

การพัฒนาวิธีการออกแบบสำหรับท่อลมที่ทำจากผ้า



นายทวีพงศ์ สิริคุตตานนท์

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Development on Fabric Duct Design Method

Mr. Taweephong Sirikuttanon



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 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาวิธีการออกแบบสำหรับท่อลมที่ทำจากผ้า

โดย

นายทวีพงศ์ สิริคุตตานนท์

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร. เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยเป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญากรณ์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ดร. เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพล เขตเจนการ)

ทวีพงศ์ สิริคุตตานนท์ : การพัฒนาวิธีการออกแบบสำหรับท่อลมที่ทำจากผ้า (Development on Fabric Duct Design Method) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ดร. เชิดพันธ์ วิทยากรณ์, 240 หน้า.

ในปัจจุบัน ระบบท่อลมจะต้องคำนึงถึงรูปลักษณะความสวยงาม นอกเหนือจากการออกแบบระบบให้ได้การกระจายลมตามต้องการ จึงเริ่มมีการใช้ระบบท่อลมที่ทำจากวัสดุผ้าขึ้นมาแทนที่ท่อลมโลหะ แต่พบปัญหาด้านช่องเปิดที่ผิวท่อลมผ้าและความไม่คงรูปของวัสดุ ซึ่งมีอิทธิพลต่อการกระจายลม นอกจากนี้วิธีการออกแบบท่อลมที่มีอยู่ ยังไม่สามารถตอบโจทย์การออกแบบระบบท่อลมผ้าได้โดยตรง ทำให้งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายในการศึกษาและพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลมผ้า เพื่อนำไปสู่แนวทางการพัฒนาวิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้า โดยทำการทดลองการไหลผ่านท่อลมผ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว ด้วยการปรับเปลี่ยนปริมาณลมไหลเข้า ที่อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวมต่อขนาดท่อ (d_o/D) เท่ากับ 0.791, 1.118 และ 1.581 พร้อมทั้งตรวจสอบผลการทดลองด้วยโปรแกรมจำลองการไหล Ansys Fluent V.14 พบว่าพฤติกรรมของความดันสถิตและอัตราการไหลผ่านช่องเปิดจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากตำแหน่งขาเข้าท่อลมผ้า และมีค่ามากที่สุดที่ปลายท่อ นอกจากนี้ ยังต้องมีค่าความดันสถิตขั้นต่ำค่าหนึ่งที่ทำให้ท่อลมผ้าสามารถคงรูปได้อย่างเหมาะสม จากการทดลองยังพบว่าค่าอัตราส่วน d_o/D จะส่งผลต่อค่าขนาดและความสม่ำเสมอของความดันสถิตที่เกิดขึ้น

ผลการทดลองที่ได้ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยการสร้างแบบจำลองขึ้นมา 3 แบบคือ แบบจำลองสำหรับท่อตรง, ท่อที่มีช่องเปิด และข้อต่อ ซึ่งสามารถนำมาประกอบกันเป็นแนวท่อลมที่ผู้ออกแบบต้องการได้ การวิเคราะห์จะใช้หลักการเพิ่มขึ้นของความดันสถิต ที่คำนึงถึงข้อจำกัดด้านความดันสถิตตั้งต้น ความเร็วการไหล และระยะส่งลมที่ระบบสามารถทำได้

วิธีการออกแบบท่อลมผ้าที่พัฒนาขึ้นจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ 1. ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า ประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นท่อตรงต่อกับส่วนท่อที่มีช่องเปิด ซึ่งเป็นส่วนสำคัญของการออกแบบ เพราะจะส่งผลต่อความดันสถิตของพัดลม และผลลัพธ์ปลายท่อจะถูกนำไปเป็นปัจจัยทางเข้าของท่อลมท่อนถัดไป 2. ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้าซึ่งอาจเป็นท่อตรง ท่อที่มีช่องเปิด หรือข้อต่อตามรูปแบบการวางแนวท่อลม โดยการวิเคราะห์แต่ละส่วนจะใช้โมเดลที่ถูกพัฒนาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำให้ทราบขนาดท่อลมส่วนต่างๆ ขนาดช่องเปิดย่อย จำนวนช่องเปิดย่อย และความดันสถิตของพัดลม เพื่อให้สามารถนำไปสร้างเป็นระบบท่อลมผ้าในเชิงปฏิบัติ

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อนิสิต

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก

ปีการศึกษา 2558

5770182021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: FABRIC DUCT / PRESSURE LOSS / MATHEMATICAL MODEL / STATIC PRESSURE REGAIN / INFLATION / AIR DISTRIBUTION SYSTEM / AIR DUCT DESIGN / OUTLET / PERFORATED DUCT / NOMOGRAM

TAWEEPHONG SIRIKUTTANON: Development on Fabric Duct Design Method. ADVISOR: CHIRDPUN VITOORAPORN, Ph.D., 240 pp.

At present, air duct system is being concerned on its outlook as part of interior decoration apart from being able to properly distribute air as required. Therefore fabric duct is starting to play as a choice for metal duct replacement. However, surface openings on fabric duct and duct shape instability are found to be influent to the distribution of air from the duct. Moreover, present air duct design methods cannot be applied directly to the design of fabric duct system. Therefore this research is aimed to study and develop the mathematical model of fabric duct in order to develop a fabric duct design method. The experiment to study the air flow through fabric duct is set up by using fabric duct with 10 inches in diameter. The inlet air flow rate is varied. The ratio between equivalent diameter for the total opening area and the duct diameter (aperture ratio, d_o/D) of 0.791, 1.118 and 1.581 are used in the experiment. Results from experiments are verified by using air flow simulation program (Ansys Fluent v.14). It is found that the duct static pressure and outlet airflow rate trend to increase along the length of the duct. The highest values of both are found at the end of the duct. In order to keep the duct shape stable, the minimum static pressure must be maintained within the fabric duct. Results from experiments also show that the ratio of d_o/D affects not only the magnitude of static pressure inside the duct but also the uniformity of the pressure itself.

Results obtained from experiments are used to develop the mathematical model. It is consisted of 3 models altogether which are straight duct model, perforated duct model and duct fitting model. These three models can be used together to comprise any fabric duct system as required by the duct designer. The static regain principle with concern on the limitation of initial static pressure, air flow velocity and the distance of air flow (throw length) is used for analysis.

The fabric duct design method is comprised of 2 parts. The first part is the fabric duct inlet portion that consists of straight duct section and perforated duct section connected together. This portion is the most important part of design because its result can affect the fan static pressure and the outcomes from this part are used as inputs to the next duct section. The second part is the duct extension portion which could be the straight duct section, perforated duct section and duct fitting section according to the duct system layout. Each section in this portion is analyzed by using the nomograms developed from the mathematical model. By using these two portions together, results on duct diameters for different sections, diameter and number of outlets as well as static pressure required by the fan can be obtained and hence lead to the construction of practical fabric duct system.

Department: Mechanical Engineering

Student's Signature

Field of Study: Mechanical Engineering

Advisor's Signature

Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร.เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์ อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้กรุณาเสียสละเวลาอันมีค่า ในการถ่ายทอดความรู้ ประสบการณ์ กระบวนการคิดวิเคราะห์ การสื่อสาร และการแก้ไขปัญหาต่างๆที่เกิดขึ้นในการทำงานวิจัย อย่างเป็นระบบ อันนำมาซึ่งความถูกต้องสมบูรณ์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอกราบขอบพระคุณ คณะกรรมการวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. พงษ์ธร จรรย์ญาณกรณ์ ประธานกรรมการ รองศาสตราจารย์ ดร. จิตติน แดงเที่ยง กรรมการ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทสพล เขตเจนการ ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัย ที่ได้กรุณาเสียเวลาอันมีค่าและเอื้อเฟื้อคำแนะนำต่างๆ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ยงเจริญ ที่ให้ความรู้และความอนุเคราะห์อุปกรณ์การทดลองของงานวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่คอยอบรม ชี้แนะ สั่งสอน และให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ มาโดยตลอด รวมทั้งข้าพเจ้าขอขอบคุณนายตุลยวัต แสงวิเชียรกิจ และกัลยาณมิตรทั้งหลายของข้าพเจ้า ที่คอยช่วยเหลือ และ ให้กำลังใจในการทำงานวิจัยนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ฐ |
| สารบัญรูปภาพ..... | ฑ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | ท |
| บทที่ 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ที่มาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์ | 2 |
| 1.3 ขอบเขตและแนวทางการวิจัย | 2 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 3 |
| บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรม..... | 4 |
| 2.1 ลักษณะการกระจายตัวของความดัน..... | 4 |
| 2.1.1 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ต่อการกระจายตัวของความดัน | 5 |
| 2.1.2 ผลของความยาวระหว่างช่องเปิดต่อการกระจายตัวของความดัน..... | 8 |
| 2.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องเปิดต่อการกระจายตัวของความดัน | 10 |
| 2.2 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อ | 11 |
| 2.3 ลักษณะการกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด | 12 |
| บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง..... | 14 |
| 3.1 ลักษณะของการไหลในท่อ (Characteristics of flow inside duct) | 14 |
| 3.2 สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)..... | 16 |

| | |
|--|----|
| 3.3 การสูญเสียของการไหลในท่อ (Loss of flow inside duct)..... | 17 |
| 3.3.1 การสูญเสียหลัก (Major Loss)..... | 19 |
| 3.3.2 การสูญเสียรอง (Minor Loss)..... | 19 |
| 3.4 อัตราการไหลผ่านช่องเปิด (Outlet Air Flow) | 20 |
| 3.5 ระยะส่งลม (throw)..... | 21 |
| 3.5.1 ช่องจ่ายลมแบบวงกลม (Circular jets)..... | 23 |
| 3.6 วิธีการออกแบบท่อลม..... | 24 |
| 3.6.1 Equal Friction Method | 24 |
| 3.6.2 Static Regain Method | 25 |
| 3.6.3 Velocity Reduction Method..... | 26 |
| 3.6.4 T-Method | 27 |
| 3.7 การวิเคราะห์ทางมิติ (Dimensional Analysis)..... | 28 |
| 3.7.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง..... | 28 |
| 3.7.2 มิติปฐมภูมิ (Primary Dimension) | 28 |
| 3.7.3 ทฤษฎี Buckingham Pi Theorem..... | 29 |
| 3.8 สมบัติเชิงกลของวัสดุ | 30 |
| 3.8.1 ความเค้นและความเครียด | 31 |
| 3.8.2 ความเค้นคราก (Yield stress) | 31 |
| 3.8.3 เกจวัดความเครียด (Strain Gauge) | 32 |
| 3.8.4 ภาชนะความดัน (Pressure Vessel)..... | 33 |
| บทที่ 4 การทดลอง | 35 |
| 4.1 แผนการศึกษาทดลอง | 35 |
| 4.2 ชุดทดลองสำหรับท่อลมผ้า..... | 35 |

| | |
|---|----|
| 4.2.1 ส่วนทางเข้าท่อลมผ้า | 36 |
| 4.2.1.1 บานปรับลม (Volume Damper)..... | 36 |
| 4.2.1.2 พัดลม (FAN)..... | 37 |
| 4.2.1.3 ท่อลดขนาด (Duct Reducer) | 37 |
| 4.2.1.4 ชุดจัดเรียงการไหล (Flow Straightener)..... | 38 |
| 4.2.1.5 ท่อตรง (Straight Duct)..... | 38 |
| 4.2.2 ส่วนท่อลมผ้าทดสอบ..... | 38 |
| 4.2.2.1 ท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 | 39 |
| 4.2.2.2 ท่อลมผ้ารูปแบบที่ 2..... | 39 |
| 4.2.2.3 ท่อลมผ้ารูปแบบที่ 3..... | 40 |
| 4.2.3 ส่วนทางออกท่อลมผ้า..... | 40 |
| 4.2.4 การวัดค่าตัวแปรต่างๆ | 40 |
| 4.2.4.1 การวัดความดันสถิต | 40 |
| 4.2.4.2 การวัดความดันรวม..... | 41 |
| 4.2.4.3 การวัดความเร็วการไหลผ่านช่องเปิด..... | 41 |
| 4.2.4.4 การวัดความคงรูปของท่อลมผ้า | 41 |
| 4.2.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)..... | 42 |
| 4.3 ผลลัพธ์การทดลองของการไหลผ่านท่อลมผ้า | 43 |
| 4.3.1 ความดันรวมลดที่เกิดขึ้นในการไหลผ่านท่อลมผ้า | 44 |
| 4.3.2 พฤติกรรมของความดันสถิตในการไหลผ่านท่อลมผ้า..... | 44 |
| 4.3.3 พฤติกรรมของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด..... | 45 |
| 4.3.4 คุณสมบัติทางกลของวัสดุผ้าจากการทดสอบแรงดึง | 47 |
| 4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปของตัวแปรไร้มิติ | 49 |

| | |
|---|----|
| 4.5 การพัฒนาฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้า..... | 50 |
| 4.6 ซีดจำกัดการใช้งานของค่าฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้า..... | 51 |
| บทที่ 5 ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมจำลองการไหล..... | 53 |
| 5.1 ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) | 53 |
| 5.2 Turbulent Models : Standard k-epsilon..... | 55 |
| 5.3 โปรแกรมจำลองการไหล | 57 |
| 5.3.1 โครงสร้าง (Geometry)..... | 57 |
| 5.3.2 การแบ่งเมช (Meshing)..... | 58 |
| 5.3.3 การตั้งค่าโปรแกรม | 59 |
| 5.3.3.1 หัวข้อ General..... | 60 |
| 5.3.3.2 หัวข้อ Model | 60 |
| 5.3.3.3 หัวข้อ Material | 61 |
| 5.3.3.4 หัวข้อ Boundary Condition..... | 61 |
| 5.3.3.5 หัวข้อ Solution Initialization..... | 63 |
| 5.3.3.6 หัวข้อ Run Calculation | 63 |
| 5.4 ผลลัพธ์ของการจำลองการไหลผ่านท่อลมผ้า..... | 64 |
| 5.4.1 ลักษณะของเส้นระดับที่เกิดขึ้นในการไหลผ่านท่อลมผ้า..... | 64 |
| 5.4.2 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการทดลอง..... | 65 |
| บทที่ 6 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบท่อลมผ้า..... | 68 |
| 6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลผ่านระบบท่อลมผ้า..... | 68 |
| 6.1.1 แบบจำลองการไหลผ่านท่อตรง (Straight Duct)..... | 69 |
| 6.1.2 แบบจำลองการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด (Perforated Duct) | 70 |
| 6.1.3 แบบจำลองการไหลผ่านข้อต่อ (Fitting)..... | 71 |

| | |
|--|----|
| 6.2 การวิเคราะห์ระบบท่อลมผ้า..... | 72 |
| 6.2.1 การวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า..... | 73 |
| 6.2.1.1 การวิเคราะห์ชุดสมการด้วยวิธีความดันสถิตได้คีน | 75 |
| 6.2.1.2 การวิเคราะห์การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย..... | 75 |
| 6.2.1.3 ผังงานการวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า..... | 76 |
| 6.2.2 การวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า..... | 78 |
| 6.2.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองท่อตรง..... | 78 |
| 6.2.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองท่อที่มีช่องเปิด | 79 |
| 6.2.2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองข้อต่อ..... | 79 |
| 6.2.2.4 ผังงานการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า | 79 |
| 6.3 เปรียบเทียบผลของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 81 |
| บทที่ 7 การออกแบบระบบท่อลมผ้าโดยใช้โนโมแกรม | 84 |
| 7.1 หลักพื้นฐานของการสร้างโนโมแกรม..... | 84 |
| 7.1.1 โนโมแกรมแบบสเกลคู่ขนาน (Parallel Scale Nomogram)..... | 85 |
| 7.2 วิเคราะห์การสร้างโนโมแกรมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์..... | 86 |
| 7.2.1 โนโมแกรมของท่อตรง..... | 86 |
| 7.2.2 โนโมแกรมของท่อที่มีช่องเปิด | 87 |
| 7.2.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสร้างโนโมแกรม..... | 88 |
| 7.2.2.2 การสร้างโนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิต | 90 |
| 7.2.2.3 การสร้างโนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่า พื้นที่ช่องเปิดรวม..... | 92 |
| 7.2.3 โนโมแกรมของข้อต่อ | 92 |
| 7.2.3.1 การสร้างโนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศ 1->2..... | 94 |

| | |
|--|-----|
| 7.2.3.2 การสร้างโนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศ 1->3 | 94 |
| 7.2.4 โนโมแกรมของการกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย | 94 |
| 7.3 วิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยโนโมแกรม | 95 |
| 7.3.1 ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า | 95 |
| 7.3.2 ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า | 96 |
| 7.3.2.1 ท่อตรง | 96 |
| 7.3.2.2 ท่อที่มีช่องเปิด | 97 |
| 7.3.2.3 ข้อต่อ | 97 |
| 7.3.3 การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย | 98 |
| บทที่ 8 สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ | 109 |
| 8.1 สรุปผลการวิจัย | 109 |
| 8.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการไหลผ่านท่อลมผ้า | 109 |
| 8.1.1.1 ความดันสถิต (P_s) และอัตราการไหลผ่านช่องเปิด (q_0) | 109 |
| 8.1.1.2 อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวมต่อขนาดท่อ (d_0/D) | 110 |
| 8.1.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ | 111 |
| 8.1.3 วิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้า | 112 |
| 8.2 ข้อเสนอแนะ | 113 |
| รายการอ้างอิง | 114 |
| ภาคผนวก ก ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้า | 118 |
| ภาคผนวก ข การแสดงผลในรูปของตาราง | 125 |
| ภาคผนวก ค การแสดงผลในรูปของกราฟ | 141 |
| ภาคผนวก ง การแสดงผลจากโปรแกรมจำลองการไหลในรูปเส้นระดับ | 174 |

| | |
|---|-----|
| ภาคผนวก จ ตัวอย่างการออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยโนโมแกรมและวิธีของผู้ผลิต DUCTSOX... | 197 |
| ภาคผนวก ฉ ชุดคำสั่งทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์..... | 224 |
| ภาคผนวก ช เครื่องมือการวัดสำหรับการทดลอง..... | 236 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ | 240 |



สารบัญตาราง

| | |
|----------------------------------|----|
| ตารางที่ 4-1 ท่อลมผ้าทดสอบ | 39 |
|----------------------------------|----|



สารบัญรูปภาพ

| | |
|---|----|
| รูปที่ 2-1 แบบจำลองของ Ibrahim Tas and Raymond A. A. Bryant (1986) ^[1] | 4 |
| รูปที่ 2-2 การกระจายตัวของความดันสถิตและความดันรวม ^[1] | 5 |
| รูปที่ 2-3 ปริมาตรควบคุมที่พิจารณา ^[2] | 5 |
| รูปที่ 2-4 ลักษณะของชุดทดลอง ^[2] | 6 |
| รูปที่ 2-5 ความดันสถิตต่อระยะทางตามแนวท่อที่เกิดขึ้นที่ค่า AR ต่าง ๆ ^[3] | 6 |
| รูปที่ 2-6 ลักษณะของระบบท่อที่ทำด้วยวัสดุผ้า (FADS) ^[4-6] | 7 |
| รูปที่ 2-7 แสดงตำแหน่งการวัดความดันและความเร็วในท่อ FADS ^[4-6] | 7 |
| รูปที่ 2-8 การกระจายตัวของความดันสถิตที่ค่า AR ต่าง ๆ ^[4-6] | 8 |
| รูปที่ 2-9 ความดันสถิตต่อระยะทางตามแนวท่อที่เกิดขึ้น ^[7] | 9 |
| รูปที่ 2-10 ความดันสถิตต่อระยะทางตามแนวท่อที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L/D ที่ AR ต่าง ๆ กัน ^[7] | 9 |
| รูปที่ 2-11 ลักษณะของช่องเปิด ^[8] | 10 |
| รูปที่ 2-12 ความดันสถิตต่อระยะทางตามแนวท่อที่เกิดขึ้น ในรูปร่างช่องเปิดใดๆ ^[8] | 10 |
| รูปที่ 2-13 การกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อ จากงานวิจัยของ Ibrahim Tas and Raymond A. A. Bryant (1986) ^[1] | 11 |
| รูปที่ 2-14 การกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อ จากงานวิจัยของ Khaled El Moueddeb (1996) ^[2, 3] | 11 |
| รูปที่ 2-15 รูปร่างลักษณะของโมเดล ^[9] | 12 |
| รูปที่ 2-16 การกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด ^[9] | 12 |
| รูปที่ 2-17 การกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด ^[2, 3] | 13 |
| รูปที่ 2-18 การกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดกรณีรูปร่างต่างๆ ^[8] | 13 |
| รูปที่ 3-1 รูปร่างการกระจายตัวของความเร็วของการไหลในท่อ ^[10] | 15 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 3-2 ลักษณะของการไหลภายในท่อ ^[11] | 15 |
| รูปที่ 3-3 ระดับอ้างอิงของสมการเบอร์นูลลี ^[12] | 16 |
| รูปที่ 3-4 ปริมาตรควบคุมที่พิจารณา ^[12] | 17 |
| รูปที่ 3-5 เส้นการไหลบริเวณที่ลมไหลออกจากช่องเปิด..... | 20 |
| รูปที่ 3-6 สัมประสิทธิ์การจ่ายผ่านช่องเปิด (Newman, 1989) ^[2] | 21 |
| รูปที่ 3-7 แสดงการแบ่งเขตของการกระจายลมจากหัวจ่ายลม ^[14] | 22 |
| รูปที่ 3-8 การกระจายตัวของความเร็วผ่านช่องเปิดแบบวงกลม ^[15] | 23 |
| รูปที่ 3-9 การกระจายตัวของความดันที่เกิดขึ้นในวิธี Static Regain ^[17] | 25 |
| รูปที่ 3-10 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านท่อลมผ้า..... | 28 |
| รูปที่ 3-11 กราฟความเค้นกับความเครียด ^[19] | 30 |
| รูปที่ 3-12 การหาความเค้นคราก ^[19] | 32 |
| รูปที่ 3-13 เวกวัดความเครียด ^[20] | 32 |
| รูปที่ 3-14 Cylindrical Pressure Vessel ^[21] | 33 |
| รูปที่ 3-15 Hoop Stress และ Longitudinal Stress ^[21] | 33 |
| รูปที่ 4-1 แสดงภาพ 3 มิติของชุดทดลอง..... | 36 |
| รูปที่ 4-2 แสดงภาพ 2 มิติของชุดทดลองและอุปกรณ์การวัด | 36 |
| รูปที่ 4-3 แบบของบานปรับลม | 37 |
| รูปที่ 4-4 พัดลม FSA 315 CM CW 90 | 37 |
| รูปที่ 4-5 โครงสร้างของท่อลดขนาด | 38 |
| รูปที่ 4-6 ลักษณะของท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 | 39 |
| รูปที่ 4-7 ลักษณะของท่อลมผ้ารูปแบบที่ 2..... | 39 |
| รูปที่ 4-8 ลักษณะของท่อลมผ้ารูปแบบที่ 3..... | 40 |
| รูปที่ 4-9 การวัดความดันสถิตและความดันรวม ^[11] | 41 |

| | |
|--|----|
| รูปที่ 4-10 เภจวัดความเครียด ^[20] | 42 |
| รูปที่ 4-11 แสดงขนาดชั้นผ้าทดสอบ..... | 43 |
| รูปที่ 4-12 เครื่องทดสอบแรงดึง..... | 43 |
| รูปที่ 4-13 ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมของการทดลองในท่อลมผ้ารูปแบบที่1 ถึง3... | 44 |
| รูปที่ 4-14 ความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลอง ด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิรตซ์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3..... | 45 |
| รูปที่ 4-15 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลม..... | 46 |
| รูปที่ 4-16 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลม..... | 46 |
| รูปที่ 4-17 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลม..... | 47 |
| รูปที่ 4-18 กราฟความเค้นต่อความเครียดของวัสดุผ้าที่ใช้ในงานวิจัย | 48 |
| รูปที่ 4-19 ลักษณะของท่อลมผ้าที่คงรูปเหมาะสม(ซ้าย) และไม่เหมาะสม(ขวา) | 48 |
| รูปที่ 4-20 ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์ชาเข้า ของการทดลองใน ท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3 เมื่อ $e/D=0.000433$ | 49 |
| รูปที่ 4-21 กราฟแสดงฟังก์ชันความเสียหายต่อตัวเลขเรย์โนลด์ชาเข้า เมื่อ $e/D=0.000433$ | 50 |
| รูปที่ 4-22 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของฟังก์ชัน $g(Re,e/D,d_0/D)$ จากการทดลองกับสมการ 4.1 เมื่อ $e/D=0.000433$ | 51 |
| รูปที่ 4-23 ความเสียหาย $g(Re,e/D,d_0/D)$ ต่อตัวเลขเรย์โนลด์ชาเข้าท่อลมผ้า เมื่อ e/D $=0.000433$ ที่ค่า d_0/D ต่าง ๆ โดยค่า d_0/D สูงสุด = 3.4..... | 52 |
| รูปที่ 5-1 ปริมาตรควบคุมขนาดเล็ก ^[11] | 53 |
| รูปที่ 5-2 ส่วนประกอบของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน ^[10] | 55 |
| รูปที่ 5-3 แสดงโครงสร้าง 3 มิติ | 58 |
| รูปที่ 5-4 แสดงบริเวณต่างๆของระบบ | 59 |
| รูปที่ 5-5 ลักษณะของเมช | 59 |
| รูปที่ 5-6 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในหัวข้อทั่วไป (General)..... | 60 |

| | |
|---|----|
| รูปที่ 5-7 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในหัวข้อแบบจำลอง (Model)..... | 60 |
| รูปที่ 5-8 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในหัวข้อวัสดุ (Materials)..... | 61 |
| รูปที่ 5-9 แสดงการตั้งค่าในส่วนความเร็วขาเข้า (Inlet Velocity)..... | 61 |
| รูปที่ 5-10 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในส่วนของ Wall และ Wall end | 62 |
| รูปที่ 5-11 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในส่วนของ Pressure outlet | 62 |
| รูปที่ 5-12 แสดงการตั้งค่าค่าเริ่มต้นการคำนวณ (Solution Initialization)..... | 63 |
| รูปที่ 5-13 แสดงการตั้งค่าการดำเนินการคำนวณ (Run Calculation)..... | 63 |
| รูปที่ 5-14 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลในการไหลผ่านท่อลมผ้า กรณีสที่ 1.4..... | 64 |
| รูปที่ 5-15 เวกเตอร์เส้นระดับของความดันสถิตในการไหลผ่านท่อลมผ้า กรณีสที่ 1.4..... | 64 |
| รูปที่ 5-16 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความดันลดรวมต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลอง และโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 | 65 |
| รูปที่ 5-17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม | 66 |
| รูปที่ 5-18 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตาม สัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีสที่ 1.4..... | 66 |
| รูปที่ 5-19 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์ชา เข้า..... | 67 |
| รูปที่ 6-1 แบบจำลองของการไหลผ่านท่อตรง | 69 |
| รูปที่ 6-2 แบบจำลองของการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด..... | 70 |
| รูปที่ 6-3 แบบจำลองของการไหลผ่านข้อต่อแยก SD5-10 | 72 |
| รูปที่ 6-4 การต่อแบบจำลองท่อลมเพื่อสร้างแนวท่อลมผ้า | 72 |
| รูปที่ 6-5 ส่วนขาเข้าและส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า | 73 |
| รูปที่ 6-6 ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า | 74 |
| รูปที่ 6-7 การกระจายช่องเปิดทั้งหมดให้เป็นช่องเปิดย่อย..... | 76 |
| รูปที่ 6-8 ผังงานการวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า..... | 77 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| รูปที่ 6-9 | ผังงานการวิเคราะห์การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย | 78 |
| รูปที่ 6-10 | ผังงานการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ท่อตรง | 80 |
| รูปที่ 6-11 | ผังงานการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ท่อที่มีช่องเปิด | 80 |
| รูปที่ 6-12 | ผังงานการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ข้อต่อ..... | 81 |
| รูปที่ 6-13 | การเปรียบเทียบฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้าจาก การทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 เมื่อ $e/D=0.000433$ | 82 |
| รูปที่ 6-14 | การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเฉลี่ยต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม.. | 82 |
| รูปที่ 6-15 | การเปรียบเทียบผลลัพธ์การเพิ่มขึ้นของความดันสถิตต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม | 83 |
| รูปที่ 7-1 | แสดงแผนภาพและส่วนประกอบของโนโมแกรม ^[30] | 84 |
| รูปที่ 7-2 | แสดงลักษณะของโนโมแกรมแบบสเกลคู่ขนาน ^[30] | 85 |
| รูปที่ 7-3 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง D_2/D_1 ต่อ Q_2/Q_1 ของการไหลในข้อต่อ SD5-10 ทิศ 1→2 ภายใต้เงื่อนไขความดันสถิตได้คืนสมบูรณ์ | 93 |
| รูปที่ 7-4 | แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง D_3/D_1 ต่อ Q_3/Q_1 ของการไหลในข้อต่อ SD5-10 ทิศ 1→3 ภายใต้เงื่อนไขความดันสถิตได้คืนสมบูรณ์ | 93 |
| รูปที่ 7-5 | โนโมแกรมสำหรับการวิเคราะห์ในส่วนท่อตรง..... | 99 |
| รูปที่ 7-6 | โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิตของท่อที่มีช่องเปิด | 100 |
| รูปที่ 7-7 | โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม ของท่อ ที่มีช่องเปิด..... | 104 |
| รูปที่ 7-8 | โนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศทางการไหล 1→2..... | 105 |
| รูปที่ 7-9 | โนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศทางการไหล 1→3..... | 106 |
| รูปที่ 7-10 | โนโมแกรมสำหรับการกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย | 107 |
| รูปที่ 7-11 | โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์จำนวนช่องเปิดย่อยทั้งหมด | 108 |
| รูปที่ 8-1 | การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม..... | 109 |

| | |
|--|-----|
| รูปที่ 8-2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.6 | 110 |
| รูปที่ 8-3 ความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลอง ด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3..... | 111 |
| รูปที่ 8-4 ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมของการทดลองในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1ถึง3... | 111 |



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

อักษรโรมัน

| | | |
|-----------|-----|---|
| A_0 | คือ | พื้นที่ช่องเปิดรวม [m^2] |
| a | คือ | พื้นที่หน้าตัดของช่องเปิด [m^2] |
| C_d | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย [-] |
| C_{PR} | คือ | อัตราส่วนความดันสถิต P_{s1} ต่อ P_{s2} ซึ่งมีค่า ≤ 1 |
| D | คือ | เส้นผ่าศูนย์กลางท่อลม [m] |
| d | คือ | เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด 1 ช่อง [m] |
| d_0 | คือ | เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม [m] |
| E | คือ | โมดูลัสของยังส์ (Young's modulus) [Pa] |
| E_L | คือ | Life cycle cost ของระบบท่อลม [BAHT] |
| E_p | คือ | เทอมของค่าไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบท่อ [BAHT] |
| E_s | คือ | ค่าวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการก่อสร้างระบบ [BAHT] |
| \dot{e} | คือ | พลังงานของของไหลต่อหน่วยมวล [J/kg] |
| e | คือ | ความขรุขระของผิววัสดุ [m] |
| f | คือ | Friction Factor [-] |
| g | คือ | ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [m/s^2] |
| H_u | คือ | ระยะห่างระหว่างขีดสเกล u_{min} กับ u ใดๆ |
| H_v | คือ | ระยะห่างระหว่างขีดสเกล v_{min} กับ v ใดๆ |
| H_w | คือ | ระยะห่างระหว่างขีดสเกล w_{min} กับ w ใดๆ |
| h_l | คือ | การสูญเสียหลัก [m^2/s^2] |
| h_{lm} | คือ | การสูญเสียรอง [m^2/s^2] |
| h_{lt} | คือ | ค่าการสูญเสียรวม [m^2/s^2] |
| ISP | คือ | ความดันสถิตขาเข้าที่ทำให้ท่อลมคงรูปได้ [Pa] |
| K | คือ | สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง [-] |
| L | คือ | ความยาวของท่อท่อนใดๆ [m] |
| L_{en} | คือ | ความยาวเทียบเท่าของข้อต่อและอุปกรณ์ |
| L_e | คือ | ความยาวขาเข้า (Entrance length) [m] |
| \dot{m} | คือ | อัตราการไหลเชิงมวล [kg/s] |

| | | |
|----------------------|-----|--|
| N | คือ | จำนวนรูเปิด [-] |
| $P_{s,i}$ | คือ | ความดันสถิตเกจ ณ ตำแหน่ง i [Pa_{gauge}] |
| $P_{v,i}$ | คือ | ความดันจลน์ ณ ตำแหน่ง i [Pa] |
| P_a | คือ | ความดันบรรยากาศ [Pa] |
| $P_{s,av}$ | คือ | ความดันเกจสถิตเฉลี่ยของการไหลผ่านช่องเปิด [Pa_{gauge}] |
| $P_{s,fan}$ | คือ | ความดันสถิตของพัดลม [Pa] |
| ΔP_t | คือ | ความดันรวมลด [Pa] |
| ΔP_f | คือ | ความดันสูญเสียต่อหน่วยความยาวที่กำหนด [Pa/m] |
| $\Delta P_{1c,s}$ | คือ | ความดันลดเนื่องจากข้อต่อ [Pa] |
| PWEF | คือ | ตัวแปรปรับค่าใช้จ่ายต่างๆ [-] |
| \dot{Q} | คือ | อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังปริมาตรควบคุม [J/s] |
| Q_i | คือ | ปริมาณลม ณ ตำแหน่ง i [m^3/s] |
| q_0 | คือ | อัตราการไหลผ่านช่องเปิด [m^3/s] |
| R | คือ | รัศมีของหน้าตัดทรงกระบอก [m] |
| Re | คือ | ตัวเลขเรย์โนลด์ [-] |
| \overline{T}_{50} | คือ | ระยะส่งลมเฉลี่ย ที่ความเร็วลมปลายทาง 50 FPM [m] |
| t | คือ | ความหนาของวัสดุ [m] |
| \bar{u} | คือ | เวกเตอร์ความเร็วเฉลี่ยของของไหล [m/s] |
| \acute{u} | คือ | ค่าความปั่นป่วนของความเร็วเฉลี่ย [m/s] |
| u | คือ | เวกเตอร์ความเร็วของของไหล [m/s] |
| V | คือ | ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ [m/s] |
| v_0 | คือ | ความเร็วเริ่มต้นที่ออกจากช่องเปิด [m/s] |
| \bar{v} | คือ | ความเร็วเฉลี่ยของการไหลผ่านช่องเปิด [m/s] |
| \overline{v}_{T50} | คือ | ความเร็วเฉลี่ยปลายทาง ณ ตำแหน่งสี่ระยะ [0.254m/s (50 FPM)] |
| \dot{W} | คือ | กำลังงานผ่านผนังปริมาตรควบคุม [J/s] |
| x | คือ | ระยะส่งลมจากความเร็ว v_0 ถึงความเร็ว v ใดๆ [m] |
| z | คือ | ความสูงเทียบระดับอ้างอิง [m] |

อักษรกรีก

| | | |
|---------------|-----|---|
| α | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานจลน์ [≈ 1 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน] |
| V | คือ | ปริมาตรของไหลภายในปริมาตรควบคุม [m^3] |
| σ | คือ | ความเค้น [Pa] |
| ε | คือ | ความเครียด [-] |
| μ | คือ | ความหนืดของของไหล [kg/m.s] |
| ρ | คือ | ความหนาแน่นของของไหล [kg/m^3] |



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ระบบปรับอากาศ (Air Conditioning System) เป็นระบบที่ทำหน้าที่ควบคุมสภาวะแวดล้อมของอากาศภายในบริเวณหนึ่งๆ ให้มีความเหมาะสมตามความต้องการของผู้ที่อยู่อาศัย ซึ่งในอาคารหรือสถานที่ต่างๆ ในปัจจุบัน จะมีระบบปรับอากาศหลายรูปแบบ เช่น ระบบปรับอากาศแบบแยกส่วนระบายความร้อนด้วยอากาศหรือระบายความร้อนด้วยน้ำ, ระบบปรับอากาศแบบใช้เครื่องทำน้ำเย็น เป็นต้น โดยระบบปรับอากาศในพื้นที่ใหญ่จำเป็นต้องมีระบบการกระจายลม (Air Distribution System) เพื่อสร้างความสม่ำเสมอของการกระจายตัวอุณหภูมิภายในห้องและก่อให้เกิดภาวะสุขสบายต่อผู้อยู่อาศัยในบริเวณนั้น การออกแบบระบบกระจายลมที่ไม่ถูกต้องอาจหมายถึงความสูญเสียของระบบทั้งหมด และอาจไม่ได้ภาวะสุขสบายตามที่ต้องการ

ในปัจจุบัน ระบบการกระจายลมส่วนใหญ่จะใช้ท่อลมที่ทำจากสังกะสี (Galvanized air duct) โดยมีการตีขึ้นรูปท่อลมที่หน้างานหรือใช้ท่อลมสังกะสีสำเร็จรูป การใช้ท่อลมดังกล่าวในบางบริเวณที่ต้องการใช้ท่อลมเพื่อการตกแต่ง จำเป็นต้องมีการทาสีปิดทับผิวท่อ ซึ่งไม่สะดวกและไม่สวยงาม ทำให้ต้องมีการใช้วัสดุท่อชนิดใหม่ ที่มีความสวยงามเข้ามาแทนที่ ซึ่งท่อลมที่ทำจากวัสดุผ้า (Fabric air duct) สามารถตอบสนองความต้องการดังกล่าวได้เป็นอย่างดีและเริ่มเข้ามามีบทบาทในงานระบบกระจายลมมากยิ่งขึ้น

นอกจากเรื่องของความสวยงามแล้ว การที่ท่อลมผ้ามีการเจาะช่องเปิดอย่างต่อเนื่องตามแนวท่อลมเพื่อให้ลมไหลออกที่ท่อลมยังทำให้การกระจายลมเป็นแบบสม่ำเสมอตลอดความยาวท่อลม ซึ่งอากาศจะผสมกันภายในห้องได้เป็นอย่างดี โดยไม่ทำให้เกิดความรู้สึกเหมือนมีแรงลมปะทะอย่างที่เกิดขึ้นกับท่อลมสังกะสี รวมทั้งน้ำหนักที่เบาของวัสดุผ้าจะช่วยให้การขนส่งและการติดตั้งท่อลมผ้า มีความสะดวกรวดเร็วมากยิ่งขึ้น ทั้งยังช่วยลดต้นทุนค่าติดตั้งและต้นทุนด้านโครงสร้างของอาคาร ทำให้ท่อลมผ้าจึงได้เปรียบต่อส่งลมสังกะสีที่มีน้ำหนักมากกว่าและต้องอาศัยการตี พับ ขึ้นรูปทั้งที่หน้างานและที่โรงงาน นอกจากนี้เทคโนโลยีที่ก้าวล้ำในปัจจุบันได้พัฒนาให้เนื้อผ้าของวัสดุท่อลมผ้าสามารถกันไฟลามและมีการดูดซับความชื้นที่ต่ำ ซึ่งช่วยด้านความปลอดภัยและป้องกันการควบแน่นของไอน้ำ ทำให้ท่อลมผ้าไม่จำเป็นต้องหุ้มฉนวนกันความร้อน เหมือนกับท่อลมสังกะสี รวมทั้งท่อลมผ้ายังสามารถนำไปถอดซักทำความสะอาดด้วยเครื่องซักผ้าปกติ หรือนำไปผ่านกระบวนการฆ่าเชื้อโรคก่อนนำไปใช้งาน ทำให้ระบบการกระจายลมภายในห้องสามารถรักษาคุณภาพอากาศที่ดี (Indoor Air Quality) ได้ตลอดอายุการใช้งาน ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้อยู่อาศัยมากยิ่งขึ้น

อย่างไรก็ตาม การออกแบบระบบทอลมผ้า จะมีปัญหาด้านปัจจัยช่องเปิดบนผิวทอลมและความไม่คงรูปของวัสดุชนิดผ้า ที่แตกต่างจากความเป็นทอลมสังกะสี ซึ่งสิ่งเหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีอิทธิพลต่อระบบกระจายลม ทำให้การพิจารณาตัวแปรต่างๆ เพื่อออกแบบระบบทอลมผ้ามีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น โดยที่วิธีการออกแบบทอลมที่มีใช้อยู่ในปัจจุบัน ยังไม่สามารถตอบโจทย์การออกแบบระบบทอลมผ้าได้โดยตรง

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษา และ พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบทอลมผ้า ที่คำนึงถึงผลกระทบของช่องเปิดและความไม่คงรูปของวัสดุผ้า ด้วยพื้นฐานวิชากลศาสตร์ของไหลและกลศาสตร์วัสดุ โดยทำการทดลองผ่านชุดทดสอบทอลมและจำลองสภาพการไหลผ่านทอลมผ้าที่เกิดขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปพัฒนาร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นแนวทางไปสู่การพัฒนาวิธีการออกแบบสำหรับทอลมที่ทำจากผ้าได้อย่างเหมาะสม

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการส่งลมในระบบทอลมผ้า
2. เพื่อศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านการทดลองและการจำลองการไหลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์
3. เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบทอลมผ้า
4. นำผลการศึกษาวิจัยที่ได้ไปพัฒนาวิธีการออกแบบระบบทอลมที่ทำจากผ้าได้อย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตและแนวทางการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีการไหลในท่อและการไหลผ่านช่องเปิด โดยสมมติเป็นของไหลที่อัดตัวไม่ได้และเป็นการไหลแบบปั่นป่วน
2. ศึกษาทฤษฎีทางสมบัติเชิงกลของวัสดุผ้าซึ่งเป็นวัสดุไม่คงรูป
3. ศึกษาวิธีการออกแบบระบบทอลมที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน 4 วิธีหลักคือ
 - Equal Friction Method
 - Static Regain Method
 - Velocity Reduction Method
 - T-Method
4. วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของตัวแปรต่างๆ ในระบบทอลมผ้าด้วยวิธีการวิเคราะห์เชิงมิติ
5. สร้างชุดทดสอบทอลมและเครื่องมือในการทดลอง เพื่อศึกษาพฤติกรรมของตัวแปรต่างๆ ในการไหลผ่านทอลมผ้า

6. ทำการทดลองด้วยชุดทดสอบท่อลมและตรวจสอบผลลัพธ์ด้วยโปรแกรมจำลองการไหล Ansys Fluent V.14
7. พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลมให้เหมาะสมกับระบบท่อลมผ้า โดยคำนึงถึงพฤติกรรมของการไหลที่เกิดขึ้นและใช้พื้นฐานจากชุดสมการของการไหลในท่อ
8. วิเคราะห์ผลลัพธ์ และนำผลการวิจัยไปพัฒนาวิธีการออกแบบสำหรับท่อลมที่ทำจากผ้า โดยใช้โปรแกรม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้ความเข้าใจถึงพฤติกรรมของตัวแปรต่างๆ ในการไหลผ่านท่อลมผ้า
2. สามารถพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมกับระบบท่อลมผ้า
3. สามารถนำผลการวิจัยที่ได้ไปพัฒนาวิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้าที่เหมาะสมได้
4. ได้แนวคิดและหลักการออกแบบที่จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาระบบการกระจายลม



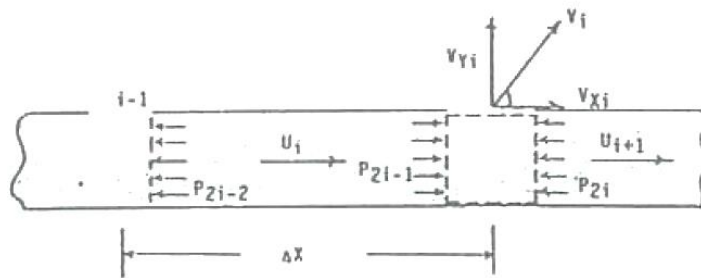
บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรม

จากการศึกษาเอกสาร บทความทางวิชาการและผลงานวิจัย ที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องกับงานวิจัย เพื่อใช้เป็นแนวทางการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการออกแบบสำหรับระบบท่อลมฟ้า สามารถสรุปออกเป็นหัวข้อย่อยต่างๆได้ดังนี้

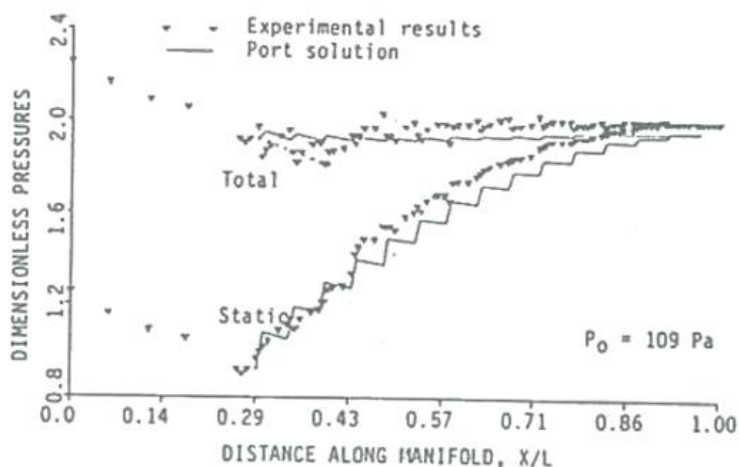
2.1 ลักษณะการกระจายตัวของความดัน

ในปี ค.ศ.1986 Ibrahim Tas and Raymond A. A. Bryant^[1] ได้ศึกษาการไหลภายในท่อที่มีช่องเปิดเว้นระยะห่างเท่าๆกัน และให้อัตราการไหลผ่านช่องเปิดมีขนาดเท่ากันผ่านการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิด โดยพิจารณาว่าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะประกอบด้วยลักษณะท่อ 2 ส่วน คือส่วนท่อตรงที่ไม่มีช่องเปิด (straight-pipe section) และส่วนช่องเปิด (port section) ดังรูปที่ 2-1



รูปที่ 2-1 แบบจำลองของ Ibrahim Tas and Raymond A. A. Bryant (1986)^[1]

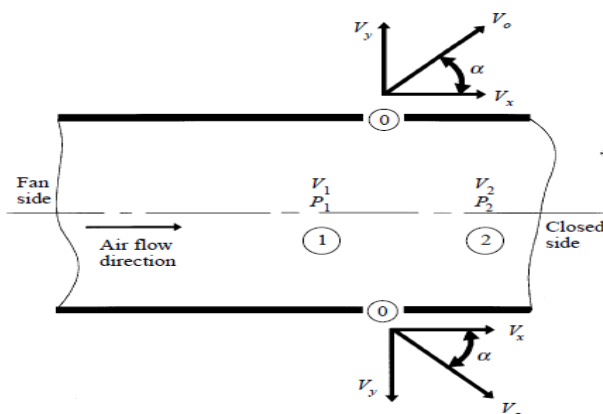
พวกเขาได้ทำการทดลองกับท่อเหล็กกล้าชุบเคลือบสังกะสี (galvanized steel pipe) เส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร หนา 1.6 มิลลิเมตร ยาว 4800 มิลลิเมตร และทำการเจาะช่องเปิดระยะห่าง 300 มิลลิเมตร เท่าๆกัน จำนวน 15 ช่อง แล้วเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ พบว่าลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เมื่อออกจากจากพัดลมมากยิ่งขึ้น และความดันรวมจะมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ดังรูปที่ 2-2



รูปที่ 2-2 การกระจายตัวของความดันสถิตและความดันรวม^[1]

2.1.1 ผลของอัตราส่วนพื้นที่ต่อการกระจายตัวของความดัน

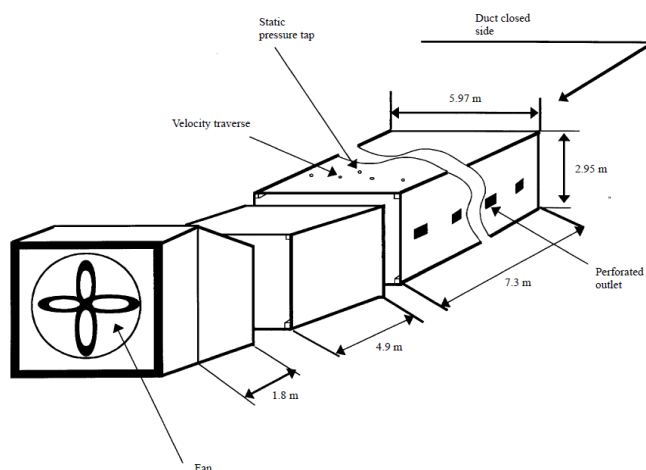
ในปี ค.ศ.1996 Khaled El Moueddeb^[2, 3] ได้ศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อทำนายการกระจายตัวของอากาศผ่านท่อที่มีช่องเปิดในระบบระบายอากาศ (ventilation) โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นมานั้นประกอบด้วย 3 สมการหลักคือ สมการอนุรักษ์มวล (mass conservation) สมการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservation) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (energy conservation) นำมาพิจารณาร่วมกับปริมาตรควบคุมในรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3 ปริมาตรควบคุมที่พิจารณา^[2]

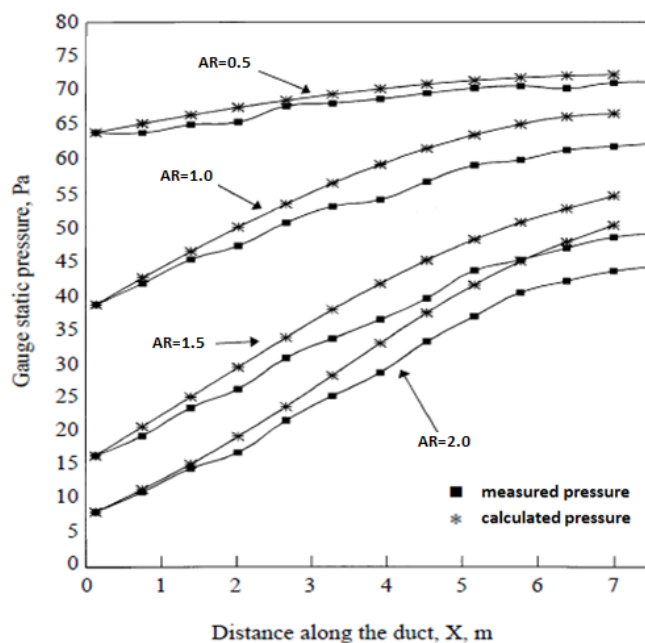
เขาได้ทำการทดลองกับท่อลมที่ทำด้วยวัสดุไม้ ขนาด 39 mm x 39 mm มีพื้นที่หน้าตัดเท่ากับ 0.17 ตารางเมตร และเจาะช่องเปิดรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส ในลักษณะเป็นคู่ ห่างกัน 610 มิลลิเมตรที่ผิวท่อตลอดความยาวท่อ โดยกำหนดให้มีความยาวท่อทั้งหมด 1 ขนาด และปรับเปลี่ยน

ขนาดพื้นที่ช่องเปิด 4 ค่าคือ $145 \times 25 \text{ mm}^2$, $145 \times 50 \text{ mm}^2$, $145 \times 75 \text{ mm}^2$ และ $145 \times 100 \text{ mm}^2$ ซึ่งทำให้ได้อัตราส่วนพื้นที่ช่องเปิดทั้งหมดต่อพื้นที่หน้าตัดท่อ (Aperture Ratio, AR) เท่ากับ 0.5, 1, 1.5 และ 2.0 ตามลำดับ



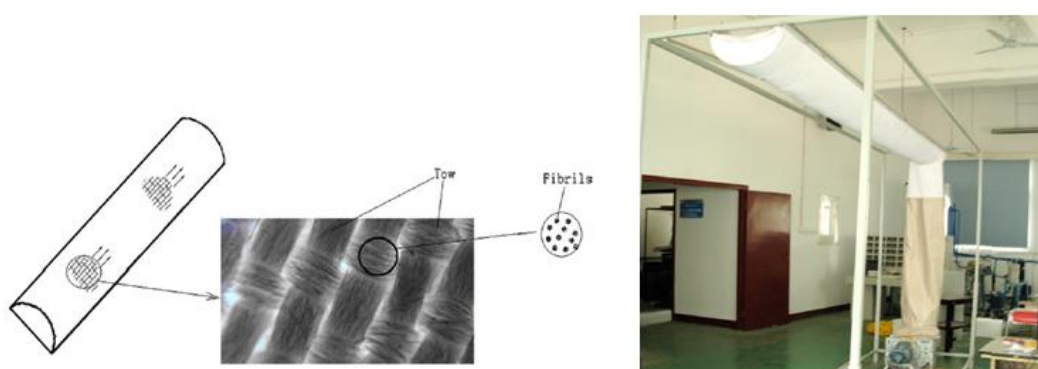
รูปที่ 2-4 ลักษณะของชุดทดลอง^[2]

จากการทดลองพบว่าลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตลอดความยาวท่อและมีค่ามากที่สุดที่ปลายท่อ โดยค่า AR ที่มากจะทำให้เส้นกราฟการกระจายตัวของความดันสถิตอยู่ต่ำกว่าเส้นที่มีค่า AR น้อย ดังรูปที่ 2-5



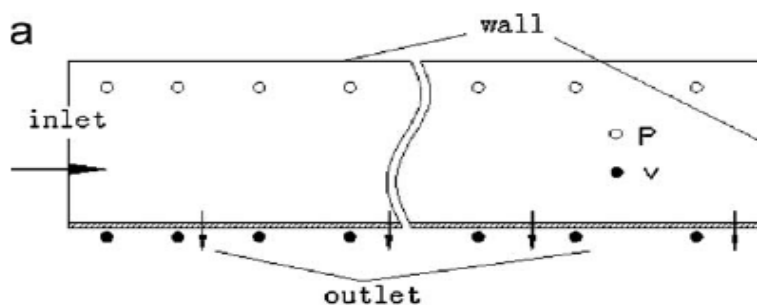
รูปที่ 2-5 ความดันสถิตต่อระยะทางตามแนวท่อที่เกิดขึ้นที่ค่า AR ต่าง ๆ^[3]

ในปี 2013 Fujiang Chena และคณะ^[4-6] ได้ศึกษาถึงผลกระทบของขนาดช่องพรุนและความพรุนของวัสดุผ้าที่มีต่อการกระจายตัวของตัวแปรต่างๆ ในการไหลผ่านระบบท่อลมที่ทำด้วยวัสดุผ้า ซึ่งเรียกว่า FADS (Fabric air dispersion system) โดยทำการทดลองและทำนายการไหลผ่านโปรแกรมจำลองการไหล Fluent ด้วยโมเดลการไหลแบบปั่นป่วน เค-เอปไซลอน (k - epsilon turbulent model) โดยตั้งสมมุติฐานในการวิเคราะห์ให้เป็นการไหลแบบคงตัว (Steady State),อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Fluid), อุณหภูมิคงที่ (Constant Temperature) และวัสดุผ้าเป็นวัสดุที่มีสมบัติเหมือนกันทุกทิศทาง (Isotropic)



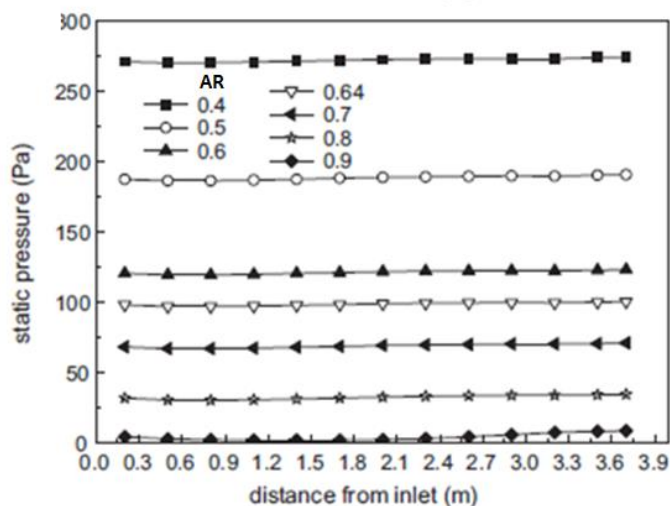
รูปที่ 2-6 ลักษณะของระบบท่อที่ทำด้วยวัสดุผ้า (FADS)^[4-6]

Fujiang Chena และคณะได้ทำการทดลองกับท่อ FADS ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 305 มิลลิเมตร ความยาว 3400 มิลลิเมตร ความหนาของวัสดุ 0.47 มิลลิเมตร ที่ความพรุน (Porosity) และขนาดช่องพรุนของท่อแตกต่างกัน โดยอากาศที่ไหลเข้ามาจากพัดลมที่ปรับความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง 50 Hz วัดความดันด้วยท่อปีโตต์ 6 อัน ณ ตำแหน่งต่างกัน 300 มิลลิเมตร และวัดความเร็วอากาศด้วยแอนนิโมมิเตอร์แบบเส้นลวดความร้อน ดังรูปที่ 2-7



รูปที่ 2-7 แสดงตำแหน่งการวัดความดันและความเร็วในท่อ FADS^[4-6]

พวกเขาพบว่าลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิตในการไหลผ่านท่อลม FADS มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ความพรุนและขนาดของช่องพรุนยังส่งผลให้ความดันสถิตเฉลี่ยของทั้งระบบมีการเปลี่ยนแปลงไป โดยจะมีค่าลดลงเมื่อความพรุนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่าตัวแปรหนึ่งที่สำคัญต่อการไหลในระบบท่อ FADS คือความพรุนหรืออัตราส่วนพื้นที่ (AR)

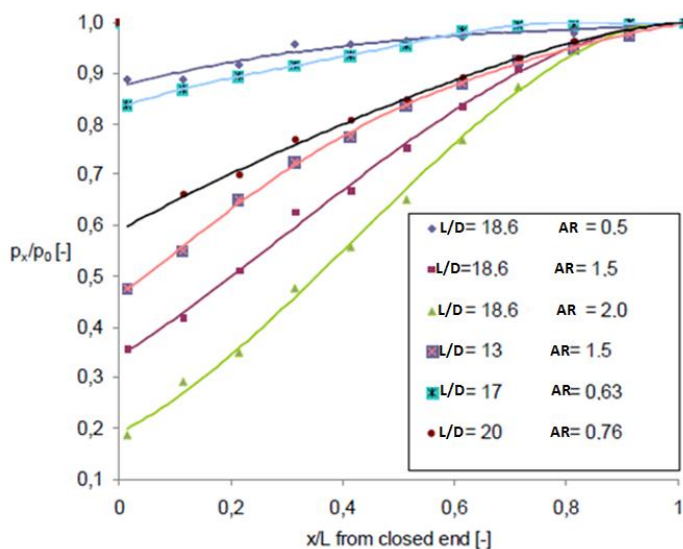


รูปที่ 2-8 การกระจายตัวของความดันสถิตที่ค่า AR ต่าง ๆ^[4-6]

2.1.2 ผลของความยาวระหว่างช่องเปิดต่อการกระจายตัวของความดัน

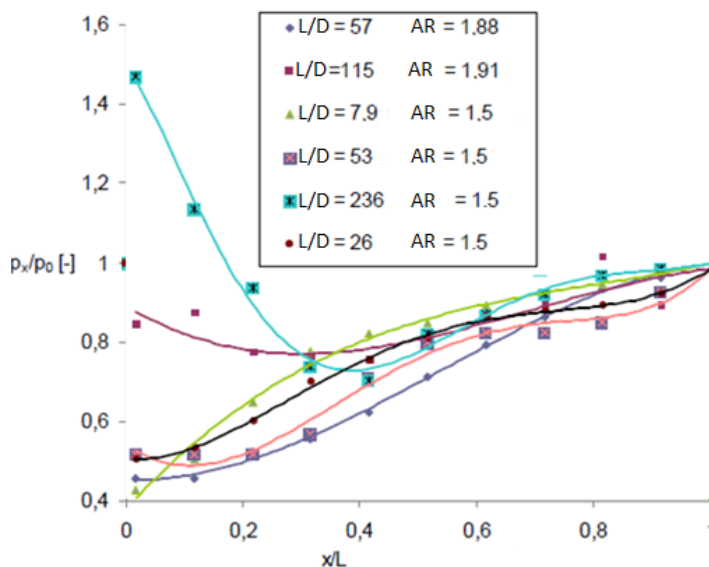
ในปี ค.ศ.2011 Ing.Martin Pospisil^[7] ได้ศึกษาถึงลักษณะของความดันสถิตที่เกิดขึ้นจากการกระจายตัวที่สม่ำเสมอของอากาศในท่อรูพรุนที่มีพื้นที่หน้าตัดคงที่ โดยอาศัยสมการเบอร์นูลลีสำหรับของไหลจริงที่อัดตัวไม่ได้ (Real Incompressible fluid) และแสดงผลลัพธ์ของการคำนวณในรูปแบบของตัวแปรไร้มิติ

เขาพบว่าความดันสถิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนมากที่สุดที่ปลายท่อปิด โดยที่อัตราส่วนพื้นที่ (AR) ที่ลดลงส่งผลให้ความชันของการกระจายตัวของความดันสถิตลดลง ทำให้ผลต่างระหว่างความดันต้นท่อและปลายท่อลดลง ดังรูปที่ 2-9



รูปที่ 2-9 ความดันสถิตต่อระยะทางตามแนวท่อที่เกิดขึ้น^[7]

นอกจากนี้เขายังได้ศึกษาเพิ่มเติมถึงผลของการเพิ่มค่าอัตราส่วนความยาวต่อขนาดท่อ (L/D) ที่มีต่อการกระจายตัวของความดัน โดยพบว่าที่ L/D มีค่าสูงเกินกว่า 100 การกระจายตัวของความดันจะมีลักษณะที่ลดลงแล้วเพิ่มขึ้น ในขณะที่ L/D ที่ค่าต่ำกว่า 100 การกระจายตัวของความดันจะมีลักษณะที่เพิ่มขึ้นตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีที่ L/D สูงเกินกว่า 100 ส่งผลให้ความยาวท่อระหว่างช่องเปิดมากเกินไป ทำให้ความดันลดมีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันสถิต ดังรูปที่ 2-10



รูปที่ 2-10 ความดันสถิตต่อระยะทางตามแนวท่อที่เกิดขึ้น เมื่อเปลี่ยนแปลงค่า L/D ที่ AR ต่างๆกัน^[7]

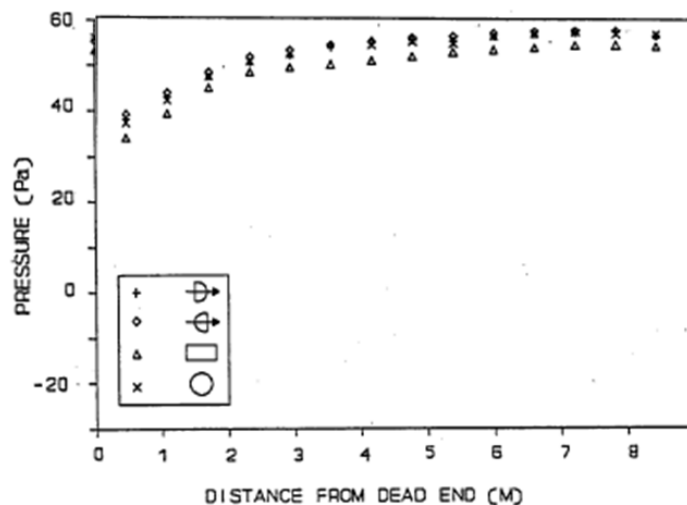
2.1.3 ผลของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องเปิดต่อการกระจายตัวของความดัน

ในปี 1990 Roger Gordon Kinsman^[8] ศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างของช่องเปิด โดยทำการทดลองกับท่อทดสอบที่ทำด้วยไม้ขนาด $8.54 \text{ m} \times 0.17 \text{ m}^2$ มีช่องเปิดห่างกัน 0.61 เมตร เป็นคู่ๆ จำนวนทั้งหมด 28 ช่องเปิด และทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของช่องเปิด 3 ขนาดและเปลี่ยนรูปร่างของช่องเปิดไป 4 ลักษณะดังรูปที่ 2-11

| SHAPE | NO. | APERTURE RATIO | | |
|----------------------------|-----|----------------|-----|-----|
| | | 0.5 | 1.0 | 1.5 |
| HALF MOON WITH AIR FLOW | 1 | | | |
| HALF MOON AGAINST AIR FLOW | 2 | | | |
| RECTANGULAR | 3 | | | |
| CIRCULAR | 4 | | | |

รูปที่ 2-11 ลักษณะของช่องเปิด^[8]

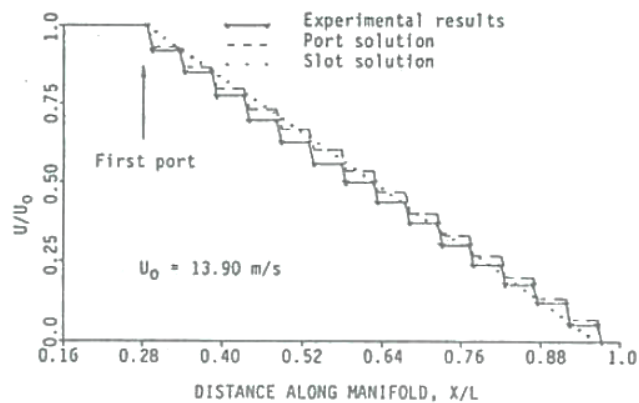
เขาพบว่า การกระจายตัวของความดันสถิตมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น และการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องเปิดส่งผลอย่างมีนัยน้อยมากต่อลักษณะการกระจายตัวของความดันสถิต



รูปที่ 2-12 ความดันสถิตต่อระยะทางตามแนวท่อที่เกิดขึ้น ในรูปร่างช่องเปิดใดๆ^[8]

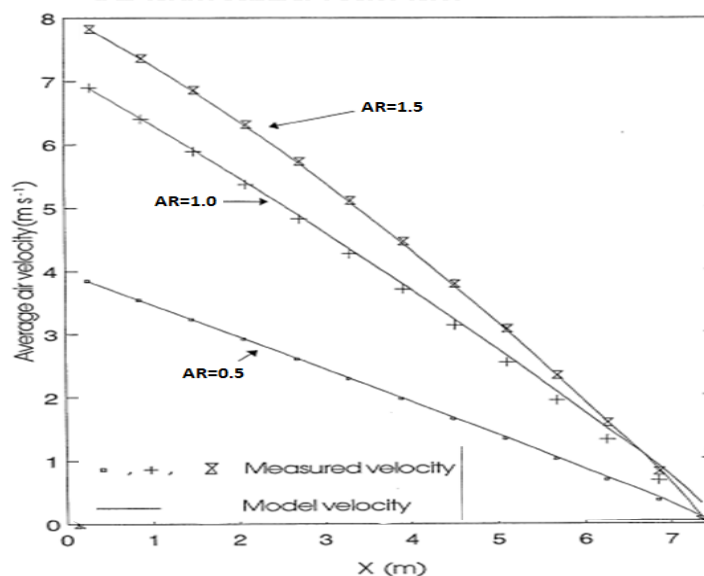
2.2 ลักษณะการกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อ

จากงานวิจัยของ Ibrahim Tas and Raymond A. A. Bryant (1986)^[1] และ Khaled El Moueddeb (1996)^[3-4] ที่ได้ทำการศึกษากับท่อที่มีช่องเปิด พบว่าการกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อจะมีแนวโน้มลดลงตลอด จนกระทั่งเป็น 0 ที่ปลายท่อ ดังรูปที่ 2-13 เนื่องจากท่อเป็นแบบปลายปิดและผลจากอัตราการไหลที่ไหลออกไปในแต่ละช่องเปิด โดยลักษณะการลดลงของความเร็วการไหลในท่อจะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนพื้นที่ (AR) โดยค่า AR ที่น้อยจะให้การลดลงของความเร็วในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น ดังรูปที่ 2-14



รูปที่ 2-13 การกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อ

จากงานวิจัยของ Ibrahim Tas and Raymond A. A. Bryant (1986)^[1]

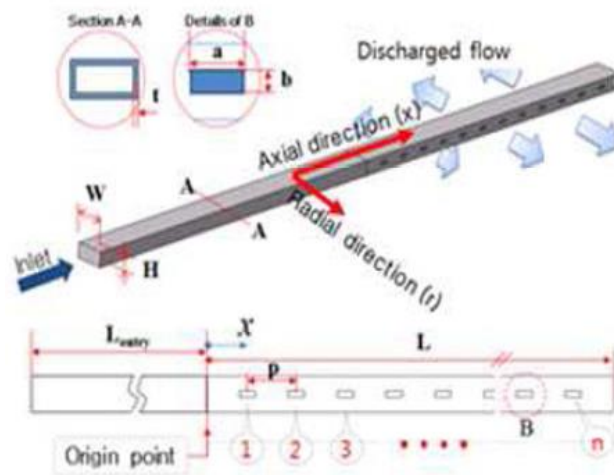


รูปที่ 2-14 การกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อ

จากงานวิจัยของ Khaled El Moueddeb (1996)^[2, 3]

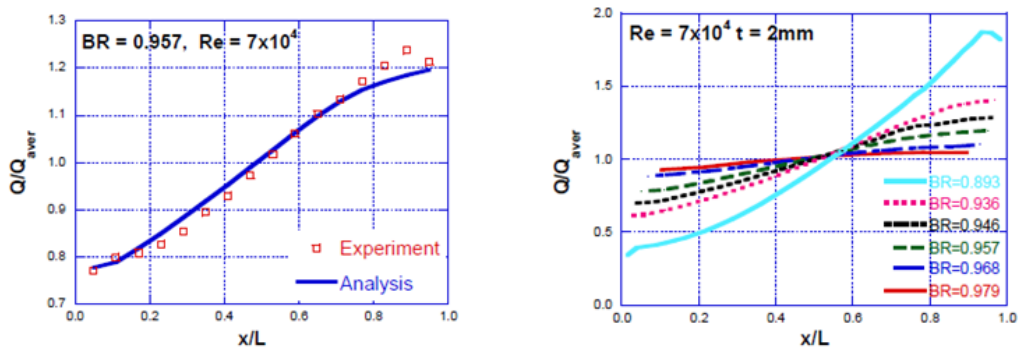
2.3 ลักษณะการกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด

ในปี ค.ศ.2011 Sangkyoo Lee, Namsoo Moon และ Jeekeun Lee^[9] ได้ศึกษาถึงการกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดและมุมการไหลผ่านช่องเปิด โดยทำการทดลองกับท่อขนาด 50 mm x 25 mm , หนา 2 mm , ความยาว 600 mm และขนาดช่องเปิด 10 mm x 4 mm ที่ค่าอัตราส่วนพื้นที่ผิวด้านข้างกรณีเจาะช่องต่อพื้นที่ผิวด้านข้างกรณีไม่เจาะช่อง (Blockage Ratio, BR) ต่างๆกัน โดยใช้ของไหลเป็นน้ำที่อุณหภูมิ 20 องศา



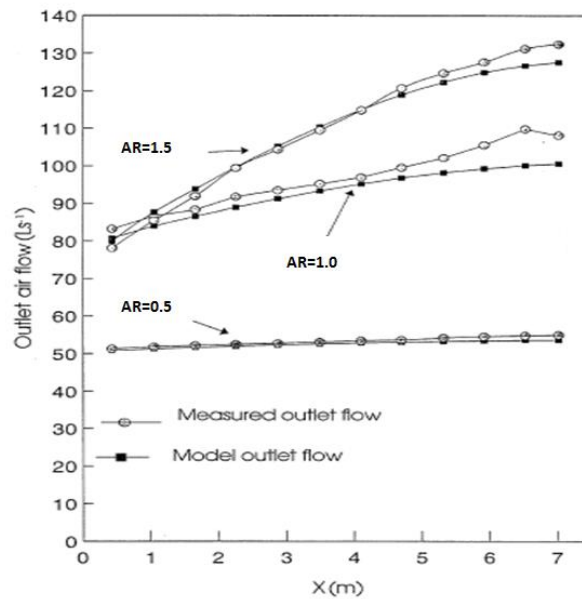
รูปที่ 2-15 รูปร่างลักษณะของโมเดล^[9]

จากการทดลองและใช้โปรแกรมจำลองการไหล Fluent V.6.3 โดยใช้โมเดลการไหลปั่นป่วนแบบ เค-เอปไซลอน (k – epsilon turbulent model) ในการวิเคราะห์ พบว่าค่าอัตราส่วนระหว่างอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อค่าเฉลี่ยของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดความยาวท่อ นอกจากนี้ค่า Blockage Ratio ที่เพิ่มขึ้น (AR ลดลง) ยังให้การกระจายตัวของอัตราส่วนดังกล่าวมีความสม่ำเสมอมากขึ้น (uniform) ดังรูปที่ 2-16

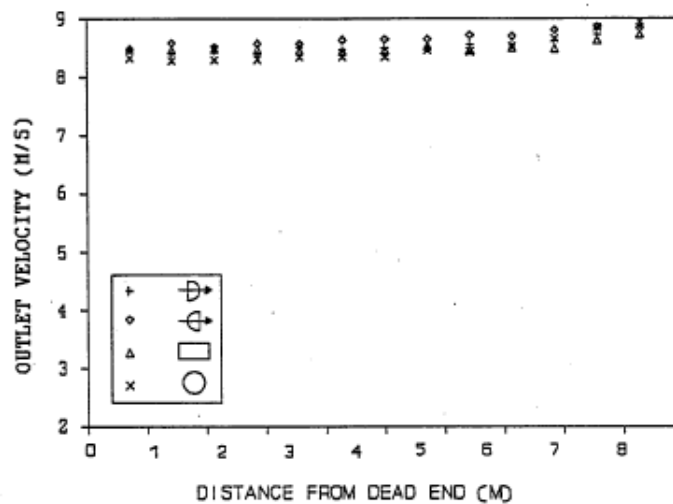


รูปที่ 2-16 การกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด^[9]

ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Khaled El Moueddeb (1996)^[2, 3] ที่ค่าอัตราการไหลผ่านช่องเปิดมีค่าเพิ่มขึ้นตลอดความยาวท่อ และการกระจายตัวมีความสม่ำเสมอมากขึ้นที่ค่า AR ต่ำ ดังรูปที่ 2-17 นอกจากนี้ในงานวิจัยของ Roger Gordon Kinsman (1990)^[8] ยังแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องเปิดว่ามีผลอย่างมีนัยน้อยมากต่อการกระจายตัวของความเร็วการไหลของช่องเปิด ดังรูปที่ 2-18



รูปที่ 2-17 การกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด^[2, 3]



รูปที่ 2-18 การกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดกรณีรูปร่างต่างๆ^[8]

บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การไหลภายในเป็นการไหลของของไหลผ่านพื้นที่ถูกกักหรือล้อมรอบด้วยผนังของแข็ง ซึ่งในระบบท่อลมโดยทั่วไปจะทำด้วยวัสดุคงรูป แต่ในระบบท่อลมผ้านั้นจะเป็นท่อลมที่มีช่องเปิด หลากหลายรูปแบบและทำด้วยวัสดุไม่คงรูป หากค่าความดันที่กระทำกับผิวของวัสดุน้อยเกินไป จะส่งผลให้รูปร่างของวัสดุนั้นไม่ได้รูปทรงตามที่ต้องการ และกระทบต่อระบบที่ต้องการออกแบบได้

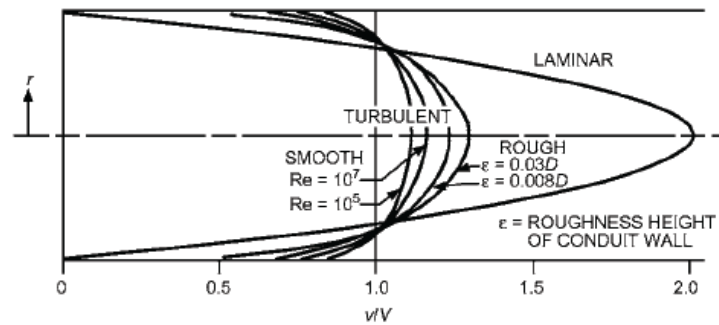
สิ่งต่าง ๆ ที่กล่าวถึงเหล่านี้ทำให้การพิจารณาตัวแปรต่างๆภายในระบบการไหลผ่านท่อลมผ้านี้ มีความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากมีพารามิเตอร์หลายตัวที่ส่งผลให้การไหลนั้นแปรเปลี่ยนไปเช่น ความคงรูปของผ้า ขนาดของช่องเปิด จำนวนช่องเปิด ระยะห่างระหว่างช่องเปิด ความดัน และอัตราการไหลของลมที่ตำแหน่งต่างๆ เป็นต้น ดังนั้น จึงจำเป็นที่จะต้องพิจารณาท่อลมผ้าด้วยทฤษฎีพื้นฐานทั้งจากวิชากลศาสตร์ของไหล (Fluid Mechanics) และกลศาสตร์วัสดุ (Mechanics of Materials) เพื่อนำไปพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการออกแบบท่อลมผ้าต่อไป

3.1 ลักษณะของการไหลในท่อ (Characteristics of flow inside duct)

การไหลภายในจะแบ่งลักษณะการไหลออกเป็น 2 แบบ คือ การไหลแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) ซึ่งจะมีผลโดยตรงต่อรูปร่างการกระจายตัวของความเร็ว (velocity profile) ที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ ตัวแปรไร้มิติที่ใช้กำหนดลักษณะการไหลคือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number, Re) ดังสมการ 3.1 โดยที่การไหลในท่อกลม ค่า Re ที่ต่ำกว่า 2000 จะให้การไหลแบบราบเรียบ ในขณะที่ Re สูงกว่า 4000 จะให้การไหลแบบปั่นป่วน

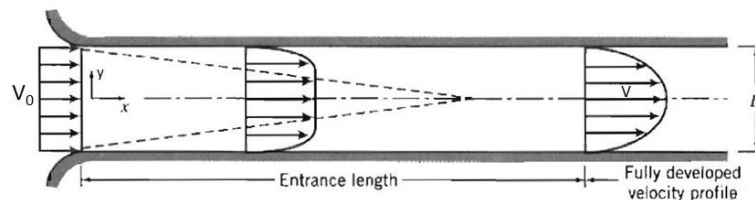
$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.1)$$

| | | | |
|--------|--------|-----|--|
| โดยที่ | Re | คือ | Reynolds number [-] |
| | D | คือ | เส้นผ่านศูนย์กลางท่อ [m] |
| | ρ | คือ | ความหนาแน่นของของไหล [kg/m^3] |
| | V | คือ | ความเร็วเฉลี่ยของการไหลในท่อ [m/s] |
| | μ | คือ | ความหนืดของของไหล [kg/m.s] |



รูปที่ 3-1 รูปร่างการกระจายตัวของความเร็วของการไหลในท่อ^[10]

ช่วงก่อนที่ของไหลจะไหลเข้าสู่ระบบท่อนั้น การกระจายตัวของความเร็วจะมีลักษณะที่สม่ำเสมอ และหลังจากเริ่มไหลเข้าสู่ท่อ ความเร็วที่บริเวณใกล้ผนังจะมีค่าเป็น 0 บนเงื่อนไขที่ไม่มีการลื่นไถล (no slip condition) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการกระจายตัวของความเร็ว โดยช่วงขาเข้าถึงตำแหน่งก่อนที่รูปร่างการกระจายตัวของความเร็วจะไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง ชื่อเรียกว่า ความยาวขาเข้า (Entrance length, L_e [m]) และตั้งแต่ที่การกระจายตัวของความเร็วไม่มีเปลี่ยนแปลงเป็นต้นไปเรียกว่า การไหลที่พัฒนาเต็มที่ (Fully developed flow)



รูปที่ 3-2 ลักษณะของการไหลภายในท่อ^[11]

รูปที่ 3-2 แสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของความเร็วจะต้องใช้ระยะทางของท่อในช่วงหนึ่งๆ ในการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลให้ไปสู่การไหลแบบพัฒนาเต็มที่ ซึ่งระยะดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับขนาดของท่อ, ทิศทาง หรือการไหลผ่านอุปกรณ์ต่างๆในระบบท่อ โดยค่าความยาวขาเข้าตามลักษณะการไหลจะเป็นไปตามสมการ

$$\text{สำหรับการไหลแบบราบเรียบ} \quad \frac{L_e}{D} = 0.06 \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.2)$$

$$\text{สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน} \quad \frac{L_e}{D} = 4.4 \left(\frac{\rho V D}{\mu} \right)^{1/6} \quad (3.3)$$

โดยทั่วไป การไหลมักจะอยู่ในลักษณะของการไหลแบบปั่นป่วน เนื่องจากการไหลแบบราบเรียบนั้นจะพบได้ในบางกรณีเท่านั้น ทำให้การไหลส่วนใหญ่จะมีความซับซ้อนของการไหลที่เกิดขึ้นจากการแกว่งตัว (fluctuation) ของตัวแปรที่เป็นปริมาณสุ่ม จึงนิยมใช้การวิเคราะห์จากผลการทดลองมาประกอบการพิจารณาการไหลแบบปั่นป่วน

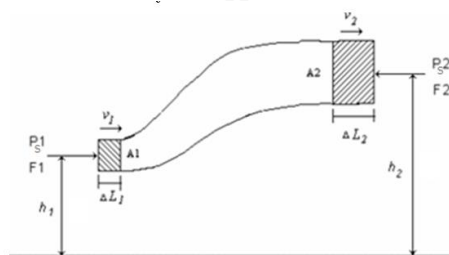
3.2 สมการของเบอร์นูลลี (Bernoulli's Equation)

ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่และกายภาพของของไหลสามารถอธิบายได้จากกฎข้อที่สองของนิวตันบนของไหลที่เคลื่อนที่กับสมมติฐานด้านความเค้นบนของไหลที่เกิดจากผลรวมของความหนืดและความดัน ได้เป็นสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier–Stokes Equations) และหากพิจารณาเงื่อนไขของการไหลให้เป็นดังนี้

- เป็นการไหลไร้ความหนืด (nonviscous fluid)
- เป็นการไหลแบบคงตัว (steady flow)
- เป็นการไหลแบบอัดไม่ได้ (incompressible flow)
- อนุภาคของของไหลอยู่บนเส้นการไหล (streamline) เส้นเดียวกัน

จะสามารถลดรูปสมการนาเวียร์-สโตกส์ ให้เป็นสมการเบอร์นูลลีดังสมการ 3.4 โดยความดันสถิตที่ใช้สำหรับ P_s จะเป็นความดันเกจอันเนื่องมาจากความดันบรรยากาศ (P_a) ทั้งสองฝั่งหักลบกัน

อย่างไรก็ตาม ในการไหลจริง ของไหลจะมีความหนืด ดังนั้น ในการแก้ปัญหาการไหลของระบบท่อโดยใช้สมการเบอร์นูลลีจำเป็นต้องพิจารณาถึงพจน์ของความสูญเสียอันเนื่องมาจากความหนืดของของไหลเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย เพื่อให้การแก้ปัญหานั้นมีความแม่นยำและเที่ยงตรงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3-3 ระดับอ้างอิงของสมการเบอร์นูลลี ^[12]

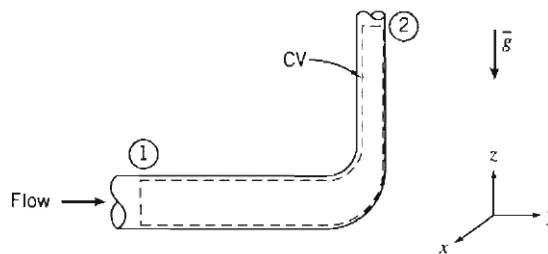
$$\left(\frac{P_s}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_1 = \left(\frac{P_s}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz \right)_2 \quad (3.4)$$

| | | | |
|--------|-------|-----|-----------------------------------|
| โดยที่ | P_s | คือ | ความดันสถิตเกจ [Pa _g] |
| | V | คือ | ความเร็วของของไหล [m/s] |

| | | |
|-----|-----|--|
| z | คือ | ความสูงเทียบระดับอ้างอิง [m] |
| g | คือ | ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [m^2/s] |

3.3 การสูญเสียของการไหลในท่อ (Loss of flow inside duct)

เมื่อของไหลที่มีความหนืดไหลผ่านระบบท่อ จะเกิดความเค้นเฉือน (shear stress) ขึ้นที่ผนังท่อและก่อให้เกิดแรงเสียดทานที่ส่งผลต่อการสูญเสียพลังงานในการไหล ซึ่งสามารถพิจารณาการสูญเสียของพลังงานของของไหลเนื่องจากแรงเสียดทานดังกล่าวได้จากสมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) และสมการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) ร่วมกับปริมาตรควบคุมดังรูป 3-4



รูปที่ 3-4 ปริมาตรควบคุมที่พิจารณา^[12]

สมการอนุรักษ์มวล (conservation of mass) เมื่อนำไปใช้สำหรับปริมาตรควบคุมใดๆ จะได้ว่า ที่เวลาใด ๆ ผลรวมของอัตราการเปลี่ยนแปลงมวลภายในปริมาตรควบคุมเทียบกับเวลาและอัตราการไหลของมวลผ่านผนังปริมาตรควบคุมจะมีค่าเท่ากับศูนย์

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho V dA = 0 \quad (3.5)$$

สมการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) กล่าวไว้ว่า ‘พลังงานรวมของระบบไม่มีการสูญหาย แต่จะเปลี่ยนจากพลังงานหนึ่งไปเป็นอีกพลังงานหนึ่ง’ ดังสมการ

$$\dot{Q} - \dot{W}_{shaft} - \dot{W}_{shear} - \dot{W}_{other} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \dot{e} \rho dV + \int_{cs} (\dot{e} + Pv) \rho V dA \quad (3.6)$$

| | | | |
|--------|-----------|-----|---|
| โดยที่ | \dot{Q} | คือ | อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังปริมาตรควบคุม [J/s] |
| | \dot{W} | คือ | กำลังงานผ่านผนังปริมาตรควบคุม [J/s] |
| | V | คือ | ปริมาตรของไหลภายในปริมาตรควบคุม [m^3] |

| | | |
|-----------|-----|------------------------------------|
| t | คือ | เวลา [s] |
| \dot{e} | คือ | พลังงานของของไหลต่อหน่วยมวล [J/kg] |

