale_type':'linear smart', 'align_func':lambda u:((u)- 180.95)/0.3928, 'title':r'\small \$\$', 'title_x_shift':0.4, 'tick_side':'left', 'text_format':r"\$%3.0f\$", 'tick_levels':3, </pre>	<pre> 'tick_text_levels':2, } block_2_params={ 'block_type':'type_8', 'f_params':T_params, } 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } Tins_params={ 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:-(u), 'title':r'\$T_{ins}\$\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_3', 'width':15.0, 'height':40.0, 'reference_titles':['X','Y'], 'f_params':[D_params,R_params, L_params,T_params,Tins_params], } ### TYPE 8 SINGLE-SCALE BLOCK ### T_params={ 'tag':'Tem', 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:(u), 'scale_type':'linear smart', 'align_func':lambda u:((u)- 180.95)/0.3928, </pre>
--	--	--

<pre> 'title':r'\small \$\$', 'title_x_shift':0.4, 'tick_side':'left', 'text_format':r"\$%3.0f\$", 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } block_2_params={ 'block_type':'type_8', 'f_params':T_params, } main_params={ 'filename':'TinsArev2scaleA.pdf', 'paper_height':40.0, 'paper_width':15.0, 'block_params':[block_1_params,block_ 2_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], 'title_x':10.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 10.0, 'title_str':r'Resolution = (N \$\times\$ Range) \ / (Focal Length \$\times\$ Target Size)', } Nomographer(main_params) </pre>	 <p>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY</p>	
--	--	--

ค.7.ข โนโมแกรมสำหรับหาอุณหภูมิภายนอกของฉนวน (T_{ins}) สำหรับ R_{ins} ในช่วง 0.8 K/W ถึง 2.5 K/W (รูปที่ ง - 8 ข)

<pre> D_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:-(0.0254*u*10), 'title':r'\$D[m]\$', 'tick_levels':8, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } T_params={ 'tag':'Tem', 'u_min':285.0, 'u_max':300.0, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$T_1[K]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$L[m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear', } R_params={ 'u_min':0.8, 'u_max':2.5, 'function':lambda u:-(u*3), 'title':r'\$R\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, </pre>	<pre> 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } Tins_params={ 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:-(u), 'title':r'\$T_{ins}\$\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_3', 'width':15.0, 'height':40.0, 'reference_titles':['X','Y'], 'f_params':[D_params,R_params, L_params,T_params,Tins_param s], } ### TYPE 8 SINGLE-SCALE BLOCK ### T_params={ 'tag':'Tem', 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:(u), 'scale_type':'linear smart', 'align_func':lambda u:((u)- 180.95)/0.3928, 'title':r'\small \$\$', 'title_x_shift':0.4, 'tick_side':'left', 'text_format':r"\$%3.0f\$", 'tick_levels':3, </pre>	<pre> 'tick_text_levels':2, } block_2_params={ 'block_type':'type_8', 'f_params':T_params, } 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } Tins_params={ 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:-(u), 'title':r'\$T_{ins}\$\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_3', 'width':15.0, 'height':40.0, 'reference_titles':['X','Y'], 'f_params':[D_params,R_params, L_params,T_params,Tins_params], } ### TYPE 8 SINGLE-SCALE BLOCK ### T_params={ 'tag':'Tem', 'u_min':292.8, 'u_max':296.83, 'function':lambda u:(u), 'scale_type':'linear smart', 'align_func':lambda u:((u)- 180.95)/0.3928, </pre>
---	--	---

<pre> 'title':r'\small \$\$', 'title_x_shift':0.4, 'tick_side':'left', 'text_format':r"\$%3.0f\$", 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } block_2_params={ 'block_type':'type_8', 'f_params':T_params, } main_params={ 'filename':'TinsArev2scaleA.pdf', 'paper_height':40.0, 'paper_width':15.0, 'block_params':[block_1_params,block_ 2_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], 'title_x':10.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 10.0, 'title_str':r'Resolution = (N \$\times\$ Range) \ / (Focal Length \$\times\$ Target Size)', } Nomographer(main_params) </pre>	 <p>จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY</p>	
---	--	--

ค.8 โนโมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ ($R_{h,o}$)
(รูปที่ ง-9)

<pre> ### Type3-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * Rtot_params={ 'u_min':1, 'u_max':22, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$R_{tot}\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':6, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Q1_params={ 'u_min':0.0472, 'u_max':20, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$Q_1\text{thinspace}[m^3/s]\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } Tav_params={ 'u_min':288, 'u_max':293, 'function':lambda u:log10(298-u), 'title':r'\$T_{1}\$', 'scale_type':'linear', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } R5_params={ 'u_min':0.02, 'u_max':500, 'function':lambda u:-log10(u), </pre>	<pre> 'title':r'\$\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'log smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_3', 'width':10.0, 'height':10.0, 'reference_titles':['Ref. 3'], 'f_params':[Rtot_params,Q1_params, R5_params,Tav_params], } main_params={ 'filename':'findR5rev1(1).pdf', 'paper_height':15.0, 'paper_width':20.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], 'title_x':10.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 20.0, 'title_str:r"', } Nomographer(main_params) </pre>	
--	--	--

ค.9 โนโมแกรม R_{13} สำหรับหาค่าอ้างอิง $Term_{D1}$ (รูปที่ ง-10)

<pre> ### Type2-Example.py ### from pynomo.nomographer import * X_params={ 'u_min':0.010, 'u_max':1.1, 'function':lambda u:-log(u), 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', } f_params={ 'u_min':0.010, 'u_max':0.06, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'\$f\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } L_params={ 'u_min':1.0, 'u_max':20.0, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'\$L[m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } D_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:log(0.0254*u), 'title':r'\$D[m(in)]\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':1, </pre>	<pre> 'tick_side':'left', 'scale_type':'linear smart', } D_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:log(0.0254*u), 'title':r'\$D[m(in)]\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', 'scale_type':'linear smart', } Y_params={ 'u_min':0.00656, 'u_max':7.5, 'function':lambda u:log(u), 'title':r'\$Y\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':10, 'height':20.0, 'f1_params':X_params, 'f2_params':Y_params, 'f3_params':D_params, } main_params={ 'filename':'Yrev2scale.pdf', 'paper_height':20.0, 'paper_width':10.0, 'block_params':[block_1_params], </pre>	<pre> 'transformations':[(('rotate',0.01),('scal e paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 5.0, 'title_str':r'\$S(S+0.64)^(0.58)(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>
---	---	---

ค.10 ก โนโมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 0.01 ถึง 0.1 (รูปที่ ง - 11ก)

<pre> ### Type2-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * R13_params={ 'u_min':0.01, 'u_max':0.1, 'function':lambda u:-(0.0024-(0.5*u)), 'title':r'\$R_{13}\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } v_params={ 'u_min':2.4, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:1/(u*u), 'title':r'\$v_{1}[m/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } Term1_params={ 'u_min':-5.5, 'u_max':1, 'function':lambda u:-u, 'title':r'\$Term_{v1}\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_2', 'width':20.0, 'height':25.0, 'f1_params':R13_params, 'f2_params':v_params, 'f3_params':Term1_params, </pre>	<pre> } main_params={ 'filename':'Term1rev6A.pdf', 'paper_height':25.0, 'paper_width':20.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 2.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>	
---	---	--

ค.10 ข โนโมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 0.1 ถึง 1.0 (รูปที่ ง - 11ข)

<pre> ### Type2-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * R13_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':1, 'function':lambda u:-(0.0024-(0.5*u)), 'title':r'\$R_{13}\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } v_params={ 'u_min':2.4, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:1/(u*u), 'title':r'\$v_{1}[m/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } Term1_params={ 'u_min':-55, 'u_max':1, 'function':lambda u:-u, 'title':r'\$Term_{v1}\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_2', 'width':20.0, 'height':25.0, 'f1_params':R13_params, 'f2_params':v_params, 'f3_params':Term1_params, </pre>	<pre> } main_params={ 'filename':'Term1rev6B.pdf', 'paper_height':25.0, 'paper_width':20.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 2.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>	
---	---	--

ค.10 ค โนโมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 1 ถึง 7.5 (รูปที่ ง - 11ค)

<pre> ### Type2-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * R13_params={ 'u_min':1, 'u_max':7.5, 'function':lambda u:-(0.0024-(0.5*u)), 'title':r'\$R_{13}\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } v_params={ 'u_min':2.4, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:1/(u*u), 'title':r'\$v_{1}[m/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'left', } Term1_params={ 'u_min':-300, 'u_max':1, 'function':lambda u:-u, 'title':r'\$Term_{v1}\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_2', 'width':20.0, 'height':25.0, 'f1_params':R13_params, 'f2_params':v_params, 'f3_params':Term1_params, </pre>	<pre> } main_params={ 'filename':'Term1rev6C.pdf', 'paper_height':25.0, 'paper_width':20.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 2.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>	
--	---	--

ค.11 ก โนโมแกรมสำหรับหา R_{16} สำหรับ $Q_{1,B}$ ในช่วง 0.1 m^3 ถึง 5 m^3 (รูปที่ ง-12 ก)

<pre> from pynomo.nomographer import * QB_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':5, 'function':lambda u:log10(0.6*4*(u**(- 0.67))), 'title':r'\$Q_{1B}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } T_params={ 'u_min':2, 'u_max':12, 'function':lambda u:2.67*log10((u**0.5)*0.579), 'title':r'\$T_{50}[m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } X2_params={ 'u_min':0.5, 'u_max':70, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', } Y2_params={ 'u_min':0.19, 'u_max':140, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$Y\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } </pre>	<pre> 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } LB_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$L_{B}[m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } X2_params={ 'u_min':0.19, 'u_max':71, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', } Y2_params={ 'u_min':0.19, 'u_max':140, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$Y\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } LB_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$L_{B}[m]\$', 'tick_levels':3, </pre>	<pre> 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } Term2_params={ 'u_min':0.19, 'u_max':71, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$Term2\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':10.0, 'height':30.0, 'f1_params':Y2_params, 'f2_params':LB_params, 'f3_params':Term2_params, } main_params={ 'filename':'TermXA.pdf', 'paper_height':30.0, 'paper_width':10.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 5.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>
---	---	--

ค.11 ข โนโมแกรมสำหรับหา R_{16} สำหรับ $Q_{1,B}$ ในช่วง ในช่วง $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ถึง $20 \text{ m}^3/\text{s}$
(รูปที่ ง-12 ข)

<pre> ### Type1-Example1.py ### from pynomo.nomographer import * QB_params={ 'u_min':5, 'u_max':20, 'function':lambda u:log10(0.6*4*(u**(- 0.67))), 'title':r'\$Q_{1B}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } T_params={ 'u_min':2, 'u_max':12, 'function':lambda u:2.67*log10((u**0.5)*0.579), 'title':r'\$T_{50}[m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } X2_params={ 'u_min':0.2, 'u_max':5, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', } Y2_params={ 'u_min':0.19, 'u_max':100, 'function':lambda u:log10(u), </pre>	<pre> 'title':r'\$Y\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } LB_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$L_{B}[m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } X2_params={ 'u_min':0.2, 'u_max':5, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', } Y2_params={ 'u_min':0.2, 'u_max':100, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$Y\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } LB_params={ 'u_min':1, </pre>	<pre> 'u_max':20, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$L_{B}[m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', }Term2_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':85, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$R_{16B}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', }block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':10.0, 'height':30.0, 'f1_params':Y2_params, 'f2_params':LB_params, 'f3_params':Term2_params, }main_params={ 'filename':R16B.pdf, 'paper_height':30.0, 'paper_width':10.0, 'block_params':[block_1_params, 'transformations':[('rotate',0.01),('sc ale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 5.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>
--	--	---

ค.12 ก โนโมแกรมสำหรับหา $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 0.1 ถึง 1 (รูปที่ ง-13 ก)

<pre> from pynomo.nomographer import * Rtot_params={ 'u_min':0.02, 'u_max':3.0, 'function':lambda u:8*u, 'title':r'\$R_{tot}[K/W]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } Term3_params={ 'u_min':-20, 'u_max':25, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', }Term2_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':1, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term2\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', 'tick_side':'left', }T1_params={ 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:-u, 'title':r'\$T_{1}[K]\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, </pre>	<pre> 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Term3_params={ 'u_min':-1, 'u_max':25, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', } Term4_params={ 'u_min':255, 'u_max':310, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$Term_{x}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', }block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':10.0, 'height':30.0, 'f1_params':Term3_params, 'f2_params':T1_params, 'f3_params':Term4_params, } main_params={ 'filename':'TermXstep2.pdf', 'paper_height':30.0, 'paper_width':10.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], ('polygon',)], 'title_x':5.0, </pre>	<pre> 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 3.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>
--	---	---

ค.12 ข โนโมแกรมสำหรับหา $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 1 ถึง 20 (รูปที่ ง-13 ข)

<pre> from pynomo.nomographer import * Rtot_params={ 'u_min':0.02, 'u_max':3.0, 'function':lambda u:8*u, 'title':r'\$R_{tot}[K/W]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', }Term3_params={ 'u_min':-20, 'u_max':25, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', }Term2_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term2\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', 'tick_side':'left', } T1_params={'u_min':285, 'u_max':300,'function':lambda u:-u, 'title':r'\$T_{1}[K]\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left',} Term3_params={ 'u_min':-20, 'u_max':25, </pre>	<pre> 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', } Term4_params={ 'u_min':275, 'u_max':310, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$Term_{x}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', }block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':40.0, 'height':55.0, 'f1_params':Term3_params, 'f2_params':T1_params, 'f3_params':Term4_params,} main_params={ 'filename':'TermXBstep2(2).pdf', 'paper_height':50.0, 'paper_width':10.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 3.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$'} Nomographer(main_params) </pre>	
--	--	--

ค.12 ค โนโมแกรมสำหรับหา $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 20 ถึง 85 (รูปที่ ง-13 ค)

<pre> from pynomo.nomographer import * Rtot_params={ 'u_min':0.02, 'u_max':3.0, 'function':lambda u:8*u, 'title':r'\$R_{tot}[K/W]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } Term3_params={ 'u_min':-75, 'u_max':15, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', } Term2_params={ 'u_min':20, 'u_max':85, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term2\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'log smart', 'tick_side':'left', } T1_params={ 'u_min':285, 'u_max':300, 'function':lambda u:-u, 'title':r'\$T_{1}[K]\$', </pre>	<pre> 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Term3_params={ 'u_min':-75, 'u_max':15, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', } Term4_params={ 'u_min':210, 'u_max':310, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$Term_{x}\$\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':40.0, 'height':55.0, 'f1_params':Term3_params, 'f2_params':T1_params, 'f3_params':Term4_params, } main_params={ 'filename':'TermXCstep2(50).pdf', 'paper_height':80.0, 'paper_width':10.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),(</pre>	<pre> 'scale paper'), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 3.0, 'title_str:r'\$' } Nomographer(main_params) </pre>
--	---	--

ค.13 โนโมแกรมสำหรับหา $P_{S1,A}$ (รูปที่ ง-14)

<pre> from pynomo.nomographer import * Ps1A_params={ 'u_min':10.0, 'u_max':380.0, 'u_min_trafo':-10.0, 'u_max_trafo':10.0, 'f':lambda u:u, 'g':lambda u:1, 'h':lambda u:0, 'title':r'\$P_{s1A}\$', 'scale_type':'linea smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', 'grid':False } Termv1_params={ 'u_min'0, 'u_max':-300, 'f':lambda u:u, 'g':lambda u:1, 'h':lambda u:1, 'title':r'\$Term_{v1}\$', 'title_x_shift':-1.0, 'title_y_shift':1.5, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':5, 'grid':False } Termx_params={ 'u_min':210.0, 'u_max':310.0, 'u_min_trafo':-10.0, 'u_max_trafo':10.0, 'f':lambda u:u, 'g':lambda u:0, 'h':lambda u:1, </pre>	<pre> 'title':r'\$MS\$', 'scale_type':'linear', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'grid':False } block_params={ 'block_type':'type_9', 'f1_params':Ps1A_params, 'f2_params':Termv1_params, 'f3_params':Termx_params, 'transform_ini':True, } main_params={ 'filename':Ps1A.pdf, 'paper_height':40.0, 'paper_width':55.0, 'block_params':[block_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], 'title_y':2.5, 'title_str':r'\$M = (T - N) / T^2\$', 'isopleth_params':[{'color':'black', 'linewidth':'thick', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, 'transparency':0.0, },], } Nomographer(main_params </pre>	
--	---	--

ค.14.ข. โนโมแกรมสำหรับหาค่า $P_{S2,A}$ สำหรับ R_{tot} ในช่วง 0.4 K/W ถึง 1.2 K/W

(รูป ง - 15 ข)

<pre> ### Type9-Range1.py ### from pynomo.nomographer import * QA_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':20, QL= 22*(((0.5*(Ps1A+Ps2A))- Pam)/250)**n)*(pi*DiA*LA)*5.077*10** -5, 'f':lambda u-(QL/Q1A)), } Ps2_params={ 'u_min':1, 'u_max':350, 'u_min_trafo':1, 'u_max_trafo':350, 'f':lambda u-(QL/Q1A)), 'g':lambda u:1, 'h':lambda u:0, 'title':r'\$N\$', 'scale_type':'linear', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', 'grid':False } Termv1_params={ 'u_min':-300.0, 'u_max':0.0, 'f':lambda u:u, 'g':lambda u:1, 'h':lambda u:-1, 'title':r'\$Term_{v1}\$', 'title_x_shift':-1.0, 'title_y_shift':1.5, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':5, 'grid':False </pre>	<pre> } Rtot_params={ 'u_min':0.4, 'u_max':12, Ps1A 'u_min':10.0, 'u_max':380.0, 'f':lambda u:1-Ps1A, 'g':lambda u:0, 'h':lambda u:1, 'title':r'\$M\$', 'scale_type':'linear', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'grid':False } block_params={ 'block_type':'type_9', 'f1_params':QA_params, 'f2_params':T_params, 'f3_params':M_params, 'transform_ini':True, 'isopleth_values':[[-4.5,'x',5.0]], } main_params={ 'filename':'Ps2A.pdf', 'paper_height':40.0, 'paper_width':55.0, 'block_params':[block_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('sc ale paper',)], 'title_y':2.5, 'title_str':r'\$\$', 'isopleth_params':[{'color':'black', 'linewidth':'thick', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, </pre>	<pre> 'transparency':0.0, },], } Nomographer(main_params) </pre>
--	---	---

ค.14.ค. โนโมแกรมสำหรับหาค่า $P_{S2,A}$ สำหรับ R_{tot} ในช่วง 1.2 K/W ถึง 3 K/W

(รูป ง - 15 ค)


<pre> ### Type9-Range1.py ### from pynomo.nomographer import * QA_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':20, QL= 22*(((0.5*(Ps1A+Ps2A))- Pam)/250)**n)*(pi*DiA*LA)*5.077*10** -5, 'f':lambda u:(QL/Q1A)), } Ps2_params={ 'u_min':1, 'u_max':350, 'u_min_trafo':1, 'u_max_trafo':350, 'f':lambda u:(QL/Q1A)), 'g':lambda u:1, 'h':lambda u:0, 'title':r'\$N\$', 'scale_type':'linear', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', 'grid':False } Termv1_params={ 'u_min':-300.0, 'u_max':0.0, 'f':lambda u:u, 'g':lambda u:1, 'h':lambda u:-1, 'title':r'\$Term_{v1}\$', 'title_x_shift':-1.0, 'title_y_shift':1.5, 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':5, 'grid':False </pre>	<pre> } Rtot_params={ 'u_min':12, 'u_max':3, Ps1A 'u_min':10.0, 'u_max':380.0, 'f':lambda u:1-Ps1A, 'g':lambda u:0, 'h':lambda u:1, 'title':r'\$M\$', 'scale_type':'linear', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'grid':False } block_params={ 'block_type':'type_9', 'f1_params':QA_params, 'f2_params':T_params, 'f3_params':M_params, 'transform_ini':True, 'isopleth_values':[[-4.5,'x',5.0]], } main_params={ 'filename':'Ps2A.pdf', 'paper_height':40.0, 'paper_width':55.0, 'block_params':[block_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('sc ale paper',)], 'title_y':2.5, 'title_str':r'\$\$', 'isopleth_params':[{'color':'black', 'linewidth':'thick', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, </pre>	<pre> 'transparency':0.0, }], } Nomographer(main_params) </pre>
--	---	---

ค.15 โนโมแกรมสำหรับหา $v_{1,B}$ (รูปที่ ง -16)

<pre> #### Type1-Example1.py #### from pynomo.nomographer import * T_params={ 'u_min':-40, 'u_max':-1, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term8\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'log smart', 'tick_side':'left', } Ps1A_params={ 'u_min':10, 'u_max':380, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$P_{s1A}[Pa]\$', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } Ps2A_params={ 'u_min':1, 'u_max':350, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$P_{s2A}[Pa]\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } T_params={ 'u_min':-40, 'u_max':-1, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Term8\$', 'tick_levels':3, </pre>	<pre> 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'log smart', 'tick_side':'left', } v2A_params={ 'u_min':2.4, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:(-0.6*0.66*(u**2)), 'title':r'\$v_{2A}[m/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } v1B_params={ 'u_min':1, 'u_max':6.5, 'function':lambda u:1.2*(u**2), 'title':r'\$v_{1B}[m/s]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':40.0, 'height':55.0, 'f1_params':T_params, 'f2_params':v2A_params, 'f3_params':v1B_params, } main_params={ 'filename':'v1BArev4step2.pdf', 'paper_height':55.0, 'paper_width':40.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale </pre>	<pre> paper'), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 3.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^(0.58)(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>
--	---	--

ค.16 ก โนโมแกรมสำหรับการหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร Q_L สำหรับ $P_{s1,A}$ ในช่วง 10 Pa ถึง 150 Pa (รูปที่ ง - 17 ก)

from pynomo.nomographer import *	'scale_type':'linear smart',	9:",
Ps1A_params={	'tick_side':'left',	10:'0.254 (10)',
'u_min':10,	}	11:",
'u_max':150,	Y_params={	12:'0.305 (12)',
'function':lambda u:(u,	'u_min':1,	13:",
'title':r'\$P_{s1}[Pa]\$',	'u_max':350,	14:'0.356 (14)',
'tick_levels':3,	'function':lambda u:(-u,	15:",
'tick_text_levels':2,	'title':r'\$Y\$',	16:'0.406 (16)',
'scale_type':'linear smart',	'scale_type':'linear smart',	17:",
'tick_side':'right',	'tick_levels':4,	18:'0.457 (18)',
}	'tick_text_levels':3,	19:",
Ps2A_params={	'tick_side':'right',	20:'0.508 (20)',
'u_min':1,	}	21:",
'u_max':350,	X_params={	22:'0.559 (22)',
'function':lambda u:u,	'u_min':10,	24:'0.610 (24)',
'title':r'\$P_{s2}[Pa]\$',	'u_max':500,	26:'0.660 (26)',
'scale_type':'linear smart',	'function':lambda u:-	28:'0.711 (28)',
'tick_levels':6,	(22*((u/500)**0.65)),	30:'0.762 (30)',
'tick_text_levels':3,	'scale_type':'log smart',	32:'0.813 (32)',
'tick_side':'left',	'title':r'\$X\$',	34:",
}X_params={	'tick_levels':4,	36:'0.914 (36)',
'u_min':10,	'tick_text_levels':2,	38:",
'u_max':500,	'tick_side':'left',	40:'1.016 (40)',
'function':lambda u:-u,	}D_params={	42:",
'scale_type':'log smart',	'u_min':6,	44:'1.118 (44)',
'title':r'\$R22\$',	'u_max':60,	46:",
'tick_levels':4,	'function':lambda	48:'1.219 (48)',
'tick_text_levels':2,	u:log(3.14*(0.0254*u)*0.00005077),	50:",
'tick_side':'right',	'title':r'\$D\thinspace[m]\thinspace[in.]\$',	52:",
}L_params={	'tick_levels':3,	54:'1.3716(54)',
'u_min':1,	'tick_text_levels':1,	56:",
'u_max':20,	'scale_type':'manual line',	58:",
'function':lambda u:1/(u),	'tick_side':'left',	60:'1.524 (60)',
'title':r'\$L\$',	'manual_axis_data': {	}
'tick_levels':3,	6:'0.152(6)',	Y_params={
'tick_text_levels':2,	7:",	'u_min':1,
'function':lambda u:log(u),	8:'0.203 (8)',	'u_max':350,

<pre> 'title':r'\$Y\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Q_params={ 'u_min':0.0001, 'u_max':0.04, 'function':lambda u:-log(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Q_{L}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':7.0, 'height':35.0, 'f1_params':Y_params, 'f2_params':Q_params, 'f3_params':D_params, } main_params={ 'filename':'QLstep3scaleA.pdf', 'paper_height':35.0, 'paper_width':7.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 6.0, 'title_str':r'\$S+0.64^{\{0.58\}}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>		
---	---	--

ค.16 ข โนโมแกรมสำหรับการหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร Q_L สำหรับ $P_{s1,A}$ ในช่วง 150 Pa ถึง 380 Pa (รูปที่ ง - 17 ข)

<pre> from pynomo.nomographer import * Ps1A_params={ 'u_min':150, 'u_max':380, 'function':lambda u:(u), 'title':r'\$P_{s1}[Pa]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'right', } Ps2A_params={ 'u_min':1, 'u_max':350, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$P_{s2}[Pa]\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':6, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'left',} X_params={ 'u_min':150, 'u_max':700, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$R22\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right',} block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':7.0, 'height':35.0, 'f1_params':Ps1A_params, 'f2_params':Ps2A_params, 'f3_params':X_params,} </pre>	<pre> L_params={ 'u_min':1, 'u_max':20, 'function':lambda u:1/(u), 'title':r'\$L\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } Y_params={ 'u_min':1, 'u_max':350, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Y\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } X_params={ 'u_min':150, 'u_max':700, 'function':lambda u:- (22*((u/500)**0.65)), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$X\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } block_2_params={ 'block_type':'type_2', 'width':10.0, 'height':35.0, 'f1_params':X_params, 'f2_params':L_params, </pre>	<pre> 'f3_params':Y_params, } main_params={ 'filename':'QLstep2rev2B.pdf', 'paper_height':35.0, 'paper_width':10.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 6.0, 'title_str':r'\$ \$' } Nomographer(main_params) </pre>
--	--	---

ค.17 ก โนโมแกรมสำหรับการหา y สำหรับ Q_L/Q_1 ในช่วง 5×10^{-5} ถึง 0.01 (รูปที่ ง - 18 ก.)