จากสมการข้างต้นหากพิจารณาสมมุติฐานที่ว่า

- ไม่มีงานอื่นๆกระทำ [$\dot{W}_{shaft} = \dot{W}_{shear} = \dot{W}_{other} = 0$]
- เป็นการไหลแบบคงตัว (steady state)
- เป็นการไหลแบบอัดไม่ได้ (incompressible flow)
- ค่าพลังงานภายในและความดันมีค่าสม่ำเสมอ ณ ตำแหน่ง 1 และ 2

เมื่อพิจารณาตำแหน่ง 1 ไป 2 จะสามารถเขียนสมการอนุรักษ์มวลได้เป็นสมการ 3.7 และสำหรับท่อยาว พลังงานกลจะค่อย ๆ น้อยลงจากตำแหน่ง 1 ไป 2 ในขณะที่ความร้อนเกิดขึ้น ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน จะสามารถเขียนสมการ 3.6 ให้อยู่ในรูปของสมการเบอร์นูลลี ที่มีการพิจารณาถึงความสูญเสียที่เกิดขึ้นในการไหลจริง ได้ดังสมการ 3.8

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (3.7)$$

$$\left(\frac{P_{s1}}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_1 V_1^2 + gz_1 \right) - \left(\frac{P_{s2}}{\rho} + \frac{1}{2} \alpha_2 V_2^2 + gz_2 \right) = h_{it} \quad (3.8)$$

| | | | |
|--------|----------|-----|---|
| โดยที่ | h_{it} | คือ | ค่าการสูญเสียรวม [m^2/s^2] |
| | α | คือ | ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานจลน์ [≈ 1 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน] |

สำหรับการไหลภายในท่อที่ผ่านอุปกรณ์ต่างๆ ค่าการสูญเสียรวม(h_{it}) จะเป็นผลรวมของค่าการสูญเสียหลักกับค่าการสูญเสียรอง ดังสมการ 3.9

$$h_{it} = h_l + h_{lm} \quad (3.9)$$

| | | | |
|--------|----------|-----|------------------------------|
| โดยที่ | h_l | คือ | การสูญเสียหลัก [m^2/s^2] |
| | h_{lm} | คือ | การสูญเสียรอง [m^2/s^2] |

3.3.1 การสูญเสียหลัก (Major Loss)

เป็นค่าการสูญเสียพลังงานที่เป็นผลมาจากแรงเสียดทานจากการไหลที่พัฒนาเต็มที่ภายในท่อ โดยขึ้นอยู่กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ ความยาวท่อ ความหยาบของผิววัสดุ ความหนืดของไหล และความเร็วในการไหล ซึ่งสามารถเขียนอยู่ในรูปของการสูญเสียได้เป็น

$$h_l = f \frac{L V^2}{D 2} \quad (3.10)$$

โดย f เป็นค่าตัวประกอบความเสียดทานของดาร์ซี^[10] ซึ่งเป็นฟังก์ชันของตัวเลขเรย์โนลด์ (Re) และค่าความขรุขระของผิวท่อต่อขนาดท่อ (e/D) โดยสามารถหาค่าตัวประกอบได้จากแผนผังมูดี้^[10] (Moody Diagram) ซึ่งมีความยากลำบากในการอ่านค่าที่แน่นอนในแต่ละการคำนวณ ดังนั้น Miller^[13] จึงได้เสนอสมการหาค่า f ใหม่เป็น

$$f = 0.25 \left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (3.11)$$

โดยที่ e คือ ความขรุขระของผิววัสดุ [m]

3.3.2 การสูญเสียรอง (Minor Loss)

เป็นค่าการสูญเสียพลังงานเนื่องจากการไหลผ่านอุปกรณ์ภายในระบบท่อ หรือข้อต่อต่างๆ และแสดงอยู่ในรูปค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (minor loss coefficient, K) ซึ่งไม่สามารถหาได้โดยตรง ดังนั้น ค่า K จึงมักจะเป็นค่าที่ได้มาจากผลการทดลองกับข้อต่อรูปแบบนั้นๆ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองสามารถพิจารณาได้จากตารางข้อต่อใน ASHRAE FITTING DATABASE^[10]

$$h_{lm} = K_i \frac{V_i^2}{2} \quad (3.12)$$

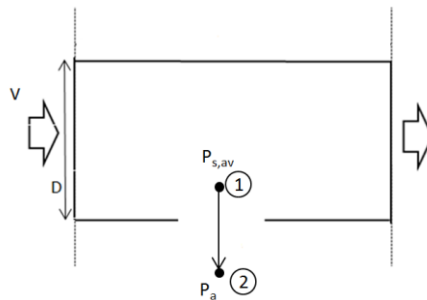
ทั้งนี้ ค่า K จะเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 2 ท่อ แต่สำหรับข้อต่อที่เป็นท่อรวม (Convergent) หรือท่อแยก (Divergent) จะพิจารณาค่า K จากสมการ (3.13) ที่มีผลของความเร็วการไหลที่แปรเปลี่ยนไป และต้องดูทิศทางของข้อต่อคือจากข้อต่อต้นทางไปยังข้อต่อตรงถัดไปหรือจากข้อต่อต้นทางไปยังข้อต่อสาขา ดังนั้นในตารางการหาค่า K ของ ASHRAE FITTING DATABASE สำหรับข้อต่อแยกจะต้องพิจารณา 2 ส่วน คือ อัตราส่วนพื้นที่และสัดส่วนของอัตราการไหล

$$K_i = \frac{K_c i}{(V_i/V_c)^2} \quad (3.13)$$

โดยที่ตัวห้อย c คือ ตำแหน่งต้นทางของข้อต่อ
 i คือ ตำแหน่งปลายทางของข้อต่อซึ่งแบ่งได้เป็น
 $s=$ ข้อต่อตรงถัดไป และ $b=$ ข้อต่อสาขา

3.4 อัตราการไหลผ่านช่องเปิด (Outlet Air Flow)

การพิจารณาการไหลผ่านช่องเปิดและให้การไหลเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ โดยใช้สมการเบอร์นูลลีมาวิเคราะห์ จะกระทำโดยพิจารณาเส้นการไหล (streamline) ณ บริเวณที่ลมไหลออกจากช่องเปิด ระหว่างตำแหน่งในท่อ (1) และนอกท่อ (2) ดังรูปที่ 3-5 ซึ่งหากพิจารณาว่าความสูงแตกต่างกันน้อยมาก ($z_1=z_2$) จะสามารถลดรูปสมการเบอร์นูลลีได้เป็นสมการ 3.14



รูปที่ 3-5 เส้นการไหลบริเวณที่ลมไหลออกจากช่องเปิด

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho (V_2^2 - V_1^2) \quad (3.14)$$

โดยในรูป 3-5 ความดัน ณ ตำแหน่งที่ 2 จะเป็นความดันบรรยากาศที่มีค่า 0 ปาสกาลเกจ และความดัน ณ ตำแหน่งที่ 1 เป็นความดันเกจสถิตเฉลี่ยที่คร่อมช่องเปิดนั้น โดยที่ความเร็วการไหลออกเริ่มต้นจากช่องเปิด ณ ตำแหน่ง 1 จะถือว่ามิต้าน้อยมากเมื่อเทียบกับความเร็วการไหล ณ ตำแหน่ง 2 ทำให้สามารถเขียนสมการ 3.14 ได้เป็น สมการ 3.15

$$P_{s,av} = \frac{1}{2} \rho (V_2^2) = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{q}{a}\right)^2 \quad (3.15)$$

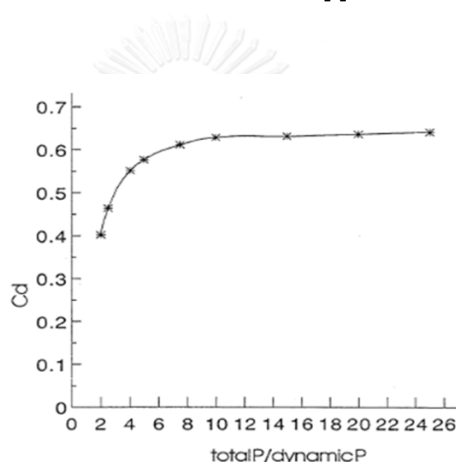
โดยที่ $P_{s,av}$ คือ ความดันเกจสถิตเฉลี่ยที่คร่อมช่องเปิด [Pa_g]
 a คือ พื้นที่หน้าตัดของช่องเปิด [m²]

q คือ อัตราการไหลผ่านช่องเปิด [m^3/s]

อย่างไรก็ตาม หากคิดการสูญเสียของการไหลผ่านช่องเปิดใด ๆ ต้องดัดแปลงสมการข้างต้น โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย (Discharge Coefficient, C_d) ที่ได้จากการทดลองเข้ามาปรับแก้ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาค่า C_d จากกราฟของ Newman (1989)^[2] ดังรูปที่ 3-6 ทำให้สามารถเขียนสมการของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดได้ดังสมการ 3.16

$$q = C_d a \sqrt{\frac{2(P_{s,av})}{\rho}} \quad (3.16)$$

โดยที่ C_d คือ ค่าสัมประสิทธิ์การจ่าย [-]



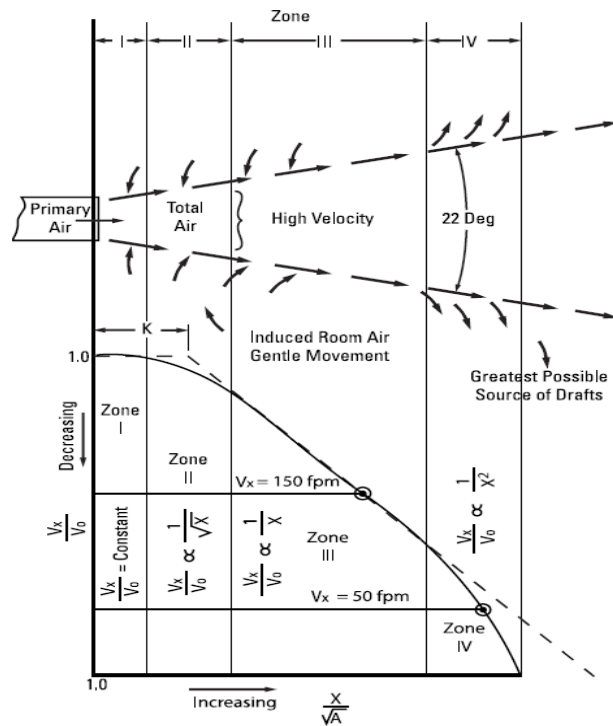
รูปที่ 3-6 สัมประสิทธิ์การจ่ายผ่านช่องเปิด (Newman, 1989)^[2]

3.5 ระยะส่งลม (throw)

ระยะส่งลม หมายถึง ระยะทางที่อากาศถูกส่งออกจากอุปกรณ์จ่ายลมหรือหัวจ่ายลม เข้าสู่บริเวณปรับอากาศจนกระทั่งมีความเร็วลมปลายทางที่เหมาะสม อยู่ในช่วง 0.25-0.76 m/s (50-150 fpm) ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการจ่ายลมที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (Isothermal Air Jet) ทำให้ความเร็วลมที่ออกจากหัวจ่ายนั้นไม่ได้รับผลกระทบจากแรงลอยตัวเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ และสามารถแบ่งเขตของระยะส่งลมออกได้เป็น 4 Zone ดังรูปที่ 3-7

Zone 1 เป็นขอบเขตเริ่มต้นของอากาศที่ออกจากหัวจ่าย ซึ่งเป็นช่วงที่อากาศจากหัวจ่ายยังไม่ได้ผสมกับอากาศที่อยู่ภายในห้อง ทำให้ความเร็วลมเปลี่ยนแปลงไม่มากหรือประมาณคงที่ ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเร็วที่ระยะทาง x (v_x) ต่อความเร็วเริ่มต้น (v_0) เป็น

$$\frac{v_x}{v_0} = \text{constant} \quad (3.17)$$



รูปที่ 3-7 แสดงการแบ่งเขตของการกระจายลมจากหัวจ่ายลม^[14]

Zone 2 เป็นบริเวณที่เริ่มตั้งแต่สิ้นสุด Zone 1 จนถึงระยะห่างจากหัวจ่ายประมาณ 8 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวจ่าย และอากาศภายในห้องเริ่มเกิดการผสมกับอากาศจากหัวจ่ายเล็กน้อย

$$\frac{v_x}{v_0} \propto \frac{1}{\sqrt{x}} \tag{3.18}$$

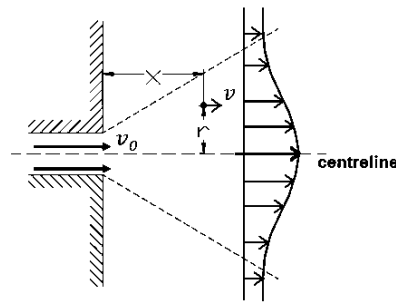
Zone 3 อากาศในบริเวณนี้จะเริ่มเกิดการหมุนวน เพื่อผสมกับอากาศภายในห้อง ซึ่งเป็นช่วงที่เริ่มจากจุดสิ้นสุดของ Zone 2 จนถึง ระยะที่ห่างไป 25-100 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางหัวจ่าย

$$\frac{v_x}{v_0} \propto \frac{1}{x} \tag{3.19}$$

Zone 4 เป็นขอบเขตสุดท้ายของระยะส่งลม ซึ่งความเร็วอากาศในบริเวณนี้จะลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากอากาศที่ออกจากหัวจ่ายจะกลมกลืนเข้ากับอากาศภายในห้อง

$$\frac{v_x}{v_0} \propto \frac{1}{x^2} \tag{3.20}$$

3.5.1 ช่องจ่ายลมแบบวงกลม (Circular jets)



รูปที่ 3-8 การกระจายตัวของความเร็วผ่านช่องเปิดแบบวงกลม^[15]

การพิจารณาช่องจ่ายลมในลักษณะต่างๆ จำเป็นต้องทราบถึงรูปร่างการกระจายตัวของความเร็วที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 3-8 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเร็วจะขึ้นกับระยะทางที่เกิดขึ้นทั้งแกนตั้งและแกนนอน และเมื่อนำสมการอนุรักษ์โมเมนตัมและสมการอนุรักษ์มวลมาประยุกต์ใช้กับการกระจายลมของช่องจ่ายลมแบบวงกลม จะได้รูปร่างของความเร็วที่เกิดขึ้นเป็นไปตามสมการของ Schlichting^[16] ดังสมการ 3.21

$$v(x, r) = \frac{7.41v_0\sqrt{a}}{x\left[1+57.5\left(\frac{r^2}{x^2}\right)\right]^2} \quad (3.21)$$

| | | | |
|--------|-----------|-----|--|
| โดยที่ | v_0 | คือ | ความเร็วเริ่มต้นที่ออกจากช่องเปิด [m/s] |
| | $v(x, r)$ | คือ | ความเร็ว ณ ตำแหน่ง (x, r) ใดๆ [m/s] |
| | a | คือ | พื้นที่ของช่องเปิด [m ²] |
| | x | คือ | ระยะส่งลมจากความเร็ว v_0 ถึงความเร็ว v ใดๆ [m] |

เมื่อพิจารณา ณ ตำแหน่ง centerline ($r=0$) ของการกระจายตัวของความเร็วที่เกิดขึ้น จะได้ลักษณะการกระจายของความเร็วดังโซนที่ 3 ทำให้สามารถเขียนสมการของระยะส่งลมได้เป็น

$$v(x) = \frac{7.41v_0\sqrt{a}}{x} \quad (3.22)$$

3.6 วิธีการออกแบบท่อลม

การไหลในระบบท่อใดๆ จะพิจารณา 2 สมการคือ สมการอนุรักษ์มวลและสมการเบอร์นูลลี ที่มีรูปของการสูญเสีย โดยค่าความดันรวมลด (ΔP_t) ของของไหลในระบบท่อ จะขึ้นกับการวางตัวของระบบท่อ, ชนิดของของไหล (ρ, μ), ความขรุขระของผิวท่อ (e), ความยาวท่อ (L), อัตราการไหล (Q) และเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (D) ซึ่งพบว่าตัวแปรต่างๆนั้นมีมากกว่าจำนวนสมการ ทำให้มีตัวแปรบางตัวต้องถูกกำหนดก่อนที่จะออกแบบระบบ

ปริมาณที่มักจะทราบค่าในการออกแบบท่อคือคุณสมบัติของไหล, คุณสมบัติของวัสดุท่อ, อัตราการไหลและความยาวที่ระบบต้องการจากผังระบบท่อลม แต่จะไม่ทราบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อและความดันที่เกิดขึ้น ทำให้เกิดกระบวนการคิดแก้ปัญหาจนกลายมาเป็นวิธีการออกแบบท่อลมในปัจจุบัน 4 วิธีหลัก ได้แก่ Equal Friction Method, Static Regain Method, Velocity Reduction Method และ T-Method โดยในแต่ละวิธีจะคำนึงถึงข้อจำกัดต่างๆ เช่น สมดุลของอัตราการไหลในระบบ, สมดุลของความดันในระบบท่อ, ขนาดของท่อลมที่เป็นไปได้, ข้อจำกัดด้านความเร็วลมและเสียงที่เกิดขึ้น ตลอดจนข้อจำกัดของพัดลมในการส่งลม เป็นต้น ซึ่งแต่ละวิธีมีรายละเอียดดังนี้

3.6.1 Equal Friction Method

วิธีนี้สามารถใช้ออกแบบได้ทั้งท่อลมส่ง ท่อลมกลับ และท่อดูดอากาศบริสุทธิ์ โดยหลักการของวิธีนี้คือ เลือกขนาดของท่อลมแต่ละท่อน ให้มีความดันสูญเสียต่อหน่วยความยาว (ΔP_f) เท่ากันตลอดทั้งระบบ และค่าความดันรวมลดที่เกิดขึ้นเป็นผลรวมของความดันรวมลดที่เกิดจากความเสียดทานในตัวท่อกับข้อต่อและอุปกรณ์ประกอบท่อต่างๆ ของท่อที่ไกลที่สุด (critical path) ดังสมการ

$$\Delta P_t = \Delta P_f [(L_1 + L_2 + \dots + L_n) + (L_{e1} + L_{e2} + \dots + L_{en})] \quad (3.23)$$

| | | | |
|--------|--------------|-----|---|
| โดยที่ | ΔP_t | คือ | ความดันรวมลด [Pa] |
| | ΔP_f | คือ | ความดันสูญเสียต่อหน่วยความยาวที่กำหนด [Pa/m] |
| | L_n | คือ | ความยาวของท่อท่อนใดๆ [m] |
| | L_{en} | คือ | ความยาวเทียบเท่าของข้อต่อและอุปกรณ์ประกอบท่อท่อนใดๆ [m] |

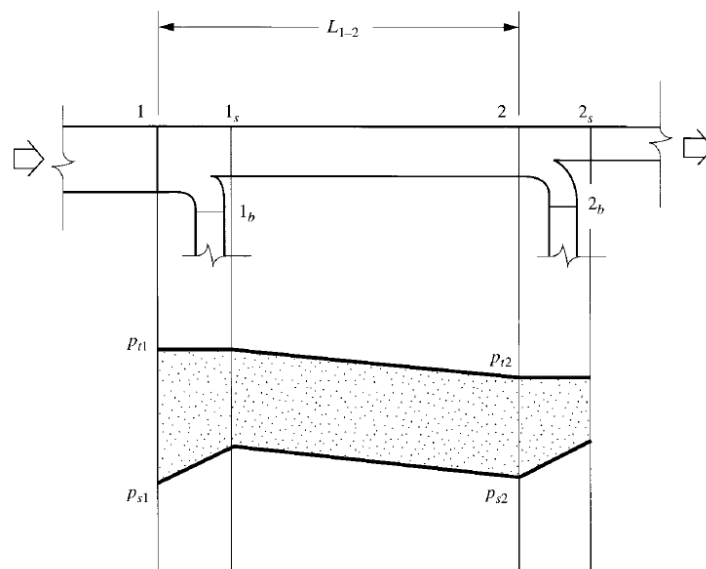
ค่าของความดันสูญเสียต่อหน่วยความยาวที่กำหนด (ΔP_f) เป็นค่าที่ถูกกำหนดจากประสบการณ์ของผู้ออกแบบแต่ละท่าน โดยปกติจะใช้ระหว่าง 0.08-0.1 inH₂O/100 ft (0.653-0.8125 Pa/m) สำหรับระบบท่อลมความดันต่ำ ซึ่งจะต้องพิจารณาร่วมกับความเร็วการไหลในท่อด้วย

เมื่อพิจารณาสมการเบอร์นูลลีจะสามารถแก้สมการเพื่อหาขนาดท่อลม (D) สำหรับ ΔP_f ใดๆ ได้ โดยการสมมติตัวแปรและใช้กระบวนการทำซ้ำ เนื่องจากฟังก์ชันความเสียดทานในสมการมีขนาดของท่อลมรวมอยู่ จึงไม่สามารถแก้สมการได้โดยตรง

อย่างไรก็ตาม การออกแบบด้วยวิธีนี้มักจะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า DUCTULATOR ซึ่งรวบรวมข้อมูลขนาดท่อ ความเร็ว และความดันรวมลดที่สัมพันธ์กันจากการแก้สมการด้วยกระบวนการทำซ้ำ แต่วิธีการออกแบบนี้ไม่ได้มีเป้าหมายในการพิจารณาถึงความเหมาะสมของค่าใช้จ่ายของระบบ และยังต้องใช้นานปรับลมาช่วยในการให้ระบบสมดุลด้วย

3.6.2 Static Regain Method

เป็นวิธีที่มีแนวคิดในการออกแบบโดยการเลือกขนาดของท่อลมในระบบเพื่อให้ความดันสถิตในแต่ละจุดแยกมีค่าเท่ากัน โดยใช้การลดความเร็วจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราการไหลที่เกิดขึ้นเมื่อไหลผ่านจุดแยกในการได้ความดันสถิตกลับคืนมา ดังนั้นความดันสถิตจึงคงเท่าเดิมกับก่อนที่มีการแยกท่อ



รูปที่ 3-9 การกระจายตัวของความดันที่เกิดขึ้นในวิธี Static Regain^[17]

ความดันรวมลดของท่อช่วง 1→2 ประกอบด้วย ความดันลดจากความเสียดทานที่ผิวท่อ และความดันลดที่เกิดจากการไหลผ่านข้อต่อสามทาง ตามสมการ

$$P_{t1} = P_{t2} + \Delta P_{f,1-2}L_{1-2} + \Delta P_{1c,s} \quad (3.24)$$

โดยที่ $\Delta P_{1c,s}$ คือ ความดันลดเนื่องจากข้อต่อ [Pa]

ค่าความดันรวม (P_t) จะเท่ากับค่าความดันสถิต (P_s) รวมกับค่าความดันจลน์ (P_v) โดยการสมมติว่าความหนาแน่นของอากาศคงที่ และพิจารณาถึงความดันสถิตได้คืน ซึ่งกำหนดให้ $P_{s1} = P_{s2}$ จะสามารถเขียนสมการ 3.24 ใหม่เพื่อหาความเร็วที่ตำแหน่ง 2 ได้ดังสมการ 3.25 และเมื่อได้ความเร็วแล้วจะสามารถหาขนาดท่อที่เปลี่ยนไป ณ ตำแหน่งนี้ได้

$$\frac{\rho(V_1^2 - V_2^2)}{2} = \Delta P_{f,1-2}L_{1-2} + \frac{K_{1c,s}\rho V_1^2}{2}$$

$$V_2 = \left[\frac{(1 - K_{1c,s})V_1^2 - 2\Delta P_{f,1-2}L_{1-2}}{\rho} \right]^{0.5} \quad (3.25)$$

วิธีการออกแบบจะเริ่มจากการสมมติความเร็วเริ่มต้นในท่อลมส่วนแรกและคำนวณหาขนาดท่อลมส่วนแรกจากข้อมูลอัตราการไหล และเนื่องจากตัวแปร $\Delta P_{f,1-2}$ เป็นฟังก์ชันของความเร็วลมท่อนถัดไป และตัวแปร $K_{1c,s}$ ที่เป็นสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองซึ่งหาได้จาก ASHRAE FITTING DATABASE ในลักษณะของข้อต่อใดๆ เป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ 2 ท่อ ทำให้การแก้สมการ 3.25 เพื่อหาคำตอบของความเร็วลมท่อนถัดไปนั้นต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ (iteration) จนขนาดท่อ ณ ตำแหน่งที่ 2 ลู่เข้าหาคำตอบ

3.6.3 Velocity Reduction Method

การออกแบบระบบท่อลมวิธีนี้มีแนวคิดคือ เลือกขนาดของท่อลมในระบบที่ทำให้ความเร็วของอากาศที่ไหลภายในท่อลดน้อยลงเป็นลำดับจากท่อต้นทางไปยังท่อปลายทางขณะที่ท่อลมได้ส่งลมออกไปยังหัวจ่ายจุดต่างๆ ทั้งนี้ความเร็วเริ่มต้นที่เลือกมาไม่ควรเกินค่าที่กำหนด โดยจะถูกจำกัดบนเงื่อนไขของความดังของเสียง ถึงแม้ว่าจะมีข้อโต้แย้งจากบางส่วนว่าเสียงมีแนวโน้มที่จะเกิดจากการปั่นป่วนของการไหลมากกว่าที่จะมาจากความเร็ว

อย่างไรก็ตาม วิธีนี้มักจะนิยมใช้ในการหาขนาดท่อลมกลับหรือท่อลมระบายออก ซึ่งไม่ต้องการการปรับสมดุลของความดันในระบบท่อลม แต่จะไม่นิยมใช้ในการหาขนาดของท่อลมส่งหรือท่อดูดอากาศเข้า เนื่องจากท่อดังกล่าวจำเป็นจะต้องมีการใช้บานปรับลมเพื่อช่วยปรับสมดุลของความดันที่บริเวณท่อแยกเพื่อการกระจายลมที่ถูกต้อง

3.6.4 T-Method

เป็นวิธีการออกแบบที่เกิดขึ้นในปี ค.ศ. 1988 ด้วยแนวคิดของ Tsal et al. ซึ่งเป็นการหาขนาดของท่อลมให้มีความเหมาะสม (optimization) บนเงื่อนไขค่าใช้จ่ายตลอดอายุใช้งาน (life cycle cost) ต่ำที่สุด หลักการสำคัญคือการหาค่าฟังก์ชันประสงค์ (objective function) ที่ต่ำสุด โดยฟังก์ชันประสงค์แสดงถึงค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นของระบบท่อลมในทุกๆ ช่วง ดังสมการ 3.26

$$E = E_p(PWEF) + E_s \quad (3.26)$$

| | | | |
|--------|--------|-----|---|
| โดยที่ | E | คือ | ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งานของระบบท่อลม [BAHT] |
| | E_p | คือ | เทอมของค่าไฟฟ้าที่จ่ายให้ระบบท่อลม [BAHT] |
| | $PWEF$ | คือ | ตัวแปรปรับค่าใช้จ่ายต่างๆ [-] |
| | E_s | คือ | ค่าวัสดุและค่าแรงที่ใช้ในการสร้างระบบท่อลม [BAHT] |

วิธีการออกแบบจะมี 3 ขั้นตอนดังนี้

1. System condensing เป็นขั้นตอนการมองและแทนระบบลมทั้งหมดด้วยท่อลมจินตภาพเพียงหนึ่งท่อน (single imaginary duct) ซึ่งท่อที่แทนนี้จะมีลักษณะทางไฮดรอลิกส์ (Hydraulic characteristics) และค่าใช้จ่ายในการติดตั้งระบบเหมือนเดิม

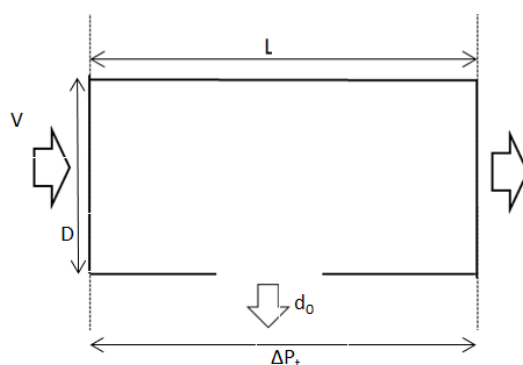
2. Fan selection เป็นขั้นตอนการพิจารณาถึงความดันที่เหมาะสมในการส่งลมจากพัดลมไปสู่ระบบท่อลมที่แทนด้วยท่อลมจินตภาพ

3. System expansion เป็นขั้นตอนการกระจายระบบท่อลมจินตภาพไปสู่ระบบท่อลมเดิม ซึ่งจะกระจายด้วยการพิจารณาถึงความดันที่เหมาะสมในท่อแต่ละท่อน และนำมาซึ่งขนาดท่อลมที่เหมาะสมสำหรับวิธีการ T-Method นี้

3.7 การวิเคราะห์ทางมิติ (Dimensional Analysis)

วิธีการวิเคราะห์ทางมิติ^[18] เป็นวิธีที่สามารถจัดตัวแปรอิสระ (Independent Variable) ที่มีผลต่อพารามิเตอร์ที่พิจารณา โดยการรวมตัวแปรให้อยู่ในรูปกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Variable) และนำความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติเหล่านี้ไปใช้ในการควบคุมการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มุ่งศึกษาผลกระทบของการไหลผ่านท่อลมผ้า โดยพิจารณาท่อลมผ้าที่มีช่องเปิดดังรูปที่ 3-10 และสามารถเขียนความสัมพันธ์ของตัวแปรไร้มิติได้ดังนี้



รูปที่ 3-10 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลผ่านท่อลมผ้า

3.7.1 ตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

การไหลผ่านท่อลมปกติ จะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลอยู่ 7 ตัว ($\Delta P_t, \rho, V, D, \mu, e, L$) ซึ่งในการไหลผ่านท่อลมผ้า นั้น จะมีผลของพื้นที่ช่องเปิดทั้งหมด (d_0) ทำให้ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลจะมีทั้งหมด 8 พารามิเตอร์ ($n=8$) ดังนี้

$$\Delta P_t, \rho, V, D, \mu, e, L, d_0$$

3.7.2 มิติปฐมภูมิ (Primary Dimension)

กำหนดมิติหลักคือ MLT

| | | | |
|-------|---|-----|----------------|
| เมื่อ | M | คือ | มิติของมวล |
| | L | คือ | มิติของความยาว |
| | T | คือ | มิติของเวลา |

3.7.3 ทฤษฎี Buckingham Pi Theorem

| | ΔP_t | ρ | V | D | μ | e | L | d_0 |
|---|--------------|--------|-----|-----|-------|-----|-----|-------|
| M | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| L | -1 | -3 | 1 | 1 | -1 | 1 | 1 | 2 |
| t | -2 | 0 | -1 | 0 | -1 | 0 | 0 | 0 |

- จำนวนตัวแปรไร้มิติ = 5

สร้างกลุ่มตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless Group) ได้ดังนี้

$$\pi_1 = \frac{\Delta P_t}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{\Delta P_t}{P_v}$$

$$\pi_2 = \frac{\rho V D}{\mu} = Re$$

$$\pi_3 = \frac{e}{D}$$

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

$$\pi_5 = \frac{d_0}{D}$$

โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างกลุ่มตัวแปรไร้มิติดังนี้

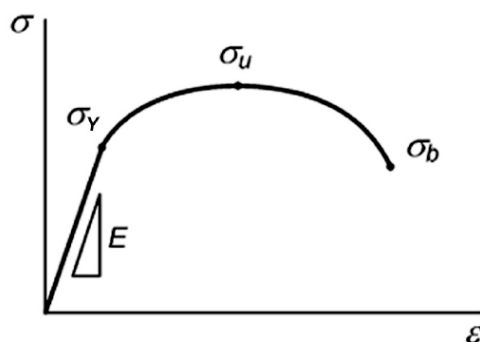
$$\frac{\Delta P_t}{\frac{1}{2}\rho V^2} = g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{L}{D}, \frac{d_0}{D}\right) \quad (3.27)$$

งานวิจัยของ Moody ได้แสดงว่าอัตราส่วนความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อ (L/D) จะแปรผันตรงกับผลต่างความดันรวมลด ดังนั้น สมการ 3.27 สามารถเขียนได้ใหม่ดังนี้

$$\frac{\Delta P_t}{\frac{1}{2}\rho V^2} = \frac{L}{D} g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right) \quad (3.28)$$

3.8 สมบัติเชิงกลของวัสดุ

คุณสมบัติของวัสดุเป็นสิ่งสำคัญในการเลือกใช้งานทางวิศวกรรมในรูปแบบต่างๆ โดยเฉพาะคุณสมบัติเชิงกลด้านกำลังของวัสดุ ซึ่งสามารถทดสอบได้ด้วยการทดสอบแรงดึง (tension test) และนำผลลัพธ์มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Diagram) ทุกระยะจนกระทั่งขาดจากกัน ดังรูปที่ 3-11



รูปที่ 3-11 กราฟความเค้นกับความเครียด^[19]

ส่วนแรกของกราฟความเค้นกับความเครียดแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเค้นกับความเครียดซึ่งการเปลี่ยนแปลงขนาดของวัสดุจะกลับคืนสู่สภาวะเดิมทันทีเมื่อปล่อยแรงที่มากระทำออก พฤติกรรมเช่นนี้ถูกเรียกว่า การเปลี่ยนแปลงขนาดแบบอีลาสติก (Elastic Deformation) ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยกฎของฮุก (Hooke's law)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.29)$$

| | | | |
|--------|------------|-----|--|
| โดยที่ | E | คือ | โมดูลัสของยังส์ (Young's modulus) [Pa] |
| | σ | คือ | ความเค้น [Pa] |
| | ϵ | คือ | ความเครียด [-] |

เมื่อเพิ่มความเค้นสูงกว่าความเค้นคราก (yield stress, σ_y) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก และเมื่อถึงความเค้นถึงสูงสุด (ultimate tensile stress, σ_u) ถ้ายังออกแรงกระทำกับวัสดุต่อไปจะทำให้วัสดุแยกออกจากกัน (breaking)

3.8.1 ความเค้นและความเครียด

ในวัสดุใดๆที่โครงสร้างมีสมบัติทางกลคงที่ในทุกตำแหน่งและทิศทาง เนื้อวัสดุกระจายอย่าง ต่อเนื่องโดยไม่มีช่องว่าง ความเค้น (stress, σ) สามารถนิยามได้ตามสมการ 3.30 โดยมีขนาดเป็น บวกถ้าแรงที่กระทำเป็นแรงดึง หรือมีขนาดเป็นลบถ้าแรงที่กระทำเป็นแรงอัด

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.30)$$

ความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงขนาด (deformation) ซึ่งมี ทิศทางตามความเค้นที่มากกระทำ ถ้าถูกกระทำจากความเค้นที่เป็นบวกหรือความเค้นดึง (tensile stress) โครงสร้างจะยืดยาวขึ้นตามทิศทางของแรง แต่ถ้าถูกกระทำจากความเค้นที่เป็นลบหรือความ เค้นอัด (compressive stress) โครงสร้างจะหดสั้นลงตามทิศทางของแรง

ความเครียด (strain, ϵ) สามารถนิยามได้ตามสมการ 3.31 เมื่อเกิดความเครียดในแนวที่แรง มากกระทำ (axial strain) โครงสร้างจะยืดตัวออกส่งผลให้พื้นที่หน้าตัดของโครงสร้างลดลง ซึ่งเรียก การเปลี่ยนแปลงขนาดในทิศทางตั้งฉากกับแรงที่มากกระทำนี้ว่า ความเครียดในแนวขวาง (transverse strain)

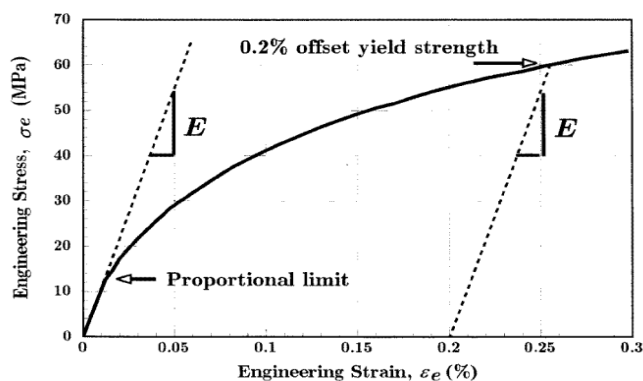
$$\epsilon = \frac{L-L_0}{L_0} = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.31)$$

3.8.2 ความเค้นคราก (Yield stress)

เป็นค่าที่มีความสำคัญในการออกแบบ เพราะเป็นค่าความแข็งแรงของวัสดุที่สำคัญต่อการ เปลี่ยนรูปที่เกิดขึ้นอย่างถาวร ซึ่งนิยมใช้แฟกเตอร์ความปลอดภัย (Safety factor) เข้ามาพิจารณา ร่วมด้วย ก่อนนำไปคำนวณออกแบบระบบใดๆ หรือเรียกว่าความเค้นใช้งาน (Working Stress, σ_w)

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{\text{Safety Factor}} \quad (3.32)$$

วัสดุทางวิศวกรรมบางอย่างมีกราฟความเค้นกับความเครียดที่ไม่มีจุดครากที่แน่นอนหรือไม่ สามารถแสดงค่าความเค้นครากได้อย่างชัดเจน จึงได้มีการกำหนดให้พิจารณาหาค่าความเค้นคราก ที่ 0.2% ของ plastic strain ที่เกิดขึ้นบนกราฟความเค้นกับความเครียด โดยให้ลากเส้นตรงขนานกับ เส้นความชันของ stress-strain curve โดยมีจุดตัดแกน x ที่ค่าความเครียด 0.2% offset ซึ่งจะไปตาม เส้นกราฟได้ค่าความเค้น โดยค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นคราก ความเค้นที่จุดนี้ มีชื่อเรียกอีกอย่างว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) ดังรูป

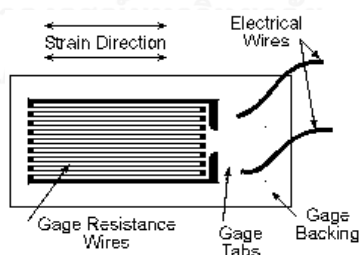


รูปที่ 3-12 การหาความเค้นคราก^[19]

3.8.3 เกจวัดความเครียด (Strain Gauge)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดความเครียด (strain gage) โดยอาศัยหลักการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าในพฤติกรรมของวัสดุ เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด โดยเกจวัดความเครียดประกอบด้วยขดลวดที่ทำจากโลหะผสมที่มีความไวสูงในการเปลี่ยนแปลงระยะการขจัดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้า

การติดตั้งเกจวัดความเครียดที่ดีประกอบด้วย 3 หลักการ คือ ขนาดและทิศทางของความเครียดของวัสดุต้องสามารถถ่ายทอดไปยังเกจวัดความเครียดได้อย่างสมบูรณ์ ไม่เกิดผลกระทบจากสัญญาณรบกวน และ รักษาความสามารถในการวัดความเครียดได้ในช่วงเวลาที่ต้องการ



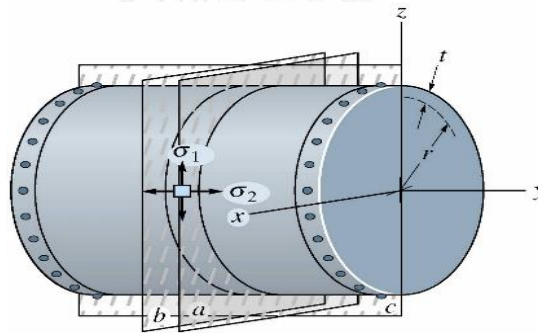
รูปที่ 3-13 เกจวัดความเครียด^[20]

การวัดการเปลี่ยนแปลงทางความต้านทานไฟฟ้าในพฤติกรรมของวัสดุ เมื่อวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงขนาด เพื่อคำนวณค่าความเครียด (strain) จะกระทำได้อย่างยาก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก ดังนั้นในการใช้เกจวัดความเครียดจึงนิยมวัดการเปลี่ยนแปลงของความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่เกิดขึ้นในวงจรหีดสโตนบริจ (Wheatstone bridge) ซึ่งสามารถตรวจวัดได้สะดวกกว่าการวัดการเปลี่ยนแปลงทางความต้านทานไฟฟ้า

3.8.4 ภาชนะความดัน (Pressure Vessel)

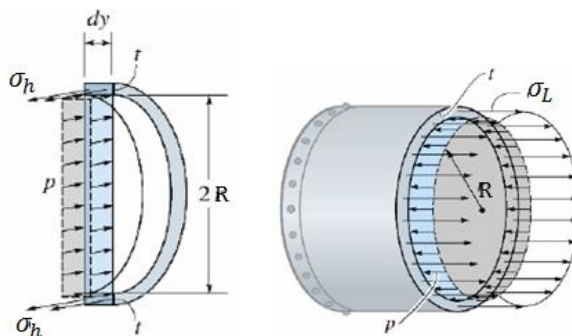
ภาชนะความดัน โดยปกติจะมีรูปลักษณะต่าง ๆ กันเช่น ทรงกลม, ทรงกระบอก หรือรูปวงรี โดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นโครงสร้างที่ใช้ในการกักเก็บหรือบรรจุของของไหลใดๆ ภายใต้ความดัน ซึ่งวัสดุที่ห่อหุ้มของไหลนั้นจะถูกกระทำจากความดันที่เกิดขึ้นในทุกทิศทางเช่นเดียวกับลูกโป่งที่ถูกเป่าลม

วัสดุของภาชนะเก็บความดันจะเกิดความเค้นขึ้น 3 ส่วนคือความเค้นสำหรับความเค้นแรงดึงในแนวเส้นรอบวง (Circumferential Tensile Stress) ซึ่งมักจะเรียกว่า Hoop Stress และค่าความเค้นในแนวแกน (Longitudinal Stress) และ ค่าความเค้นในแนวรัศมี (radial stress) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วความเค้นในแนวรัศมีจะมีค่าน้อยกว่า hoop stress และ longitudinal stress มาก ทำให้สามารถละเลยผลของความเค้นในแนวรัศมีได้ ซึ่งในท่อลมฟ้าสามารถมองลักษณะได้เป็นถังเก็บความดันรูปทรงกระบอก (Cylindrical Pressure Vessel) ดังรูปที่ 3-14



รูปที่ 3-14 Cylindrical Pressure Vessel^[21]

Hoop Stress (σ_h) และ Longitudinal Stress (σ_L) สามารถหาได้จากสมดุลของแรงระหว่างแรงที่เกิดในโครงสร้างที่พิจารณากับแรงที่เกิดจากความดันภายในวัสดุที่ตำแหน่งใดๆ ของท่อ แสดงดังรูปที่ 3-15



รูปที่ 3-15 Hoop Stress และ Longitudinal Stress^[21]

$$\sigma_h = \frac{PR}{t} \quad (3.33)$$

$$\sigma_L = \frac{PR}{2t} \quad (3.34)$$

| | | | |
|--------|-----|-----|---|
| โดยที่ | P | คือ | ความดันเกจที่กระทำกับพื้นผิว [Pa _g] |
| | R | คือ | รัศมีของหน้าตัดทรงกระบอก [m] |
| | t | คือ | ความหนาของวัสดุ [m] |



บทที่ 4

การทดลอง

งานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการกระจายตัวและความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ส่งผลต่อการไหลในท่อลมฟ้า โดยนำผลการทดลองที่ได้มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรไร้มิติที่เกี่ยวข้องกับการไหล รวมทั้งพัฒนาสมการหาค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นในท่อลมฟ้า เพื่อนำไปใช้ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

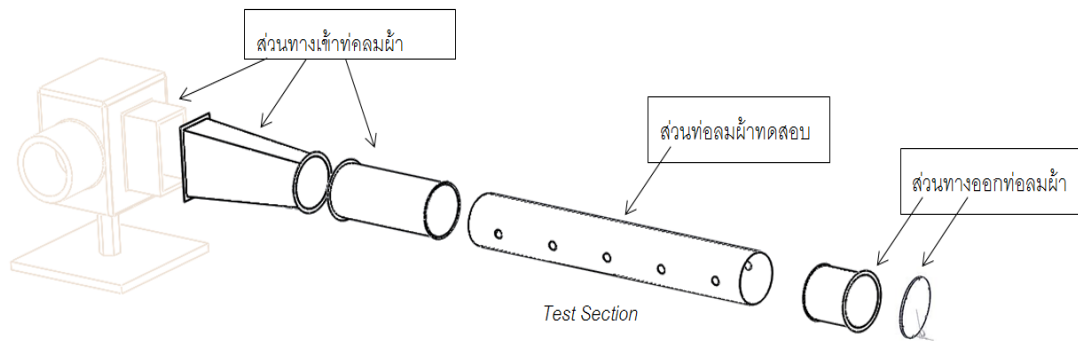
4.1 แผนการศึกษาทดลอง

ในการทดลองเพื่อศึกษาพฤติกรรมของการไหลในท่อลมฟ้า จะเริ่มทำการทดสอบด้วยชุดทดลองกับท่อลมฟ้าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 นิ้ว จำนวน 3 รูปแบบ โดยปรับเปลี่ยนปริมาณลมที่ไหลเข้าท่อลมฟ้าให้แตกต่างกัน 7 ค่า รวมทั้งหมด 21 กรณี โดยการปรับความถี่พัดลมและ/หรือบานปรับลม ทั้งนี้จะพิจารณากรณีที่ท่อลมฟ้าสามารถคงรูปอยู่ได้ในขณะที่มีการไหล แล้วทำการวัดค่าความดันสถิต ความดันรวม และความเร็วการไหลผ่านช่องเปิดที่ตำแหน่งต่างๆ

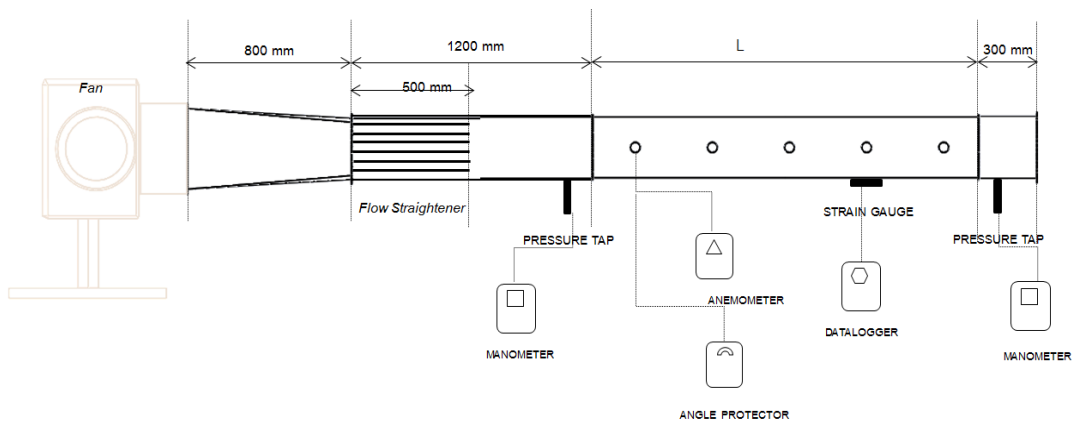
เนื่องจากผู้จัดจำหน่ายท่อลมฟ้าในประเทศไม่สามารถให้ข้อมูลคุณสมบัติทางกลของวัสดุทำท่อลมฟ้าที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ได้ จึงจำเป็นต้องทำการทดสอบแรงดึง (Tension Test) กับวัสดุผ้าชนิดนี้ เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด เพื่อนำไปวิเคราะห์หาช่วงความดันที่เหมาะสมของวัสดุท่อลมฟ้าชนิดนี้ในขณะที่ยังคงรูปเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหาย

4.2 ชุดทดลองสำหรับท่อลมฟ้า

ชุดทดลองที่ใช้ทำการทดลองการไหลของอากาศผ่านท่อลมฟ้า ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนทางเข้าท่อลมฟ้า ส่วนท่อลมฟ้าทดสอบ และส่วนทางออกท่อลมฟ้า (รูปที่ 4-1) ส่วนที่เป็นท่อลมฟ้าทดสอบจะทำด้วยวัสดุผ้าที่ลมซึมผ่านได้ยาก ซึ่งสามารถกันลมรั่วไหลออกได้ในระดับหนึ่ง ในขณะที่ส่วนอื่นๆจะประกอบขึ้นจากแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ทั้ง 3 ส่วนนี้ถูกประกอบกันเป็นชุดทดลองด้วยการใช้น็อตยึดแต่ละส่วน และมีปะเก็นยางติดอยู่บริเวณหน้าแปลน เพื่อป้องกันอากาศรั่วไหลผ่านออกมา รวมทั้งติดตั้งหัววัดความดัน (Pressure Tap) ณ ตำแหน่งที่กำหนด ดังแสดงในรูปที่ 4-2



รูปที่ 4-1 แสดงภาพ 3 มิติของชุดทดลอง



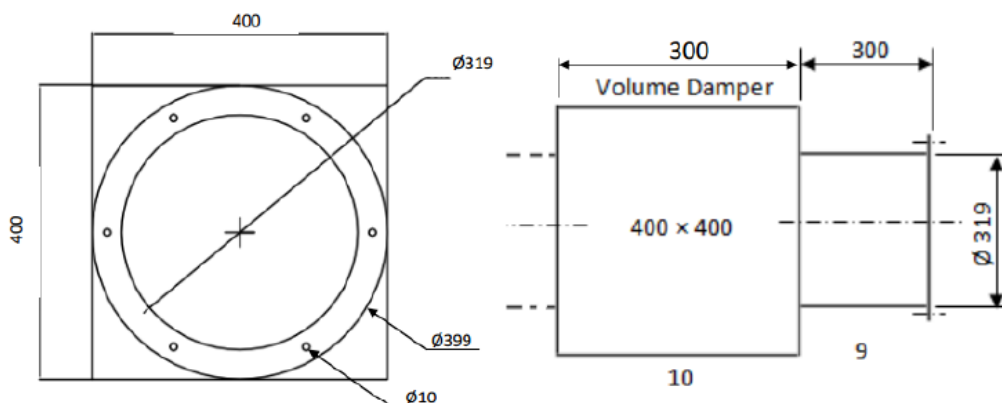
รูปที่ 4-2 แสดงภาพ 2 มิติของชุดทดลองและอุปกรณ์การวัด

4.2.1 ส่วนทางเข้าท่อลมผ้า

ส่วนนี้เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลของอากาศให้เป็นไปตามเงื่อนไขของการทดลอง ก่อนที่จะเข้าสู่ส่วนท่อลมผ้าทดสอบ โดยประกอบด้วย บานปรับลม, ชุดพัดลม, ท่อลดขนาด, ท่อตรง และชุดจัดเรียงการไหล

4.2.1.1 บานปรับลม (Volume Damper)

ทำหน้าที่ปรับอัตราการไหลของอากาศก่อนเข้าสู่ส่วนท่อลมทดสอบเพื่อให้แปรเปลี่ยนไปตามปริมาณที่ต้องการในแต่ละการทดลอง โดยถูกติดตั้งที่บริเวณด้านดูดของพัดลม บานปรับลมที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นบานปรับลมแบบใบขนาน 2 ใบ และมีมิติของส่วนต่างๆ แสดงในรูปที่ 4-3



รูปที่ 4-3 แบบของบานปรับลม

4.2.1.2 พัดลม (FAN)

พัดลมที่ใช้เป็นโมเดล FSA 315 CM CW 90 ซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบริษัท ครูเกอร์ เวนทิลเลชั่น อินดัสทรีส์ (ไทยแลนด์) จำกัด โดยเป็นพัดลมชนิดแรงเหวี่ยงแบบใบพัดโค้งไปด้านหน้า (Forward Curve Centrifugal Fan) และใช้มอเตอร์จากฮิตาชิขนาด 0.37 kW ชนิด 3 เฟส แรงดัน 380 โวลต์

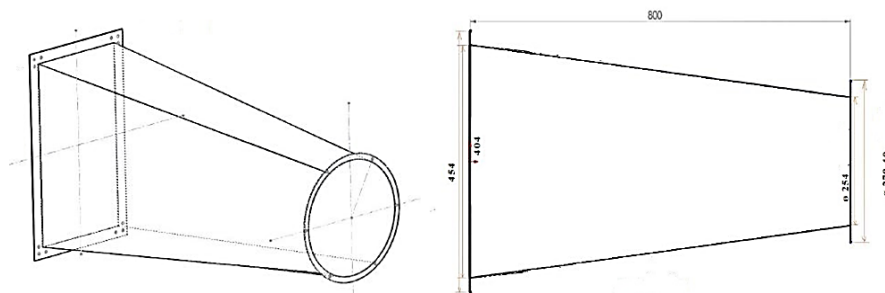


รูปที่ 4-4 พัดลม FSA 315 CM CW 90

4.2.1.3 ท่อลดขนาด (Duct Reducer)

เนื่องจากส่วนท่อลมผ้าทดสอบนั้นมีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอก จึงต้องทำการเปลี่ยนหน้าแปลนของส่วนทางเข้าท่อลมผ้าจากสี่เหลี่ยมผืนผ้าเป็นวงกลมด้วยท่อลดขนาด ซึ่งเชื่อมต่อมาจากพัด

ลมด้านส่ง โดยท่อลดขนาดนี้ทำจากแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ความหนา 1.2 มิลลิเมตร นำมาขึ้นรูปให้มี ความยาว 800 มิลลิเมตร โดยหน้าตัดด้านขาเข้ามีขนาด 404×223 ตารางมิลลิเมตร และหน้าตัด ด้านขาออกเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 254 มิลลิเมตร (10 นิ้ว) ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4-5 โครงสร้างของท่อลดขนาด

4.2.1.4 ชุดจัดเรียงการไหล (Flow Straightener)

ทำหน้าที่ปรับสภาพการไหลของอากาศจากท่อลดขนาดให้เป็นระเบียบและลดการหมุนวน ของอากาศก่อนเข้าสู่ส่วนท่อลมผ้าทดสอบ การออกแบบขนาดและความยาวของชุดจัดเรียงการไหล อ้างอิงจาก Reid F. Steams et al. (1951)^[22] โดยชุดจัดเรียงการไหลที่ออกแบบมานี้มีลักษณะ คล้ายรังผึ้ง ภายในประกอบด้วยหลอดคาแพชขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 500 มิลลิเมตร จำนวน 25 หลอดอัดแน่นติดกัน

4.2.1.5 ท่อตรง (Straight Duct)

ท่อตรงมีหน้าตัดเป็นวงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 254 มิลลิเมตร ติดตั้งต่อจากชุดจัดเรียง การไหลและทำจากแผ่นเหล็กชุบสังกะสี ความหนา 1.2 มิลลิเมตร ยาว 700 มิลลิเมตร ทำหน้าที่ช่วย ให้การไหลมีความเป็นระเบียบก่อนเข้าสู่ส่วนท่อลมผ้าทดสอบรวมทั้งลดอิทธิพลจากขาออกของชุด จัดเรียงการไหล โดยท่อส่วนนี้มีการเจาะรูเพื่อติดตั้งหัววัดความดัน (Pressure Tap) และท่อปีโตต์ (Pitot tube) เพื่อใช้ในการวัดค่าความดันสถิตและความดันรวมที่ได้ ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้

4.2.2 ส่วนท่อลมผ้าทดสอบ

เป็นส่วนที่ใช้ศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆของการไหลผ่านท่อลม โดยทำจากวัสดุไม้คงรูป ซึ่งใน งานวิจัยนี้ใช้วัสดุที่สามารถกันลมซึมผ่านได้ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 254 มิลลิเมตร(10 นิ้ว) และยาวสูงสุด 5.3 เมตร จากคู่มือของผู้ผลิตท่อลมผ้าให้คำแนะนำการออกแบบไว้ดังนี้ ท่อลมผ้า ตั้งแต่ช่วงทางเข้าต้องเว้นระยะไว้อย่างน้อย 4 ฟุต (1.2 m) ถึงจะเริ่มมีช่องเปิดช่องแรกได้ เพื่อให้ลม

สามารถออกที่ช่องเปิดแรกได้ดี และจะต้องมีช่องเปิดสุดท้ายก่อนถึงปลายท่อที่ระยะไม่น้อยกว่า 1 ฟุต (30 cm) เพื่อให้สามารถสร้างความดันสถิตที่ปลายท่อได้ ซึ่งการเจาะช่องเปิดเพื่อทำการศึกษานั้น จะทำการเจาะช่องเปิดจำนวน 3 รูปแบบ (ตารางที่ 4-1) ดังนี้

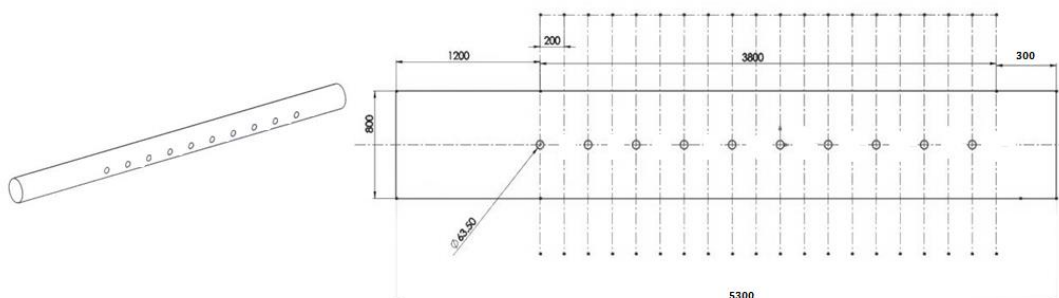
ตารางที่ 4-1 ท่อลมผ้าทดสอบ

| ท่อลมผ้า | ขนาดท่อ [m (inch)] | ความยาว [m] | ขนาดช่องเปิด [m (inch)] | จำนวน ช่องเปิด | d_0/D [-] |
|-------------|-----------------------|----------------|----------------------------|-------------------|----------------|
| รูปแบบที่ 1 | 0.254 (10") | 5.30 | 0.0635 (2.5") | 10 | 0.791 |
| รูปแบบที่ 2 | 0.254 (10") | 5.30 | 0.0635 (2.5") | 20 | 1.118 |
| รูปแบบที่ 3 | 0.254 (10") | 5.30 | 0.0635 (2.5") | 40 | 1.581 |

โดยที่ d_0 คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าคิดจากพื้นที่ช่องเปิดทั้งหมด [m]

4.2.2.1 ท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1

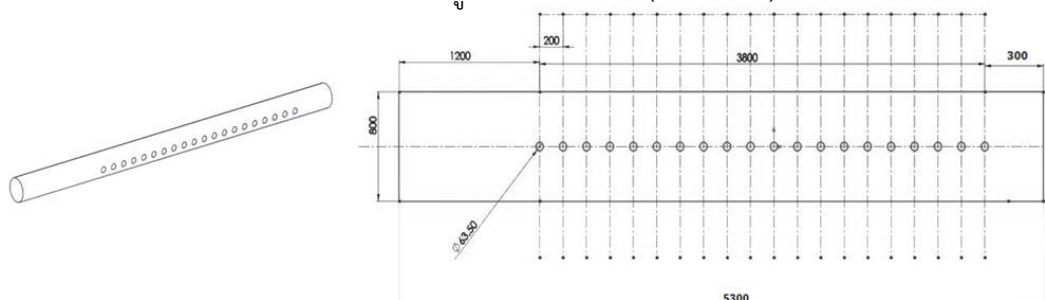
ทำการเจาะช่องเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว (63.5 mm) จำนวน 10 ช่อง



รูปที่ 4-6 ลักษณะของท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1

4.2.2.2 ท่อลมผ้ารูปแบบที่ 2

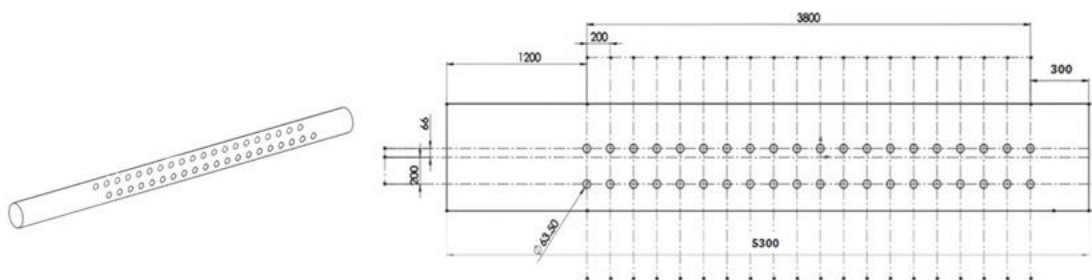
ทำการเจาะช่องเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว (63.5 mm) จำนวน 20 ช่อง



รูปที่ 4-7 ลักษณะของท่อลมผ้ารูปแบบที่ 2

4.2.2.3 ท่อลมฝ้ายรูปแบบที่ 3

ทำการเจาะช่องเปิดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 นิ้ว (63.5 mm) จำนวน 40 ช่อง โดยทำมุมที่ 4&8 o'clock มุมละ 20 ช่อง



รูปที่ 4-8 ลักษณะของท่อลมฝ้ายรูปแบบที่ 3

4.2.3 ส่วนทางออกท่อลมฝ้าย

ส่วนทางออกท่อลมฝ้ายมีลักษณะเป็นท่อตรงทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 254 มิลลิเมตร ยาว 300 มิลลิเมตร โดยด้านท้ายจะเป็นปลายปิด ท่อส่วนนี้มีการเจาะช่องเพื่อติดตั้งหัวต่อวัดความดัน และท่อท่อปิโตต์ เพื่อใช้ในการวัดค่าความดันสถิตและความดันรวมที่ได้ ณ ตำแหน่งที่กำหนดไว้

4.2.4 การวัดค่าตัวแปรต่างๆ

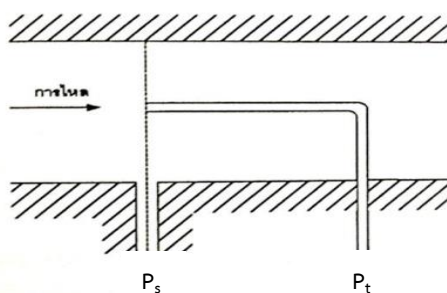
การวัดค่าในการทดลองนี้จะวัดค่าที่ตำแหน่งทางเข้าท่อลมฝ้าย ทางออกท่อลมฝ้าย ผิวของท่อลมฝ้าย และตำแหน่งช่องเปิดต่างๆของท่อลมฝ้าย โดยใช้เครื่องมือวัดดังแสดงในภาคผนวก ข

4.2.4.1 การวัดความดันสถิต

การวัดความดันสถิต (Static Pressure) กระทำโดยติดตั้งหัวต่อวัดความดัน ณ ตำแหน่งทางเข้าและทางออกของท่อลมฝ้าย โดยมีการติดตั้งทั้งตำแหน่งบน ล่าง ซ้ายและขวาของท่อลมฝ้าย หัวที่ใช้วัดความดันจะเป็นหัวเข็มของหลอดฉีดยาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1.6 มิลลิเมตร และต่อสายความดันจากหัวต่อวัดความดัน เข้ากับมานอมิเตอร์ (Manometer) ค่าที่อ่านได้จากทั้ง 4 ตำแหน่งจะนำมาเฉลี่ยเพื่อแสดงค่าความดันสถิตที่เกิด ณ หน้าตัดนั้น

4.2.4.2 การวัดความดันรวม

การวัดความดันรวม (Total Pressure) กระทำโดยติดตั้งหัวโพรบ (Probe) ที่มีขนาดประมาณ 1.6 มิลลิเมตร ณ ตำแหน่งหน้าตัดเดียวกับตำแหน่งที่วัดความดันสถิต และต่อสายความดันจากหัวต่อวัดความดันเข้ากับமானอมิเตอร์ค่าที่อ่านได้จะเป็นค่าความดันรวมที่เกิด ณ ตำแหน่งนั้น โดยหัวโพรบจะต้องวางตัวในแนวขนานกับทิศทางการไหล ดังรูปที่ 4-9



รูปที่ 4-9 การวัดความดันสถิตและความดันรวม^[11]

4.2.4.3 การวัดความเร็วการไหลผ่านช่องเปิด

ทำการวัดความเร็วการไหลผ่านช่องเปิดแต่ละช่องด้วยเครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer) โดยวัดในขณะที่การไหลของอากาศผ่านท่อลมผ้ามีสถานะคงตัว ค่าที่อ่านได้จะพิจารณาว่าเป็นค่าความเร็วลมเฉลี่ย ณ ตำแหน่งช่องเปิดนั้นๆ

4.2.4.4 การวัดความคงรูปของท่อลมผ้า

ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาการไหลของอากาศผ่านท่อลมผ้า ในขณะที่ท่อลมผ้าคงรูป เพื่อมิให้มีผลกระทบต่อผลการไหลที่มาจาก การเปลี่ยนรูปร่างของท่อลม อย่างไรก็ตาม การระบุว่าท่อลมผ้า ณ ขณะนั้นมีความคงรูปหรือไม่นั้นต้องมีเกณฑ์ที่ชัดเจน การมองด้วยสายตาเพียงอย่างเดียวไม่อาจนำมาใช้เป็นเกณฑ์ที่ตายตัวได้ เนื่องจากขึ้นกับความพึงพอใจของแต่ละบุคคล งานวิจัยนี้จึงได้กำหนดเกณฑ์ในการพิจารณาความคงรูปของท่อลมผ้าไว้ 3 เกณฑ์ ดังนี้

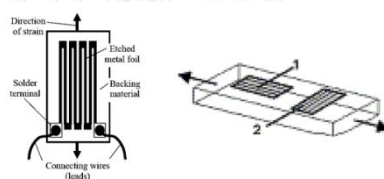
- ใช้สายตาพิจารณา: เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการบอกคร่าวๆได้ว่าท่อลมผ้าขณะนั้นคงรูป ด้วยการมองว่าท่อลมผ้าขณะนั้นไม่มีรอยย่นของผ้าอย่างเห็นได้ชัด และยังสามารถคงรูปได้ดี ไม่มีส่วนใดหย่อนลงมาจนส่งผลกระทบต่อผลการไหล

- ใช้เข็มขัดรัดเป็นเกณฑ์อ้างอิง: ขณะที่ส่งลมไปตามท่อลมผ้า หากนำเข็มขัดรัดขนาดเท่ากับขนาดของท่อลมผ้า ไปไว้ ณ ตำแหน่งใดๆของท่อลมผ้า เมื่อทำการส่งลมไปตามท่อลมผ้า หากท่อลมมี

การคงรูป ระยะห่างระหว่างผิวผ้ากับเข็มขัดรัดนั้นจะน้อยมาก แต่หากไม่คงรูปแสดงว่าระยะดังกล่าวห่างกัน

- ใช้เกจวัดความเครียด (Strain Gauge): เป็นวิธีที่สามารถบอกความคงรูปได้เป็นตัวเลขด้วยค่าความเครียด หากท่อลมผ้าคงรูป ค่าความเครียดที่เครื่องอ่านได้จะต้องมีค่ามากกว่าค่าเริ่มต้นของตัวเกจวัดความเครียดนั้น โดยการอ่านค่าความเครียดจะเริ่มอ่านเมื่อเห็นว่าท่อลมผ้าเริ่มคงรูปด้วยสายตาและไม่มีระยะห่างระหว่างเข็มขัดรัดกับผิวผ้า ค่าความเครียดที่อ่านได้เมื่อท่อลมผ้าเริ่มคงรูปนั้นจะนำมาใช้เป็นเกณฑ์ขั้นต่ำสำหรับการวิเคราะห์ เพื่อนำไปสู่ความดันสถิตขั้นต่ำที่ทำให้ท่อลมผ้าสามารถคงรูปได้

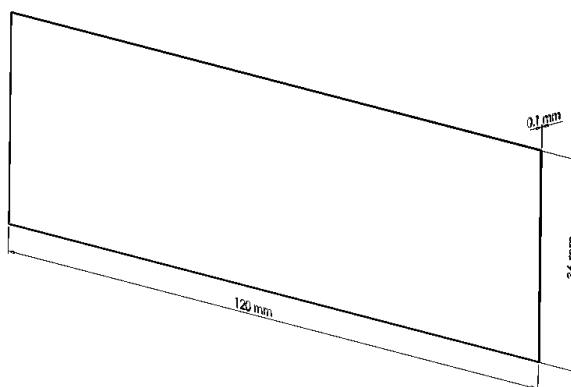
การวัดกระทำได้โดยติดตั้งเกจวัดความเครียด ณ ตำแหน่งกึ่งกลางของท่อลมผ้า เพื่อให้เป็นตัวแทนของความเครียดเฉลี่ยที่เกิดขึ้น ณ การทดลองนั้น โดยติดตั้งตามแนวแกน และแนวตั้งฉาก เพื่อพิจารณาการยึดตัวของวัสดุที่เกิดขึ้นจากความเค้นในแนวเส้นรอบวง (Hoop Stress) และความเค้นตามยาว (Longitudinal Stress) สายสัญญาณจากตัวเกจวัดความเครียด จะนำไปต่อเข้ากับเครื่องบันทึก (Data logger) เพื่อทำการอ่านความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงขนาดของเกจวัดความเครียดด้วยหลักการทางไฟฟ้า



รูปที่ 4-10 เกจวัดความเครียด [20]

4.2.5 การทดสอบแรงดึง (Tensile Test)

การทดสอบแรงดึงเป็นการทดสอบพื้นฐานที่สุดอย่างหนึ่งที่ใช้ทดสอบหาสมบัติของวัสดุต่างๆ ในการทดสอบจะต้องทราบค่าพื้นที่หน้าตัดและความยาวเริ่มต้นของวัสดุที่ทำการทดสอบ โดยทดสอบกับผ้าที่เป็นวัสดุของท่อลม ผลการทดสอบจะถูกนำเสนอสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของวัสดุ โดยค่าโมดูลัสความยืดหยุ่นสามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟในช่วงของการเสียรูปแบบยืดหยุ่น การทดสอบแรงดึงในงานวิจัยนี้ ใช้วัสดุผ้าชิ้นทดสอบขนาด 120x36x0.1 mm ดังรูปที่ 4-11 และเครื่องที่ใช้ทดสอบแรงดึงเป็นเครื่องของบริษัทชิมัดสึ (SHIMADZU) โมเดล AG-IS 100 kN โดยทำการหนีบผ้าทดสอบไว้ที่ตำแหน่งจับยึดของเครื่อง จากนั้นทำการเพิ่มแรงและวัดระยะยืดที่เพิ่มขึ้นของผ้า โดยเพิ่มแรงเข้าไปทีละน้อยและเรื่อยๆ จนกว่าผ้าเริ่มขาดออกจากกัน



รูปที่ 4-11 แสดงขนาดชิ้นผ้าทดสอบ



รูปที่ 4-12 เครื่องทดสอบแรงดึง

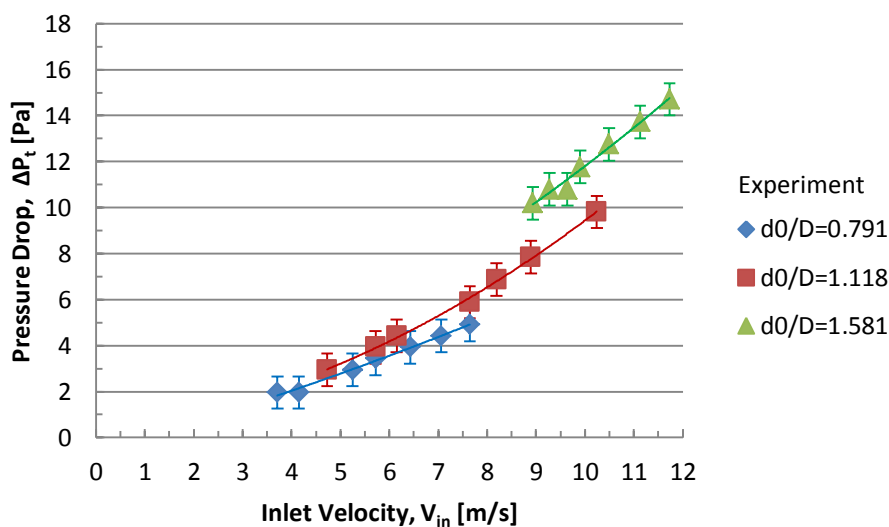
4.3 ผลลัพธ์การทดลองของการไหลผ่านท่อลมผ้า

ค่าต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบกับท่อลมผ้าทั้ง 21 กรณีถูกนำมาพล็อตเป็นกราฟเพื่อแสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของตัวแปรต่าง ๆ โดยในหัวข้อนี้ได้ทำการเลือกกรณีการทดลองที่ค่าความถี่พัลลม 60 เฮิร์ตซ์เท่ากันในแต่ละรูปแบบของช่องเปิดคือ กรณีที่ 1.4, 2.4 และ 3.1 มาเป็นตัวอย่างในการนำเสนอเพื่อให้เห็นถึงลักษณะการกระจายตัวของความดันรวมลด ความดันสถิต และอัตราการไหลผ่านช่องเปิด เพื่อวิเคราะห์ถึงพฤติกรรมของตัวแปรเหล่านี้ในการไหลผ่านท่อลมผ้า รวมทั้งผลลัพธ์ของการทดสอบแรงดึงในรูปของกราฟความเค้นและความเครียดของวัสดุผ้าชนิดนี้

4.3.1 ความดันรวมลดที่เกิดขึ้นในการไหลผ่านท่อลมผ้า

รูปที่ 4-13 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างความดันรวมลดต่อความเร็วการไหลเข้าท่อลมผ้าที่เกิดขึ้น พบว่าแนวโน้มความดันรวมลดของท่อลมผ้าทั้ง 3 รูปแบบ จะเพิ่มมากขึ้นในลักษณะพหุนามกำลังสอง เมื่อความเร็วการไหลมีค่ามากขึ้นหรือกล่าวได้ว่า เกิดความสูญเสียที่มากขึ้นนั่นเอง ซึ่งสอดคล้องกับสมการของการสูญเสีย(สมการ 3.10)

เมื่อพิจารณาความดันรวมลดที่ค่าความเร็วการไหลค่าหนึ่ง พบว่าอัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าของช่องเปิดทั้งหมดต่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมผ้า (d_0/D) จะส่งผลต่อค่าความดันรวมลดที่เกิดขึ้นด้วย โดยค่า d_0/D ที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความดันรวมลดเพิ่มสูงขึ้น ทั้งนี้เป็นผลมาจากกรณีที่มีพื้นที่ช่องเปิดที่เพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนกับมีจำนวนช่องเปิดย่อยที่มากขึ้น ทำให้เกิดความปั่นป่วนของการไหล ส่งผลให้ความสูญเสียอันเนื่องจากการไหลผ่านช่องเปิดแต่ละช่องมากกว่าท่อลมผ้าที่มีพื้นที่ช่องเปิดน้อย



รูปที่ 4-13 ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมของการทดลองในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3

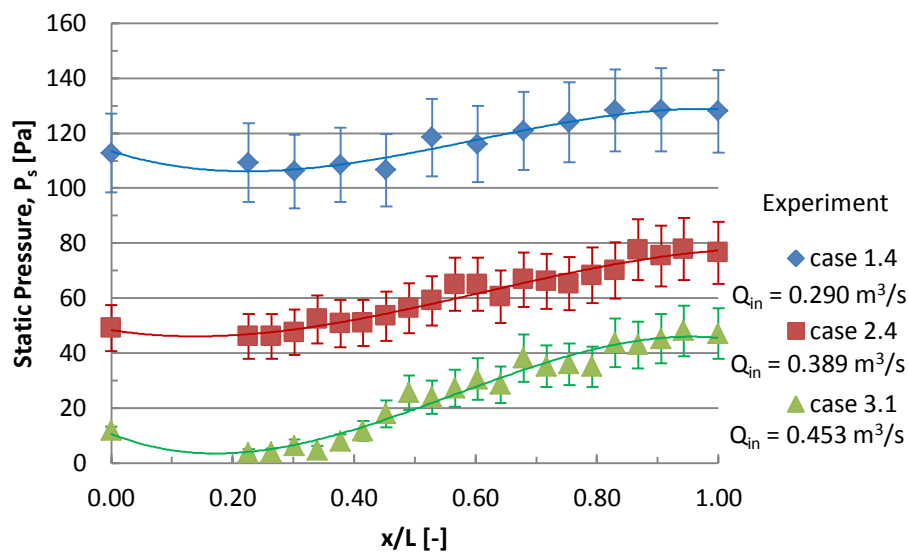
4.3.2 พฤติกรรมของความดันสถิตในการไหลผ่านท่อลมผ้า

รูปที่ 4-14 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางตามแนวท่อในการทดลองที่ความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ของท่อลมผ้าทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าลักษณะของกราฟจะมีแนวโน้มที่ลดลงระยะหนึ่งแล้วค่อยๆมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นตามระยะห่างจากต้นทางของท่อ

แนวโน้มความดันสถิตที่เพิ่มมากขึ้นนั้น เป็นผลมาจากการไหลผ่านช่องเปิดใดๆ ทำให้มวลของอากาศลดลง แต่เนื่องจากขนาดท่อลมผ้ายังคงเท่าเดิม ส่งผลให้ความดันจลน์ลดลงและเปลี่ยนไป

อยู่ในรูปของความดันสถิตที่เพิ่มมากขึ้น เกิดการได้คืนของความดันสถิต (Static Pressure Regain) ตามสมการเบอร์นูลลี ทำให้ความดันสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นและมากที่สุดที่ปลายท่อปิด ในขณะที่แนวโน้มความดันสถิตที่ลดลงในช่วงแรกนั้นเป็นผลมาจากอัตราการไหลในท่อลดลงน้อย ทำให้การได้คืนของความดันสถิตจากความดันจลน์ที่ลดลงมีค่าน้อยจนไม่เพียงพอที่จะชดเชยความดันสถิตที่สูญเสียไป

นอกจากนี้ ค่าอัตราส่วน d_0/D ที่ต่างกันในห้องลมก็ยังทำให้ค่าความดันสถิตที่ได้ต่างกัน โดยค่า d_0/D ต่ำจะให้ค่าความดันสถิตที่สูงกว่าเนื่องจากปริมาณมวลอากาศที่ออกไปน้อยกว่า ทำให้ในระบบยังคงมีพลังงานในรูปความดันที่สูง

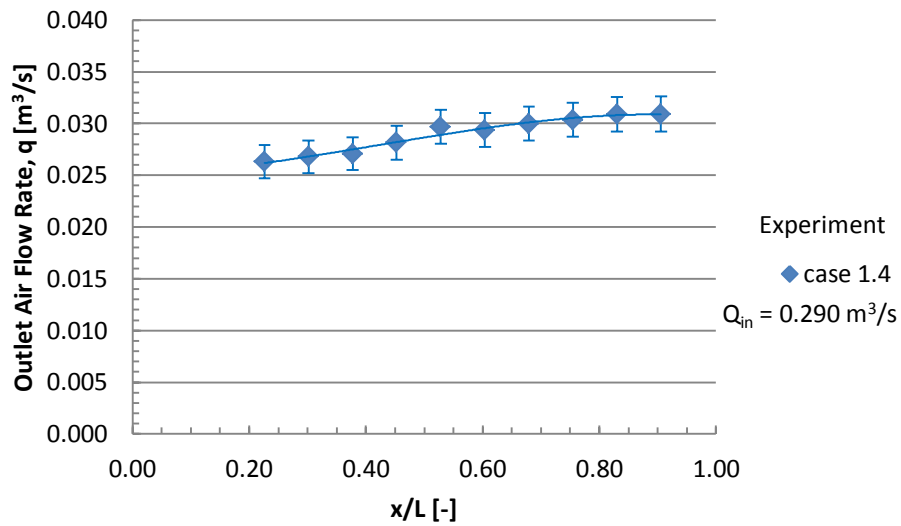


รูปที่ 4-14 ความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลอง ด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิรตซ์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3

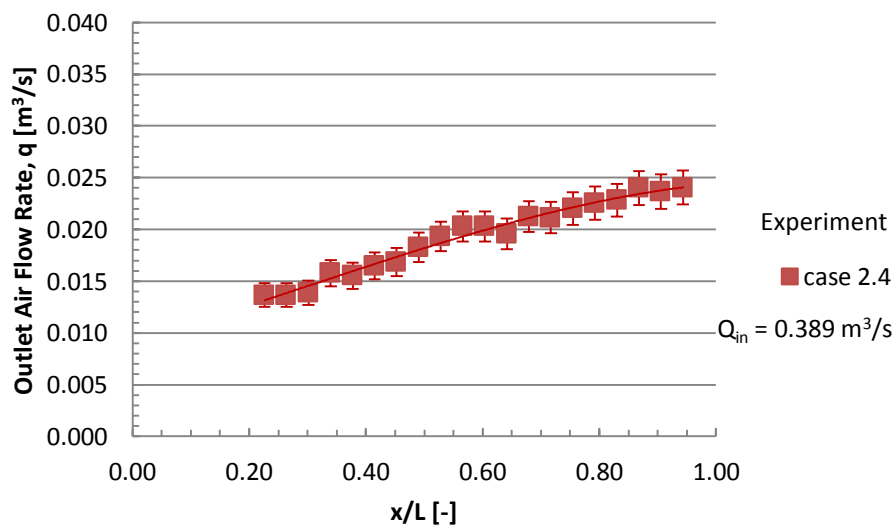
4.3.3 พฤติกรรมของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด

รูปที่ 4-15 ถึง 4-17 ได้แสดงอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิรตซ์ สำหรับกรณี 1.4, 2.4 และ 3.1 ตามลำดับพบว่า การกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดที่เกิดขึ้นจากการทดลอง มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะช่องเปิดห่างจากต้นทางของท่อมากขึ้น โดยมีอัตราการไหลออกมากที่สุดที่ตำแหน่งช่องเปิดสุดท้าย ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมการกระจายตัวของความดันสถิตที่เพิ่มขึ้น โดยความดันสถิตเฉลี่ย ณ ตำแหน่งช่องเปิดยังมีค่าสูง จะทำให้อัตราการไหลผ่านช่องเปิดสูงตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามสมการของช่องเปิดที่อัตราการไหลผ่านช่องเปิดจะแปรผันตรงกับรากที่สองของความดันเฉลี่ย ($q \propto \sqrt{P_{av}}$)

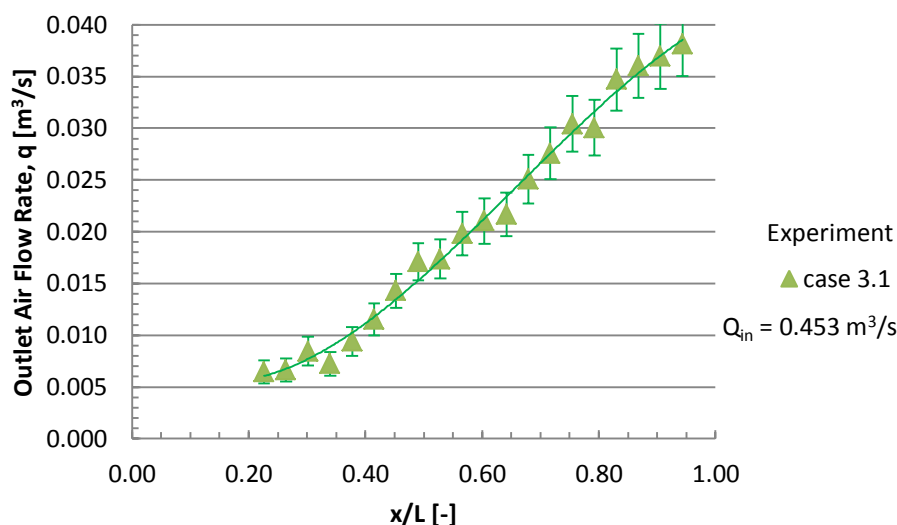
นอกจากนี้ สำหรับอัตราส่วน d_0/D ที่ต่างกัน พบว่ามีผลต่อการกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด โดย d_0/D ที่มากขึ้น จะทำให้ความสม่ำเสมอของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดลดลง เนื่องจากผลต่างของความดันสถิตในแต่ละตำแหน่งที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4-15 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ ในท่อลมผ้า กรณี 1.4



รูปที่ 4-16 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ ในท่อลมผ้า กรณี 2.4

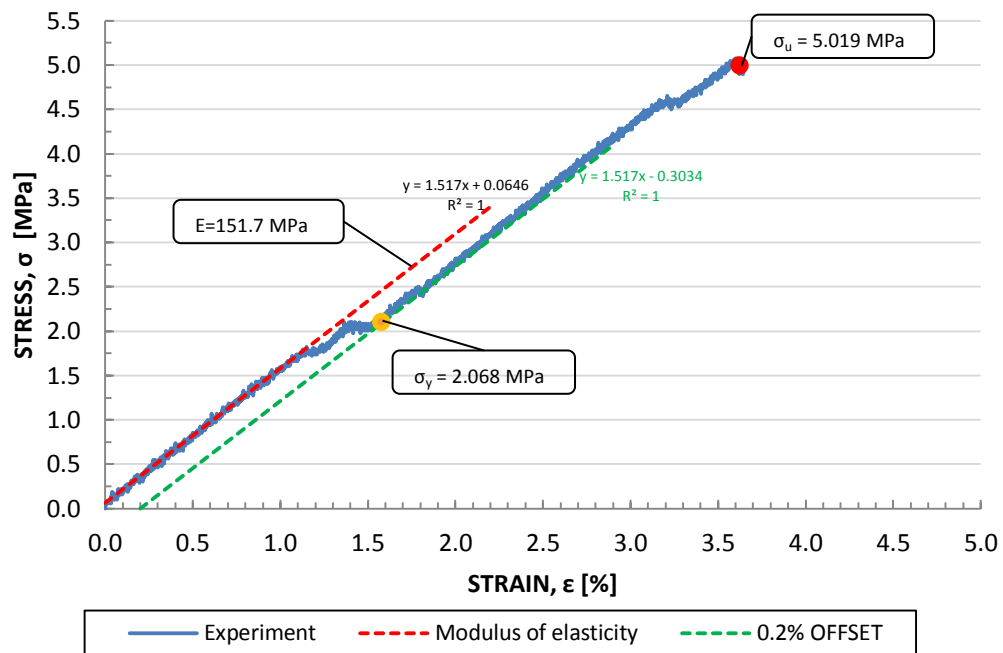


รูปที่ 4-17 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ ในท่อลมผ้า กรณี 3.1

4.3.4 คุณสมบัติทางกลของวัสดุผ้าจากการทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึงกับเศษชิ้นผ้า และวัดด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง จะได้กราฟความเค้นกับความเครียดของวัสดุผ้าชนิดนี้ ดังรูปที่ 4-18 โดยวัสดุผ้าชนิดนี้มีค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus, E) เท่ากับ 151.7 MPa ซึ่งหาได้จากความชันในช่วงความเป็นสภาพยืดหยุ่น (Elasticity) ของวัสดุ และเนื่องจากผ้าจัดว่าเป็นวัสดุเหนียว (ductile material) ทำให้ในบางกรณีไม่สามารถเห็นจุดความเค้นครากของวัสดุได้อย่างชัดเจน จึงใช้ค่าความเค้นพิสูจน์หรือค่าความเค้นที่ 0.2% Offset Strain ในการพิจารณาหาความเค้นครากซึ่งได้ค่าความเค้นคราก 2.068 MPa

เนื่องจากท่อลมผ้ามีลักษณะเป็นเสมือนภาชนะอัดความดัน ดังนั้น ค่าความเค้นครากนี้จะถูกพิจารณาตามสมการ 3.33 ทำให้สามารถหาค่าความดันสถิตได้เท่ากับ 1943.4 พาสคาลเกจ ซึ่งจะเป็นความดันสถิตสูงสุดที่ทำให้วัสดุผ้าไม่เกิดการเสียรูปได้



รูปที่ 4-18 กราฟความเค้นต่อความเครียดของวัสดุผ้าที่ใช้ในงานวิจัย

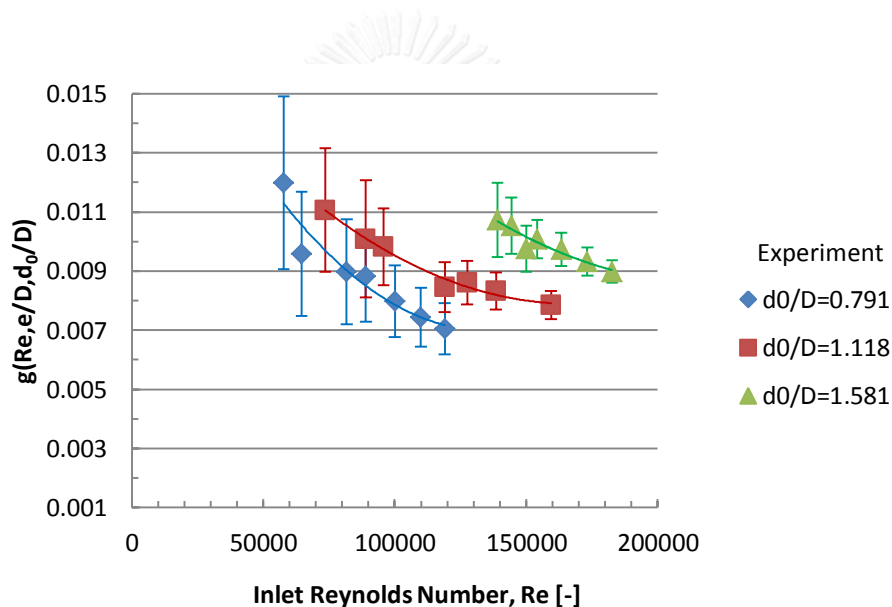
ผลการทดลองการไหลผ่านท่อลมผ้า ทำให้ได้ค่าความเครียดที่อ่านได้จากเกจวัดความเครียด ($\epsilon_{\text{tension}}$) ในขณะที่ท่อลมผ้าเริ่มคงรูปมีค่าโดยเฉลี่ย $237.86 \mu\text{m/m}$ ซึ่งอยู่ในช่วงความเป็นสภาพยืดหยุ่น จากกราฟความเค้นต่อความเครียดของวัสดุ และเมื่อพิจารณาจากกฎของฮุก ($E = \sigma/\epsilon$) จะได้ค่าความเค้นเท่ากับ 0.0367 MPa และหากพิจารณาในลักษณะของภาชนะความดัน ตามสมการ 3.33 จะได้ค่าความดันสถิตเท่ากับ 28.89 Pa ซึ่งค่าความดันสถิตนี้จะเป็นค่าความดันสถิตขั้นต่ำที่ต้องให้แก่ท่อลมผ้า เพื่อให้ท่อลมผ้านั้นสามารถคงรูปได้อย่างเหมาะสม (รูปที่ 4-19)



รูปที่ 4-19 ลักษณะของท่อลมผ้าที่คงรูปเหมาะสม(ซ้าย) และไม่เหมาะสม(ขวา)

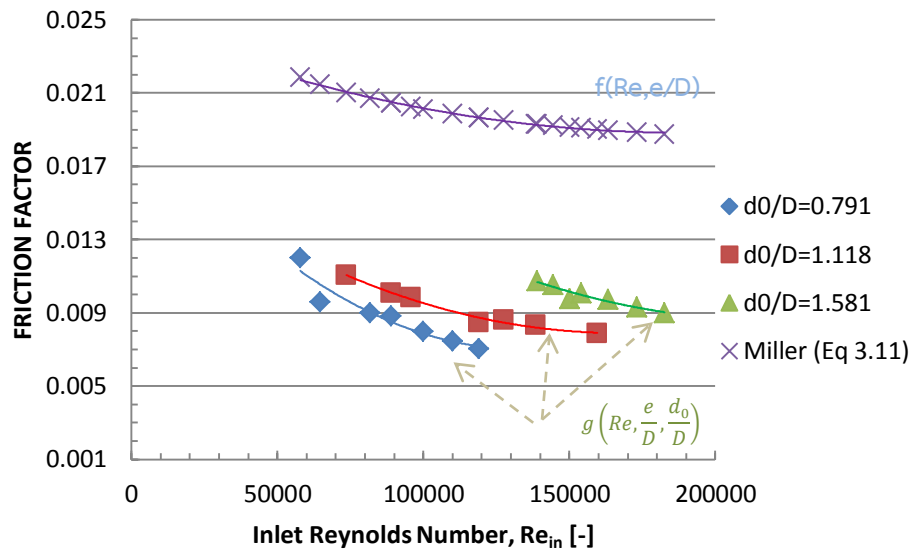
4.4 การวิเคราะห์ผลการทดลองในรูปของตัวแปรไร้มิติ

ผลการทดลองที่ได้เมื่อถูกนำวิเคราะห์ในรูปของตัวแปรไร้มิติจะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความเสียหาย $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ สำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์สเข้าที่อัตราส่วน d_0/D ต่างๆกัน ดังรูปที่ 4-20 โดยตัวเลขเรย์โนลด์สเข้าเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าฟังก์ชันความเสียหาย $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ ลดลง และเมื่อพิจารณาฟังก์ชัน $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ ที่ตัวเลขเรย์โนลด์สเข้าคงที่ใดๆ พบว่าอัตราส่วน d_0/D ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ มีสูงขึ้น ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าอัตราส่วน d_0/D หรือช่องเปิดที่เกิดขึ้นในท่อลมผ้ามีอิทธิพลต่อความเสียหายที่เกิดขึ้นในท่อและค่าอัตราส่วน d_0/D ที่มากขึ้นจะเปรียบเสมือนกับการทำให้ท่อลมผ้าที่มีความขรุขระเพิ่มมากขึ้น แต่เป็นความขรุขระที่จงใจสร้างขึ้นมาเพื่อใช้ในการส่งลม



รูปที่ 4-20 ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์สเข้าของการทดลองในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3 เมื่อ $e/D=0.000433$

เมื่อพิจารณาค่าฟังก์ชันความเสียหายของ Miller^[13] (สมการ 3.11) กับผลการทดลอง d_0/D ทั้ง 3 รูปแบบ ต่อตัวเลขเรย์โนลด์สเข้าใดๆ ดังรูป 4-21 จะเห็นว่ากราฟแต่ละรูปแบบมีแนวโน้มเดียวกับ Miller^[13] แต่มีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาด โดยค่าฟังก์ชันความเสียหายที่ได้จากท่อลมผ้าที่มีการเจาะช่องเปิดจะมีค่าน้อยกว่ากรณีท่อลมผ้าที่ไม่มีการเจาะรู ทั้งนี้เพราะว่าอิทธิพลของการไหลแบบปั่นป่วนที่เกิดขึ้นในท่อลมผ้าที่มีการเจาะช่องเปิดลดลงจากความเร็วลมในท่อที่ลดลงตลอดเวลา ดังนั้น ถึงแม้ว่าค่า d_0/D จะเปรียบเสมือนค่าความขรุขระที่เพิ่มขึ้น ซึ่งควรจะให้ค่าฟังก์ชันความเสียหายที่สูงกว่า แต่ค่า d_0/D กลับทำให้อิทธิพลของการไหลแบบปั่นป่วนในท่อลดลง



รูปที่ 4-21 กราฟแสดงฟังก์ชันความเสียดทานต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้า เมื่อ $e/D=0.000433$

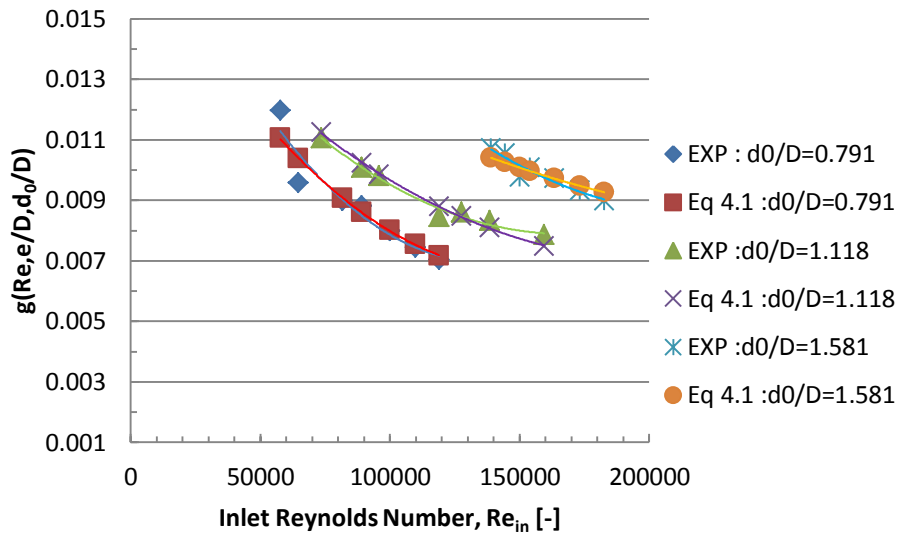
4.5 การพัฒนาฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้า

จากแนวโน้มของกราฟฟังก์ชันความเสียดทานที่คล้ายกัน ดังนั้น การพัฒนาฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้าสามารถใช้สมการของ Miller ที่มีพื้นฐานจาก Moody chart มาเป็นสมการตั้งต้นในการพัฒนาได้ ทั้งนี้ในการสร้างสมการสำหรับฟังก์ชันความเสียดทานจะพิจารณาข้อมูลการทดลองด้วยวิธีการถดถอยแบบหลายเชิงกับข้อมูลไม่เชิงเส้น (nonlinear multiple regression) เพื่อให้ได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนของข้อมูลทั้งหมดจากการทดลอง แล้วทำการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุด โดยรายละเอียดการคำนวณได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก

สมการ 4.1 แสดงสมการของฟังก์ชันความเสียดทานที่ได้ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แสดงการตัดสินใจ (R-Squared) เท่ากับ 0.916 ที่มีความแม่นยำในระดับหนึ่ง โดยสมการ 4.1 นี้จะนำไปใช้พัฒนา ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

$$g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right) = \frac{0.04215\left(\frac{d_0}{D}\right)\log(Re_{av}) - 0.15079\log(Re_{av}) - 0.1363\left(\frac{d_0}{D}\right) + 0.7711}{\left[\log\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \quad (4.1)$$

รูป 4-22 แสดงผลลัพธ์ของค่า $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ ที่ได้จากสมการ 4.1 เทียบกับผลการทดลองที่เกิดขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกัน และมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยประมาณ 3.3%

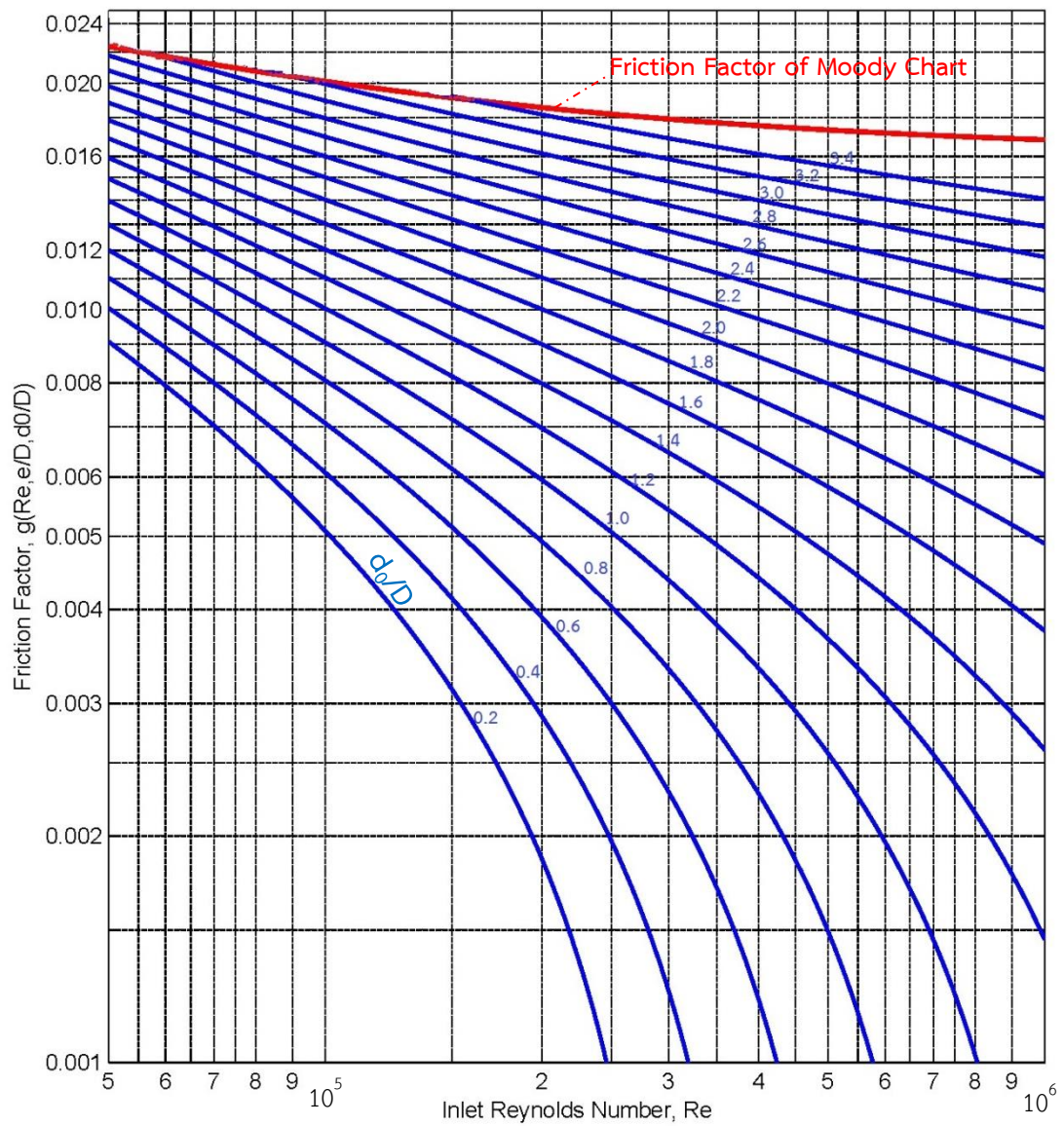


รูปที่ 4-22 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของฟังก์ชัน $g(Re, e/D, d_0/D)$
จากการทดลองกับสมการ 4.1 เมื่อ $e/D=0.000433$

4.6 ขีดจำกัดการใช้งานของค่าฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้า

จากผลการทดลองที่พบว่า เมื่อค่า d_0/D เพิ่มขึ้น ค่าฟังก์ชันความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นด้วยนั้น ในความเป็นจริงแล้ว การเพิ่มค่า d_0/D จะถูกจำกัดจากขนาดพื้นที่ผิวของท่อลมผ้าซึ่งขึ้นกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวในส่วนที่มีการเจาะช่องเปิดของท่อลมผ้า ทำให้ค่า d_0/D ไม่สามารถที่จะเพิ่มค่าขึ้นได้อย่างอิสระ ดังนั้น สมการ 4.1 ที่พัฒนาขึ้นมาจึงมีขีดจำกัดในการใช้งานของค่า d_0/D ที่จะแทนลงในสมการ

จากการที่ค่าฟังก์ชันความเสียดทานของท่อลมผ้าที่มีการเจาะช่องเปิดจะน้อยกว่าค่าฟังก์ชันความเสียดทานของท่อลมผ้าที่ไม่มีการเจาะช่องเปิดที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์ชาเข้าเดียวกัน ดังรูป 4-21 ดังนั้นในการกำหนดขีดจำกัดของค่า d_0/D ในสมการ 4.1 จึงใช้ค่าฟังก์ชันความเสียดทานสูงสุดในกรณี queท่อลมนั้นไม่มีการเจาะช่องเปิดมาเป็นตัวกำหนด ซึ่งพบว่าค่า d_0/D สูงสุดจะไม่เกิน 3.4 ดังแสดงในรูป 4-23



รูปที่ 4-23 ความเสียดทาน $g(Re, e/D, d_o/D)$ ต่อตัวเลขเรย์โนลด์ชาเข้าท่อลมฟ้า เมื่อ $e/D = 0.000433$ ที่ค่า d_o/D ต่าง ๆ โดยค่า d_o/D สูงสุด = 3.4

บทที่ 5

ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขและโปรแกรมจำลองการไหล

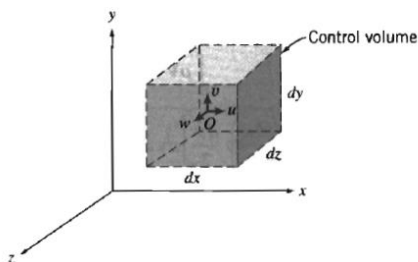
5.1 ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD)

การอธิบายปรากฏการณ์การไหลในระบบทางวิศวกรรมสามารถกระทำได้ผ่านการวิเคราะห์ทางกฎฟิสิกส์ของสมการหลัก 3 สมการคือ กฎการอนุรักษ์มวล (conservation of mass), กฎการอนุรักษ์โมเมนตัม (conservation of momentum) และกฎการอนุรักษ์พลังงาน (conservation of energy) ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของสมการนาเวียร์-สโตกส์ (Navier–Stokes equations)

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{g} \quad (5.1)$$

| | | | |
|--------|--------|-----|---|
| โดยที่ | ρ | คือ | ความหนาแน่นของของไหล [kg/m ³] |
| | u | คือ | ความเร็ว [m/s] |
| | t | คือ | เวลา [s] |
| | P | คือ | ความดัน [Pa] |
| | μ | คือ | ความหนืดของของไหล [kg/m.s] |
| | g | คือ | ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก [m/s ²] |

การหาผลเฉลยแม่นยำตรง (exact solution) ของการไหลนั้นกระทำได้ยากหรืออาจไม่สามารถหาผลเฉลยได้ ทำให้เกิดการพัฒนาวิธีการหาคำตอบโดยประมาณขึ้น (approximate solution) ซึ่งการแก้ปัญหาในระบบสมการดังกล่าวจะกระทำโดยใช้ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข (numerical method) มาช่วยในการคำนวณ และเรียกการแก้ปัญหาสมการเชิงอนุพันธ์ย่อยโดยการปรับระบบสมการให้เป็นระบบสมการทางพีชคณิตของการไหลว่า ‘ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (computational fluid dynamics, CFD)’



รูปที่ 5-1 ปริมาตรควบคุมขนาดเล็ก [11]

การวิเคราะห์การไหลเพื่อให้ทราบการกระจายตัวของตัวแปรต่างๆในปริมาตรควบคุมที่พิจารณานั้น มักจะใช้ข้อมูลที่ขอบของปริมาตรควบคุมมาประกอบการพิจารณา เนื่องจากเป็นปริมาณที่สามารถทราบค่าได้โดยง่าย และการแก้ปัญหาโดยใช้ปริมาตรควบคุมขนาดเล็กมากๆ (infinitesimal control volume) มาวิเคราะห์กับปัญหาการไหล จะทำให้ทราบถึงสนามการไหลภายในระบบ

ในการแก้ปัญหาดังกล่าวการใช้ CFD ในส่วนของการไหลแบบปั่นป่วน จะต้องใช้แบบจำลองของความปั่นป่วน (turbulent model) มาช่วยในการคำนวณและพิจารณาในระบบการไหล โดยเทคนิคการแก้สมการทางพลศาสตร์ของไหลสำหรับระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะแบ่งออกได้เป็น 4 เทคนิค ดังนี้

- Direct Numerical Simulation (DNS)

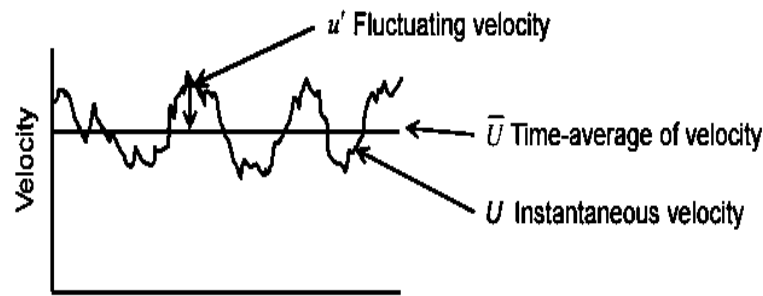
เป็นการแก้ชุดสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยตรงด้วยระเบียบวิธีเชิงตัวเลขโดยไม่ใช้แบบจำลองความปั่นป่วนมาพิจารณา ทำให้ต้องใช้ขนาดเอลิเมนต์ของของไหลขนาดเล็กๆจำนวนมากมาย เพื่อให้สอดคล้องกับรูปแบบการไหลของกระแสหมุนวนที่เกิดขึ้นในทุกๆขนาด ซึ่งจะเป็นวิธีการที่กินเวลาและสิ้นเปลืองทรัพยากรของคอมพิวเตอร์อย่างมาก

- Large Eddy Simulation (LES)

เป็นการแก้ไขและปรับปรุงการจำลองแบบ DNS ให้สะดวกและรวดเร็วมากขึ้น โดยจะทำการคำนวณสมการนาเวียร์-สโตกส์เฉพาะจุดที่มีการไหลแบบกระแสหมุนวนที่มีขนาดใหญ่ และในส่วนของกระแสหมุนวนขนาดเล็กจะทำการคำนวณด้วยการจำลองจากแบบจำลองความปั่นป่วน

- Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS)

เป็นการคำนวณด้วยการปรับปรุงรูปแบบสมการนาเวียร์-สโตกส์ โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วนทั้งหมด และการแยกตัวแปรของการไหลให้เป็น 2 เทอมคือ ส่วนค่าเฉลี่ย และส่วนค่าความปั่นป่วนที่เกิดขึ้น ดังสมการ



รูปที่ 5-2 ส่วนประกอบของความเร็วในการไหลแบบปั่นป่วน^[10]

$$u(x, t) = \bar{u}(x) + u'(x, t) \quad (5.2)$$

| | | | |
|--------|-----------|-----|--|
| โดยที่ | \bar{u} | คือ | ความเร็วเฉลี่ยของของไหล [m/s] |
| | u' | คือ | ค่าความปั่นป่วนของความเร็วเฉลี่ย [m/s] |
| | u | คือ | ความเร็วของของไหล [m/s] |

ในการคำนวณระบบที่มีการไหลแบบปั่นป่วนจะใช้แบบจำลองความปั่นป่วน เช่น model ซึ่งประกอบไปด้วย transport equation 2 สมการ โดยจะต้องหาคำตอบของสมการดังกล่าวไปพร้อมๆ กับการแก้สมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม

- Detached Eddy Simulation (DES)

เป็นการคำนวณด้วยการพิจารณาเทคนิค RANS และ LES เข้าด้วยกัน โดยขณะที่เกิดช่วงขนาดความปั่นป่วนน้อยจะใช้เทคนิค RANS ในการหาคำตอบ และเมื่อขนาดของความปั่นป่วนสูงขึ้นจะใช้เทคนิค LES ในการคำนวณ ซึ่งเทคนิคนี้จะช่วยย่นระยะเวลาในการคำนวณลง

5.2 Turbulent Models : Standard k-epsilon

สิ่งสำคัญของการคำนวณการไหลแบบปั่นป่วนที่มีผลต่อความถูกต้องของผลลัพธ์นั้น จะขึ้นอยู่กับชนิดของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Models) ซึ่งในปัจจุบันมีแบบจำลองหลากหลายแบบ เช่น Spalart-Allmaras model, k- ϵ model, k- ω model และ Reynolds Stress Model เป็นต้น ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนคือ k- ϵ model เนื่องจากแบบจำลองนี้จะใช้ได้ดีกับการไหลภายใน (internal flow) และการไหลที่มีผลต่างความดันต่ำ (small pressure gradient) รวมทั้งยังให้ค่าความถูกต้องในการคำนวณเป็นที่น่าพอใจและใช้เวลาในการคำนวณไม่มากเกินไป

สมการการเคลื่อนที่ของการไหลแบบปั่นป่วนจะประกอบด้วยสมการอนุรักษ์มวลและสมการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยสนใจค่าเฉลี่ยของการไหลแบบปั่นป่วน ซึ่งใช้วิธีการเฉลี่ยของเรย์โนลด์ (Reynolds Averaging) เพื่อแปลงสมการการเคลื่อนที่ข้างต้นของการไหลแบบปั่นป่วน ให้อยู่ในลักษณะรูปของค่าเฉลี่ย โดยมีสมมุติฐานของงานวิจัยว่า เป็นการไหลคงตัว, เป็นการไหลที่อัดตัวไม่ได้ และไม่มีการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้น ทำให้สามารถนำสมการมาเขียนในรูปของเทนเซอร์เป็น

สมการอนุรักษ์มวล

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (5.3)$$

สมการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x_i}(-\rho \overline{u_i u_j}) \quad (5.4)$$

การใช้วิธีการเฉลี่ยของค่าเรย์โนลด์จะมีพจน์พิเศษที่แตกต่างจากการไหลแบบราบเรียบเพิ่มขึ้นมา คือ ความเค้นเรย์โนลด์ (Reynolds Stresses, $\overline{u_i u_j}$) และจากสมมุติฐานของ Boussinesq พบว่ารูปแบบของความสัมพันธ์ของความเค้นเรย์โนลด์จะเป็นแปรผันเชิงเส้นกับค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดตึงสมการ 5.5

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (5.5)$$

โดยที่ μ_t คือ ค่าความหนืดของความปั่นป่วน [kg/m.s]

ค่าความหนืดของความปั่นป่วน (eddy viscosity) เป็นความสัมพันธ์ของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) และอัตราการลดลงของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ϵ) ดังนี้

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5.6)$$

การพิจารณาถึง แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด Standard k- ϵ ทำให้สามารถเขียนสมการของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน และอัตราการลดลงของค่าพลังงานจลน์ของความปั่นป่วนได้ตั้งสมการ 5.7 และ 5.8 ตามลำดับ

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \left(C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{\varepsilon 3} G_b) \right) \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon}{k} \quad (5.8)$$

$$\text{โดยที่ } G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad , \quad G_b = -g_i \left(\frac{\mu_t}{\rho Pr_T} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right)$$

ในงานวิจัยนี้จะใช้ค่าคงที่ของการไหลแบบปั่นป่วนชนิด Standard k- ε จากค่าคงที่ในโมเดลของ Launder-Sharma (1974)^[28] เนื่องจากเป็นโมเดลที่ให้ผลลัพธ์ความถูกต้องของการกระจายตัวของ พลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (ε) และความเค้นเรย์โนลด์ บริเวณตำแหน่งใกล้ชั้นขอบเขตของผิวท่อ (near wall boundary) ได้แม่นยำกว่าโมเดลอื่นๆ รวมทั้งยังเป็นโมเดลที่ทำความเข้าใจได้ง่ายและใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งมีผลลัพธ์ที่ดีในระดับหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลอง ดังนี้

$$C_\mu = 0.09 \quad , \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad , \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92$$

$$C_{\varepsilon 3} = 1 \quad , \quad \sigma_k = 1 \quad , \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad , \quad \sigma_T = 0.9$$

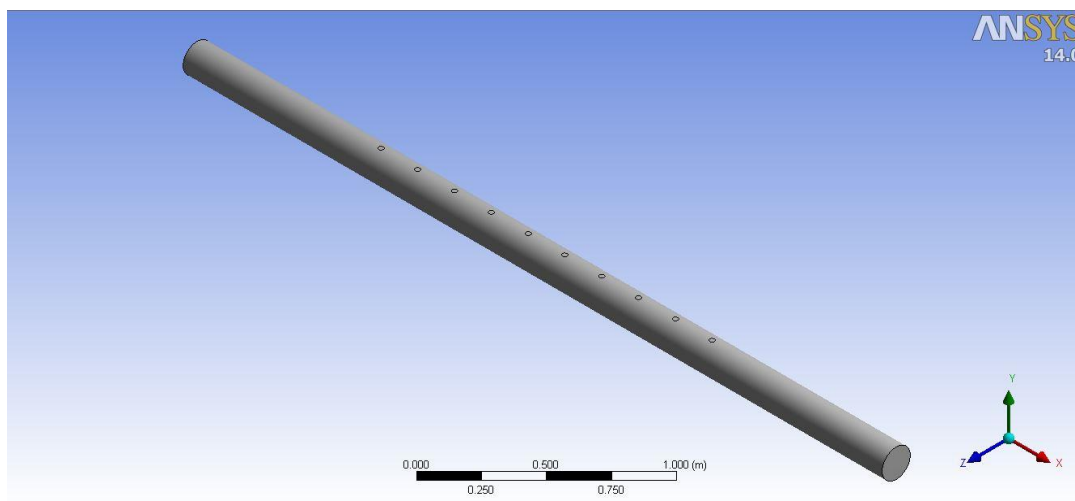
5.3 โปรแกรมจำลองการไหล

โปรแกรมจำลองการไหลเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง โดยงานวิจัยนี้จะอาศัยโปรแกรมจำลองการไหลสำเร็จรูป Ansys Fluent V.14 ซึ่งการใช้งานนั้นต้องมีการตั้งค่าส่วนต่างๆของโปรแกรมให้ตรงกับเงื่อนไขการทดลอง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

5.3.1 โครงสร้าง (Geometry)

ระบบจำลองการไหลในโปรแกรมนั้นสามารถสร้างได้ทั้ง 2 มิติ และ 3 มิติ ซึ่งการใช้โครงสร้าง 2 มิติมาตรวจสอบผลลัพธ์นั้น จะเป็นลักษณะแบบแผ่น (Plate) แต่ผลลัพธ์อาจมีความผิดพลาดมากกว่า จึงใช้โครงสร้าง 3 มิติ ที่มีความซับซ้อนกว่ามาก ในการจำลองการไหลให้มีความถูกต้องและใกล้เคียงกับการไหลผ่านท่อลมผ้ามากที่สุด

โครงสร้างของท่อลมผ้าจะมีลักษณะเป็นทรงกระบอก 3 มิติ ดังรูปที่ 5-3 ที่มีจำนวนช่องเปิดตามรูปแบบของท่อลมผ้า โดยกำหนดให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (D), ขนาดช่องเปิด (d), จำนวนช่องเปิด (N), และระยะห่างระหว่างช่องเปิด (L_h) ซึ่งมีค่าแตกต่างกันไปในแต่ละการทดลอง



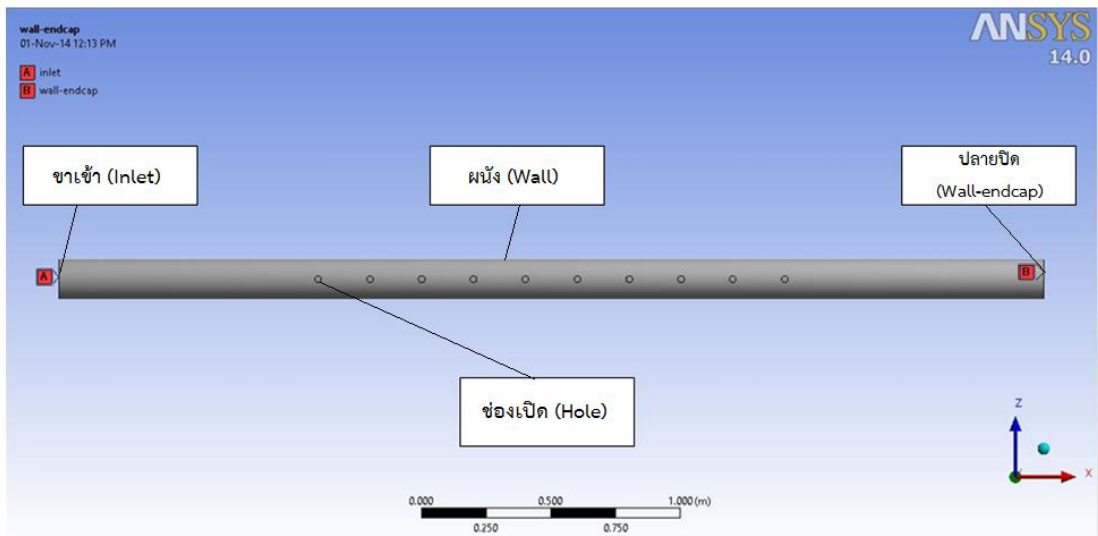
รูปที่ 5-3 แสดงโครงสร้าง 3 มิติ

5.3.2 การแบ่งเมช (Meshing)

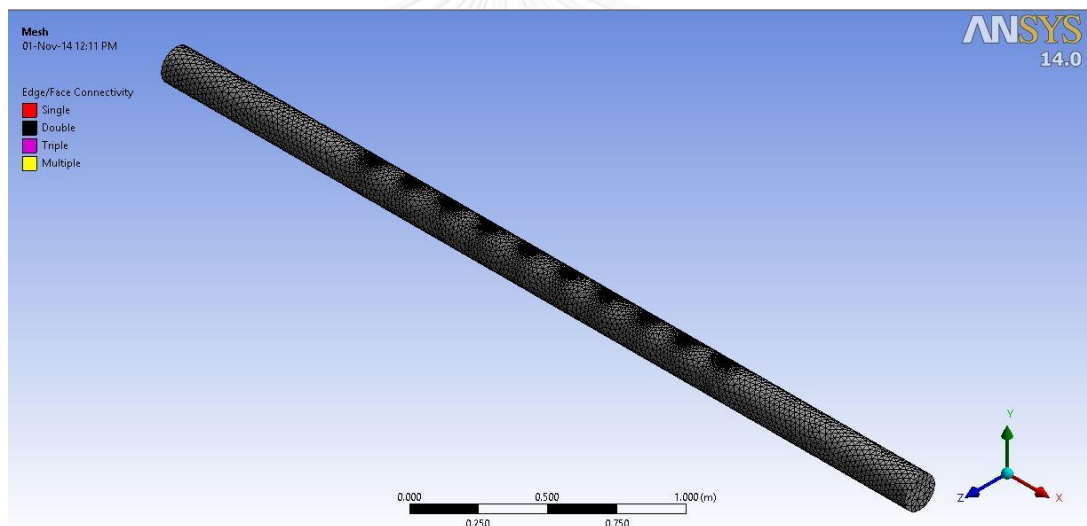
ในการเริ่มต้นแบ่งเมชจะกำหนดชื่อบริเวณต่างๆของโครงสร้าง ประกอบไปด้วย ขาเข้า (inlet), ขาออก(outlet), ผนังท่อ (wall) และช่องเปิด(holes) ดังแสดงในรูปที่ 5-4

ลักษณะของเมชเป็นแบบ Tetrahedron mesh โดยการกำหนดขนาดของเมชจะพิจารณาจากขนาดสเกลของการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulence Length Scale, $L_{turb,s}$) ซึ่งในการไหลในท่อแบบพัฒนาเต็มที่ ขนาดของสเกลการไหลแบบปั่นป่วน สามารถประมาณได้จากเส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (hydraulic diameter, D_h) ดังสมการ

$$L_{turb,s} = 0.07D_h \quad (5.9)$$



รูปที่ 5-4 แสดงบริเวณต่างๆของระบบ



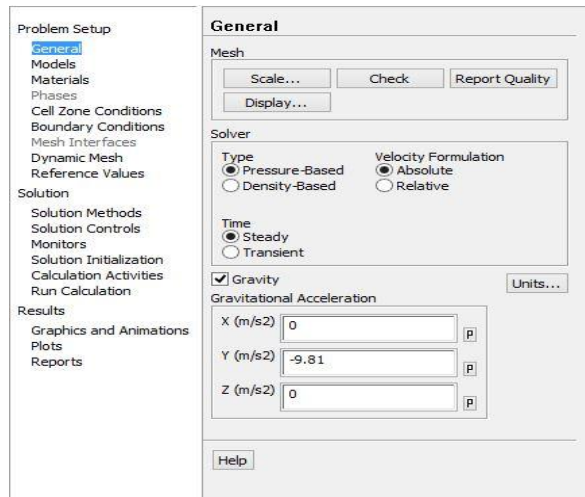
รูปที่ 5-5 ลักษณะของเมช

5.3.3 การตั้งค่าโปรแกรม

การตั้งค่าโปรแกรมจำลองการไหลนั้น จะต้องทำการกำหนดส่วนต่างๆ ให้ใกล้เคียงกับสภาวะของการทดลองมากที่สุด เพื่อให้ผลการจำลองการไหลนั้น สามารถนำไปตรวจสอบและเปรียบเทียบกับผลการทดลองได้ ซึ่งประกอบด้วย 7 หัวข้อการตั้งค่า

5.3.3.1 หัวข้อ General

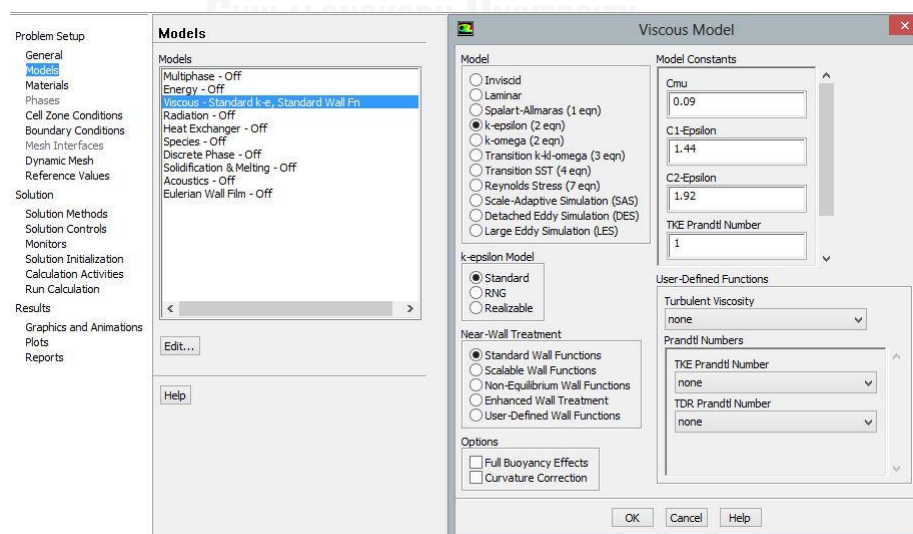
เป็นการไหลผ่านท่อทรงกระบอกที่มีช่องเปิด ในลักษณะ 3 มิติ ณ สภาวะคงตัว (Steady State) และมีความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกในทิศทาง $-Y$



รูปที่ 5-6 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในหัวข้อทั่วไป (General)

5.3.3.2 หัวข้อ Model

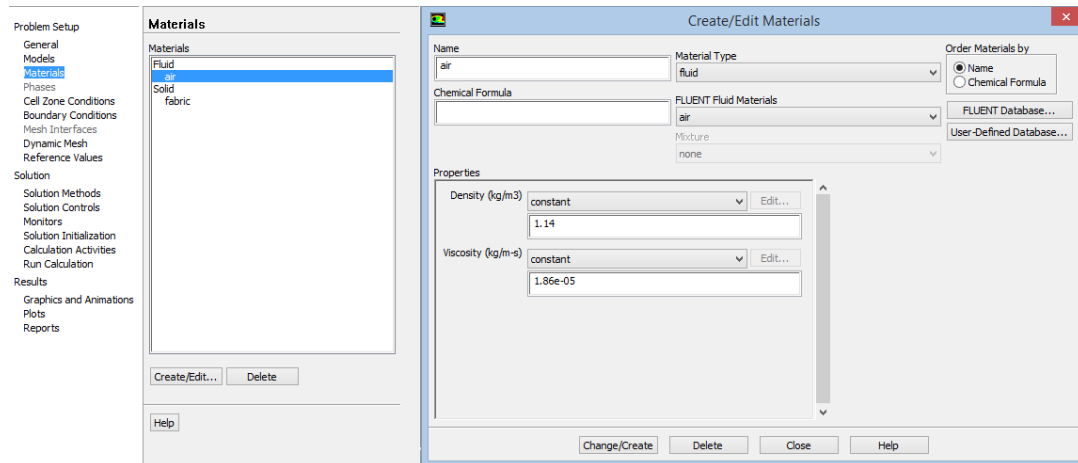
เมื่อไม่คิดผลของการถ่ายเทความร้อน จึงละเลยการพิจารณาสมการพลังงาน และการไหลในท่อลมฟ้าเป็นแบบปั่นป่วนที่มีความหนืด ซึ่งจะเลือกใช้แบบจำลองชนิด Standard k- ϵ โดยใช้ค่าคงจากโมเดลของ Launder-Sharma (1974) ^[28]



รูปที่ 5-7 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในหัวข้อแบบจำลอง (Model)

5.3.3.3 หัวข้อ Material

ของไหลที่ไหลภายในท่อลมคืออากาศ (Air) ซึ่งคุณสมบัติของอากาศจะอ้างอิงจากการทดลอง ความหนาแน่น 1.14 kg/m^3 และความหนืด $1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$ และวัสดุที่ใช้ทำท่อลมเป็นวัสดุผ้า



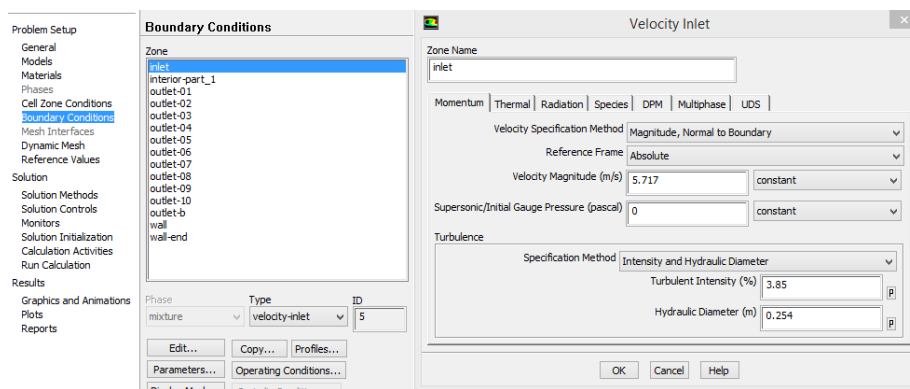
รูปที่ 5-8 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในหัวข้อวัสดุ (Materials)

5.3.3.4 หัวข้อ Boundary Condition

ในส่วนนี้จะทำการกำหนดเงื่อนไขขอบเขตของบริเวณต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ขณะแบ่งเมช โดยแบ่งเป็น 3 ส่วน ดังนี้

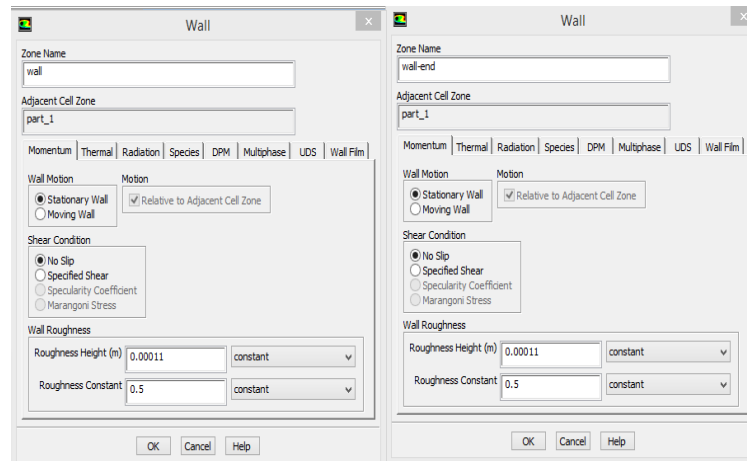
เงื่อนไข Inlet Velocity จะมีค่าความเร็วขาเข้าในแนวแกนและเนื่องจากเป็นการไหลปั่นป่วน และมีความหนืด ทำให้ต้องพิจารณาค่าระดับความเข้มข้นของความปั่นป่วน (Turbulent Intensity) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ

$$I_{turb} = 0.16(Re)^{-1/8} \quad (5.10)$$



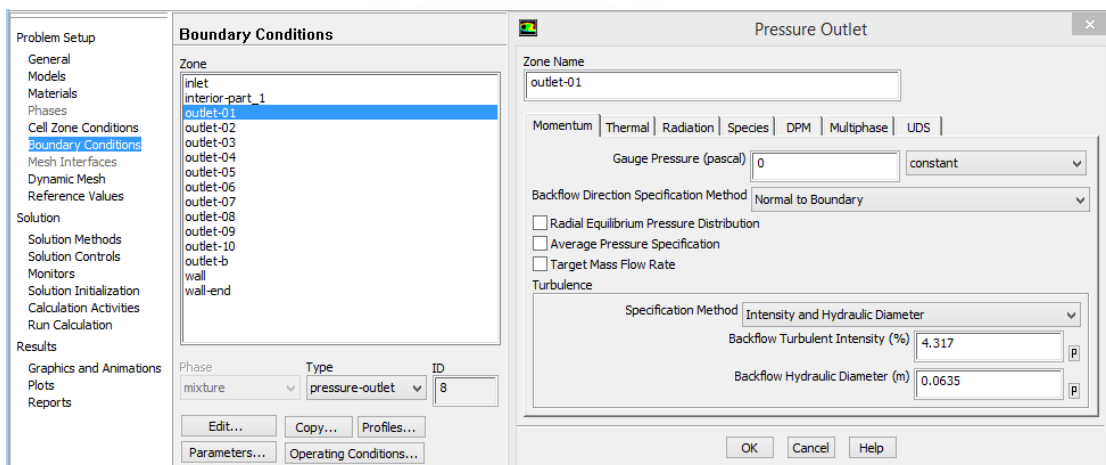
รูปที่ 5-9 แสดงการตั้งค่าในส่วนความเร็วขาเข้า (Inlet Velocity)

เงื่อนไข Wall และ Wall-end พิจารณาในส่วนของผิวท่อและปลายท่อปิดว่าเป็นวัสดุทอลมผ้า จึงกำหนดค่าความขรุขระของวัสดุ (Roughness Height) เท่ากับ 0.00011 เมตร ซึ่งอ้างอิงจากผู้ผลิตท่อลมผ้า (DUCTSOX)^[29]



รูปที่ 5-10 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในส่วนของ Wall และ Wall end

เงื่อนไข pressure-outlet ซึ่งเป็นการตั้งค่าส่วนของช่องเปิด (holes) เนื่องจากเป็นบริเวณที่จะสัมผัสกับบรรยากาศโดยตรง ซึ่งมีความดันคงเป็นศูนย์ และสามารถคำนวณค่าระดับความเข้มข้นของความปั่นป่วน ได้จากสมการ 5.10



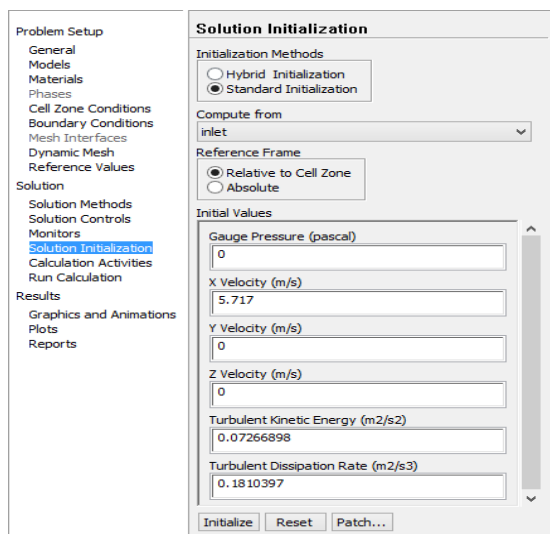
รูปที่ 5-11 แสดงการตั้งค่าโปรแกรมในส่วนของ Pressure outlet

5.3.3.5 หัวข้อ Solution Initialization

การตั้งค่าเริ่มต้นการคำนวณนั้นจะกำหนดให้เริ่มการคำนวณจากบริเวณตำแหน่งขาเข้า และสามารถคำนวณค่า Turbulent Kinetics Energy และ Turbulent Dissipation Rate ตามสมการ

$$\text{Turbulent Kinetics Energy} \quad k_{turb} = \frac{3}{2} (u_{turb})^2 \quad (5.11)$$

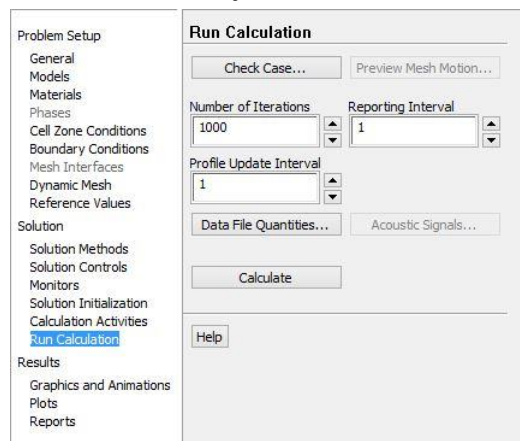
$$\text{Turbulent Dissipation Rate} \quad \epsilon_{turb} = C_{\mu}^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L_{turb,s}} \quad (5.12)$$



รูปที่ 5-12 แสดงการตั้งค่าเริ่มต้นการคำนวณ (Solution Initialization)

5.3.3.6 หัวข้อ Run Calculation

การดำเนินการคำนวณนั้นจะกำหนดจำนวนรอบของการคำนวณ (Number of iterations) ไว้ที่ 1000 รอบ และรายงานผลทุกๆการคำนวณ 1 รอบ ซึ่งจำนวนรอบของการคำนวณจะมีการปรับเปลี่ยนตามความเหมาะสมเพื่อให้เกิดการลู่เข้าของคำตอบ



รูปที่ 5-13 แสดงการตั้งค่าการดำเนินการคำนวณ (Run Calculation)

5.4 ผลลัพธ์ของการจำลองการไหลผ่านท่อลมผ้า

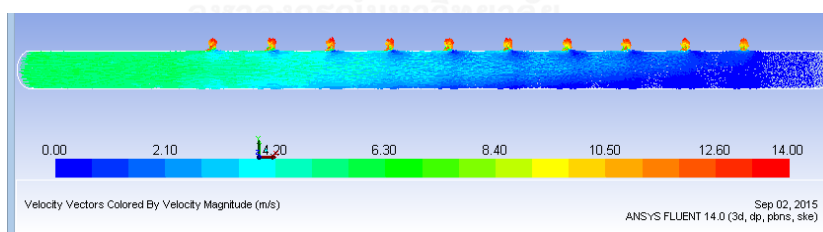
จำลองการไหลผ่านโปรแกรม Ansys Fluent v.14 ด้วยลักษณะทางกายภาพและเงื่อนไขขาเข้าท่อลมผ้าเช่นเดียวกับการทดลอง จะได้ผลลัพธ์การกระจายตัวของตัวแปรต่างๆ ในรูปของเส้นระดับดั่งภาคผนวก ง โดยนำค่าเฉลี่ยที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งต่างๆ ไปเปรียบเทียบและตรวจสอบแนวโน้มของผลลัพธ์ที่ได้จากผลการทดลอง

5.4.1 ลักษณะของเส้นระดับที่เกิดขึ้นในการไหลผ่านท่อลมผ้า

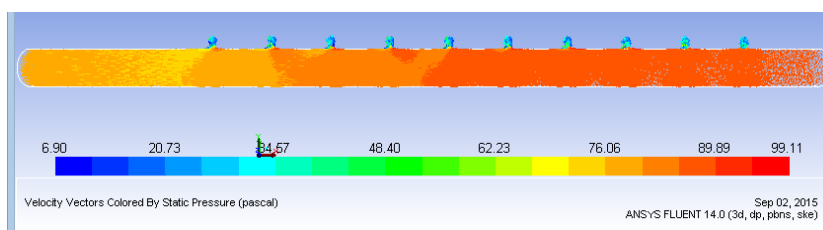
ตัวอย่างเส้นระดับที่ได้เกิดในการไหลผ่านท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4 จะแสดงให้เห็นว่า การกระจายตัวของความเร็วการไหลในท่อจะมีลักษณะของสีจากสีเขียวไปเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งหมายถึงการลดลงของความเร็วการไหลในท่อที่เกิดขึ้น ซึ่งสาเหตุมาจากอัตราการไหลผ่านช่องเปิดในแต่ละช่อง ทำให้แนวโน้มของความเร็วการไหลในท่อนั้นมีค่าลดลง ดังรูปที่ 5-14

รูปที่ 5-15 แสดงถึงความดันสถิตในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4 จะเห็นถึงแนวโน้มการกระจายตัวของความดันสถิตในท่อจากสีส้มไปเป็นสีแดงที่ปลายท่อ ซึ่งหมายถึงการเพิ่มขึ้นของความดันสถิตนั่นเอง เนื่องจากอัตราการไหลในท่อลดลงแต่ขนาดท่อลมผ้ายังคงเท่าเดิม และเกิดการได้คืนของความดันสถิตขึ้นด้วยหลักการของสมการเบอร์นูลลี

ในท่อลมผ้ากรณีอื่นๆนั้น จะมีลักษณะของพฤติกรรมทางกายภาพคล้ายๆกัน แต่แตกต่างกันที่ขนาดของพารามิเตอร์ทางกายภาพที่เกิดขึ้น อันเนื่องมาจากค่าความเร็วการไหลขาเข้าที่แตกต่างกัน



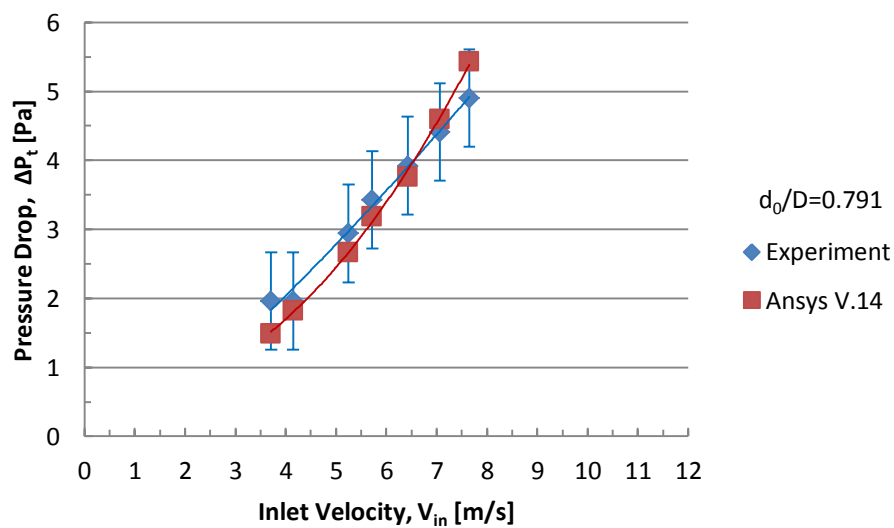
รูปที่ 5-14 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลในการไหลผ่านท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4



รูปที่ 5-15 เวกเตอร์เส้นระดับของความดันสถิตในการไหลผ่านท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4

5.4.2 เปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการทดลอง

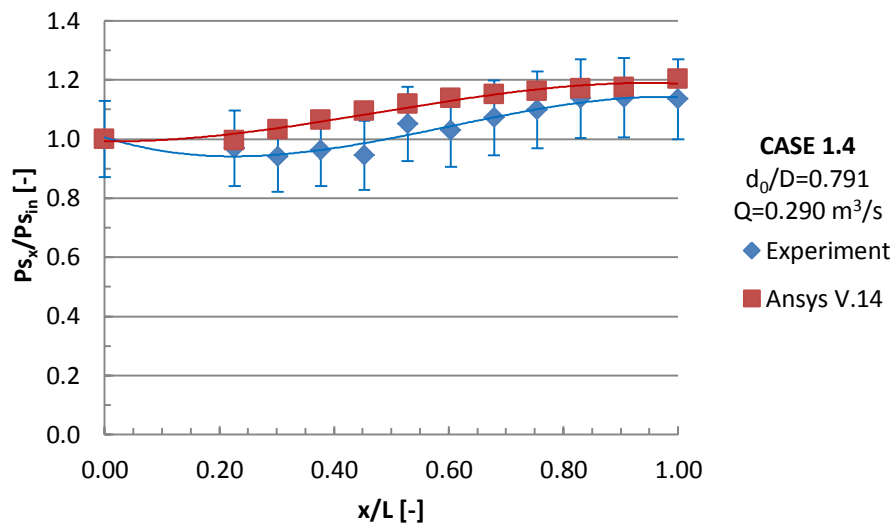
การเปรียบเทียบผลของการใช้โปรแกรมจำลองการไหลกับการทดลองนั้น จะแสดงในรูปแบบของกราฟ โดยเมื่อพิจารณาตัวอย่างท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ดังรูปที่ 5-16 พบว่าแนวโน้มของความดันลดรวมที่ได้จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหลจะมีลักษณะคล้ายกัน โดยมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการไหลเข้าท่อลมมาก



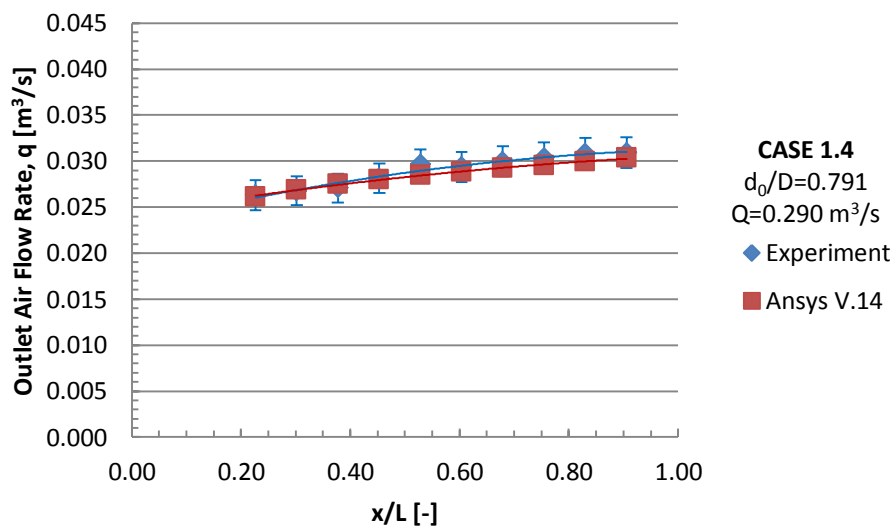
รูปที่ 5-16 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความดันลดรวมต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมจากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1

รูปที่ 5-17 แสดงถึงอัตราส่วนความดันสถิตที่เกิดขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มในลักษณะเพิ่มขึ้นและมีค่าสูงสุดที่ปลายท่อเช่นเดียวกับการทดลอง

การกระจายตัวของความดันสถิตนี้จะส่งผลต่อไปยังการกระจายตัวของอัตราการไหลผ่านช่องเปิด ดังรูปที่ 5-18 ที่แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการกระจายตัวเช่นเดียวกับการทดลอง

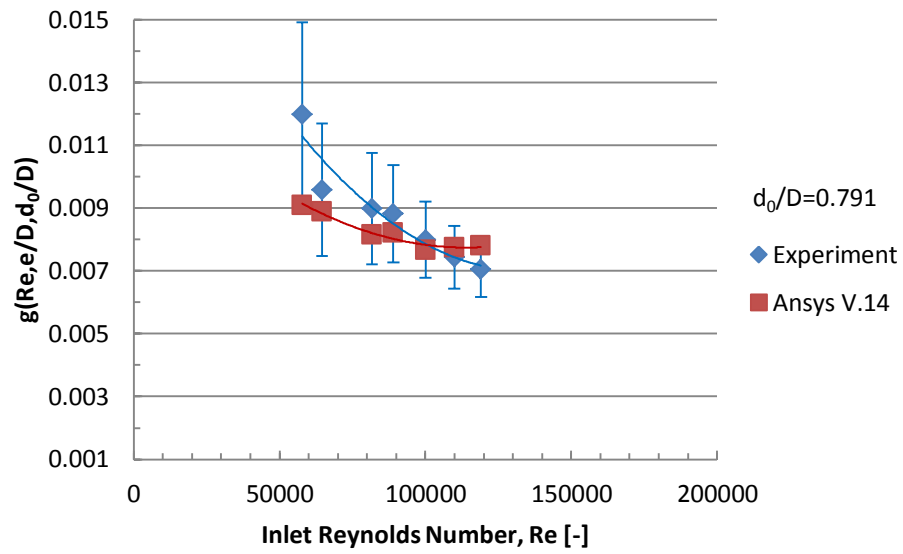


รูปที่ 5-17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4



รูปที่ 5-18 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4

รูปที่ 5-19 แสดงถึงความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าที่เกิดตั้งตัวอย่างในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ซึ่งให้แนวโน้มของค่าความเสียหายที่คล้ายกัน



รูปที่ 5-19 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้า จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 เมื่อ $e/D=0.000433$

บทที่ 6

การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบท่อลมผ้า

การไหลผ่านระบบท่อลมปกติจะประกอบด้วย การไหลผ่านท่อตรง (Straight Duct) การไหลผ่านช่วงข้อต่อ (Fitting) และช่องเปิดซึ่งจะวางห่างกันเป็นระยะที่แน่นอนรวมทั้งการไหลจะผ่านหัวจ่ายลมทำให้สามารถบังคับทิศทางของการไหลได้ แต่ในการไหลผ่านระบบท่อลมผ้า นั้น ช่องเปิด (Outlet) จะถูกวางตำแหน่งให้กระจายไปทั่วตลอดความยาวของท่อและการไหลจะผ่านช่องเปิดอย่างเดียว ส่งผลให้พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในท่อลมมีความแตกต่างกัน จึงจำเป็นที่จะต้องพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมาใหม่สำหรับการไหลในระบบท่อลมผ้า

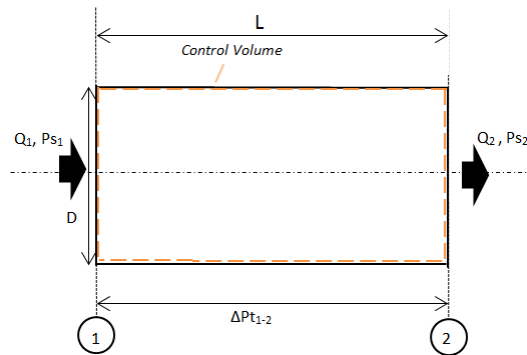
6.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการไหลผ่านระบบท่อลมผ้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับระบบท่อลมผ้าจะประกอบด้วยแบบจำลอง 3 แบบหลัก คือ แบบจำลองการไหลผ่านท่อตรง, แบบจำลองการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด และแบบจำลองการไหลผ่านข้อต่อ ซึ่งการใช้แบบจำลองเหล่านี้ร่วมกัน จะสามารถวิเคราะห์ระบบการไหลผ่านท่อลมผ้าใดๆ ได้ โดยในการพัฒนาแบบจำลองได้ทำการเปลี่ยนตัวแปรในกลุ่มตัวแปรไร้มิติ เช่น ตัวเลขเรย์โนลด์และความดันจลน์จากเดิมที่แสดงในรูปของความเร็วให้อยู่ในรูปของอัตราการไหล, $Re = \frac{4\rho Q}{\pi\mu D}$ และ $P_v = \frac{8\rho Q^2}{\pi^2 D^4}$ เนื่องจากโดยทั่วไปอัตราการไหลมักจะเป็นตัวแปรที่ทราบค่า สมมติฐานของการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีดังนี้

1. การไหลเป็นการไหลแบบอัดตัวไม่ได้ (Incompressible Flow)
2. การไหลเป็นการไหลแบบพัฒนาเต็มที่ (Fully Developed Flow)
3. การไหลเป็นแบบ 1 มิติ (1 Dimensional Flow)
4. การไหลเป็นแบบคงตัว (Steady Flow)
5. การไหลเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent Flow)
6. อุณหภูมิของของไหลคงที่ตลอดความยาวท่อ (Constant Temperature)
7. วัสดุที่ทำท่อลมผ้าไม่มีอากาศรั่วไหลออกนอกเหนือจากตำแหน่งที่กำหนดไว้
8. ค่าความเสียดทานของข้อต่อข้องอ (fittings) หาจาก ASHRAE fitting database

6.1.1 แบบจำลองการไหลผ่านท่อตรง (Straight Duct)

การไหลผ่านท่อตรงจะมีลักษณะท่อและตัวแปรที่เกี่ยวข้องดังรูปที่ 6-1 ซึ่งอัตราการไหลเข้าย่อมเท่ากับอัตราการไหลออกตั้งสมการอนุรักษ์มวล และสามารถหาความดันรวมลดได้จากสมการเบอร์นูลลี โดยที่ความเร็วการไหลเข้าเท่ากับความเร็วการไหลออก และฟังก์ชันความเสียดทาน $[f(Re, \frac{e}{D})]$ สามารถหาได้จากสมการของ Miller $(f = 0.25 [\log(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}})]^{-2})$ ทำให้สามารถจัดรูปสมการ 3.7 และ 3.8 ด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับท่อลมฟ้าได้เป็นชุดสมการสำหรับการไหลผ่านท่อตรงตั้งสมการ 6.1 และ 6.2 ตามลำดับ



รูปที่ 6-1 แบบจำลองของการไหลผ่านท่อตรง

สมการอนุรักษ์มวล

$$Q_1 = Q_2 \quad (6.1)$$

สมการเบอร์นูลลี

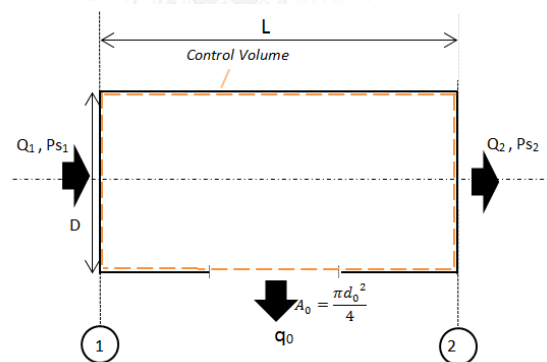
$$P_{s,1} = P_{s,2} + 0.25 \left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right)^{0.9}} \right) \right]^{-2} \frac{L}{D} \frac{8\rho Q_1^2}{\pi^2 D^4} \quad (6.2)$$

| | | | |
|--------|-----------|-----|---|
| โดยที่ | Q_1 | คือ | ปริมาณลม ณ ตำแหน่ง 1 [m^3/s] |
| | Q_2 | คือ | ปริมาณลม ณ ตำแหน่ง 2 [m^3/s] |
| | $P_{s,1}$ | คือ | ความดันสถิตเกจ ณ ตำแหน่ง 1 [Pa_{gauge}] |
| | $P_{s,2}$ | คือ | ความดันสถิตเกจ ณ ตำแหน่ง 2 [Pa_{gauge}] |

6.1.2 แบบจำลองการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด (Perforated Duct)

การไหลผ่านท่อลมที่มีช่องเปิด จะเป็นการไหลของอากาศผ่านท่อลมที่มีขนาดคงที่ เนื่องจากในระบบท่อลมผ้านั้นมักจะนิยมใช้ขนาดท่อลมเท่าเดิมสำหรับแนวท่อลมหนึ่ง ๆ ถึงแม้จะมีช่องเปิดในท่อลมนั้น โดยมีปริมาณลมไหลผ่านช่องเปิดทั้งหมด q_0 ซึ่งทำให้อัตราการไหลของอากาศลดลงตามสมการอนุรักษ์มวล ดังสมการ 6.3 และการพิจารณาสมการเบอร์นูลลีจะใช้ฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้า $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ ที่ได้มาจากการวิเคราะห์เชิงมิติกับผลการทดลองที่เกิดขึ้นในการไหลผ่านท่อลมผ้า

อย่างไรก็ตาม ฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้าที่หามาได้นั้นขึ้นอยู่กับตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้าและตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ย ดังนั้น เพื่อให้การแก้ปัญหาทางง่ายขึ้น งานวิจัยนี้จะแทนที่ตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยด้วยตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้า ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่าอัตราส่วนโดยเฉลี่ยที่ได้จากการถอดรอกที่สองของตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้าจะมีค่าประมาณ 0.673 เท่า ดังนั้นจึงประมาณตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ย ($Re_{av} \approx 0.673Re$) ในฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้า $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ และจัดรูปสมการเบอร์นูลลีด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับท่อลมผ้าได้ดังสมการ 6.4 โดยเขียนตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้าในรูปอัตราการไหลและขนาดท่อขาเข้าเป็น $Re = \frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D}$



รูปที่ 6-2 แบบจำลองของการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิด

สมการอนุรักษ์มวล

$$Q_1 = Q_2 + q_0 \quad (6.3)$$

สมการเบอร์นูลลี

$$\left(P_{s,1} + \frac{8\rho Q_1^2}{\pi^2 D^4} \right) - \left(P_{s,2} + \frac{8\rho Q_2^2}{\pi^2 D^4} \right) = \left(\frac{0.04215\left(\frac{d_0}{D}\right) \log\left(0.673\left(\frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D}\right)\right) - 0.15079 \log\left(0.673\left(\frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D}\right)\right) - 0.1363\left(\frac{d_0}{D}\right) + 0.7711}{\left[\log\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D}\right)^{0.9}}\right) \right]^2} \right) \frac{L}{D} \frac{8\rho Q_1^2}{\pi^2 D^4} \quad (6.4)$$

โดยที่ d_0 คือ เส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม [m]

ค่าอัตราการไหลรวมผ่านช่องเปิด, q_0 , สามารถหาได้จากสมการ (6.5) โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทเฉื่อย ($\overline{C_d}$) มีค่าคงที่ประมาณ 0.65 [อ้างอิงจากกราฟของนิวมาน (รูปที่ 3-6) และจากงานวิจัย Khaled El Moueddeb (1996)]

$$\text{อัตราการไหลรวมผ่านช่องเปิด} \quad q_0 = \overline{C_d} \left(\frac{\pi d_0^2}{4} \right) \sqrt{\frac{(P_{s,1} + P_{s,2})}{\rho}} \quad (6.5)$$

ระยะส่งลมจากช่องเปิดจะขึ้นอยู่กับอัตราการไหลและความเร็วลมออกจากช่องเปิด โดยที่มวลอากาศเมื่อไหลเข้าสู่ตำแหน่งที่กำหนดในบริเวณปรับอากาศจะต้องมีความเร็วลมปลายทางที่เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดความเร็วลมปลายทางเหมาะสมไว้ที่ 0.254 m/s (50 FPM) และทำการพิจารณาช่องเปิดที่เป็นวงกลม โดยใช้สมการของ Schlichting (3.22) ที่ตำแหน่งเส้นแนวกกลางของรูปร่างความเร็วลม ทั้งนี้โดยสมมติว่าอัตราการไหลและความเร็วลมที่ออกจากช่องเปิดมีความสม่ำเสมอ และระยะส่งลมหาได้จากสมการ 6.6

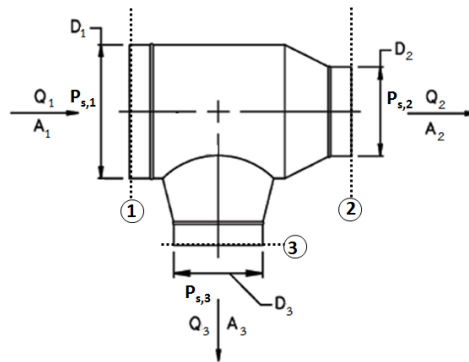
$$\text{ระยะส่งลม} \quad \overline{T}_{50} = \frac{29.17(q_0) \sqrt{\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)}}{\left(\frac{\pi d_0^2}{4}\right)} \quad (6.6)$$

โดยที่ \overline{T}_{50} คือ ระยะส่งลมเฉลี่ย ที่ความเร็วลมปลายทาง = 50 FPM [m]

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิด 1 ช่อง [m]

6.1.3 แบบจำลองการไหลผ่านข้อต่อ (Fitting)

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบจำลองข้อต่อแยก SD5-10^[10] มาเป็นส่วนต่อขยายสำหรับการไหลในระบบท่อลมผ้ดังรูปที่ 6-4 ซึ่งมีปริมาณลมของท่อย่อย (Q_3) แยกออกไป ทำให้อัตราการไหลขาออกลดลงตามกฎการอนุรักษ์มวล ดังสมการ 6.7 ซึ่งการพิจารณาสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (K) เป็นผลมาจากลักษณะทางกายภาพของข้อต่อและอัตราการไหลจากตำแหน่ง 1 ไป i ใดๆ ทำให้ฟังก์ชันสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองสามารถเขียนได้ในรูป $K_{1 \rightarrow i} \left(\frac{Q_i}{Q_1}, \frac{A_i}{A_1} \right)$ เมื่อแทนสมการเบอร์นูลลีด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลจากตำแหน่ง 1 ไป i ได้ดังสมการ 6.8 โดยตำแหน่ง i เป็นตำแหน่ง 2 หรือตำแหน่ง 3 ก็ได้ ขึ้นอยู่กับแนวท่อลมที่ผู้ออกแบบกำลังวิเคราะห์



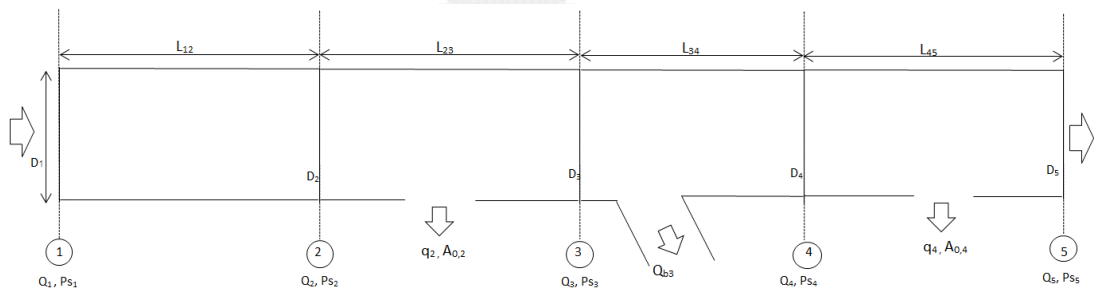
รูปที่ 6-3 แบบจำลองของการไหลผ่านข้อต่อแยก SD5-10

$$\text{สมการอนุรักษ์มวล} \quad Q_1 = Q_2 + Q_3 \quad (6.7)$$

$$\text{สมการเบอร์นูลลี} \quad \left(P_{s,1} + \frac{8\rho Q_1^2}{\pi^2 D_1^4} \right) = \left(P_{s,i} + \frac{8\rho Q_i^2}{\pi^2 D_i^4} \right) + K_{1 \rightarrow i} \left(\frac{Q_i}{Q_1}, \frac{D_i}{D_1} \right) \frac{8\rho Q_1^2}{\pi^2 D_1^4} \quad (6.8)$$

6.2 การวิเคราะห์ระบบท่อลมผ้า

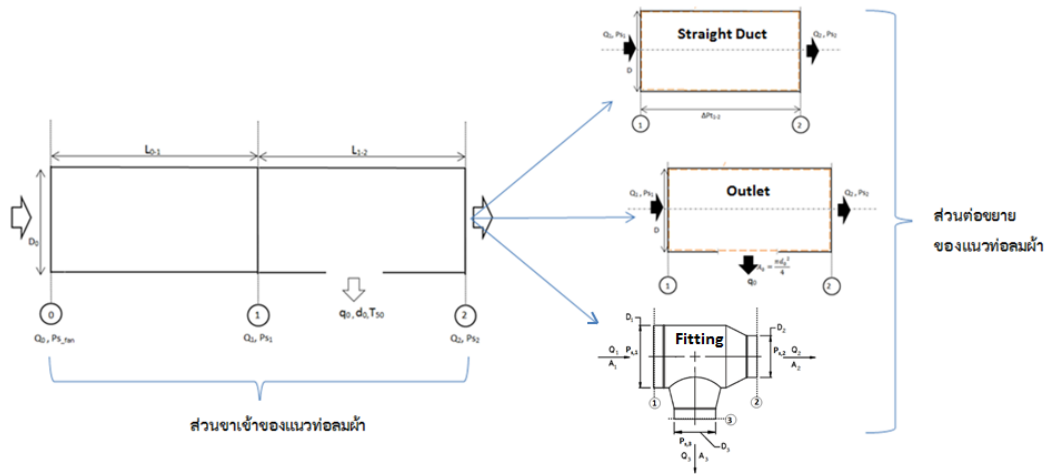
ในการวิเคราะห์ระบบท่อลมผ้า จะนำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวในหัวข้อ 6.1 มาประกอบกัน ดังรูปที่ 6-4 เพื่อสร้างแนวท่อลมขึ้นมาในระบบท่อลม และทำการวิเคราะห์ไปที่ละแนวจนครบแนวท่อลมทั้งหมด



รูปที่ 6-4 การต่อแบบจำลองท่อลมเพื่อสร้างแนวท่อลมผ้า

แนวท่อลมที่ทำกรวิเคราะห์จะถูกพิจารณาแยกเป็น 2 ส่วนคือส่วนขาเข้าของแนวท่อลมซึ่งเป็นต้นทางของท่อลมที่รับลมมาจากพัดลม ส่วนนี้จะประกอบไปด้วยท่อตรงและท่อที่มีช่องเปิด ทั้งนี้เพื่อป้องกันผลกระทบของระบบท่อลมที่มีต่อความดันสถิตของลมจากตัวพัดลม (System Effect)

ส่วนที่สองเป็นส่วนต่อขยายของแนวท่อลม โดยในส่วนนี้ แนวท่อลมอาจจะเป็นได้ทั้งท่อตรงท่อที่มีช่องเปิดและส่วนที่เป็นข้อต่อ ดังรูป 6-5 ขึ้นอยู่กับรูปแบบของการออกแบบท่อลม การคำนวณจะกระทำเรียงลำดับกันไปในแต่ละส่วนตามแนวท่อลมนั้นจนจบแนวท่อลมนั้น ๆ



รูปที่ 6-5 ส่วนขาเข้าและส่วนต่อขยายของแนวท่อนผ้า

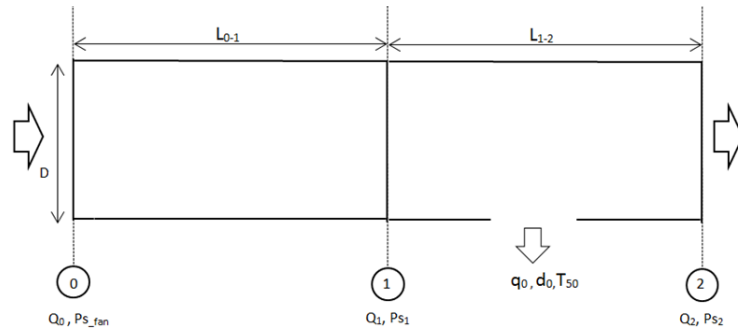
จากการศึกษาผลการทดลองพบว่า ค่าความดันสถิตมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่มีการไหลผ่านช่องเปิด อันเนื่องมาจากขนาดท่อนผ้าเท่าเดิมแต่ความดันจลน์ลดลง ดังนั้น แนวทางที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์การไหลในระบบท่อนผ้าคือ วิธีความดันสถิตที่ได้คืนมา (Static Regain, $P_{s1} \leq P_{s2}$) โดยกำหนดให้อัตราส่วนความดันสถิตเท่ากับค่าคงที่ C_{PR} [Constant Pressure Ratio, $(P_{s1}/P_{s2} = C_{PR})$] ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหนึ่งเสมอ โดย $C_{PR} = 1$ แสดงว่าเกิดความดันสถิตที่ได้คืนมาสมบูรณ์ และ $C_{PR} < 1$ แสดงว่าความดันสถิตที่ได้คืนเพิ่มขึ้น

วิธีความดันสถิตที่ได้คืนนี้จะพิจารณาใช้กับแบบจำลองการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิดและการไหลผ่านข้อต่อ ในขณะที่แบบจำลองการไหลผ่านท่อตรง จะใช้วิธีการวิเคราะห์ที่คำนึงถึงความสูญเสียปกติ ทั้งนี้ อัตราการไหลของอากาศตามแนวท่อนผ้าที่กำหนดได้จากความต้องการการปรับอากาศในพื้นที่ปรับอากาศ และความยาวของส่วนต่าง ๆ ในแนวท่อนผ้าที่กำหนดได้จากการวางผังระบบท่อนผ้า การแก้ระบบสมการของท่อนผ้าส่วนขาเข้าและส่วนต่อขยายในแต่ละท่อน จะนำมาซึ่งผลลัพธ์ของการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.2.1 การวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อนผ้า

รูปที่ 6-6 แสดงส่วนขาเข้าของแนวท่อนผ้า โดยตำแหน่งที่ 0 เป็นตำแหน่งที่อากาศออกจากพัดลมหรืออากาศไหลเข้าด้วยความดันสถิตของพัดลม ($P_{s, fan}$) ในการวิเคราะห์ความคงรูปของท่อนผ้า จะพิจารณาตัวท่อนผ้าให้เป็นเสมือนกล่องลม (Plenum Chamber) กล่าวคือ จะมีความดันสถิตขึ้นต่ำค่าหนึ่งที่จะถูกพาไปพร้อมๆ กับการส่งลม เพื่อให้ท่อนผ้าสามารถคงรูปได้อย่างเหมาะสม ดังนั้น ความดันสถิตของพัดลมจึงเป็นผลรวมระหว่างความดันสถิตขาเข้า (ISP, Inlet Static Pressure) ซึ่ง

ทำหน้าที่รักษาความคงรูปของท่อลม กับความดันสถิต ณ ตำแหน่ง 0, ($P_{s, fan} = P_{s,0} + ISP$) ที่ใช้ในการส่งลม เมื่อใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์มาเขียนชุดสมการด้วยตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับแนวท่อลมและค่าคงที่ C_{PR} จะได้ดังนี้



รูปที่ 6-6 ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า

ส่วนท่อตรง (0→1)

สมการอนุรักษ์มวล (6.1)

$$Q_0 = Q_1$$

สมการเบอร์นูลลี (6.2)

$$P_{s, fan} = P_{s,0} + ISP = P_{s,1} + \left(0.25 \left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4\rho Q_0}{\pi\mu D} \right)^{0.9}} \right) \right]^{-2} \right) \frac{L_{0 \rightarrow 1}}{D} \frac{8\rho Q_0^2}{\pi^2 D^4}$$

ส่วนท่อที่มีช่องเปิด (1→2)

สมการอนุรักษ์มวล (6.3)

$$Q_1 = Q_2 + q_0$$

สมการเบอร์นูลลี (6.4)

$$P_{s,1} \left(1 - \frac{1}{C_{PR}} \right) + \frac{8\rho}{\pi^2 D^4} (Q_1^2 - Q_2^2) = \left(\frac{\log \left(0.673 \left(\frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D} \right) \right) \left(0.04215 \left(\frac{d_0}{D} \right) - 0.15079 \right) - 0.1363 \left(\frac{d_0}{D} \right) + 0.7711}{\left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4\rho Q_1}{\pi\mu D} \right)^{0.9}} \right) \right]^2} \right) \frac{L_{1 \rightarrow 2}}{D} \frac{8\rho Q_1^2}{\pi^2 D^4}$$

อัตราการไหลผ่านช่องเปิด (6.5)

$$q_0 = C_d \left(\frac{\pi d_0^2}{4} \right) \sqrt{\frac{1}{\rho} P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}} \right)}$$

| | | | |
|--------|-----------------------|-----|---|
| โดยที่ | $P_{s, fan}$ | คือ | ความดันสถิตของพัดลม [Pa] |
| | ISP | คือ | ความดันสถิตขาเข้าที่ทำให้ท่อลมคงรูปได้ [Pa] |
| | $L_{i \rightarrow j}$ | คือ | ความยาวท่อจากตำแหน่ง i ไป j [m] |
| | C_{PR} | คือ | อัตราส่วนความดันสถิต $P_{s,1}$ ต่อ $P_{s,2}$ ซึ่งมีค่า ≤ 1 |