<pre> from pynomo.nomographer import * D1_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:log10(((0.0254*u)**2)/4), 'title':r'\$D\thinspace[m\thinspace(in.)]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 6:'0.152(6)', 7:", 8:'0.203 (8)', 9:", 10:'0.254 (10)', 11:", 12:'0.305 (12)', 13:", 14:'0.356 (14)', 15:", 16:'0.406 (16)', 17:", 18:'0.457 (18)', 19:", 20:'0.508 (20)', 21:", 22:'0.559 (22)', 23:", 24:'0.610 (24)', 25:", 26:'0.660 (26)', 28:'0.711 (28)', 30:'0.762 (30)', 32:'0.813 (32)', 34:", 36:'0.914 (36)', 38:", </pre>	<pre> 40:'1.016 (40)', 42:", 44:", 46:", 48:", 50:'1.270(50)', 52:", 54:", 56:", 58:", 60:'1.524 (60)'} } v1_params={ 'u_min':2.5, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:log10(1006*u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$v_1[m/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } Z_params={ 'u_min':15, 'u_max':5900, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':D1_params, 'f2_params':v1_params, 'f3_params':Z_params, </pre>	<pre> Z2_params={ 'u_min':0.00015, 'u_max':2360, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z2\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } } Q_params={ 'u_min':0.00005, 'u_max':0.01, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Q_{L}/Q_{1}\$\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'left', } } Z_params={ 'u_min':15, 'u_max':5900, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } } block_2_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':Z_params, 'f2_params':Q_params, 'f3_params':Z2_params, } } </pre>
---	--	---

<pre> Z2_params={ 'u_min':0.00015, 'u_max':2360, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z2\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } Rtot_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':3, 'function':lambda u:log10(2*1.2*3.14*u), 'title':r'\$R_{tot}\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':6, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Z3_params={ 'u_min':0.0001, 'u_max':53000, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_3_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':Z2_params, 'f2_params':Rtot_params, 'f3_params':Z3_params, } </pre>	<pre> } Q_params={ 'u_min':0.00005, 'u_max':0.4, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Q_{L}/Q_{1}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } y_params={ 'u_min':100, 'u_max':10000, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$y\$', 'scale_type':'log smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Z3_params={ 'u_min':0.0001, 'u_max':53000, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':Z3_params, 'f2_params':Q_params, 'f3_params':y_params, } main_params={ 'filename':'ystep4rev1.pdf', </pre>	<pre> 'paper_height':25.0, 'paper_width':8.3, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 6.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>
--	--	---

ค.17 ข โนโมแกรมสำหรับการหา y สำหรับ Q_L/Q_1 ในช่วง 0.01 ถึง 0.4 (รูปที่ ง - 18 ข.)

<pre> from pynomo.nomographer import * D1_params={ 'u_min':6, 'u_max':60, 'function':lambda u:log10(((0.0254*u)**2)/4), 'title':r'\$D\thinspace[m\thinspace(in.)]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 6:'0.152(6)', 7:", 8:'0.203 (8)', 9:", 10:'0.254 (10)', 11:", 12:'0.305 (12)', 13:", 14:'0.356 (14)', 15:", 16:'0.406 (16)', 17:", 18:'0.457 (18)', 19:", 20:'0.508 (20)', 21:", 22:'0.559 (22)', 23:", 24:'0.610 (24)', 25:", 26:'0.660 (26)', 28:'0.711 (28)', 30:'0.762 (30)', 32:'0.813 (32)', 34:", 36:'0.914 (36)', 38:", Z2_params={ 'u_min':0.00015, </pre>	<pre> 40:'1.016 (40)', 42:", 44:", 46:", 48:", 50:'1.270(50)', 52:", 54:", 56:", 58:", 60:'1.524 (60)'} } v1_params={ 'u_min':2.5, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:log10(1006*u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$v_{1}[m/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } Z_params={ 'u_min':15, 'u_max':5900, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } } block_2_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':Z_params, 'f2_params':v1_params, 'f3_params':Z_params, } } Q_params={ 'u_min':0.01, 'u_max':0.4, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Q_{L}/Q_{1}\$\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'left', } Z_params={ 'u_min':15, 'u_max':5900, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } } block_2_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':Z_params, 'f2_params':Q_params, 'f3_params':Z2_params, } } 'paper_height':25.0, 'paper_width':8.3, </pre>	<pre> Z2_params={ 'u_min':0.00015, 'u_max':2360, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z2\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } Q_params={ 'u_min':0.01, 'u_max':0.4, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Q_{L}/Q_{1}\$\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'left', } Z_params={ 'u_min':15, 'u_max':5900, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } } block_2_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':Z_params, 'f2_params':Q_params, 'f3_params':Z2_params, } } 'paper_height':25.0, 'paper_width':8.3, </pre>
--	--	---

<pre>'u_max':2360, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z2\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } Rtot_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':3, 'function':lambda u:log10(2*1.2*3.14*u), 'title':r'\$R_{tot}\$', 'scale_type':'log smart', 'tick_levels':6, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Z3_params={ 'u_min':0.0001, 'u_max':53000, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_3_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':Z2_params, 'f2_params':Rtot_params, 'f3_params':Z3_params, }</pre>	<pre>'u_min':0.00005, 'u_max':0.4, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Q_{L}/Q_{1}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } y_params={ 'u_min':100, 'u_max':10000, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$y\$', 'scale_type':'log smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Z3_params={ 'u_min':0.0001, 'u_max':53000, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$Z3\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', }block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8.3, 'height':25.0, 'f1_params':Z3_params, 'f2_params':Q_params, 'f3_params':y_params, }main_params={ 'filename':'ystep4rev1.pdf',</pre>	<pre>'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 6.0, 'title_str':r'\$'\$' } Nomographer(main_params)</pre>
---	---	--

ค.18 โนโมแกรมสำหรับการหา T_2 (รูปที่ ง-21)

<pre> from pynomo.nomographer import * T1_params={ 'u_min':285, 'u_max':291.5, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$T_{1}[K]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } Z_params={ 'u_min':0.98, 'u_max':1, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$Z_{1}\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':1, 'tick_side':'right', } Z2_params={ 'u_min':279, 'u_max':291, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{27}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', }block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':15.0, 'height':35.0, 'f1_params':T1_params, 'f2_params':Z_params, 'f3_params':Z2_params, </pre>	<pre> T2_params={ 'u_min':285, 'u_max':291.5, 'function':lambda u(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$T_{2}[K]\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } Z_params={ 'u_min':0.01, 'u_max':6, 'function':lambda u:(-u), 'title':r'\$Z_{2}\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } R_params={ 'u_min':279, 'u_max':291, 'function':lambda u:(-u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{27}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_2_params={ 'block_type':'type_1', 'width':15.0, 'height':35.0, 'f1_params':R_params, 'f2_params':Z_params, 'f3_params':T2_params, } </pre>	<pre> main_params={ 'filename':'T2step2A.pdf', 'paper_height':35.0, 'paper_width':15.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 3.0, 'title_str':r'\$(S+0.64)^{0.58}(0.74V) = P\$' } Nomographer(main_params) </pre>
---	--	--

ค.19 โนโมแกรมสำหรับการหา R_{29} (รูปที่ ง-22)

<pre> from pynomo.nomographer import * Ps1_params={ 'u_min':10, 'u_max':380, 'function':lambda u:-u, 'title':r'\$P_{s1A}\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'left', } Ps2_params={ 'u_min':1, 'u_max':350, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$P_{s2A}\$', 'scale_type':'linear smart', 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'left', } v2_params={ 'u_min':2.0, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:0.5*1.2*0.6*(u**2), 'title':r'\$v_{2A}\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } Ref1_params={ 'u_min':1, 'u_max':50, 'function':lambda u:-u, 'title':r'\$Ref_{1}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', </pre>	<pre> } block_1_params={ 'block_type':'type_3', 'width':20.0, 'height':30.0, 'reference_titles':['Ref. 1'], 'f_params':[v2_params,Ps1_params, Ps2_params,Ref1_params], } main_params={ 'filename':'v1c2step1new.pdf', 'paper_height':30.0, 'paper_width':20.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], 'title_x':10.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 10.0, 'title_str':r", } Nomographer(main_params) </pre>	
---	--	--

ค.20 โนโมแกรมสำหรับการหา v_{1C} (รูปที่ ง-23)

<pre> from pynomo.nomographer import * Ref1_params={ 'u_min':1, 'u_max':50, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$Ref_{1}\$', 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'scale_type':'log smart', 'tick_side':'right', } v2_params={ 'u_min':2, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$v_{2,A}\$', 'scale_type':'log smart', 'title_y_shift':0.5, 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } v3_params={ 'u_min':1, 'u_max':10.5, 'function_3':lambda u:0.4*1.2*u, 'function_4':lambda u:- 0.5*1.2*1.4*u*u, 'scale_type':'log smart', 'title':r'\$v_{1,C}\$', 'title_x_shift':-1.0, 'title_y_shift':1.5, 'tick_levels':5, 'tick_text_levels':3, } block_1_params={ 'block_type':'type_10', 'width':8.0, 'height':15.0, 'f1_params':Ref1_params, </pre>	<pre> 'f2_params':v2_params, 'f3_params':v3_params, } main_params={ 'filename':'v1step2swap.pdf', 'paper_height':15.0, 'paper_width':8.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',)], 'title_y':2.5, 'title_str':r'\$ \$', } Nomographer(main_params) </pre>	
---	---	--

ค.21 โนโมแกรมสำหรับการหาความดันสถิตขาออกจากข้องอ $P_{S,2}$ (รูปที่ ง-23)

<pre> from pynomo.nomographer import * Ps2A_params={ 'u_min':1, 'u_max':350, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$P_{s2}[Pa]\$', 'tick_levels':7, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'left', 'scale_type':'linear smart', } Ps1A_params={ 'u_min':1, 'u_max':349, 'function':lambda u:-u, 'title':r'\$P_{s1}[Pa]\$', 'tick_levels':7, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', 'scale_type':'linear smart', } v2A_params={ 'u_min':2.4, 'u_max':10.5, 'function':lambda u:-0.132*(u*u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$v_{2}[m/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':10, 'height':30, 'f1_params':Ps2A_params, 'f2_params':Ps1A_params, 'f3_params':v2A_params, }main_params={ </pre>	<pre> 'filename':'elbowA.pdf', 'paper_height':30, 'paper_width':10, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper',), ('polygon',)], 'title_x':5.0, 'title_y':-1.0, 'title_box_width': 4.0, } Nomographer(main_params) </pre>	
---	---	--

ค.22 ชุดคำสั่งการคำนวณการออกแบบท่อลมด้วยวิธี Static Regain

```

v1 = 8.64;%i-1 Velocity
x = 8.64;%Straigh or Branch Velocity
R = 0.75;%Regain Factor
L = 2.5;%Length
Q1 = 0.14;%Flow Rate
Ps2 = 18;%Pressure for Throwing
n=0;%initialize iteration counter
Mu= 0.00001811;%Dynamis Viscosity
Rho=1.2;

%---First Guess Value Below-----
Di=20;%Duct Diameter
Re=50000;%Renold No
sf=0.5;%Error of Pressure Loss and Rise
while sf > 0.00001 && n < 1000
    Di = sqrt((4*Q1)/(pi*x));
    Re = 1.2*x*Di/(Mu);
    f = (-1.8*log10(((1.52E-04)/(Di*3.7))^1.11)+(6.9/Re))^2;
    Pdrop = 0.5*f*1.2*(L/Di)*x^2;
    Ps1 = Pdrop + Ps2
    A = R*(v1^2);
    B = ((f*(L/Di))+ R)*(x^2);
    sf = (-A + B)*100/A;
    x = x - 0.01;
    n = n + 1;
end
fprintf('%12.4f \n',x,Di,Pdrop,n,sf)

```

นำเข้าข้อมูล

กำหนดค่าสำหรับกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1

สมการในการคำนวณ

แสดงผลลัพธ์

ค.23 ชุดคำสั่งการคำนวณการออกแบบท่อลมที่คำนึงถึงการรั่ว และการถ่ายเทความร้อน

```

for Q1A = 0.56;
for v1A = 8.64;
for T50 = 5;
for Q1B = 0.14;
for LA = 4.5;
for LB = 2.5;
for T1A = 291;
Cl=22;%Leakage Class
n = 0.65;%Exponent of Leakage Class
Pam = 0;%Atmosphere Pressure
Tam =298;%Ambient Velocity
Cp = 1006.8;
Cv = 717;
Rho =1.2;%Density of Air
e = 0.00015;%Roughness
nu= 1.53E-05;%Kinematics Viscosity
Mu= 0.000018;%Dynamis Viscosity
alpha=2.25E-05;%Thermal Diffuse
b = 0.45E-03;%Duct Wall Thickness
kD = 16.3;%Conductivity of Air Duct
kins= 0.04;%Conductivity of Insulation
bins =0.0381;%Insulation Thickness
Pr=0.710;%Prandtl Number
kair=2.53E-02;%Conductivity of Air
k=0;%initialize iteration counter
Cd = 0.5;

%----First Guess Value Below-----
Ps1A = 50;
Ps2A = 50;
v2A = 10;
TinsoA = 298;
Ps2B = 30;
v1B = 5;
v2B = 5;
TinsoB = 298;
s1 = 1;s2 = 1;s3 = 1;s4 = 1; s5 = 1; s6 = 1; s7 = 1; s8 = 1;

while (abs(s1) > 0.0001|| abs(s2) > 0.0001|| abs(s3) > 0.0001||abs(s4)> 0.0001||abs(s5)> 0.0001||abs(s6)>
0.0001||abs(s7)> 0.0001||abs(s8)> 0.0001) && k < 1000

```

นำเข้าข้อมูล

กำหนดค่าสำหรับกระบวนการทำซ้ำครั้งที่ 1

$$Ps1OldA = Ps1A;$$

$$Ps2OldA = Ps2A;$$

$$v2OldA = v2A;$$

$$TinsoOldA = TinsoA;$$

$$Ps2OldB = Ps2B;$$

$$v1OldB = v1B;$$

$$v2OldB = v2B;$$

$$TinsoOldB = TinsoB;$$

$$DiA = \sqrt{(4*Q1A)/(\pi*v1A)};$$

$$ReA = \rho*v1A*DiA/(\mu);$$

$$Q1A = C1*(((0.5*(Ps1A+Ps2A))Pam)/250)^n*(\pi*DiA*LA)*5.077*10^{-5};$$

$$Q2A = Q1A - Q1A;$$

$$v2A = (4/(\pi*DiA^2))*(Q2A);$$

$$a = 0.0133*\exp(-7*(10^{-6})*ReA);$$

$$fA = ((-1.8*\log_{10}(((e/(DiA*3.7))^1.11)+(6.9/ReA))))^{-2}+(a);$$

$$fsmA = (0.79*\log(ReA)-1.64)^{-2};$$

$$RadA = (9.8*(1/Tam)*(Tam-TinsoA)*(DiA^3))/((\nu)*(\alpha));$$

$$RiA = (\log(((DiA/2)+b)/(DiA/2)))/(2*\pi*kD*LA);$$

$$RoA = (\log(((DiA/2)+b+bins)/(DiA/2+b)))/(2*\pi*kins*LA);$$

$$NusmA = (((fsmA/8)*(ReA-1000)*Pr)^*(1+(DiA/LA)^{(2/3)}))/(1+(12.7*((fsmA/8)^{0.5})*(Pr^{(2/3)}-1)));$$

$$ConviA = 1/(\pi*LA*kair*NusmA*((fA/fsmA)^{0.6312});$$

$$NuoA = (0.6+((0.387*(RadA^{(1/6)}))/((1+((0.559/Pr)^{(9/16)}))^{(8/27))))^2;$$

$$ConvoA = 1/(\pi*LA*kair*NuoA);$$

$$R123A = RiA + ConviA + RoA;$$

$$RtotA = RiA + ConviA + ConvoA + RoA;$$

$$TinsoA = ((ConvoA*T1A)+(R123A*Tam))/RtotA;$$

$$YA = 2*((DiA^2)/4)*(0.5*(v1A+v2A))*\pi*\rho*Cp*RtotA;$$

$$T2A = ((2*Tam)+ T1A*(YA - 1))/(YA+1);$$

$$DiB = \sqrt{(4*Q1B)/(\pi*v1B)};$$

$$ReB = \rho*v1B*DiB/(\mu);$$

$$Q1B = C1*(((0.5*(Ps1OldA+Ps2OldB))-Pam)/250)^n*(\pi*DiB*LB)*5.077*10^{-5};$$

$$Q2B = Q1B - Q1B;$$

$$v2B = (4/(\pi*DiB^2))*(Q2B);$$

$$aB = 0.0133*\exp(-7*(10^{-6})*ReB);$$

$$fB = ((-1.8*\log_{10}(((e/(DiB*3.7))^1.11)+(6.9/ReB))))^{-2}+(aB);$$

$$fsmB = (0.79*\log(ReB)-1.64)^{-2};$$

$$RadB = (9.8*(1/Tam)*(Tam-TinsoB)*(DiB^3))/((\nu)*(\alpha));$$

$$RiB = (\log(((DiB/2)+b)/(DiB/2)))/(2*\pi*kD*LB);$$

$$RoB = (\log(((DiB/2)+b+bins)/(DiB/2+b)))/(2*\pi*kins*LB);$$

$$NusmB = (((fsmB/8)*(ReB-1000)*Pr)^*(1+(DiB/LB)^{(2/3)}))/(1+(12.7*((fsmB/8)^{0.5})*(Pr^{(2/3)}-1)));$$

$$ConviB = 1/(\pi*LB*kair*NusmB*((fB/fsmB)^{0.6312});$$

สมการใน
การคำนวณ

```

NuoB = (0.6+((0.387*(RadB^(1/6)))/((1+((0.559/Pr)^(9/16))))^(8/27))))^2;
ConvoB = 1/(pi*LB*kair*NuoB);
R123B = RiB + ConviB + RoB;
RtotB = RiB + ConviB + ConvoB + RoB;
T1B = T2A;Tinsob = ((ConvoB*T1B)+(R123B*Tam))/RtotB;
YB = 2*((DiB^2)/4)*(0.5*(v1OldB+v2B))*pi*Rho*Cp*RtotB;
T2B = ((2*Tam)+ T1B*(YB - 1))/(YB+1);
DeltaTB = Tam - ((T1B+T2B)/2);
qD12B = DeltaTB/(RtotB);
q2B = Rho*Cv*((Q2B/Q1B)*(T2B-Tam)-(T1B-Tam));
qL12B = Rho*QLB*Cp*(Tam-(0.5*(T1B+T2B)));
ml=QA*Rho;DeltaTA = Tam - ((T1A+T2A)/2);
qD12A = DeltaTA/(RtotA);
q2A = Rho*Cv*((Q2A/Q1A)*(T2A-Tam)-(T1A-Tam));
qL12A = Rho*QLA*Cp*(Tam-(0.5*(T1A+T2A)));
A = 1;C24 = A*(0.34+(v1OldB/v2OldA)^2);
Ps1A = ((Q2A/Q1A)*(Ps2A + (0.5*Rho*v2A^2)))+(0.5*fA*Rho*
(LA/DiA)*v1A^2)-(qD12A/Q1A)+q2A-(qL12A/Q1A)-(0.5*Rho*v1A^2);
Ps2A = (-0.5*Rho*v2OldA^2)+Ps1A+(0.5*Rho*v1OldB^2)+(0.5*Rho*C24*v2OldA^2);
v1B = sqrt((((0.5*Rho)-((0.5*fB*(LB/DiB)*Rho))^(-1)*(-Ps1OldA+((Q2B/Q1B)*(Ps2OldB
+ (0.5*Rho*v2OldB^2)))-(qD12B/Q1B)+q2B-(qL12B/Q1B)))));
Ps2B = ((Rho)/2)*((1/Cd)^2)*((1/Q2B)^(2/3))*(sqrt(T50)/(1.728))^(8/3));
%----- s1 = ((v2OldA-v2A)/v2A)*100;
s2 = (((Ps2A) - (Ps2OldA))/(Ps2A))*100;
s3 = ((Tinsob-TinsobOldA)/Tinsob)*100;
s4 = (((Ps1A) - (Ps1OldA))/(Ps1A))*100;
s5 = ((v2OldB-v2B)/v2B)*100;
s6 = ((v1OldB-v1B)/v1B)*100;
s7 = (((Ps2B) - (Ps2OldB))/(Ps2B))*100;
s8 = ((Tinsob-TinsobOldB)/Tinsob)*100;
k = k + 1;

end

fprintf('%8.7f \n',Ps1A,Ps2A,v1B,Ps2B,QA,QLB,T2A,T2B);
fprintf('%5.3f \n',)
end
end
end
end
end
end
end
end
end
end

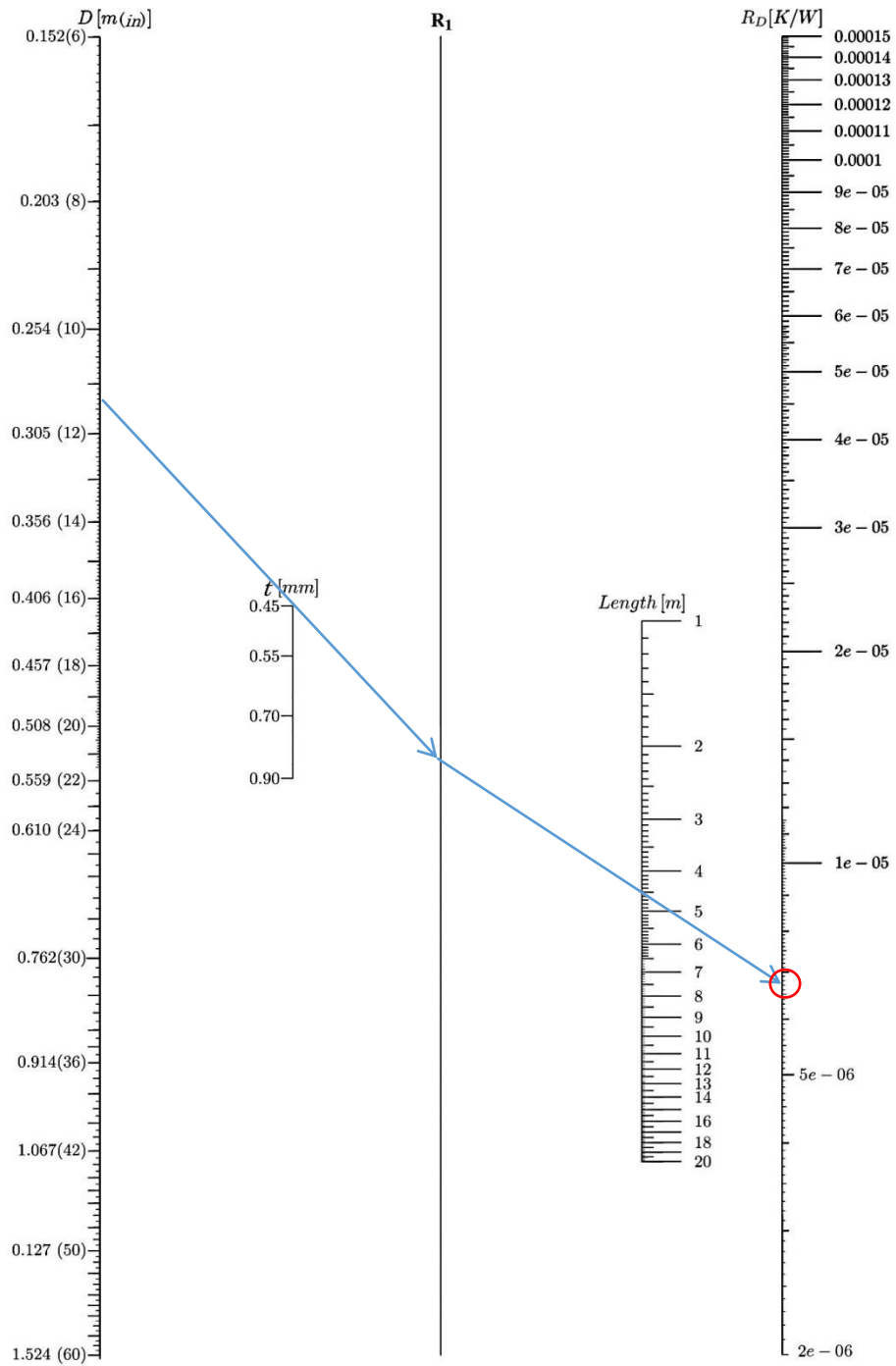
```