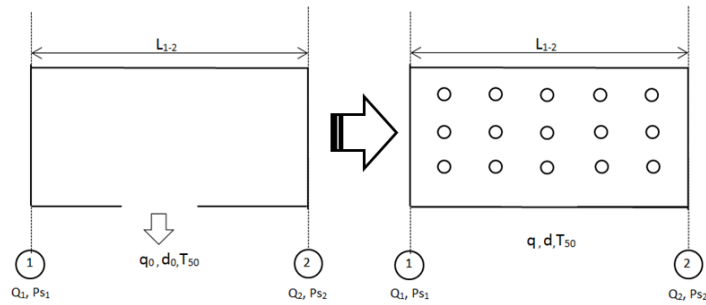
6.2.1.1 การวิเคราะห์ชุดสมการด้วยวิธีความดันสถิตได้คีน

โดยทั่วไปค่าตัวแปร $Q_0, q_0, L_{0 \rightarrow 1}, L_{1 \rightarrow 2}$, ISP สามารถทราบได้จากความต้องการในการปรับอากาศ การวางผังของระบบท่อลมผ้าและวัสดุที่ใช้ทำท่อลมผ้า จากสมการอนุรักษ์มวล 6.1 กับ 6.3 ทำให้หาค่า Q_1, Q_2 ได้ นำไปสู่การพิจารณาสมการ 6.2, 6.4, 6.5 ที่มีความสัมพันธ์กันและมีจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าอยู่ 5 ตัวแปรคือ $P_{s,0}, P_{s,1}, C_{PR}, D, d_0$ ในการแก้ชุดสมการ 6.2, 6.4 และ 6.5 จะใช้วิธีความดันสถิตได้คีนมา โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. กำหนดความเร็วขาเข้า (V) ที่เหมาะสมสำหรับท่อตรงในส่วนขาเข้า ซึ่งความเร็วที่กำหนดต้องคำนึงถึงเหตุผลเรื่องเสียงและการสั่นสะเทือน
2. ใช้สมการ $Q=AV$ หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม(D) ในส่วนขาเข้า ทำให้เหลือจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่า 4 ตัวแปร คือ $P_{s,0}, P_{s,1}, C_{PR}, d_0$
3. กำหนดอัตราส่วนความดันสถิต C_{PR} ทำให้ชุดสมการเหลือจำนวนตัวแปรไม่ทราบค่าอยู่ 3 ตัวแปรคือ $P_{s,0}, P_{s,1}, d_0$ ซึ่งสามารถแก้ชุดสมการดังกล่าวเพื่อหาค่า $P_{s,0}, P_{s,1}, d_0$ ในส่วนขาเข้าได้
4. ตรวจสอบความถูกต้องค่า $P_{s,0}$ ที่ได้จากการแก้สมการในข้อ 3 โดยค่า $P_{s,0}$ ต้องมากกว่าศูนย์ ($P_{s,0} > 0$) เนื่องจาก $P_{s,0}$ น้อยกว่าศูนย์จะทำให้ความดันสถิตของพัดลมมีค่าน้อยกว่าความดันสถิตตั้งต้น ($P_{s, fan} < ISP$) ทำให้ความดันสถิตที่ออกจากพัดลมไม่สามารถนำพาการไหลให้เกิดความคงรูปของท่อลมผ้าได้ หากค่า $P_{s,0}$ ที่ได้มาไม่อยู่บนข้อจำกัดนี้ แสดงว่าค่า C_{PR} ที่กำหนดไว้ไม่เหมาะสม จะต้องกำหนดค่า C_{PR} ใหม่
5. ค่า $P_{s,0}$ ที่ได้นำมารวมกับค่า ISP จะได้ค่า $P_{s, fan}$ ซึ่งใช้ในการเลือกความดันสถิตของพัดลม ส่วน $P_{s,2}$ ที่ได้จะเป็นค่าความดันสถิตขาเข้าของท่อส่วนต่อขยายเพื่อใช้ในการคำนวณท่อส่วนต่อขยายต่อไป
6. ค่า d_0 ที่ได้จะถูกนำมาคำนวณหาจำนวนช่องเปิด, N, และขนาดช่องเปิดย่อย, d, ในท่อส่วนขาเข้า บนเงื่อนไขของระยะส่งลมที่ต้องการ

6.2.1.2 การวิเคราะห์การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

เนื่องจากค่า d_0 เป็นเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม ซึ่งยังไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง จึงต้องกระจายให้เป็นช่องเปิดย่อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง d จำนวน N ช่อง ดังรูป 6-7 โดยใช้สมการของระยะส่งลม 6.6 บนสมมติฐานที่ว่าอัตราการไหลและความเร็วลมผ่านช่องเปิดมีความคงที่สม่ำเสมอ ซึ่งโดยทั่วไปเราจะทราบค่า T_{50} จากข้อมูลความสูงของบริเวณปรับอากาศ ส่วนค่า d_0 ทราบจากการวิเคราะห์ชุดสมการ ทำให้สามารถแก้สมการ 6.6 ได้โดยตรง ซึ่งผลลัพธ์คือขนาดช่องเปิดย่อย (d)



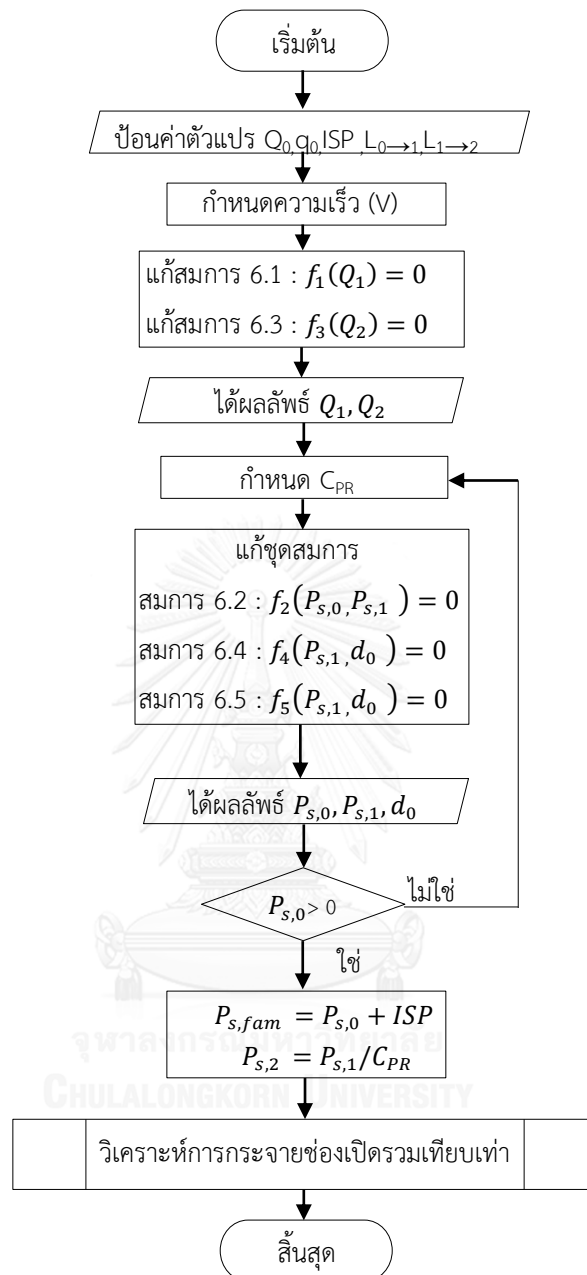
รูปที่ 6-7 การกระจายช่องเปิดทั้งหมดให้เป็นช่องเปิดย่อย

อย่างไรก็ตาม การเจาะช่องเปิดบนท่อลมผ้าในทางการผลิต จะมีขนาดมาตรฐานซึ่งเป็นที่นิยมกัน (0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4 นิ้ว) ดังนั้นค่าของ d ที่ได้จะถูกปรับให้ตรงกับขนาดช่องเปิดมาตรฐานที่ใกล้เคียงที่สุด แล้วนำมาคำนวณสมการ 6.6 ซ้ำด้วยค่า d ที่เลือก เพื่อตรวจสอบระยะส่งลมจริงสำหรับขนาดช่องเปิดนี้ จากนั้นจึงใช้สมการ 6.9 หาจำนวนช่องเปิดทั้งหมด (N)

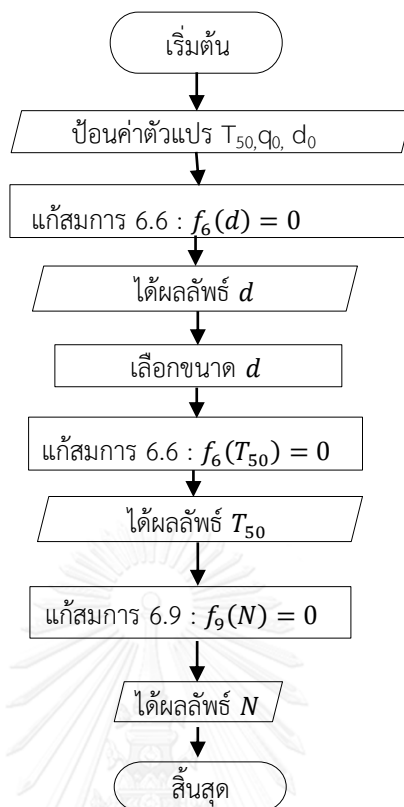
$$N = \frac{A_0}{a} = \left(\frac{d_0}{d}\right)^2 \quad (6.9)$$

6.2.1.3 ผังงานการวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า

รูปที่ 6-8 และ 6-9 แสดงผังงาน (Flowchart Diagram) การวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้าและการกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่า ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นชุดคำสั่งด้วยโปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) ได้ดังภาคผนวก ฉ



รูปที่ 6-8 ผังงานการวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมฟ้า



รูปที่ 6-9 ผังงานการวิเคราะห์การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

6.2.2 การวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า

เป็นท่อที่ต่อจากส่วนขาเข้าหรือท่อนต่อขยายก่อนหน้านี้ เพื่อให้กลายเป็นแนวท่อลมผ้าที่ผู้ออกแบบต้องการ แบ่งออกเป็น 3 แบบคือ ท่อตรง, ท่อที่มีช่องเปิด และข้อต่อ การวิเคราะห์ส่วนนี้จะหาคำตอบของค่าตัวแปรปลายท่อ โดยทราบค่าตัวแปรขาเข้าท่อลมจากท่อนก่อนหน้านี้

6.2.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองท่อตรง

ในกรณีนี้ ขนาดท่อตรงจะเท่ากับขนาดท่อลมก่อนหน้านี้ ดังนั้นจะทราบ D ของท่อตรง ส่วนความยาว L ของท่อตรงทราบจากการวางแนวท่อลม ค่า P_{s1}, Q_1 ทราบจากผลการคำนวณของท่อนต่อลมก่อนหน้านี้ ดังนั้น จากสมการอนุรักษ์มวล 6.1 ทำให้ทราบค่า Q_2 และจากการแก้สมการ 6.2 โดยตรง จะทราบค่า P_{s2}

6.2.2.2 การวิเคราะห์แบบจำลองท่อที่มีช่องเปิด

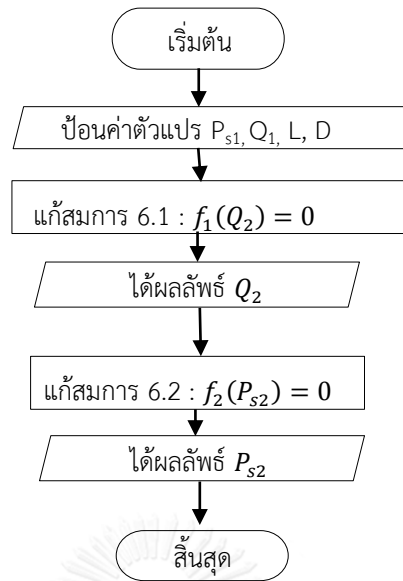
ในกรณีนี้ ขนาดท่อที่มีช่องเปิดจะเท่ากับขนาดท่อลมก่อนหน้านี้เช่นกัน ดังนั้นจะทราบ D ของท่อที่มีช่องเปิด ส่วนความยาว L ของท่อที่มีช่องเปิดทราบจากการวางแนวท่อลม ค่า q_0 ของท่อที่มีช่องเปิดทราบจากความต้องการการปรับอากาศ ค่า P_{s1}, Q_1 ทราบจากผลการคำนวณของท่อนท่อลมก่อนหน้า ดังนั้น จากสมการอนุรักษ์มวล 6.3 ทำให้หาค่า Q_2 หรือปริมาณลมที่ออกจากท่อที่มีช่องเปิดได้ จากนั้นพิจารณาสมการ 6.4 และ 6.5 ในรูปตัวแปรอัตราส่วนความดันสถิต C_{PR} ทำให้สมการชุดนี้เหลือตัวแปรไม่ทราบค่าคือ C_{PR} และ d_0 ซึ่งสามารถแก้ชุดสมการ รวมทั้งหาค่า P_{s2} ได้ นำค่า d_0 ที่ได้มาหาจำนวนและขนาดของช่องเปิดย่อย โดยใช้การวิเคราะห์เช่นเดียวกับหัวข้อ 6.2.1.2

6.2.2.3 การวิเคราะห์แบบจำลองข้อต่อ

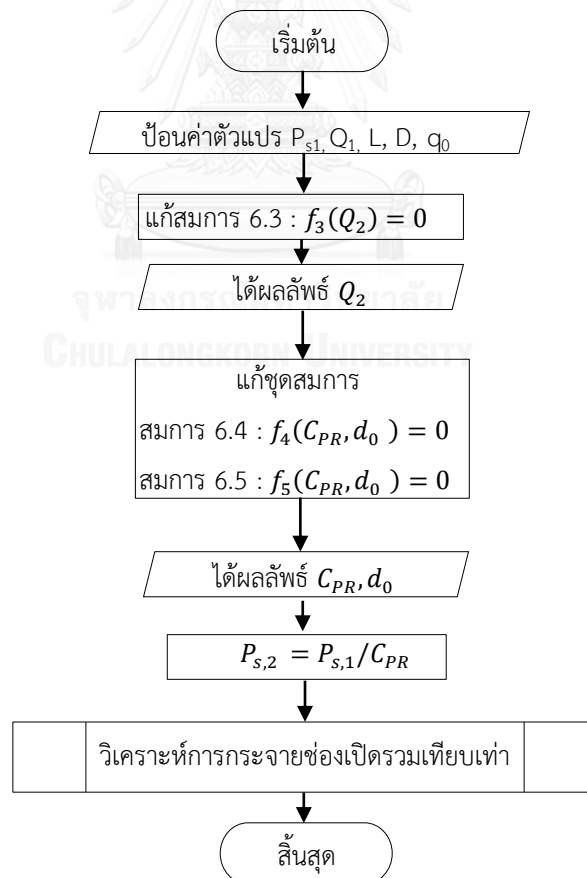
การคำนวณข้อต่อจากตำแหน่ง 1 ไป i เพื่อให้ทราบขนาดข้อต่อที่ตำแหน่ง i หรือ D_i เริ่มต้นจากการทราบค่า P_{s1}, D_1 ตรงทางเข้าข้อต่อทราบจากการคำนวณท่อลมก่อนหน้า ส่วนค่า Q_1 และ Q_3 ทราบจากความต้องการการปรับอากาศ ดังนั้นจากสมการอนุรักษ์มวล 6.7 ทำให้หาค่า Q_2 ได้ ทำให้สมการ 6.8 จะเหลือตัวแปรไม่ทราบค่าคือ P_{si} และ D_i ดังนั้น จึงต้องใช้กระบวนการทำซ้ำ โดยการกำหนดเงื่อนไขความดันสถิตที่ได้คืนมาสมบูรณ์ ($P_{s1}=P_{si}$) และสมมติค่า D_i เพื่อหาสัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง (K) จากตารางข้อต่อ SD5-10 ทำการแทนลงในสมการ 6.8 แล้วแก้สมการ เพื่อหาค่า D_i นำค่า D_i ใหม่เปรียบเทียบกับค่า D_i ที่สมมติ หากผลต่างยังคงมาก จะต้องทำซ้ำด้วย D_i ใหม่ จนคำตอบ D_i ต่างกันน้อยมาก ($|\frac{D_i - D_{i,assume}}{D_i}| \leq 0.001$) จึงจะได้ค่า D_i ที่ถูกต้อง บนเงื่อนไขความดันสถิตที่ได้คืนมาสมบูรณ์

6.2.2.4 ฝั่งงานการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า

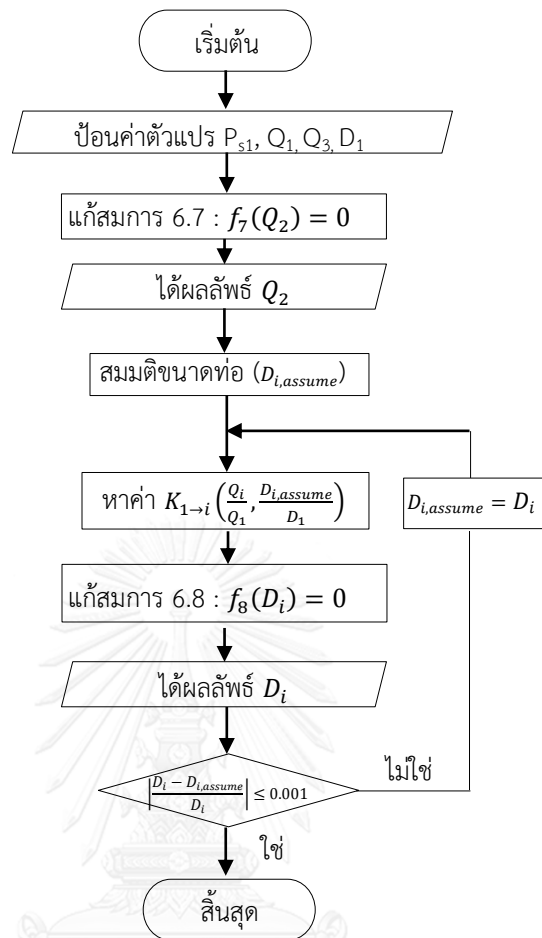
รูปที่ 6-10 , 6-11 และ 6-12 แสดงฝั่งงานการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้าที่ประกอบไปด้วยท่อตรง ท่อที่มีช่องเปิดและข้อต่อ ตามลำดับ ซึ่งขั้นตอนการวิเคราะห์นี้สามารถนำไปพัฒนาเป็นชุดคำสั่งด้วยโปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) ได้ดังภาคผนวก ฉ



รูปที่ 6-10 ผังงานการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ท่อตรง



รูปที่ 6-11 ผังงานการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ท่อที่มีช่องเปิด



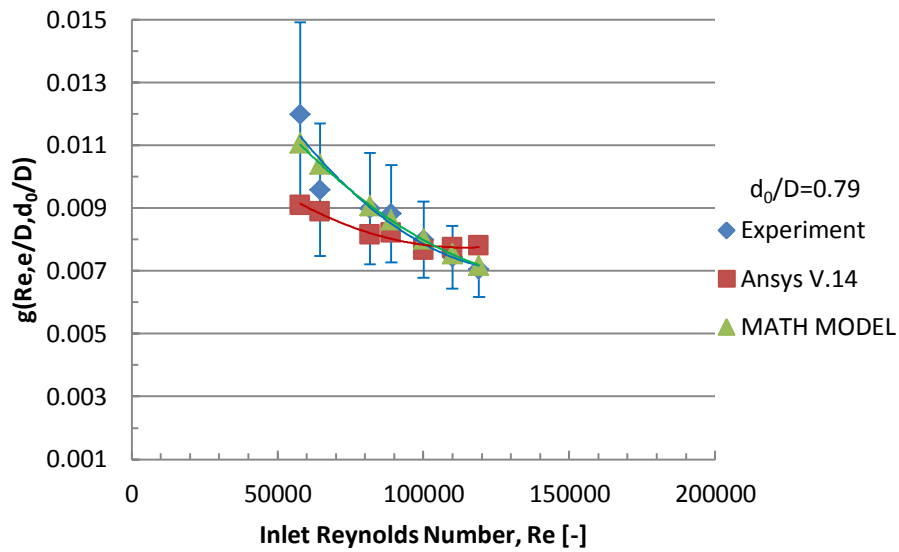
รูปที่ 6-12 ผังงานการวิเคราะห์หาค่าส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ข้อต่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

6.3 เปรียบเทียบผลของการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

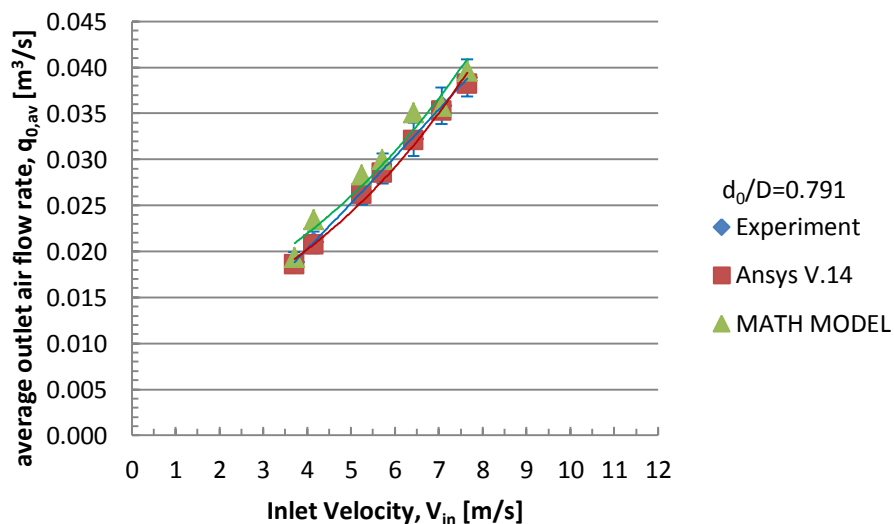
การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้พัฒนากับท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3 จะพิจารณาเงื่อนไขขาเข้าเช่นเดียวกับการทดลองทั้ง 21 กรณี ซึ่งแสดงผลลัพธ์การคำนวณดังตาราง ข-3 โดยเลือกท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 มาเป็นตัวอย่างในการนำเสนอเพื่อแสดงผลการเปรียบเทียบกับ การทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล

รูปที่ 6-13 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้า ด้วยท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 พบว่าการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์นั้นจะให้ผลลัพธ์สอดคล้องกับการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล



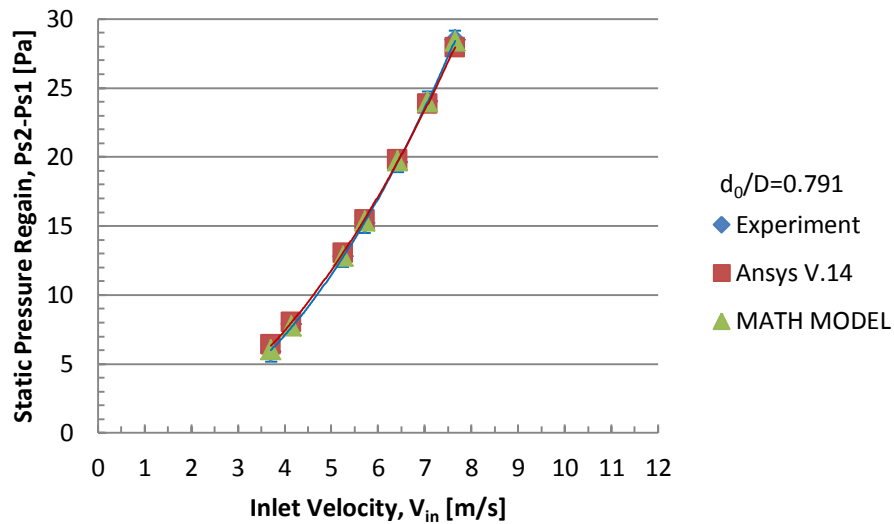
รูปที่ 6-13 การเปรียบเทียบฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์สเข้าจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 เมื่อ $e/D=0.000433$

รูปที่ 6-14 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเฉลี่ยต่อความเร็วการไหล ด้วยท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 พบว่าอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเฉลี่ยจะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วการไหลเข้าท่อลมมากขึ้น โดยผลลัพธ์จากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 6-14 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเฉลี่ยต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1

รูปที่ 6-15 แสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์การเพิ่มขึ้นของความดันสถิตต่อความเร็วการไหลด้วยท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 พบว่าแนวโน้มการเพิ่มขึ้นของความดันสถิตนั้น จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเร็วการไหลเข้าท่อลมมากขึ้น โดยผลลัพธ์ทั้งจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ มีความสอดคล้องกัน



รูปที่ 6-15 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การเพิ่มขึ้นของความดันสถิตต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1

บทที่ 7

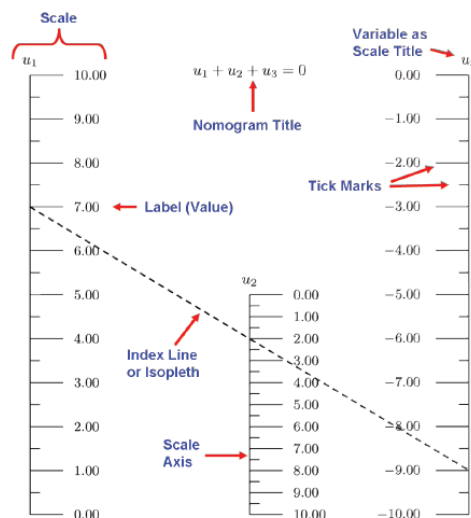
การออกแบบระบบท่อลมผ้าโดยใช้โนโมแกรม

การวิเคราะห์การไหลในท่อลมผ้าในบทที่ 6 แสดงให้เห็นความซับซ้อนของชุดสมการที่ต้องใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งถ้านำไปหาผลลัพธ์การคำนวณในทุกๆ ท่อนของแนวท่อลม ย่อมไม่สะดวกในทางปฏิบัติ ยกเว้นจะเป็นการเขียนในรูปโปรแกรมคอมพิวเตอร์ อย่างไรก็ตาม วิธีการออกแบบท่อลมที่มีอยู่เดิม ถึงแม้จะมีโปรแกรมคอมพิวเตอร์มาช่วยให้การออกแบบกระทำได้รวดเร็วขึ้น แต่ในทางปฏิบัติวิศวกรผู้ออกแบบส่วนใหญ่ยังนิยมใช้ตารางหรือโนโมแกรม (Nomogram) ในการออกแบบ เนื่องจากสามารถออกแบบได้บนแบบแสดงแนวท่อลมได้โดยตรง ดังนั้น ในบทนี้ จึงได้นำเครื่องมือที่เรียกว่า โนโมแกรมมาช่วยวิเคราะห์ท่อลมแต่ละท่อนบนพื้นฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของท่อลมนั้น

7.1 หลักพื้นฐานของการสร้างโนโมแกรม

โนโมแกรม(nomogram) หรือ โนโมกราฟ (nomograph) คือเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการคำนวณสำหรับสมการหนึ่งในระบบพิกัดฉาก โดยใช้สำหรับแก้สมการตั้งแต่สามตัวแปรขึ้นไป ซึ่งมีตัวแปรไม่ทราบค่าเพียงตัวเดียว และแสดงในรูปแบบของช่วงสเกล (scale) ของตัวแปรนั้นในเชิงปฏิบัติ

หลักการใช้งานของโนโมแกรม คือการแทนตัวแปรทราบค่า บนแกนเส้นตรงหรือเส้นโค้งซึ่งมีการปรับสเกลไว้แล้ว และลากเส้นตรงระหว่างจุดบนสเกลของตัวแปรทราบค่า โดยเรียกเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ที่ลากผ่านว่า Index Line หรือ Isopleth ซึ่งเส้นตรงที่ลากผ่านนี้จะไปตัดกับสเกลของตัวแปรไม่ทราบค่าและอ่านคำตอบของตัวแปรนั้นได้ โดยผลลัพธ์ที่ได้จะสอดคล้องกับสมการของโนโมแกรม ดังรูปที่ 7-1



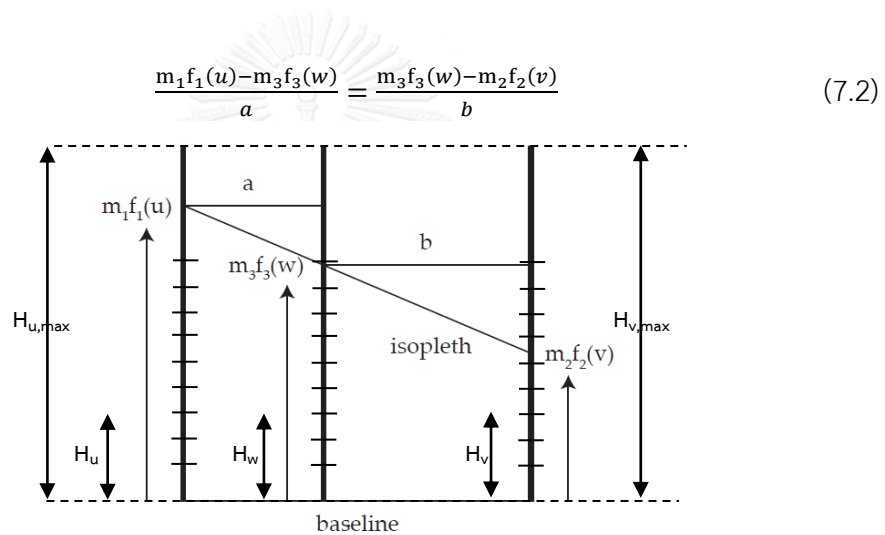
รูปที่ 7-1 แสดงแผนภาพและส่วนประกอบของโนโมแกรม^[30]

7.1.1 โนโมแกรมแบบสเกลคู่ขนาน (Parallel Scale Nomogram)

เป็นโนโมแกรมพื้นฐานที่สุดซึ่งประกอบด้วย 3 ตัวแปร u, v, w โดยแสดงในรูปแบบของฟังก์ชันดังสมการ 7.1

$$f_1(u) + f_2(v) = f_3(w) \quad (7.1)$$

ตัวแปรแต่ละตัวจะแสดงบนสเกลเส้นแนวตั้ง ที่มีการคูณตัวปรับสเกลด้วยค่าคงที่ m_1, m_2 และ m_3 เพื่อให้สเกลทั้งสามสามารถลากเส้นตรงและสอดคล้องกับสมการได้ ซึ่งมีระยะห่างระหว่างแกนสเกลเป็น a และ b ดังรูปที่ 7-2 โดยพิจารณาคุณสมบัติของสามเหลี่ยมคล้ายจะสามารถแสดงความสัมพันธ์ได้ดังสมการ 7.2



รูปที่ 7-2 แสดงลักษณะของโนโมแกรมแบบสเกลคู่ขนาน [30]

ขั้นตอนการสร้างโนโมแกรมจะกำหนดความสูงของเส้นสเกลตัวแปรที่หนึ่ง $H_{u,max}$ และความสูงเส้นสเกลตัวแปรที่สอง $H_{v,max}$ และกำหนดระยะห่างระหว่างเส้นสเกล u กับ v เป็น L โดยแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$m_1 = \frac{H_{u,max}}{f_1(u_{max}) - f_1(u_{min})} \quad , \quad m_2 = \frac{H_{v,max}}{f_2(v_{max}) - f_2(v_{min})} \quad , \quad L = a + b$$

สมการ 7.2 จะต้องสอดคล้องกับสมการ 7.1 ทำให้สามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ m_1, m_2, m_3, a และ b ได้เป็น

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a}{b} \quad , \quad m_3 = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

จากความสัมพันธ์ข้างต้นทั้งหมดจะหาระยะระหว่างแกนสเกล a, b รวมทั้งค่าคงที่ m_3 ได้ สำหรับระยะห่างระหว่างขีดสเกลของ u, v และ w จะสามารถหาได้จากสมการ

$$H_u = m_1(f_1(u) - f_1(u_{min}))$$

$$H_v = m_2(f_2(v) - f_2(v_{min}))$$

$$H_w = m_3(f_3(w) - f_3(w_{min}))$$

| | | | |
|--------|-------|-----|--|
| โดยที่ | H_u | คือ | ระยะห่างระหว่างขีดสเกล u_{min} กับ u ใดๆ |
| | H_v | คือ | ระยะห่างระหว่างขีดสเกล v_{min} กับ v ใดๆ |
| | H_w | คือ | ระยะห่างระหว่างขีดสเกล w_{min} กับ w ใดๆ |

อย่างไรก็ตามการสร้างโนโมแกรมจะมีความยากง่ายขึ้นอยู่กับจำนวนตัวแปรและสมการที่พิจารณา ทำให้แผนภาพโนโมแกรมอาจอยู่ในรูปแบบอื่นๆที่มีความซับซ้อนมากได้

7.2 วิเคราะห์การสร้างโนโมแกรมจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

เมื่อพิจารณาแนวท่อลมผ้าและสมการอนุรักษ์มวล จะทราบความยาว (L) และอัตราการไหล (Q) ในส่วนต่างๆ ทำให้พื้นฐานของการสร้างโนโมแกรมมาจากสมการเบอร์นูลลีหรือสมการที่เกี่ยวข้องกับแบบจำลองนั้น ซึ่งโนโมแกรมที่ได้จะต้องตอบโจทย์การวิเคราะห์หรือออกแบบในแต่ละท่อนได้

อย่างไรก็ตามการสร้างโนโมแกรมต้องมีความละเอียดและความแม่นยำอย่างมาก เพราะการวาดสเกลที่ผิดพลาดแม้เพียงเล็กน้อยก็ทำให้คำตอบคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นเพื่อความถูกต้องของการสร้างโนโมแกรมและนำไปใช้ในทางปฏิบัติ จึงสร้างด้วยโปรแกรมไพโนโม (PyNomo) ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดย Leif Roschier^[31] บนภาษาไพทอน (Python) ที่มีความถูกต้องและนิยมใช้สำหรับสร้างโนโมแกรม (แสดงชุดคำสั่งไพโนโมในภาคผนวก ฉ)

7.2.1 โนโมแกรมของท่อตรง

โนโมแกรมส่วนท่อตรงจะต้องหาค่าความดันรวมลด (ΔP_t) หรือหาขนาดท่อตรง (D) ในส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้าเมื่อกำหนดความเร็ว (V) ที่เหมาะสมได้ เมื่อพิจารณาสมการเบอร์นูลลี (6.2) โดยกำหนดคุณสมบัติของอากาศและวัสดุท่อ ($\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$, $e=0.11 \text{ mm}$) แล้วจัดรูปตัวแปรได้ดังสมการ 7.3

$$\text{สมการเบอร์นูลี (6.2)} \quad \Delta P_t = 0.25 \left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4\rho(Q)}{\pi\mu D} \right)^{0.9}} \right) \right]^{-2} \frac{L}{D} \frac{8\rho(Q)^2}{\pi^2 D^4}$$

$$\left(\frac{\Delta P_t}{L} \right) = 0.231 \left[\log \left(\frac{2.973 \times 10^{-5}}{D} + \frac{2.269 \times 10^{-4}}{\left(\frac{Q}{D} \right)^{0.9}} \right) \right]^{-2} \frac{(Q)^2}{D^5} \quad (7.3)$$

| | | |
|-------------------------------|-----|------------------------------------|
| โดยที่ $\frac{\Delta P_t}{L}$ | คือ | ความดันรวมลดต่อความยาว [Pa/m] |
| D | คือ | ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลม [m] |
| Q | คือ | ปริมาณลม [m^3/s] |

ค่าความดันรวมลดต่อความยาว $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)$ จะขึ้นอยู่กับตัวแปร D และ Q ซึ่งสามารถสร้างโนโมแกรมได้ในลักษณะเดียวกับ DUCTULATOR แต่การสร้างจะมีความซับซ้อนมาก ดังนั้น งานวิจัยนี้จะแสดงโนโมแกรมส่วนท่อตรงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ด้วยกลุ่มข้อมูลที่คำนวณแล้วเสร็จจากขนาดท่อลมผ้าที่มีการผลิตและใช้กันในทางปฏิบัติคือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 0.203-1.524 m (8 - 60 inch) และเลือกใช้ขนาดท่อลมผ้าที่เป็นเลขคู่ จากนั้นทำการแปรเปลี่ยนอัตราการไหล (Q) ซึ่งเป็นปริมาณที่ทราบค่าตั้งแต่ 0.1-10 m^3/s ($\approx 212 - 21200$ CFM) ทั้งนี้ตัวเลขอัตราการไหลดังกล่าวสามารถครอบคลุมการใช้งานในทางปฏิบัติที่เกิดขึ้นทั่ว ๆ ไป เมื่อแทนค่าตัวแปรทั้งสองลงสมการ 7.3 จะได้ค่าคำตอบ $\left(\frac{\Delta P}{L}\right)$ จากนั้นทำการเปลี่ยนขนาดท่อลมและอัตราการไหลจนครบตามขอบเขตที่กำหนด รวมทั้งพิจารณาสมการ $Q=AV$ จะได้ความเร็วการไหลของแต่ละข้อมูลด้วย กลุ่มข้อมูลที่ได้ทั้งหมดจะสามารถนำไปสร้างเป็นโนโมแกรมส่วนท่อตรงดังรูปที่ 7-5

7.2.2 โนโมแกรมของท่อที่มีช่องเปิด

การสร้างโนโมแกรมสำหรับท่อที่มีช่องเปิดจะต้องพิจารณาทั้งสมการเบอร์นูลีและสมการอัตราการไหลผ่านช่องเปิด ซึ่งจะต้องแก้สมการทั้งสองไปพร้อมๆกัน ทำให้การวิเคราะห์จะครอบคลุม 2 แบบจำลองด้วยกันคือ

- แบบจำลองส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า ในส่วนนี้จะทราบอัตราส่วนความดันสถิต C_{PR} โดยการกำหนดขึ้นมา เพื่อหาค่าความดันสถิตขาเข้า P_{s1} และหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม d_0
- แบบจำลองท่อที่มีช่องเปิดของส่วนต่อขยาย ในส่วนนี้จะทราบความดันสถิตขาเข้า P_{s1} จากท่อนก่อนหน้า เพื่อหาค่า C_{PR} และหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม d_0

อย่างไรก็ตาม โนโมแกรมหนึ่งแผนภาพไม่สามารถหาค่าตัวแปรไม่ทราบค่า 2 ตัวได้ จึงต้องแบ่งการสร้างโนโมแกรมออกเป็น 2 ส่วนคือ โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิต และโนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม ซึ่งทั้งสองโนโมแกรมนี้จะมีความสอดคล้องของสมการซึ่งกันและกัน

7.2.2.1 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับสร้างโนโมแกรม

พิจารณาสมการเบอร์นูลลี 6.6 ด้วยการแทนค่า d_0 จากสมการอัตราการไหลผ่านช่องเปิด 7.4 เพื่อกำจัดตัวแปร d_0 ทิ้งและจัดรูปได้ดังสมการ 7.5

$$\begin{aligned} \text{อัตราการไหลผ่านช่องเปิด : } \quad q_0 &= Q_1 - Q_2 = \bar{C}_d \left(\frac{\pi d_0^2}{4} \right) \sqrt{\frac{1}{\rho} P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}} \right)} \\ d_0 &= \sqrt{(Q_1 - Q_2) \left(\frac{4\sqrt{\rho}}{\pi \bar{C}_d} \right) \sqrt{\frac{1}{P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}} \right)}}} \end{aligned} \quad (7.4)$$

$$\text{สมการเบอร์นูลลี : } P_{s,1} \left(1 - \frac{1}{C_{PR}} \right) + (P_{v,1} - P_{v,2}) = g \left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D} \right) \frac{L}{D} P_{v,1}$$

$$P_{s,1} \left(1 - \frac{1}{C_{PR}} \right) + \frac{8\rho}{\pi^2} \left(\frac{Q_1^2 - Q_2^2}{D^4} \right) = \left(\frac{\left(\sqrt{(Q_1 - Q_2) \left(\frac{4\sqrt{\rho}}{\pi \bar{C}_d} \right) \sqrt{\frac{1}{P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}} \right)}}} \right)^{0.04215 \log \left(\frac{0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right) - 0.1363}}{D} - 0.15079 \log \left(\frac{0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right) + 0.7711}{\left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right)^{0.9}} \right) \right]^2} \right)^2 \frac{L}{D} \frac{8\rho}{\pi^2} \left(\frac{Q_1^2}{D^4} \right) \quad (7.5)$$

โดยทั่วไปจะกำหนดเงื่อนไขของอากาศและวัสดุท่อเช่นเดียวกับท่อตรง รวมทั้งทราบอัตราการไหล ขนาดท่อจากคำตอบของส่วนท่อตรงและความยาวทำให้สมการ 7.5 นี้เหลือตัวแปรที่ต้องพิจารณาคือ $P_{s,1}$ และ C_{PR} โดยสามารถหาค่า $P_{s,1}$ ได้เมื่อทราบ C_{PR} หรือหาค่า C_{PR} ได้เมื่อทราบ $P_{s,1}$ เช่นกัน ซึ่งครอบคลุมการวิเคราะห์ส่วนขาเข้าและส่วนต่อขยาย อย่างไรก็ตามสมการ 7.5 อยู่ในรูปแบบที่มีความซับซ้อนมากและไม่สามารถสร้างเป็นโนโมแกรมได้โดยตรง เนื่องจากเป็นหนึ่งสมการที่มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกันถึง 7 ตัวด้วยกัน ($Q_1, Q_2, q_0, L, D, P_{s,1}, C_{PR}$) ดังนั้น จึงต้องวิเคราะห์สมการและจัดรูปใหม่เพื่อให้สามารถนำไปสร้างเป็นโนโมแกรมได้

จากการที่ท่อที่มีช่องเปิดนั้นมีพื้นฐานการวิเคราะห์มาจากการท่อตรง ต่างกันตรงที่ได้มีการเจาะช่องเปิดจำนวนหนึ่ง ทำให้ส่งผลต่อลักษณะการไหลในท่อ โดยตัวแปรที่ส่งผลให้เกิดการความแตกต่างดังกล่าวคือฟังก์ชัน $h(Re, \frac{d_0}{D})$ ซึ่งเป็นผลมาจากช่องเปิด ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการเบอร์นูลลี 7.6 ในรูปของฟังก์ชัน $g(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}) = h(Re, \frac{d_0}{D})f(Re, \frac{e}{D})$ โดยค่า $f(Re, \frac{e}{D})$ เป็นค่าตัวประกอบความเสียหายของท่อตรงและ $[f(Re, \frac{e}{D}) \frac{L}{D} P_{v,1}]$ จะมีค่าเท่ากับความดันรวมลดของกรณีท่อตรง ($\Delta P_{t, straight}$) ซึ่งหาได้จากโนโมแกรมของท่อตรงรูปที่ 7-5 ทำให้ลดความซับซ้อนของสมการลงได้

$$\text{สมการเบอร์นูลลี : } P_{s,1} \left(1 - \frac{1}{C_{PR}}\right) + (P_{v,1} - P_{v,2}) = h \left(Re, \frac{d_0}{D}\right) \left[f \left(Re, \frac{e}{D}\right) \frac{L}{D} P_{v,1} \right] = h \left(Re, \frac{d_0}{D}\right) (\Delta P_{t, straight})$$

$$P_{s,1} \left(1 - \frac{1}{C_{PR}}\right) + \frac{8\rho}{\pi^2} \left(\frac{Q_1^2 - Q_2^2}{D^4}\right) = \left(\frac{\left(\sqrt{(q_0) \left(\frac{4\sqrt{\rho}}{\pi C_d} \right) \sqrt{P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}}\right)}} \right)}{D} \left(0.09365 \log \left(0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right) - 0.22182 \right) - 0.52502 \log \left(0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right) + 2.8287 \right) (\Delta P_{t, straight}) \quad (7.6)$$

เมื่อแทนเงื่อนไขของอากาศและวัสดุท่อลมผ้า ($\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$, $e/D=0.000433$) จะสามารถจัดรูปได้ดังสมการ 7.7

$$P_{s,1} \left(1 - \frac{1}{C_{PR}}\right) + c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, straight}, c_0) = c_2(Q_1, q_0, D, \Delta P_{t, straight}) \left(P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}}\right) \right)^{-1/4} \quad (7.7)$$

$$\text{เมื่อ } c_0(Q_1, Q_2, D) = \frac{8\rho}{\pi^2} \left(\frac{Q_1^2 - Q_2^2}{D^4}\right)$$

$$c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, straight}, c_0) = c_0 + \left(0.52502 \log \left(0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right) - 2.8287 \right) \Delta P_{t, straight}$$

$$c_2(Q_1, q_0, D, \Delta P_{t, straight}) = \sqrt{(q_0) \left(\frac{4\sqrt{\rho}}{\pi C_d} \right) \frac{\left(0.09365 \log \left(0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right) - 0.22182 \right)}{D}} \Delta P_{t, straight}$$

สมการ 7.7 จะประกอบไปด้วยตัวแปร $P_{s,1}$, C_{PR} และฟังก์ชัน $c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, straight}, c_0)$ กับ $c_2(Q_1, q_0, D, \Delta P_{t, straight})$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันทราบค่าสำหรับท่อลมกรณีใดๆ โดยทั้งหมดนี้อยู่ในรูปแบบของสมการที่สามารถนำไปสร้างเป็นโนโมแกรมได้

7.2.2.2 การสร้างโนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิต

การสร้างโนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิตของสมการ 7.7 จะต้องหาค่าฟังก์ชัน c_0 , c_1 และ c_2 ก่อน จึงจะสามารถหาค่าตอบของสมการ 7.7 ได้ ทำให้การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือโนโมแกรมสำหรับฟังก์ชัน c_0 , โนโมแกรมสำหรับฟังก์ชัน c_1 , โนโมแกรมสำหรับฟังก์ชัน c_2 และโนโมแกรมสำหรับสมการ 7.7

โดยกำหนดสเกลของตัวแปรทราบค่าคือ Q_1 ตั้งแต่ 0.1-10 m^3/s ($\approx 212 - 21200$ CFM), Q_2 ตั้งแต่ 0-9 ($\approx 0 - 19000$ CFM) เนื่องจากการไหลผ่านท่อที่มีช่องเปิดจะมีค่า $Q_2 < Q_1$ เสมอ รวมทั้งท่อสิ้นสุดท้ายของแนวท่อลมเป็นปลายปิดจะมีค่า $Q_2=0$ และกำหนดสเกล q_0 ตั้งแต่ 0.1-5 m^3/s ($\approx 212 - 10000$ CFM) ซึ่งขึ้นอยู่กับความต้องการของระบบปรับอากาศ

ทั้งนี้ได้กำหนดสเกลของ D เป็นจำนวนเต็มตั้งแต่ 8 - 60 in (0.203-1.524 m) เช่นเดียวกับท่อตรง และกำหนดสเกลของ $\Delta P_{t, \text{straight}}$ ตั้งแต่ 0.1-15 Pa เนื่องจากการออกแบบท่อส่วนใหญ่นิยมใช้ค่าความดันรวมลดต่อความยาวเท่ากับ 0.8-1.0 Pa/m ซึ่งที่ความยาวท่อปกติมักจะไม่ทำให้ความดันรวมลดเกินกว่า 15 Pa

■ โนโมแกรมสำหรับฟังก์ชัน $c_0(Q_1, Q_2, D)$

การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งสมการของฟังก์ชัน $c_0(Q_1, Q_2, D)$ ออกเป็น 2 สมการย่อย 7.8 และ 7.9 โดยเริ่มจากพิจารณาสมการ 7.8 ด้วยค่า Q_1 กับ Q_2 บนช่วงที่กำหนด เพื่อหาค่า R_1 ก่อน แล้วจึงพิจารณาสมการ 7.9 ด้วยค่าของ R_1 กับ D เพื่อหาค่าตอบ $c_0(Q_1, Q_2, D)$ โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไพโนโมดังรูปที่ 7-6a

$$Q_1^2 - Q_2^2 = R_1 \quad (7.8)$$

$$c_0(Q_1, Q_2, D) = \frac{8\rho}{\pi^2} \left(\frac{R_1}{D^4} \right) \quad (7.9)$$

■ โนโมแกรมสำหรับฟังก์ชัน $c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0)$

การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งสมการของฟังก์ชัน $c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0)$ ออกเป็น 3 สมการย่อย 7.10 ถึง 7.12 โดยเริ่มจากพิจารณาสมการ 7.10 ด้วยค่า Q_1 กับ D บนช่วงที่กำหนด เพื่อหาค่า R_2 ก่อน แล้วจึงพิจารณาสมการ 7.11 ด้วยค่าของ R_2 กับ $\Delta P_{t, \text{straight}}$ เพื่อหาค่า R_3 จากนั้นพิจารณาสมการ 7.12 ด้วยค่า R_3 กับสเกลของ c_0 จากโนโมแกรมก่อนหน้า ทำให้ได้คำตอบของ c_1 โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไพโนโมดังรูปที่ 7-6b

$$(0.52502 \log(0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D}) - 2.8287) = R_2 \quad (7.10)$$

$$R_2 \Delta P_{t, \text{straight}} = R_3 \quad (7.11)$$

$$c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0) = c_0 + R_3 \quad (7.12)$$

■ โนโมแกรมสำหรับฟังก์ชัน $c_2(Q_1, q_0, D, \Delta P_{t, \text{straight}})$

การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งสมการของฟังก์ชัน $c_2(Q_1, q_0, D, \Delta P_{t, \text{straight}})$ ออกเป็น 3 สมการย่อย 7.13 ถึง 7.15 โดยเริ่มจากพิจารณาสมการ 7.13 ด้วยค่า Q_1 กับ D บนช่วงที่กำหนด เพื่อหาค่า R_4 ก่อน แล้วจึงพิจารณาสมการ 7.14 ด้วยค่าของ R_4 กับ q_0 เพื่อหาค่า R_5 จากนั้นพิจารณาสมการ 7.15 ด้วยค่า R_5 กับ $\Delta P_{t, \text{straight}}$ ทำให้ได้คำตอบของ c_2 โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไพธอนโมดังรูปที่ 7-6c

$$\frac{(0.09365 \log(0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D}) - 0.22182)}{D} = R_4 \quad (7.13)$$

$$R_4 \sqrt{(q_0) \left(\frac{4\sqrt{\rho}}{\pi c_d} \right)} = R_5 \quad (7.14)$$

$$c_2(Q_1, q_0, D, \Delta P_{t, \text{straight}}) = \Delta P_{t, \text{straight}} R_5 \quad (7.15)$$

■ โนโมแกรมสำหรับสมการ 7.7

การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งสมการ 7.7 ออกเป็น 2 สมการย่อย 7.16 และ 7.17 โดยใช้สเกลของ c_1 และ c_2 จากโนโมแกรมก่อนหน้านี้ มาวิเคราะห์หาค่า R_6 ก่อนแล้วจึงพิจารณาค่า R_6 กับตัวแปรทราบค่า C_{PR} เพื่อหาค่า $P_{s,1}$ /หรือหาค่า C_{PR} เมื่อทราบ $P_{s,1}$ เช่นกัน โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไพธอนโมดังรูปที่ 7-6d

อย่างไรก็ตามสเกลของ C_{PR} จะขึ้นอยู่กับ $P_{s,1}$ จึงกำหนดสเกลของ $P_{s,1}$ ตั้งแต่ 30-250 Pa (≈ 0.12 -1.00 inWC) เนื่องจากท่อลมผ้าจะคงรูปได้ต้องมีความดันสถิตมากกว่าความดันสถิตตั้งต้นหรือมากกว่า 30 Pa รวมทั้งเป็นการไหลในระบบความดันต่ำ ซึ่งประสบการณ์ของผู้ผลิต DUCTSOX^[29] พบว่าช่วงความดันสถิตของท่อลมผ้ามักอยู่ในช่วง 0.25-1 นิ้วน้ำ

$$P_{s,1} \left(1 - \frac{1}{C_{PR}} \right) + c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0) = R_6 \quad (7.16)$$

$$c_2(Q_1, q_0, D, \Delta P_{t, \text{straight}}) \left(P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}} \right) \right)^{-1/4} = R_6 \quad (7.17)$$

7.2.2.3 การสร้างโนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม

จากการวิเคราะห์ความดันสถิตด้วยโนโมแกรมรูปที่ 7-6 จะทราบค่า P_{s1} และ C_{PR} ทำให้สามารถหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม (d_0) ได้ โดยพิจารณาสมการอัตราการไหลผ่านช่องเปิด 6.5 เมื่อกำหนด $C_d=0.65$, $\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$ แล้วจัดรูปได้ดังสมการ 7.18

$$\text{อัตราการไหลผ่านช่องเปิด : } q_0 = C_d \left(\frac{\pi d_0^2}{4} \right) \sqrt{\frac{1}{\rho} P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}} \right)}$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{q_0}{0.47814 \sqrt{P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}} \right)}}} \quad (7.18)$$

การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งสมการ 7.18 ออกเป็น 2 สมการย่อย 7.19 และ 7.20 โดยเริ่มจากพิจารณาสมการ 7.19 ด้วยค่า C_{PR} กับ P_{s1} จากสเกลของโนโมแกรม 7-6d เพื่อหาค่า R_7 ก่อนแล้วจึงพิจารณาสมการ 7.20 ด้วยค่าของ R_7 กับ q_0 เพื่อหาค่าตอบ d_0 โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไฟโนโมดังรูปที่ 7-7

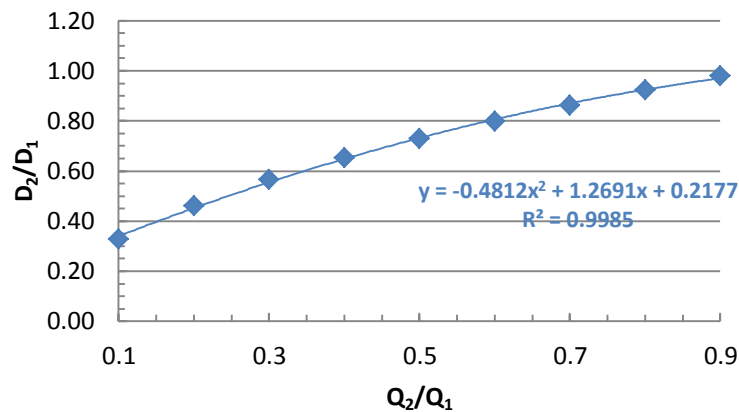
$$\sqrt{P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}} \right)} = R_7 \quad (7.19)$$

$$d_0 = \sqrt{\frac{q_0}{0.47814 R_7}} \quad (7.20)$$

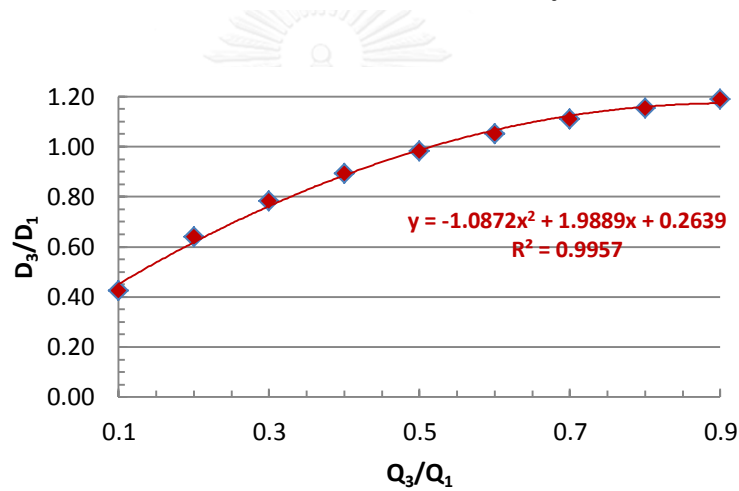
7.2.3 โนโมแกรมของข้อต่อ

โนโมแกรมส่วนข้อต่อจะใช้สำหรับการหาขนาดท่อท่อนต่อไป เมื่อทราบขนาดท่อขาเข้าและอัตราส่วนปริมาตรลมผ่านข้อต่อ เมื่อพิจารณาสมการเบอร์นูลลี (6.8) ภายใต้เงื่อนไขความดันสถิตได้ค้ำสมบูรณ์ ($P_{s1}=P_{s2}$) และจัดรูปตัวแปร พบว่าที่อัตราส่วนปริมาตรลม (Q_i/Q_1) ค่าหนึ่งจะมีอัตราส่วน $\frac{D_i}{D_1}$ ที่ทำให้เกิดความดันสถิตได้ค้ำสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาข้อต่อ SD5-10 จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\frac{Q_i}{Q_1}$ ต่อ $\frac{D_i}{D_1}$ ได้ดังรูปที่ 7-3 และ 7-4

$$\text{สมการเบอร์นูลลี (6.8)} \quad \left(\frac{D_i}{D_1} \right)^4 = \left[1 + K_{1 \rightarrow i} \left(\frac{Q_i}{Q_1}, \frac{D_i}{D_1} \right) \right] \left(\frac{Q_i}{Q_1} \right)^2$$



รูปที่ 7-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง D_2/D_1 ต่อ Q_2/Q_1 ของการไหลในข้อต่อ SD5-10 ทิศ 1→2
ภายใต้เงื่อนไขความดันสถิตได้คืบสมบูรณ์



รูปที่ 7-4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง D_3/D_1 ต่อ Q_3/Q_1 ของการไหลในข้อต่อ SD5-10 ทิศ 1→3
ภายใต้เงื่อนไขความดันสถิตได้คืบสมบูรณ์

จากความสัมพันธ์ข้างต้นจะสามารถเขียนสมการของการหาขนาดท่อต่อไปได้ของข้อต่อ SD5-10 ได้ดังสมการ 7.21 และ 7.22

$$\text{ทิศ 1} \rightarrow 2 \quad D_2 = D_1 \left(-0.4812 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 + 1.2691 \frac{Q_2}{Q_1} + 0.2177 \right) \quad (7.21)$$

$$\text{ทิศ 1} \rightarrow 3 \quad D_3 = D_1 \left(-1.0872 \left(\frac{Q_3}{Q_1} \right)^2 + 1.9889 \frac{Q_3}{Q_1} + 0.2639 \right) \quad (7.22)$$

การสร้างโมเดลจะแบ่งออกเป็น 2 ทิศทาง โดยกำหนดสเกลของตัวแปรทราบค่า Q_1, Q_2 และ Q_3 ตั้งแต่ $0.1-10 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\approx 212 - 21200 \text{ CFM}$) และ D_1, D_2, D_3 ตั้งแต่ 8-60 นิ้ว

7.2.3.1 การสร้างโนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศ 1->2

การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งสมการ 7.21 ออกเป็น 2 สมการย่อย 7.23 และ 7.24 โดยเริ่มจากพิจารณาสมการ 7.23 ด้วยค่า Q_1 กับ Q_2 บนช่วงที่กำหนด เพื่อหาค่า R_8 ก่อน แล้วจึงพิจารณาสมการ 7.24 ด้วยค่าของ R_8 กับ D_1 เพื่อหาค่าตอบ D_2 โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไพโนโมดังรูปที่ 7-8

$$\frac{Q_2}{Q_1} = R_8 \quad (7.23)$$

$$D_2 = D_1(-0.4812(R_8)^2 + 1.2691R_8 + 0.2177) \quad (7.24)$$

7.2.3.2 การสร้างโนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศ 1->3

การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งสมการ 7.22 ออกเป็น 2 สมการย่อย 7.25 และ 7.26 โดยเริ่มจากพิจารณาสมการ 7.25 ด้วยค่า Q_1 กับ Q_3 บนช่วงที่กำหนด เพื่อหาค่า R_9 ก่อน แล้วจึงพิจารณาสมการ 7.26 ด้วยค่าของ R_9 กับ D_1 เพื่อหาค่าตอบ D_3 โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไพโนโมดังรูปที่ 7-9

$$\frac{Q_3}{Q_1} = R_9 \quad (7.25)$$

$$D_3 = D_1(-1.0872(R_9)^2 + 1.9889R_9 + 0.2639) \quad (7.26)$$

อย่างไรก็ตามการใช้งานโนโมแกรมของข้อต่อนี้จะจำกัดเฉพาะแบบจำลองข้อต่อ SD5-10 ในกรณีที่ต้องใช้ข้อต่อรูปแบบอื่น สามารถกระทำการสร้างโนโมแกรมบนข้อจำกัดความดันสถิตได้คืนสมบูรณ์ด้วยหลักการข้างต้น

7.2.4 โนโมแกรมของการกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

โนโมแกรมที่ได้จะใช้สำหรับการหาขนาดช่องเปิดย่อย (d) สำหรับท่อลมที่มีช่องเปิดท่อนใด ๆ เมื่อทราบระยะส่งลม, อัตราการไหลผ่านช่องเปิดทั้งหมด (q_0) และเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม (d_0) โดยพิจารณาสมการของระยะส่งลม 6.6 ภายใต้เงื่อนไขความเร็วปลายทาง 50 FPM

$$\text{สมการของระยะส่งลม (6.6)} \quad \overline{T_{50}} = 29.17 \left(\frac{q_0}{\pi(d_0)^2/4} \right) \sqrt{\frac{\pi(d)^2}{4}} = 32.915 \left(\frac{q_0}{d_0^2} \right) d$$

การสร้างโนโมแกรมจะแบ่งสมการ 6.6 ออกเป็น 2 สมการย่อย 7.27 และ 7.28 โดยพิจารณาสมการ 7.27 ด้วยค่า q_0 กับ d_0 ซึ่งมีสเกลเดียวกับโนโมแกรมรูปที่ 7-7 เพื่อหาค่า R_{10} ก่อนแล้วจึงพิจารณาสมการ 7.28 ด้วยค่าของ R_{10} กับ T_{50} เพื่อหาค่าตอบ d ทั้งนี้กำหนดช่วงของระยะส่งลมตั้งแต่ 2-12 เมตร ซึ่งครอบคลุมการใช้งานสำหรับพื้นที่ปรับอากาศทั่วไป โดยสามารถสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไฟโนโมดังรูปที่ 7-10 ทั้งนี้ โดยค่านึงว่าค่าตอบขนาดของช่องเปิดย่อย (d) นั้นจะต้องเป็นค่าที่นิยมใช้ในการผลิตจริง ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.5, 1.0, ..., 4.0 นิ้ว (127, 254, ..., 1016 mm)

$$\frac{q_0}{d_0^2} = R_{10} \quad (7.27)$$

$$\overline{T_{50}} = 32.915(R_{10})d \quad (7.28)$$

สำหรับจำนวนช่องเปิดทั้งหมดสามารถหาค่าได้จากสมการ 6.9 [$N = (d_0/d)^2$] หรือสร้างเป็นโนโมแกรมด้วยชุดคำสั่งไฟโนโมดังรูปที่ 7-11 ด้วยสเกลของ d_0 และ d เช่นเดียวกับโนโมแกรมรูปที่ 7-10

$$N = (d_0/d)^2 \quad (6.9)$$

7.3 วิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยโนโมแกรม

การใช้โนโมแกรมสำหรับระบบท่อลมผ้าจะเริ่มวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า ตามด้วยส่วนต่อขยายบนแนวท่อลมผ้าจนถึงท่อนสุดท้ายของแนวท่อลมผ้านั้นๆ ดังตัวอย่างการออกแบบระบบท่อลมในภาคผนวก จ โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยโนโมแกรมในแต่ละส่วนของแนวท่อลมผ้า ดังนี้

7.3.1 ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า

1. ทราบค่า Q_0 , Q_1 , Q_2 และ q_0 จากการออกแบบ, L_{0-1} , L_{1-2} และ T_{50} จากการวางแนวท่อลมผ้า
2. กำหนดความเร็ว (V) ที่เหมาะสม โดยคำนึงถึงเหตุผลเรื่องเสียงและการสิ้นเสทือน ซึ่งอยู่ในช่วง 5-10 m/s ($\approx 1000-2000$ FPM) อ้างอิงจาก ASHRAE Fundamental Handbook 2013^[10]
3. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นระหว่าง Q กับ V มาตัดกันได้ค่า D จากนั้นเลือกขนาด D ที่ใกล้เคียง และนำ D ที่เลือกนี้ลากตัดกับ Q จะได้ค่า V และ $\frac{\Delta P_t}{L}$ จริง

4. คำนวณค่า $\Delta P_{t, straight} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right) L_{1-2}$
5. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-6a ลากเส้นตรงระหว่างค่า Q_1 กับ Q_2 มาตัดที่แกน R_1 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_1 ที่ได้จาก D ที่ได้จากข้อ 3 ตัดที่แกน c_0 และอ่านค่า c_0 ที่ได้
6. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-6b ลากเส้นตรงระหว่างค่า Q_1 กับ D มาตัดที่แกน R_2 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_2 ที่ได้จาก $\Delta P_{t, straight}$ ที่คำนวณในข้อ 4 มาตัดที่แกน R_3 แล้วลากเส้นตรงระหว่างค่า R_3 ที่ได้จาก c_0 ที่ได้จากข้อ 5 มาตัดที่แกน c_1 และอ่านค่า c_1 ที่ได้
7. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-6c ลากเส้นตรงระหว่างค่า Q_1 กับ D มาตัดที่แกน R_4 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_4 ที่ได้จาก q_0 มาตัดที่แกน R_5 แล้วลากเส้นตรงระหว่างค่า R_5 ที่ได้จาก $\Delta P_{t, straight}$ ที่คำนวณในข้อ 4 มาตัดที่แกน c_2 และอ่านค่า c_2 ที่ได้
8. กำหนดค่า C_{PR} ที่เหมาะสม เนื่องจากค่า C_{PR} จะส่งผลต่อขนาดความดันสถิตพัฒนาและความสม่ำเสมอของความดันสถิตที่เกิดขึ้น
หมายเหตุ ความเหมาะสมอาจได้จากการทดลองเปลี่ยนค่า C_{PR} หลาย ๆ ค่า เพื่อดูขนาดความดันสถิตและความสม่ำเสมอของความดันสถิตที่เกิดขึ้น
9. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-6d ลากเส้นตรงระหว่างค่า c_1 ที่ได้จากข้อ 6 กับ c_2 ที่ได้จากข้อ 7 มาตัดที่แกน R_6 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_6 ที่ได้จาก C_{PR} ที่กำหนดมาตัดที่แกน P_{s1} และอ่านค่า P_{s1} ที่ได้
10. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-7 ลากเส้นตรงระหว่างค่า P_{s1} ที่ได้จากข้อ 9 กับ C_{PR} ที่กำหนดมาตัดที่แกน R_7 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_7 ที่ได้จาก q_0 ที่กำหนดมาตัดที่แกน d_0 และอ่านค่า d_0 ที่ได้
11. คำนวณค่า $P_{s,2} = P_{s,1}/C_{PR}$ และ $P_{s, fan} = P_{s,1} + \left(\frac{\Delta P}{L}\right) \times L_{0 \rightarrow 1}$
12. ได้ผลลัพธ์ของ $D, P_{s, fan}, P_{s,1}, P_{s,2}, d_0$ และนำค่า D และ P_{s2} ที่ได้ไปใช้ในท่อนถัดไป

7.3.2 ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า

7.3.2.1 ท่อตรง

1. ทราบค่า Q จากการออกแบบ, L จากการวางแนวท่อลมผ้า, D และ P_{s1} (คือ P_{s2}) จากการใช้นโนโมแกรมในท่อนก่อนหน้า
2. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นระหว่าง Q กับ D มาตัดกันได้ค่า $\frac{\Delta P_t}{L}$
3. คำนวณค่า $P_{s,2} = P_{s,1} - \left(\frac{\Delta P}{L}\right) \times L$
4. นำค่า D และ P_{s2} ไปใช้ในท่อนถัดไป

7.3.2.2 ท่อที่มีช่องเปิด

1. ทราบค่า Q_1 , Q_2 และ q_0 จากการออกแบบ, L จากแนวท่อลมผ้า, D และ P_{s1} (คือ P_{s2}) จากการใช้โนโมแกรมในท่อนก่อนหน้า
2. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นระหว่าง Q_1 กับ D มาตัดกันได้ค่า $\frac{\Delta P_t}{L}$
3. คำนวณค่า $\Delta P_{t, straight} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right)L$
4. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-6a ลากเส้นตรงระหว่างค่า Q_1 กับ Q_2 มาตัดที่แกน R_1 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_1 ที่ได้จาก D มาตัดที่แกน c_0 และอ่านค่า c_0 ที่ได้
5. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-6b ลากเส้นตรงระหว่างค่า Q_1 กับ D มาตัดที่แกน R_2 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_2 ที่ได้จาก $\Delta P_{t, straight}$ มาตัดที่แกน R_3 แล้วลากเส้นตรงระหว่างค่า R_3 ที่ได้จาก c_0 ที่ได้จากข้อ 4 มาตัดที่แกน c_1 และอ่านค่า c_1 ที่ได้
6. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-6c ลากเส้นตรงระหว่างค่า Q_1 กับ D มาตัดที่แกน R_4 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_4 ที่ได้จาก q_0 ที่กำหนดมาตัดที่แกน R_5 แล้วลากเส้นตรงระหว่างค่า R_5 ที่ได้จาก $\Delta P_{t, straight}$ ที่คำนวณได้จากข้อ 3 มาตัดที่แกน c_2 และอ่านค่า c_2 ที่ได้
7. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-6d ลากเส้นตรงระหว่างค่า c_1 ที่ได้จากข้อ 5 กับ c_2 ที่ได้จากข้อ 6 มาตัดที่แกน R_6 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_6 ที่ได้จาก P_{s1} ที่ทราบค่ามาตัดที่แกน C_{PR} และอ่านค่า C_{PR} ที่ได้
8. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-7 ลากเส้นตรงระหว่างค่า P_{s1} ที่ทราบค่ากับ C_{PR} ที่ได้จากข้อ 7 มาตัดที่แกน R_7 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_7 ที่ได้จาก q_0 ที่กำหนดมาตัดที่แกน d_0 และอ่านค่า d_0 ที่ได้
9. คำนวณค่า $P_{s,2} = P_{s,1}/C_{PR}$
10. ได้ผลลัพธ์ของ $P_{s,2}$, d_0 และนำค่า D และ P_{s2} ไปใช้ในท่อนถัดไป

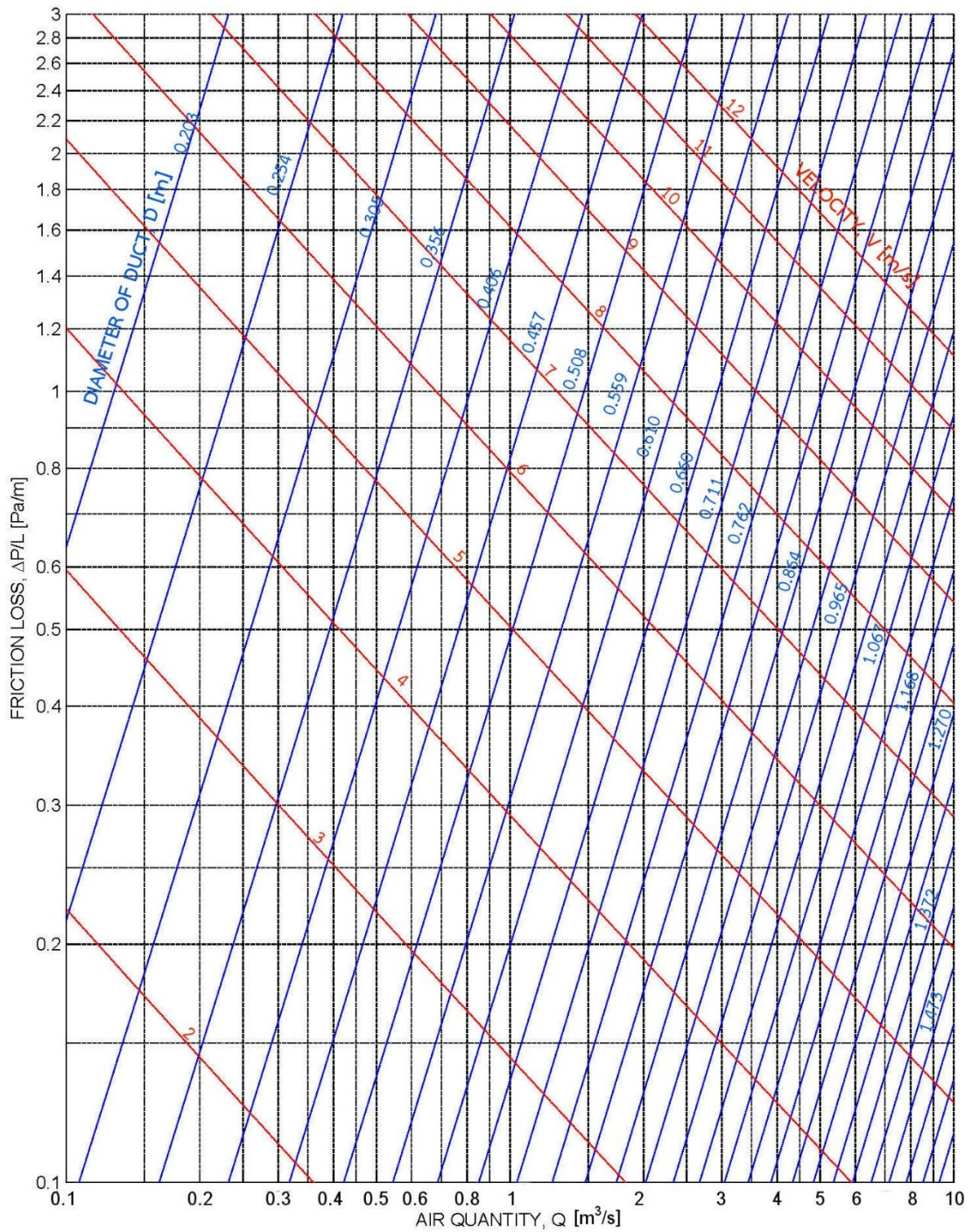
7.3.2.3 ข้อต่อ

1. ทราบค่า Q_1 , Q_2 , Q_3 , จากการออกแบบ, D_1 (คือ D ของท่อนก่อนหน้า) และ P_{s1} จากการใช้โนโมแกรมในท่อนก่อนหน้า
2. สำหรับทิศ $1 \rightarrow 2$ จากโนโมแกรมรูปที่ 7-8 ลากเส้นตรงระหว่างค่า Q_1 กับ Q_2 มาตัดแกน R_8 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_8 ที่ได้จาก D_1 มาตัดที่แกน D_2 โดยเลือกขนาด D_2 ที่ใกล้เคียง

3. สำหรับทิศ $1 \rightarrow 3$ จากโนโมแกรมรูปที่ 7-9 ลากเส้นตรงระหว่างค่า Q_1 กับ Q_3 มาตัดแกน R_9 จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_9 ที่ได้กับ D_1 ที่ทราบมาตัดที่แกน D_3 โดยเลือกขนาด D_3 ที่ใกล้เคียง
4. นำค่า D_i และ $P_{si} = P_{s1}$ ไปใช้ในท่อนถัดไป โดยแสดงทิศทาง 2 และ 3 ของข้อต่อ

7.3.3 การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

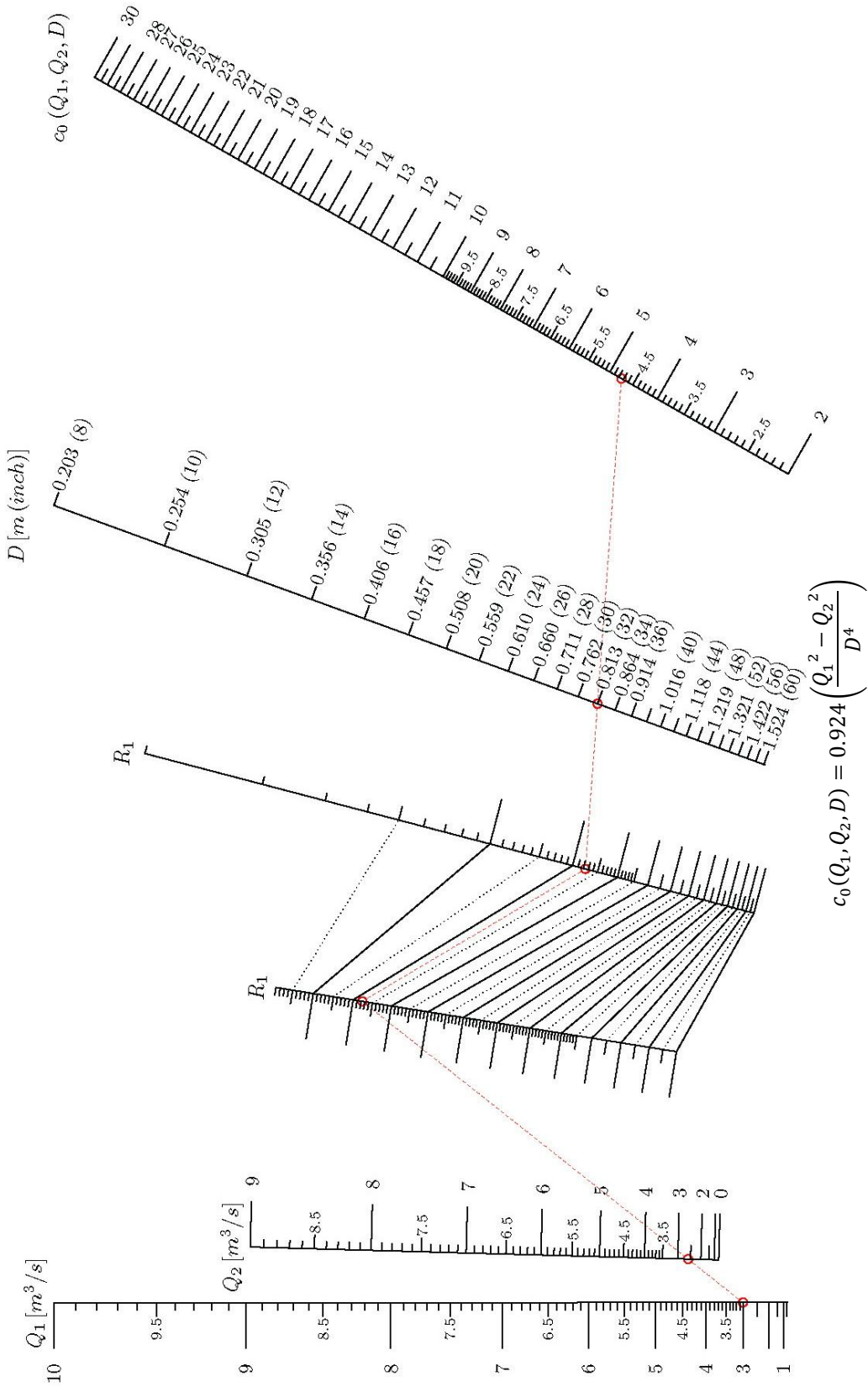
1. ทราบค่า q_0 จากการออกแบบ, T_{50} จากการวางแนวท่อลมผ้าและ d_0 จากการวิเคราะห์ในท่อที่มีช่องเปิด
2. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-10 ลากเส้นตรงระหว่างค่า q_0 กับ d_0 มาตัดที่แกน R_{10} จากนั้นลากเส้นตรงระหว่างค่า R_{10} ที่ได้กับ T_{50} มาตัดที่แกน d โดยเลือกขนาด d ที่ใกล้เคียงและทำให้ได้ระยะส่งลมที่เหมาะสม แล้วนำ d ที่เลือกนี้ลากเส้นตรงกับค่า R_{10} เพื่ออ่านค่า $T_{50,real}$ จริงที่ได้
3. จากโนโมแกรมรูปที่ 7-11 ลากเส้นตรงระหว่างค่า d_0 กับ d มาตัดที่แกน N แล้วอ่านค่า N หรือจำนวนช่องเปิดที่ต้องใช้
4. ได้ผลลัพธ์ของ d , N และ $T_{50,real}$ สำหรับท่อที่มีช่องเปิด



$$\frac{\Delta P_f}{L} = 0.25 \left[\log \left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{\left(\frac{4\rho(Q)}{\pi\mu D} \right)^{0.9}} \right) \right]^{-2} \frac{1}{D} \frac{8\rho(Q)^2}{\pi^2 D^4}$$

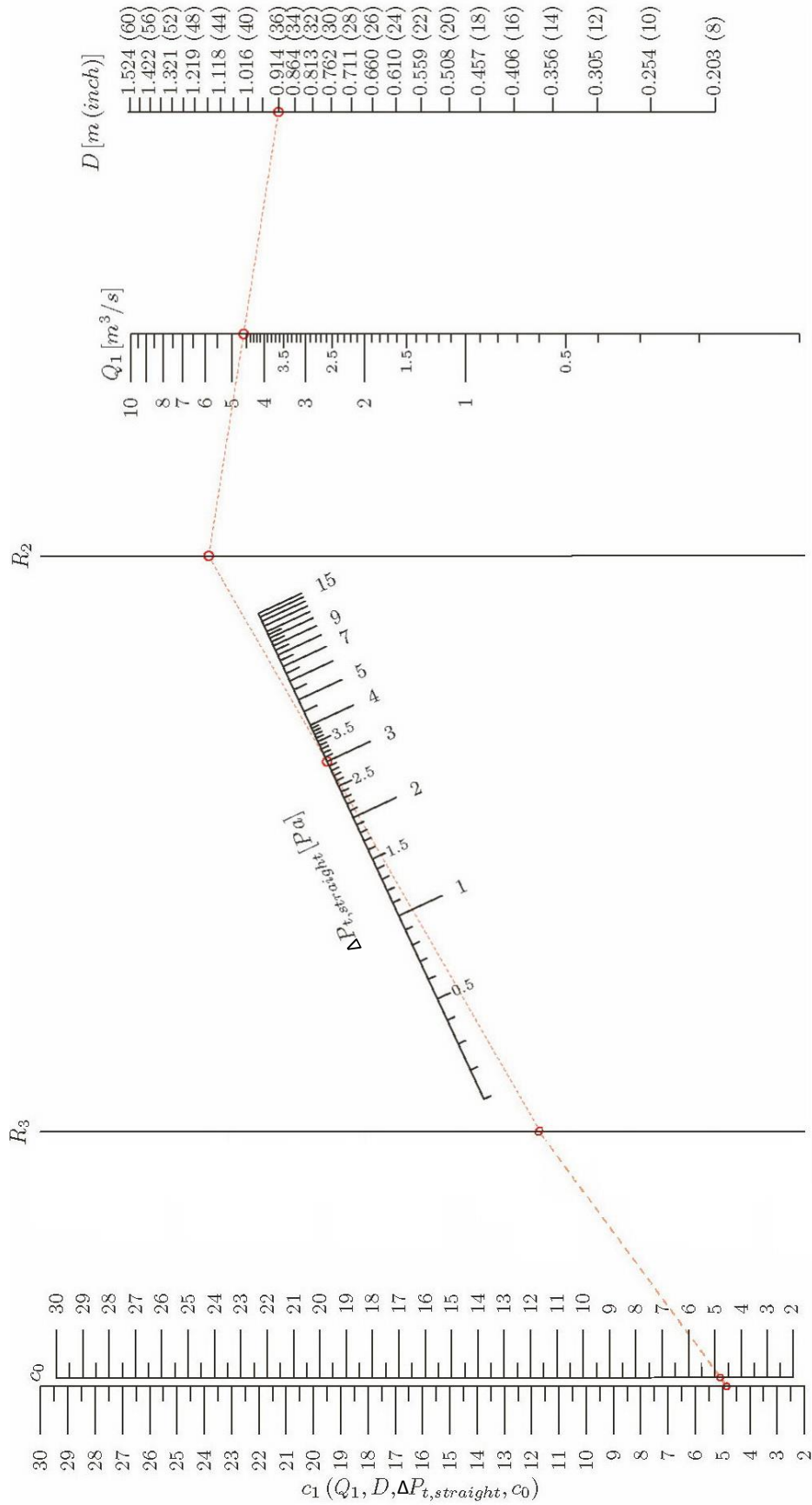
รูปที่ 7-5 โนมแกรมสำหรับการวิเคราะห์ที่ในส่วนท่อตรง

($\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, $e=0.11 \text{ mm}$)