สมการใน
การคำนวณ

แสดงผลลัพธ์

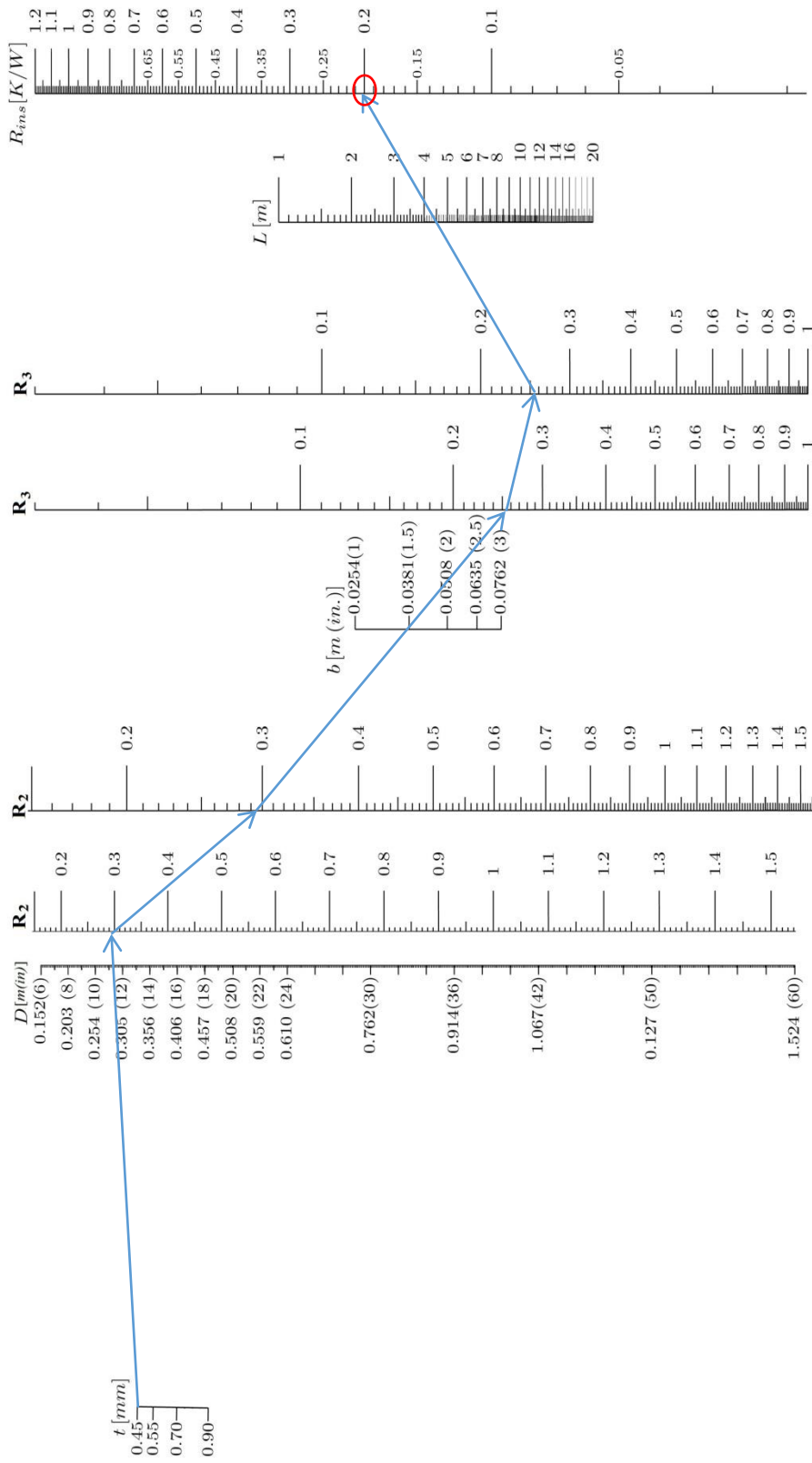
ภาคผนวก ง

รวมรูปโนโมแกรม



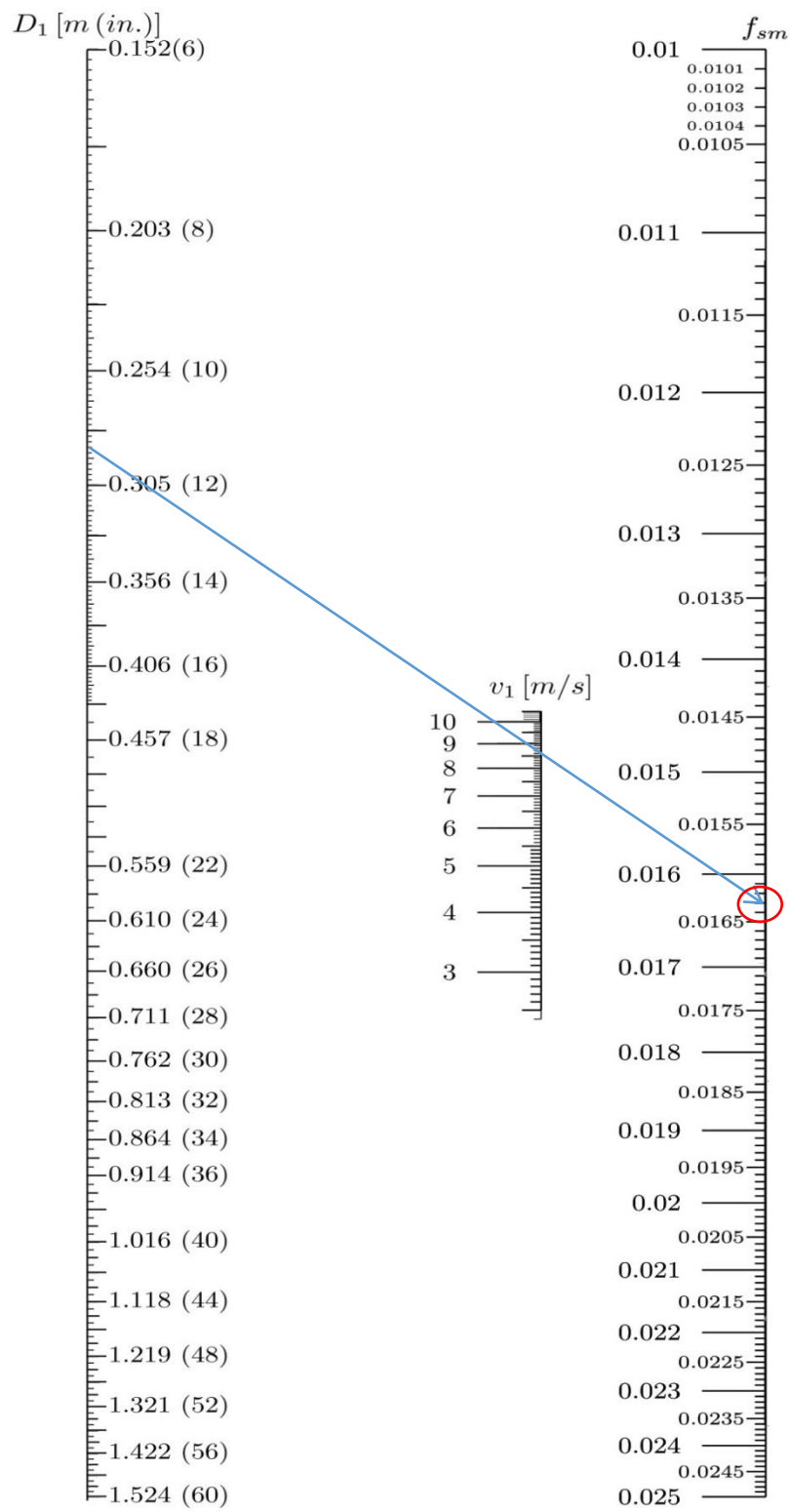
รูปที่ ง - 1 โนโมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนของท่อ (R_D)

(R_1 คือ แกนอ้างอิง)

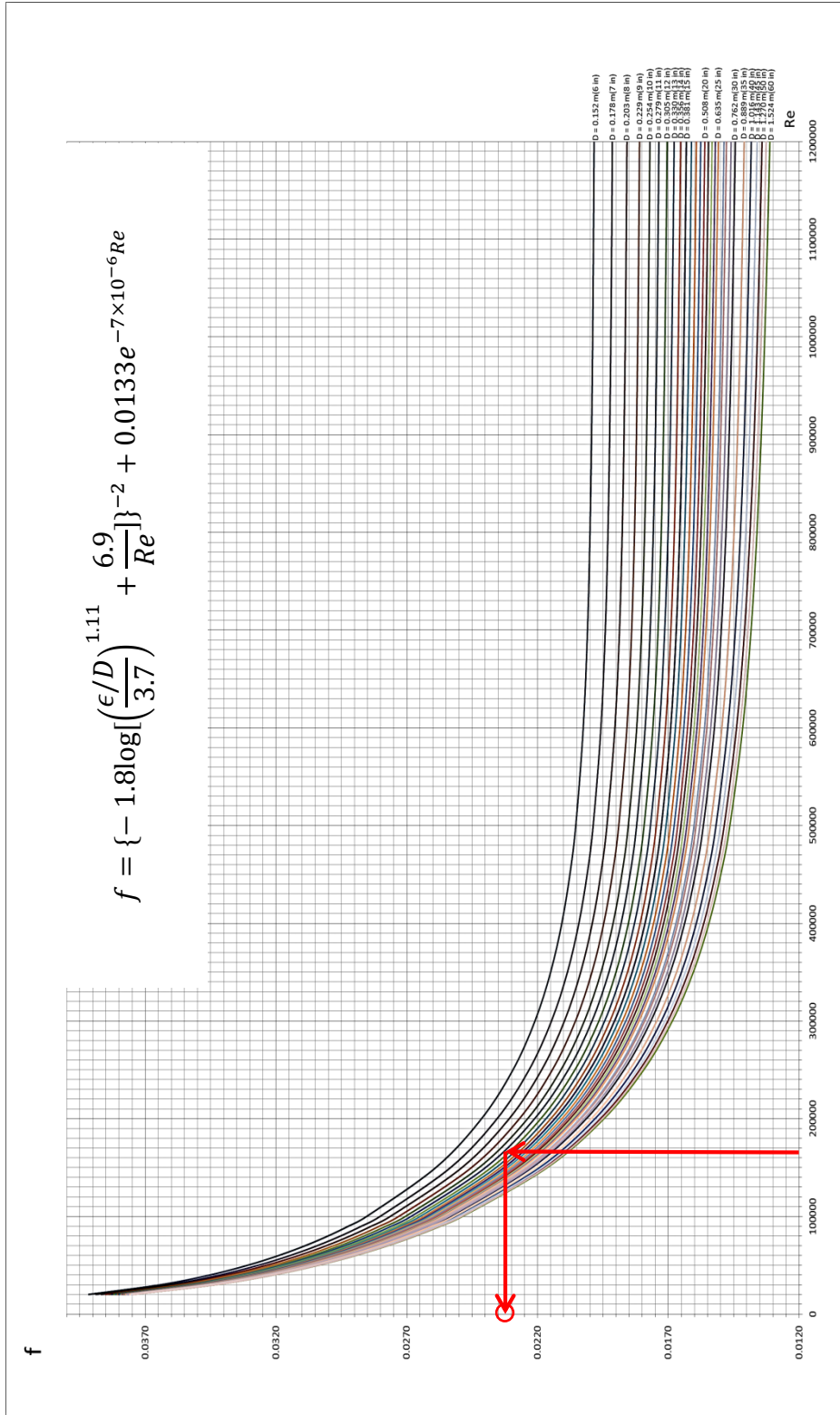


รูปที่ ง - 2 โน้มนำการสำหรับการหาความต้านทานเชิงความร้อนของฉนวน (R_{rms})

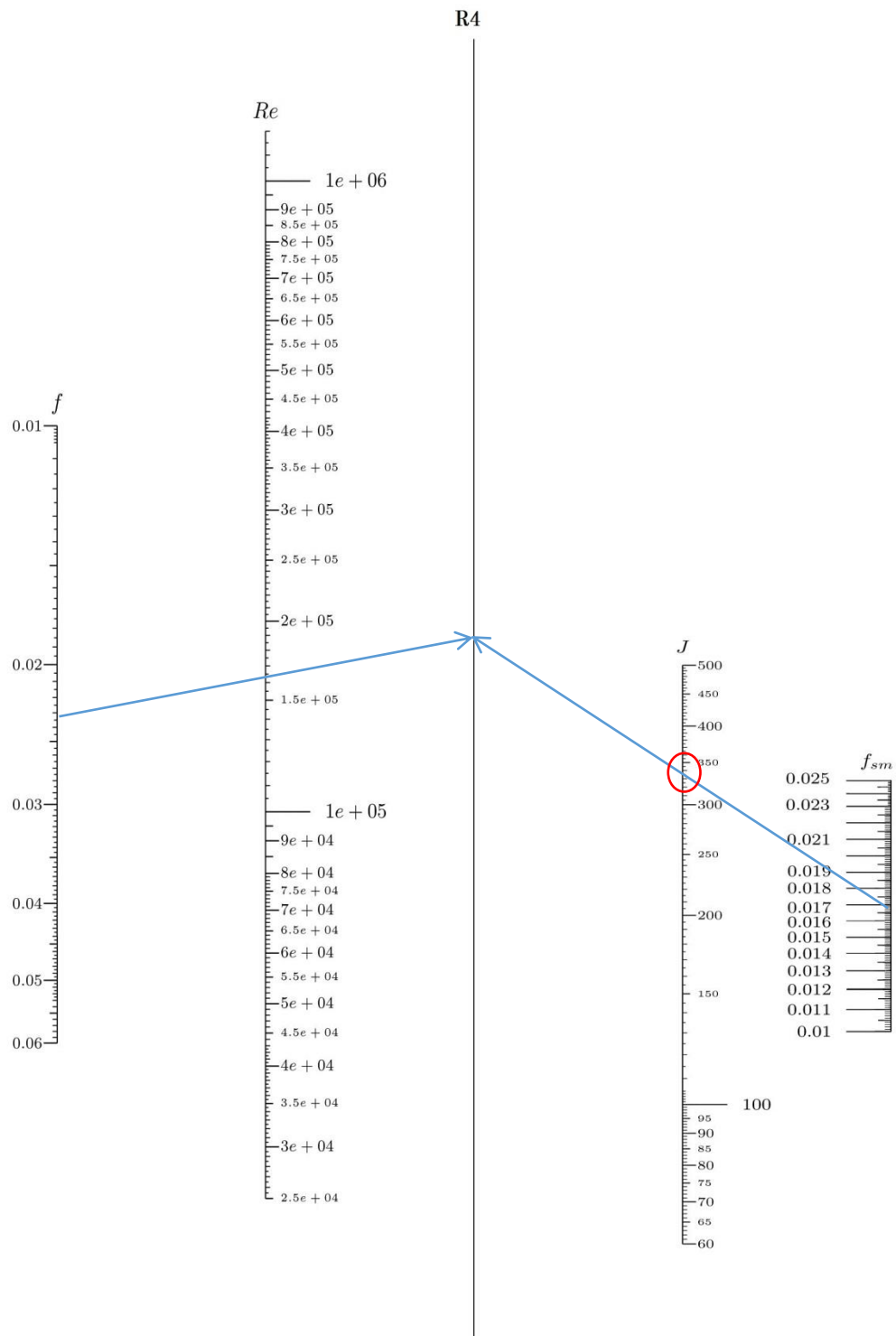
(R_2 และ R_3 คือ แกนอ้างอิง)



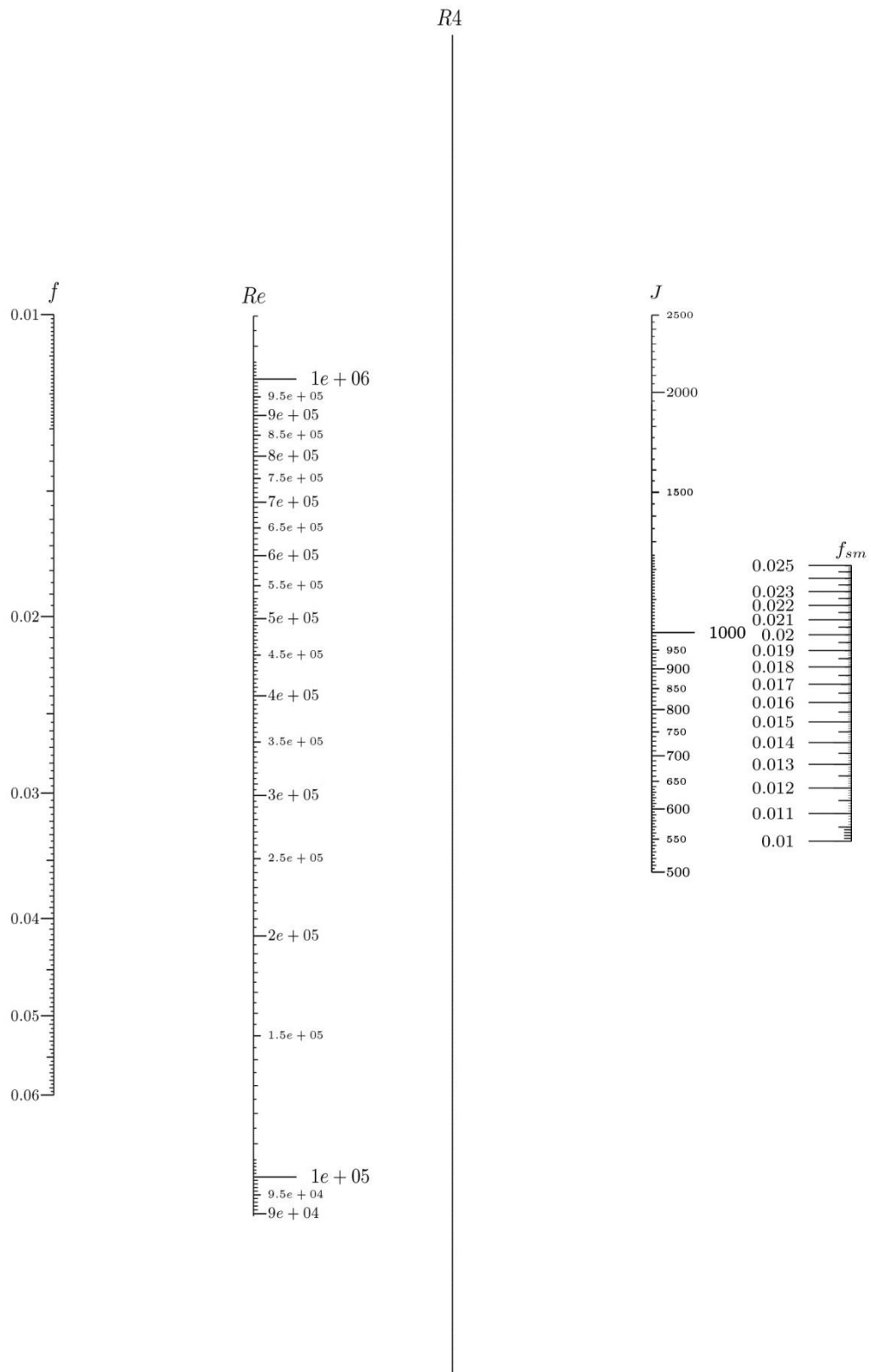
รูปที่ ง - 3 โนโมแกรมสำหรับหา $f_{sm}(\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ และ $\mu = 1.8 \times 10^5 \text{ kg/m.s})$



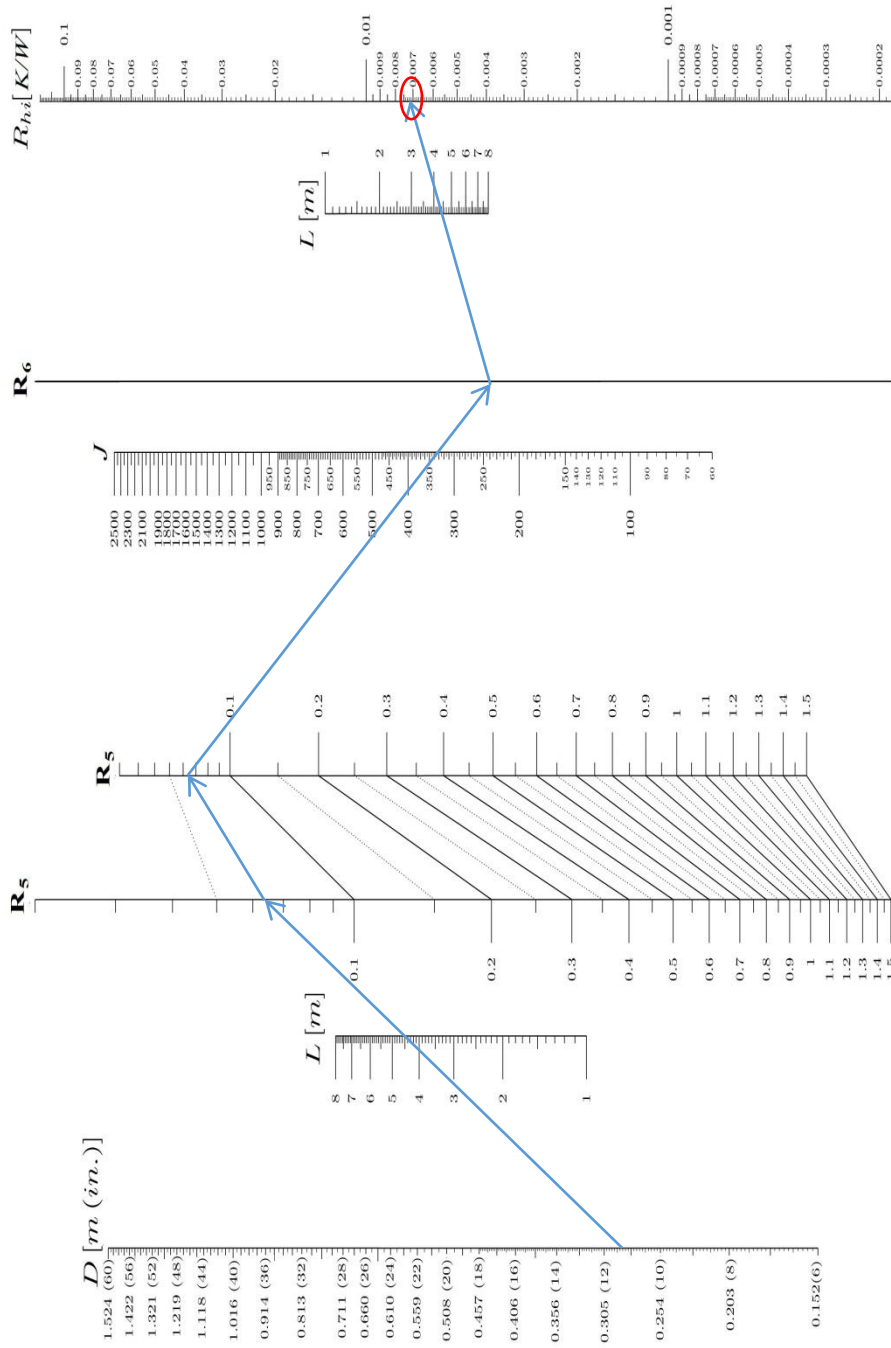
รูปที่ ง - 4 กราฟสำหรับหาค่า Friction Factor ($\epsilon = 0.00015$ m., $\rho = 1.2$ kg/m³ และ $\mu = 1.8 \times 10^{-5}$ kg/m.s)