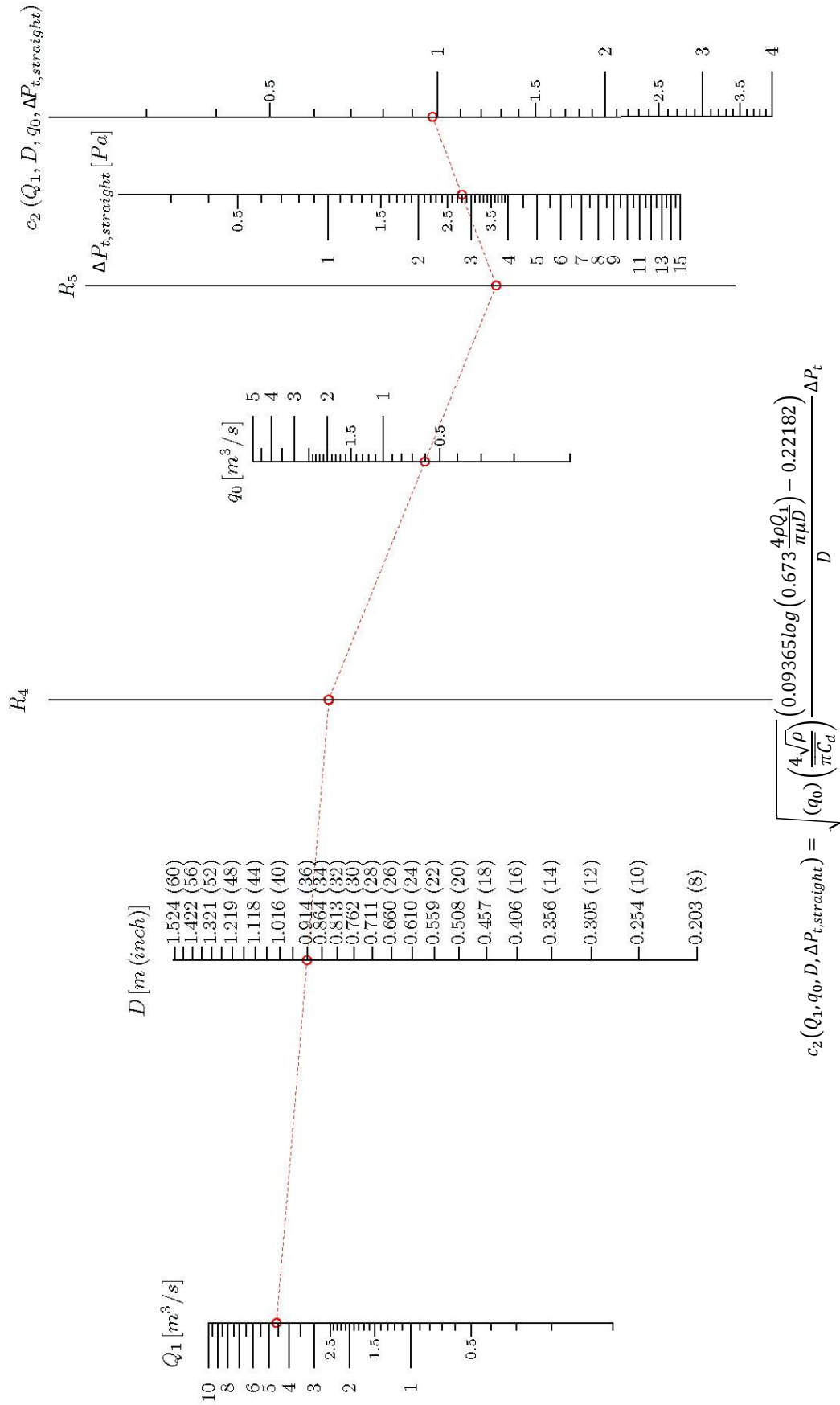
$$c_0(Q_1, Q_2, D) = 0.924 \left(\frac{Q_1^2 - Q_2^2}{D^4} \right)$$

รูปที่ 7-6a โนมแกรมสำหรับหาค่าฟังก์ชัน c_0 เพื่อใช้วิเคราะห์ความต้นสเถียรของท่อที่มีช่องเปิด ($\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, $e/D=0.000433$)

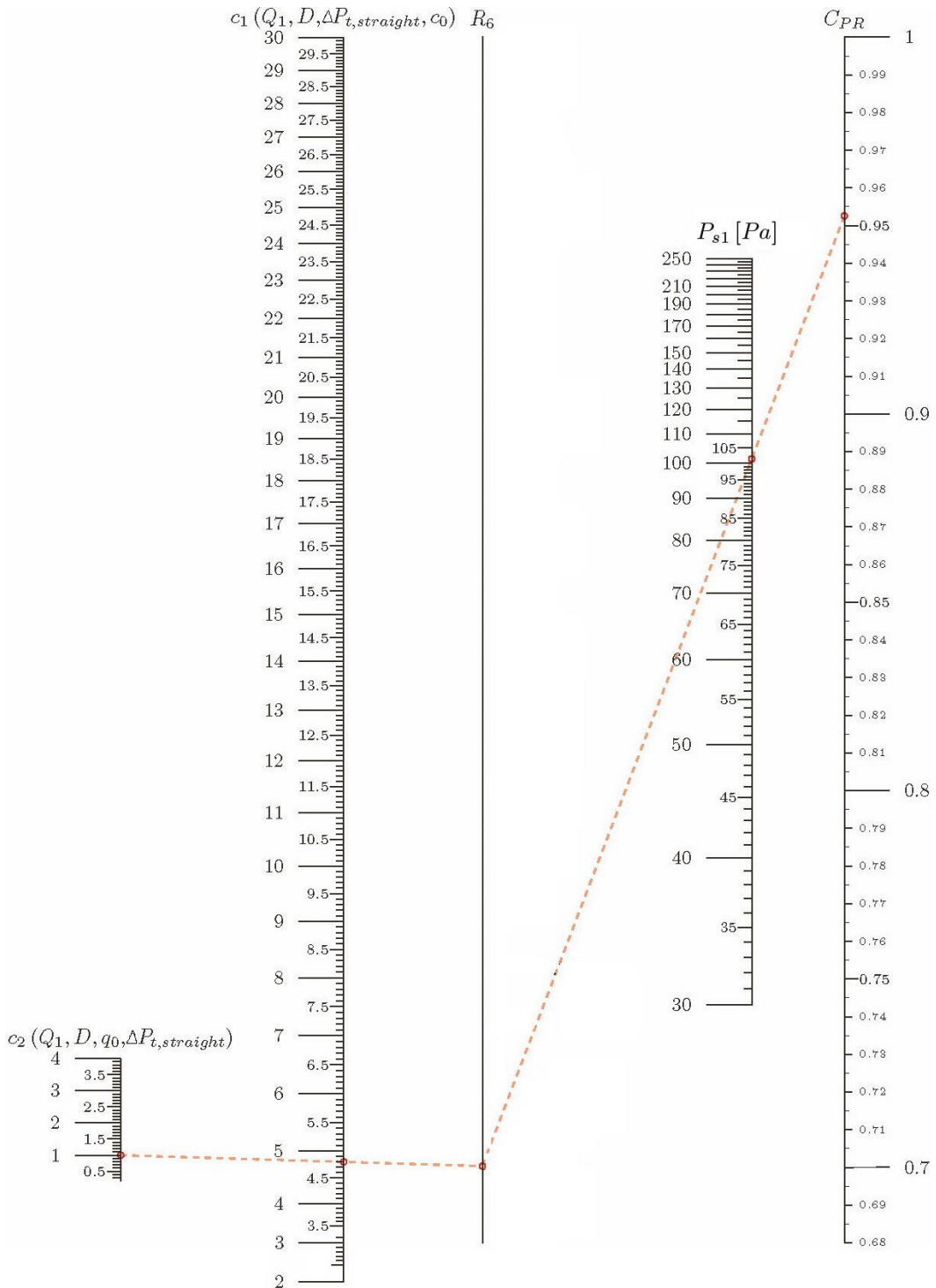


$$c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0) = c_0 + \left(0.52502 \log \left(0.673 \frac{4\rho Q_1}{\pi \mu D} \right) - 2.8287 \right) \Delta P_{t, \text{straight}}$$

รูปที่ 7-6b โนมแกรมสำหรับหาค่าฟังก์ชัน c_1 เพื่อใช้วิเคราะห์ที่ความดันสถิตของท่อที่มีช่องเปิด ($\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, $e/D=0.000433$)



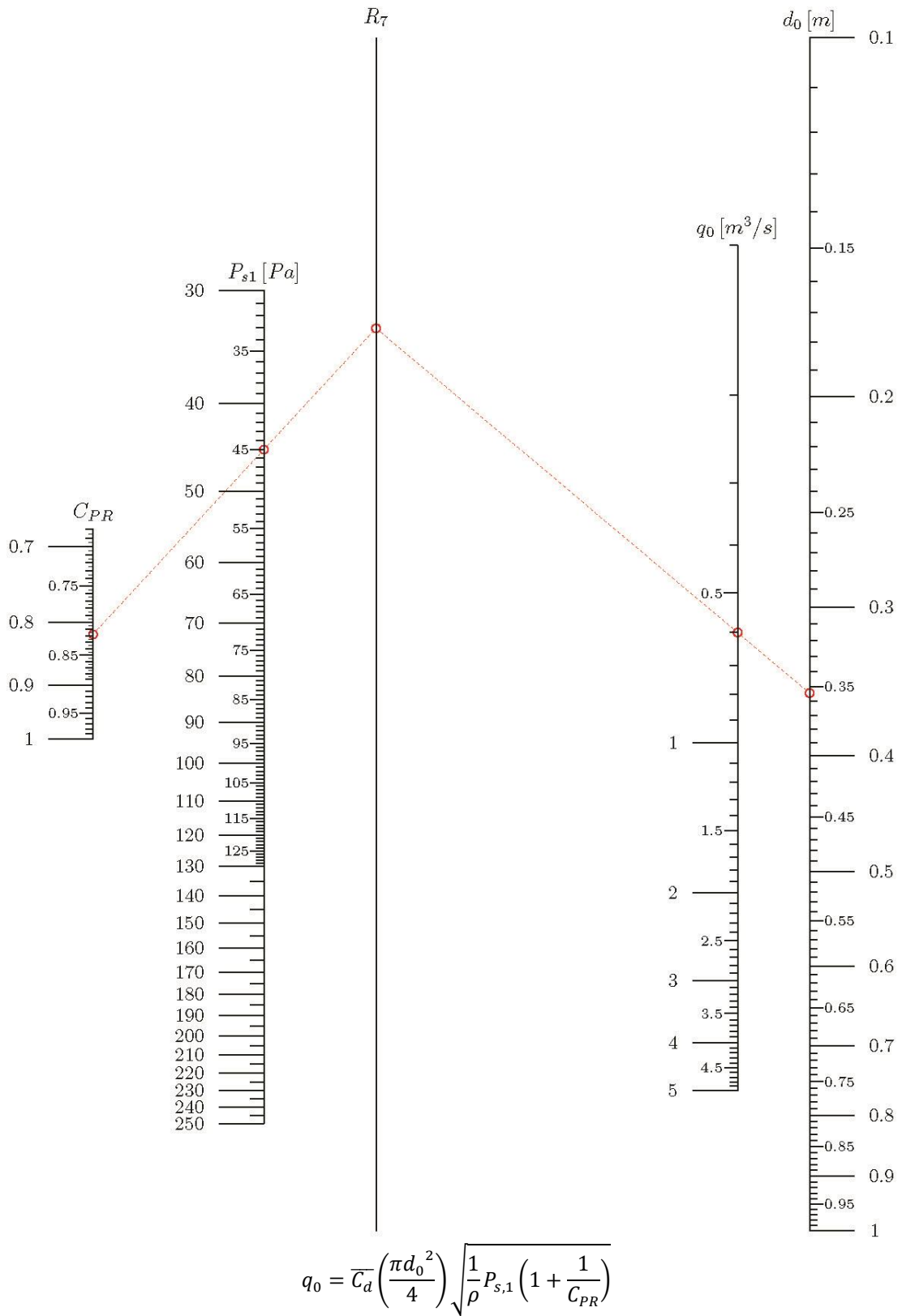
รูปที่ 7-6c โนมแกรมสำหรับหาค่าฟังก์ชัน c_2 เพื่อใช้วิเคราะห์ความดันสถิตของท่อที่มีช่องเปิด ($\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, $e/D=0.000433$)



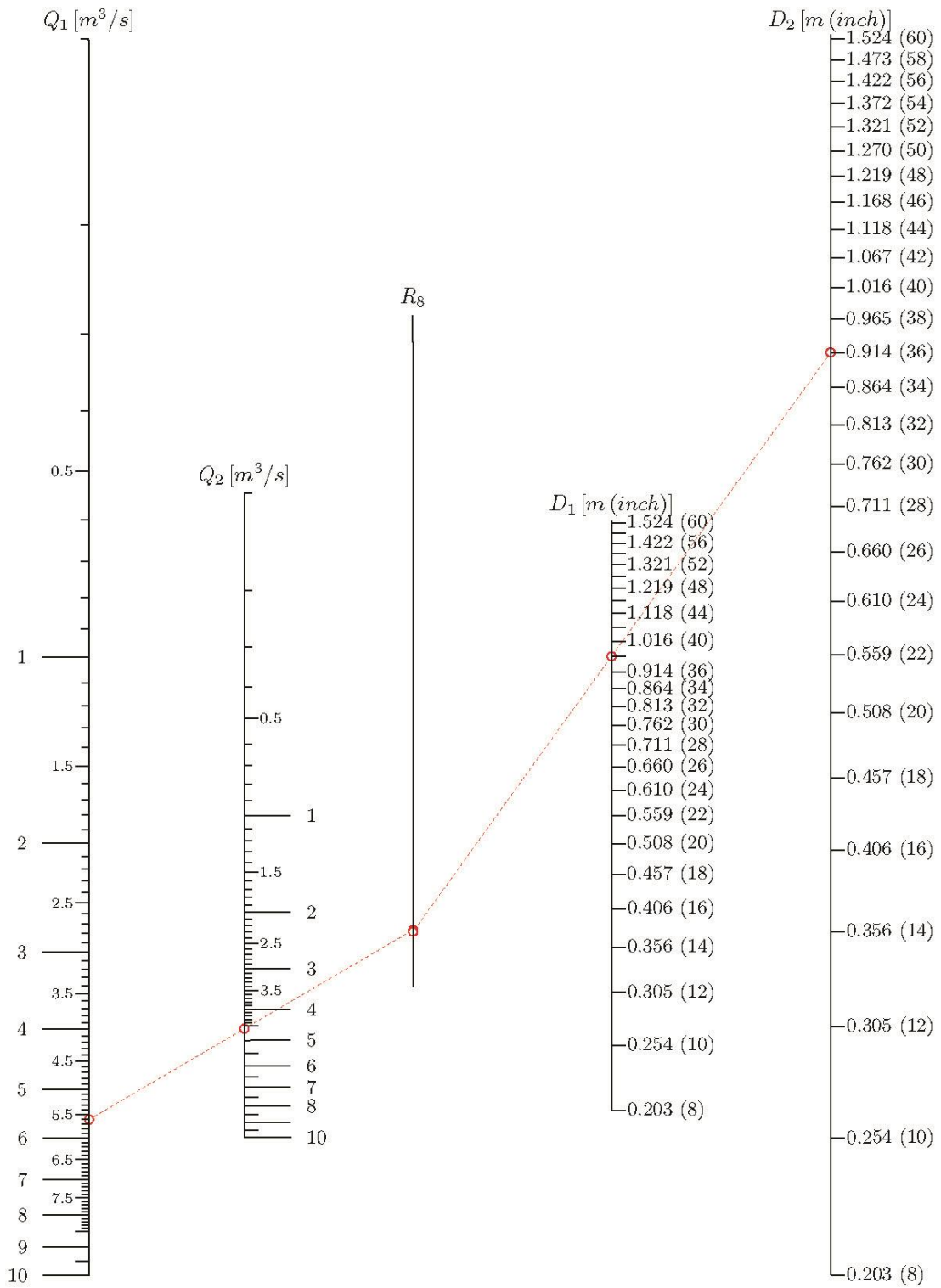
$$P_{s,1} \left(1 - \frac{1}{C_{PR}}\right) + c_1(Q_1, D, \Delta P_{t, straight}, c_0) = c_2(Q_1, q_0, D, \Delta P_{t, straight}) \left(P_{s,1} \left(1 + \frac{1}{C_{PR}}\right)\right)^{-1/4}$$

รูปที่ 7-6d โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ความดันสถิตของท่อที่มีช่องเปิด

($\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.86 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$, $e/D=0.000433$)

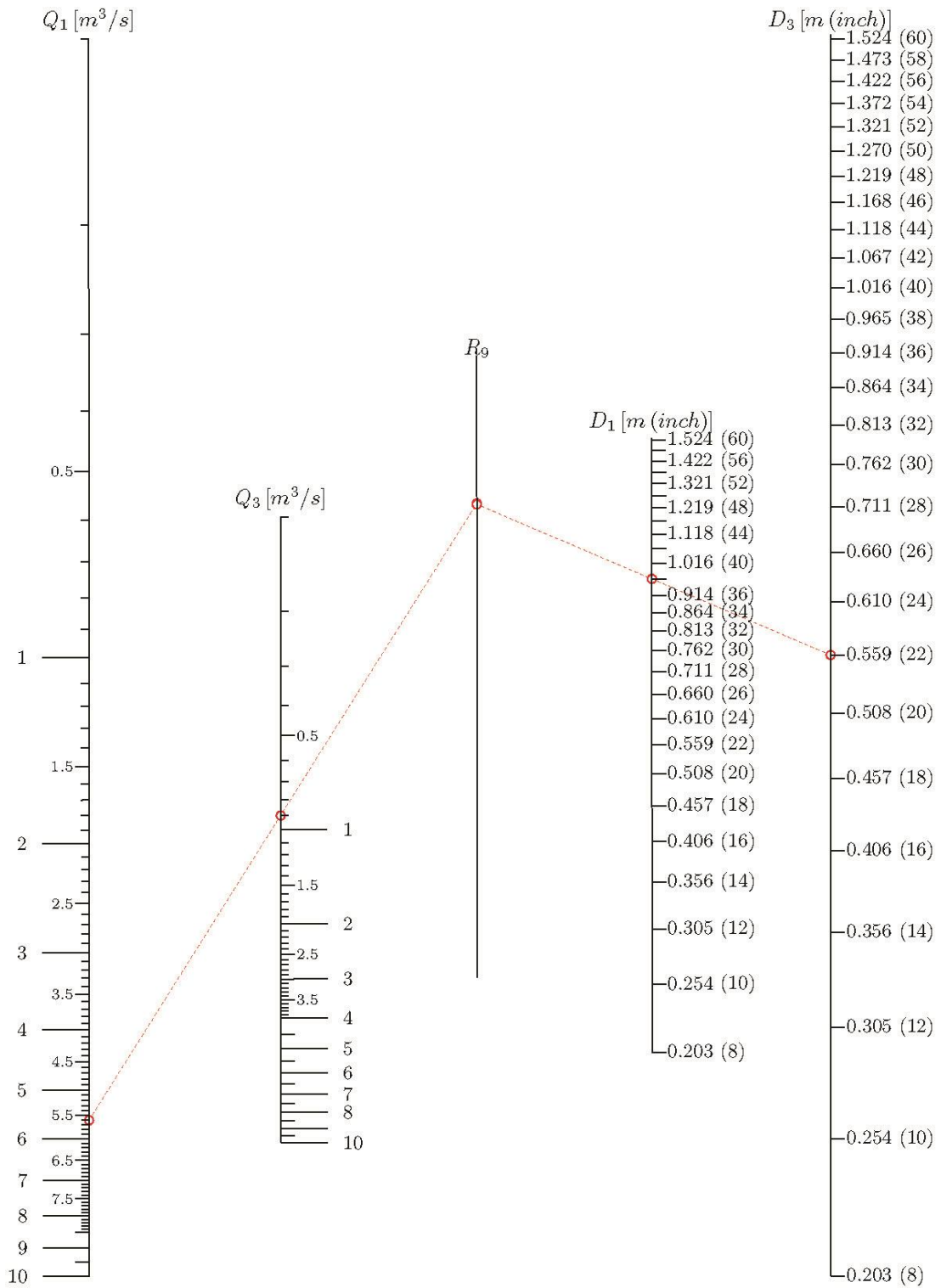


รูปที่ 7-7 โนมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม
ของท่อที่มีช่องเปิด ($\rho=1.14 \text{ kg/m}^3$, $C_d=0.65$)



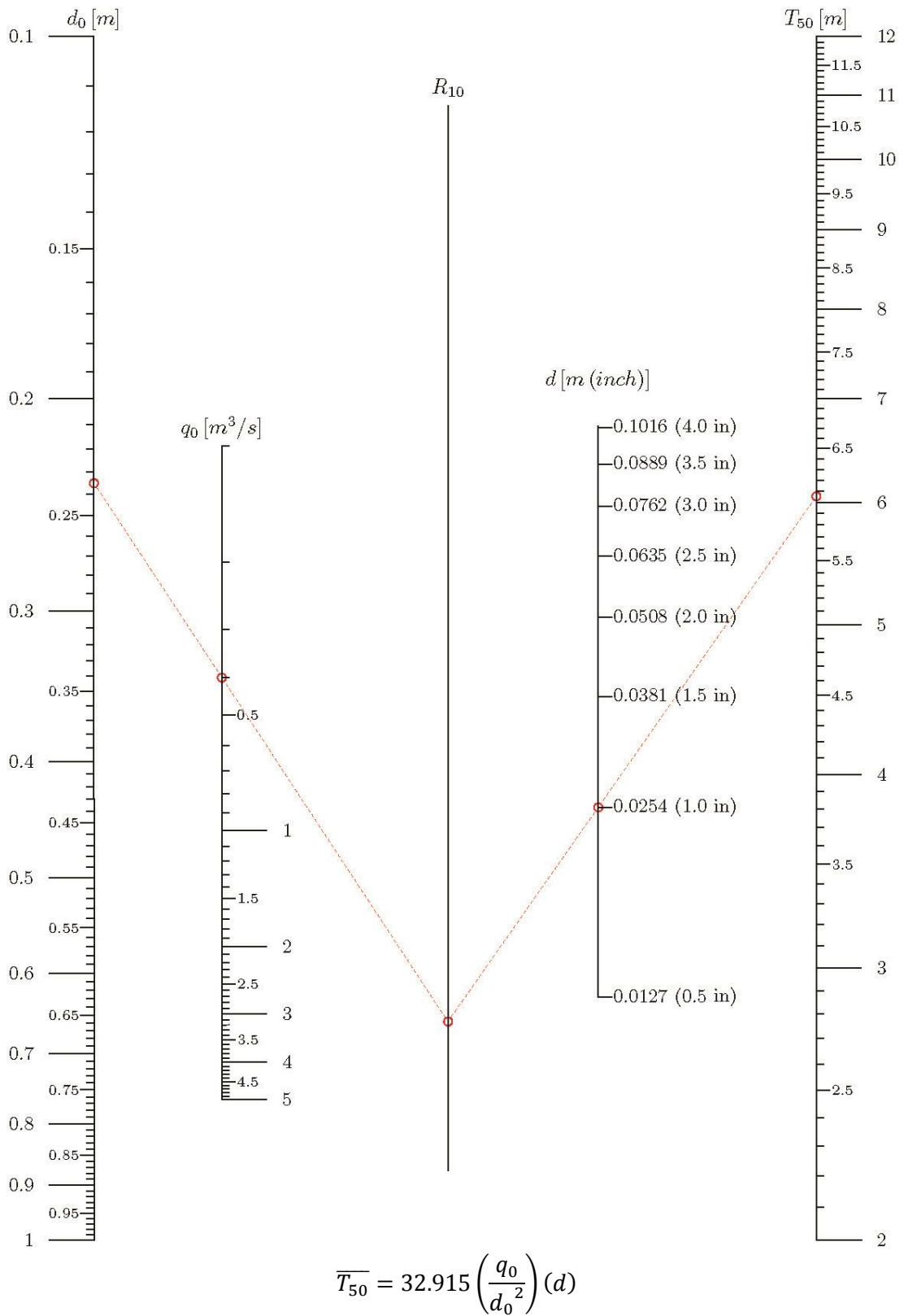
$$D_2 = \left(-0.4812 \left(\frac{Q_2}{Q_1} \right)^2 + 1.2691 \frac{Q_2}{Q_1} + 0.2177 \right) D_1$$

รูปที่ 7-8 โนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศทางการไหล 1→2
(เงื่อนไขความดันสถิตได้ค้ำสมบูรณ์ $P_{s1}=P_{s2}$)



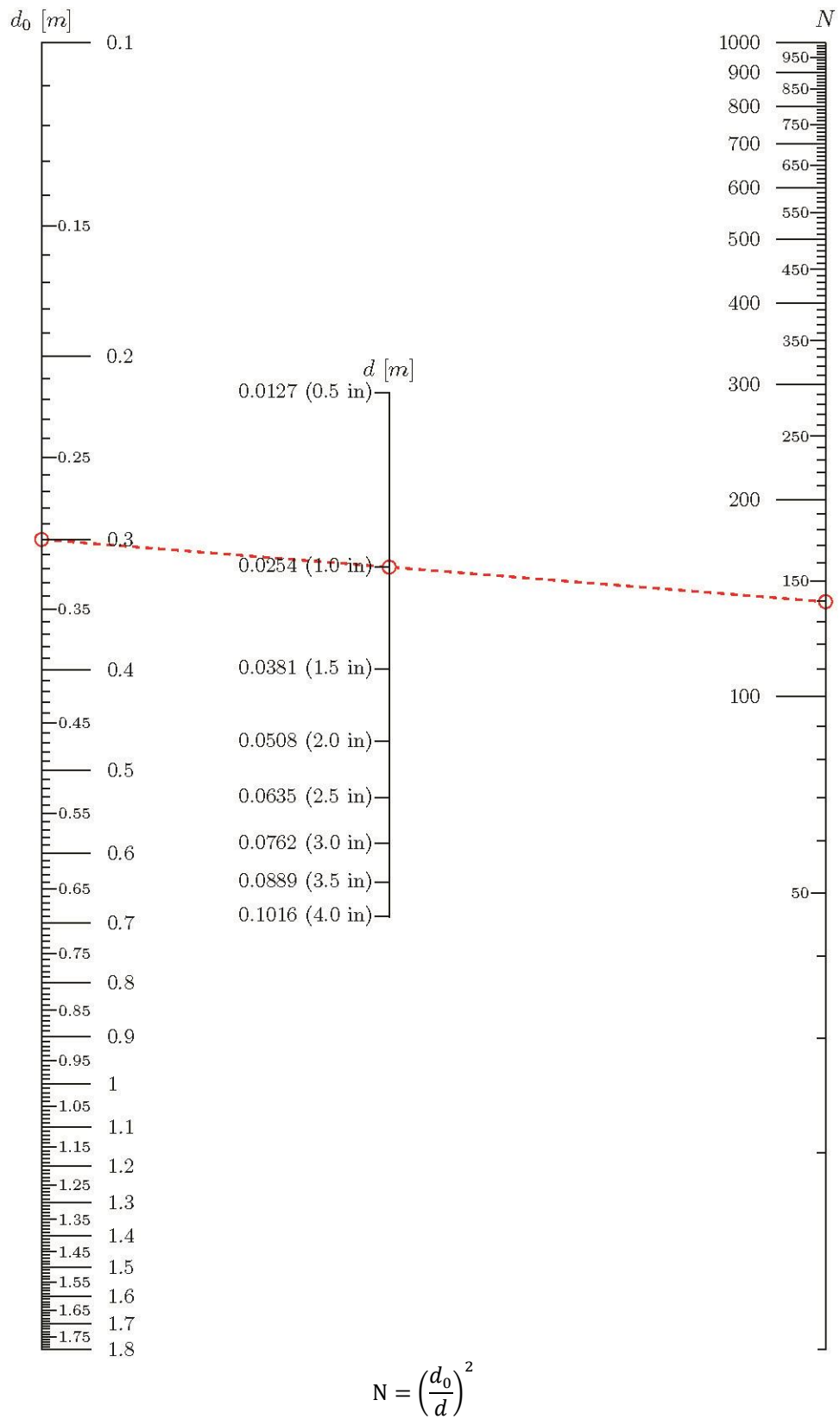
$$D_3 = \left(-1.0872 \left(\frac{Q_3}{Q_1}\right)^2 + 1.9889 \frac{Q_3}{Q_1} + 0.2639\right) D_1$$

รูปที่ 7-9 โนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศทางการไหล 1→3
(เงื่อนไขความดันสถิตได้ค้ำสมบูรณ์ $P_{s1}=P_{s3}$)



$$\overline{T}_{50} = 32.915 \left(\frac{q_0}{d_0^2} \right) (d)$$

รูปที่ 7-10 โนโมแกรมสำหรับการกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย
(ความเร็วปลายทาง 0.254 m/s [50 FPM])



รูปที่ 7-11 โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์จำนวนช่องเปิดย่อยทั้งหมด

บทที่ 8

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

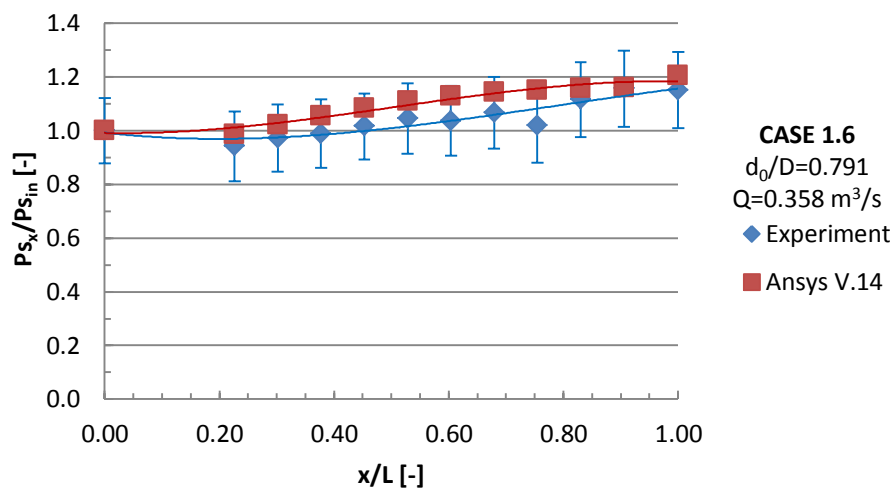
8.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ มีจุดประสงค์หลักเพื่อพัฒนาวิธีการออกแบบระบบท่อลมฟ้า ซึ่งจะต้องเข้าใจถึงพฤติกรรมตัวแปรต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลผ่านท่อลมฟ้า จากนั้นจึงนำพฤติกรรมเหล่านี้ไปพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อวิเคราะห์หาวิธีในการได้คำตอบ จากนั้นนำมาสร้างเป็นวิธีการออกแบบระบบท่อลมฟ้าขึ้นมาโดยพัฒนาเครื่องมือที่เรียกว่าโนโมแกรม ซึ่งช่วยให้การออกแบบกระทำได้รวดเร็วและสะดวกขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้การวิจัยสามารถสรุปได้เป็น 3 หัวข้อดังนี้

8.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการไหลผ่านท่อลมฟ้า

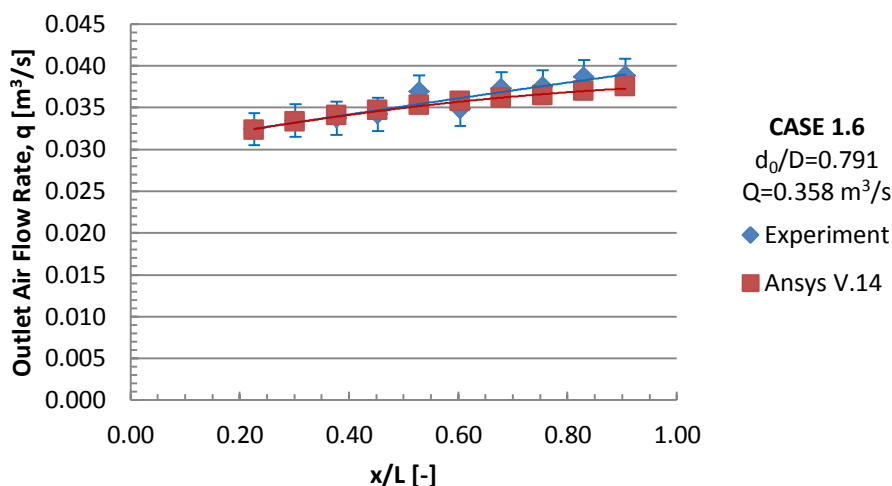
8.1.1.1 ความดันสถิต (P_s) และอัตราการไหลผ่านช่องเปิด (q_o)

เป็นปัจจัยหลักสำคัญที่สุดของการไหลผ่านท่อลมฟ้า เนื่องจากผลลัพธ์จากการทดลองและจากการจำลองการไหล แสดงให้เห็นพฤติกรรมของความดันสถิตที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากตำแหน่งขาเข้าท่อลมฟ้า ทั้งนี้ ความดันสถิต, P_s จะมีค่ามากที่สุดที่ตำแหน่งใกล้ปลายท่อ ดังตัวอย่างท่อลมฟ้า กรณีที่ 1.6 รูปที่ 8-1



รูปที่ 8-1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมฟ้า กรณีที่ 1.6

พฤติกรรมของความดันสถิตดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่ออัตราการไหลผ่านช่องเปิด (q_0) ทำให้ค่าอัตราการไหลผ่านช่องเปิดมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นสอดคล้องกันด้วย ดังตัวอย่างรูปที่ 8-2 นอกจากนี้ความดันสถิตในตอนเริ่มต้นยังส่งผลกระทบต่อความคงรูปของวัสดุผ้า เนื่องจากท่อลมผ้าจะสามารถคงรูปได้ก็ต่อเมื่อมีค่าความดันสถิตขั้นต่ำค่าหนึ่ง (Inlet Static Pressure) ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำท่อลมผ้า

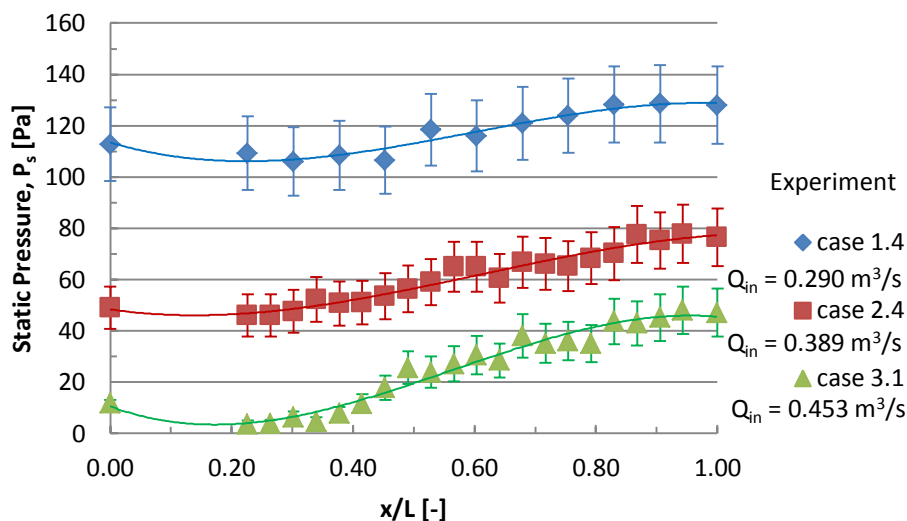


รูปที่ 8-2 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.6

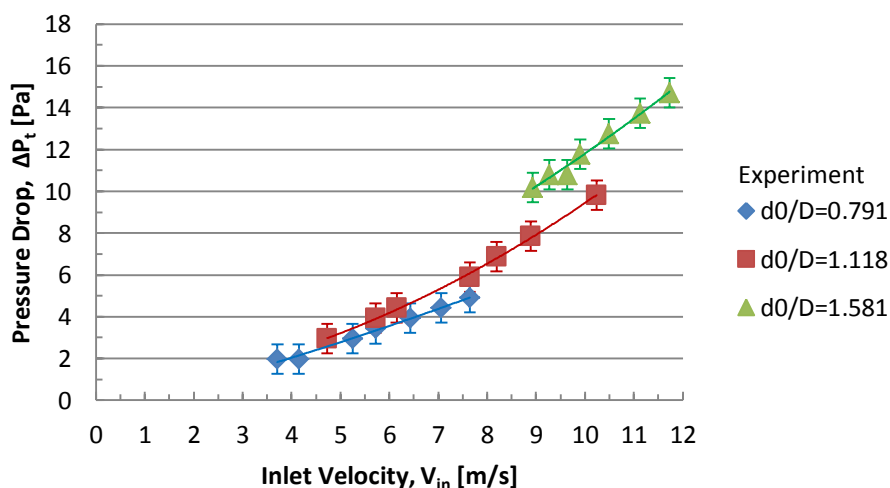
8.1.1.2 อัตราส่วนเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวมต่อขนาดท่อ (d_0/D)

เป็นลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของท่อลมผ้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อค่าขนาดของความดันสถิตที่เกิดขึ้น โดยค่า d_0/D ที่ต่างกันในท่อลมผ้าจะให้ค่าความดันสถิตที่ได้ต่างกัน ทั้งนี้ ค่า d_0/D ต่ำจะให้ค่าความดันสถิตที่สูงกว่าดังตัวอย่างรูปที่ 8-3 ของท่อลมผ้ากรณีที่ 1.4, 2.4 และ 3.1 ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณมวลอากาศที่ออกไปน้อยกว่า ทำให้ในระบบยังคงมีพลังงานในรูปความดันที่สูง

นอกจากนี้ค่า d_0/D ที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้ความดันรวมลดมีค่าสูงขึ้น ดังรูปที่ 8-4 ทั้งนี้เป็นผลมาจากการมีพื้นที่ช่องเปิดที่เพิ่มขึ้นเปรียบเสมือนกับมีจำนวนช่องเปิดย่อยที่มากตาม ทำให้เกิดความปั่นป่วนของการไหล ส่งผลให้ความสูญเสียอันเนื่องจากการไหลผ่านช่องเปิดแต่ละช่องมากกว่าท่อลมผ้าที่มีพื้นที่ช่องเปิดน้อย



รูปที่ 8-3 ความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลอง ด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิรตซ์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3



รูปที่ 8-4 ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมของการทดลองในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3

8.1.2 การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ท่อลมผ้ามีความซับซ้อนกว่าท่อตรงปกติ ทำให้สมการที่มีอยู่เดิมไม่สามารถนำไปทำนายหรือคำนวณการไหลผ่านท่อลมผ้าโดยตรงได้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาสมการสำหรับท่อลมผ้าโดยใช้พื้นฐานจากสมการท่อตรงปกติ แล้วประยุกต์ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าจากผลการทดลองรวมทั้งผลของการมีช่องเปิดย่อยจำนวนมากตามแนวท่อลมรวมเข้าไปด้วยกัน ทำให้ในการจำลองระบบท่อลมผ้าจะประกอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3 รูปแบบคือ ท่อตรง (Straight Duct), ท่อที่มีช่องเปิด (Perforated Duct) และข้อต่อ (Fitting)

การวิเคราะห์แบบจำลองจะอยู่บนหลักการเพิ่มขึ้นของความดันสถิต (Static Pressure Regain) ที่เกิดจากพฤติกรรมของการไหลผ่านท่อลมผ้า โดยคำนึงถึงข้อจำกัดด้านความดันสถิตในตอนเริ่มต้นที่มีผลต่อความคงรูปของวัสดุผ้า ข้อจำกัดด้านเสียงต่อผู้อยู่อาศัยอันเกิดจากความเร็วการไหลในท่อและความสม่ำเสมอของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดที่ระบบต้องการเพื่อให้การกระจายตัวของอุณหภูมิภายในห้องมีความสม่ำเสมอและเพียงพอต่อความต้องการต่อการปรับอากาศของพื้นที่นั้น

8.1.3 วิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้า

วิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้าจะนำแบบจำลองทั้งสามดังกล่าวข้างต้นมาประกอบกัน เพื่อสร้างเป็นแนวท่อลมตามที่คุณออกแบบต้องการ แล้ววิเคราะห์ไปที่ละแนวจนครบระบบท่อลมทั้งหมด ซึ่งแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ

1. ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า : เป็นลักษณะของท่อตรงต่อกับท่อที่มีช่องเปิด ซึ่งสำคัญมากที่สุดในระบบท่อลมผ้า เนื่องจากการออกแบบส่วนนี้จะส่งผลต่อความดันของพัดลมที่ต้องใช้ ผลลัพธ์ปลายท่อจากส่วนนี้จะไปเป็นปัจจัยทางเข้าของท่อลมที่อนถัดไปและส่งผลสืบเนื่องกันทั้งระบบท่อลมผ้า
2. ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : เป็นส่วนที่ต่อจากส่วนขาเข้าหรือท่อนก่อนหน้า โดยใช้ผลลัพธ์ขาออกของส่วนก่อนหน้ามาเป็นเงื่อนไขขาเข้า ทั้งนี้การวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับลักษณะท่อท่อนนั้นว่าเป็นท่อตรง ท่อตรงที่มีช่องเปิดหรือข้อต่อ

การวิเคราะห์แต่ละท่อนสามารถคำนวณได้จากชุดสมการของแบบจำลองนั้น หรือเขียนชุดคำสั่งคอมพิวเตอร์ขึ้นมาช่วยคำนวณ แต่เนื่องจากความซับซ้อนในการหาคำตอบ ประกอบกับการเขียนชุดคำสั่งคอมพิวเตอร์นั้น ถ้าจะให้สามารถหาขนาดท่อลมได้ตามรูปแบบการวางแนวท่อลมซึ่งประกอบไปด้วยท่อลมหลายแนว จะต้องเขียนชุดคำสั่งเพื่อสร้างลำดับขั้นในการหาคำตอบซึ่งจะยุ่งยากหรือต้องเขียนในลักษณะกราฟิก อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ต้องการสร้างเครื่องมือที่ง่ายและสะดวกเพื่อใช้ในการออกแบบ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้สร้างโปรแกรมสำหรับออกแบบระบบท่อลมผ้าขึ้นมาบนพื้นฐานแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อเป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ออกแบบท่อลมผ้า

ผลลัพธ์ของการออกแบบระบบท่อลมผ้า จะนำมาซึ่งขนาดท่อลมท่อนต่างๆ, ขนาดช่องเปิดย่อย, จำนวนช่องเปิดย่อย, ขนาดข้อต่อและความดันสถิตที่พัดลมต้องใช้ เพื่อนำไปสร้างเป็นระบบท่อลมผ้าในทางปฏิบัติ ทั้งหมดนี้อยู่บนเงื่อนไขของความคงรูปของท่อลม, ความดังของเสียงและระยะส่งลมที่เหมาะสม

8.2 ข้อเสนอแนะ

1. ทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่หลากหลายมากขึ้นในการปรับแต่งสมการความเสียหายที่ใช้สำหรับทอลมผ้าให้มีความถูกต้อง แม่นยำมากขึ้น
2. ทำการศึกษาทอลมผ้าที่ใช้วัสดุไม่คงรูปอื่นๆ เช่น พลาสติก หรือผ้าชนิดต่างๆ ตลอดจนผ้าที่มีความหนาต่างๆกัน เป็นต้น
3. ศึกษาเพิ่มเติมถึงลักษณะของช่องเปิดนอกเหนือจากลักษณะที่เป็นรูปกลมเพื่อดูผลกระทบที่มีต่อการกระจายตัวของอัตราการไหล หรือการหาขนาดทอลมผ้าที่มีความเหมาะสม (Optimization) ในระบบทอลมผ้าเมื่อคำนึงถึงต้นทุนวัสดุและต้นทุนการติดตั้ง โดยประยุกต์ร่วมกับวิธี T-Method ซึ่งจะช่วยพัฒนาวิธีการออกแบบทอลมผ้าให้มีความเหมาะสม
4. ศึกษาวิธีการออกแบบทอลมผ้าโดยใช้วิธีออกแบบทอลมพื้นฐานวิธีอื่น เช่น วิธีความเสียหายที่เท่ากัน ซึ่งต้องอาศัยงานปรับลมนิในการทำสมดุลลมในระบบ
5. เพิ่มเติมตัวเลือกสำหรับชนิดของข้อต่อที่ใช้ เพื่อให้การวางแนวทอลมผ้ากระทำได้หลากหลายยิ่งขึ้น
6. ทำการทดลองกับระบบทอลมผ้าจริง เพื่อให้เห็นผลลัพธ์เพิ่มเติม ซึ่งจะช่วยพัฒนาแบบจำลองให้สอดคล้องกับการใช้งานจริงมากยิ่งขึ้น แต่เนื่องจากวัสดุที่ใช้ทำระบบทอลมผ้ายังไม่สามารถผลิตได้ในประเทศ ทำให้การสร้างระบบทอลมผ้าจริง จะต้องใช้งบประมาณรวมทั้งสถานที่ ซึ่งเป็นข้อจำกัดของการศึกษาวิจัย

รายการอ้างอิง

1. Tas, I. and R.A.A. Bryant, *An Investigation of Flow Distributions in Perforated Pipes*. 9th Australasian fluid mechanics conference, 1986.
2. El Moueddeb, K., S. Barrington, and N. Barthakur, *Perforated Ventilation Ducts: Part 1, A Model for Air Flow Distribution*. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997. **68**(1): p. 21-27.
3. El Moueddeb, K., S. Barrington, and N. Barthakur, *Perforated Ventilation Ducts: Part 2, Validation of an Air Distribution Model*. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997. **68**(1): p. 29-37.
4. Chen, F., et al., *Parametrical analysis on characteristics of airflow generated by fabric air dispersion system in penetration mode*. Energy and Buildings, 2013. **67**(0): p. 365-373.
5. Chen, F., et al., *Air distribution in room ventilated by fabric air dispersion system*. Building and Environment, 2011. **46**(11): p. 2121-2129.
6. Chen, F., et al., *Characterizing airflow through fabric air dispersion system using a porous media model*. Energy and Buildings, 2011. **43**(2-3): p. 665-670.
7. Pospíšil, I.M., *Ducts for uniform air distribution – textile diffusers*.
8. Kinsman, R.G., *Outlet Discharge Coefficients of Ventilation Ducts*. 1990: McGill University.
9. Lee, S., N. Moon, and J. Lee, *A study on the exit flow characteristics determined by the orifice configuration of multi-perforated tubes*. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012. **26**(9): p. 2751-2758.
10. Ashrae, *2013 Ashrae Handbook: Fundamentals (Ip & Si)*. 2013: Amer Society of Heating.
11. ไชยะภินันท์, ส., กลศาสตร์ของไหล. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ,2552.
12. ไชยะภินันท์, ส., การออกแบบงานวิศวกรรมเชิงพลังงาน ความร้อน และของไหล. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2554.
13. Miller, D.S., *Internal Flow Systems*. 1990: BHRA (Information Services).

14. Djunaedy, E. and K.W.D. Cheong, *Development of a simplified technique of modelling four-way ceiling air supply diffuser*. Building and Environment, 2002. **37**(4): p. 393-403.
15. Kharagpur, I., *Refrigeration and Air Conditioning*. 2008.
16. Mayes, C., et al., *Boundary-Layer Theory*. 2003: Springer Berlin Heidelberg.
17. Wang, S., *Handbook of Air Conditioning and Refrigeration*. 2000: McGraw-Hill Education.
18. Bridgman, P.W., *Dimensional Analysis*. 1922: Yale University Press.
19. Dewolf, J., *Mechanics Of Materials (In Si Units)*. 2004: McGraw-Hill Education (India) Pvt Limited.
20. Window, A.L., *Strain Gauge Technology*. 1992: Springer Netherlands.
21. Seangatith, A.P.D.S., *MECHANICS OF MATERIALS*. SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING, INSTITUTE OF ENGINEERING, SURANAREE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
22. Stearns, R.F., *Flow measurement with orifice meters*. 1951: Van Nostrand.
23. Ramgopal, P.M. *Refrigeration and Air Conditioning*. Available from: http://nptel.iitg.ernet.in/Mech_Engg/IIT%20Kharagpur/Refrigeration%20and%20Air%20Conditioning.htm.
24. MacKinnon, I.R., *Air distribution from ventilation ducts, in Agricultural Engineering*. 1990, Macdonald College of McGill University.
25. Hicks, T.G. and S.D. Hicks, *Standard handbook of engineering calculations*. 2005: McGraw-Hill.
26. Gladyszewska-Fiedoruk, K., et al., *Measurement of velocity distribution for air flow through perforated plastic foil ducts*. Energy and Buildings, 2011. **43**(2-3): p. 374-378.
27. Carpenter, G.A., *The design of permeable ducts and their application to the ventilation of livestock buildings*. Journal of Agricultural Engineering Research, 1972. **17**(3): p. 219-230.

28. หล้าอมรชัยกุล, ว., *Application of K-epsilon(k- ϵ) and K-omega(k- ω) Turbulence Model for Rotation Analysis of Vertical Axis Water Turbine Generator* การประชุมวิชาการด้านการวิจัยดำเนินงานแห่งชาติประจำปี 2554, 2011.
29. DUCTSOX, *DUCTSOX Engineering and Design Manual*. 2014.
30. Doerfler, R. *The Art of Nomography*. 2008; Available from: www.myreckonings.com/wordpress.
31. Doerfler, R. *Creating Nomograms with the Pynomo Software*. 2009; Available from: <http://pynomo.org/>.
32. Gy, P., *Sampling Nomogram*. 1960: Service Technique.
33. Levens, A.S., *Nomography*. 1959: Wiley.
34. Doerfler, R. *The Lost Art of Nomography*. TheUMAPJournal 2009 [cited 30; 457-493].





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

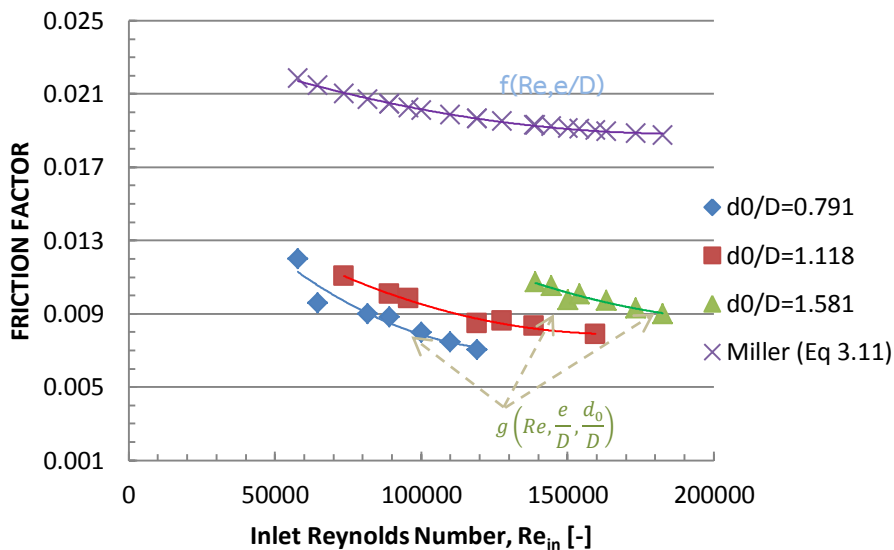
ภาคผนวก ก

ฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้า

ในการหาฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับการไหลผ่านท่อลมผ้า $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ ที่นำไปใช้กับการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะศึกษาจากผลการทดลองของการไหลผ่านท่อลมผ้ากับฟังก์ชันความเสียดทานท่อลมปกติของ Miller^[13] (สมการ 3.11) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ก.1 วิเคราะห์ความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความเสียดทาน $f\left(Re, \frac{e}{D}\right)$ และ $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$

นำค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการหาฟังก์ชัน $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ จากผลลัพธ์การทดลองตาราง ข-1 มาแสดงได้ดังตาราง ก-1 และแสดงกราฟของฟังก์ชันความเสียดทานต่อตัวเลขเรย์โนลด์เข้าท่อลมผ้า ในกรณีของการทดลองที่ $d_0/D = 0.791, 1.118, 1.581$ และกรณีของท่อลมปกติด้วยฟังก์ชันความเสียดทานของ Miller เมื่อค่า e/D คงที่ ดังรูปที่ ก-1



รูปที่ ก-1 กราฟแสดงฟังก์ชันความเสียดทานต่อตัวเลขเรย์โนลด์เข้าท่อลม

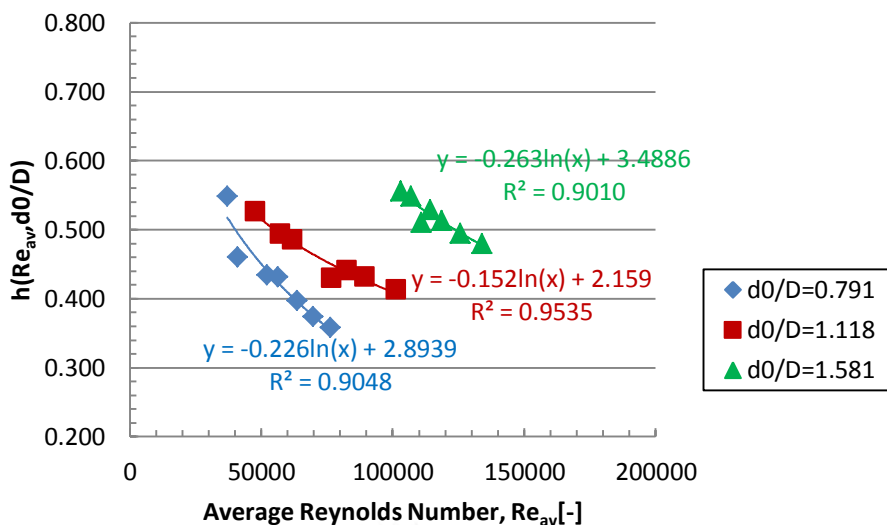
แนวโน้มที่เกิดขึ้นเมื่อเปรียบเทียบค่าฟังก์ชันความเสียดทานของ Miller กับผลการทดลองที่ d_0/D ใดๆ นั้น จะมีลักษณะของฟังก์ชันพหุนามดีกรีสองในลักษณะเดียวกัน แต่มีความแตกต่างกันของขนาด ซึ่งจากการทำการวิเคราะห์หาค่า การเปลี่ยนแปลงขนาดดังกล่าวเป็นผลมาจากตัวเลขเรย์โนลด์ของการไหลที่เปลี่ยนแปลงไปในท่อลมที่มีการเจาะช่องเปิด และ d_0/D ที่ทำให้ความขรุขระของผิวท่อเปลี่ยนแปลง โดยในงานวิจัยนี้ได้แสดงความแตกต่างนี้ในค่าอัตราส่วนของฟังก์ชันความเสียดทาน

$g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ ต่อ $f\left(Re, \frac{e}{D}\right)$ ของ Miller ว่าเป็นฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ โดย Re_{av} คือค่าตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยของการไหลในท่อที่มีการเจาะช่องเปิด การหาสมการของฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ จะนำไปสู่ผลลัพธ์ของฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้า

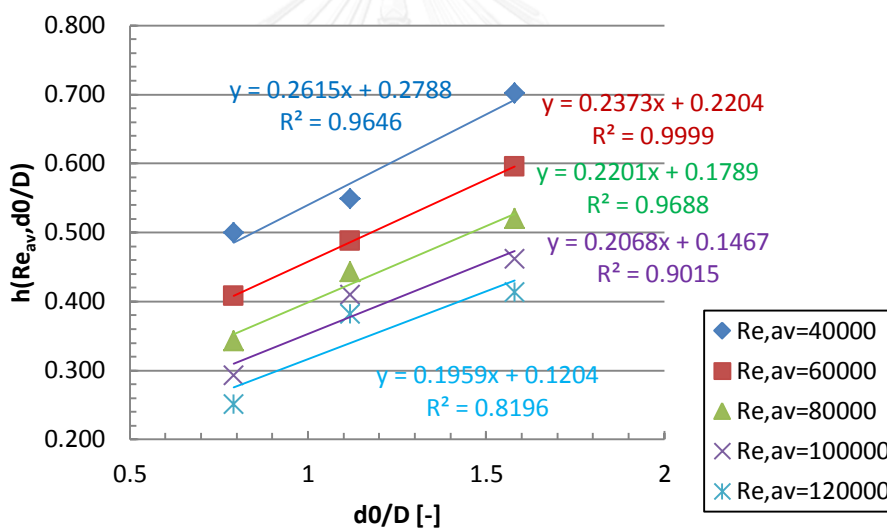
ตารางที่ ก-1 แสดงค่าฟังก์ชันความเสียดทานของการทดลอง

| CASE | Re | Re_{av} | d_0/D | $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ | $f\left(Re, \frac{e}{D}\right)$ | $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ |
|------|--------|-----------|---------|--|---------------------------------|--|
| | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] | [-] |
| 1.1 | 57756 | 37061 | 0.791 | 0.0120 | 0.0219 | 0.5483 |
| 1.2 | 64573 | 40969 | 0.791 | 0.0096 | 0.0215 | 0.4467 |
| 1.3 | 81701 | 52304 | 0.791 | 0.0090 | 0.0207 | 0.4339 |
| 1.4 | 89007 | 56437 | 0.791 | 0.0088 | 0.0204 | 0.4315 |
| 1.5 | 100036 | 63709 | 0.791 | 0.0080 | 0.0201 | 0.3970 |
| 1.6 | 109963 | 69750 | 0.791 | 0.0074 | 0.0199 | 0.3743 |
| 1.7 | 119066 | 76162 | 0.791 | 0.0070 | 0.0197 | 0.3583 |
| 2.1 | 73624 | 47888 | 1.118 | 0.0111 | 0.0210 | 0.5260 |
| 2.2 | 89007 | 57354 | 1.118 | 0.0101 | 0.0204 | 0.4935 |
| 2.3 | 95729 | 62020 | 1.118 | 0.0098 | 0.0202 | 0.4848 |
| 2.4 | 119066 | 76797 | 1.118 | 0.0085 | 0.0197 | 0.4300 |
| 2.5 | 127521 | 82609 | 1.118 | 0.0086 | 0.0195 | 0.4410 |
| 2.6 | 138493 | 89365 | 1.118 | 0.0083 | 0.0193 | 0.4315 |
| 2.7 | 159483 | 101415 | 1.118 | 0.0079 | 0.0190 | 0.4133 |
| 3.1 | 139077 | 102996 | 1.581 | 0.0107 | 0.0193 | 0.5560 |
| 3.2 | 144389 | 106997 | 1.581 | 0.0105 | 0.0192 | 0.5485 |
| 3.3 | 150053 | 110788 | 1.581 | 0.0098 | 0.0191 | 0.5101 |
| 3.4 | 154165 | 114167 | 1.581 | 0.0101 | 0.0191 | 0.5288 |
| 3.5 | 163357 | 118599 | 1.581 | 0.0097 | 0.0190 | 0.5134 |
| 3.6 | 173267 | 125625 | 1.581 | 0.0093 | 0.0188 | 0.4946 |
| 3.7 | 182639 | 134087 | 1.581 | 0.0090 | 0.0187 | 0.4795 |

รูป ก-2 แสดงฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ ต่อตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ย ที่ $d_0/D = 0.791, 1.118, 1.581$ จะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์มีแนวโน้มเป็นไปในลักษณะของลอการิทึม (Logarithm) เมื่อประมาณค่า $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ ในช่วงของตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยที่ 20,000-200,000 ด้วยสมการลอการิทึม จะสามารถวิเคราะห์ถึงค่า $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ ที่ d_0/D ที่ตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยคงที่ใดๆได้ ซึ่งการพิจารณาถึงตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยคงที่ที่ 40,000 60,000 80,000 100,000 และ 120,000 ดังรูป ก-3 แสดงให้เห็นถึงค่าของฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ ต่ออัตราส่วน d_0/D มีแนวโน้มความสัมพันธ์เป็นลักษณะเชิงเส้น



รูปที่ ก-2 กราฟแสดงฟังก์ชัน $h(Re_{av}, \frac{d_0}{D})$ ต่อตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ย เมื่อ d_0/D คงที่



รูปที่ ก-3 กราฟแสดงฟังก์ชัน $h(Re_{av}, \frac{d_0}{D})$ ต่ออัตราส่วน d_0/D เมื่อตัวเลขเรย์โนลด์เฉลี่ยคงที่

จากการวิเคราะห์ฟังก์ชันสองตัวแปร (Functions of two variables) โดยแสดงความสัมพันธ์ของ $h(Re_{av}, \frac{d_0}{D})$ และ Re_{av} ด้วยฟังก์ชันลอการิทึมที่ค่าคงที่ใดๆ ดังสมการ ก.1 เนื่องจากค่า $h(Re_{av}, \frac{d_0}{D})$ ขึ้นอยู่กับ d_0/D ด้วย พบว่าค่าคงที่ a และ b ต้องมีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับ d_0/D ดังสมการ ก.2 และ ก.3 ตามลำดับ เมื่อแทนค่า a และ b ลงสมการ ก.1 จะได้สมการของฟังก์ชัน $h(Re_{av}, \frac{d_0}{D})$ โดยมี c_1 ถึง c_4 เป็นค่าคงที่ ดังสมการ ก.4

$$h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right) = a \log(Re_{av}) + b \quad (ก.1)$$

$$a = c_1 \frac{d_0}{D} + c_2 \quad (ก.2)$$

$$b = c_3 \frac{d_0}{D} + c_4 \quad (ก.3)$$

$$h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right) = c_1 \frac{d_0}{D} \log(Re_{av}) + c_2 \log(Re_{av}) + c_3 \frac{d_0}{D} + c_4 \quad (ก.4)$$

ก.2 สมการของฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$

การสร้างสมการของฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ จะศึกษาจากวิธีการถดถอยแบบหลายเชิงกับข้อมูลไม่เชิงเส้น (nonlinear multiple regression) ด้วยข้อมูลทั้งหมดจากการทดลองตาราง ก-1 โดยทำการคำนวณหาค่าคงที่ c_1 ถึง c_4 ในสมการ ก.4 ด้วยวิธีกำลังสองน้อยสุด (Least square approximation) เพื่อให้ได้ฟังก์ชันที่เป็นตัวแทนของข้อมูล เพราะเป็นการเฉลี่ยค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลให้มีค่าเหลือน้อยที่สุด ซึ่งเริ่มจากการเขียนสมการของความคลาดเคลื่อน E ของข้อมูลทั้งหมด n ข้อมูลที่เบี่ยงเบนไปจากฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ ดังนี้

$$E = \sum_{i=1}^n \left[h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)_i - \left[c_1 \left(\frac{d_0}{D} \log(Re_{av})\right)_i + c_2 (\log(Re_{av}))_i + c_3 \left(\frac{d_0}{D}\right)_i + c_4 \right] \right]^2$$

สามารถเขียนในรูปตัวแปร x และ y ได้เป็นสมการ ก.5 โดยที่ y_i คือ ค่าของฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)_i$ ที่ข้อมูล i ใดๆ และ $x_{1i} = \left(\frac{d_0}{D} \log(Re_{av})\right)_i$, $x_{2i} = (\log(Re_{av}))_i$, $x_{3i} = \left(\frac{d_0}{D}\right)_i$

$$E = \sum_{i=1}^n [y_i - (c_1 x_{1i} + c_2 x_{2i} + c_3 x_{3i} + c_4)]^2 \quad (ก.5)$$

หาค่าต่ำสุดของความคลาดเคลื่อน E โดยหาอนุพันธ์เทียบกับตัวแปรไม่ทราบค่า (c_1 ถึง c_4) ก่อให้เกิดระบบสมการซึ่งประกอบไปด้วย 4 สมการ ดังนี้

$$\frac{\partial E}{\partial c_1} = 0 \quad , \quad \frac{\partial E}{\partial c_2} = 0 \quad , \quad \frac{\partial E}{\partial c_3} = 0 \quad , \quad \frac{\partial E}{\partial c_4} = 0$$

โดยการแก้ชุดสมการเพื่อหาค่าคงที่ c_1 c_2 c_3 c_4 ต้องกระทำไปพร้อม ๆ กัน ทำให้ต้องใช้กระบวนการทำซ้ำโดยการสมมติค่า c_1 ถึง c_4 แล้วกระทำการแก้ชุดสมการไปพร้อมๆกันจนคำตอบของค่าคงที่นั้นลู่เข้าและมีค่าแตกต่างกันน้อยมาก

ในงานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมแมตแล็บ (MATLAB) มาช่วยวิเคราะห์การถดถอยแบบหลายเชิงกับข้อมูลไม่เชิงเส้น ด้วยชุดคำสั่งสำเร็จรูป NonLinearModel.fit เพื่อหาค่าคงที่สำหรับฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ โดยการเขียนโปรแกรมเพื่อหาผลลัพธ์ดังรูปที่ ก-4

```

Nonlinear regression model:
y ~ (c1*x2*log10(x1) + c2*log10(x1) + c3*x2 + c4)

Estimated Coefficients:

```

| | Estimate | SE | tStat | pValue |
|----|----------|---------|----------|------------|
| c1 | 0.1686 | 0.11236 | 1.5005 | 0.15183 |
| c2 | -0.60315 | 0.1229 | -4.9076 | 0.00013302 |
| c3 | -0.54519 | 0.55986 | -0.97378 | 0.34382 |
| c4 | 3.0844 | 0.60024 | 5.1387 | 8.2067e-05 |

```

Number of observations: 21, Error degrees of freedom: 17
Root Mean Squared Error: 0.0184
R-Squared: 0.916, Adjusted R-Squared 0.901
F-statistic vs. constant model: 61.9, p-value = 2.35e-09

```

รูปที่ ก-4 แสดงผลลัพธ์ของการวิเคราะห์การถดถอยแบบหลายเชิงกับข้อมูลไม่เชิงเส้น

คำตอบค่าคงที่ของสมการ ก.4 คือ $c_1 = 0.1686$, $c_2 = -0.60315$, $c_3 = -0.54519$, $c_4 = 3.0844$ และผลลัพธ์ที่ได้มีค่า R-Squared = 0.916 ที่มีความแม่นยำในระดับหนึ่ง แต่อาจมีความคลาดเคลื่อนอยู่บ้าง เพราะเป็นข้อมูลการวัดที่ได้จากการทดลอง ดังนั้นฟังก์ชัน $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ สามารถแสดงได้ดังสมการ ก.6

$$h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right) = 0.1686 \frac{d_0}{D} \log(Re_{av}) - 0.60315 \log(Re_{av}) - 0.54519 \frac{d_0}{D} + 3.0844 \quad (\text{ก.6})$$

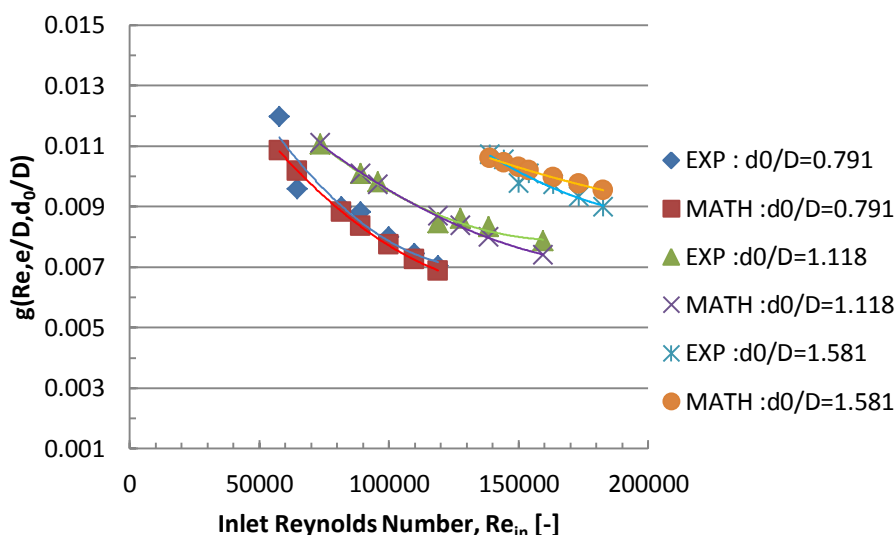
ก.3 ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้า $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$

ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อผ้า $g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right)$ หาได้จากการนำสมการ $h\left(Re_{av}, \frac{d_0}{D}\right)$ ไปคูณฟังก์ชันความเสียหายของท่อลมปกติ $f\left(Re, \frac{e}{D}\right)$ ด้วยสมการของ Miller (สมการ 3.11) และจัดรูปได้ดังสมการ ก.7

$$g\left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D}\right) = \frac{0.04215\left(\frac{d_0}{D}\right)\log(Re_{av}) - 0.15079\log(Re_{av}) - 0.1363\left(\frac{d_0}{D}\right) + 0.7711}{\left[\log\left(\frac{e}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}}\right)\right]^2} \quad (\text{ก.7})$$

ก.3.1 การวิเคราะห์ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้า

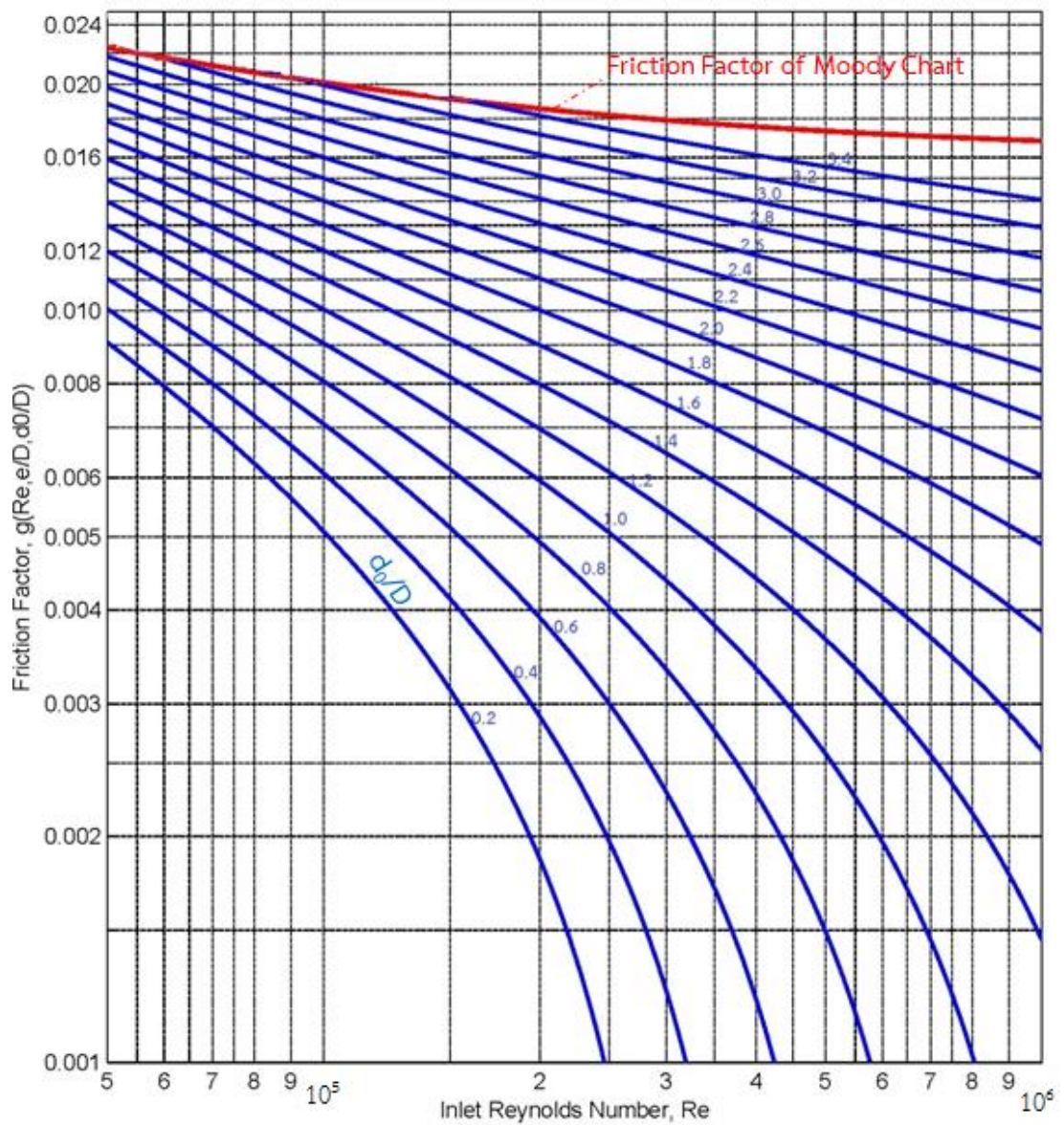
รูปที่ ก-5 แสดงผลลัพธ์ของค่า $g \left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D} \right)$ ที่ได้จากสมการ ก.7 เทียบกับผลของการทดลองที่เกิดขึ้น ซึ่งมีแนวโน้มสอดคล้องกัน และมีความผิดพลาดโดยเฉลี่ยประมาณ 3.3%



รูปที่ ก-5 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของฟังก์ชัน $g \left(Re, \frac{e}{D}, \frac{d_0}{D} \right)$ จากการทดลองกับสมการ ก.7 (EXP.=Experiment, MATH=Equation ก.7)

รูปที่ ก-6 แสดงฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์เข้าท่อลมผ้าที่อัตราส่วน d_0/D เมื่อ e/D คงที่เท่ากับ 0.000433 พบว่าตัวเลขเรย์โนลด์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความเสียหายลดลง และอัตราส่วน d_0/D สูงขึ้นจะให้ค่าความเสียหายมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของ Re และ e/D ในท่อลมปกติ

อย่างไรก็ตามช่วงของ d_0/D ไม่สามารถเพิ่มค่าขึ้นได้อย่างอิสระ เนื่องจากฟังก์ชันความเสียหายของท่อลมผ้าที่มีการเจาะช่องเปิดจะน้อยกว่าค่าฟังก์ชันความเสียหายของท่อลมผ้าที่ไม่มีการเจาะช่องเปิดที่ค่าตัวเลขเรย์โนลด์เข้าเดียวกัน ซึ่งพบว่าช่วงของ d_0/D มีขีดจำกัดสูงสุดไม่เกิน 3.4



รูปที่ ก-6 ฟังก์ชันความเสียดทานสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้า
เมื่อ $e/D=0.000433$ โดยค่า d/D สูงสุด = 3.4

ภาคผนวก ข
การแสดงผลในรูปแบบของตาราง

ประกอบด้วย

- | | |
|--------------|---|
| ตารางที่ ข-1 | แสดงผลลัพธ์การทดลองของการไหลผ่านท่อลมฝักรูปแบบที่ 1 ถึง 3 |
| ตารางที่ ข-2 | แสดงผลลัพธ์การจำลองการไหลของท่อลมฝักรูปแบบที่ 1 ถึง 3 |
| ตารางที่ ข-3 | แสดงผลลัพธ์การใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับท่อลมฝักรูปแบบที่ 1 ถึง 3 |
| ตารางที่ ข-4 | แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลในการทดลองของท่อลมฝักรูปแบบที่ 1 |
| ตารางที่ ข-5 | แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลในการทดลองของท่อลมฝักรูปแบบที่ 2 |
| ตารางที่ ข-6 | แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลในการทดลองของท่อลมฝักรูปแบบที่ 3 |
| ตารางที่ ข-7 | แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลในท่อลมฝักรูปแบบที่ 1 |
| ตารางที่ ข-8 | แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลในท่อลมฝักรูปแบบที่ 2 |
| ตารางที่ ข-9 | แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลในท่อลมฝักรูปแบบที่ 3 |

ตารางที่ ข-1 แสดงผลลัพธ์การทดลองของการไหลผ่านท่อลมฝากรูปแบบที่ 1 ถึง 3

| CASE | Q_{in} [m ³ /s] | V_{in} [m/s] | Re | d_0/D | L/D | $\epsilon_{tension}$ [μ m/m] | $P_{s,in}$ [Pa] | $P_{t,in}$ [Pa] | $P_{v,in}$ [Pa] | $P_{t,end}$ [Pa] | $q_{0,av}$ [m ³ /s] | $P_{s,av}$ [Pa] | SPR | ΔP_t [Pa] | $g(Re, e/D, d_0/D)$ | Uncertainty of g [-] |
|------|---------------------------------|-------------------|--------|---------|-------|--------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|------|----------------------|---------------------|-------------------------|
| 1.1 | 0.188 | 3.7 | 57756 | 0.791 | 20.87 | 208 | 47.1 | 54.9 | 7.8 | 53.0 | 0.0188 | 50.0 | 5.9 | 2.0 | 0.0120 | 0.0029 |
| 1.2 | 0.210 | 4.1 | 64573 | 0.791 | 20.87 | 233 | 76.5 | 86.3 | 9.8 | 84.3 | 0.0210 | 80.4 | 7.8 | 2.0 | 0.0096 | 0.0021 |
| 1.3 | 0.266 | 5.2 | 81701 | 0.791 | 20.87 | 220 | 101.0 | 116.7 | 15.7 | 113.8 | 0.0265 | 107.4 | 12.8 | 2.9 | 0.0090 | 0.0018 |
| 1.4 | 0.290 | 5.7 | 89007 | 0.791 | 20.87 | 217 | 112.8 | 131.4 | 18.6 | 128.0 | 0.0290 | 120.4 | 15.2 | 3.4 | 0.0088 | 0.0015 |
| 1.5 | 0.326 | 6.4 | 100036 | 0.791 | 20.87 | 257 | 154.9 | 178.5 | 23.5 | 174.6 | 0.0322 | 164.8 | 19.6 | 3.9 | 0.0080 | 0.0012 |
| 1.6 | 0.358 | 7.1 | 109963 | 0.791 | 20.87 | 228 | 159.8 | 188.3 | 28.4 | 183.9 | 0.0358 | 171.9 | 24.0 | 4.4 | 0.0074 | 0.0010 |
| 1.7 | 0.388 | 7.6 | 119066 | 0.791 | 20.87 | 223 | 196.1 | 229.5 | 33.3 | 224.6 | 0.0388 | 210.4 | 28.4 | 4.9 | 0.0070 | 0.0009 |
| 2.1 | 0.240 | 4.7 | 73624 | 1.118 | 20.87 | 217 | 20.6 | 33.3 | 12.7 | 30.4 | 0.0118 | 25.5 | 9.8 | 2.9 | 0.0111 | 0.0021 |
| 2.2 | 0.290 | 5.7 | 89007 | 1.118 | 20.87 | 260 | 26.5 | 45.1 | 18.6 | 41.2 | 0.0146 | 33.8 | 14.7 | 3.9 | 0.0101 | 0.0020 |
| 2.3 | 0.312 | 6.1 | 95729 | 1.118 | 20.87 | 247 | 45.1 | 66.7 | 21.6 | 62.3 | 0.0152 | 53.7 | 17.1 | 4.4 | 0.0098 | 0.0013 |
| 2.4 | 0.388 | 7.6 | 119066 | 1.118 | 20.87 | 258 | 49.0 | 82.4 | 33.3 | 76.5 | 0.0196 | 62.8 | 27.5 | 5.9 | 0.0085 | 0.0008 |
| 2.5 | 0.415 | 8.2 | 127521 | 1.118 | 20.87 | 242 | 54.9 | 93.2 | 38.2 | 86.3 | 0.0205 | 70.6 | 31.4 | 6.9 | 0.0086 | 0.0007 |
| 2.6 | 0.451 | 8.9 | 138493 | 1.118 | 20.87 | 192 | 65.7 | 110.8 | 45.1 | 103.0 | 0.0222 | 84.3 | 37.3 | 7.8 | 0.0083 | 0.0006 |
| 2.7 | 0.519 | 10.2 | 159483 | 1.118 | 20.87 | 262 | 82.4 | 142.2 | 59.8 | 132.4 | 0.0256 | 107.4 | 50.0 | 9.8 | 0.0079 | 0.0005 |
| 3.1 | 0.453 | 8.9 | 139077 | 1.581 | 20.87 | 212 | 11.8 | 57.3 | 45.5 | 47.1 | 0.0235 | 29.4 | 35.3 | 10.2 | 0.0107 | 0.0013 |
| 3.2 | 0.470 | 9.3 | 144389 | 1.581 | 20.87 | 258 | 12.7 | 61.8 | 49.0 | 51.0 | 0.0258 | 31.9 | 38.2 | 10.8 | 0.0105 | 0.0010 |
| 3.3 | 0.488 | 9.6 | 150053 | 1.581 | 20.87 | 224 | 13.7 | 66.7 | 53.0 | 55.9 | 0.0260 | 34.8 | 42.2 | 10.8 | 0.0098 | 0.0008 |
| 3.4 | 0.502 | 9.9 | 154165 | 1.581 | 20.87 | 266 | 14.7 | 70.6 | 55.9 | 58.8 | 0.0261 | 36.8 | 44.1 | 11.8 | 0.0101 | 0.0006 |
| 3.5 | 0.532 | 10.5 | 163357 | 1.581 | 20.87 | 283 | 15.7 | 78.5 | 62.8 | 65.7 | 0.0287 | 40.7 | 50.0 | 12.7 | 0.0097 | 0.0006 |
| 3.6 | 0.564 | 11.1 | 173267 | 1.581 | 20.87 | 251 | 17.7 | 88.3 | 70.6 | 74.5 | 0.0303 | 46.1 | 56.9 | 13.7 | 0.0093 | 0.0005 |
| 3.7 | 0.594 | 11.7 | 182639 | 1.581 | 20.87 | 237 | 19.6 | 98.1 | 78.5 | 83.4 | 0.0323 | 51.5 | 63.7 | 14.7 | 0.0090 | 0.0004 |

ตารางที่ ข-2 แสดงผลลัพธ์การจำลองการไหลของท่อลมผ่ารูปแบบที่ 1 ถึง 3

| CASE | Q_{in} [m ³ /s] | V_{in} [m/s] | d_p/D [-] | L/D | t_{turb} [%] | k_{turb} [m ² /s ²] | ϵ_{turb} [m ² /s ³] | $P_{s,in}$ [Pa] | $P_{t,in}$ [Pa] | $P_{v,in}$ [Pa] | $P_{t,end}$ [Pa] | $q_{0,av}$ [m ³ /s] | $P_{s,av}$ [Pa] | SPR [Pa] | ΔP_t [Pa] | $g(Re_e/D, d_p/D)$ [-] |
|------|---------------------------------|-------------------|----------------|-------|-------------------|---|--|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|--------------------|-------------|----------------------|---------------------------|
| 1.1 | 0.188 | 3.7 | 0.791 | 20.87 | 4.064 | 0.034 | 0.058 | 32.2 | 40.1 | 7.8 | 38.6 | 0.0185 | 35.4 | 6.4 | 1.5 | 0.0091 |
| 1.2 | 0.210 | 4.1 | 0.791 | 20.87 | 4.007 | 0.041 | 0.078 | 40.2 | 50.0 | 9.8 | 48.2 | 0.0207 | 44.2 | 8.0 | 1.8 | 0.0089 |
| 1.3 | 0.266 | 5.2 | 0.791 | 20.87 | 3.891 | 0.063 | 0.145 | 64.7 | 80.4 | 15.7 | 77.7 | 0.0262 | 71.2 | 13.0 | 2.7 | 0.0081 |
| 1.4 | 0.290 | 5.7 | 0.791 | 20.87 | 3.850 | 0.073 | 0.181 | 76.0 | 94.6 | 18.6 | 91.4 | 0.0285 | 83.7 | 15.4 | 3.2 | 0.0082 |
| 1.5 | 0.326 | 6.4 | 0.791 | 20.87 | 3.794 | 0.089 | 0.246 | 95.8 | 119.4 | 23.5 | 115.6 | 0.0321 | 105.7 | 19.8 | 3.8 | 0.0077 |
| 1.6 | 0.358 | 7.1 | 0.791 | 20.87 | 3.749 | 0.105 | 0.315 | 117.1 | 145.6 | 28.4 | 141.0 | 0.0352 | 129.0 | 23.8 | 4.6 | 0.0078 |
| 1.7 | 0.388 | 7.6 | 0.791 | 20.87 | 3.712 | 0.121 | 0.389 | 135.3 | 168.6 | 33.3 | 163.2 | 0.0382 | 149.2 | 27.9 | 5.4 | 0.0078 |
| 2.1 | 0.240 | 4.7 | 1.118 | 20.87 | 3.942 | 0.052 | 0.110 | 11.4 | 24.1 | 12.7 | 21.6 | 0.0119 | 16.5 | 10.2 | 2.6 | 0.0096 |
| 2.2 | 0.290 | 5.7 | 1.118 | 20.87 | 3.850 | 0.073 | 0.181 | 16.4 | 35.0 | 18.6 | 31.4 | 0.0144 | 23.9 | 15.0 | 3.6 | 0.0092 |
| 2.3 | 0.312 | 6.1 | 1.118 | 20.87 | 3.815 | 0.083 | 0.219 | 28.4 | 49.9 | 21.6 | 46.1 | 0.0155 | 37.2 | 17.7 | 3.9 | 0.0086 |
| 2.4 | 0.388 | 7.6 | 1.118 | 20.87 | 3.712 | 0.121 | 0.389 | 30.1 | 63.4 | 33.3 | 57.8 | 0.0193 | 43.9 | 27.7 | 5.6 | 0.0081 |
| 2.5 | 0.415 | 8.2 | 1.118 | 20.87 | 3.681 | 0.136 | 0.465 | 35.2 | 73.4 | 38.2 | 66.9 | 0.0206 | 51.0 | 31.8 | 6.5 | 0.0081 |
| 2.6 | 0.451 | 8.9 | 1.118 | 20.87 | 3.643 | 0.158 | 0.578 | 40.8 | 85.9 | 45.1 | 78.3 | 0.0224 | 59.6 | 37.5 | 7.6 | 0.0081 |
| 2.7 | 0.519 | 10.2 | 1.118 | 20.87 | 3.579 | 0.202 | 0.837 | 54.2 | 114.0 | 59.8 | 104.0 | 0.0258 | 79.1 | 49.8 | 10.0 | 0.0080 |
| 3.1 | 0.453 | 8.9 | 1.581 | 20.87 | 3.641 | 0.159 | 0.584 | 7.3 | 52.8 | 45.5 | 42.6 | 0.0251 | 25.0 | 35.3 | 10.2 | 0.0107 |
| 3.2 | 0.470 | 9.3 | 1.581 | 20.87 | 3.624 | 0.169 | 0.645 | 7.8 | 56.8 | 49.0 | 45.9 | 0.0261 | 26.9 | 38.2 | 10.9 | 0.0106 |
| 3.3 | 0.488 | 9.6 | 1.581 | 20.87 | 3.607 | 0.181 | 0.713 | 8.4 | 61.4 | 53.0 | 49.8 | 0.0271 | 29.1 | 41.4 | 11.6 | 0.0105 |
| 3.4 | 0.502 | 9.9 | 1.581 | 20.87 | 3.594 | 0.190 | 0.766 | 8.8 | 64.7 | 55.9 | 52.7 | 0.0278 | 30.8 | 43.9 | 12.0 | 0.0103 |
| 3.5 | 0.532 | 10.5 | 1.581 | 20.87 | 3.568 | 0.210 | 0.891 | 9.8 | 72.6 | 62.8 | 59.1 | 0.0289 | 34.5 | 49.3 | 13.5 | 0.0103 |
| 3.6 | 0.564 | 11.1 | 1.581 | 20.87 | 3.542 | 0.233 | 1.040 | 11.0 | 81.6 | 70.6 | 66.6 | 0.0305 | 38.8 | 55.6 | 15.0 | 0.0102 |
| 3.7 | 0.594 | 11.7 | 1.581 | 20.87 | 3.519 | 0.256 | 1.195 | 12.2 | 90.6 | 78.5 | 73.9 | 0.0331 | 43.1 | 61.8 | 16.7 | 0.0102 |