รูปที่ ง - 5 ก โนโมแกรมสำหรับการหาค่า J ในช่วง 60 ถึง 500
 (R_4 คือ แกนอ้างอิง)

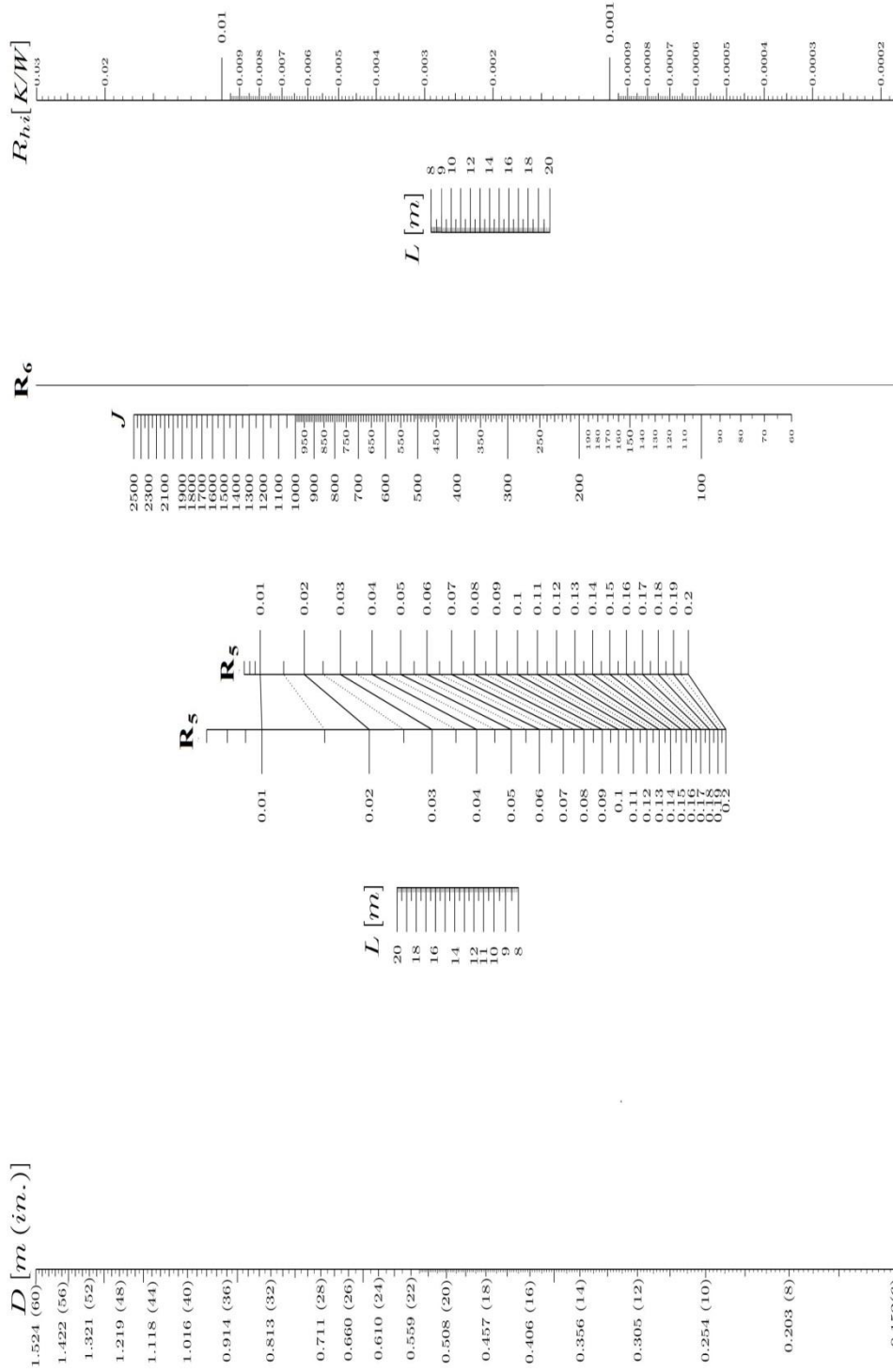


รูปที่ ง - 5 ข โนโมแกรมสำหรับการหาค่า J ในช่วง 500 ถึง 2500
 (R_4 คือ แกนอ้างอิง)



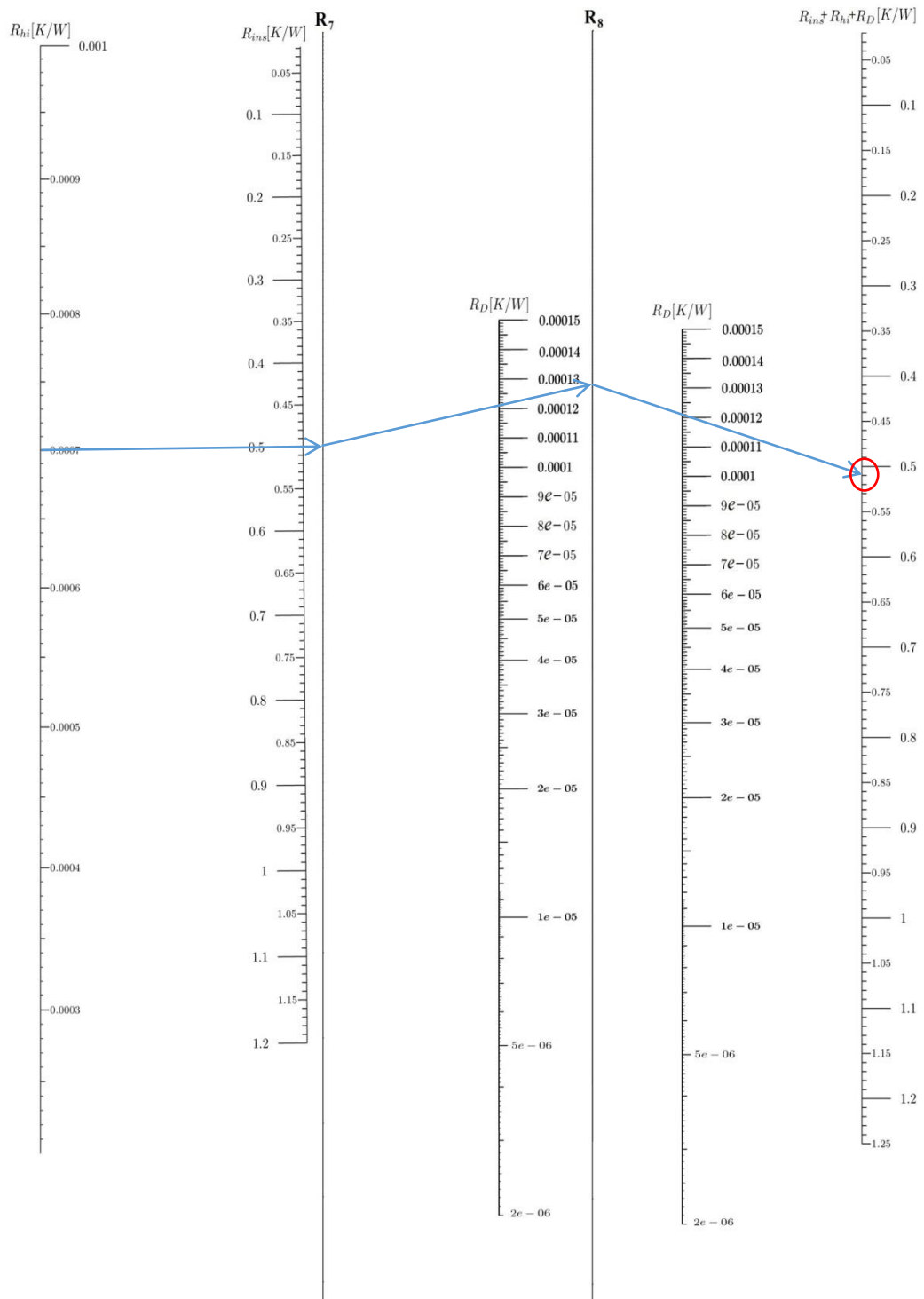
รูปที่ ง - 6 ก โนมแกรมสำหรับการหา $R_{h,i}$ ในช่วง $L = 1$ m ถึง 8 m

(R_5 และ R_6 คือ แกนอ้างอิง)

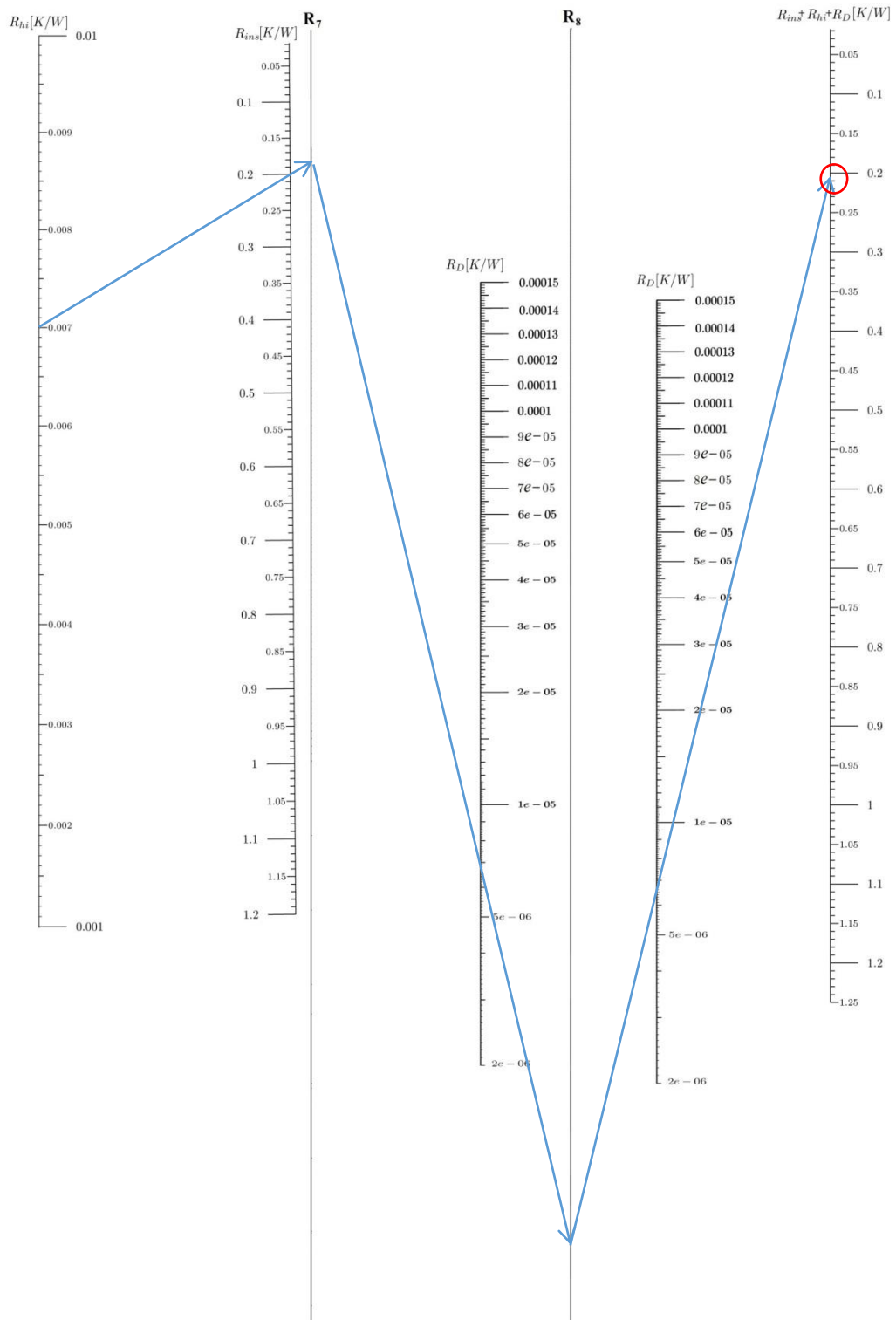


รูปที่ ง - 6 ข โน้มนิยามสำหรับกราฟหา $R_{h,i}$ ในช่วง $L = 8$ ม ถึง 20 ม

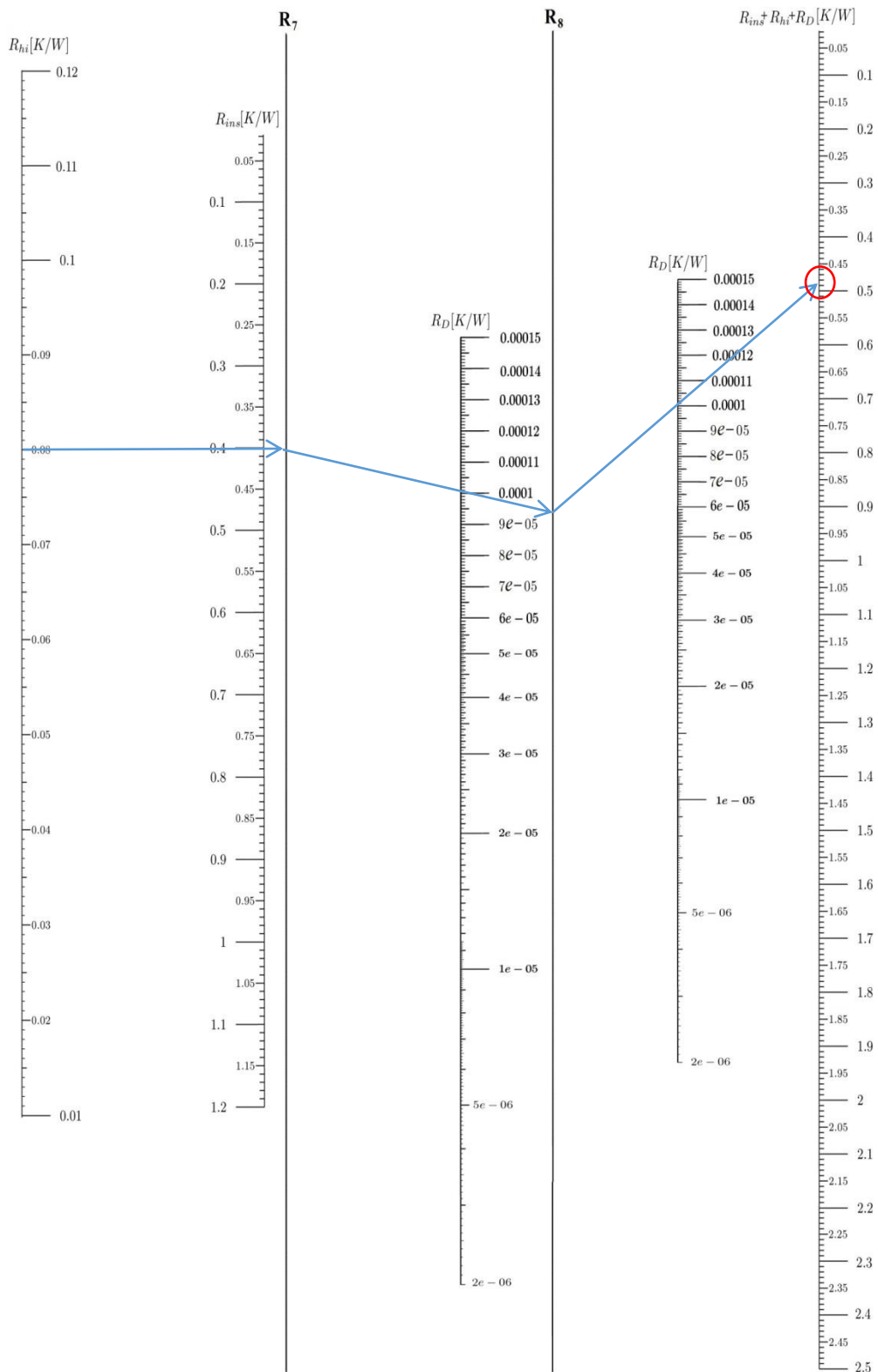
(R₅ และ R₆ คือ แกนอ้างอิง)



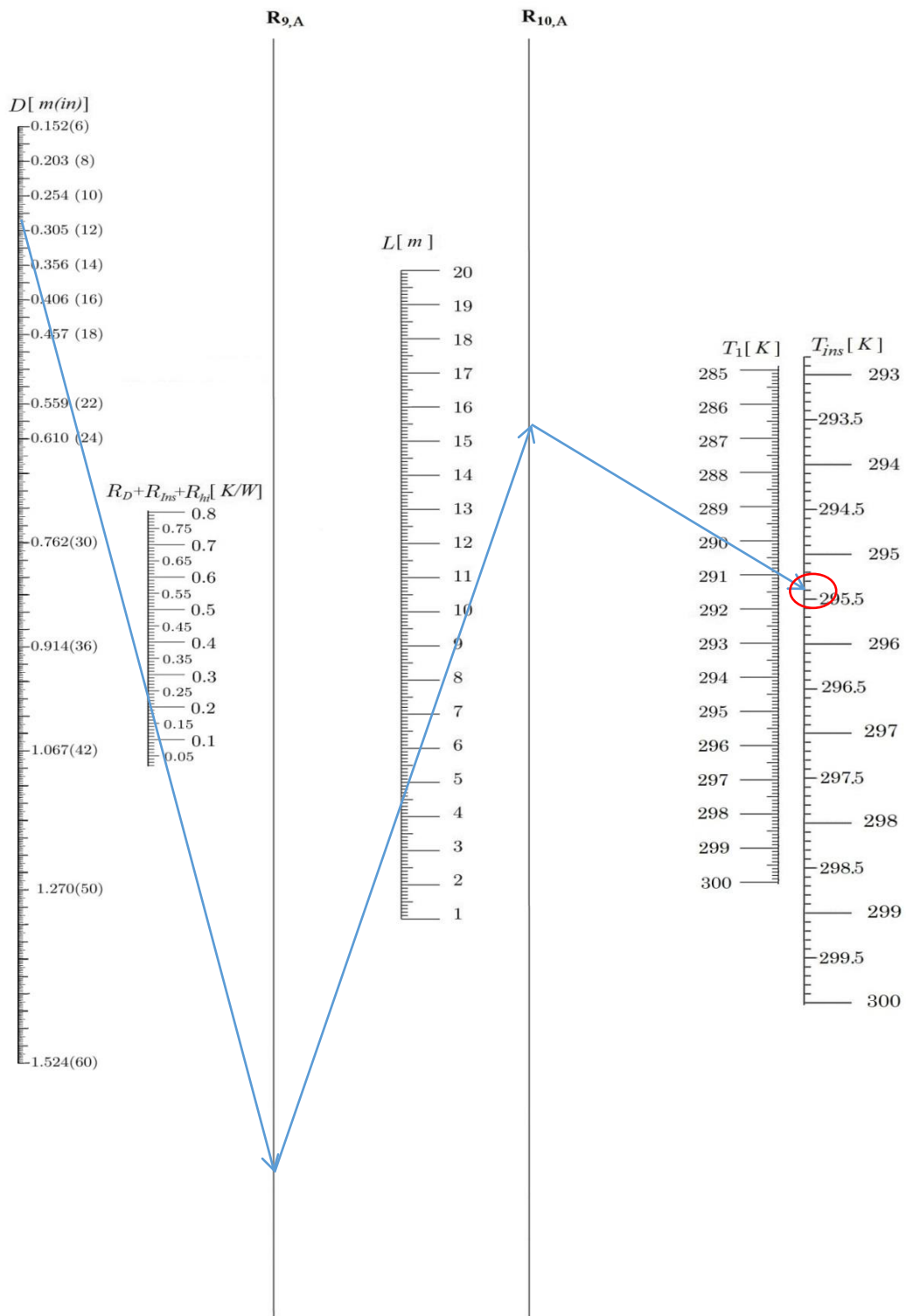
รูปที่ 7 ก โนโมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.0002 ถึง 0.001 K/W
(R_7 และ R_8 คือ แกนอ้างอิง)



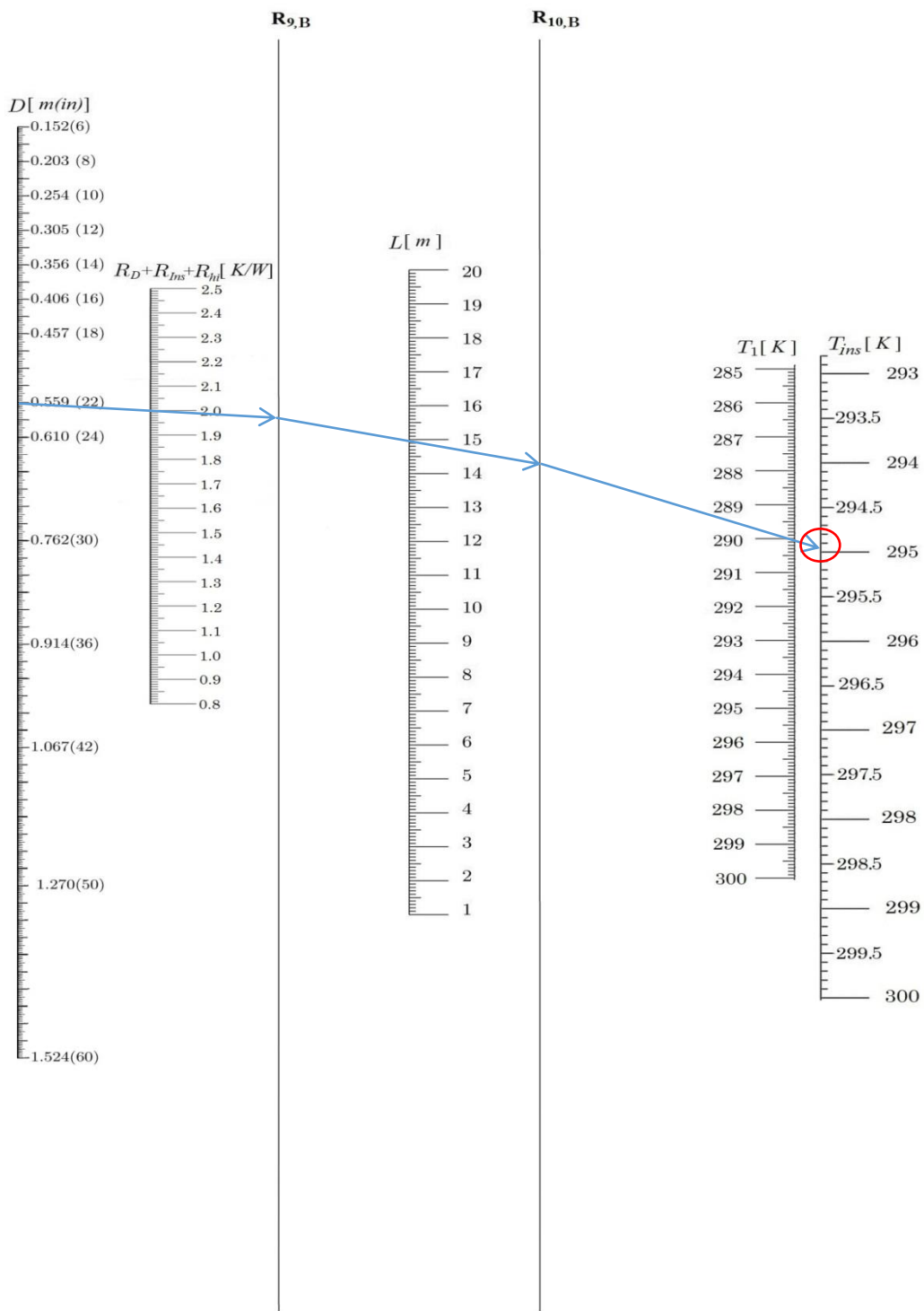
รูปที่ ง - 7 ข โนมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.001 ถึง 0.01 K/W (R_7 และ R_8 คือ แกนอ้างอิง)



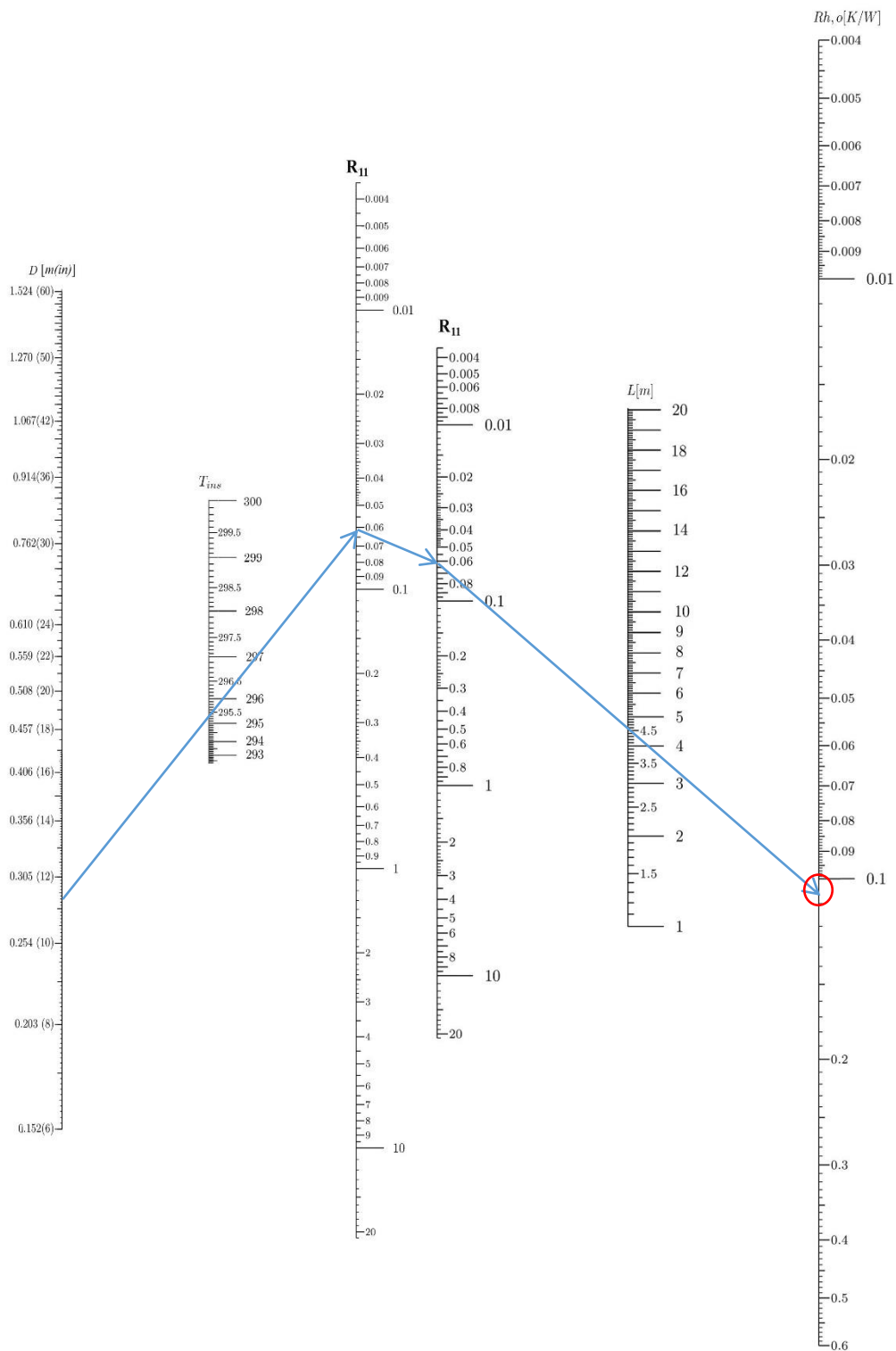
รูปที่ ง - 7 ค โนมแกรมสำหรับหา $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ สำหรับ $R_{h,i}$ ในช่วง 0.01 ถึง 0.12 K/W
 (R_7 และ R_8 คือ แกนอ้างอิง)



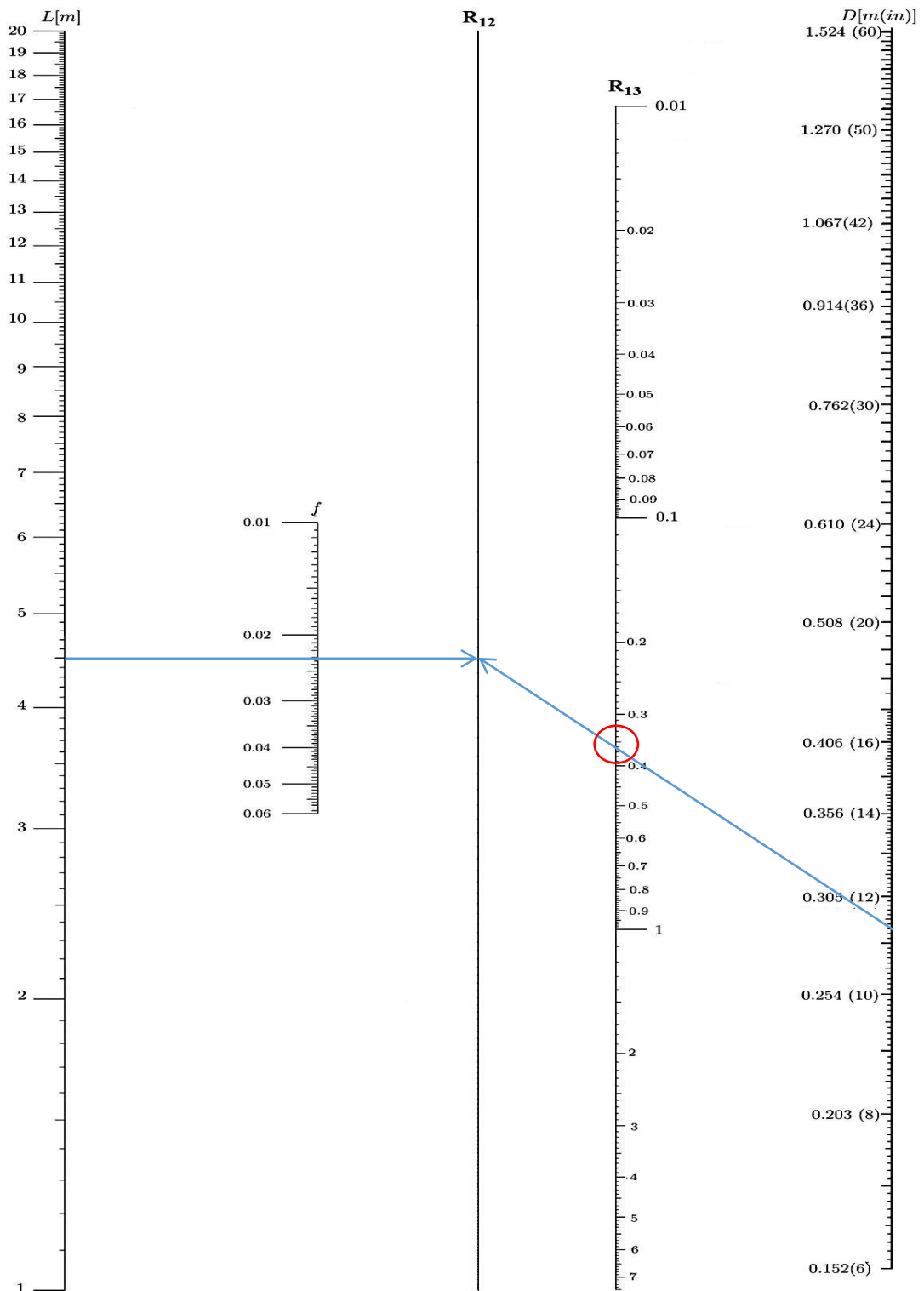
รูปที่ ง - 8 ก โนโมแกรมสำหรับหาอุณหภูมิภายนอกของฉนวน (T_{ins}) สำหรับ $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ ในช่วง 0.02 K/W ถึง 0.8 K/W (R_9 และ R_{10} คือ แกนอ้างอิง)



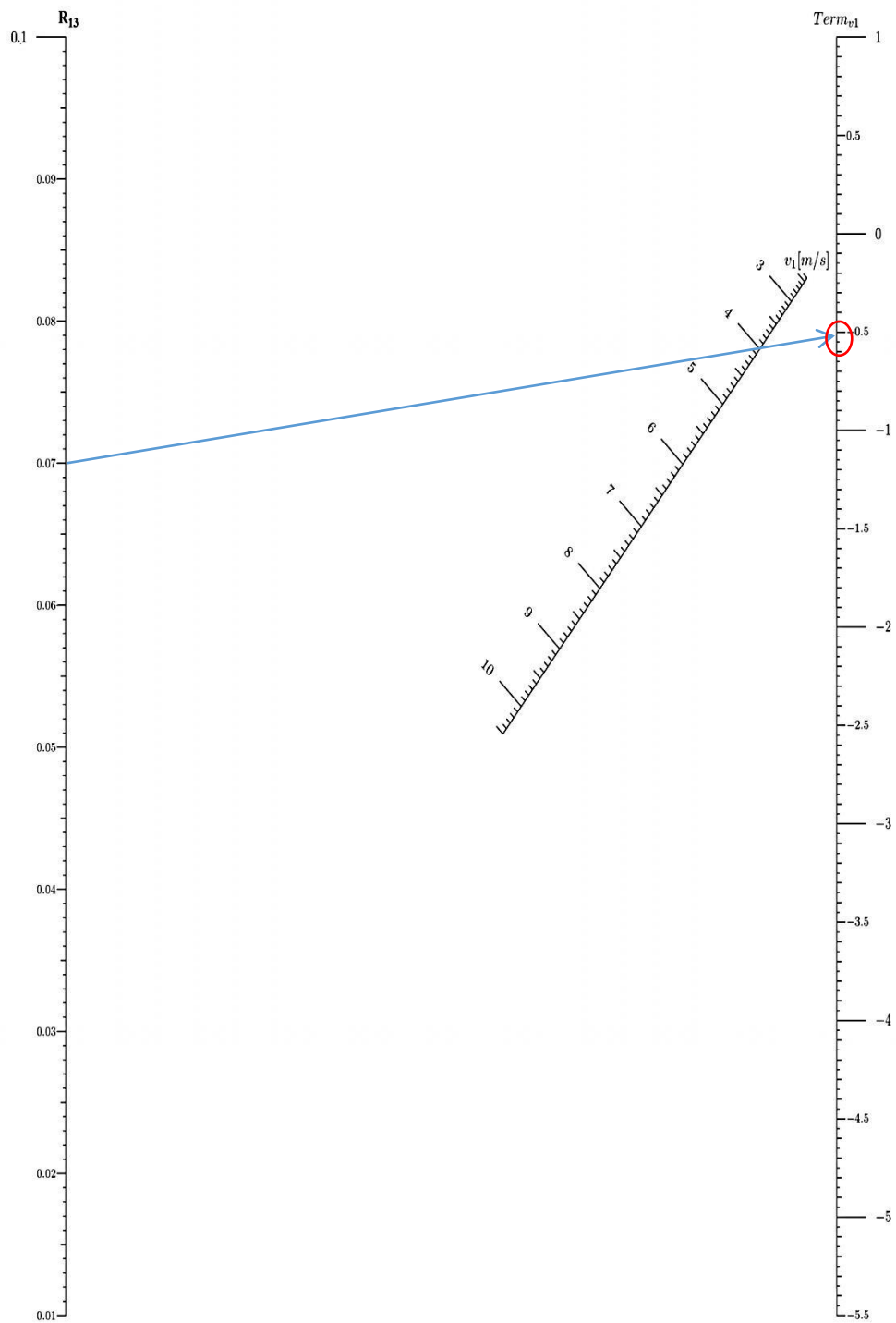
รูปที่ ง - 8 ข โนโมแกรมสำหรับหาอุณหภูมิภายนอกของฉนวน (T_{ins}) สำหรับ $R_{h,i} + R_D + R_{ins}$ ในช่วง 0.8 K/W ถึง 2.5 K/W (R_9 และ R_{10} คือ แกนอ้างอิง)



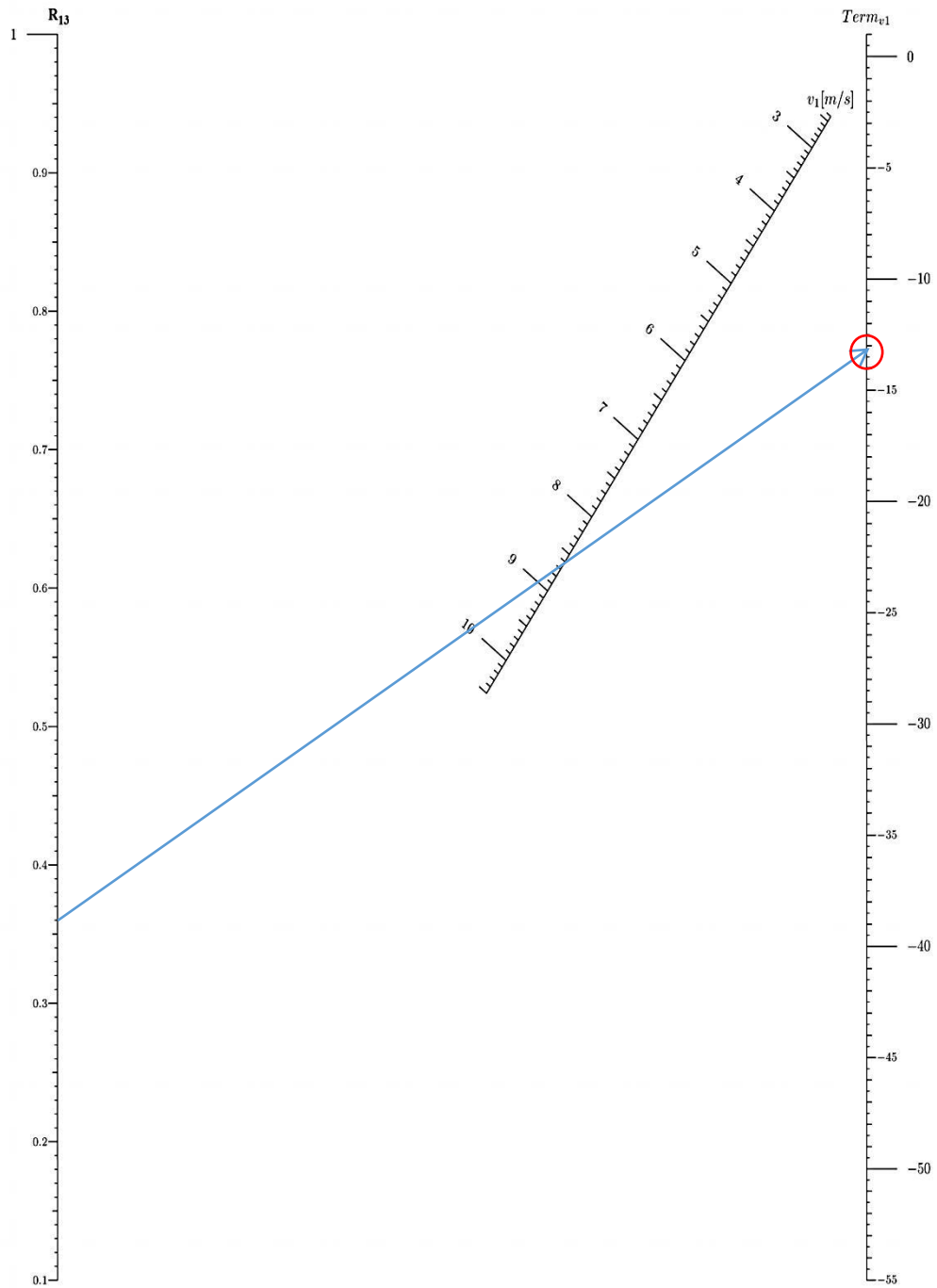
รูปที่ 9 - โนมแกรมสำหรับหาความต้านทานเชิงความร้อนจากการพาความร้อนภายนอกท่อ ($R_{h,o}$) (R_{11} คือ แกนอ้างอิง)



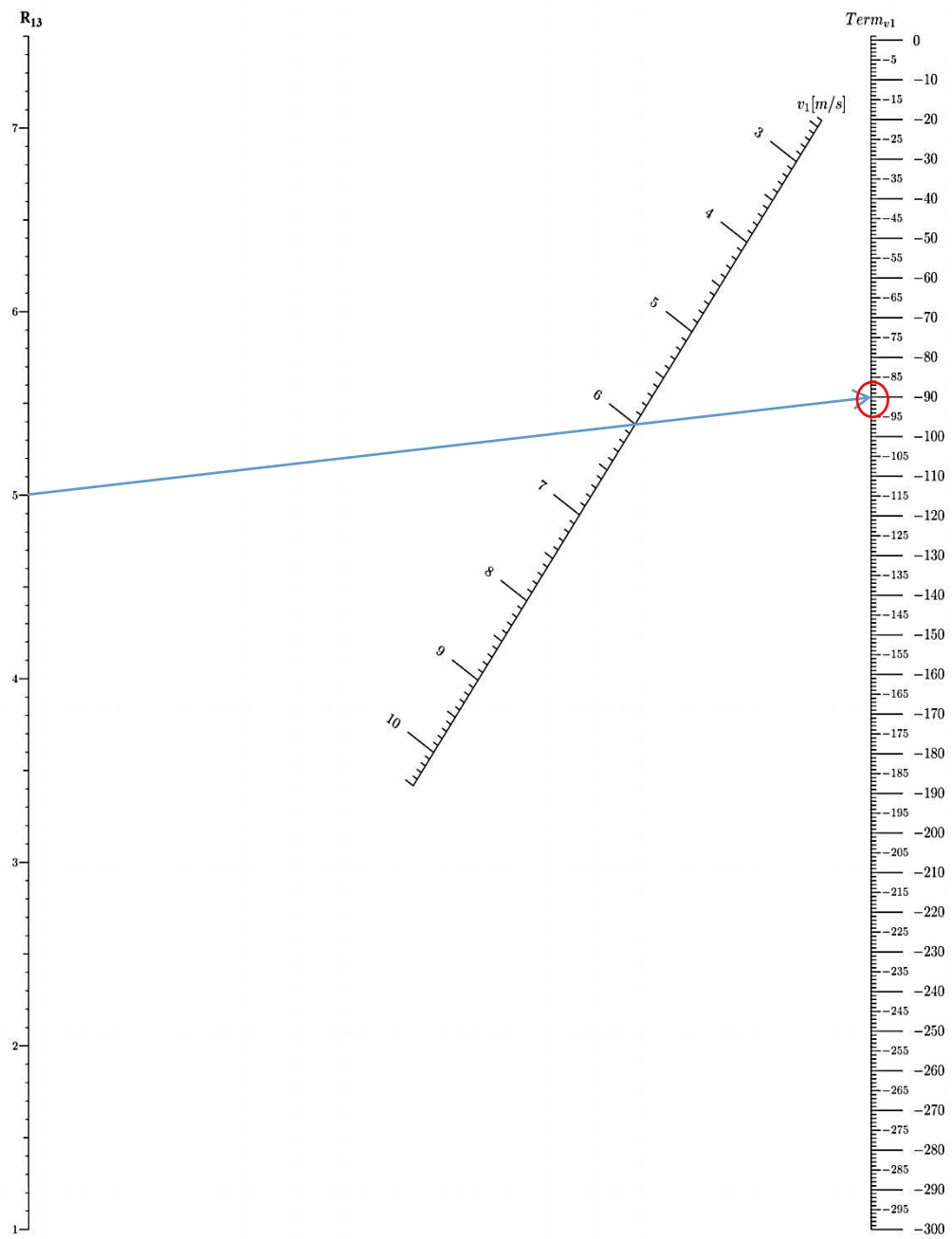
รูปที่ ง - 10 โนมแกรม R_{13} สำหรับหาค่าอ้างอิง $Term_{v1}$
 (R_{12} คือ แกนอ้างอิง และ R_{13} คือ แกนอ้างอิงซึ่งถูกนำไปใช้ในรูป ง - 11)



รูปที่ ง-11 ก โนโมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 0.01 ถึง 0.1
 (R_{13} คือ แกนอ้างอิงที่ใช้เชื่อมโยงรูปที่ ง - 10)

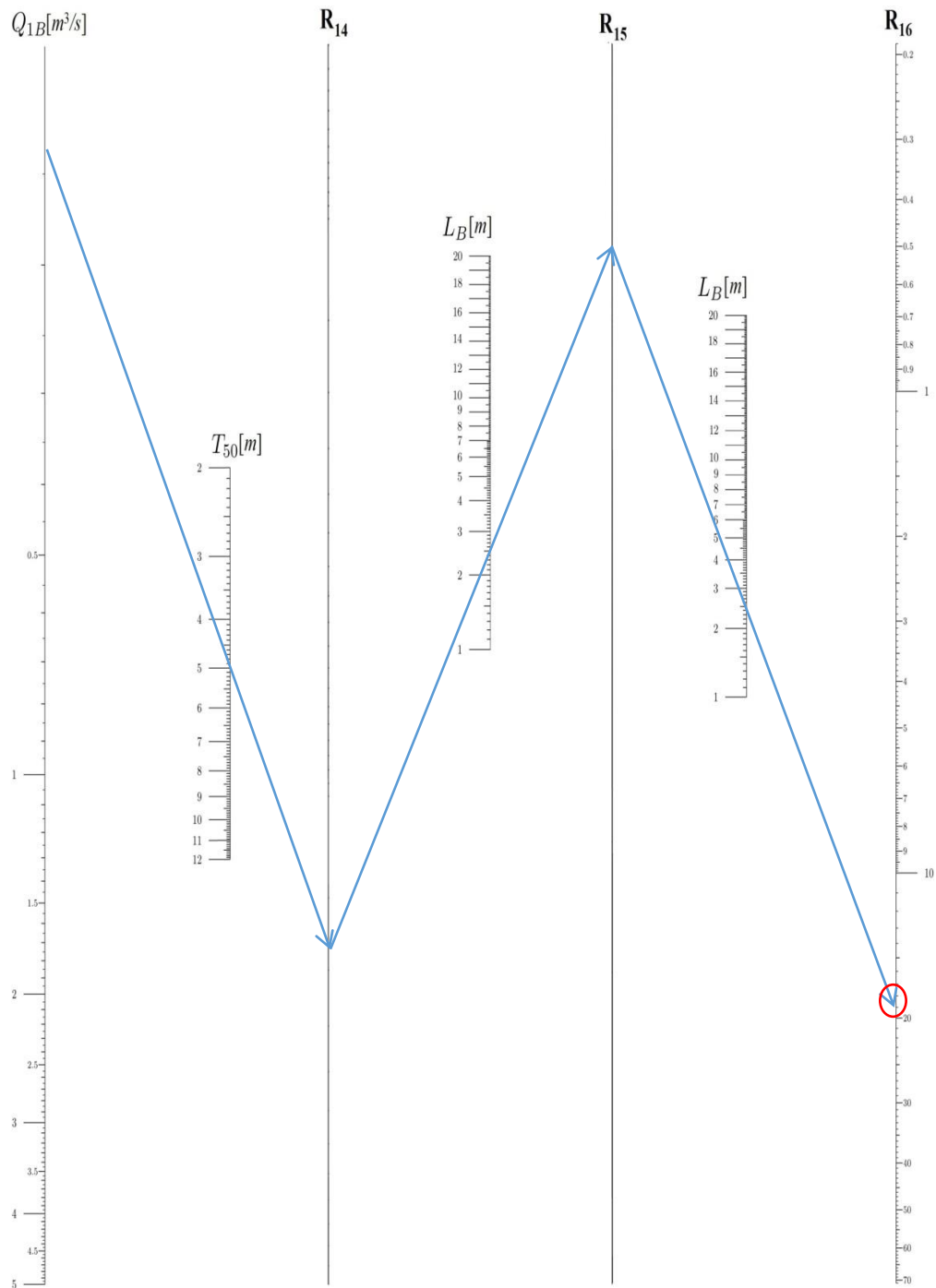


รูปที่ ง-11 ข โนโมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 0.1 ถึง 1
 (R_{13} คือ แกนอ้างอิงที่ใช้เชื่อมโยงรูปที่ ง - 10)