ตารางที่ ข-3 แสดงผลลัพธ์การใส่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์กับพอลิเมอร์รูปแบบที่ 1 ถึง 3

| CASE | Q_{in} [m ³ /s] | V_{in} [m/s] | Re | d_0/D | L/D | $P_{s,in}$ [Pa] | $P_{v,in}$ [Pa] | C_{PR} | $P_{s,end}$ [Pa] | $q_{0,av}$ [m ³ /s] | SPR | ΔP_t [Pa] | $g(Re_e/D, d_0/D)$ |
|------|---------------------------------|-------------------|--------|---------|-------|--------------------|--------------------|----------|---------------------|-----------------------------------|------|----------------------|--------------------|
| 1.1 | 0.188 | 3.7 | 57756 | 0.791 | 20.87 | 47.1 | 7.8 | 0.886 | 53.1 | 0.0193 | 6.1 | 1.8 | 0.0111 |
| 1.2 | 0.210 | 4.1 | 64573 | 0.791 | 20.87 | 76.5 | 9.8 | 0.911 | 84.0 | 0.0234 | 7.5 | 2.1 | 0.0104 |
| 1.3 | 0.266 | 5.2 | 81701 | 0.791 | 20.87 | 101.0 | 15.7 | 0.888 | 113.8 | 0.0283 | 12.8 | 3.0 | 0.0091 |
| 1.4 | 0.290 | 5.7 | 89007 | 0.791 | 20.87 | 112.8 | 18.6 | 0.880 | 128.1 | 0.0299 | 15.4 | 3.3 | 0.0086 |
| 1.5 | 0.326 | 6.4 | 100036 | 0.791 | 20.87 | 154.9 | 23.5 | 0.888 | 174.5 | 0.0350 | 19.6 | 3.9 | 0.0080 |
| 1.6 | 0.358 | 7.1 | 109963 | 0.791 | 20.87 | 159.8 | 28.4 | 0.869 | 184.0 | 0.0358 | 24.1 | 4.5 | 0.0075 |
| 1.7 | 0.388 | 7.6 | 119066 | 0.791 | 20.87 | 196.1 | 33.3 | 0.873 | 224.7 | 0.0396 | 28.5 | 5.0 | 0.0072 |
| 2.1 | 0.240 | 4.7 | 73624 | 1.118 | 20.87 | 20.6 | 12.7 | 0.684 | 30.1 | 0.0137 | 9.5 | 3.0 | 0.0112 |
| 2.2 | 0.290 | 5.7 | 89007 | 1.118 | 20.87 | 26.5 | 18.6 | 0.646 | 41.0 | 0.0158 | 14.5 | 4.0 | 0.0102 |
| 2.3 | 0.312 | 6.1 | 95729 | 1.118 | 20.87 | 45.1 | 21.6 | 0.744 | 60.7 | 0.0178 | 15.6 | 4.4 | 0.0099 |
| 2.4 | 0.388 | 7.6 | 119066 | 1.118 | 20.87 | 49.0 | 33.3 | 0.646 | 75.9 | 0.0216 | 26.9 | 6.1 | 0.0088 |
| 2.5 | 0.415 | 8.2 | 127521 | 1.118 | 20.87 | 54.9 | 38.2 | 0.638 | 86.1 | 0.0229 | 31.2 | 6.8 | 0.0085 |
| 2.6 | 0.451 | 8.9 | 138493 | 1.118 | 20.87 | 65.7 | 45.1 | 0.640 | 102.7 | 0.0250 | 37.0 | 7.6 | 0.0081 |
| 2.7 | 0.519 | 10.2 | 159483 | 1.118 | 20.87 | 82.4 | 59.8 | 0.622 | 132.5 | 0.0283 | 50.1 | 9.3 | 0.0075 |
| 3.1 | 0.453 | 8.9 | 139077 | 1.581 | 20.87 | 11.8 | 45.5 | 0.243 | 48.4 | 0.0270 | 36.6 | 9.9 | 0.0104 |
| 3.2 | 0.470 | 9.3 | 144389 | 1.581 | 20.87 | 12.7 | 49.0 | 0.243 | 52.4 | 0.0281 | 39.6 | 10.5 | 0.0102 |
| 3.3 | 0.488 | 9.6 | 150053 | 1.581 | 20.87 | 13.7 | 53.0 | 0.242 | 56.7 | 0.0292 | 43.0 | 11.1 | 0.0101 |
| 3.4 | 0.502 | 9.9 | 154165 | 1.581 | 20.87 | 14.7 | 55.9 | 0.244 | 60.2 | 0.0301 | 45.5 | 11.6 | 0.0100 |
| 3.5 | 0.532 | 10.5 | 163357 | 1.581 | 20.87 | 15.7 | 62.8 | 0.234 | 67.0 | 0.0317 | 51.3 | 12.7 | 0.0097 |
| 3.6 | 0.564 | 11.1 | 173267 | 1.581 | 20.87 | 17.7 | 70.6 | 0.233 | 75.7 | 0.0337 | 58.1 | 14.0 | 0.0095 |
| 3.7 | 0.594 | 11.7 | 182639 | 1.581 | 20.87 | 19.6 | 78.5 | 0.232 | 84.4 | 0.0356 | 64.8 | 15.2 | 0.0093 |

ตารางที่ ข-4 แสดงการกระจายตัวของความถี่ในสัณฐานและอัตราการไหลในการทดลองของท่อลมฟ้า รูปแบบที่ 1

| x/L | EXPERIMENT case 1.1 | | | | | EXPERIMENT case 1.2 | | | | | EXPERIMENT case 1.3 | | | | | EXPERIMENT case 1.4 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|
| | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.188 | 47.1 | 1.00 | 0.0000 | 0.210 | 76.5 | 1.00 | 0.0000 | 0.266 | 101.0 | 1.00 | 0.0000 | 0.290 | 112.8 | 1.00 | 0.0000 | 0.290 | 112.8 | 1.00 | 0.0000 |
| 0.23 | 0.172 | 42.8 | 0.91 | 0.0165 | 0.191 | 72.5 | 0.95 | 0.0193 | 0.243 | 91.4 | 0.91 | 0.0229 | 0.263 | 109.3 | 0.97 | 0.0263 | 0.263 | 109.3 | 0.97 | 0.0263 |
| 0.30 | 0.155 | 42.8 | 0.91 | 0.0170 | 0.171 | 71.7 | 0.94 | 0.0199 | 0.219 | 94.3 | 0.93 | 0.0236 | 0.237 | 106.1 | 0.94 | 0.0268 | 0.237 | 106.1 | 0.94 | 0.0268 |
| 0.38 | 0.138 | 43.9 | 0.93 | 0.0167 | 0.151 | 72.5 | 0.95 | 0.0196 | 0.195 | 98.7 | 0.98 | 0.0246 | 0.210 | 108.4 | 0.96 | 0.0271 | 0.210 | 108.4 | 0.96 | 0.0271 |
| 0.45 | 0.120 | 45.0 | 0.96 | 0.0174 | 0.132 | 74.1 | 0.97 | 0.0195 | 0.169 | 100.6 | 1.00 | 0.0257 | 0.181 | 106.5 | 0.94 | 0.0281 | 0.181 | 106.5 | 0.94 | 0.0281 |
| 0.53 | 0.102 | 45.1 | 0.96 | 0.0183 | 0.111 | 75.9 | 0.99 | 0.0205 | 0.142 | 97.3 | 0.96 | 0.0269 | 0.152 | 118.4 | 1.05 | 0.0297 | 0.152 | 118.4 | 1.05 | 0.0297 |
| 0.60 | 0.083 | 45.9 | 0.98 | 0.0193 | 0.090 | 76.3 | 1.00 | 0.0216 | 0.115 | 97.6 | 0.97 | 0.0274 | 0.122 | 116.0 | 1.03 | 0.0294 | 0.122 | 116.0 | 1.03 | 0.0294 |
| 0.68 | 0.062 | 46.5 | 0.99 | 0.0206 | 0.068 | 77.9 | 1.02 | 0.0220 | 0.087 | 97.3 | 0.96 | 0.0281 | 0.092 | 120.9 | 1.07 | 0.0300 | 0.092 | 120.9 | 1.07 | 0.0300 |
| 0.75 | 0.042 | 44.9 | 0.95 | 0.0202 | 0.045 | 79.0 | 1.03 | 0.0227 | 0.059 | 99.6 | 0.99 | 0.0280 | 0.062 | 124.0 | 1.10 | 0.0304 | 0.062 | 124.0 | 1.10 | 0.0304 |
| 0.83 | 0.022 | 45.4 | 0.96 | 0.0203 | 0.023 | 82.1 | 1.07 | 0.0219 | 0.031 | 103.7 | 1.03 | 0.0282 | 0.031 | 128.2 | 1.14 | 0.0309 | 0.031 | 128.2 | 1.14 | 0.0309 |
| 0.91 | 0.001 | 48.4 | 1.03 | 0.0210 | 0.001 | 84.7 | 1.11 | 0.0224 | 0.001 | 108.6 | 1.08 | 0.0293 | 0.000 | 128.6 | 1.14 | 0.0309 | 0.000 | 128.6 | 1.14 | 0.0309 |
| 1.00 | 0.001 | 53.0 | 1.13 | 0.0000 | 0.001 | 84.3 | 1.10 | 0.0000 | 0.001 | 113.8 | 1.13 | 0.0000 | 0.000 | 128.0 | 1.13 | 0.0000 | 0.000 | 128.0 | 1.13 | 0.0000 |

ตารางที่ ข-4 แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลในการทดลองของพอลิเมอร์ วัสดุแบบที่ 1 (ต่อ)

| x/L | EXPERIMENT case 1.5 | | | | EXPERIMENT case 1.6 | | | | EXPERIMENT case 1.7 | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|
| | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.326 | 155.0 | 1.00 | 0.0000 | 0.358 | 159.9 | 1.00 | 0.0000 | 0.388 | 196.1 | 1.00 | 0.0000 |
| 0.23 | 0.297 | 144.7 | 0.93 | 0.0288 | 0.325 | 150.4 | 0.94 | 0.0324 | 0.354 | 180.8 | 0.92 | 0.0338 |
| 0.30 | 0.267 | 149.1 | 0.96 | 0.0297 | 0.292 | 155.3 | 0.97 | 0.0335 | 0.319 | 186.8 | 0.95 | 0.0350 |
| 0.38 | 0.236 | 150.5 | 0.97 | 0.0309 | 0.258 | 158.0 | 0.99 | 0.0337 | 0.283 | 197.5 | 1.01 | 0.0354 |
| 0.45 | 0.204 | 157.4 | 1.02 | 0.0321 | 0.224 | 162.2 | 1.01 | 0.0342 | 0.246 | 201.8 | 1.03 | 0.0369 |
| 0.53 | 0.171 | 153.2 | 0.99 | 0.0327 | 0.187 | 167.0 | 1.04 | 0.0369 | 0.208 | 195.8 | 1.00 | 0.0387 |
| 0.60 | 0.140 | 156.6 | 1.01 | 0.0315 | 0.152 | 165.6 | 1.04 | 0.0348 | 0.169 | 197.1 | 1.00 | 0.0389 |
| 0.68 | 0.106 | 157.4 | 1.02 | 0.0337 | 0.115 | 170.3 | 1.07 | 0.0372 | 0.127 | 199.5 | 1.02 | 0.0415 |
| 0.75 | 0.072 | 153.6 | 0.99 | 0.0338 | 0.078 | 162.6 | 1.02 | 0.0374 | 0.085 | 212.4 | 1.08 | 0.0428 |
| 0.83 | 0.038 | 166.3 | 1.07 | 0.0341 | 0.039 | 178.3 | 1.12 | 0.0386 | 0.042 | 223.5 | 1.14 | 0.0420 |
| 0.91 | 0.004 | 171.8 | 1.11 | 0.0341 | 0.000 | 184.7 | 1.16 | 0.0388 | 0.000 | 224.9 | 1.15 | 0.0421 |
| 1.00 | 0.004 | 174.6 | 1.13 | 0.0000 | 0.000 | 183.9 | 1.15 | 0.0000 | 0.000 | 224.6 | 1.15 | 0.0000 |

ตารางที่ ข-5 แสดงการกระจายตัวของความถี่สัณฐานและอัตราการไหลในการทดลองของท่อลมผ่า รูปแบบที่ 2

| x/L | EXPERIMENT case 2.1 | | | | | EXPERIMENT case 2.2 | | | | | EXPERIMENT case 2.3 | | | | | EXPERIMENT case 2.4 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.240 | 20.6 | 1.00 | 0.0000 | 0.290 | 26.5 | 1.00 | 0.0000 | 0.312 | 45.1 | 1.00 | 0.0000 | 0.388 | 49.0 | 1.00 | 0.0000 | | | | |
| 0.23 | 0.231 | 17.7 | 0.86 | 0.0085 | 0.279 | 25.8 | 0.97 | 0.0102 | 0.301 | 39.9 | 0.88 | 0.0110 | 0.374 | 46.0 | 0.94 | 0.0137 | | | | |
| 0.26 | 0.223 | 18.0 | 0.87 | 0.0085 | 0.269 | 25.2 | 0.95 | 0.0103 | 0.290 | 40.1 | 0.89 | 0.0111 | 0.360 | 46.0 | 0.94 | 0.0137 | | | | |
| 0.30 | 0.214 | 19.2 | 0.93 | 0.0088 | 0.259 | 26.9 | 1.01 | 0.0107 | 0.278 | 42.0 | 0.93 | 0.0115 | 0.346 | 47.5 | 0.97 | 0.0139 | | | | |
| 0.34 | 0.205 | 17.4 | 0.85 | 0.0091 | 0.246 | 27.1 | 1.02 | 0.0120 | 0.265 | 42.6 | 0.94 | 0.0128 | 0.331 | 52.3 | 1.07 | 0.0158 | | | | |
| 0.38 | 0.195 | 18.6 | 0.90 | 0.0094 | 0.234 | 31.0 | 1.17 | 0.0124 | 0.253 | 43.5 | 0.96 | 0.0124 | 0.315 | 50.7 | 1.03 | 0.0155 | | | | |
| 0.42 | 0.186 | 17.8 | 0.86 | 0.0097 | 0.221 | 29.5 | 1.11 | 0.0128 | 0.240 | 45.6 | 1.01 | 0.0131 | 0.299 | 51.0 | 1.04 | 0.0165 | | | | |
| 0.45 | 0.175 | 19.0 | 0.92 | 0.0101 | 0.209 | 29.4 | 1.11 | 0.0125 | 0.226 | 48.4 | 1.07 | 0.0136 | 0.282 | 53.4 | 1.09 | 0.0169 | | | | |
| 0.49 | 0.165 | 20.2 | 0.98 | 0.0109 | 0.196 | 27.9 | 1.06 | 0.0129 | 0.212 | 46.3 | 1.03 | 0.0144 | 0.263 | 56.3 | 1.15 | 0.0183 | | | | |
| 0.53 | 0.153 | 20.2 | 0.98 | 0.0113 | 0.183 | 28.4 | 1.07 | 0.0134 | 0.197 | 48.4 | 1.07 | 0.0144 | 0.244 | 59.0 | 1.20 | 0.0193 | | | | |
| 0.57 | 0.142 | 21.7 | 1.05 | 0.0117 | 0.168 | 31.3 | 1.18 | 0.0146 | 0.182 | 51.7 | 1.15 | 0.0151 | 0.224 | 65.0 | 1.33 | 0.0203 | | | | |
| 0.60 | 0.129 | 23.3 | 1.13 | 0.0122 | 0.154 | 31.3 | 1.18 | 0.0141 | 0.166 | 53.0 | 1.17 | 0.0157 | 0.203 | 65.0 | 1.33 | 0.0203 | | | | |
| 0.64 | 0.117 | 23.2 | 1.13 | 0.0121 | 0.138 | 33.0 | 1.25 | 0.0157 | 0.150 | 53.1 | 1.18 | 0.0163 | 0.184 | 60.5 | 1.23 | 0.0196 | | | | |
| 0.68 | 0.105 | 23.7 | 1.15 | 0.0127 | 0.123 | 34.7 | 1.31 | 0.0153 | 0.134 | 52.7 | 1.17 | 0.0164 | 0.163 | 66.7 | 1.36 | 0.0212 | | | | |
| 0.72 | 0.091 | 26.0 | 1.26 | 0.0133 | 0.107 | 35.6 | 1.35 | 0.0160 | 0.117 | 54.6 | 1.21 | 0.0167 | 0.142 | 66.1 | 1.35 | 0.0211 | | | | |
| 0.75 | 0.077 | 26.1 | 1.27 | 0.0139 | 0.090 | 39.4 | 1.49 | 0.0168 | 0.100 | 53.8 | 1.19 | 0.0166 | 0.120 | 65.2 | 1.33 | 0.0220 | | | | |
| 0.79 | 0.064 | 25.3 | 1.23 | 0.0137 | 0.072 | 36.8 | 1.39 | 0.0178 | 0.084 | 53.9 | 1.19 | 0.0160 | 0.097 | 68.3 | 1.39 | 0.0225 | | | | |
| 0.83 | 0.050 | 25.2 | 1.22 | 0.0137 | 0.055 | 37.9 | 1.43 | 0.0176 | 0.066 | 58.1 | 1.29 | 0.0179 | 0.074 | 70.1 | 1.43 | 0.0228 | | | | |
| 0.87 | 0.036 | 27.9 | 1.36 | 0.0142 | 0.037 | 37.6 | 1.42 | 0.0172 | 0.049 | 54.7 | 1.21 | 0.0174 | 0.050 | 77.6 | 1.58 | 0.0240 | | | | |
| 0.91 | 0.022 | 29.6 | 1.44 | 0.0139 | 0.020 | 40.9 | 1.54 | 0.0180 | 0.031 | 59.8 | 1.32 | 0.0182 | 0.026 | 75.3 | 1.54 | 0.0237 | | | | |
| 0.94 | 0.008 | 29.4 | 1.43 | 0.0143 | 0.002 | 39.7 | 1.50 | 0.0180 | 0.012 | 60.5 | 1.34 | 0.0189 | 0.002 | 77.8 | 1.59 | 0.0241 | | | | |
| 1.00 | 0.008 | 30.4 | 1.48 | 0.0000 | 0.002 | 41.2 | 1.56 | 0.0000 | 0.012 | 62.3 | 1.38 | 0.0000 | 0.002 | 76.5 | 1.56 | 0.0000 | | | | |

ตารางที่ ข-5 แสดงการกระจายตัวของความถี่สปีดและอัตราการไหลในการทดลองของพอลิเม่า รูปแบบที่ 2 (ต่อ)

| x/L | EXPERIMENT case 2.5 | | | | | EXPERIMENT case 2.6 | | | | | EXPERIMENT case 2.7 | | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|---------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|
| | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.415 | 54.9 | 1.00 | 0.0000 | 0.451 | 65.7 | 1.00 | 0.0000 | 0.512 | 82.4 | 1.00 | 0.0000 | 0.512 | 82.4 | 1.00 | 0.0000 |
| 0.23 | 0.401 | 50.7 | 0.92 | 0.0143 | 0.434 | 60.8 | 0.92 | 0.0163 | 0.494 | 83.2 | 1.01 | 0.0184 | 0.494 | 83.2 | 1.01 | 0.0184 |
| 0.26 | 0.386 | 52.3 | 0.95 | 0.0146 | 0.418 | 60.8 | 0.92 | 0.0163 | 0.475 | 85.2 | 1.03 | 0.0186 | 0.475 | 85.2 | 1.03 | 0.0186 |
| 0.30 | 0.371 | 53.9 | 0.98 | 0.0148 | 0.401 | 64.1 | 0.98 | 0.0168 | 0.456 | 89.4 | 1.08 | 0.0190 | 0.456 | 89.4 | 1.08 | 0.0190 |
| 0.34 | 0.355 | 58.9 | 1.07 | 0.0167 | 0.384 | 65.9 | 1.00 | 0.0177 | 0.436 | 87.3 | 1.06 | 0.0204 | 0.436 | 87.3 | 1.06 | 0.0204 |
| 0.38 | 0.338 | 57.2 | 1.04 | 0.0165 | 0.365 | 69.6 | 1.06 | 0.0182 | 0.415 | 89.4 | 1.08 | 0.0206 | 0.415 | 89.4 | 1.08 | 0.0206 |
| 0.42 | 0.321 | 57.3 | 1.04 | 0.0175 | 0.346 | 69.4 | 1.06 | 0.0192 | 0.393 | 88.6 | 1.08 | 0.0217 | 0.393 | 88.6 | 1.08 | 0.0217 |
| 0.45 | 0.303 | 60.2 | 1.10 | 0.0179 | 0.326 | 78.9 | 1.20 | 0.0205 | 0.371 | 93.5 | 1.14 | 0.0223 | 0.371 | 93.5 | 1.14 | 0.0223 |
| 0.49 | 0.283 | 63.2 | 1.15 | 0.0193 | 0.305 | 74.1 | 1.13 | 0.0209 | 0.347 | 96.5 | 1.17 | 0.0239 | 0.347 | 96.5 | 1.17 | 0.0239 |
| 0.53 | 0.263 | 65.8 | 1.20 | 0.0204 | 0.283 | 72.9 | 1.11 | 0.0215 | 0.322 | 96.4 | 1.17 | 0.0247 | 0.322 | 96.4 | 1.17 | 0.0247 |
| 0.57 | 0.242 | 67.7 | 1.23 | 0.0214 | 0.261 | 79.8 | 1.22 | 0.0225 | 0.297 | 104.9 | 1.27 | 0.0258 | 0.297 | 104.9 | 1.27 | 0.0258 |
| 0.60 | 0.220 | 67.7 | 1.23 | 0.0214 | 0.238 | 83.8 | 1.28 | 0.0230 | 0.271 | 107.2 | 1.30 | 0.0261 | 0.271 | 107.2 | 1.30 | 0.0261 |
| 0.64 | 0.199 | 73.2 | 1.33 | 0.0215 | 0.215 | 79.0 | 1.20 | 0.0224 | 0.244 | 111.4 | 1.35 | 0.0266 | 0.244 | 111.4 | 1.35 | 0.0266 |
| 0.68 | 0.176 | 74.1 | 1.35 | 0.0224 | 0.192 | 81.9 | 1.25 | 0.0235 | 0.216 | 114.6 | 1.39 | 0.0278 | 0.216 | 114.6 | 1.39 | 0.0278 |
| 0.72 | 0.154 | 73.6 | 1.34 | 0.0223 | 0.168 | 85.7 | 1.30 | 0.0241 | 0.188 | 117.5 | 1.43 | 0.0282 | 0.188 | 117.5 | 1.43 | 0.0282 |
| 0.75 | 0.131 | 72.5 | 1.32 | 0.0232 | 0.143 | 82.1 | 1.25 | 0.0247 | 0.159 | 112.1 | 1.36 | 0.0289 | 0.159 | 112.1 | 1.36 | 0.0289 |
| 0.79 | 0.107 | 75.8 | 1.38 | 0.0237 | 0.117 | 88.0 | 1.34 | 0.0256 | 0.130 | 117.3 | 1.42 | 0.0295 | 0.130 | 117.3 | 1.42 | 0.0295 |
| 0.83 | 0.084 | 73.9 | 1.35 | 0.0234 | 0.092 | 85.9 | 1.31 | 0.0253 | 0.100 | 119.7 | 1.45 | 0.0298 | 0.100 | 119.7 | 1.45 | 0.0298 |
| 0.87 | 0.059 | 81.7 | 1.49 | 0.0246 | 0.066 | 90.1 | 1.37 | 0.0259 | 0.069 | 125.7 | 1.53 | 0.0306 | 0.069 | 125.7 | 1.53 | 0.0306 |
| 0.91 | 0.035 | 79.4 | 1.45 | 0.0243 | 0.040 | 96.7 | 1.47 | 0.0268 | 0.038 | 131.2 | 1.59 | 0.0312 | 0.038 | 131.2 | 1.59 | 0.0312 |
| 0.94 | 0.010 | 82.0 | 1.49 | 0.0247 | 0.012 | 99.7 | 1.52 | 0.0272 | 0.007 | 132.1 | 1.60 | 0.0313 | 0.007 | 132.1 | 1.60 | 0.0313 |
| 1.00 | 0.010 | 86.3 | 1.57 | 0.0000 | 0.012 | 103.0 | 1.57 | 0.0000 | 0.007 | 132.4 | 1.61 | 0.0000 | 0.007 | 132.4 | 1.61 | 0.0000 |

ตารางที่ ๖-6 แสดงผลการกระจายตัวของความถี่สัณฐานและอัตราการไหลในการทดลองของท่อลมผ่า รูปแบบที่ 3

| x/L | EXPERIMENT case 3.1 | | | | | EXPERIMENT case 3.2 | | | | | EXPERIMENT case 3.3 | | | | | EXPERIMENT case 3.4 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.453 | 11.8 | 1.00 | 0.0000 | 0.470 | 12.8 | 1.00 | 0.0000 | 0.488 | 0.488 | 13.7 | 1.00 | 0.0000 | 0.502 | 0.502 | 14.7 | 1.00 | 0.0000 | 0.502 | 0.502 |
| 0.23 | 0.446 | 3.6 | 0.31 | 0.0064 | 0.464 | 3.5 | 0.27 | 0.0063 | 0.482 | 0.482 | 4.0 | 0.29 | 0.0067 | 0.495 | 0.495 | 4.5 | 0.31 | 0.0071 | 0.495 | 0.495 |
| 0.26 | 0.440 | 3.9 | 0.33 | 0.0066 | 0.457 | 3.8 | 0.29 | 0.0065 | 0.475 | 0.475 | 4.3 | 0.31 | 0.0069 | 0.487 | 0.487 | 4.8 | 0.33 | 0.0074 | 0.487 | 0.487 |
| 0.30 | 0.431 | 6.2 | 0.53 | 0.0085 | 0.449 | 3.9 | 0.31 | 0.0083 | 0.466 | 0.466 | 5.5 | 0.40 | 0.0088 | 0.478 | 0.478 | 7.8 | 0.53 | 0.0094 | 0.478 | 0.478 |
| 0.34 | 0.424 | 4.6 | 0.39 | 0.0072 | 0.442 | 4.5 | 0.36 | 0.0071 | 0.458 | 0.458 | 5.1 | 0.37 | 0.0076 | 0.470 | 0.470 | 5.7 | 0.39 | 0.0080 | 0.470 | 0.470 |
| 0.38 | 0.415 | 7.7 | 0.66 | 0.0094 | 0.432 | 7.8 | 0.61 | 0.0094 | 0.448 | 0.448 | 8.7 | 0.63 | 0.0099 | 0.459 | 0.459 | 9.7 | 0.66 | 0.0104 | 0.459 | 0.459 |
| 0.42 | 0.403 | 11.6 | 0.99 | 0.0115 | 0.421 | 11.9 | 0.94 | 0.0116 | 0.436 | 0.436 | 13.2 | 0.96 | 0.0122 | 0.447 | 0.447 | 14.5 | 0.99 | 0.0128 | 0.447 | 0.447 |
| 0.45 | 0.389 | 17.8 | 1.51 | 0.0143 | 0.406 | 18.8 | 1.48 | 0.0146 | 0.421 | 0.421 | 20.5 | 1.49 | 0.0152 | 0.431 | 0.431 | 22.3 | 1.51 | 0.0158 | 0.431 | 0.431 |
| 0.49 | 0.372 | 25.6 | 2.17 | 0.0171 | 0.389 | 24.9 | 1.96 | 0.0176 | 0.403 | 0.403 | 23.5 | 1.71 | 0.0183 | 0.412 | 0.412 | 32.0 | 2.17 | 0.0190 | 0.412 | 0.412 |
| 0.53 | 0.354 | 23.9 | 2.03 | 0.0174 | 0.371 | 25.5 | 2.00 | 0.0178 | 0.383 | 0.383 | 27.0 | 1.97 | 0.0196 | 0.393 | 0.393 | 29.9 | 2.03 | 0.0193 | 0.393 | 0.393 |
| 0.57 | 0.334 | 27.1 | 2.31 | 0.0198 | 0.350 | 29.1 | 2.28 | 0.0204 | 0.360 | 0.360 | 32.1 | 2.33 | 0.0228 | 0.371 | 0.371 | 33.9 | 2.31 | 0.0220 | 0.371 | 0.371 |
| 0.60 | 0.313 | 30.5 | 2.59 | 0.0210 | 0.327 | 38.1 | 2.99 | 0.0233 | 0.336 | 0.336 | 34.3 | 2.50 | 0.0246 | 0.347 | 0.347 | 38.1 | 2.59 | 0.0233 | 0.347 | 0.347 |
| 0.64 | 0.292 | 28.5 | 2.42 | 0.0217 | 0.303 | 35.6 | 2.79 | 0.0240 | 0.311 | 0.311 | 38.0 | 2.77 | 0.0248 | 0.323 | 0.323 | 35.6 | 2.42 | 0.0240 | 0.323 | 0.323 |
| 0.68 | 0.267 | 38.1 | 3.24 | 0.0251 | 0.275 | 47.6 | 3.74 | 0.0278 | 0.283 | 0.283 | 41.9 | 3.05 | 0.0282 | 0.296 | 0.296 | 47.6 | 3.24 | 0.0278 | 0.296 | 0.296 |
| 0.72 | 0.239 | 35.1 | 2.98 | 0.0276 | 0.245 | 43.9 | 3.44 | 0.0306 | 0.251 | 0.251 | 46.7 | 3.40 | 0.0315 | 0.265 | 0.265 | 43.9 | 2.98 | 0.0306 | 0.265 | 0.265 |
| 0.75 | 0.209 | 35.9 | 3.05 | 0.0304 | 0.211 | 44.9 | 3.52 | 0.0337 | 0.217 | 0.217 | 44.9 | 3.27 | 0.0337 | 0.231 | 0.231 | 44.9 | 3.05 | 0.0337 | 0.231 | 0.231 |
| 0.79 | 0.179 | 35.0 | 2.98 | 0.0300 | 0.178 | 43.8 | 3.43 | 0.0333 | 0.183 | 0.183 | 46.5 | 3.39 | 0.0343 | 0.198 | 0.198 | 43.8 | 2.98 | 0.0333 | 0.198 | 0.198 |
| 0.83 | 0.144 | 43.7 | 3.72 | 0.0347 | 0.139 | 49.7 | 3.90 | 0.0385 | 0.145 | 0.145 | 53.1 | 3.86 | 0.0379 | 0.159 | 0.159 | 54.7 | 3.72 | 0.0385 | 0.159 | 0.159 |
| 0.87 | 0.108 | 42.9 | 3.65 | 0.0360 | 0.099 | 46.2 | 3.63 | 0.0399 | 0.106 | 0.106 | 50.5 | 3.68 | 0.0388 | 0.120 | 0.120 | 53.6 | 3.65 | 0.0399 | 0.120 | 0.120 |
| 0.91 | 0.071 | 45.1 | 3.84 | 0.0370 | 0.058 | 48.7 | 3.82 | 0.0410 | 0.067 | 0.067 | 53.2 | 3.87 | 0.0398 | 0.079 | 0.079 | 56.4 | 3.84 | 0.0410 | 0.079 | 0.079 |
| 0.94 | 0.033 | 48.1 | 4.08 | 0.0381 | 0.016 | 51.8 | 4.06 | 0.0423 | 0.025 | 0.025 | 54.9 | 4.00 | 0.0417 | 0.036 | 0.036 | 60.1 | 4.08 | 0.0423 | 0.036 | 0.036 |
| 1.00 | 0.033 | 47.1 | 4.00 | 0.0000 | 0.016 | 51.0 | 4.00 | 0.0000 | 0.025 | 0.025 | 55.9 | 4.07 | 0.0000 | 0.036 | 0.036 | 58.8 | 4.00 | 0.0000 | 0.036 | 0.036 |

ตารางที่ ๖-6 แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลในการทดลองของพอลิเมอร์ 3 รูปแบบที่ 3 (ต่อ)

| x/L | EXPERIMENT case 3.5 | | | | | EXPERIMENT case 3.6 | | | | | EXPERIMENT case 3.7 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.532 | 15.7 | 1.00 | 0.0000 | 0.564 | 17.7 | 1.00 | 0.0000 | 0.595 | 19.6 | 1.00 | 0.0000 | | | |
| 0.23 | 0.523 | 6.3 | 0.40 | 0.0084 | 0.555 | 7.4 | 0.42 | 0.0091 | 0.585 | 8.1 | 0.41 | 0.0095 | | | |
| 0.26 | 0.515 | 6.7 | 0.42 | 0.0087 | 0.546 | 7.7 | 0.44 | 0.0093 | 0.576 | 8.8 | 0.45 | 0.0100 | | | |
| 0.30 | 0.504 | 7.4 | 0.47 | 0.0110 | 0.534 | 8.2 | 0.47 | 0.0120 | 0.563 | 14.1 | 0.72 | 0.0126 | | | |
| 0.34 | 0.494 | 7.7 | 0.49 | 0.0093 | 0.524 | 8.8 | 0.50 | 0.0100 | 0.553 | 9.6 | 0.49 | 0.0104 | | | |
| 0.38 | 0.482 | 12.9 | 0.82 | 0.0120 | 0.510 | 12.6 | 0.71 | 0.0134 | 0.539 | 15.3 | 0.78 | 0.0131 | | | |
| 0.42 | 0.468 | 14.9 | 0.95 | 0.0146 | 0.495 | 16.8 | 0.95 | 0.0155 | 0.524 | 21.2 | 1.08 | 0.0155 | | | |
| 0.45 | 0.450 | 22.1 | 1.41 | 0.0177 | 0.475 | 27.1 | 1.53 | 0.0196 | 0.507 | 26.9 | 1.37 | 0.0174 | | | |
| 0.49 | 0.429 | 31.1 | 1.98 | 0.0210 | 0.453 | 33.1 | 1.88 | 0.0217 | 0.486 | 36.8 | 1.88 | 0.0204 | | | |
| 0.53 | 0.407 | 36.5 | 2.33 | 0.0218 | 0.430 | 39.1 | 2.22 | 0.0236 | 0.463 | 42.2 | 2.15 | 0.0229 | | | |
| 0.57 | 0.381 | 38.6 | 2.46 | 0.0261 | 0.405 | 36.2 | 2.05 | 0.0252 | 0.437 | 39.8 | 2.03 | 0.0265 | | | |
| 0.60 | 0.354 | 40.5 | 2.58 | 0.0267 | 0.376 | 45.8 | 2.60 | 0.0284 | 0.409 | 46.8 | 2.39 | 0.0275 | | | |
| 0.64 | 0.328 | 39.8 | 2.54 | 0.0265 | 0.347 | 40.4 | 2.29 | 0.0293 | 0.380 | 48.8 | 2.49 | 0.0293 | | | |
| 0.68 | 0.296 | 47.8 | 3.05 | 0.0319 | 0.313 | 44.9 | 2.54 | 0.0337 | 0.346 | 46.1 | 2.35 | 0.0342 | | | |
| 0.72 | 0.263 | 52.6 | 3.36 | 0.0335 | 0.278 | 48.2 | 2.73 | 0.0349 | 0.307 | 50.7 | 2.58 | 0.0388 | | | |
| 0.75 | 0.226 | 55.4 | 3.53 | 0.0368 | 0.240 | 58.2 | 3.30 | 0.0384 | 0.264 | 60.9 | 3.10 | 0.0425 | | | |
| 0.79 | 0.189 | 54.0 | 3.44 | 0.0364 | 0.201 | 58.3 | 3.30 | 0.0384 | 0.222 | 60.8 | 3.10 | 0.0425 | | | |
| 0.83 | 0.147 | 57.3 | 3.65 | 0.0419 | 0.157 | 72.2 | 4.09 | 0.0442 | 0.174 | 71.4 | 3.64 | 0.0482 | | | |
| 0.87 | 0.104 | 61.6 | 3.93 | 0.0435 | 0.112 | 67.0 | 3.80 | 0.0446 | 0.123 | 74.0 | 3.77 | 0.0505 | | | |
| 0.91 | 0.059 | 64.8 | 4.13 | 0.0446 | 0.066 | 74.2 | 4.21 | 0.0470 | 0.073 | 74.2 | 3.79 | 0.0506 | | | |
| 0.94 | 0.015 | 65.0 | 4.14 | 0.0446 | 0.017 | 78.2 | 4.43 | 0.0482 | 0.021 | 77.7 | 3.96 | 0.0518 | | | |
| 1.00 | 0.015 | 65.7 | 4.19 | 0.0000 | 0.017 | 74.5 | 4.22 | 0.0000 | 0.021 | 83.4 | 4.25 | 0.0000 | | | |

ตารางที่ ๗-7 แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลที่อลิมปิก รูปแบบที่ 1

| x/L | ANSYS FLUENT case 1.1 | | | | | ANSYS FLUENT case 1.2 | | | | | ANSYS FLUENT case 1.3 | | | | | ANSYS FLUENT case 1.4 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|--|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|--|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|--|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|--|
| | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | |
| 0.00 | 0.188 | 32.2 | 1.00 | 0.0000 | | 0.210 | 40.2 | 1.00 | 0.0000 | | 0.266 | 64.7 | 1.00 | 0.0000 | | 0.290 | 76.0 | 1.00 | 0.0000 | |
| 0.23 | 0.184 | 31.7 | 0.98 | 0.0169 | | 0.206 | 39.9 | 0.99 | 0.0190 | | 0.260 | 63.9 | 0.99 | 0.0240 | | 0.258 | 75.6 | 1.00 | 0.0261 | |
| 0.30 | 0.167 | 32.9 | 1.02 | 0.0174 | | 0.187 | 41.3 | 1.03 | 0.0195 | | 0.236 | 66.3 | 1.02 | 0.0247 | | 0.231 | 78.4 | 1.03 | 0.0269 | |
| 0.38 | 0.150 | 33.9 | 1.05 | 0.0178 | | 0.168 | 42.6 | 1.06 | 0.0199 | | 0.212 | 68.3 | 1.06 | 0.0253 | | 0.203 | 80.8 | 1.06 | 0.0275 | |
| 0.45 | 0.132 | 34.8 | 1.08 | 0.0181 | | 0.147 | 43.7 | 1.09 | 0.0203 | | 0.187 | 70.2 | 1.08 | 0.0257 | | 0.176 | 83.1 | 1.09 | 0.0280 | |
| 0.53 | 0.114 | 35.6 | 1.10 | 0.0184 | | 0.127 | 44.7 | 1.11 | 0.0207 | | 0.161 | 71.7 | 1.11 | 0.0262 | | 0.147 | 84.9 | 1.12 | 0.0285 | |
| 0.60 | 0.096 | 36.2 | 1.12 | 0.0187 | | 0.107 | 45.4 | 1.13 | 0.0209 | | 0.135 | 72.9 | 1.13 | 0.0265 | | 0.119 | 86.4 | 1.14 | 0.0288 | |
| 0.68 | 0.077 | 36.7 | 1.14 | 0.0191 | | 0.086 | 46.0 | 1.14 | 0.0212 | | 0.109 | 73.8 | 1.14 | 0.0268 | | 0.089 | 87.5 | 1.15 | 0.0293 | |
| 0.75 | 0.058 | 37.1 | 1.15 | 0.0192 | | 0.065 | 46.4 | 1.16 | 0.0214 | | 0.082 | 74.4 | 1.15 | 0.0270 | | 0.060 | 88.3 | 1.16 | 0.0295 | |
| 0.83 | 0.039 | 37.5 | 1.16 | 0.0195 | | 0.044 | 46.8 | 1.16 | 0.0217 | | 0.055 | 74.8 | 1.16 | 0.0274 | | 0.030 | 88.9 | 1.17 | 0.0299 | |
| 0.91 | 0.020 | 37.7 | 1.17 | 0.0198 | | 0.022 | 47.0 | 1.17 | 0.0220 | | 0.028 | 75.1 | 1.16 | 0.0278 | | 0.000 | 89.2 | 1.17 | 0.0304 | |
| 1.00 | 0.000 | 38.6 | 1.20 | 0.0000 | | 0.000 | 48.2 | 1.20 | 0.0000 | | 0.000 | 77.8 | 1.20 | 0.0000 | | 0.000 | 91.4 | 1.20 | 0.0000 | |

ตารางที่ ๗-7 แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลในท่อลมผ้า รูปแบบที่ 1 (ต่อ)

| x/L | ANSYS FLUENT case 1.5 | | | | ANSYS FLUENT case 1.6 | | | | ANSYS FLUENT case 1.7 | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|
| | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] | Qx [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qk [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.326 | 95.8 | 1.00 | 0.0000 | 0.358 | 117.1 | 1.00 | 0.0000 | 0.388 | 135.3 | 1.00 | 0.0000 |
| 0.23 | 0.319 | 94.9 | 0.99 | 0.0294 | 0.351 | 115.4 | 0.99 | 0.0323 | 0.380 | 135.2 | 1.00 | 0.0349 |
| 0.30 | 0.290 | 99.4 | 1.04 | 0.0303 | 0.318 | 119.6 | 1.02 | 0.0333 | 0.345 | 140.2 | 1.04 | 0.0360 |
| 0.38 | 0.260 | 102.5 | 1.07 | 0.0309 | 0.286 | 123.4 | 1.05 | 0.0340 | 0.309 | 144.6 | 1.07 | 0.0368 |
| 0.45 | 0.228 | 105.3 | 1.10 | 0.0315 | 0.251 | 126.9 | 1.08 | 0.0347 | 0.272 | 148.7 | 1.10 | 0.0375 |
| 0.53 | 0.197 | 107.6 | 1.12 | 0.0321 | 0.217 | 129.8 | 1.11 | 0.0353 | 0.235 | 152.1 | 1.12 | 0.0382 |
| 0.60 | 0.165 | 109.4 | 1.14 | 0.0325 | 0.182 | 132.1 | 1.13 | 0.0357 | 0.197 | 154.9 | 1.14 | 0.0387 |
| 0.68 | 0.133 | 110.7 | 1.16 | 0.0328 | 0.146 | 133.7 | 1.14 | 0.0361 | 0.158 | 156.8 | 1.16 | 0.0391 |
| 0.75 | 0.100 | 111.5 | 1.16 | 0.0331 | 0.110 | 134.7 | 1.15 | 0.0364 | 0.119 | 158.0 | 1.17 | 0.0394 |
| 0.83 | 0.067 | 112.1 | 1.17 | 0.0335 | 0.074 | 135.4 | 1.16 | 0.0369 | 0.080 | 158.8 | 1.17 | 0.0400 |
| 0.91 | 0.034 | 112.4 | 1.17 | 0.0341 | 0.037 | 135.8 | 1.16 | 0.0375 | 0.040 | 159.2 | 1.18 | 0.0406 |
| 1.00 | 0.000 | 115.6 | 1.21 | 0.0000 | 0.000 | 141.0 | 1.20 | 0.0000 | 0.000 | 163.2 | 1.21 | 0.0000 |

ตารางที่ ข-8 แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลท่อลมฟ้า รูปแบบที่ 2

| x/L | ANSYS FLUENT case 2.1 | | | | | ANSYS FLUENT case 2.2 | | | | | ANSYS FLUENT case 2.3 | | | | | ANSYS FLUENT case 2.4 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.240 | 11.4 | 1.00 | 0.0000 | 0.290 | 16.4 | 1.00 | 0.0000 | 0.312 | 28.3 | 1.00 | 0.0000 | 0.384 | 30.1 | 1.00 | 0.0000 | | | | |
| 0.23 | 0.234 | 10.3 | 0.91 | 0.0082 | 0.283 | 15.2 | 0.93 | 0.0099 | 0.305 | 25.2 | 0.89 | 0.0109 | 0.367 | 29.1 | 0.97 | 0.0132 | | | | |
| 0.26 | 0.227 | 11.1 | 0.97 | 0.0086 | 0.274 | 16.3 | 1.00 | 0.0105 | 0.295 | 27.0 | 0.95 | 0.0115 | 0.353 | 31.2 | 1.04 | 0.0139 | | | | |
| 0.30 | 0.218 | 11.7 | 1.03 | 0.0091 | 0.264 | 17.3 | 1.06 | 0.0111 | 0.283 | 28.6 | 1.01 | 0.0122 | 0.338 | 33.1 | 1.10 | 0.0148 | | | | |
| 0.34 | 0.209 | 12.5 | 1.10 | 0.0096 | 0.252 | 18.4 | 1.13 | 0.0117 | 0.271 | 30.3 | 1.07 | 0.0128 | 0.322 | 35.1 | 1.17 | 0.0156 | | | | |
| 0.38 | 0.199 | 13.2 | 1.16 | 0.0099 | 0.240 | 19.4 | 1.19 | 0.0120 | 0.258 | 32.0 | 1.13 | 0.0132 | 0.307 | 37.2 | 1.24 | 0.0161 | | | | |
| 0.42 | 0.190 | 13.9 | 1.22 | 0.0104 | 0.229 | 20.5 | 1.25 | 0.0126 | 0.245 | 33.6 | 1.19 | 0.0138 | 0.290 | 39.1 | 1.30 | 0.0169 | | | | |
| 0.45 | 0.179 | 14.6 | 1.28 | 0.0108 | 0.216 | 21.5 | 1.31 | 0.0132 | 0.231 | 35.2 | 1.24 | 0.0143 | 0.272 | 41.1 | 1.37 | 0.0176 | | | | |
| 0.49 | 0.169 | 15.3 | 1.34 | 0.0112 | 0.204 | 22.5 | 1.37 | 0.0137 | 0.217 | 36.8 | 1.30 | 0.0148 | 0.254 | 43.0 | 1.43 | 0.0182 | | | | |
| 0.53 | 0.157 | 15.9 | 1.40 | 0.0115 | 0.190 | 23.4 | 1.43 | 0.0140 | 0.202 | 38.2 | 1.35 | 0.0151 | 0.236 | 44.8 | 1.49 | 0.0187 | | | | |
| 0.57 | 0.146 | 16.5 | 1.45 | 0.0118 | 0.176 | 24.4 | 1.49 | 0.0144 | 0.188 | 39.5 | 1.40 | 0.0154 | 0.216 | 46.5 | 1.55 | 0.0191 | | | | |
| 0.60 | 0.134 | 17.1 | 1.50 | 0.0123 | 0.161 | 25.2 | 1.54 | 0.0150 | 0.172 | 40.7 | 1.44 | 0.0160 | 0.196 | 48.0 | 1.60 | 0.0199 | | | | |
| 0.64 | 0.122 | 17.6 | 1.55 | 0.0125 | 0.146 | 25.9 | 1.58 | 0.0152 | 0.156 | 41.8 | 1.48 | 0.0163 | 0.176 | 49.4 | 1.64 | 0.0203 | | | | |
| 0.68 | 0.109 | 18.1 | 1.59 | 0.0129 | 0.131 | 26.6 | 1.62 | 0.0156 | 0.140 | 42.7 | 1.51 | 0.0167 | 0.156 | 50.6 | 1.68 | 0.0208 | | | | |
| 0.72 | 0.096 | 18.5 | 1.63 | 0.0131 | 0.116 | 27.2 | 1.66 | 0.0158 | 0.123 | 43.6 | 1.54 | 0.0169 | 0.135 | 51.7 | 1.72 | 0.0210 | | | | |
| 0.75 | 0.084 | 18.9 | 1.66 | 0.0134 | 0.100 | 27.7 | 1.69 | 0.0161 | 0.106 | 44.2 | 1.56 | 0.0171 | 0.113 | 52.7 | 1.75 | 0.0215 | | | | |
| 0.79 | 0.070 | 19.2 | 1.69 | 0.0137 | 0.084 | 28.1 | 1.72 | 0.0163 | 0.089 | 44.9 | 1.58 | 0.0174 | 0.091 | 53.6 | 1.78 | 0.0219 | | | | |
| 0.83 | 0.057 | 19.7 | 1.73 | 0.0139 | 0.068 | 28.5 | 1.74 | 0.0166 | 0.072 | 45.4 | 1.60 | 0.0176 | 0.069 | 54.4 | 1.81 | 0.0223 | | | | |
| 0.87 | 0.043 | 20.1 | 1.76 | 0.0140 | 0.051 | 28.8 | 1.76 | 0.0169 | 0.055 | 45.5 | 1.61 | 0.0180 | 0.047 | 55.2 | 1.84 | 0.0227 | | | | |
| 0.91 | 0.029 | 20.2 | 1.78 | 0.0142 | 0.034 | 29.1 | 1.78 | 0.0171 | 0.037 | 45.9 | 1.62 | 0.0182 | 0.023 | 56.2 | 1.87 | 0.0231 | | | | |
| 0.94 | 0.014 | 20.4 | 1.79 | 0.0145 | 0.017 | 29.2 | 1.79 | 0.0173 | 0.018 | 46.0 | 1.63 | 0.0184 | 0.000 | 57.0 | 1.89 | 0.0234 | | | | |
| 1.00 | 0.000 | 21.6 | 1.90 | 0.0000 | 0.000 | 31.4 | 1.82 | 0.0000 | 0.000 | 46.1 | 1.63 | 0.0000 | 0.000 | 57.8 | 1.92 | 0.0000 | | | | |

ตารางที่ ๗-8 แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลที่อุณหภูมิ รูปแบบที่ 2 (ต่อ)

| x/L | ANSYS FLUENT case 2.5 | | | | | ANSYS FLUENT case 2.6 | | | | | ANSYS FLUENT case 2.7 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.415 | 35.2 | 1.00 | 0.0000 | 0.451 | 40.8 | 1.00 | 0.0000 | 0.519 | 54.2 | 1.00 | 0.0000 | 0.0000 | | |
| 0.23 | 0.406 | 34.7 | 0.99 | 0.0143 | 0.441 | 38.5 | 0.94 | 0.0158 | 0.508 | 53.4 | 0.98 | 0.0180 | 0.0180 | | |
| 0.26 | 0.393 | 37.2 | 1.06 | 0.0151 | 0.426 | 41.4 | 1.01 | 0.0166 | 0.491 | 55.4 | 1.02 | 0.0189 | 0.0189 | | |
| 0.30 | 0.378 | 39.6 | 1.13 | 0.0161 | 0.410 | 44.0 | 1.08 | 0.0176 | 0.473 | 57.1 | 1.05 | 0.0201 | 0.0201 | | |
| 0.34 | 0.361 | 42.1 | 1.20 | 0.0169 | 0.392 | 46.8 | 1.15 | 0.0185 | 0.452 | 59.1 | 1.09 | 0.0212 | 0.0212 | | |
| 0.38 | 0.344 | 44.5 | 1.27 | 0.0174 | 0.373 | 49.4 | 1.21 | 0.0191 | 0.430 | 63.9 | 1.18 | 0.0219 | 0.0219 | | |
| 0.42 | 0.327 | 46.8 | 1.33 | 0.0182 | 0.355 | 52.1 | 1.28 | 0.0201 | 0.409 | 65.7 | 1.21 | 0.0230 | 0.0230 | | |
| 0.45 | 0.309 | 49.1 | 1.40 | 0.0190 | 0.334 | 54.7 | 1.34 | 0.0209 | 0.386 | 69.4 | 1.28 | 0.0239 | 0.0239 | | |
| 0.49 | 0.291 | 51.4 | 1.46 | 0.0197 | 0.314 | 57.1 | 1.40 | 0.0216 | 0.363 | 73.0 | 1.35 | 0.0248 | 0.0248 | | |
| 0.53 | 0.271 | 53.5 | 1.52 | 0.0202 | 0.292 | 59.3 | 1.45 | 0.0220 | 0.338 | 84.3 | 1.56 | 0.0254 | 0.0254 | | |
| 0.57 | 0.251 | 55.6 | 1.58 | 0.0207 | 0.271 | 61.4 | 1.50 | 0.0225 | 0.313 | 87.5 | 1.62 | 0.0260 | 0.0260 | | |
| 0.60 | 0.230 | 57.4 | 1.63 | 0.0215 | 0.248 | 63.2 | 1.55 | 0.0233 | 0.286 | 91.2 | 1.68 | 0.0270 | 0.0270 | | |
| 0.64 | 0.208 | 58.9 | 1.68 | 0.0219 | 0.224 | 65.7 | 1.61 | 0.0236 | 0.259 | 93.5 | 1.72 | 0.0273 | 0.0273 | | |
| 0.68 | 0.187 | 60.3 | 1.71 | 0.0224 | 0.201 | 66.9 | 1.64 | 0.0241 | 0.233 | 94.3 | 1.74 | 0.0279 | 0.0279 | | |
| 0.72 | 0.164 | 61.4 | 1.75 | 0.0226 | 0.177 | 68.9 | 1.69 | 0.0243 | 0.204 | 95.9 | 1.77 | 0.0281 | 0.0281 | | |
| 0.75 | 0.142 | 62.3 | 1.77 | 0.0229 | 0.153 | 70.8 | 1.73 | 0.0246 | 0.177 | 97.2 | 1.79 | 0.0285 | 0.0285 | | |
| 0.79 | 0.119 | 63.1 | 1.79 | 0.0232 | 0.128 | 71.5 | 1.75 | 0.0250 | 0.148 | 98.2 | 1.81 | 0.0288 | 0.0288 | | |
| 0.83 | 0.096 | 63.6 | 1.81 | 0.0235 | 0.103 | 74.0 | 1.81 | 0.0253 | 0.119 | 99.0 | 1.83 | 0.0293 | 0.0293 | | |
| 0.87 | 0.072 | 64.1 | 1.82 | 0.0239 | 0.078 | 74.3 | 1.82 | 0.0258 | 0.090 | 100.6 | 1.86 | 0.0298 | 0.0298 | | |
| 0.91 | 0.049 | 64.4 | 1.83 | 0.0242 | 0.053 | 75.6 | 1.85 | 0.0261 | 0.061 | 101.9 | 1.88 | 0.0302 | 0.0302 | | |
| 0.94 | 0.024 | 64.6 | 1.84 | 0.0246 | 0.026 | 76.7 | 1.88 | 0.0265 | 0.030 | 102.1 | 1.88 | 0.0306 | 0.0306 | | |
| 1.00 | 0.000 | 66.9 | 1.90 | 0.0000 | 0.000 | 78.3 | 1.92 | 0.0000 | 0.000 | 104.0 | 1.92 | 0.0000 | 0.0000 | | |

ตารางที่ ๑-9 แสดงการกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลที่อุณหภูมิ 300 K รูปแบบที่ 3

| x/L | ANSYS FLUENT case 3.1 | | | | | ANSYS FLUENT case 3.2 | | | | | ANSYS FLUENT case 3.3 | | | | | ANSYS FLUENT case 3.4 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.452 | 7.3 | 1.00 | 0.0000 | 0.470 | 7.8 | 1.00 | 0.0000 | 0.488 | 8.4 | 1.00 | 0.0000 | 0.502 | 8.8 | 1.00 | 0.0000 | | | | |
| 0.23 | 0.438 | 4.2 | 0.58 | 0.0053 | 0.460 | 4.5 | 0.58 | 0.0055 | 0.478 | 4.8 | 0.57 | 0.0058 | 0.491 | 5.1 | 0.58 | 0.0059 | | | | |
| 0.26 | 0.432 | 5.0 | 0.68 | 0.0065 | 0.455 | 5.3 | 0.68 | 0.0067 | 0.473 | 5.7 | 0.68 | 0.0071 | 0.486 | 6.0 | 0.68 | 0.0072 | | | | |
| 0.30 | 0.424 | 5.8 | 0.79 | 0.0074 | 0.449 | 6.2 | 0.79 | 0.0076 | 0.466 | 6.6 | 0.79 | 0.0079 | 0.479 | 7.0 | 0.79 | 0.0081 | | | | |
| 0.34 | 0.415 | 6.9 | 0.94 | 0.0087 | 0.441 | 7.3 | 0.93 | 0.0090 | 0.458 | 7.8 | 0.93 | 0.0094 | 0.471 | 8.3 | 0.94 | 0.0096 | | | | |
| 0.38 | 0.406 | 8.1 | 1.11 | 0.0099 | 0.431 | 8.5 | 1.10 | 0.0103 | 0.448 | 9.2 | 1.10 | 0.0107 | 0.460 | 9.7 | 1.10 | 0.0110 | | | | |
| 0.42 | 0.394 | 9.6 | 1.32 | 0.0118 | 0.422 | 10.1 | 1.30 | 0.0122 | 0.438 | 10.9 | 1.30 | 0.0127 | 0.450 | 11.5 | 1.30 | 0.0131 | | | | |
| 0.45 | 0.381 | 11.4 | 1.56 | 0.0139 | 0.409 | 12.0 | 1.54 | 0.0144 | 0.425 | 12.9 | 1.54 | 0.0150 | 0.437 | 13.6 | 1.55 | 0.0154 | | | | |
| 0.49 | 0.365 | 13.4 | 1.84 | 0.0161 | 0.396 | 14.2 | 1.82 | 0.0167 | 0.411 | 15.3 | 1.82 | 0.0174 | 0.423 | 16.1 | 1.83 | 0.0178 | | | | |
| 0.53 | 0.347 | 15.8 | 2.16 | 0.0184 | 0.379 | 16.6 | 2.14 | 0.0191 | 0.394 | 17.9 | 2.13 | 0.0198 | 0.405 | 18.9 | 2.14 | 0.0203 | | | | |
| 0.57 | 0.326 | 18.4 | 2.52 | 0.0209 | 0.360 | 19.4 | 2.49 | 0.0217 | 0.375 | 20.9 | 2.49 | 0.0225 | 0.385 | 22.1 | 2.50 | 0.0232 | | | | |
| 0.60 | 0.302 | 21.2 | 2.91 | 0.0237 | 0.338 | 22.4 | 2.87 | 0.0246 | 0.351 | 24.1 | 2.87 | 0.0255 | 0.361 | 25.5 | 2.89 | 0.0263 | | | | |
| 0.64 | 0.276 | 24.1 | 3.31 | 0.0262 | 0.314 | 25.4 | 3.27 | 0.0272 | 0.326 | 27.4 | 3.26 | 0.0283 | 0.335 | 29.0 | 3.28 | 0.0291 | | | | |
| 0.68 | 0.247 | 27.1 | 3.71 | 0.0288 | 0.287 | 28.5 | 3.66 | 0.0299 | 0.298 | 30.8 | 3.65 | 0.0311 | 0.306 | 32.5 | 3.68 | 0.0320 | | | | |
| 0.72 | 0.217 | 29.8 | 4.08 | 0.0309 | 0.257 | 31.4 | 4.03 | 0.0321 | 0.267 | 33.9 | 4.02 | 0.0333 | 0.274 | 35.8 | 4.05 | 0.0343 | | | | |
| 0.75 | 0.185 | 32.3 | 4.42 | 0.0326 | 0.225 | 34.0 | 4.36 | 0.0339 | 0.234 | 36.7 | 4.36 | 0.0352 | 0.240 | 38.8 | 4.39 | 0.0362 | | | | |
| 0.79 | 0.150 | 34.2 | 4.69 | 0.0341 | 0.192 | 36.0 | 4.63 | 0.0354 | 0.199 | 38.9 | 4.62 | 0.0368 | 0.205 | 41.1 | 4.65 | 0.0379 | | | | |
| 0.83 | 0.115 | 35.8 | 4.90 | 0.0355 | 0.156 | 37.6 | 4.84 | 0.0369 | 0.162 | 40.6 | 4.83 | 0.0383 | 0.167 | 42.9 | 4.86 | 0.0394 | | | | |
| 0.87 | 0.078 | 37.2 | 5.09 | 0.0368 | 0.120 | 39.1 | 5.03 | 0.0382 | 0.124 | 42.3 | 5.02 | 0.0397 | 0.128 | 44.7 | 5.06 | 0.0408 | | | | |
| 0.91 | 0.040 | 38.6 | 5.29 | 0.0381 | 0.081 | 40.7 | 5.23 | 0.0396 | 0.084 | 43.9 | 5.22 | 0.0411 | 0.087 | 46.4 | 5.26 | 0.0423 | | | | |
| 0.94 | 0.000 | 40.7 | 5.58 | 0.0401 | 0.042 | 42.9 | 5.52 | 0.0416 | 0.043 | 46.3 | 5.50 | 0.0432 | 0.045 | 48.9 | 5.54 | 0.0444 | | | | |
| 1.00 | 0.000 | 42.6 | 5.84 | 0.0000 | 0.000 | 45.9 | 5.90 | 0.0000 | 0.000 | 49.8 | 5.92 | 0.0000 | 0.000 | 52.7 | 5.97 | 0.0000 | | | | |

ตารางที่ ๗-9 แสดงการกระจายตัวของความถี่สปีดและอัตราการไหลด้วยการจำลองการไหลที่อุณหภูมิ รูปแบบที่ 3 (ต่อ)

| x/L | ANSYS FLUENT case 3.5 | | | | | ANSYS FLUENT case 3.6 | | | | | ANSYS FLUENT case 3.7 | | | | |
|------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------|------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] | Ox [m ³ /s] | Ps,x [Pa] | Ps,x/Psin [-] | qx [m ³ /s] | qx [m ³ /s] |
| 0.00 | 0.532 | 9.8 | 1.00 | 0.0000 | 0.564 | 11.0 | 1.00 | 0.0000 | 0.595 | 12.2 | 1.00 | 0.0000 | 0.0000 | | |
| 0.23 | 0.521 | 6.4 | 0.65 | 0.0077 | 0.552 | 7.2 | 0.65 | 0.0085 | 0.582 | 8.5 | 0.70 | 0.0068 | 0.0068 | | |
| 0.26 | 0.513 | 7.4 | 0.75 | 0.0089 | 0.544 | 8.8 | 0.80 | 0.0099 | 0.576 | 10.3 | 0.84 | 0.0084 | 0.0084 | | |
| 0.30 | 0.505 | 8.5 | 0.87 | 0.0105 | 0.535 | 10.2 | 0.93 | 0.0116 | 0.568 | 11.5 | 0.95 | 0.0094 | 0.0094 | | |
| 0.34 | 0.494 | 9.9 | 1.01 | 0.0120 | 0.523 | 11.8 | 1.07 | 0.0132 | 0.558 | 13.3 | 1.09 | 0.0112 | 0.0112 | | |
| 0.38 | 0.481 | 11.5 | 1.17 | 0.0134 | 0.509 | 13.4 | 1.22 | 0.0146 | 0.546 | 15.3 | 1.26 | 0.0127 | 0.0127 | | |
| 0.42 | 0.469 | 12.4 | 1.26 | 0.0154 | 0.495 | 15.4 | 1.40 | 0.0168 | 0.535 | 17.8 | 1.46 | 0.0152 | 0.0152 | | |
| 0.45 | 0.453 | 15.5 | 1.58 | 0.0176 | 0.478 | 17.7 | 1.61 | 0.0191 | 0.519 | 20.8 | 1.71 | 0.0180 | 0.0180 | | |
| 0.49 | 0.437 | 17.9 | 1.82 | 0.0198 | 0.460 | 21.2 | 1.93 | 0.0213 | 0.503 | 24.3 | 2.00 | 0.0209 | 0.0209 | | |
| 0.53 | 0.417 | 21.6 | 2.20 | 0.0221 | 0.439 | 24.0 | 2.19 | 0.0236 | 0.481 | 28.3 | 2.32 | 0.0239 | 0.0239 | | |
| 0.57 | 0.395 | 24.6 | 2.50 | 0.0246 | 0.416 | 27.2 | 2.48 | 0.0262 | 0.458 | 32.8 | 2.69 | 0.0273 | 0.0273 | | |
| 0.60 | 0.370 | 27.8 | 2.83 | 0.0275 | 0.389 | 32.7 | 2.97 | 0.0292 | 0.430 | 37.6 | 3.09 | 0.0311 | 0.0311 | | |
| 0.64 | 0.343 | 31.1 | 3.17 | 0.0302 | 0.360 | 35.2 | 3.20 | 0.0319 | 0.399 | 42.7 | 3.50 | 0.0345 | 0.0345 | | |
| 0.68 | 0.313 | 34.4 | 3.51 | 0.0329 | 0.328 | 39.7 | 3.61 | 0.0347 | 0.365 | 47.8 | 3.92 | 0.0380 | 0.0380 | | |
| 0.72 | 0.280 | 37.6 | 3.84 | 0.0352 | 0.294 | 43.4 | 3.95 | 0.0370 | 0.327 | 52.6 | 4.32 | 0.0409 | 0.0409 | | |
| 0.75 | 0.245 | 40.6 | 4.13 | 0.0371 | 0.257 | 46.6 | 4.24 | 0.0390 | 0.287 | 56.9 | 4.67 | 0.0432 | 0.0432 | | |
| 0.79 | 0.208 | 42.9 | 4.37 | 0.0387 | 0.218 | 48.3 | 4.39 | 0.0407 | 0.244 | 60.4 | 4.96 | 0.0452 | 0.0452 | | |
| 0.83 | 0.169 | 44.7 | 4.56 | 0.0402 | 0.177 | 52.6 | 4.79 | 0.0422 | 0.198 | 63.1 | 5.18 | 0.0471 | 0.0471 | | |
| 0.87 | 0.130 | 47.4 | 4.83 | 0.0416 | 0.136 | 57.0 | 5.18 | 0.0436 | 0.152 | 65.6 | 5.38 | 0.0488 | 0.0488 | | |
| 0.91 | 0.088 | 49.0 | 5.00 | 0.0429 | 0.092 | 58.5 | 5.33 | 0.0449 | 0.103 | 67.7 | 5.56 | 0.0502 | 0.0502 | | |
| 0.94 | 0.045 | 53.5 | 5.45 | 0.0450 | 0.047 | 61.0 | 5.55 | 0.0470 | 0.053 | 70.9 | 5.82 | 0.0527 | 0.0527 | | |
| 1.00 | 0.000 | 59.1 | 6.03 | 0.0000 | 0.000 | 66.6 | 6.06 | 0.0000 | 0.000 | 74.0 | 6.07 | 0.0000 | 0.0000 | | |

ภาคผนวก ค
การแสดงผลในรูปของกราฟ

ประกอบด้วย

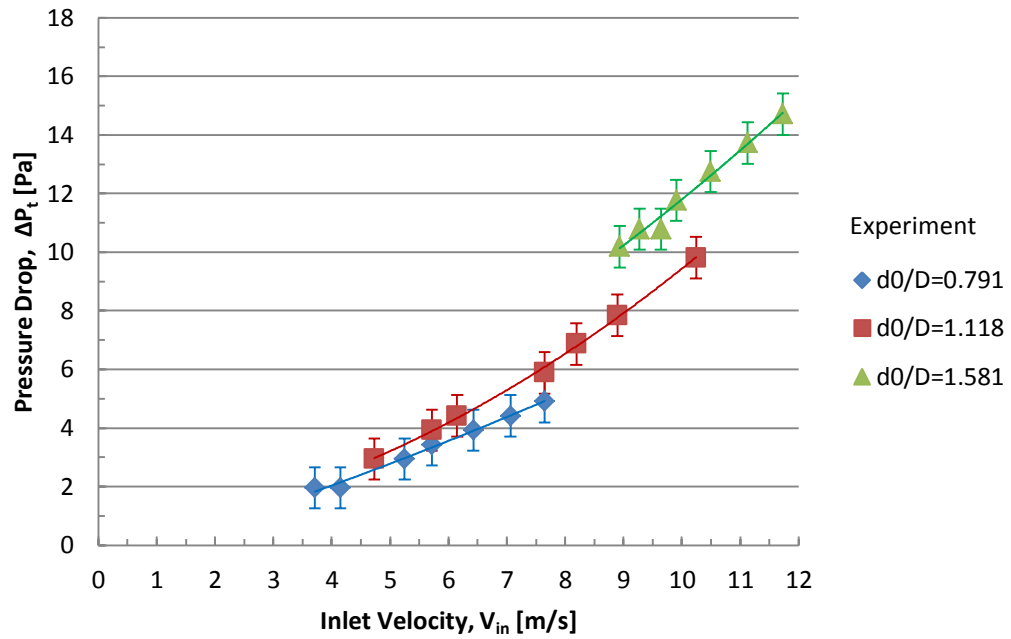
- รูปที่ ค-1 ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมของการทดลองในท่อลมผ้า
รูปแบบที่ 1 ถึง 3
- รูปที่ ค-2 ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้าของการ
ทดลองในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3 เมื่อ $e/D=0.000433$
- รูปที่ ค-3 ความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60
เฮิรตซ์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3
- รูปที่ ค-4 ถึง ค-6 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลม
ของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิรตซ์ ในท่อลมผ้ากรณีที่ 1.4, 2.4, 3.1
- รูปที่ ค-7 กราฟความเค้นต่อความเครียดของวัสดุผ้าที่ใช้ในงานวิจัย
- รูปที่ ค-8 ถึง ค-10 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการ
ทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1, 2, 3
- รูปที่ ค-11 ถึง ค-24 การเปรียบเทียบผลลัพธ์อัตราส่วนความดันสถิต/หรือ อัตราการไหลผ่าน
ช่องเปิด ต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลอง
การไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.1 ถึง 1.7
- รูปที่ ค-25 ถึง ค-38 การเปรียบเทียบผลลัพธ์อัตราส่วนความดันสถิต/หรือ อัตราการไหลผ่าน
ช่องเปิดต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลอง
การไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.1 ถึง 2.7

รูปที่ ค-39 ถึง ค-52 การเปรียบเทียบผลลัพธ์อัตราส่วนความดันสถิต/หรือ อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีสที่ 3.1 ถึง 3.7

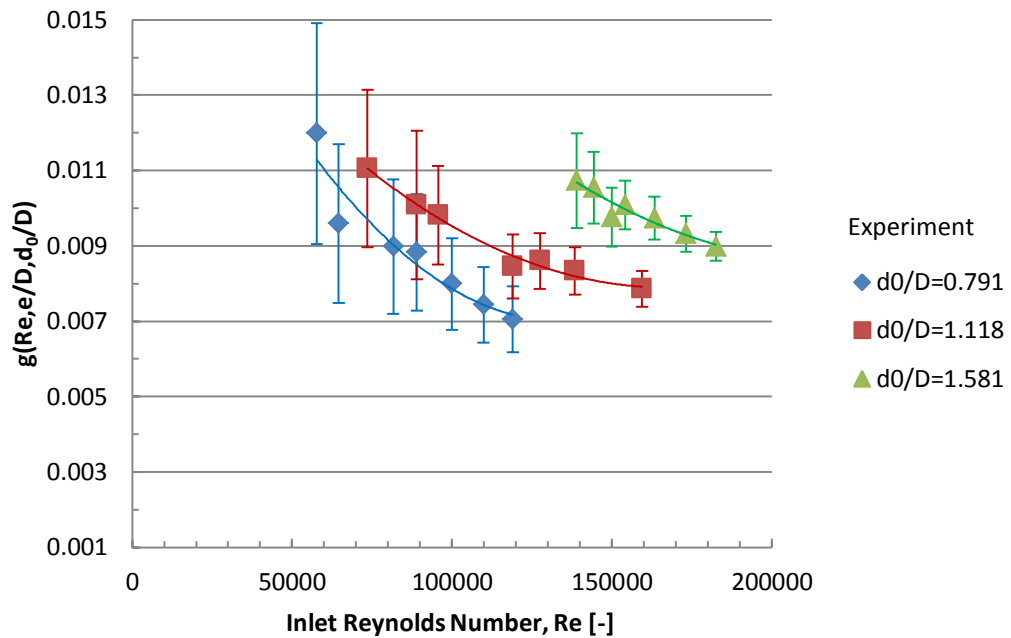
รูปที่ ค-53 ถึง ค-55 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์สขาเข้า จากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1, 2, 3 เมื่อ $e/D=0.000433$

รูปที่ ค-56 ถึง ค-58 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเฉลี่ยต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1, 2, 3

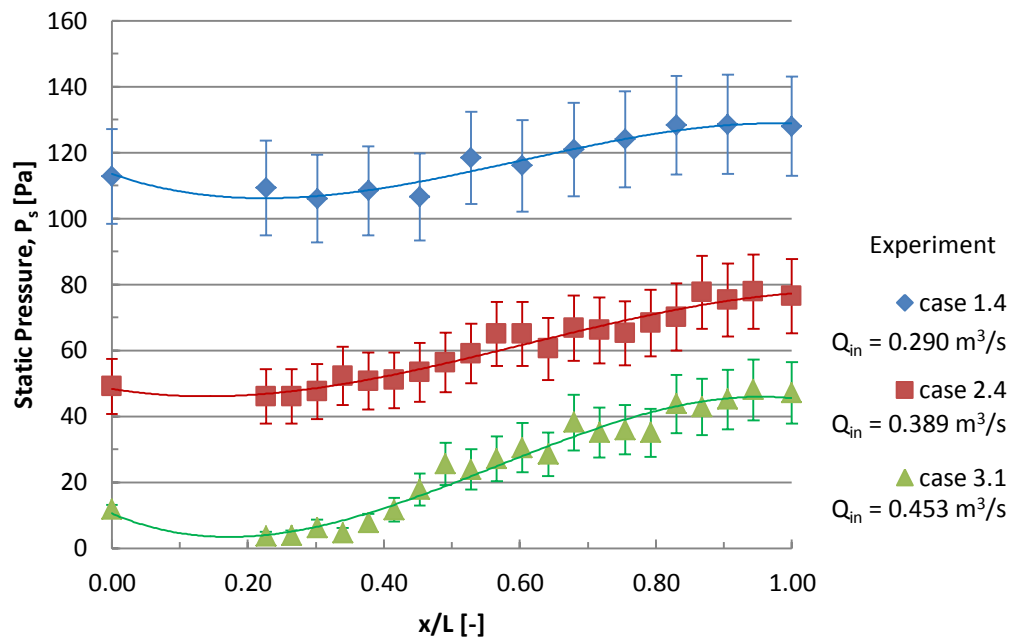
รูปที่ ค-59 ถึง ค-61 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความดันสถิตได้คืนต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1, 2, 3



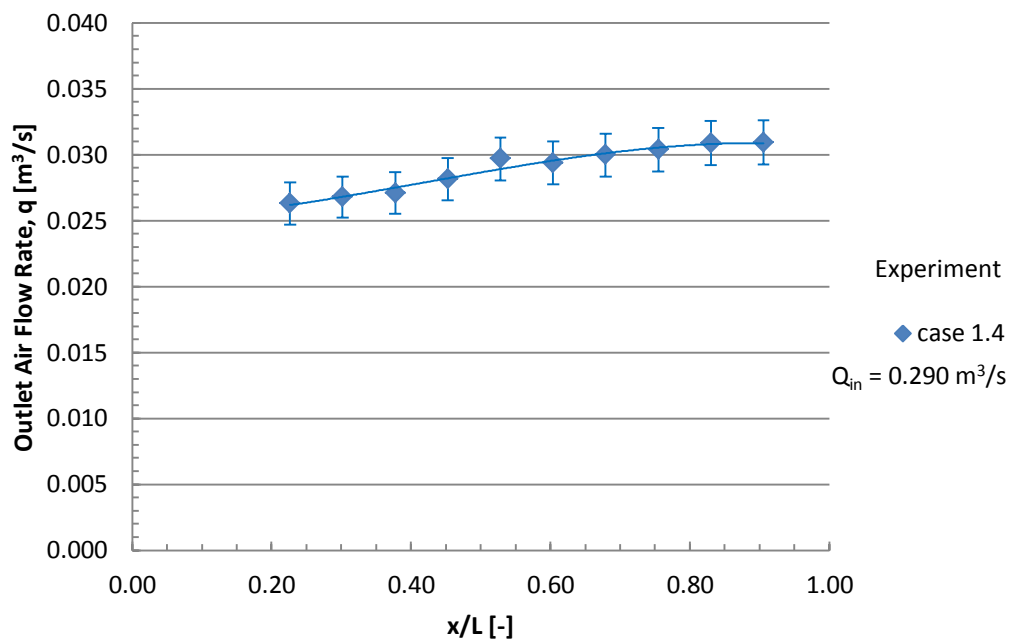
รูปที่ ค-1 ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม
ของการทดลอง ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3



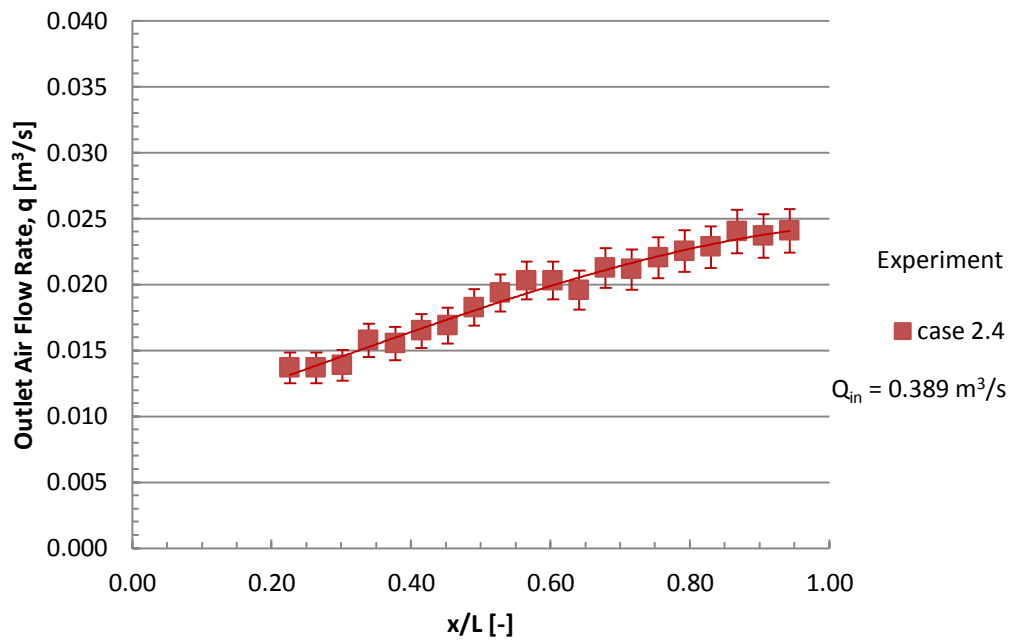
รูปที่ ค-2 ฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์ขาเข้า
ของการทดลอง ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3 เมื่อ $e/D=0.000433$



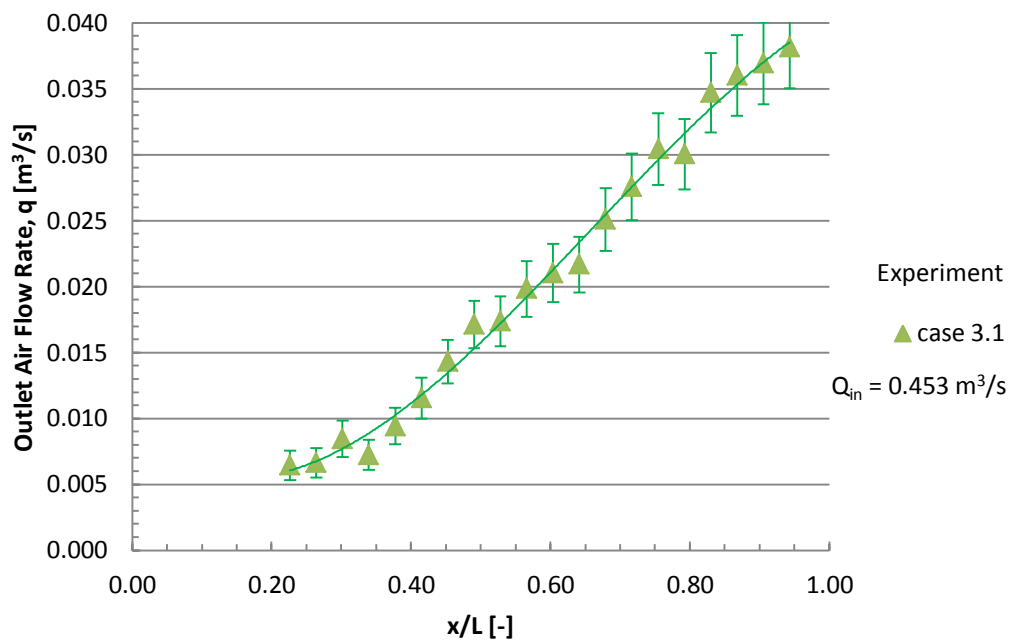
รูปที่ ค-3 ความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลอง ด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 ถึง 3



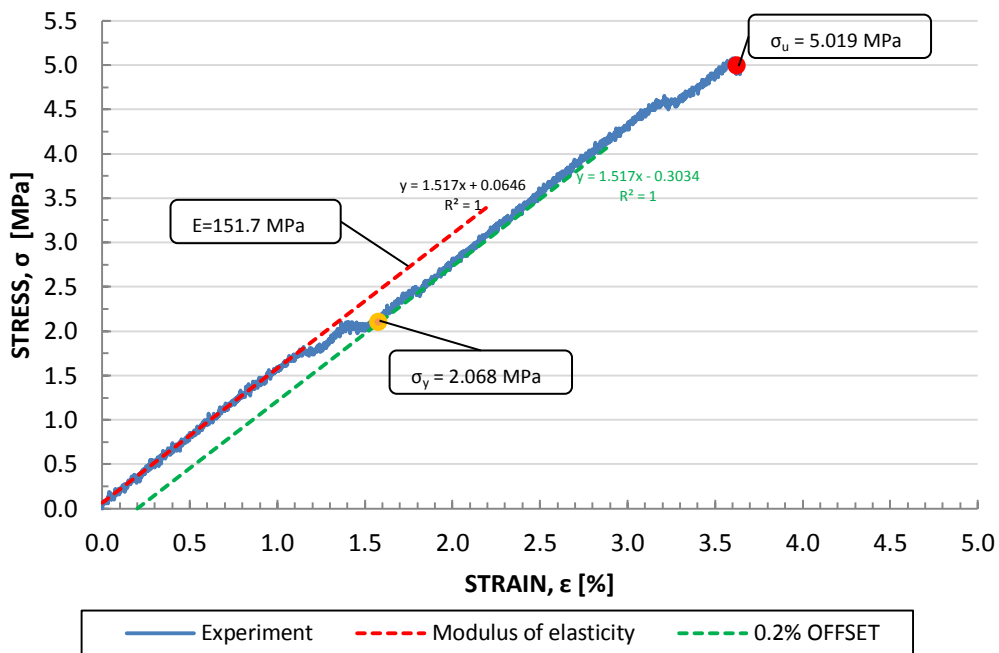
รูปที่ ค-4 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4



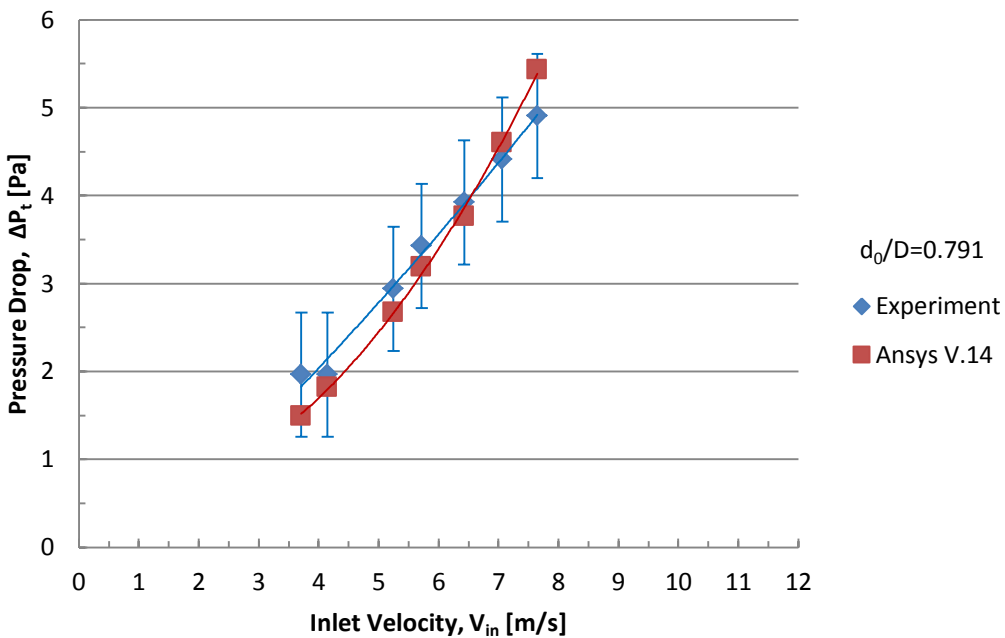
รูปที่ ค-5 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.4