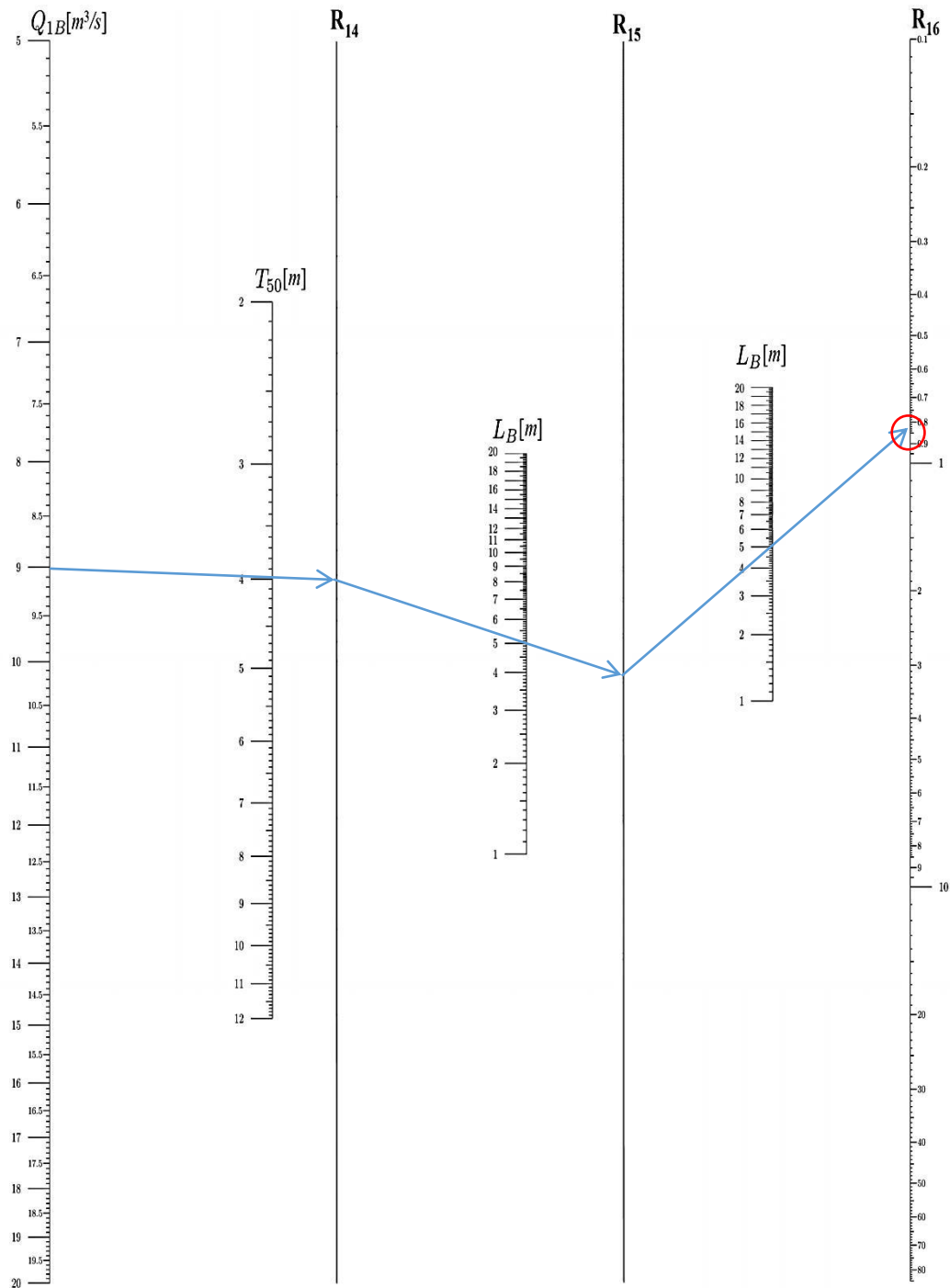


รูปที่ ง -11 ค โนมแกรม $Term_{v1}$ สำหรับ R_{13} ในช่วง 1 ถึง 7.5

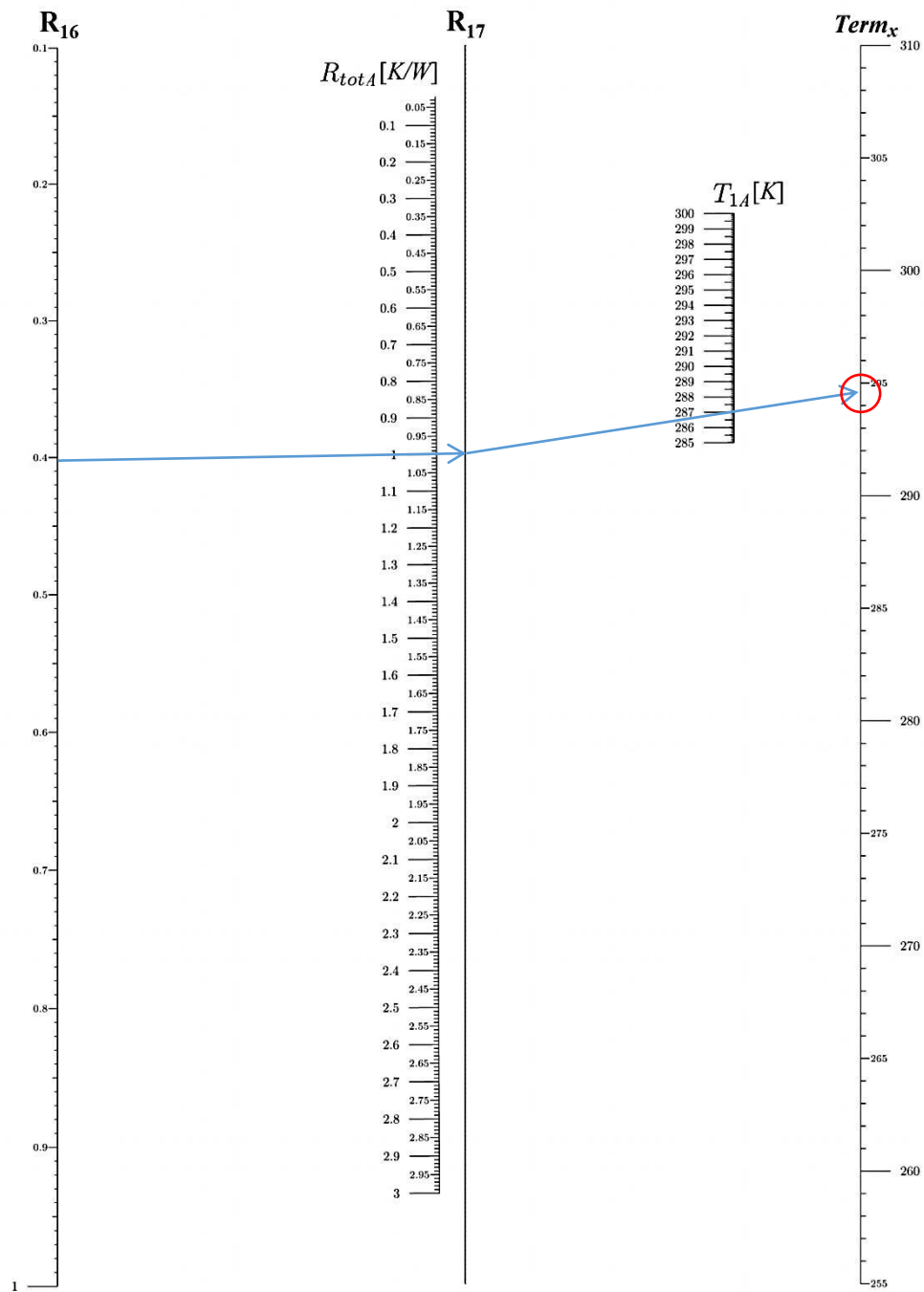
(R_{13} คือ แกนอ้างอิงที่ใช้เชื่อมโยงรูปที่ ง - 10)



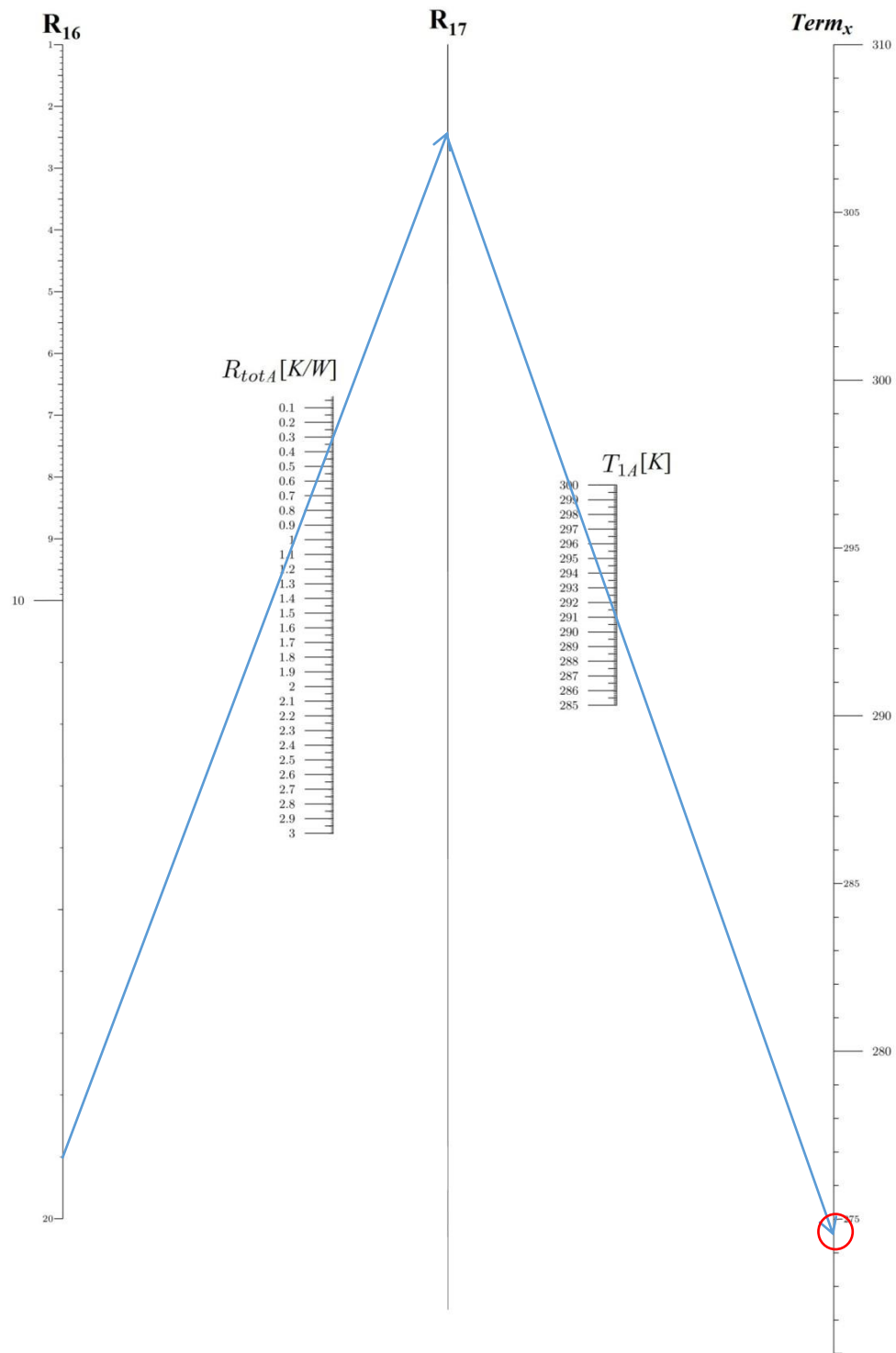
รูปที่ ง-12 ก โนมแกรม R_{16} สำหรับ $Q_{1,B}$ ในช่วง $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ถึง $5 \text{ m}^3/\text{s}$
 (R_{14}, R_{15} คือ แกนอ้างอิง)



รูปที่ ง -12 ข โนโมแกรม R_{16} สำหรับ Q_{1B} ในช่วง $5 m^3/s$ ถึง $20 m^3/s$
(R_{14}, R_{15} , คือ แกนอ้างอิง)

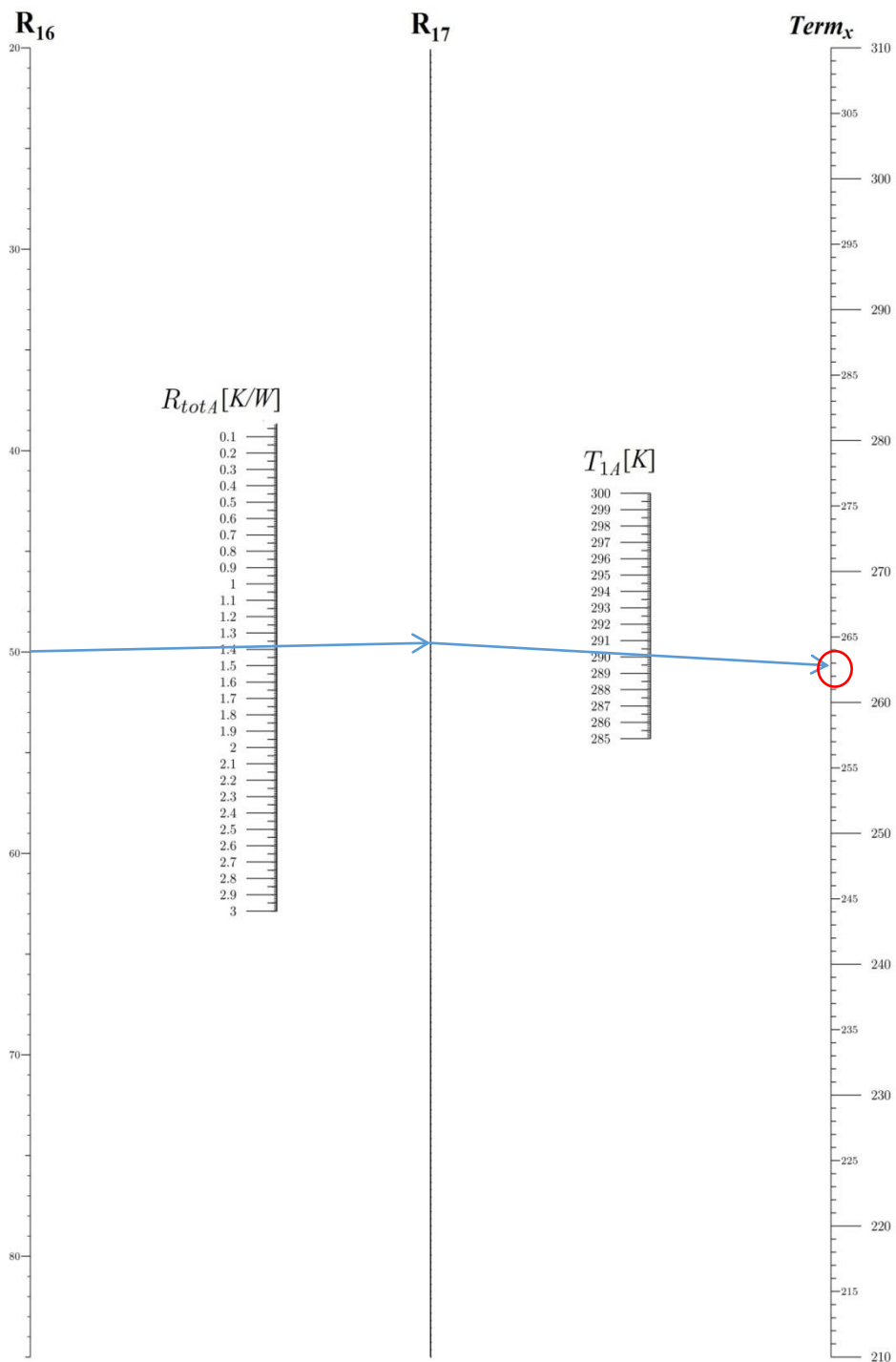


รูปที่ ง -13 ก โนมแกรม $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 0.1 ถึง 1
(R_{16}, R_{17} คือ แกนอ้างอิง)

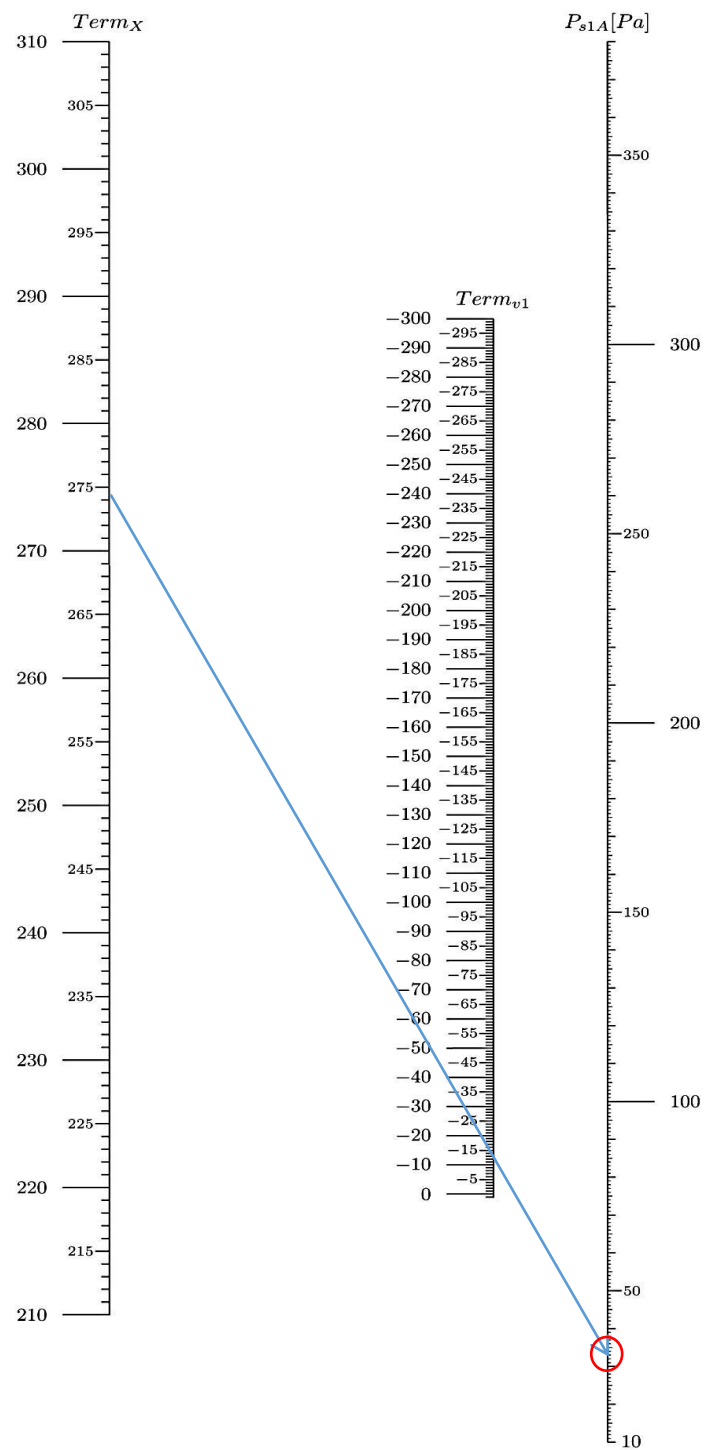


รูปที่ ง -13 ข โนโมแกรม $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 1 ถึง 20

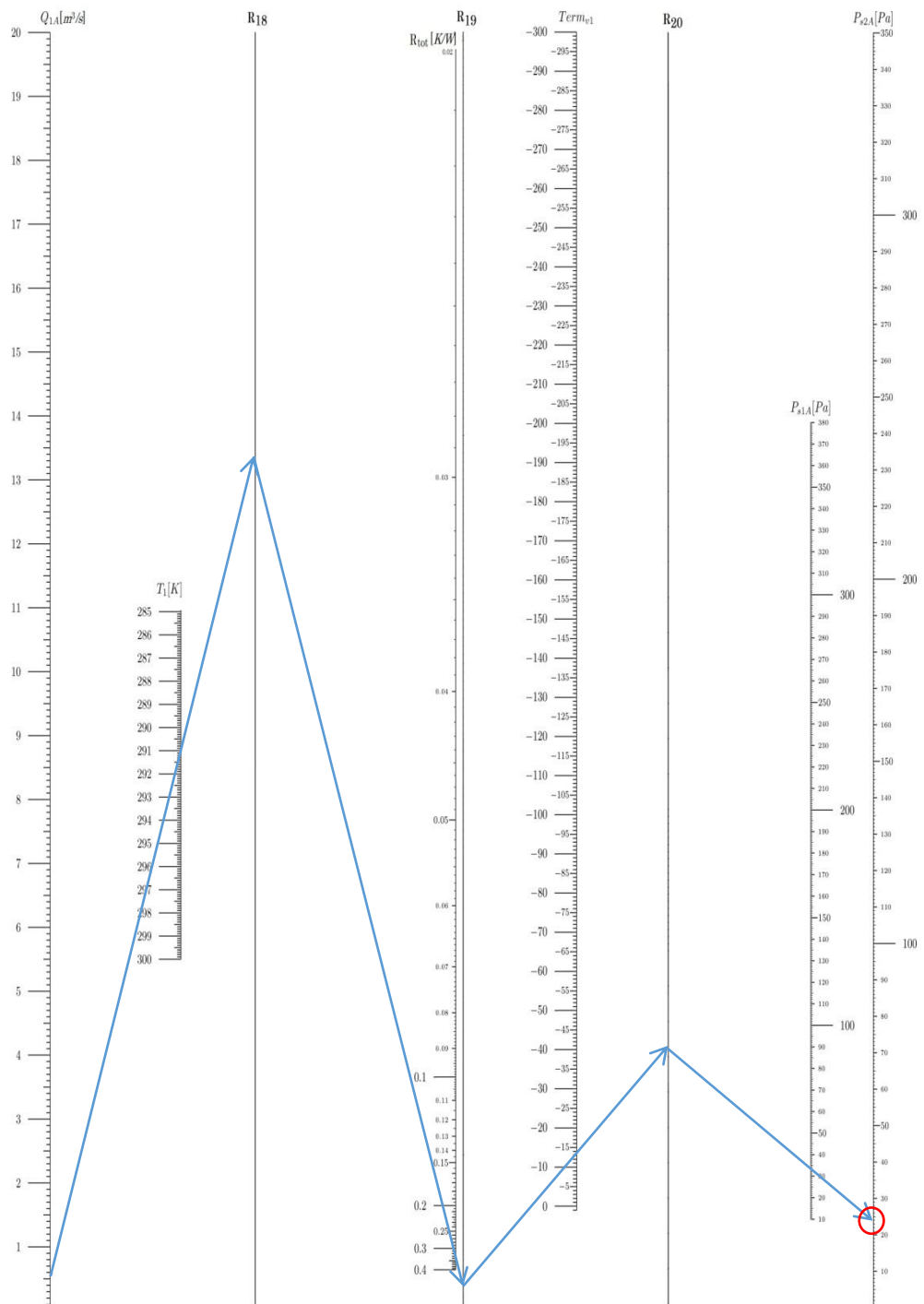
(R_{16}, R_{17} คือ แกนอ้างอิง)



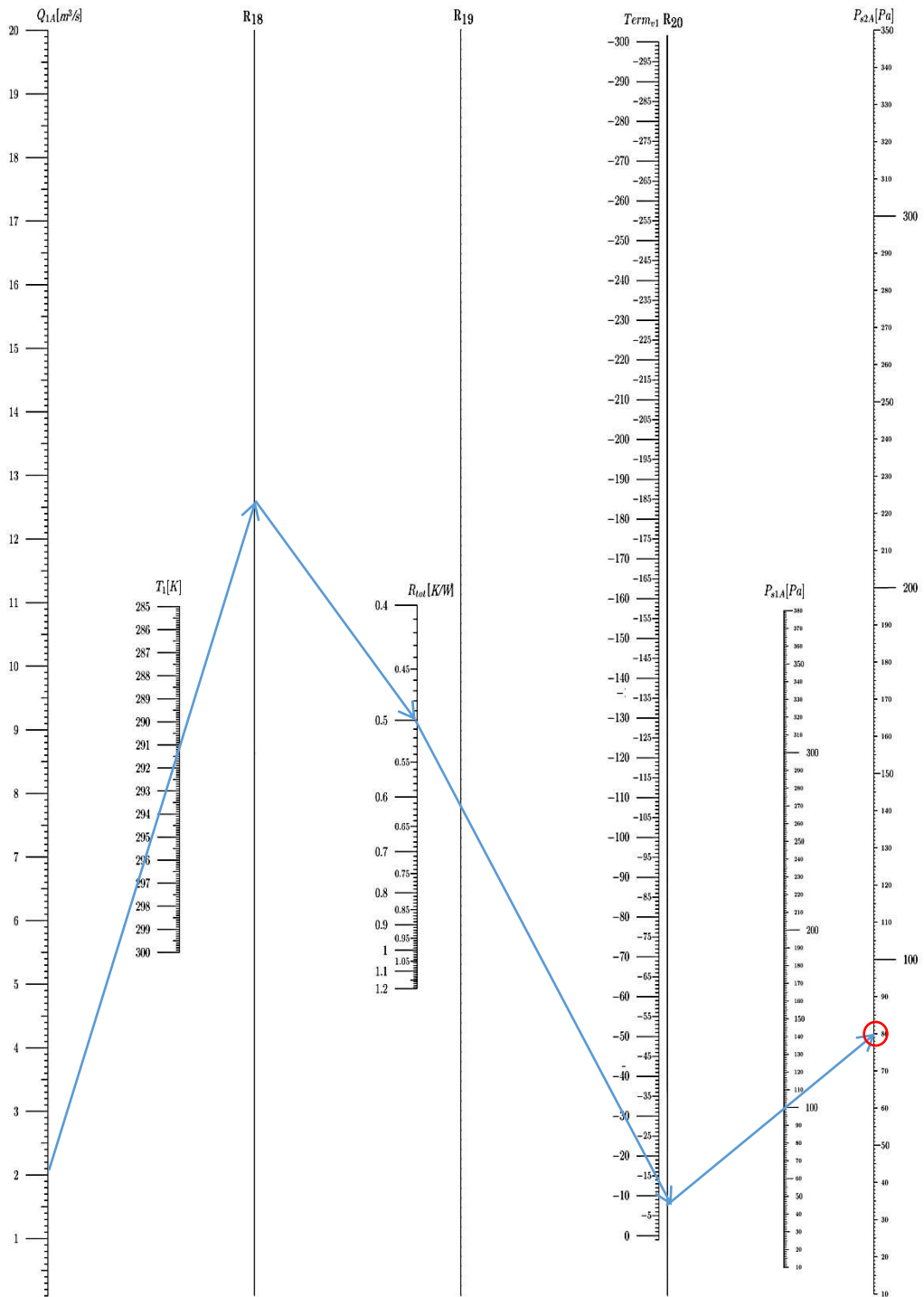
รูปที่ ง -13 ค โนโมแกรม $Term_x$ สำหรับ R_{16} ในช่วง 20 ถึง 85
 (R_{16}, R_{17} คือ แกนอ้างอิง)