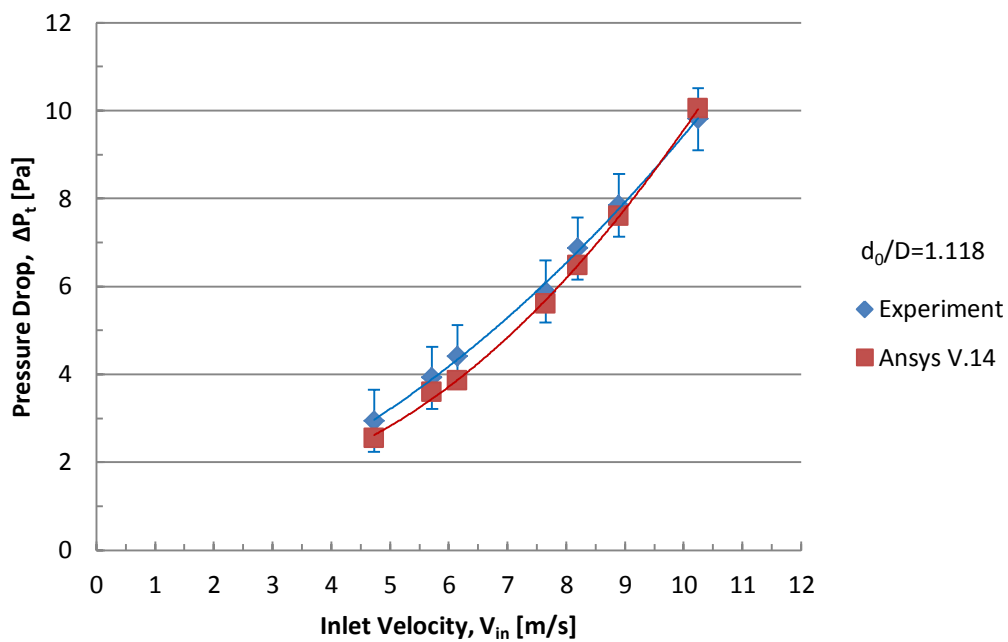
รูปที่ ค-6 อัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วนระยะทางท่อลมของการทดลองด้วยความถี่พัดลม 60 เฮิร์ตซ์ ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.1



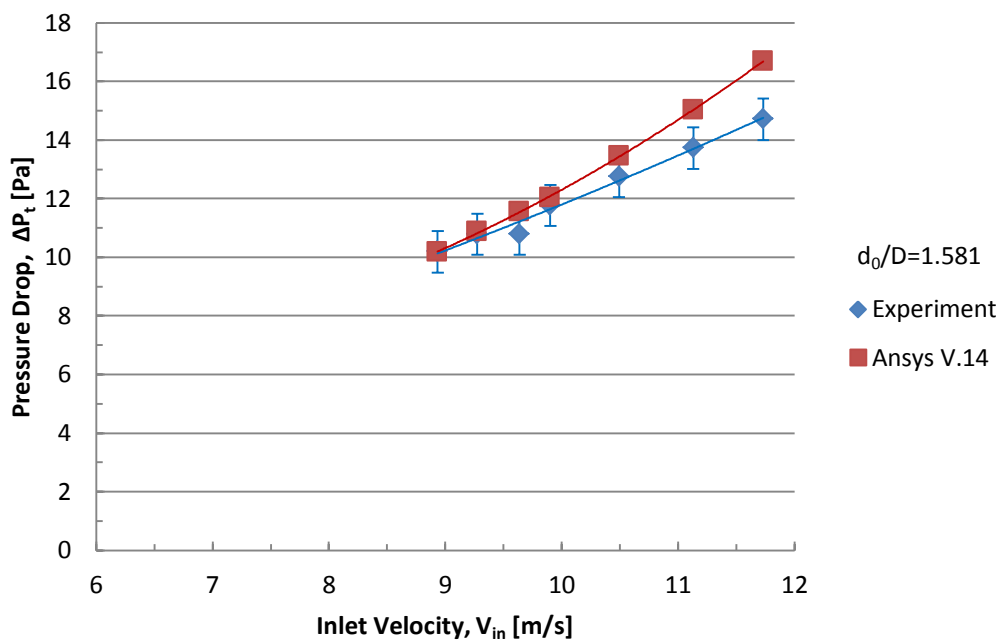
รูปที่ ค-7 กราฟความเค้นต่อความเครียดของวัสดุผ้าที่ใช้ในงานวิจัย



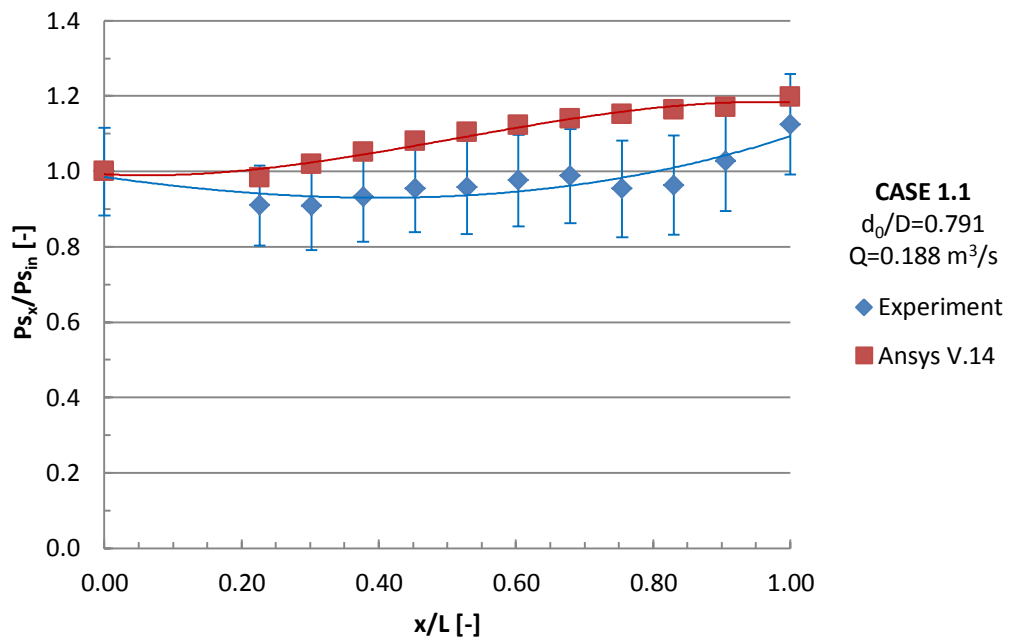
รูปที่ ค-8 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1



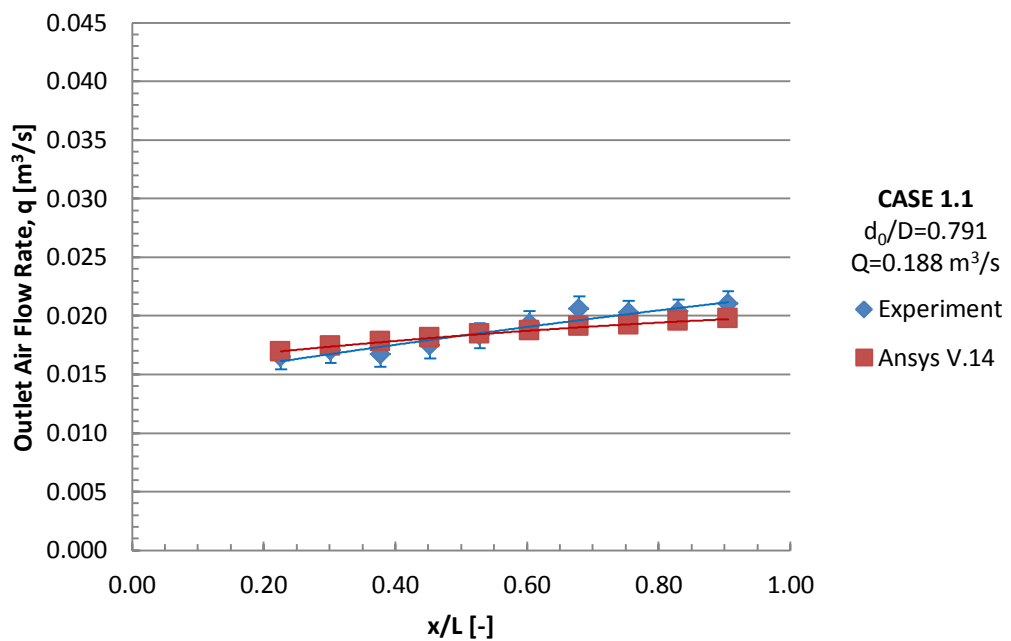
รูปที่ ค-9 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 2



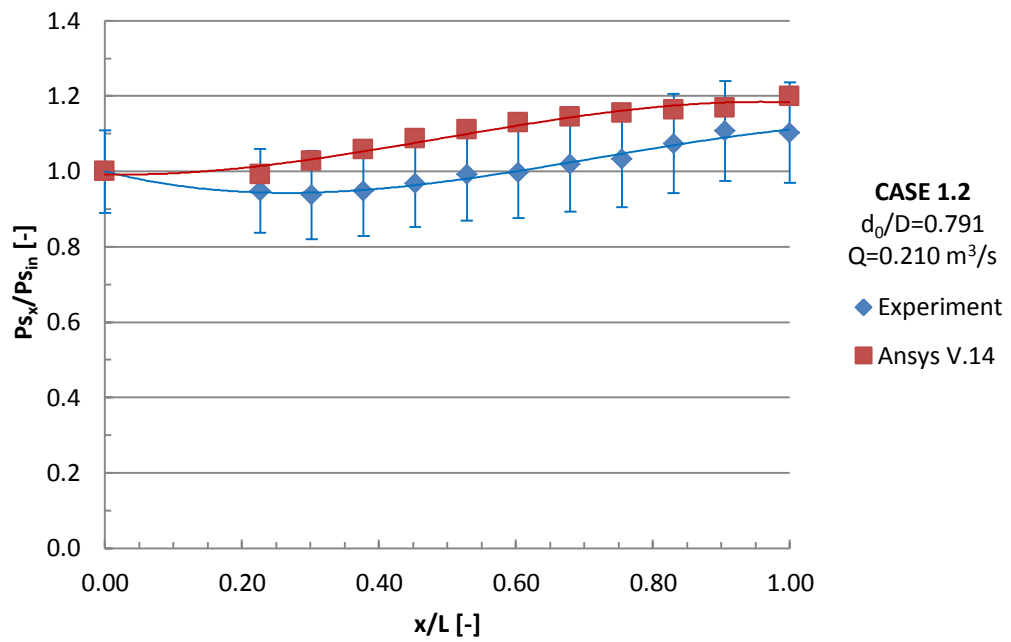
รูปที่ ค-10 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ความดันรวมลดต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 3



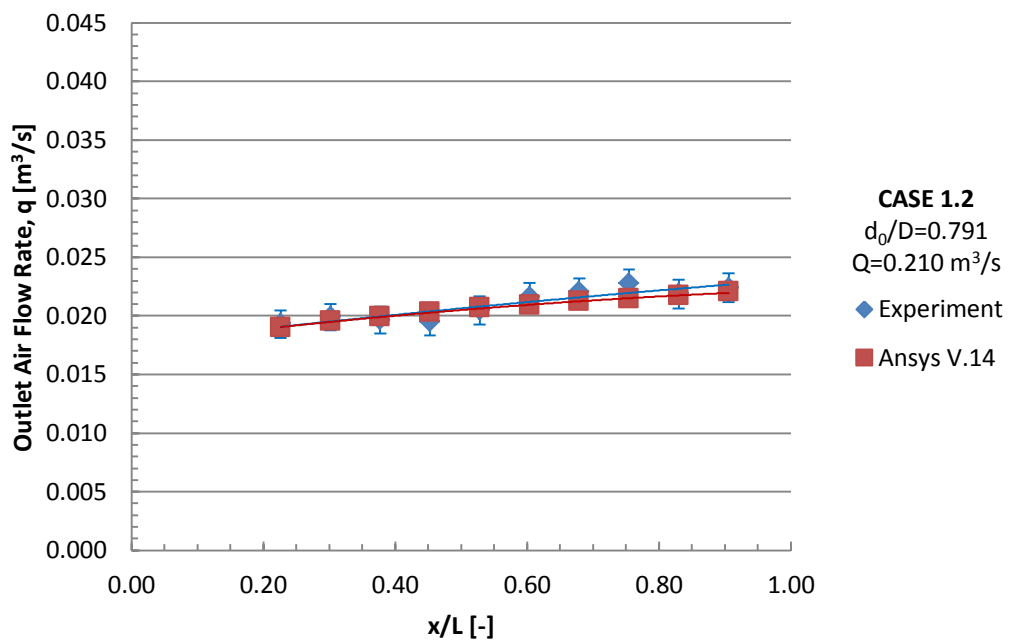
รูปที่ ค-11 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.1



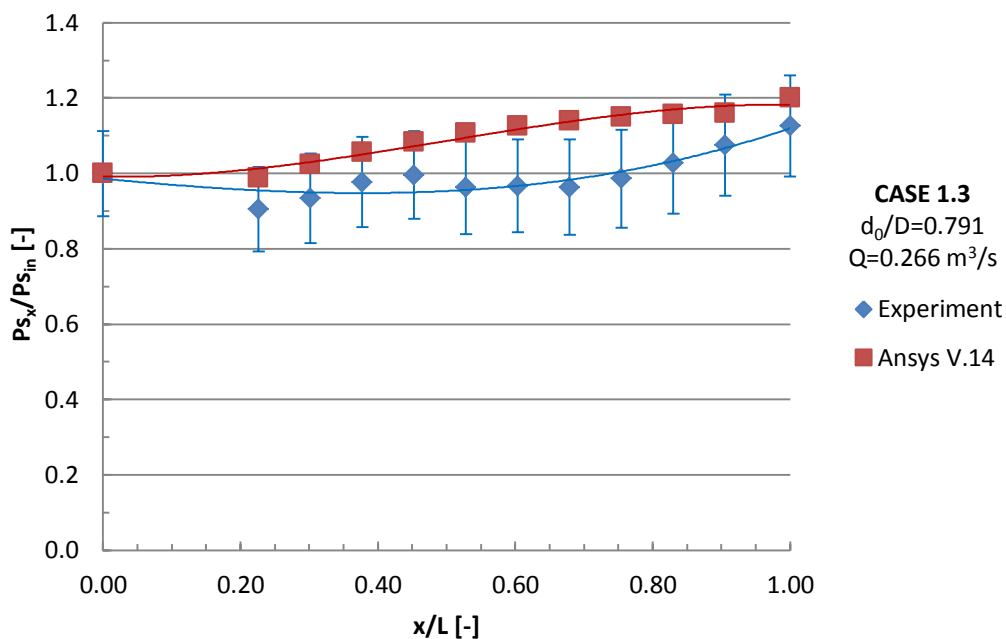
รูปที่ ค-12 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.1



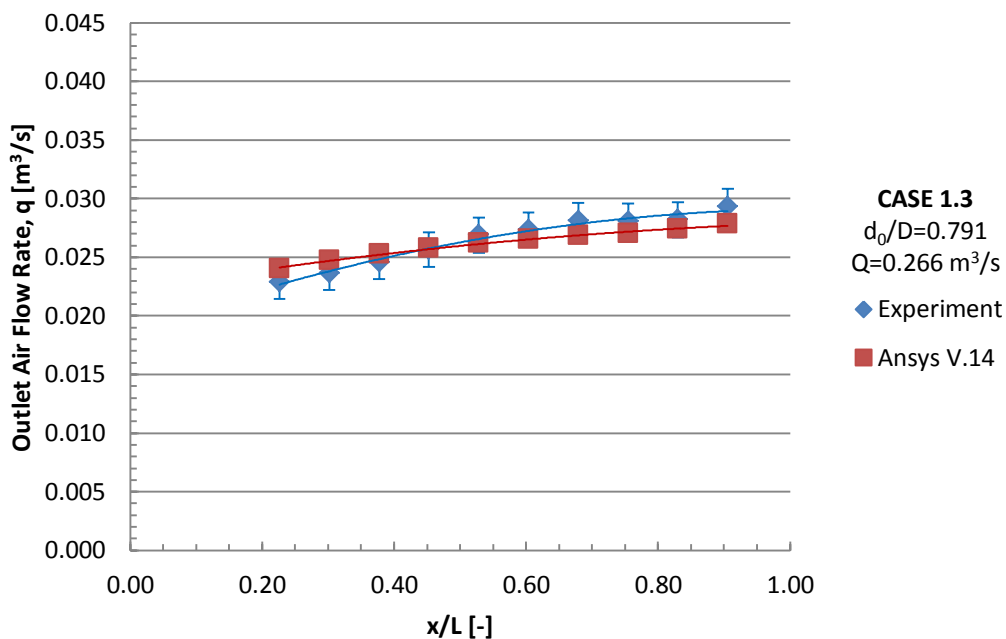
รูปที่ ค-13 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.2



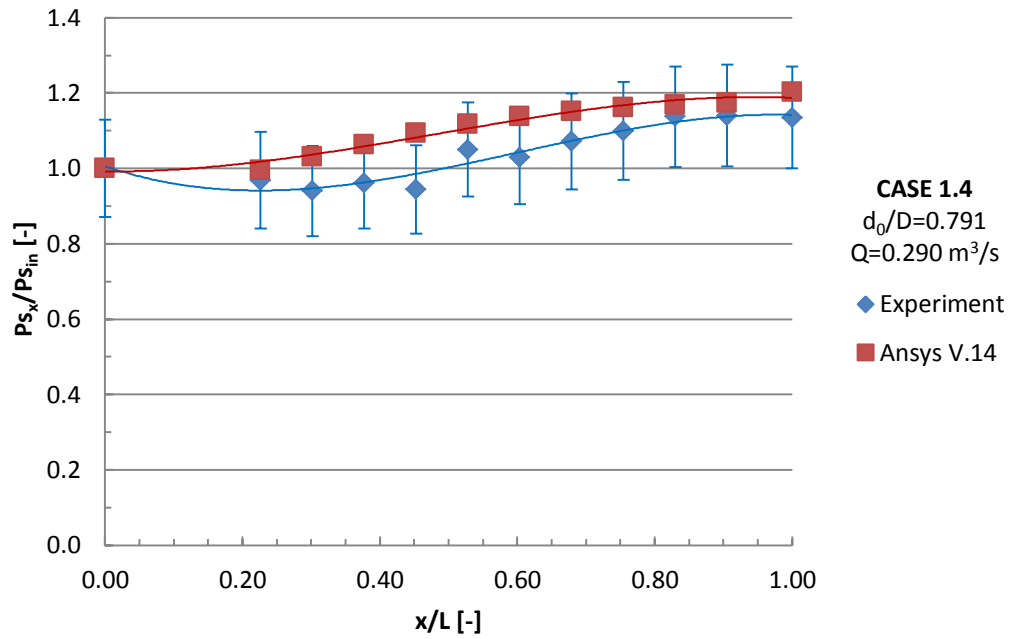
รูปที่ ค-14 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.2



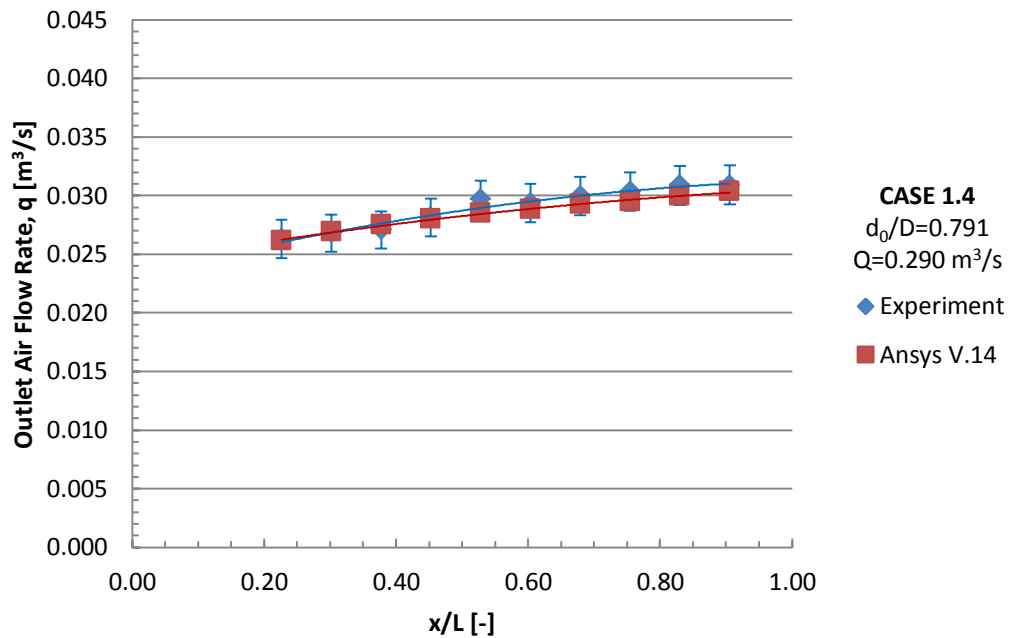
รูปที่ ค-15 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.3



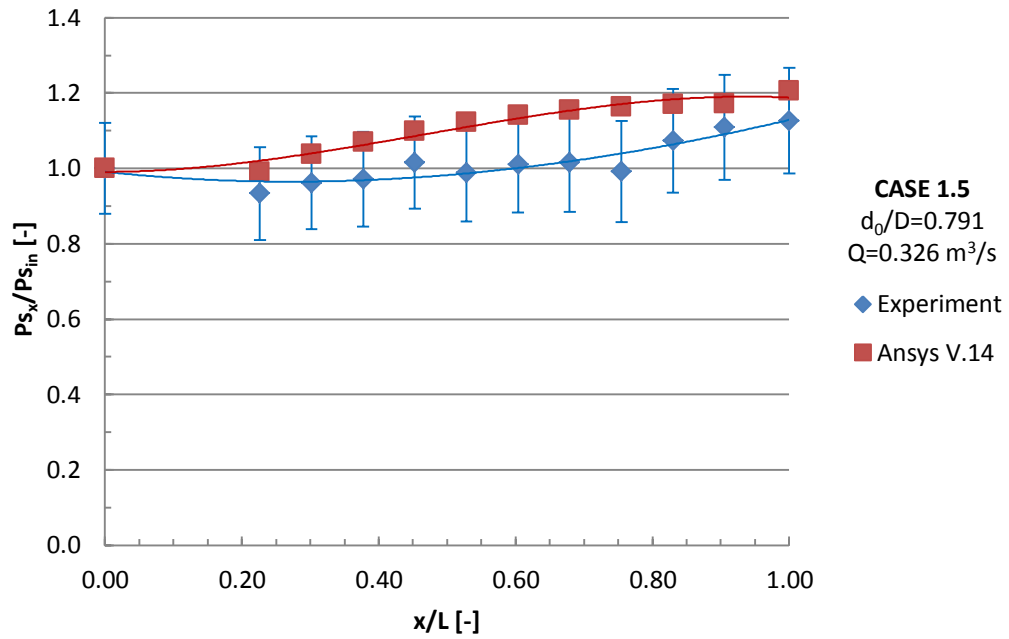
รูปที่ ค-16 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.3



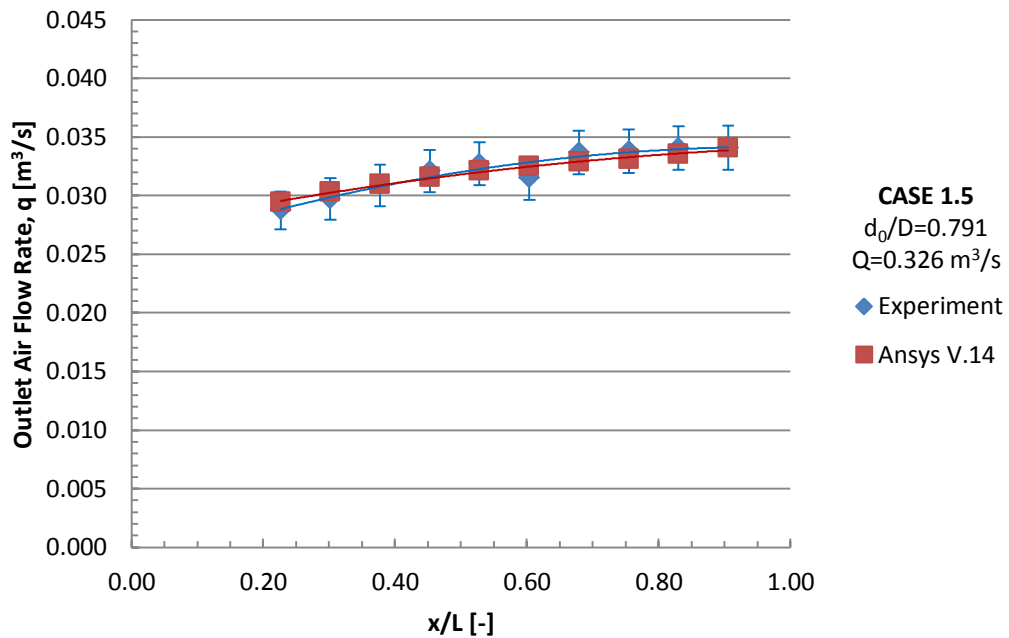
รูปที่ ค-17 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4



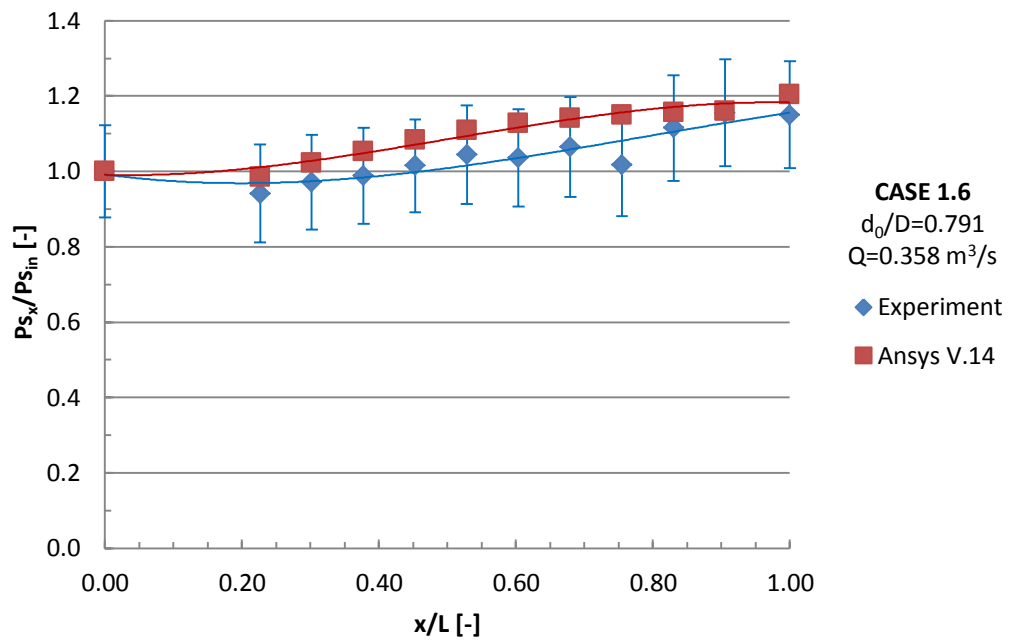
รูปที่ ค-18 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.4



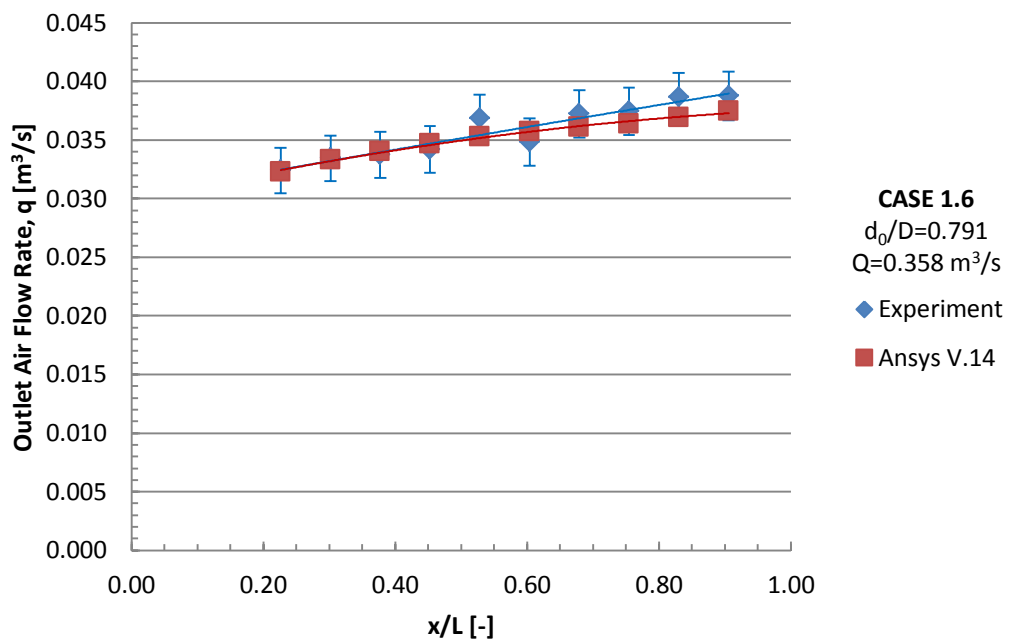
รูปที่ ค-19 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.5



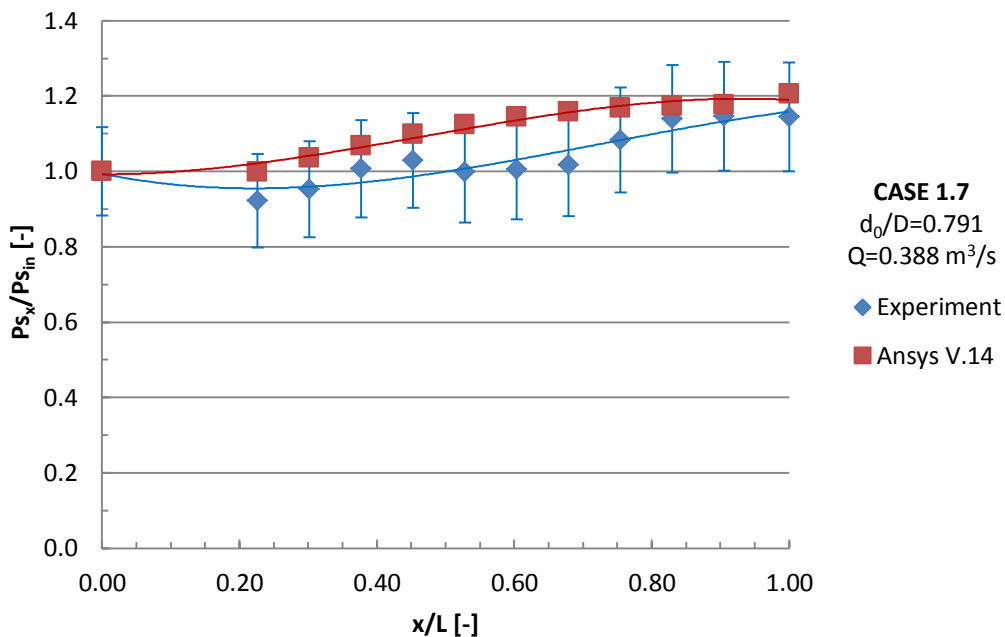
รูปที่ ค-20 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.5



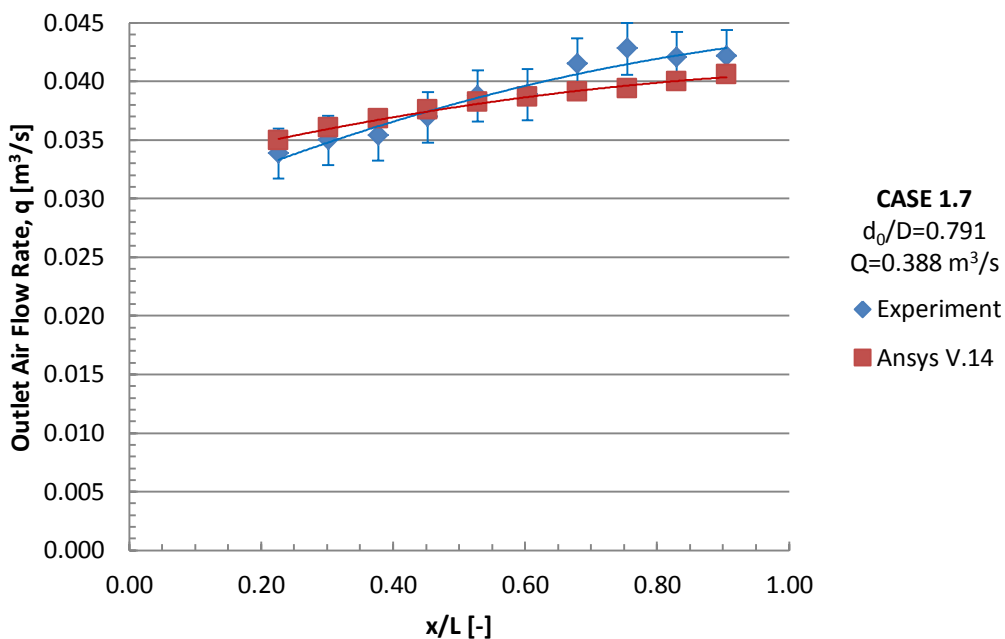
รูปที่ ค-21 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.6



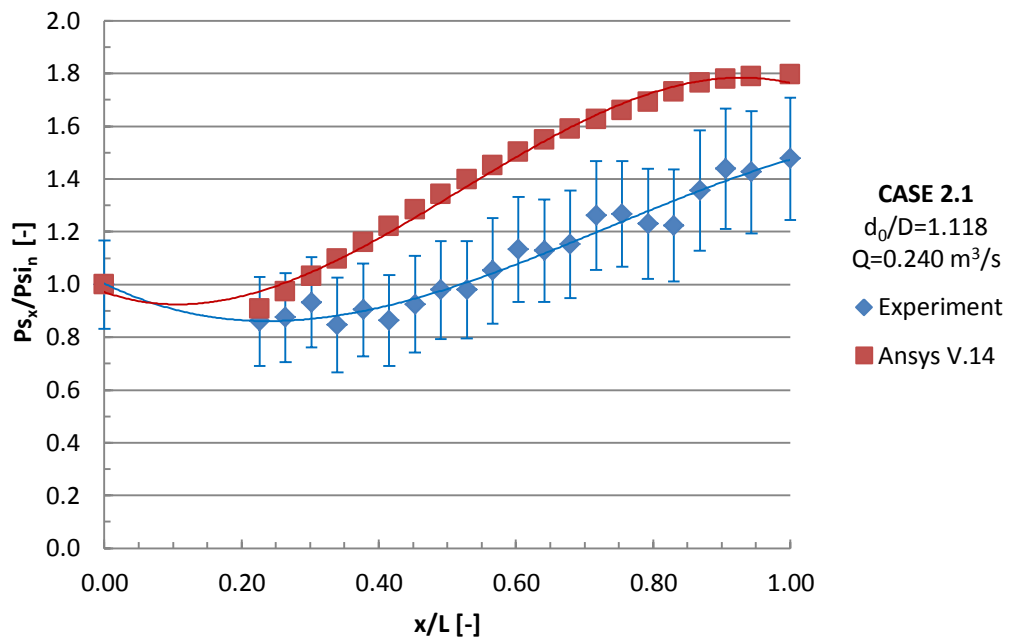
รูปที่ ค-22 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.6



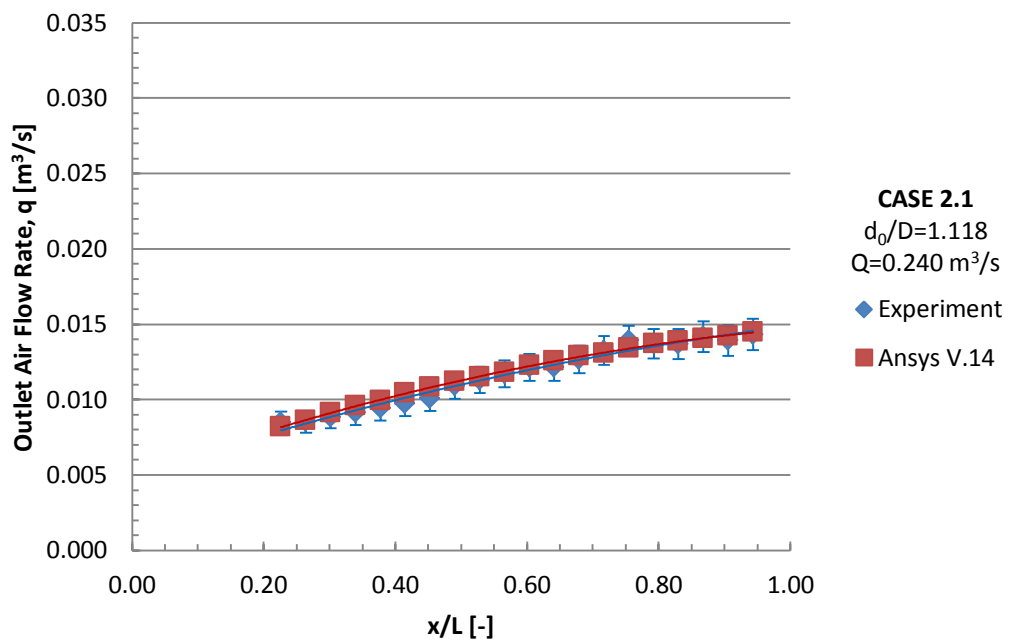
รูปที่ ค-23 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.7



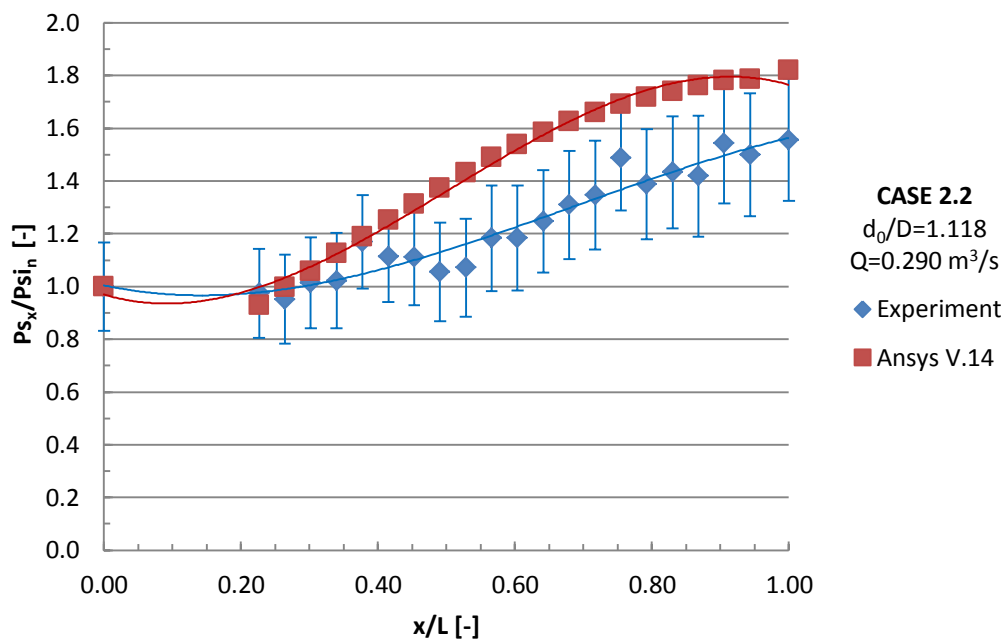
รูปที่ ค-24 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 1.7



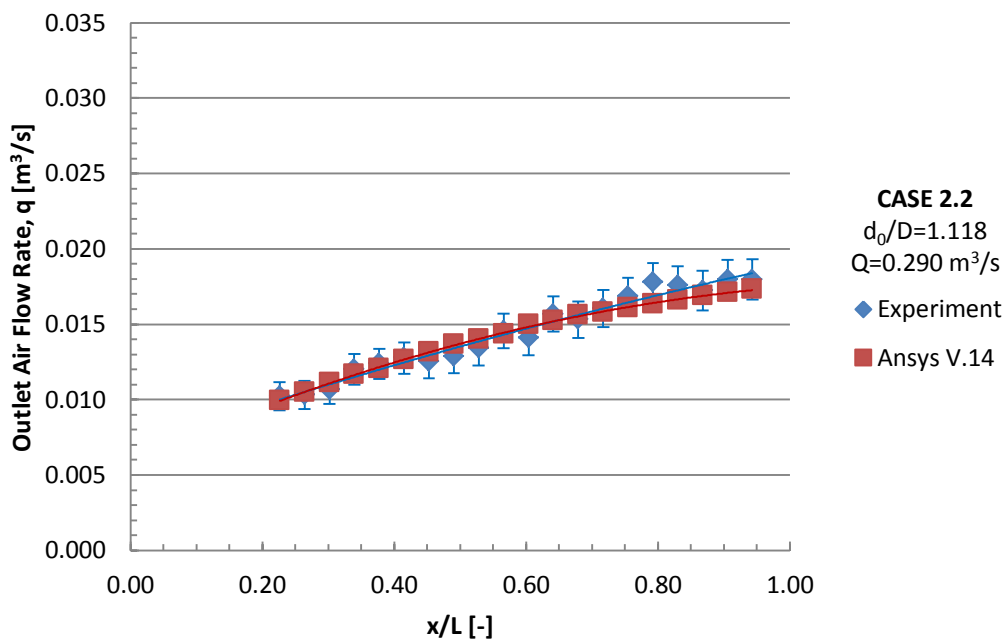
รูปที่ ค-25 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.1



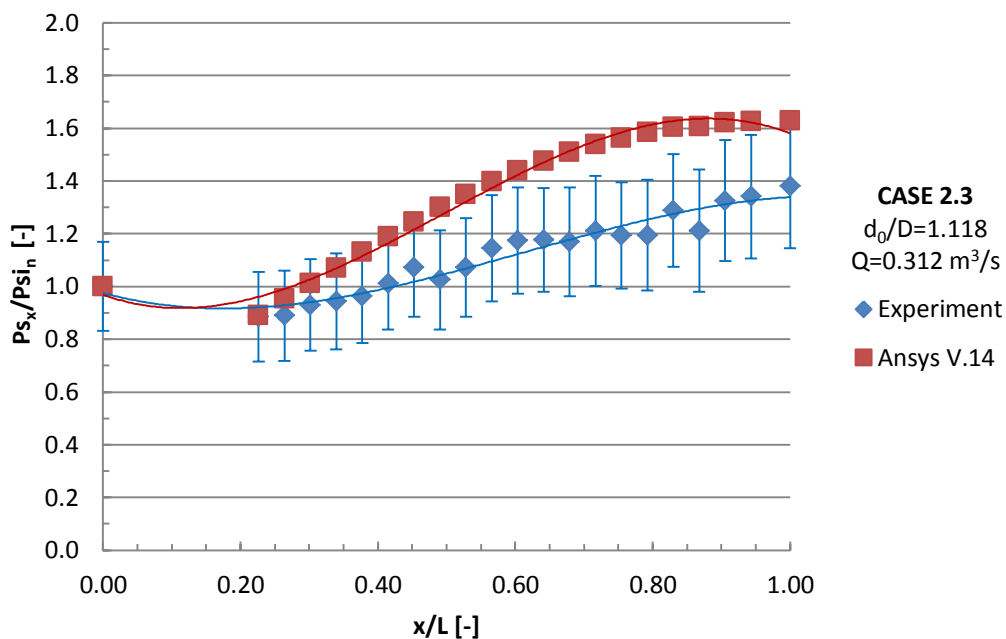
รูปที่ ค-26 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.1



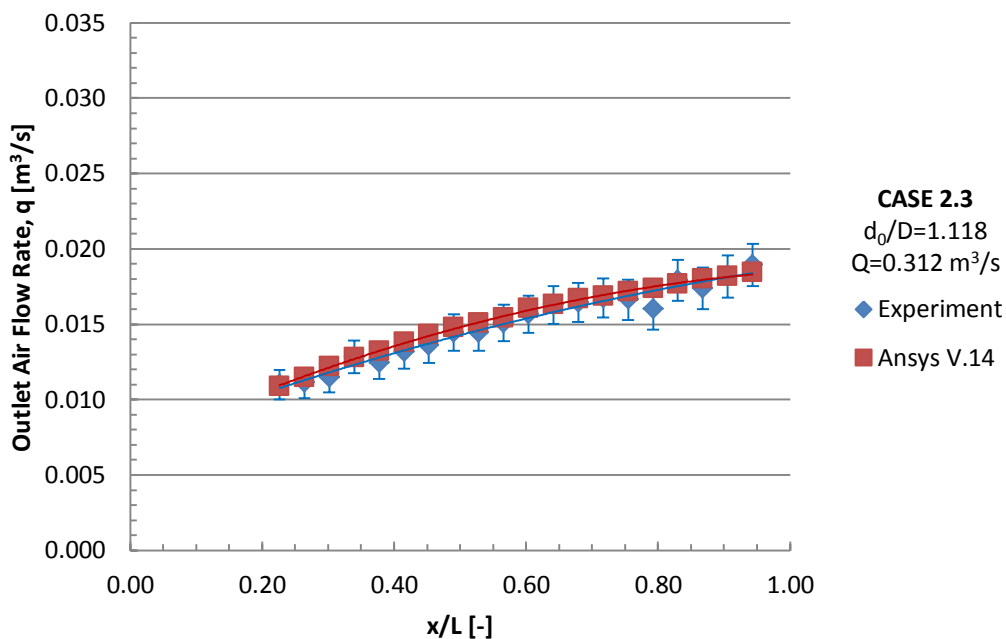
รูปที่ ค-27 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.2



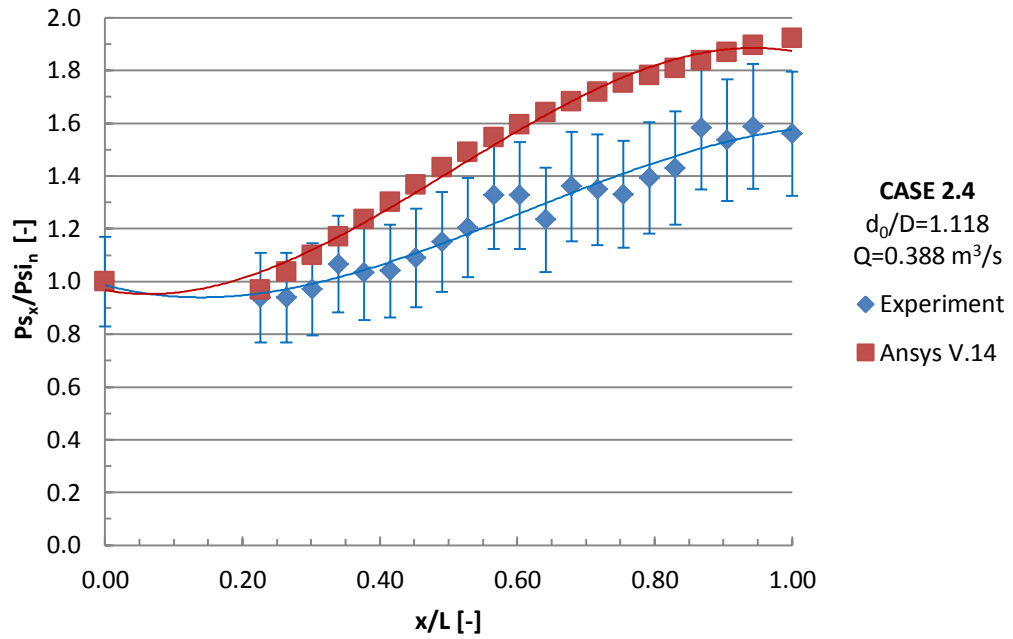
รูปที่ ค-28 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.2



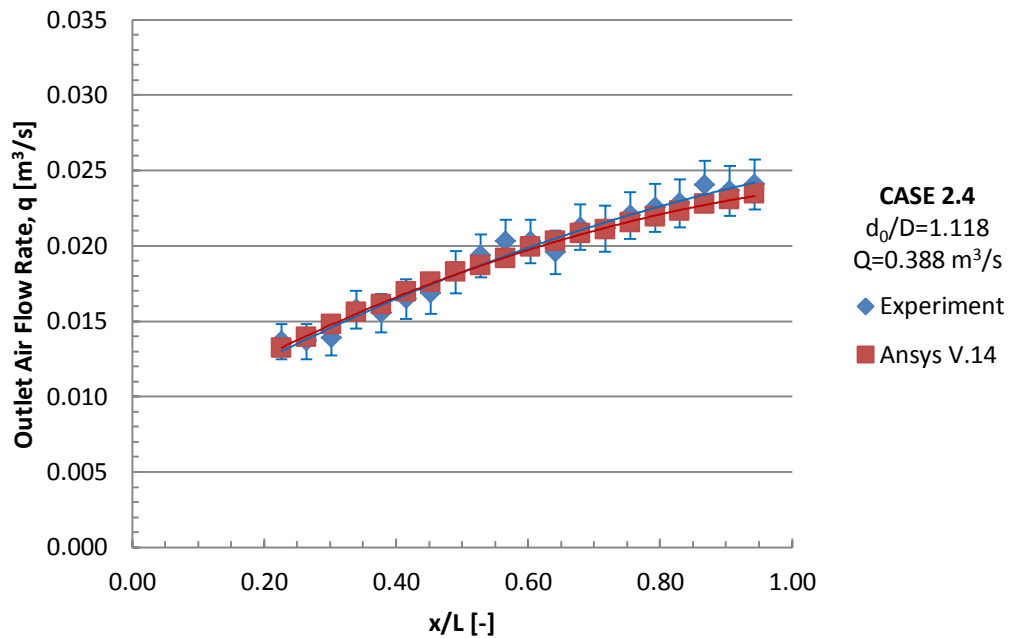
รูปที่ ค-29 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.3



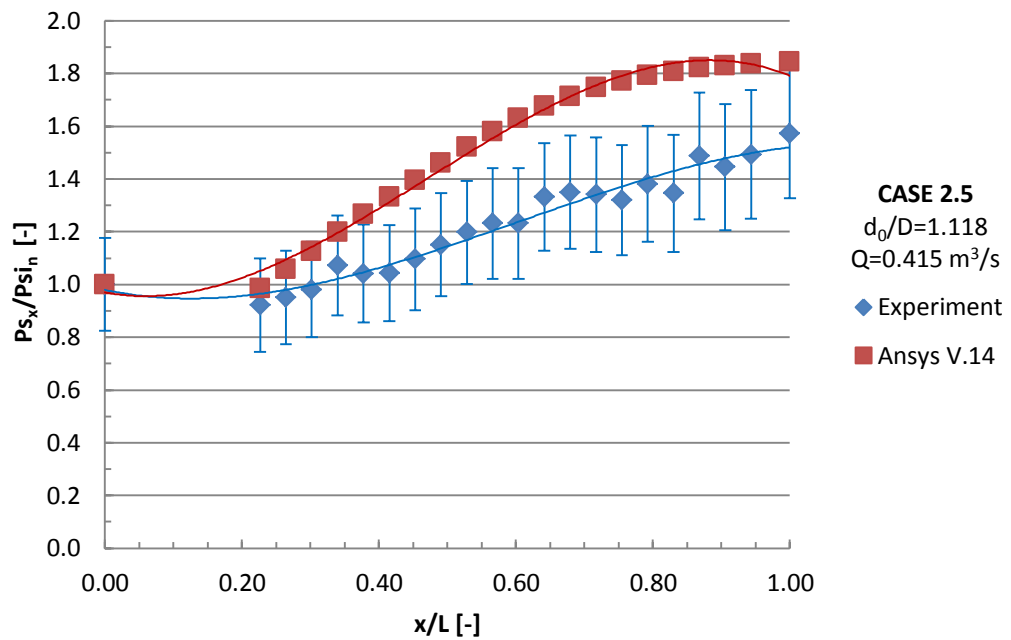
รูปที่ ค-30 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.3



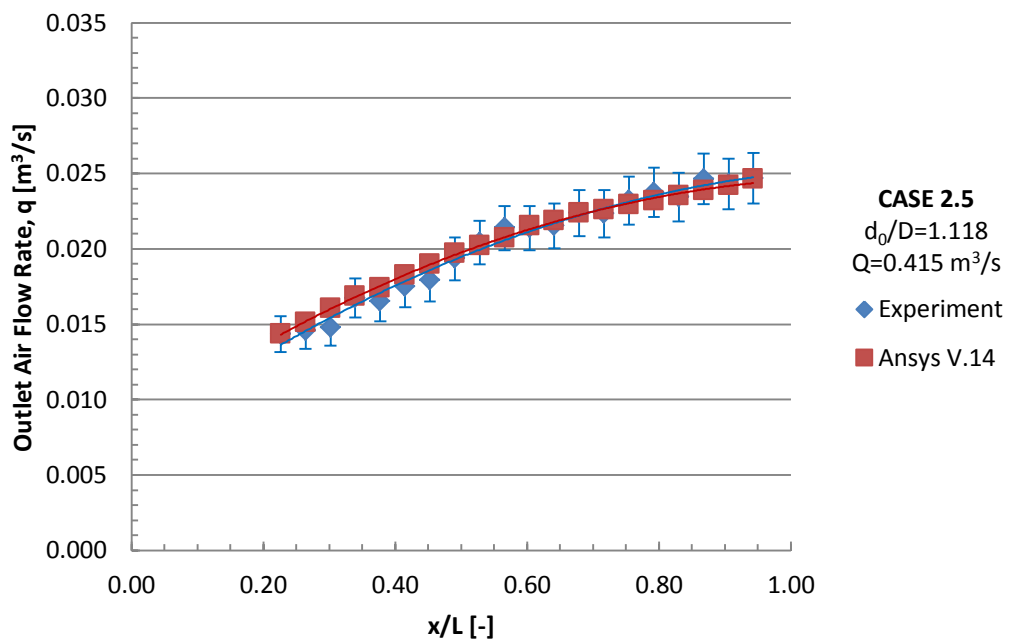
รูปที่ ค-31 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.4



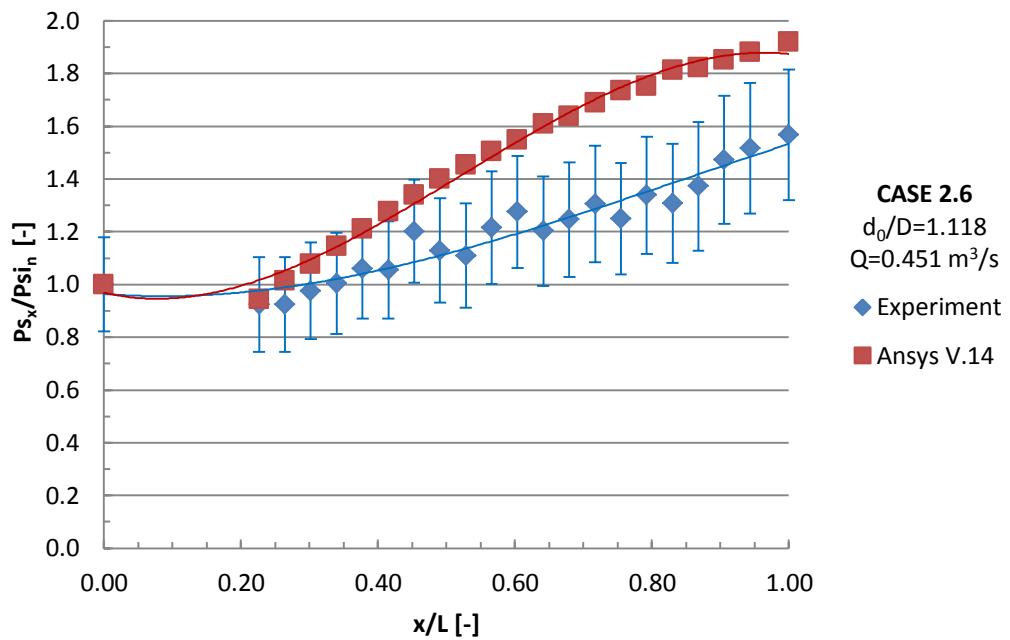
รูปที่ ค-32 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.4



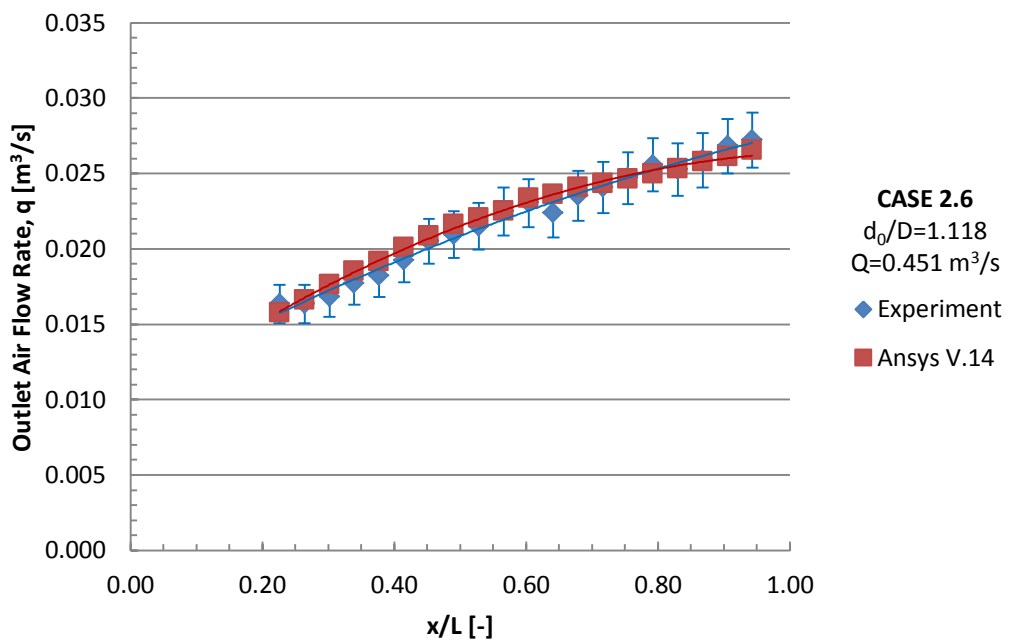
รูปที่ ค-33 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.5



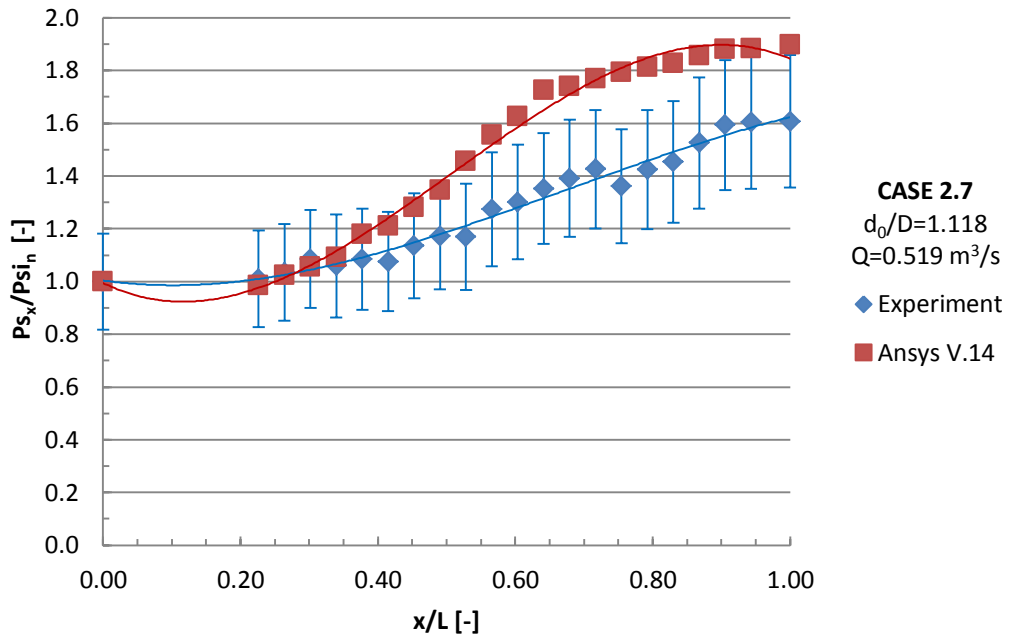
รูปที่ ค-34 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.5



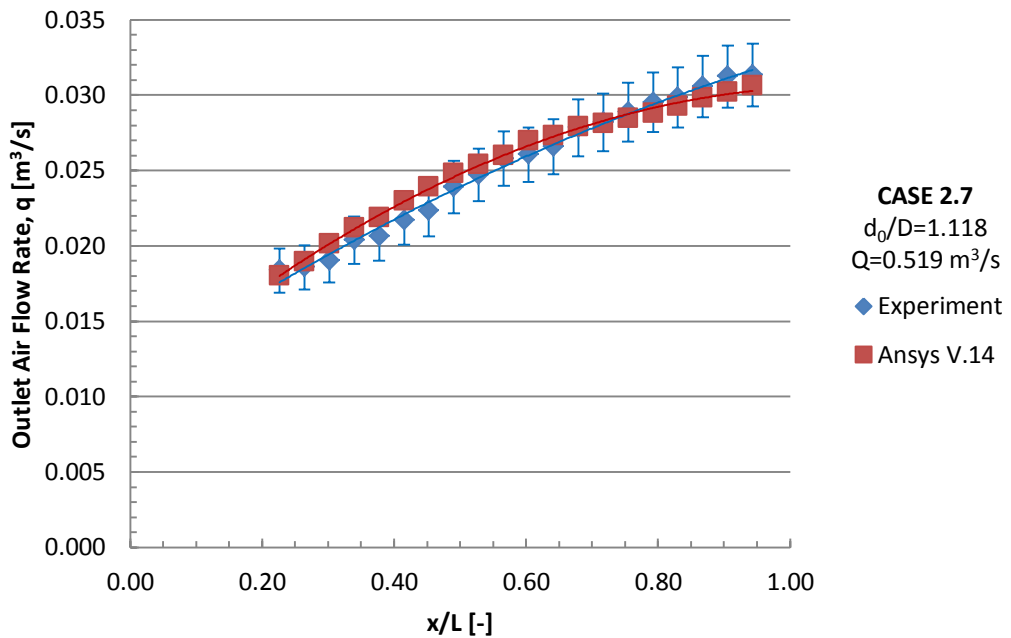
รูปที่ ค-35 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.6



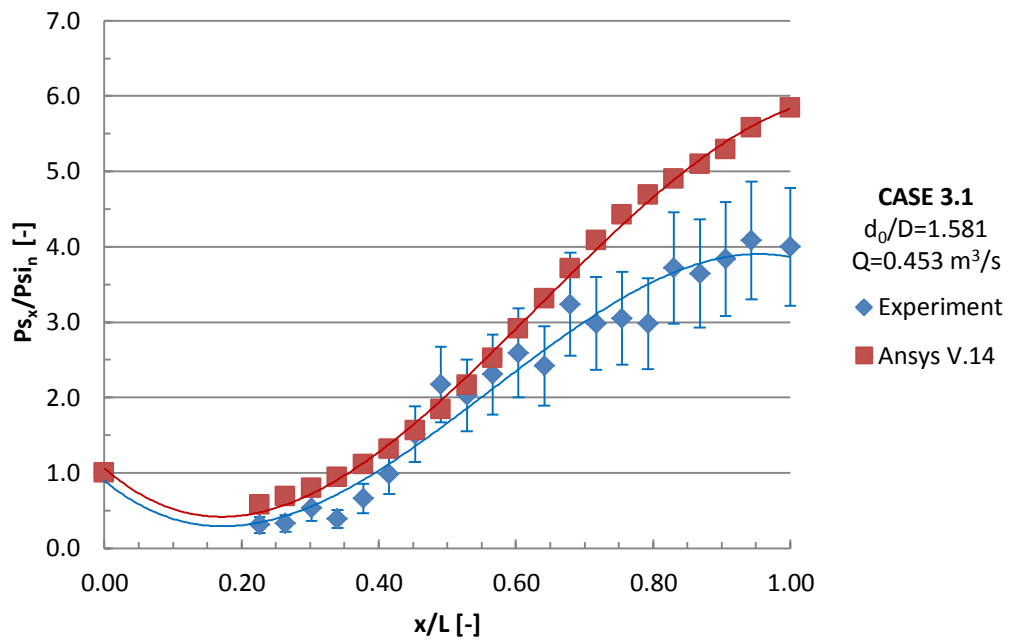
รูปที่ ค-36 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.6



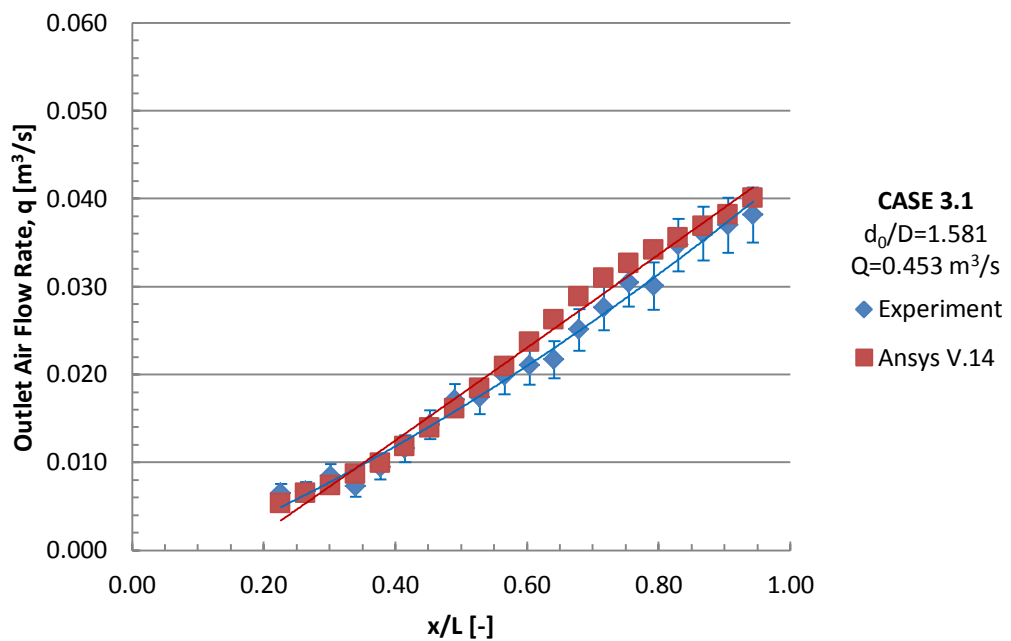
รูปที่ ค-37 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.7



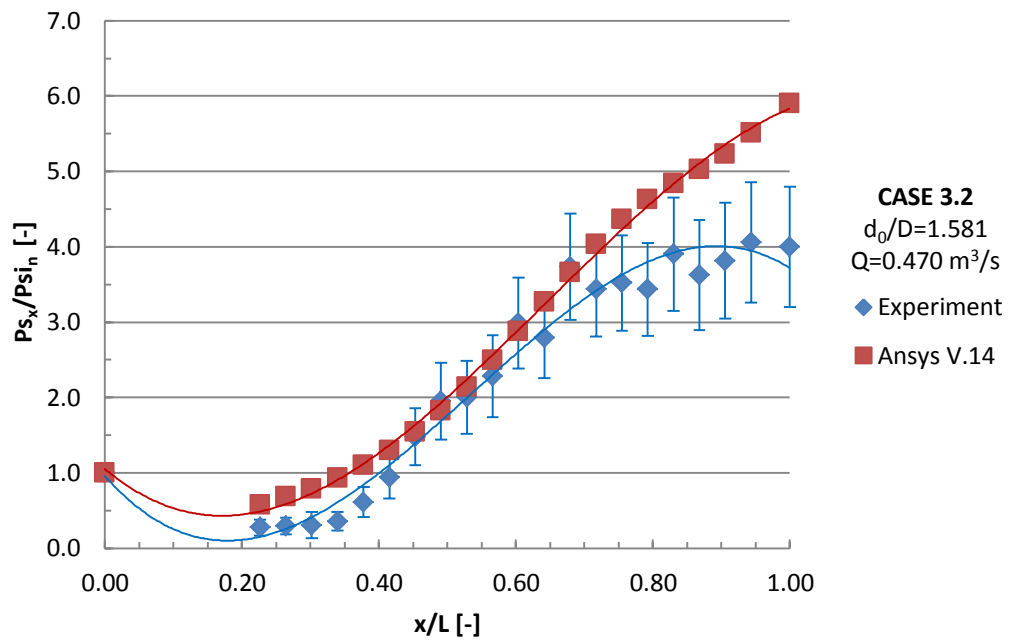
รูปที่ ค-38 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 2.7



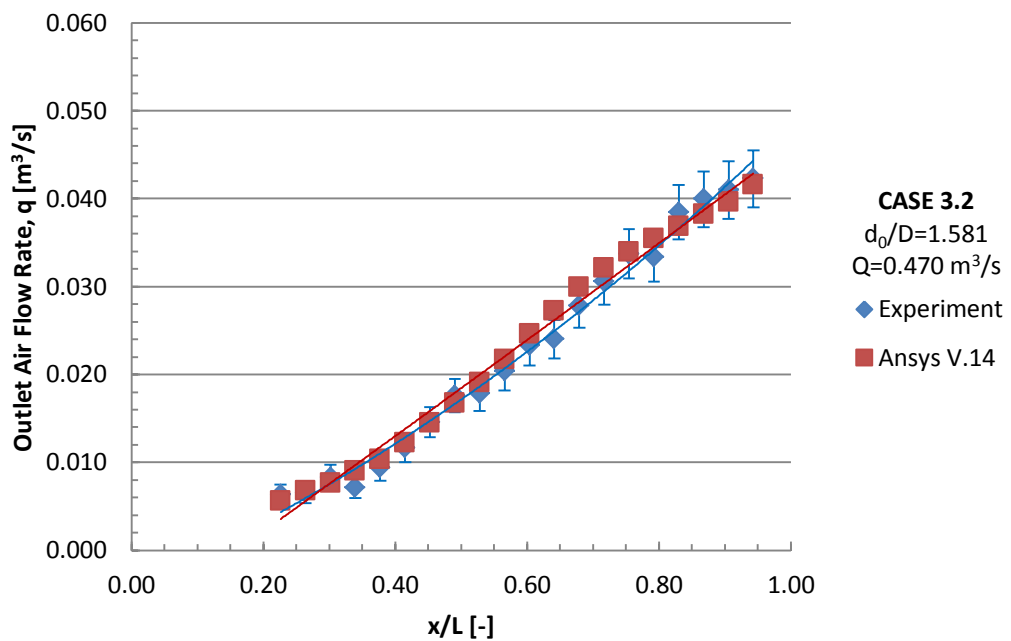
รูปที่ ค-39 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.1



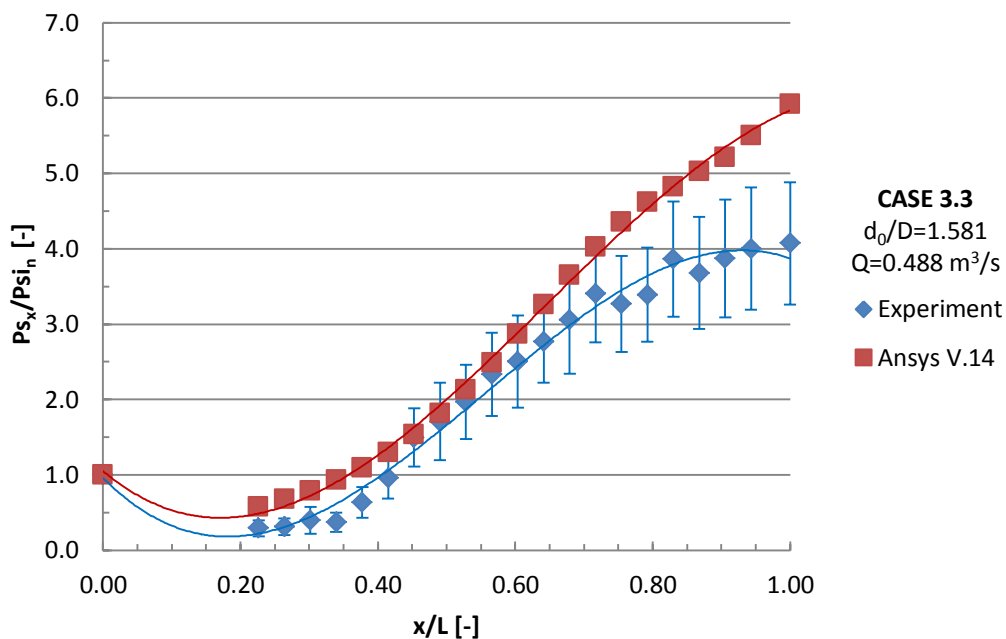
รูปที่ ค-40 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.1



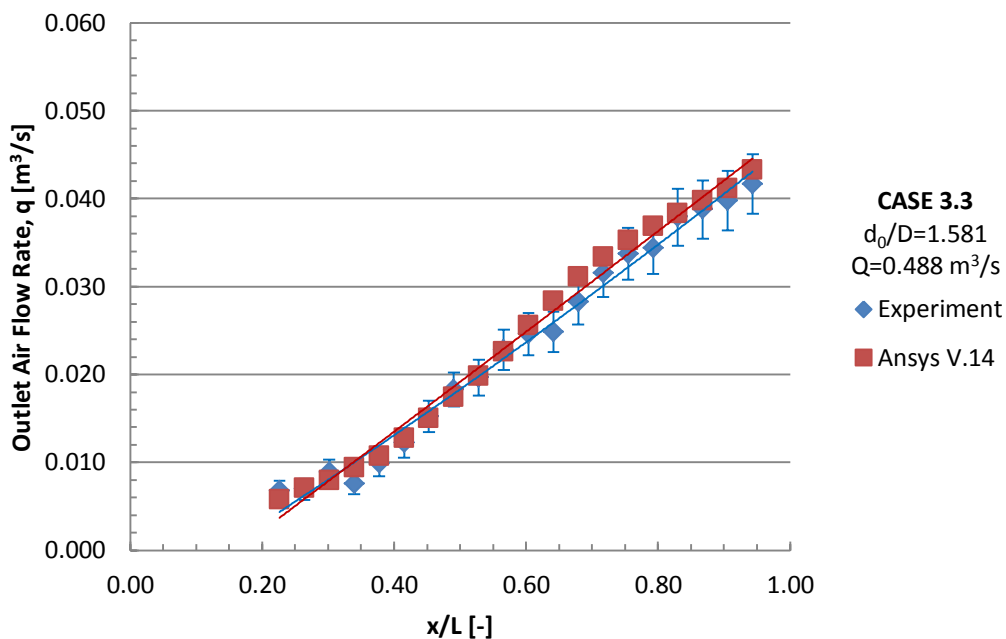
รูปที่ ค-41 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.2



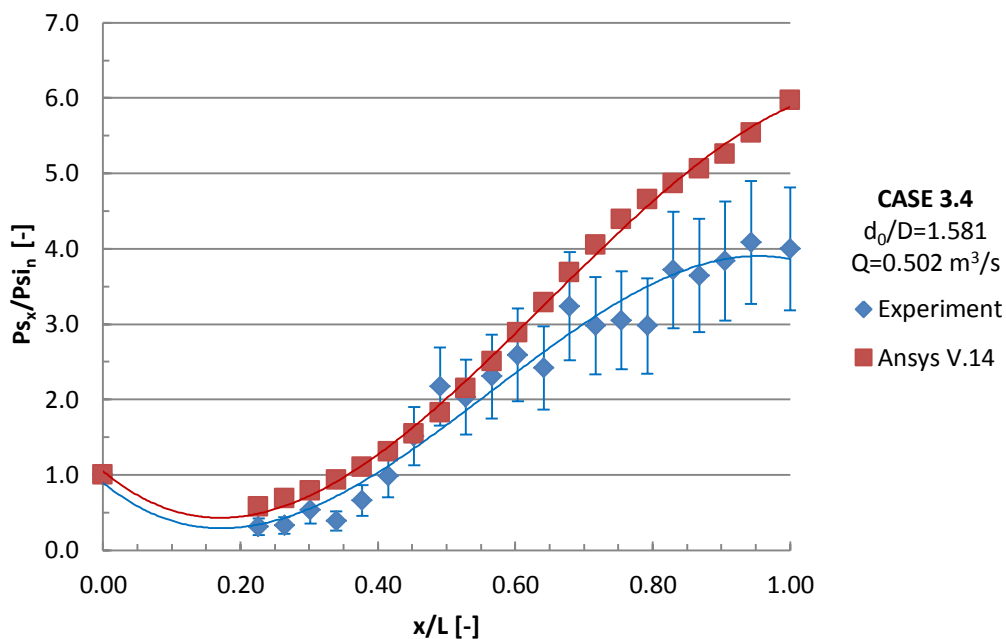
รูปที่ ค-42 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.2



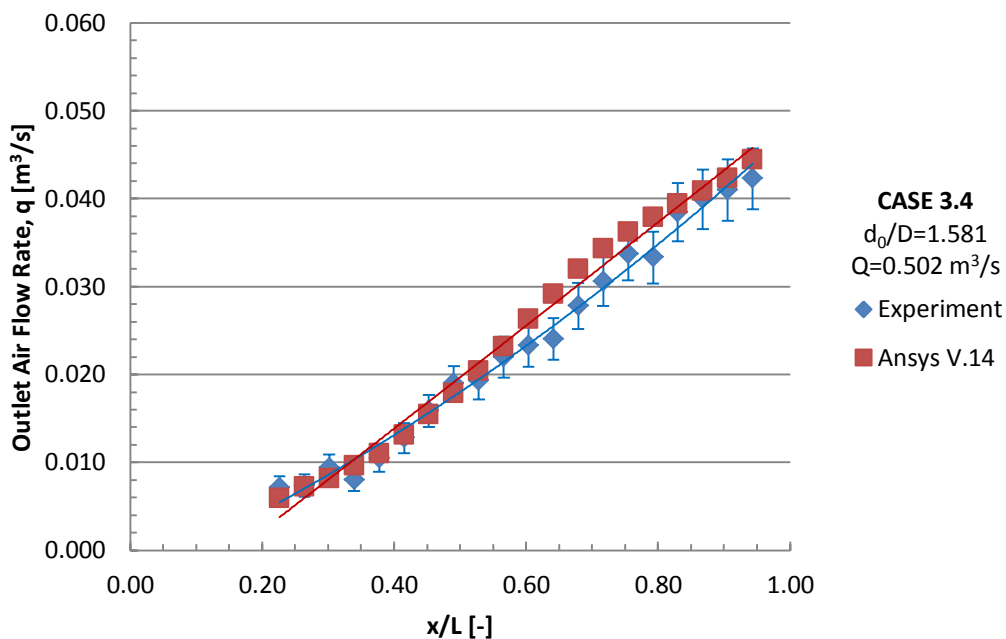
รูปที่ ค-43 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.3



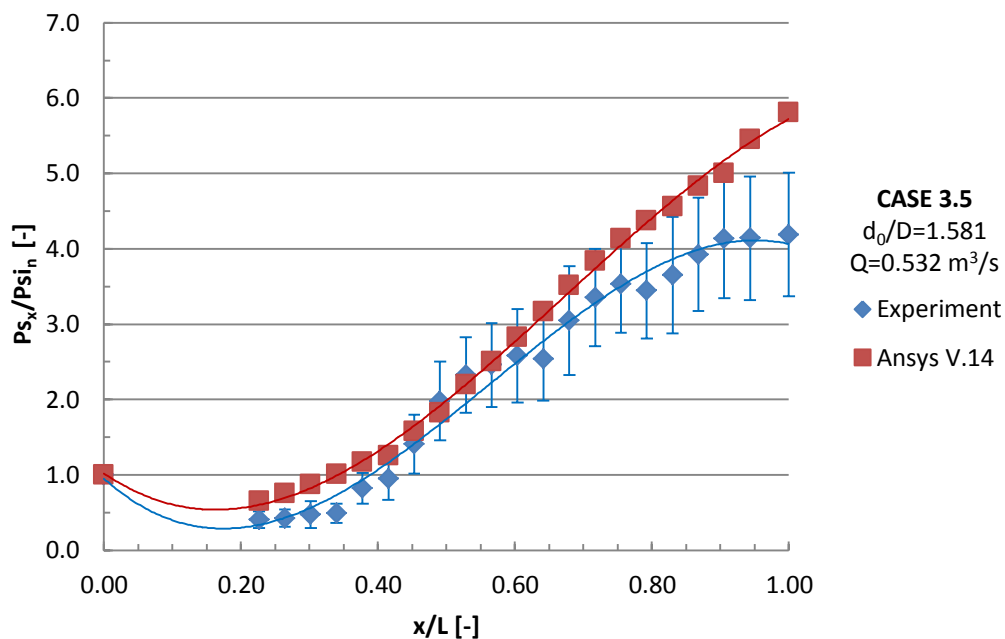
รูปที่ ค-44 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.3



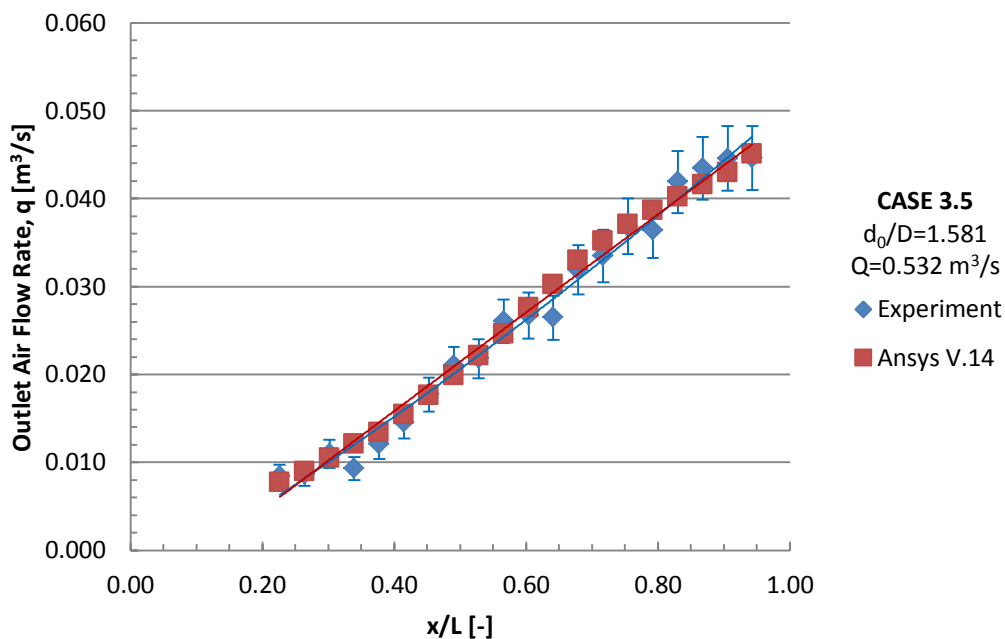
รูปที่ ค-45 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.4



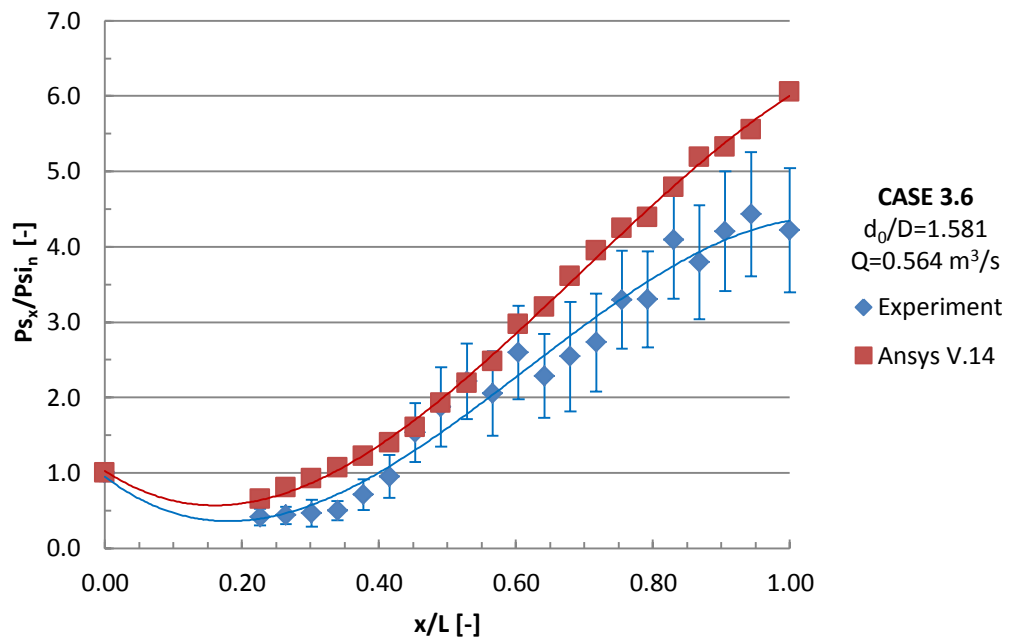
รูปที่ ค-46 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.4



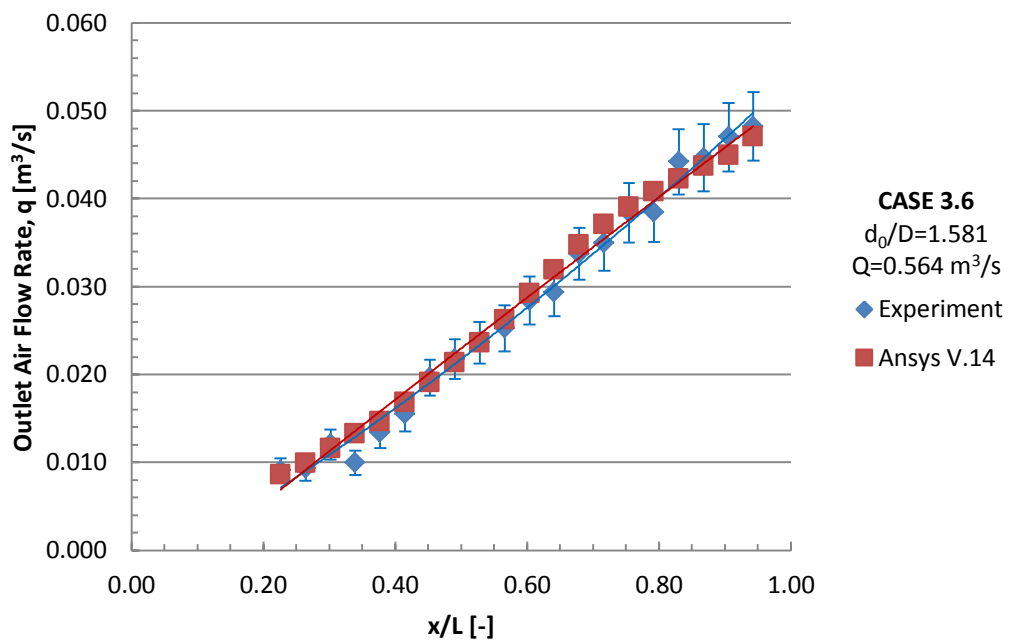
รูปที่ ค-47 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.5