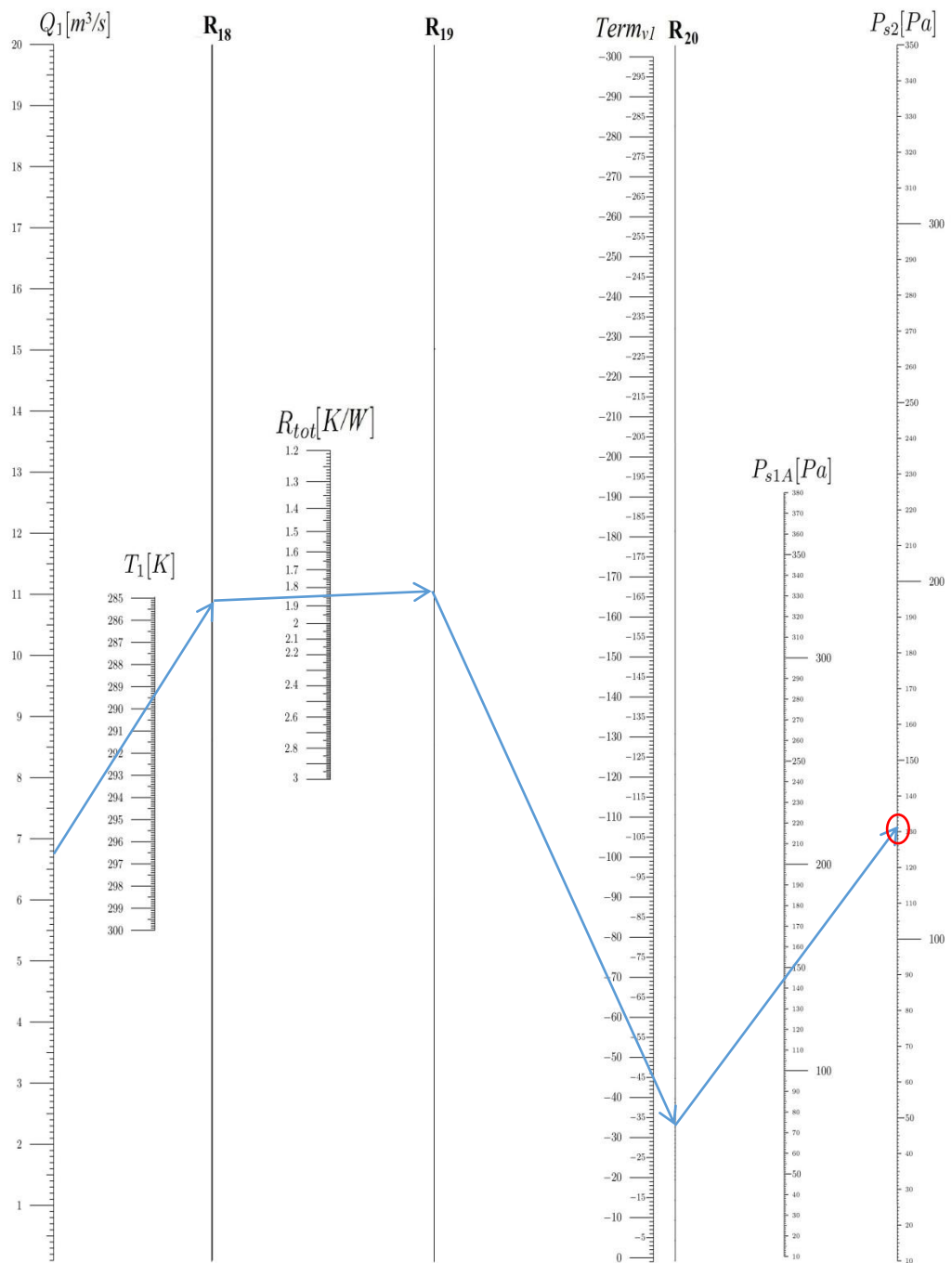
รูปที่ ง - 14 โนโมแกรมสำหรับหา $(P_{s,1})_A$
 (ใช้รูป 6 - 10 และ 6 - 11 ในการหา $Term_{v1}$ และ ใช้รูป ง - 13 ในการหา $Term_X$)



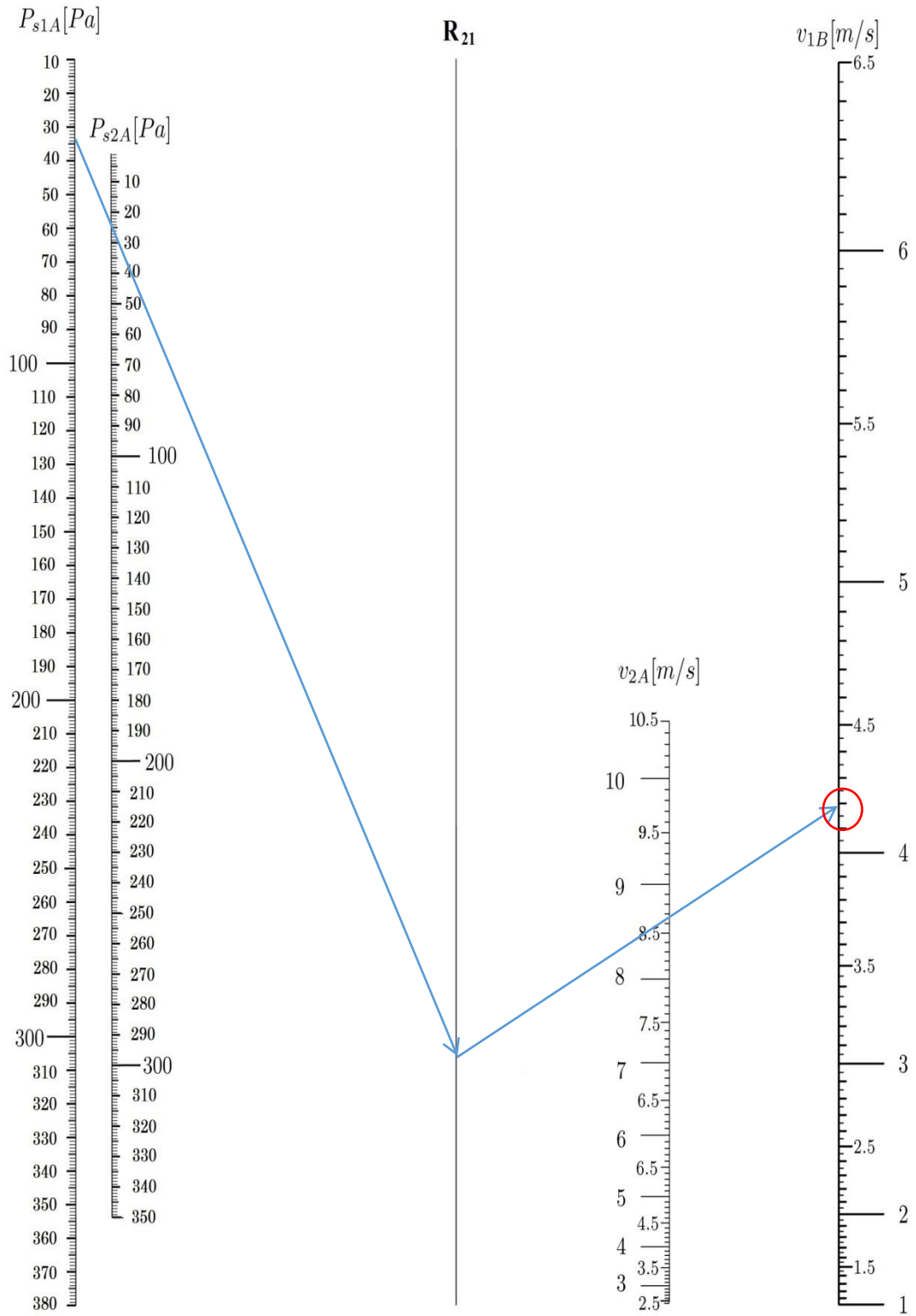
รูป ง - 15 ก โนโมแกรมสำหรับหาค่า $(P_{s,2})_A$ สำหรับ R_{tot} ในช่วง 0.02 kW ถึง 0.4 kW (R_{18} , R_{19} , R_{20} คือ แกนอ้างอิง และ ใช้รูป 6 - 10 และ 6 - 11 ในการหา $Term_{v1}$)



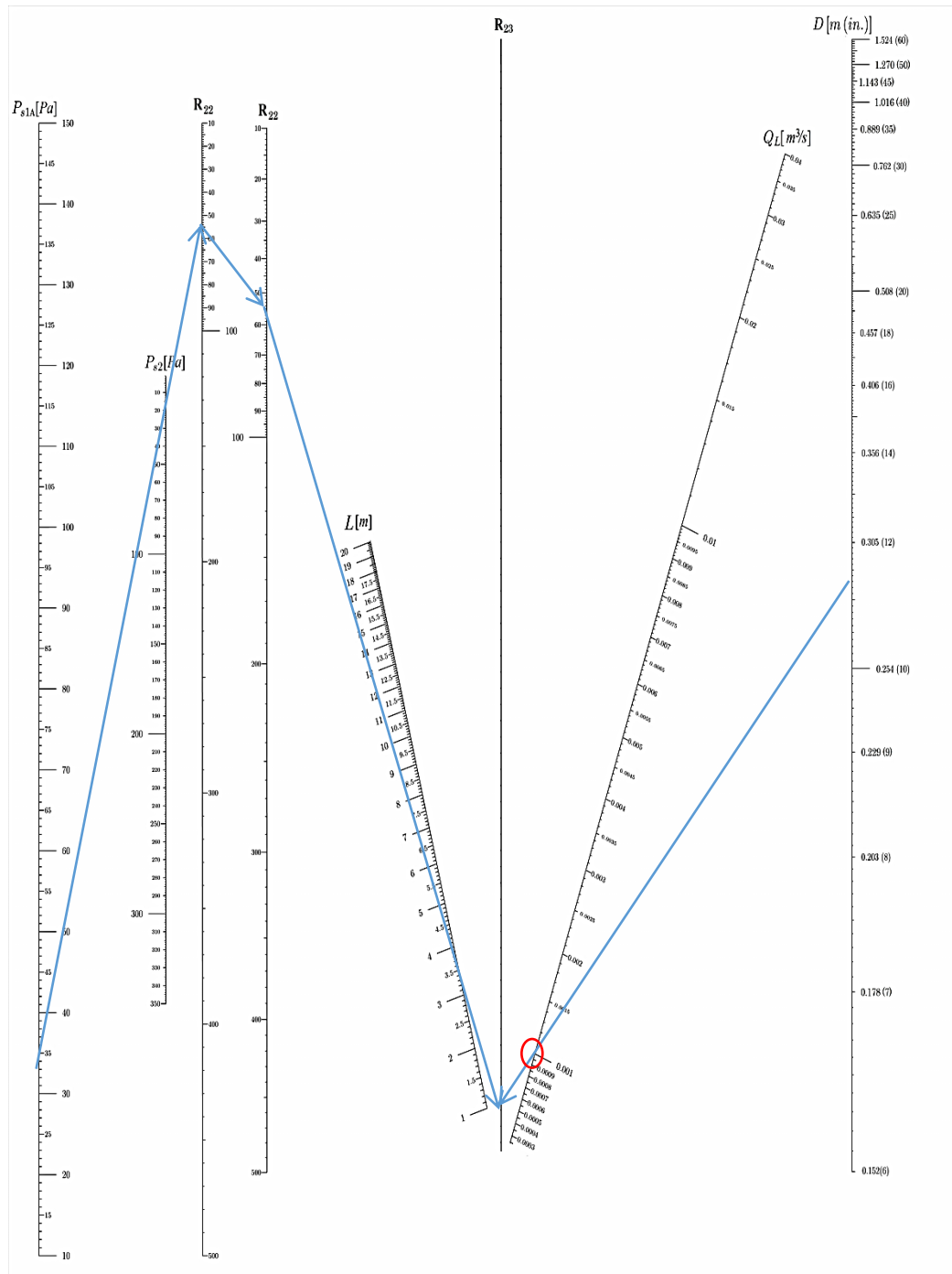
รูป ง - 15 ข โนมโมแกรมสำหรับหาค่า $(P_{s,2})_A$ สำหรับ R_{tot} ในช่วง 0.4 K/W ถึง 1.2 K/W (R_{18}, R_{19}, R_{20} คือ แกนอ้างอิง และ ใช้รูป ง - 10 และ ง - 11 ในการหา $Term_{v1}$)



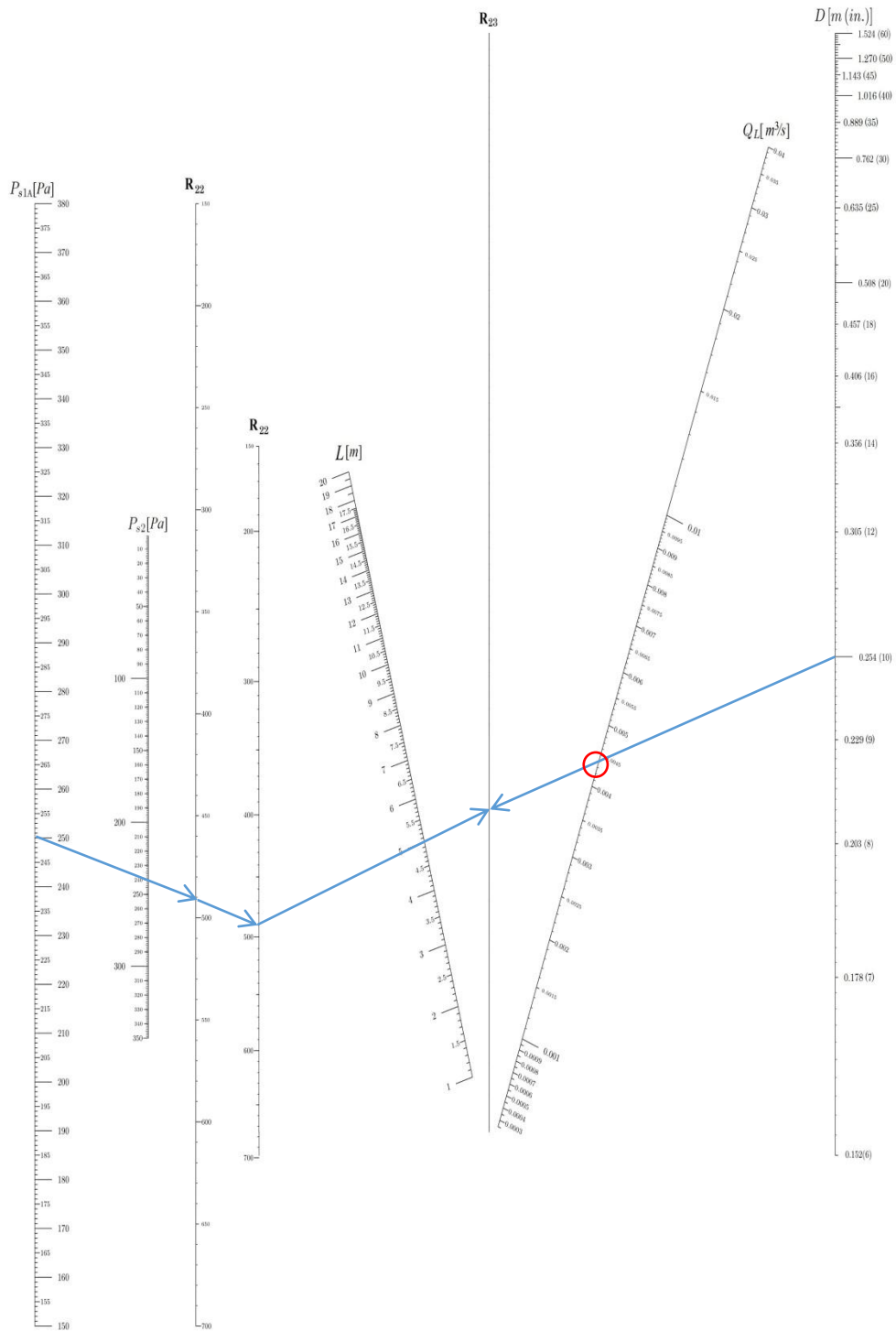
รูป ง - 15 ค โนมแกรมสำหรับหาค่า $(P_{s,2})_A$ สำหรับ R_{tot} ในช่วง 1.2 K/W ถึง 3 K/W (R_{18}, R_{19}, R_{20} คือ แกนอ้างอิง และ ใช้รูป ง - 10 และ ง - 11 ในการหา $Term_{v1}$)



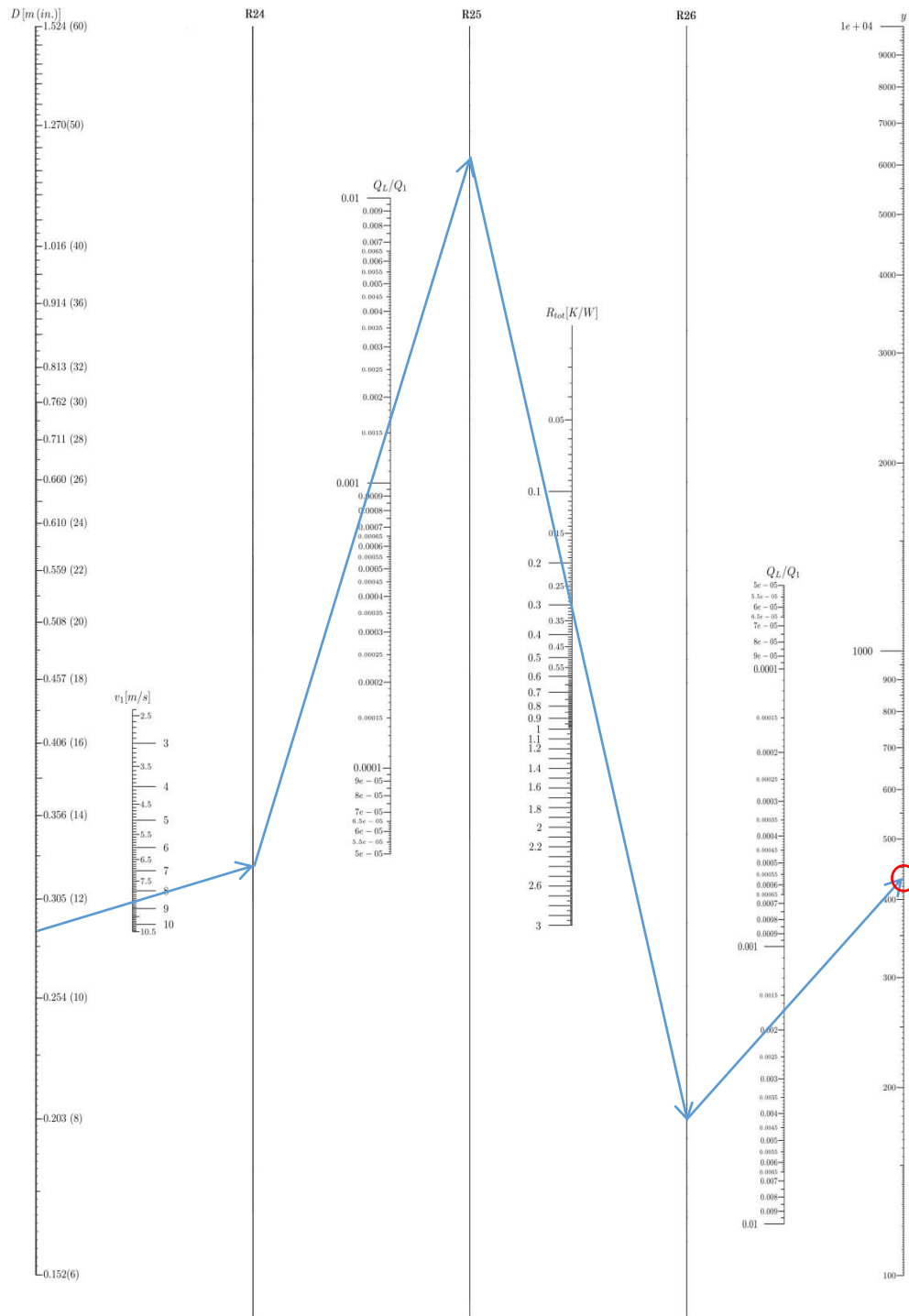
รูป ง - 16 โนมแกรมสำหรับหาค่า $v_{1,B}$
 (R_{21} คือ แกนอ้างอิง)



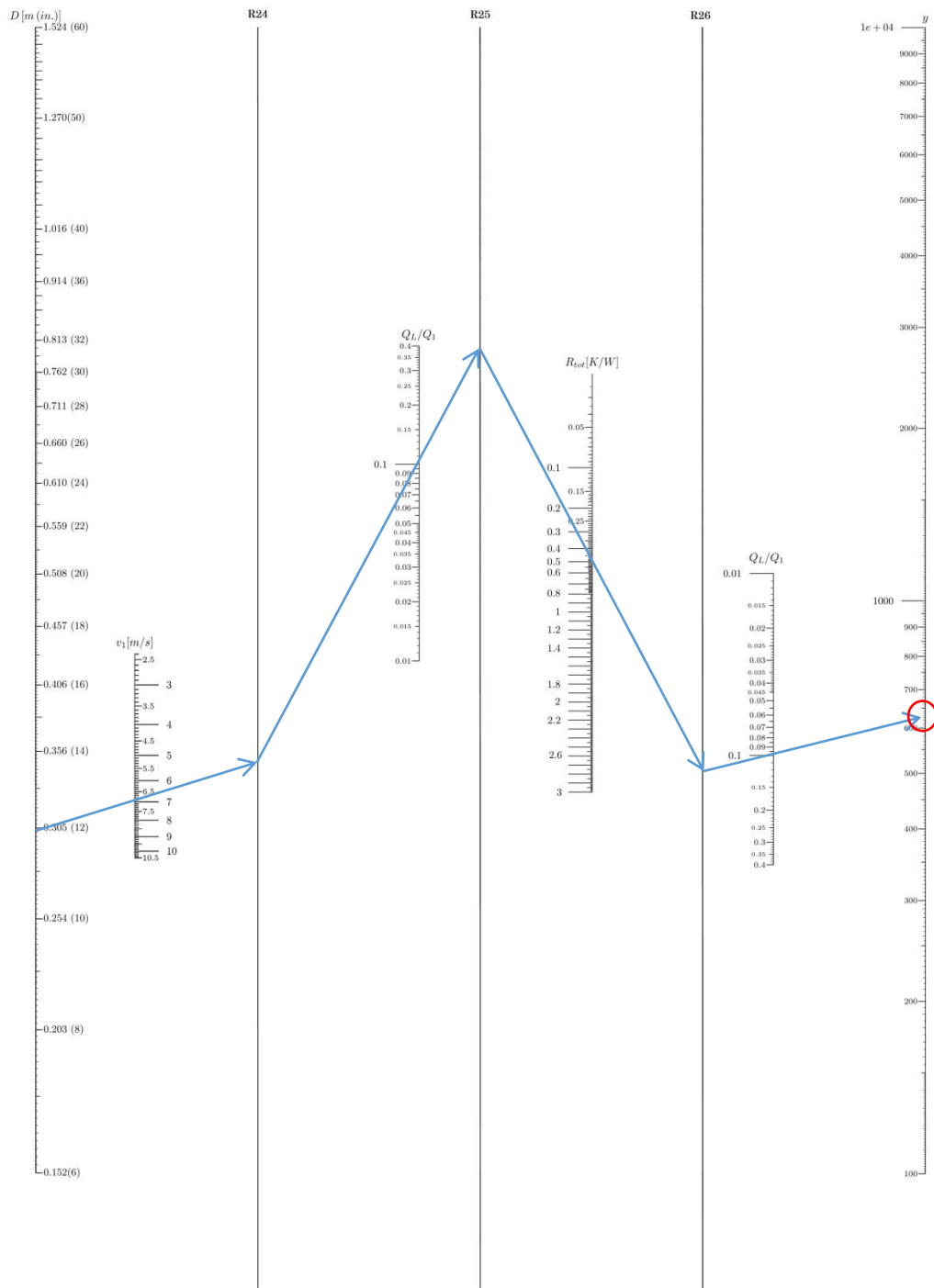
รูปที่ ๑๗ ก โนโมแกรมสำหรับการหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร (Q_L) สำหรับ P_{s1A} ในช่วง 10 Pa ถึง 150 Pa (R_{22} และ R_{23} คือ แกนอ้างอิง)



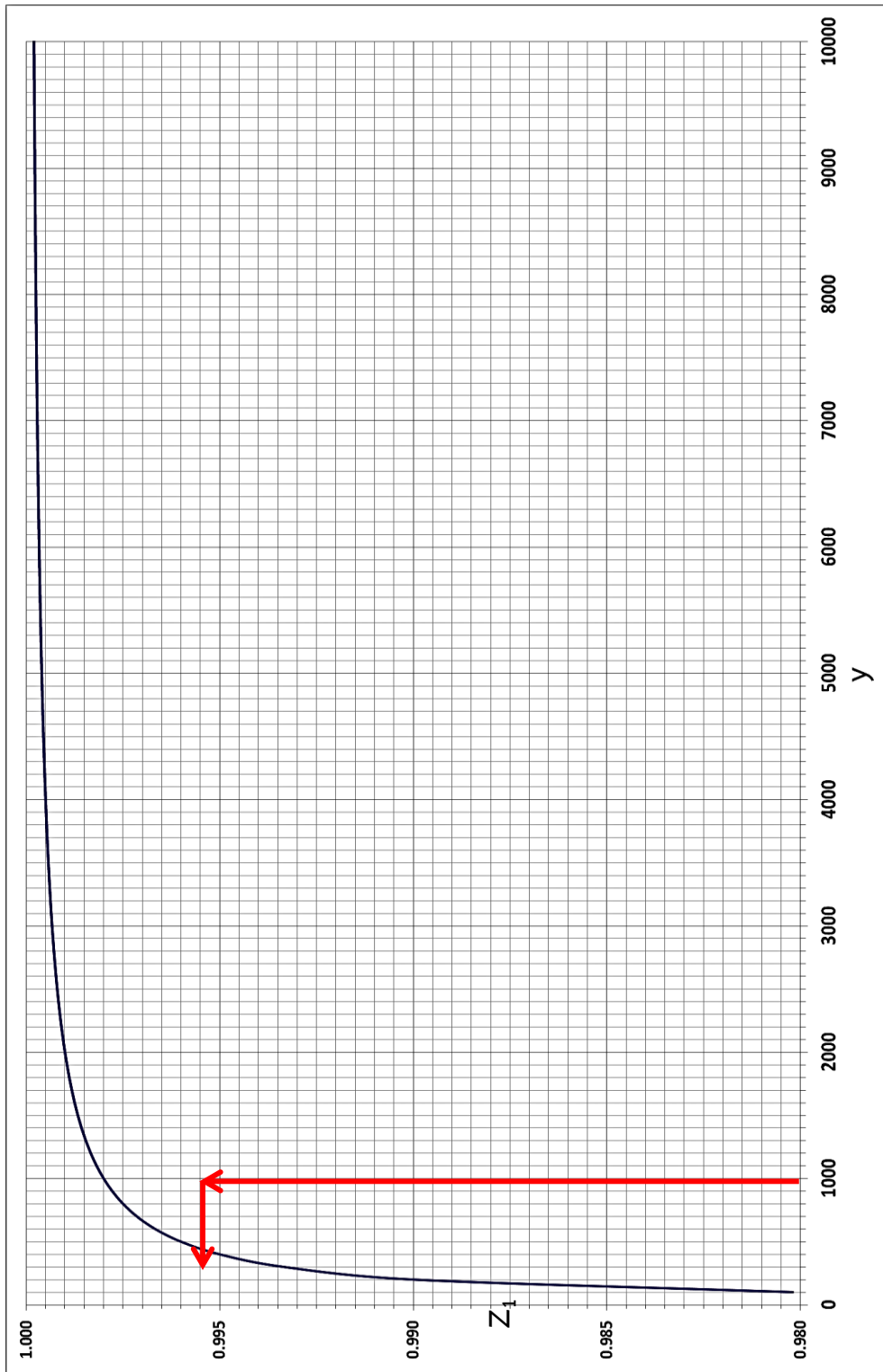
รูปที่ ๑๗ - ๑๗ ข โนโมแกรมสำหรับการหาอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตร (Q_L) สำหรับ P_{s1A} ในช่วง 150 Pa ถึง 380 Pa (R_{22} และ R_{23} คือ แกนอ้างอิง)



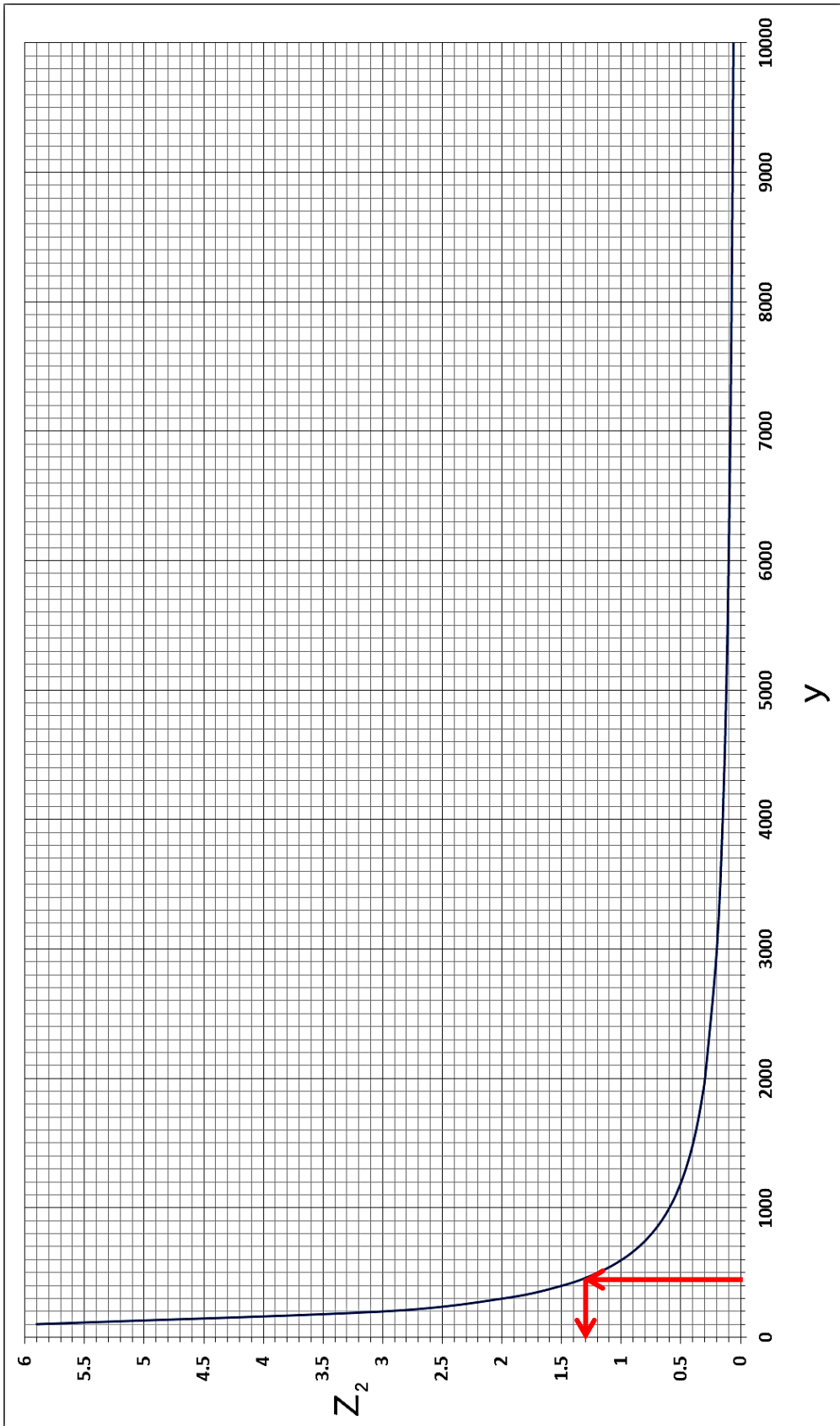
รูปที่ 18 ก. โนโมแกรมสำหรับการหา y สำหรับ Q_L/Q_1 ในช่วง 5×10^{-5} ถึง 0.01
 (R_{24} , R_{25} และ R_{26} คือ แกนอ้างอิง)



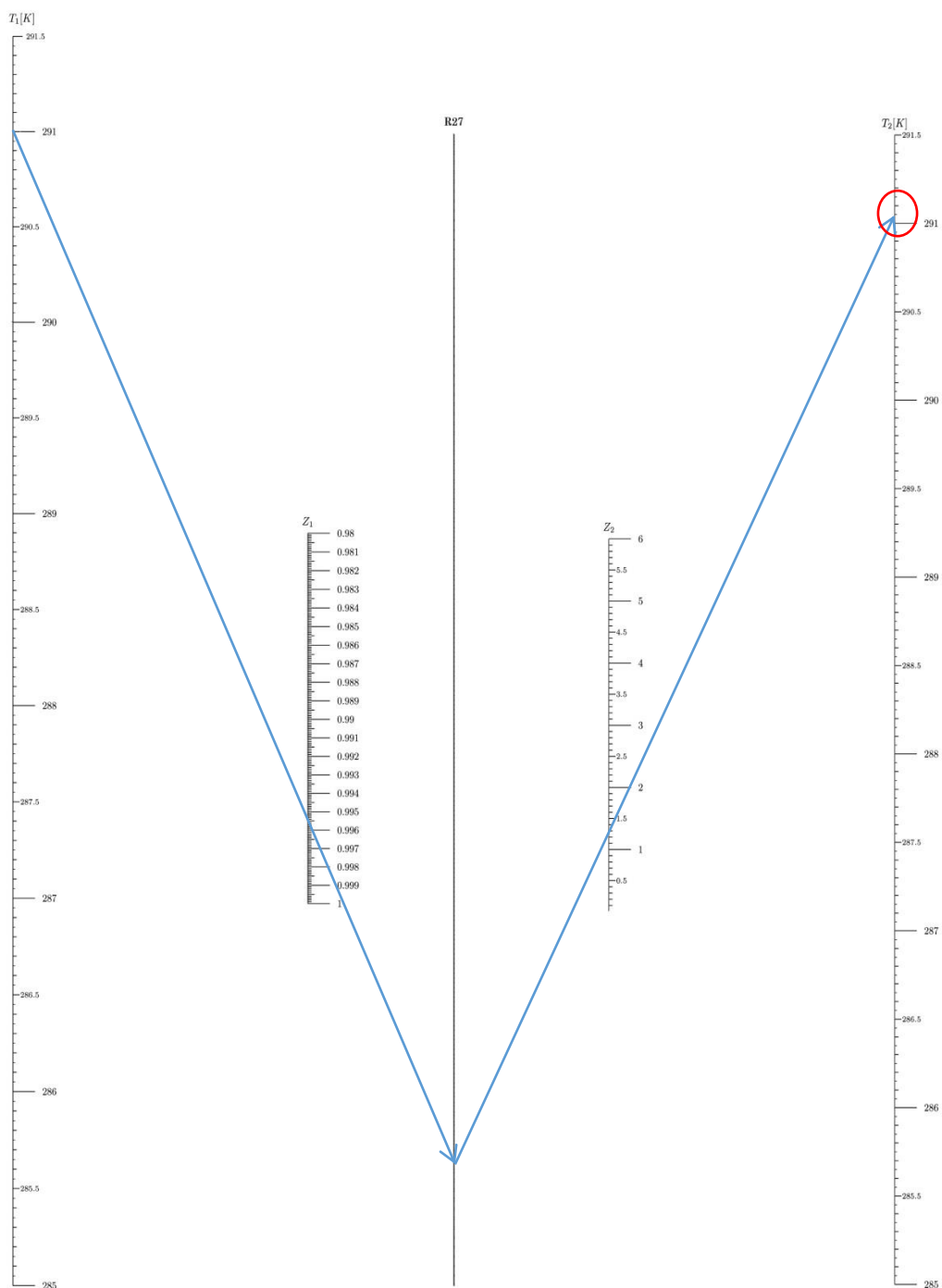
รูปที่ ง - 18 ข. โนโมแกรมสำหรับการหา y สำหรับ Q_L/Q_1 ในช่วง 0.01 ถึง 0.4 (R_{24} , R_{25} และ R_{26} คือ แกนอ้างอิง)



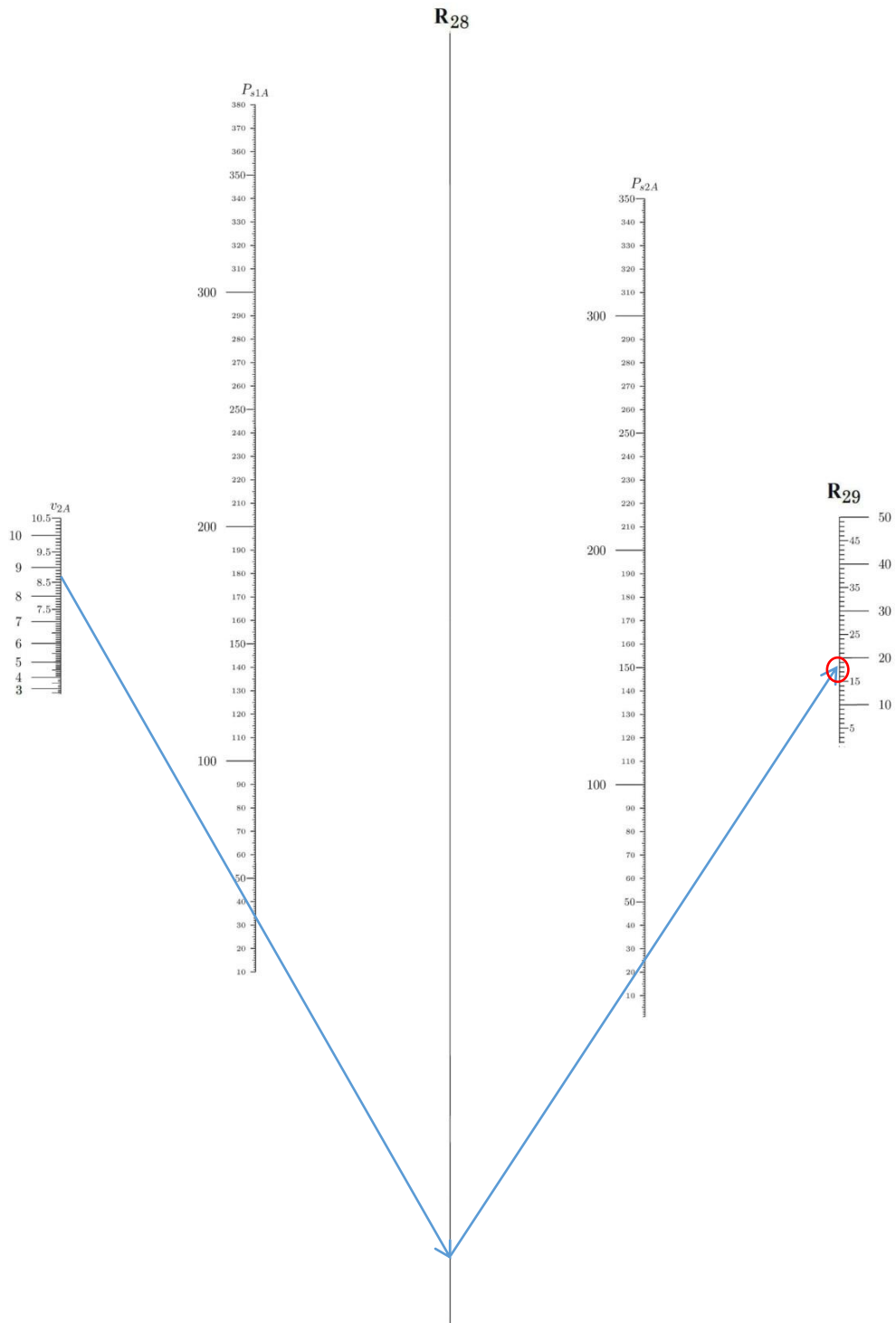
รูปที่ ง - 19 กราฟสำหรับค่า Z_1



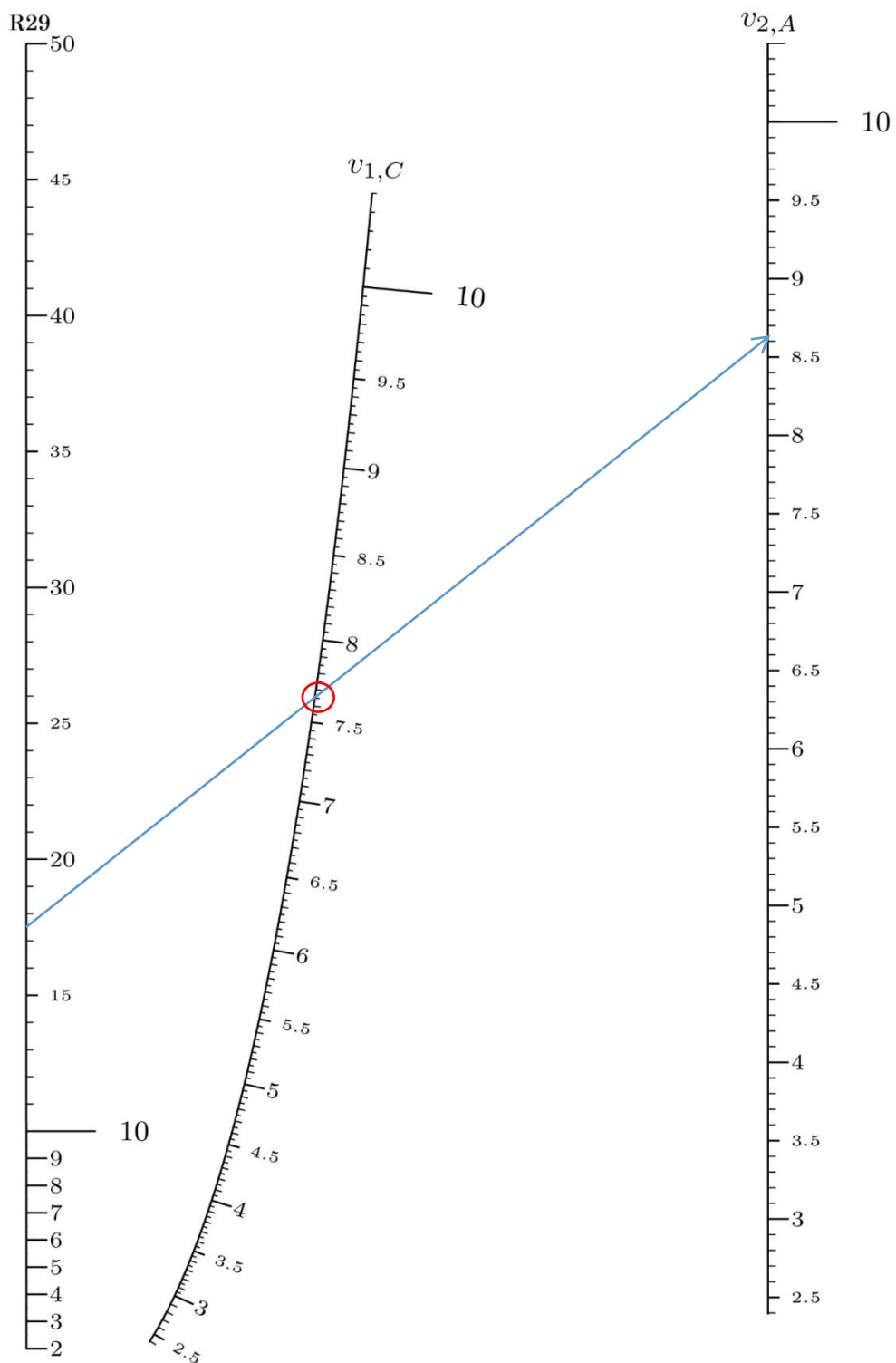
รูปที่ ง - 20 กราฟสำหรับค่า Z_2



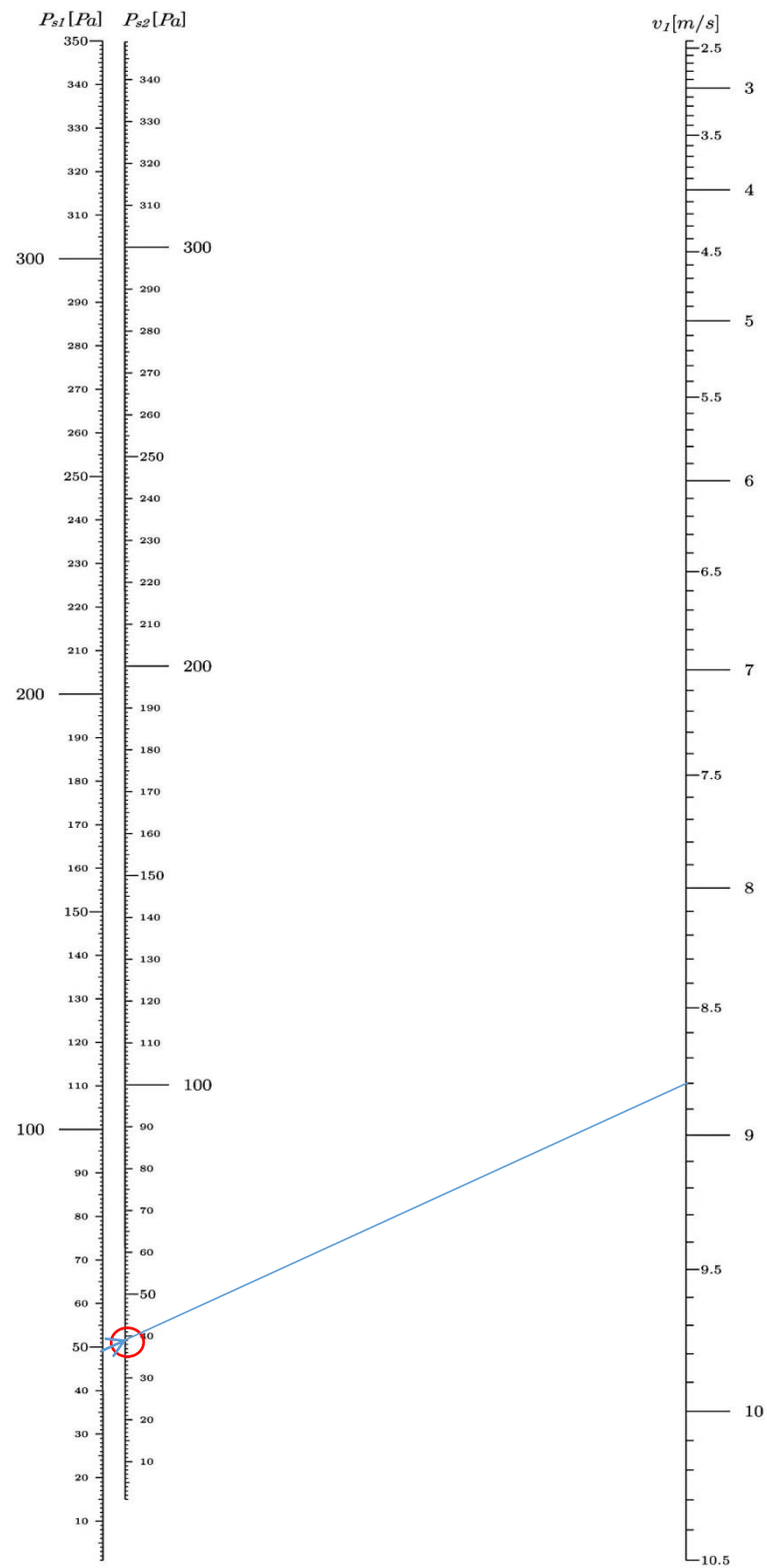
รูปที่ ง - 21 โนโมแกรมสำหรับการหา T_2
 (R_{27} คือ แกนอ้างอิง)



รูปที่ ง - 22 โนโมแกรมสำหรับการหา R_{29}
 (R_{28} คือ แกนอ้างอิง)



รูปที่ ง - 23 โนโมแกรมสำหรับการหา v_{1c}
 (R_{29} คือ แกนอ้างอิงหาได้จากรูป ง - 22)



รูปที่ ง - 24 โนโมแกรมสำหรับการหาความดันสถิตขาออกจากข้อ P_{S2}

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย ตลุยวัต แสงวิเชียรกิจ เกิดวันอังคารที่ 11 ธันวาคม พ.ศ. 2533 จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมจากโรงเรียนสวนกุหลาบวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2551 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2555 และ เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2556