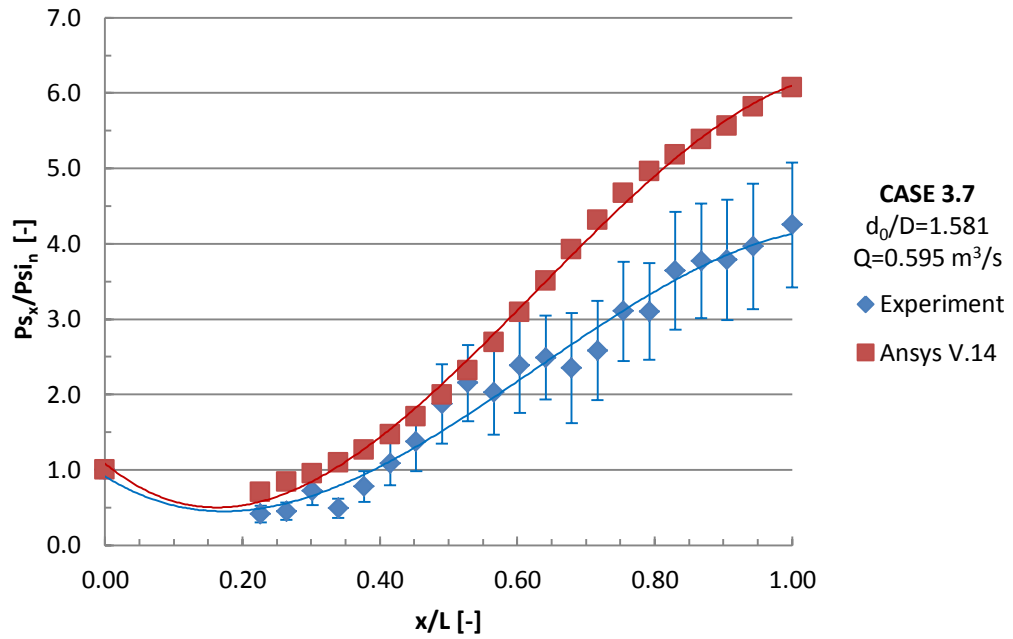
รูปที่ ค-48 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.5



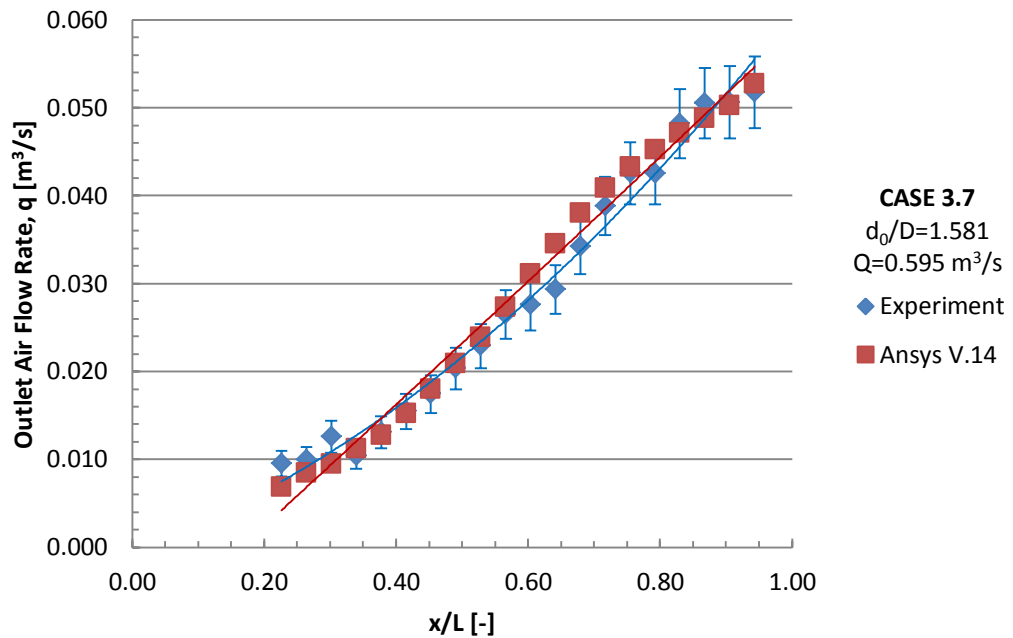
รูปที่ ค-49 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.6



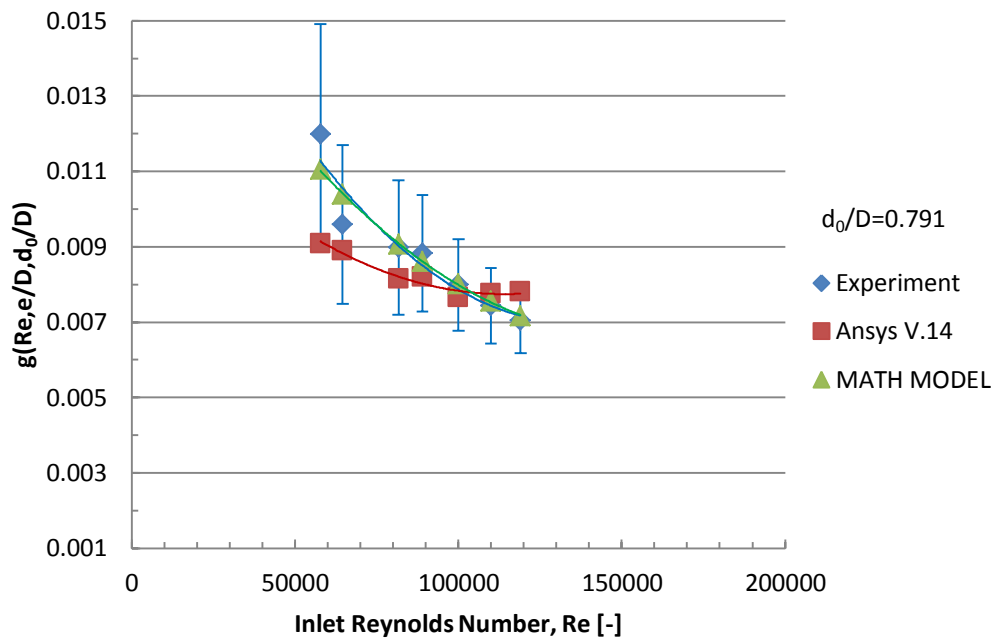
รูปที่ ค-50 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.6



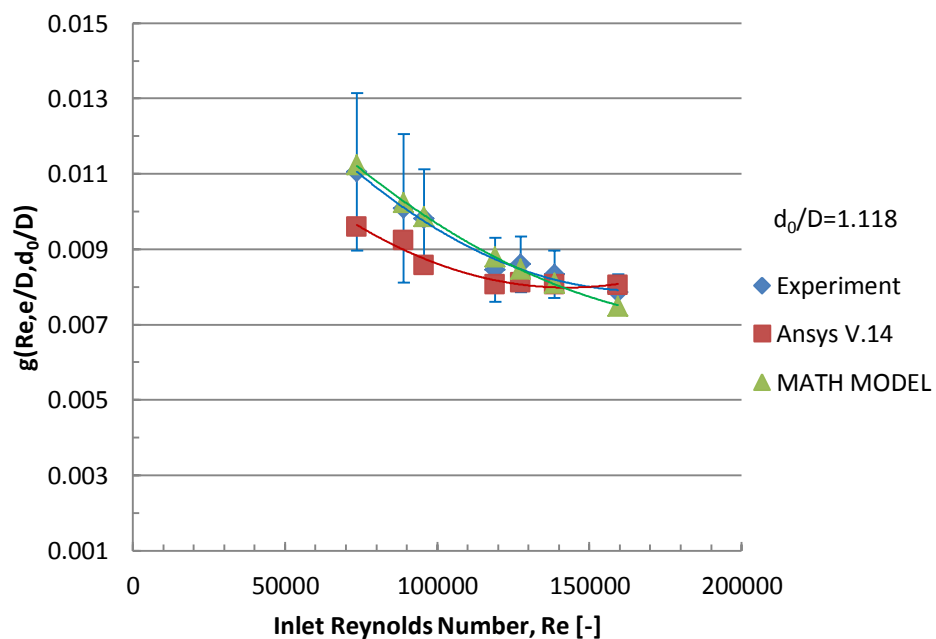
รูปที่ ค-51 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราส่วนความดันสถิตต่อสัดส่วนระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.7



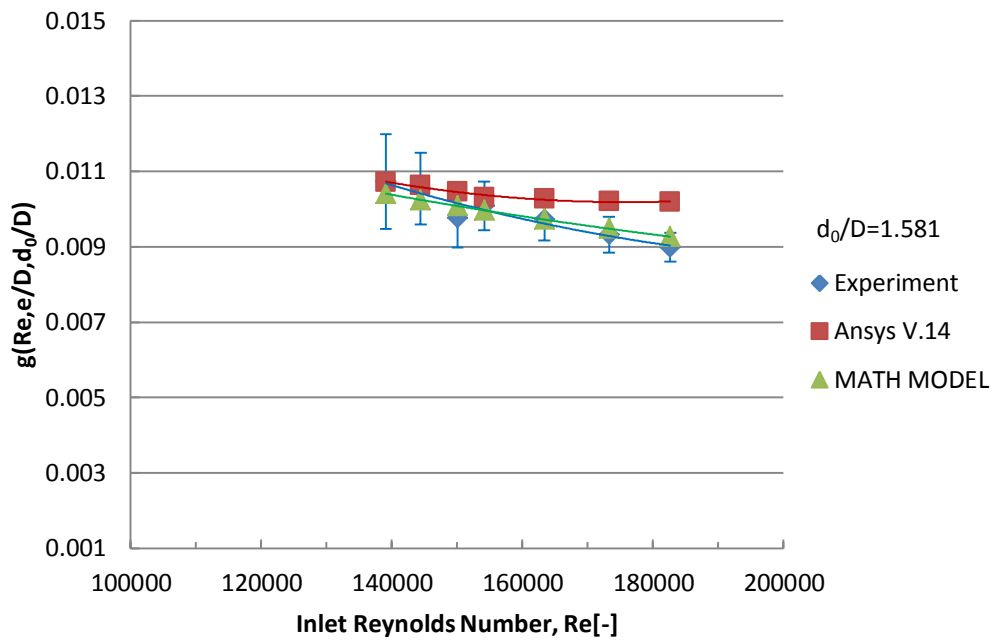
รูปที่ ค-52 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดต่อตำแหน่งช่องเปิดตามสัดส่วน ระยะทางท่อลม จากการทดลองและโปรแกรมจำลองการไหล ในท่อลมผ้า กรณีที่ 3.7



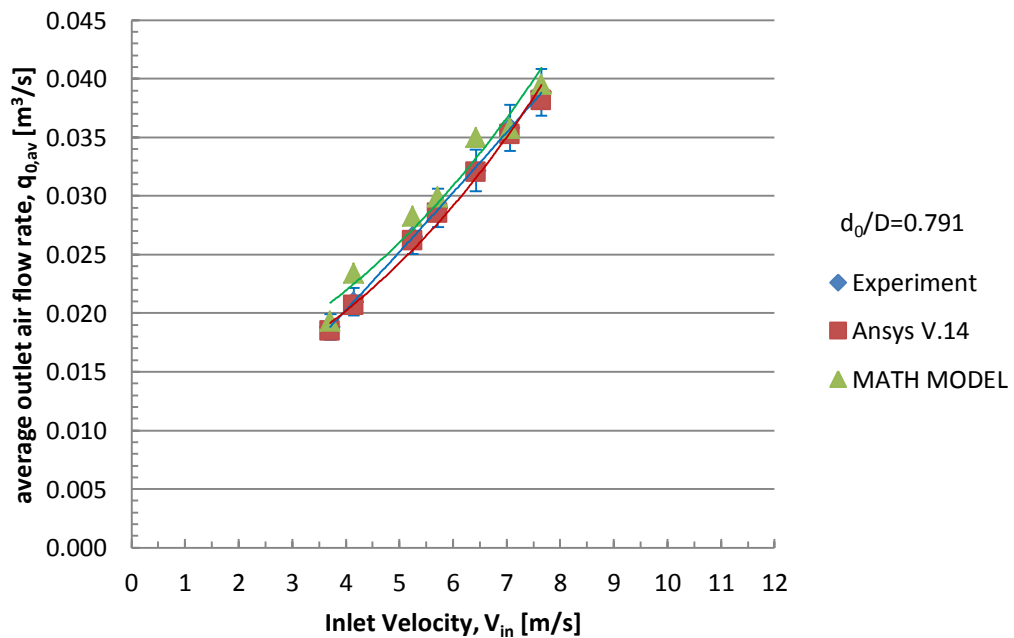
รูปที่ ค-53 การเปรียบเทียบฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์สเข้าจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1 เมื่อ $e/D=0.000433$



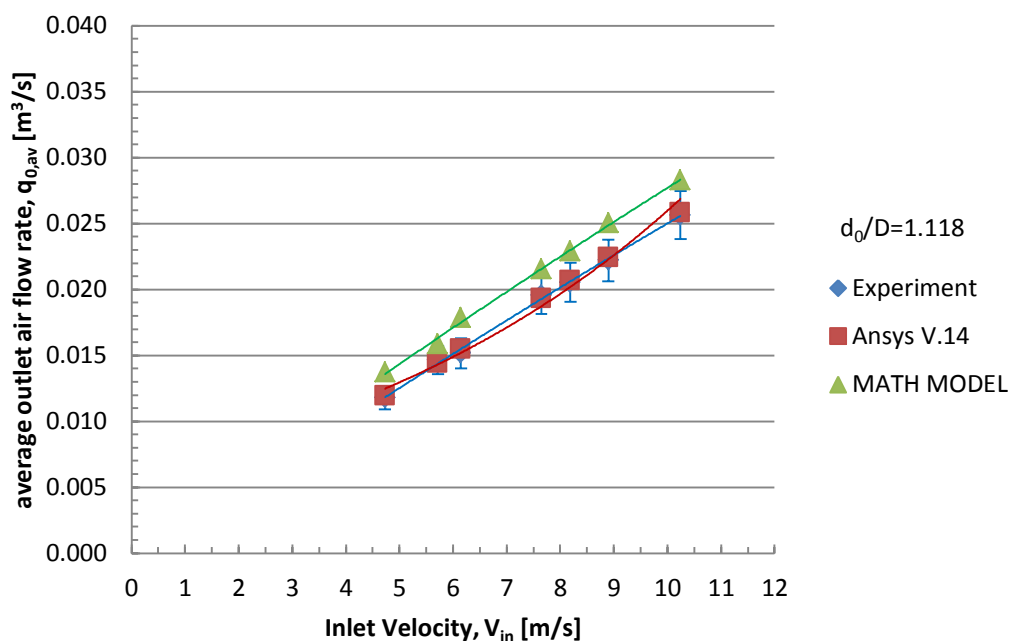
รูปที่ ค-54 การเปรียบเทียบฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์สเข้าจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 2 เมื่อ $e/D=0.000433$



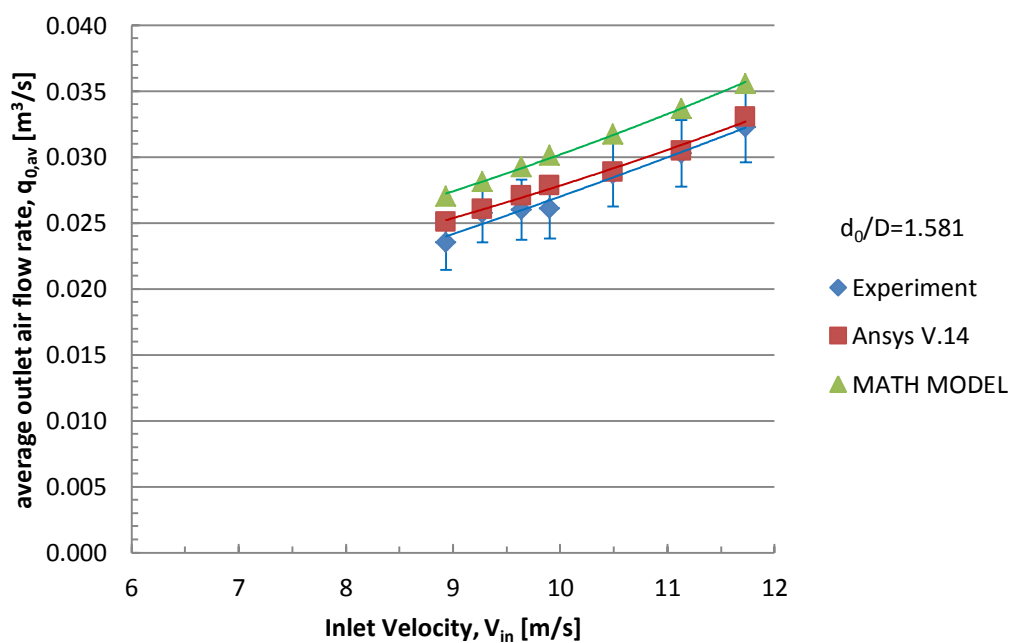
รูปที่ ค-55 การเปรียบเทียบฟังก์ชันความเสียหายสำหรับท่อลมผ้าต่อตัวเลขเรย์โนลด์สขาเข้าจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 3 เมื่อ $e/D=0.000433$



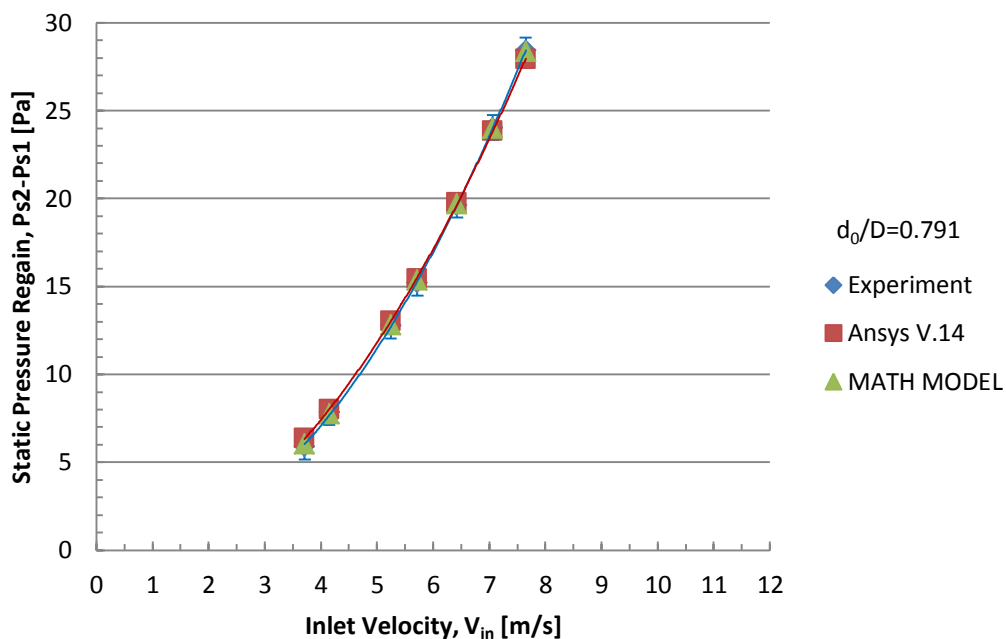
รูปที่ ค-56 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเฉลี่ยต่อความเร็วไหลเข้าท่อลมจากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1



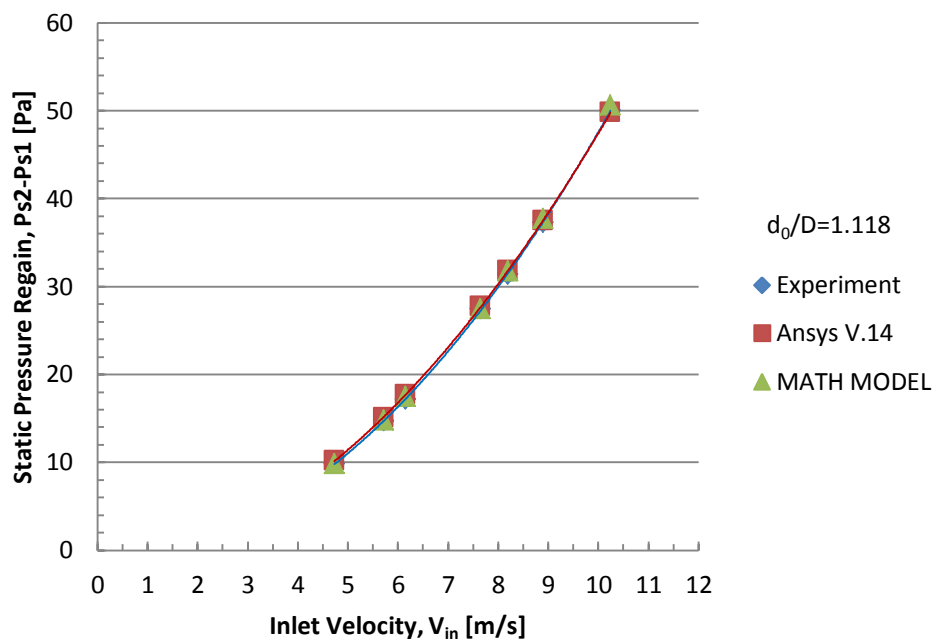
รูปที่ ค-57 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเฉลี่ยต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 2



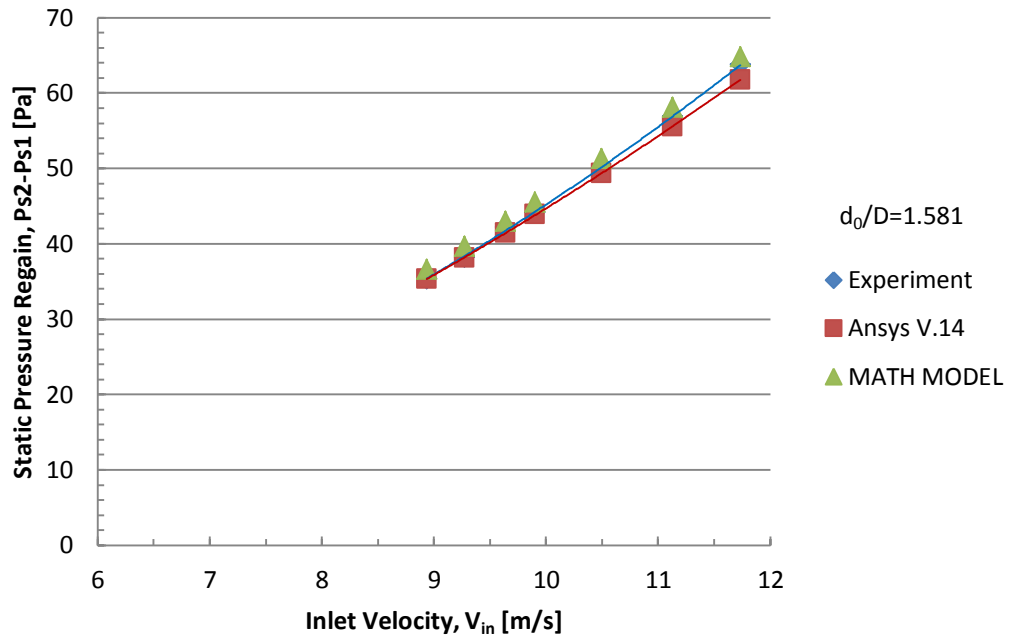
รูปที่ ค-58 การเปรียบเทียบผลลัพธ์ของอัตราการไหลผ่านช่องเปิดเฉลี่ยต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 3



รูปที่ ค-59 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การเพิ่มขึ้นของความดันสถิตต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 1

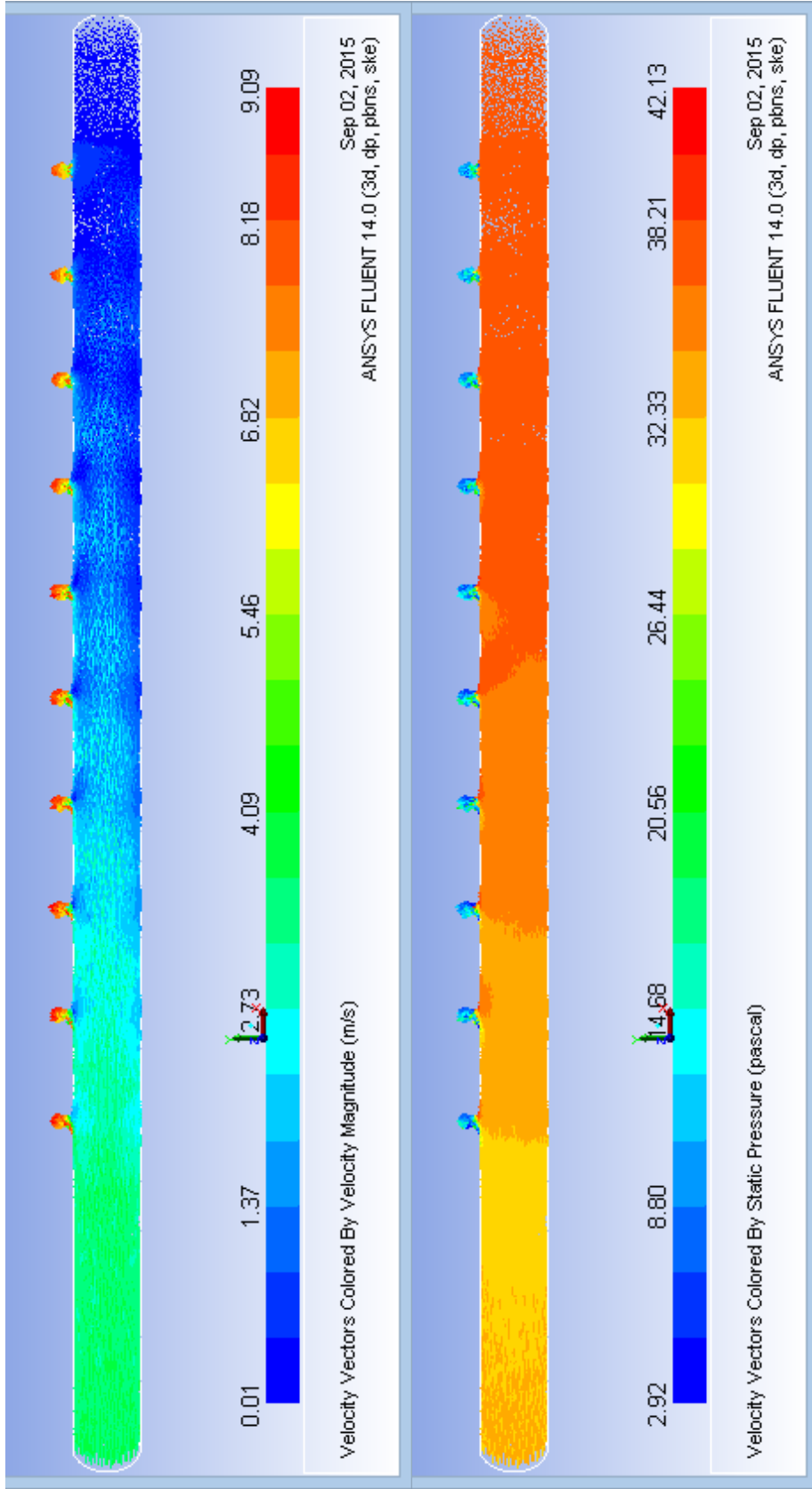


รูปที่ ค-60 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การเพิ่มขึ้นของความดันสถิตต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 2

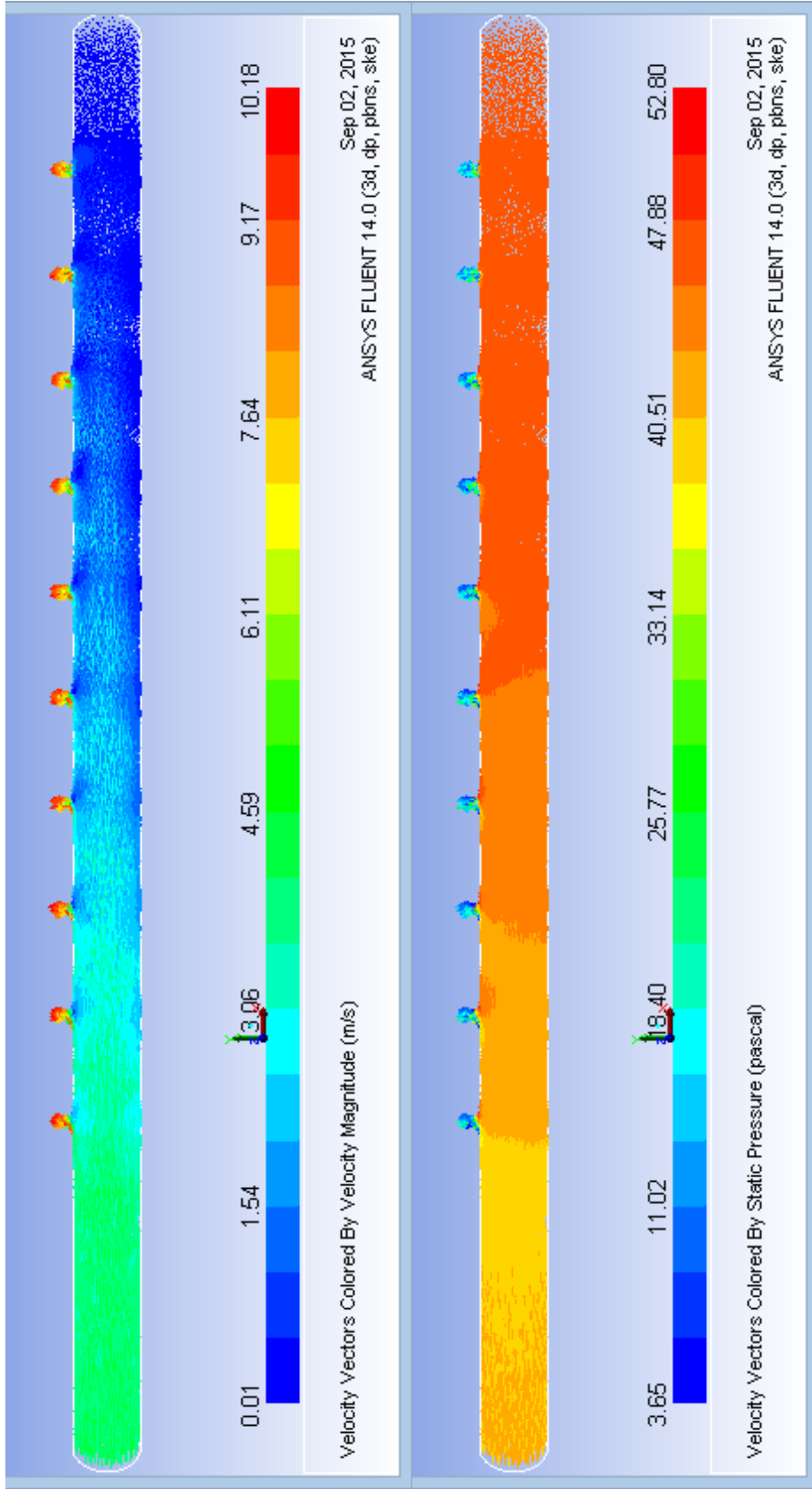


รูปที่ ค-61 การเปรียบเทียบผลลัพธ์การเพิ่มขึ้นของความดันสถิตต่อความเร็วไหลเข้าท่อลม จากการทดลอง โปรแกรมจำลองการไหลและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ในท่อลมผ้ารูปแบบที่ 3

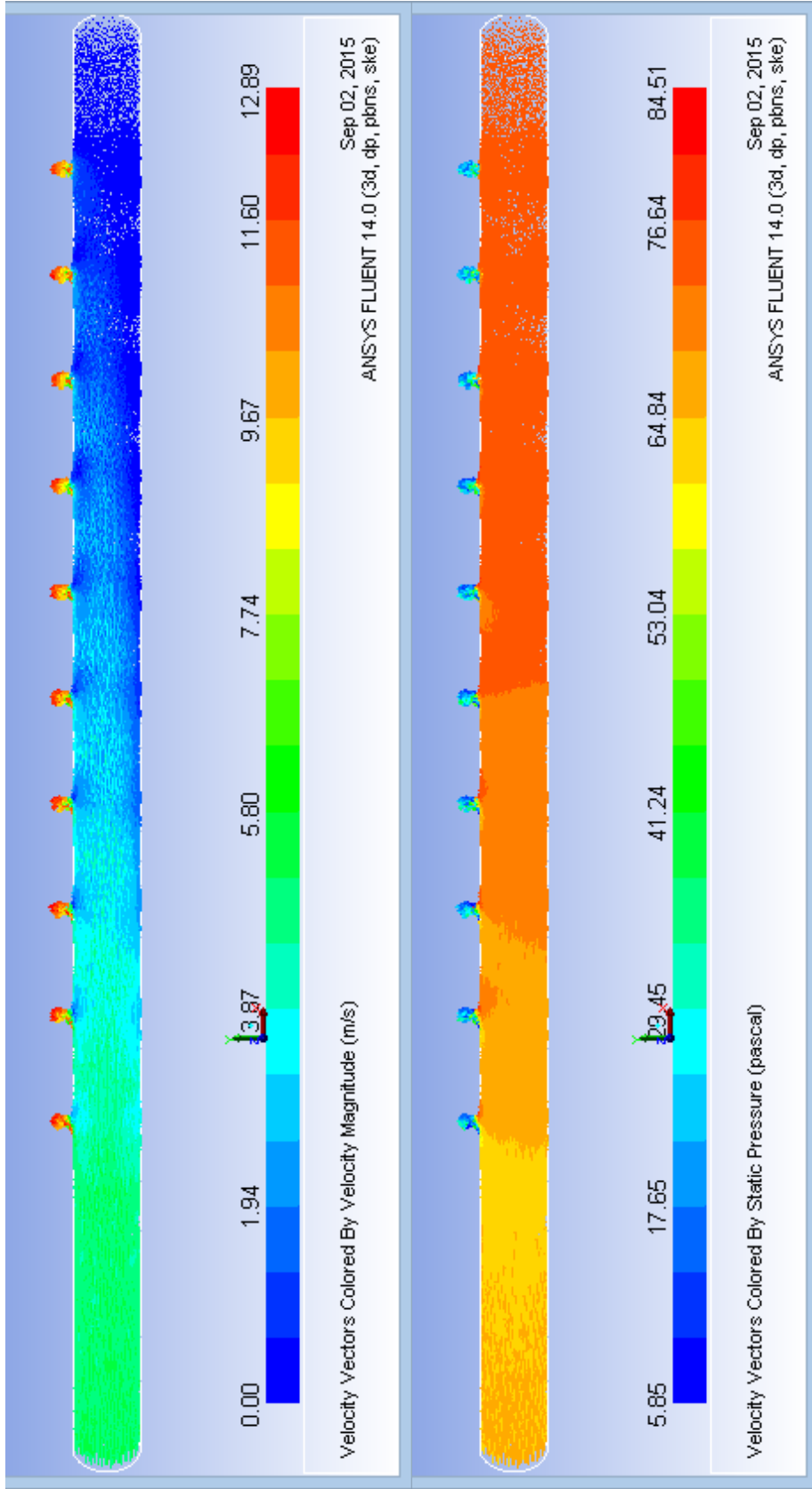
- รูปที่ ง-13 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 2.6
- รูปที่ ง-14 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 2.7
- รูปที่ ง-15 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 3.1
- รูปที่ ง-16 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 3.2
- รูปที่ ง-17 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 3.3
- รูปที่ ง-18 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 3.4
- รูปที่ ง-19 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 3.5
- รูปที่ ง-20 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 3.6
- รูปที่ ง-21 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 3.7



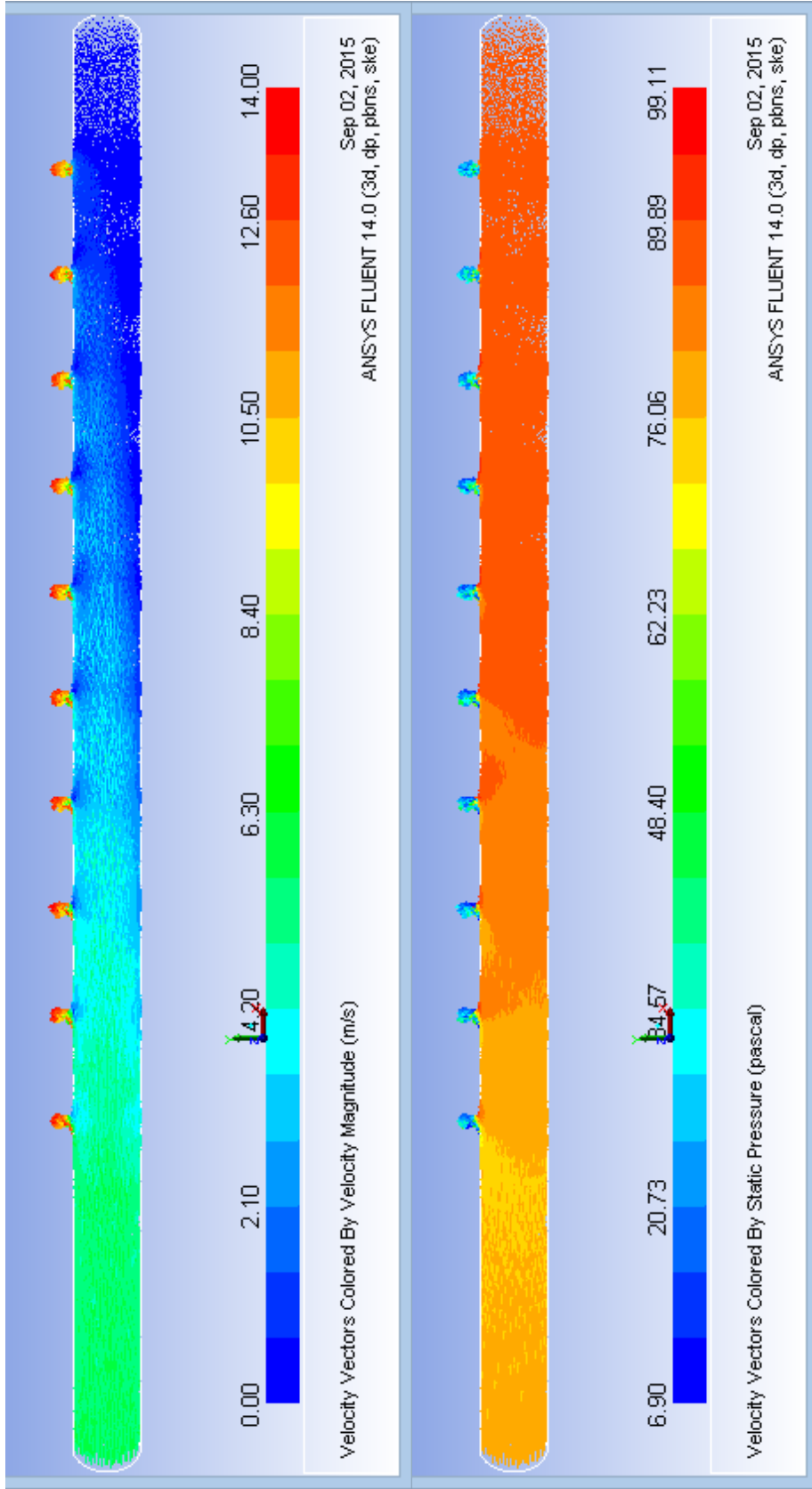
รูปที่ ง-1 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณที่ 1.1



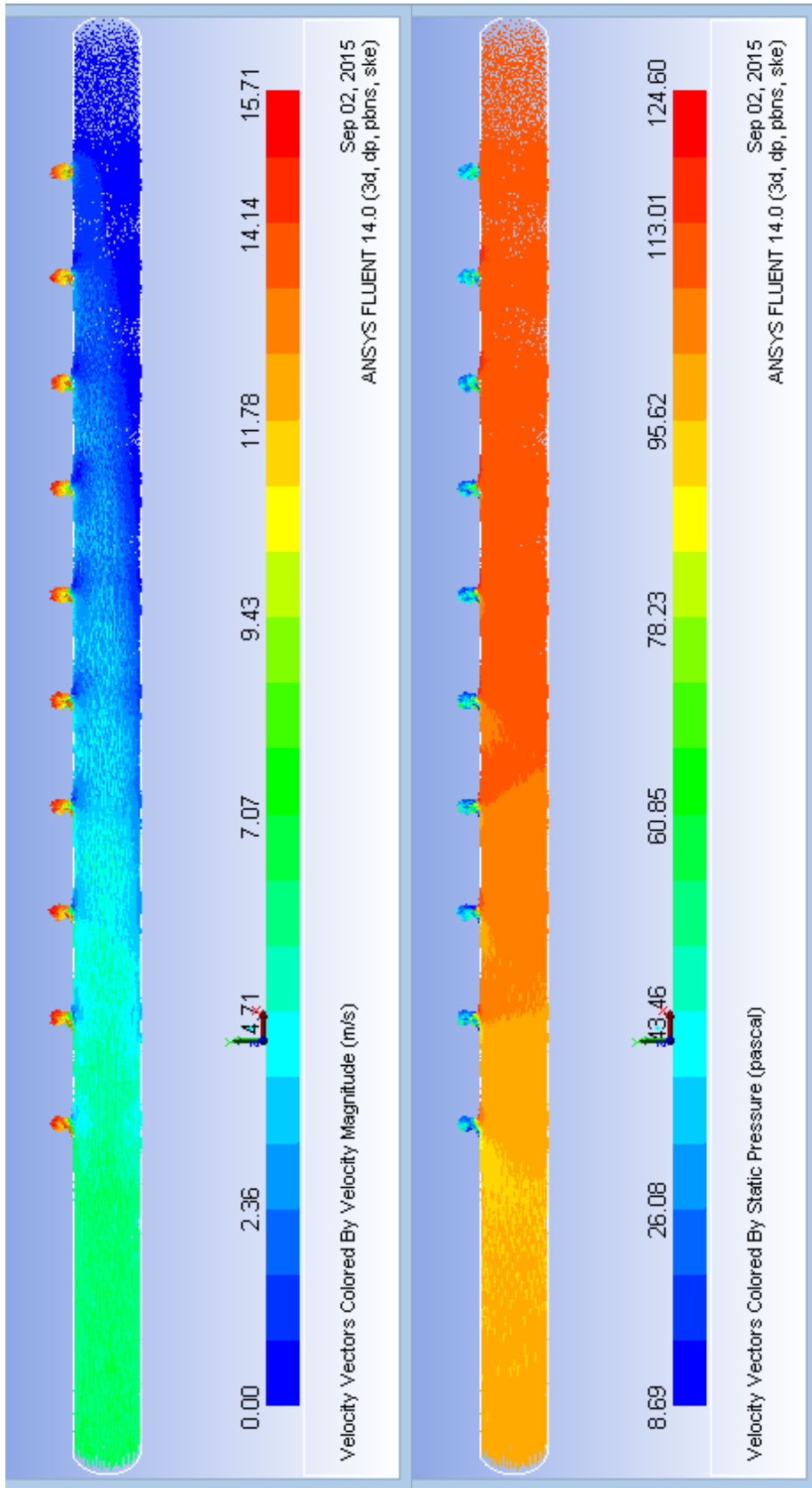
รูปที่ ๑-2 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณที่ 1.2



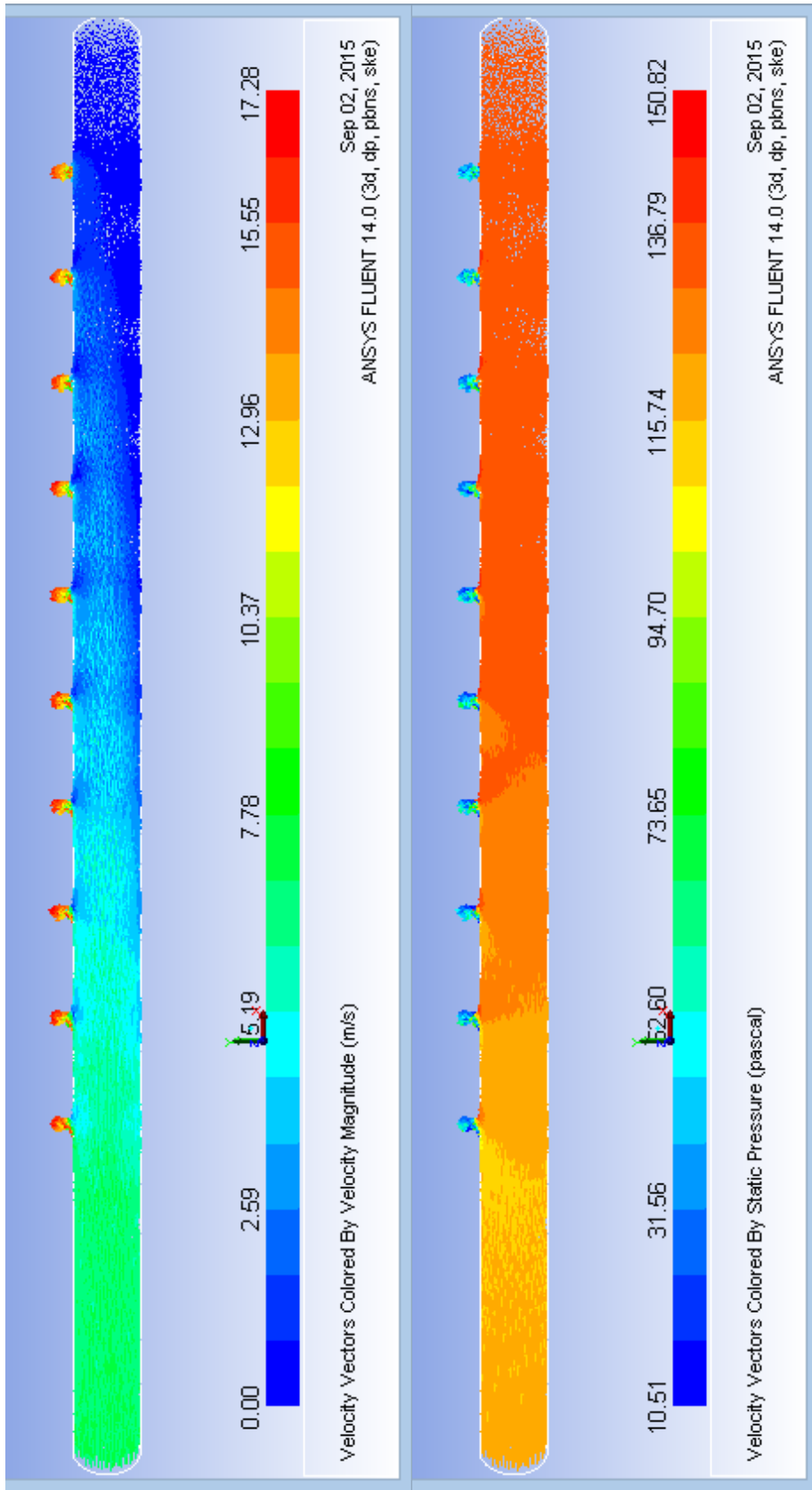
รูปที่ ๓-3 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณที่ 1.3



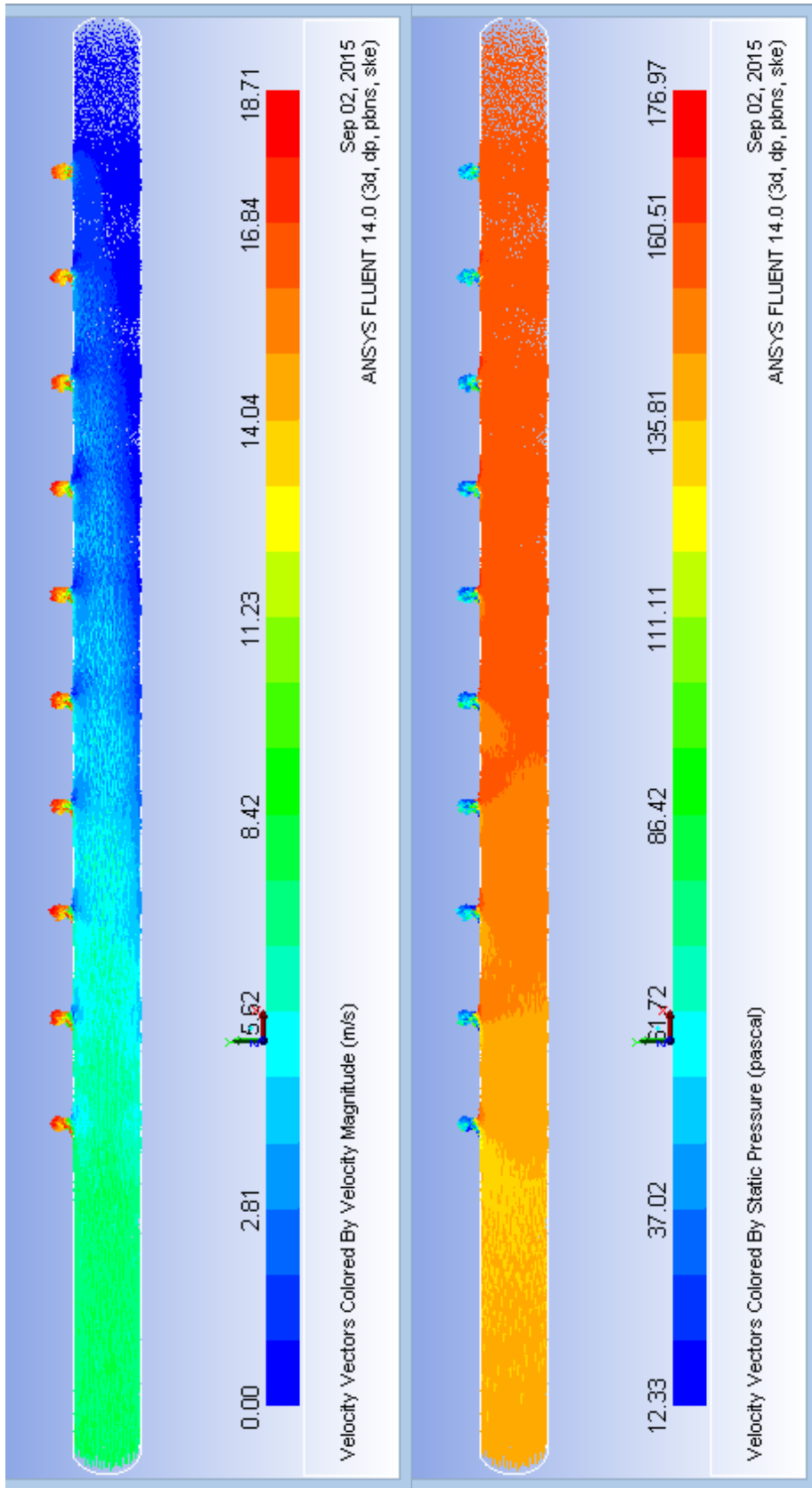
รูปที่ ๓-4 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกวาระการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณีที่ 1.4



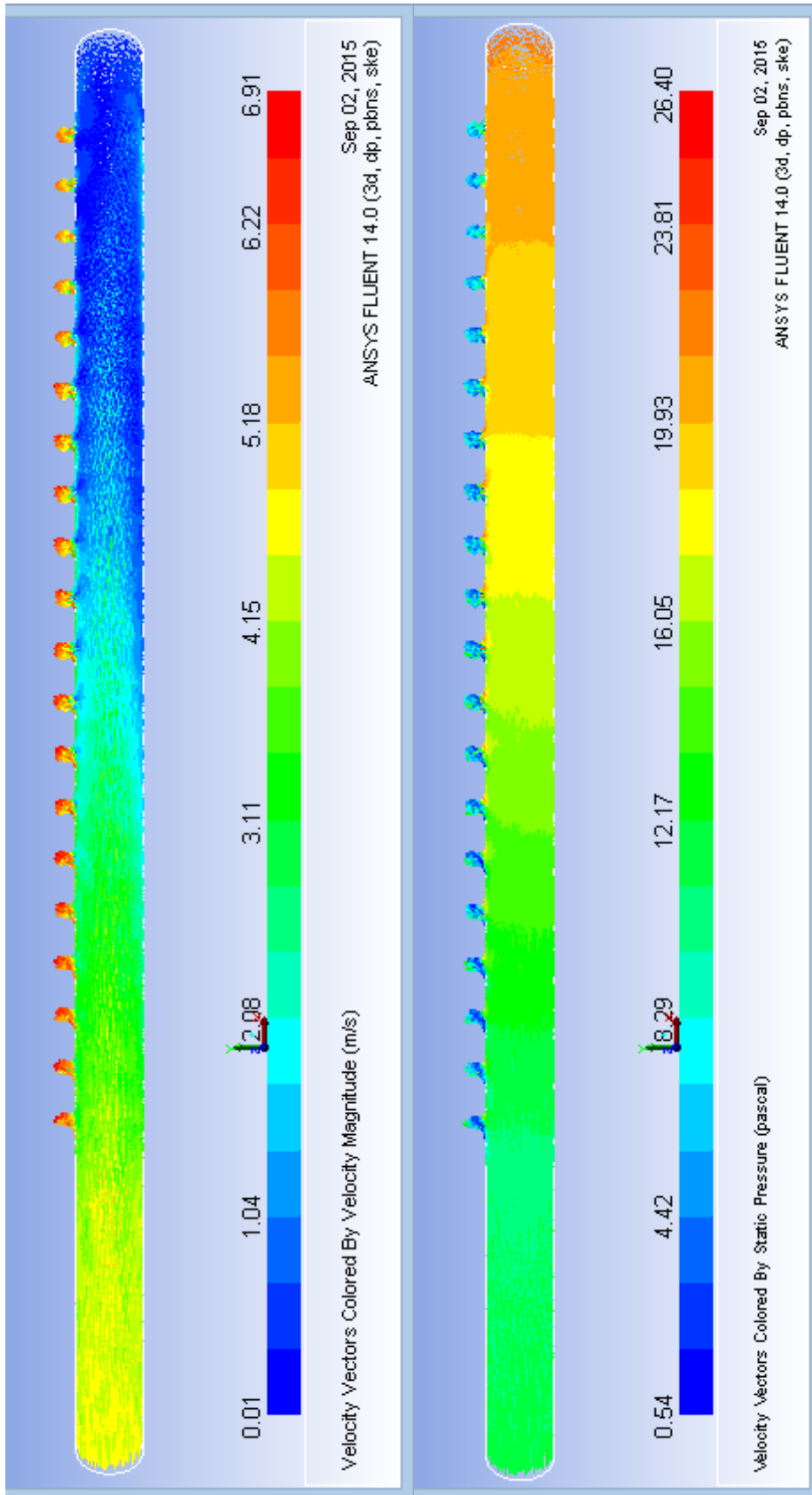
รูปที่ ๓-5 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณที่ 1.5



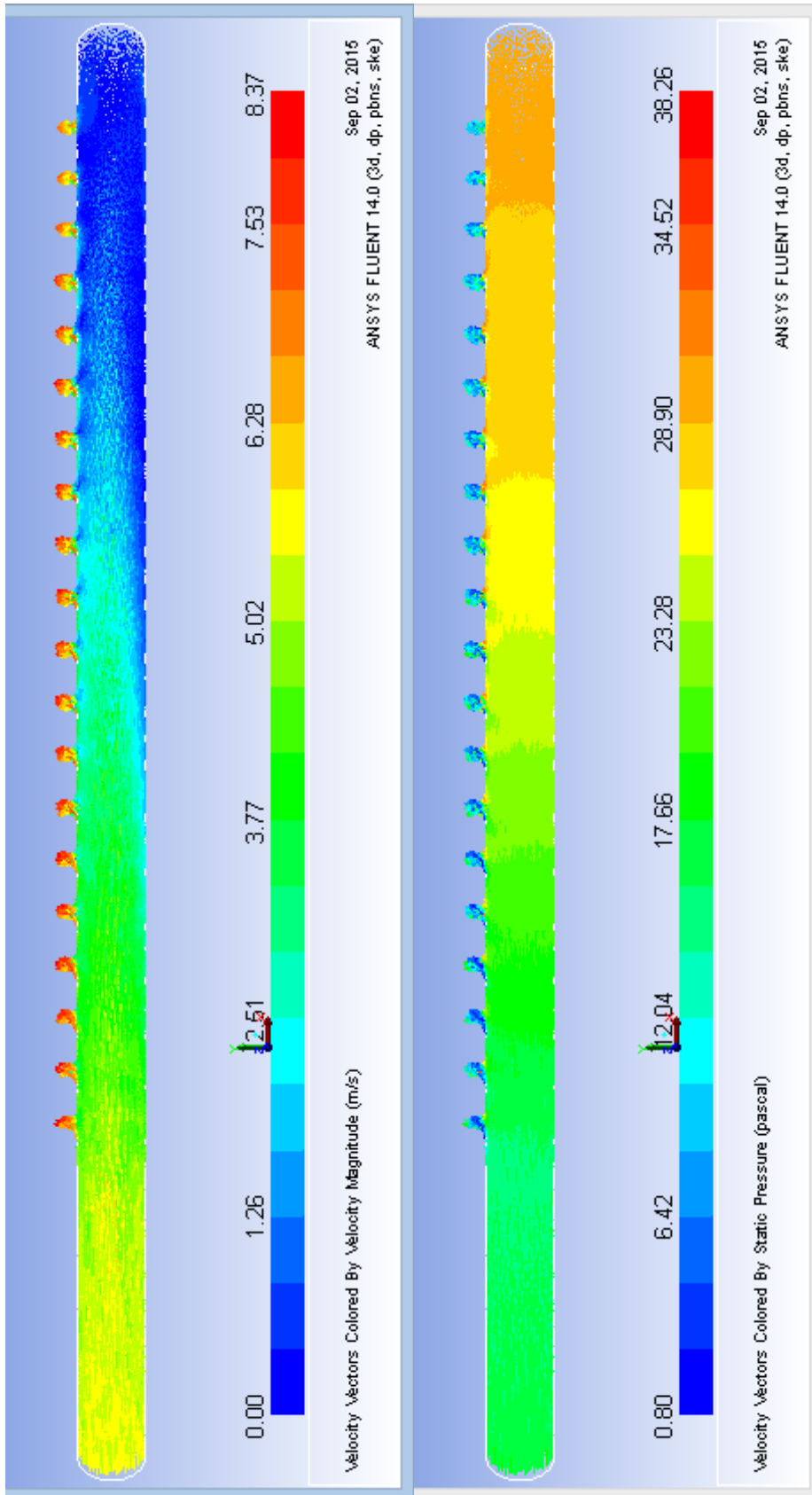
รูปที่ ๓-6 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณที่ 1.6



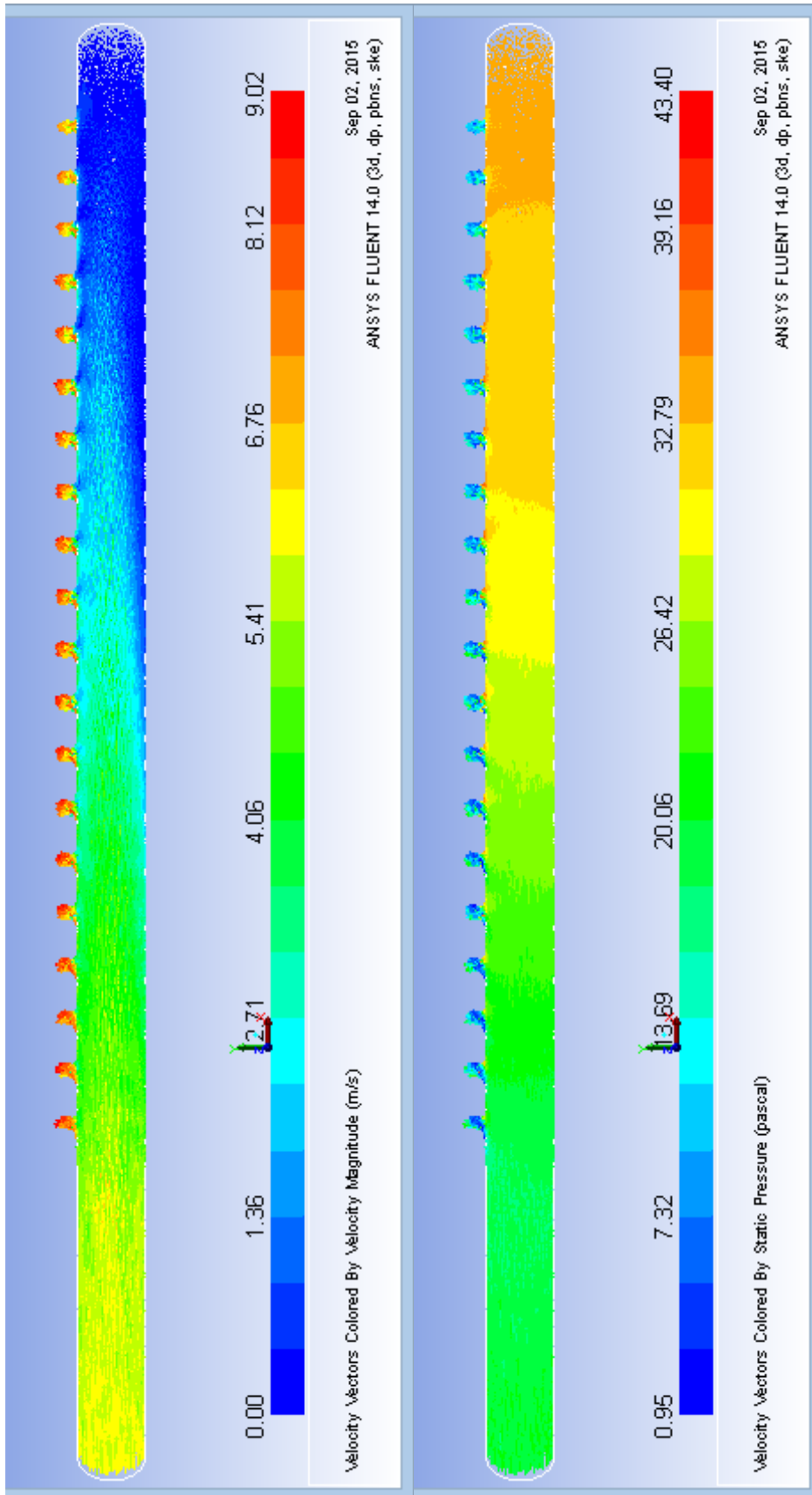
รูปที่ ๓-๗ เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ่า กรณที่ 1.7



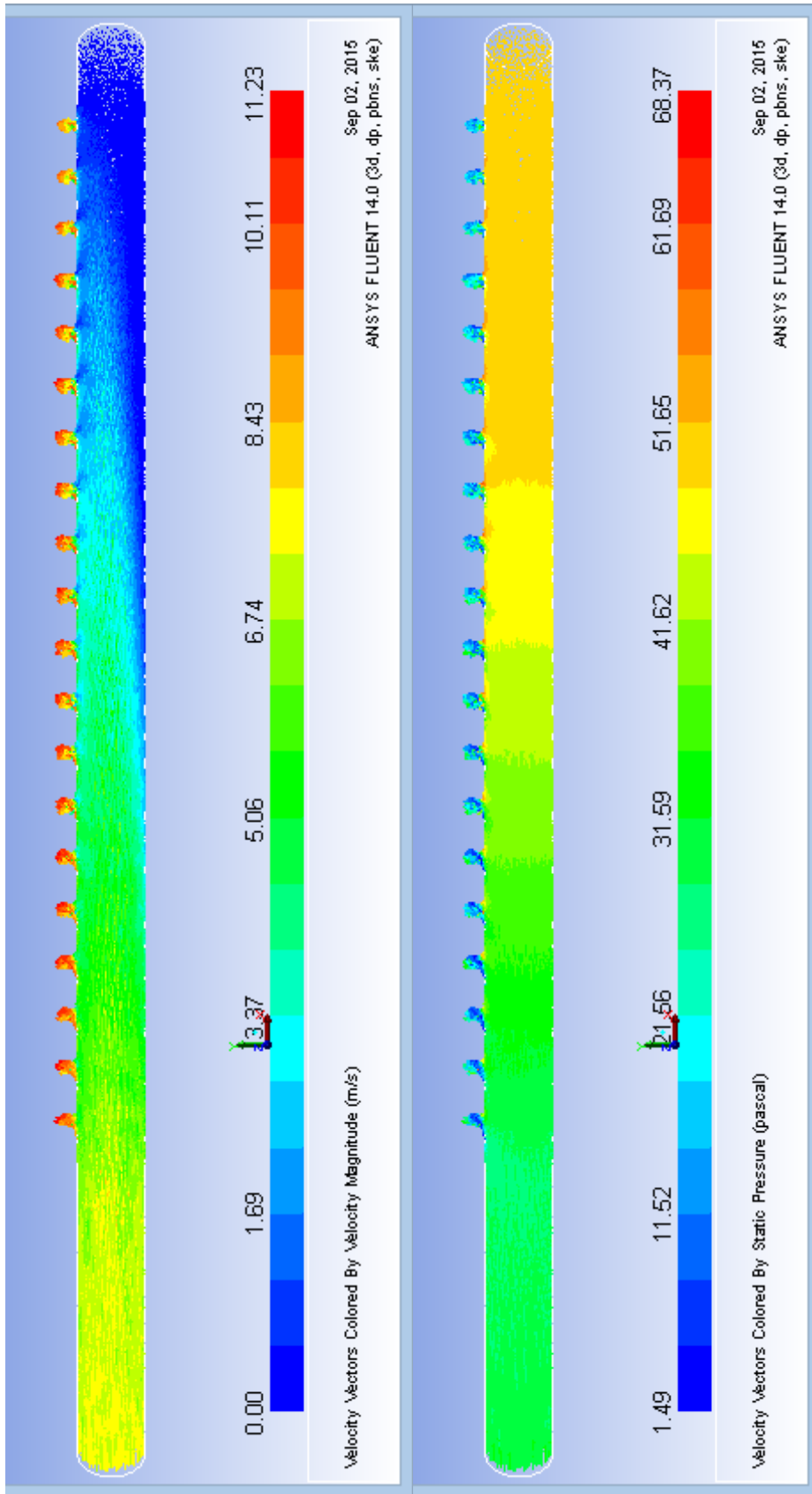
รูปที่ ๓-8 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกวไรเทิลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมผ้า กรณีสที่ 2.1



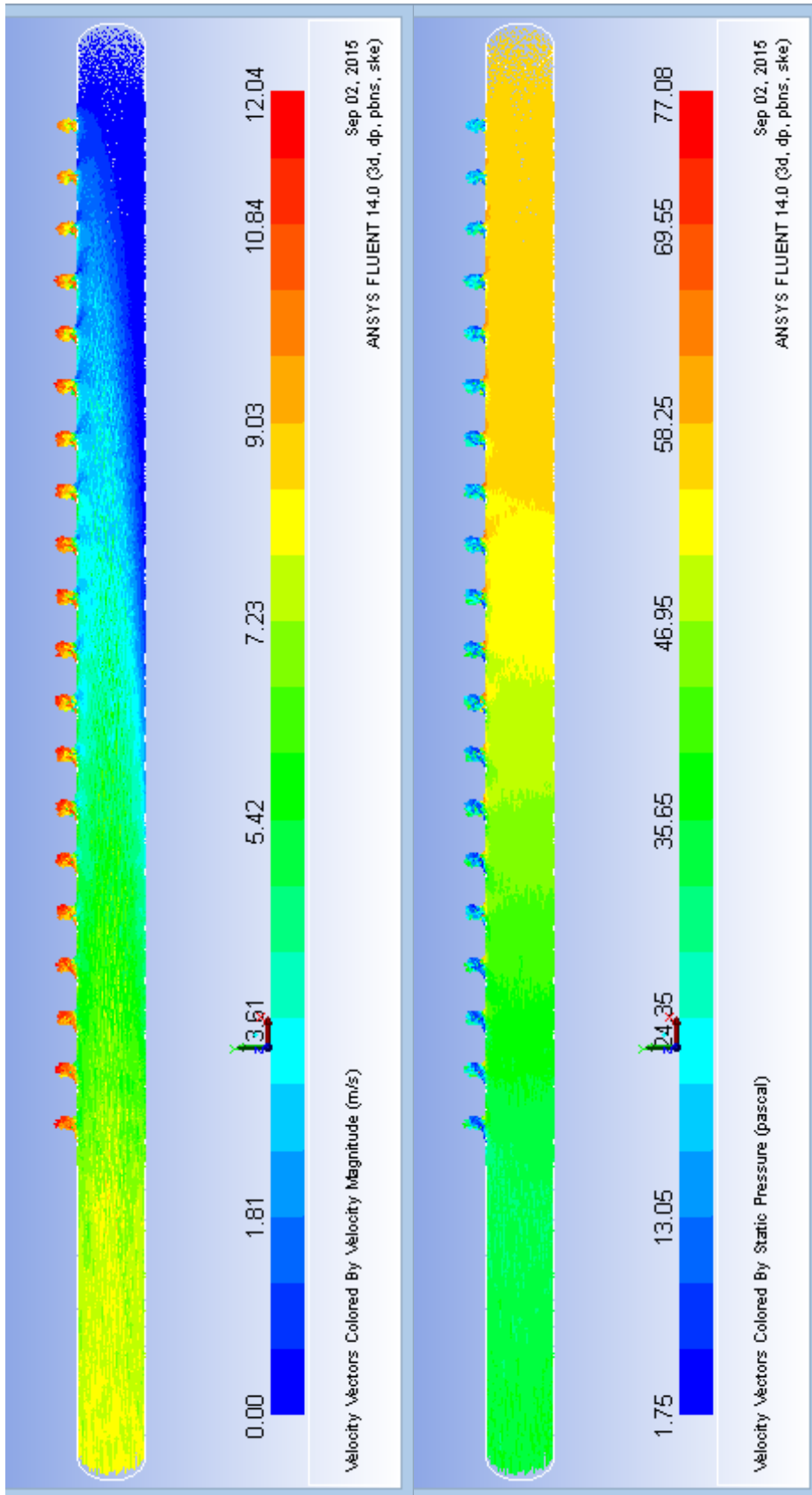
รูปที่ ๓-๙ เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกวไรและการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณที่ 2.2



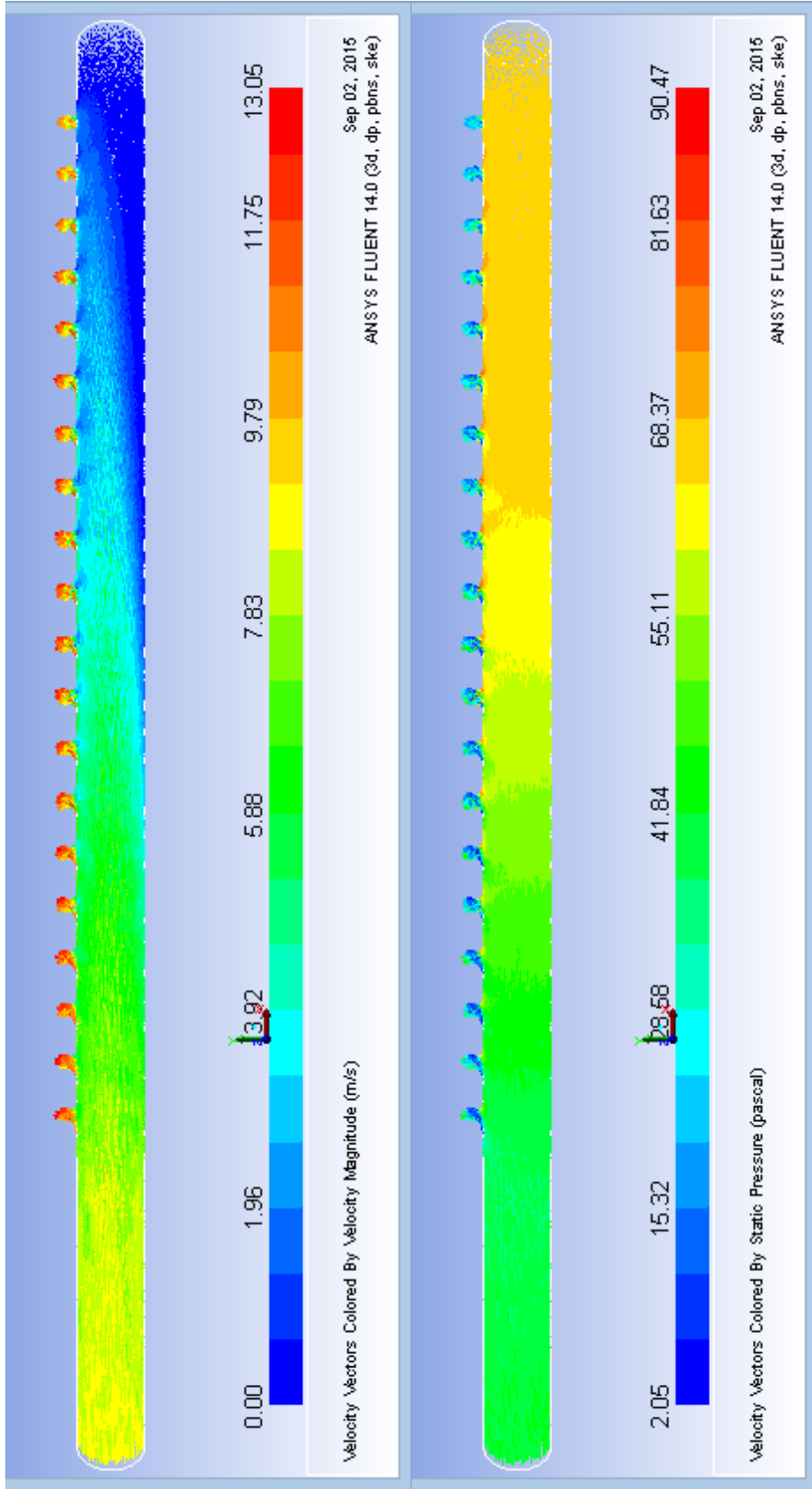
รูปที่ ง-10 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณีที่ 2.3



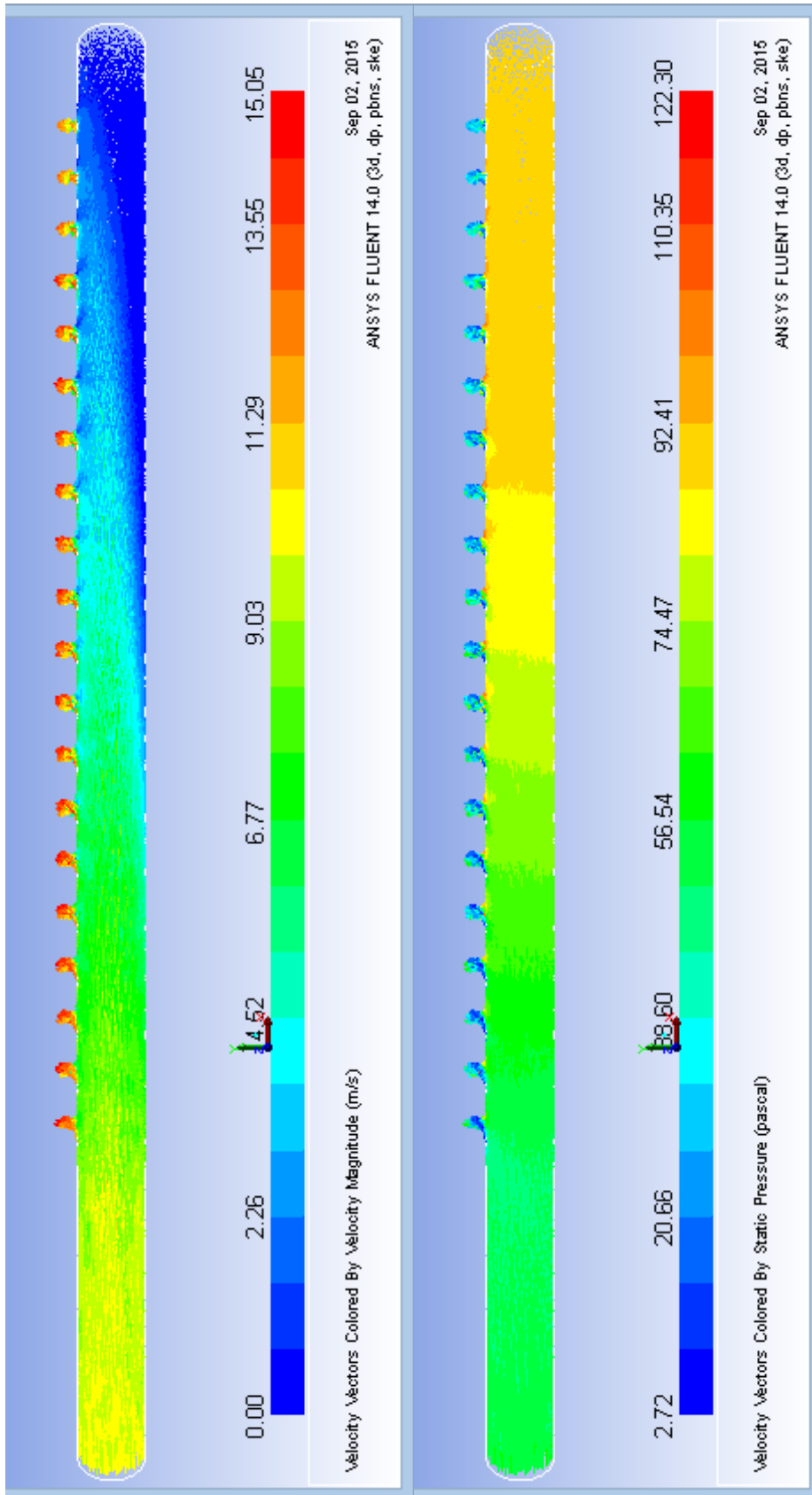
รูปที่ ง-11 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกวไรเทิลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณีสที่ 2.4



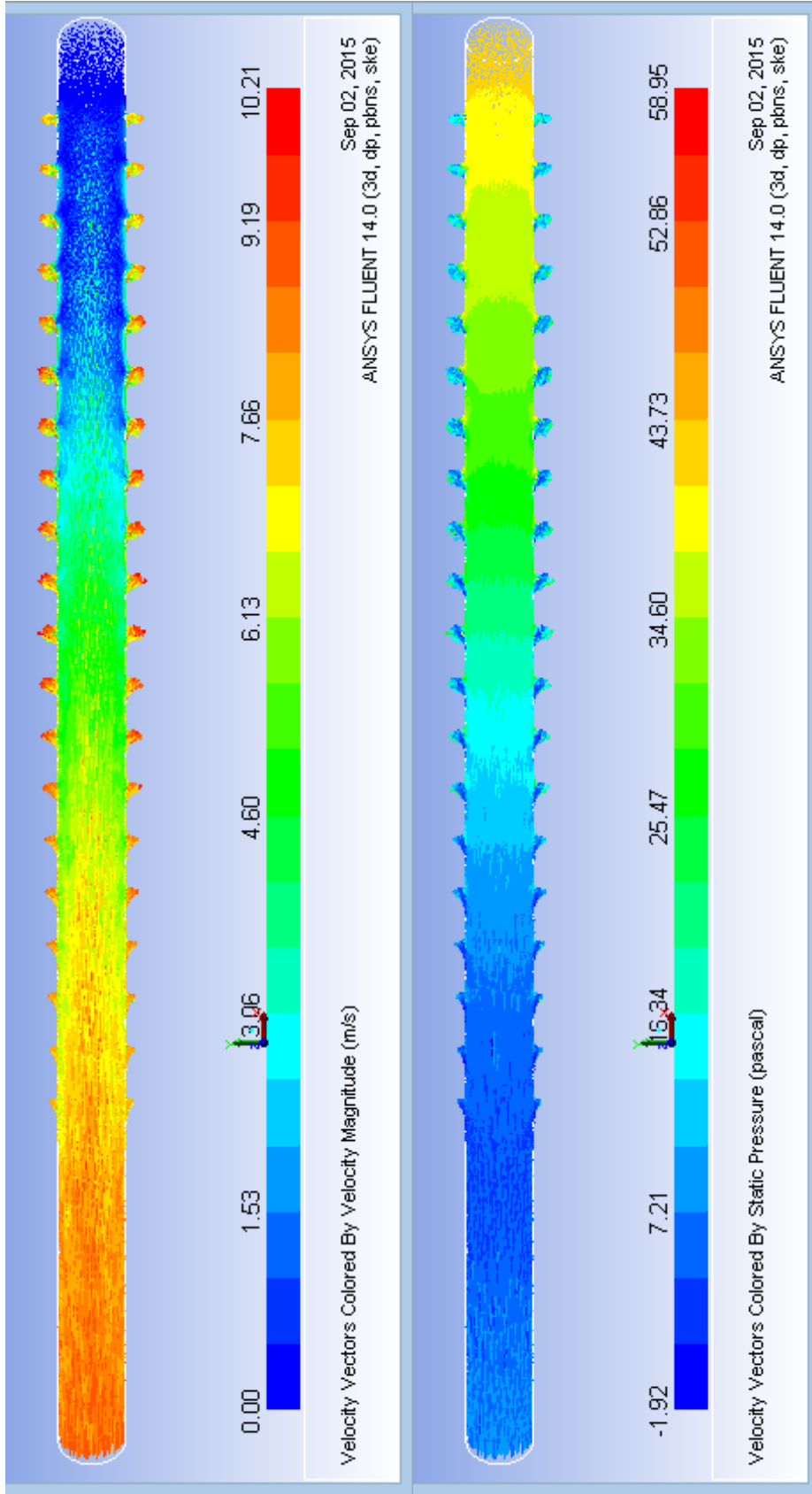
รูปที่ ง-12 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณีสที่ 2.5



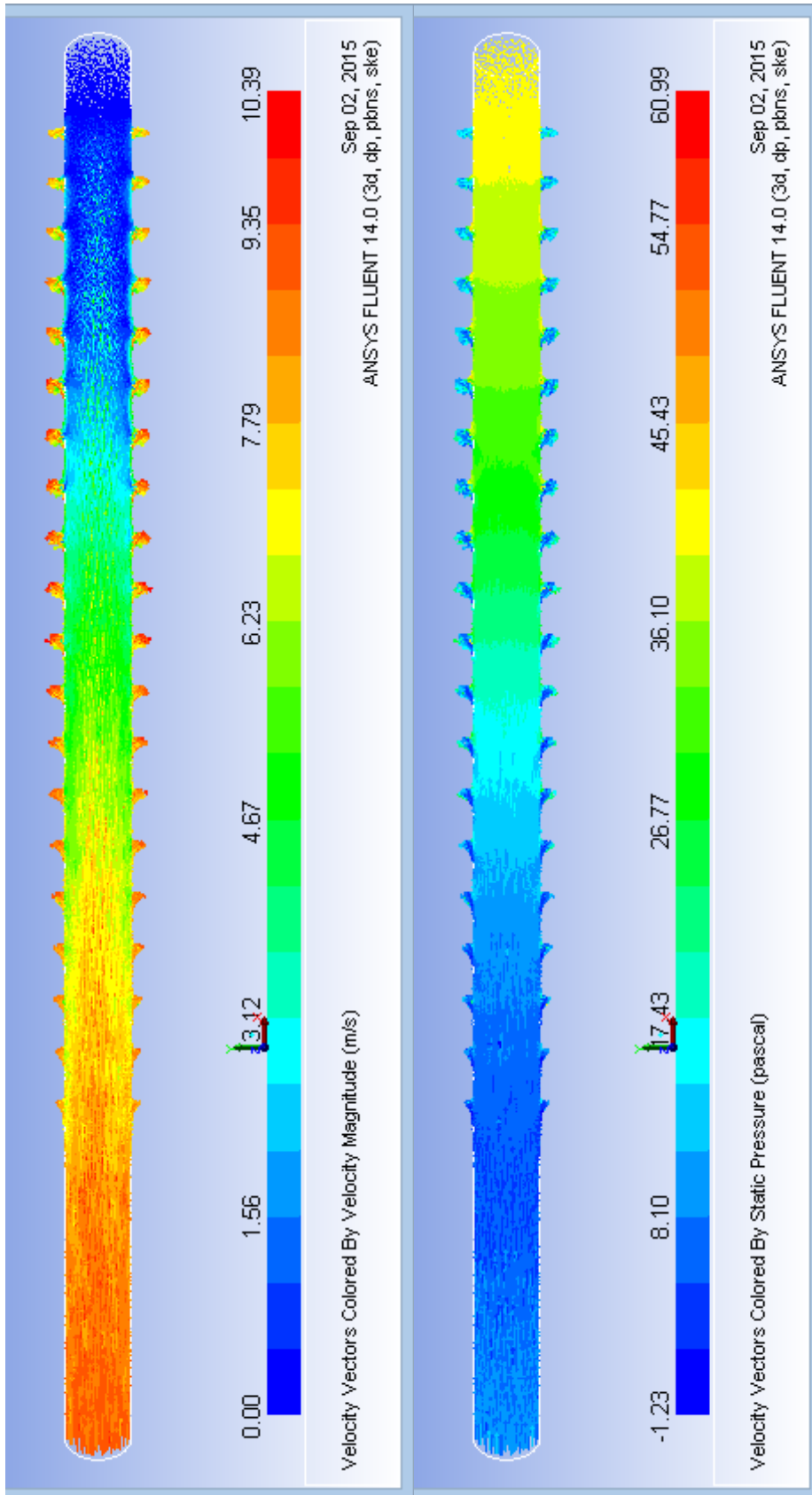
รูปที่ ง-13 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณีที่ 2.6



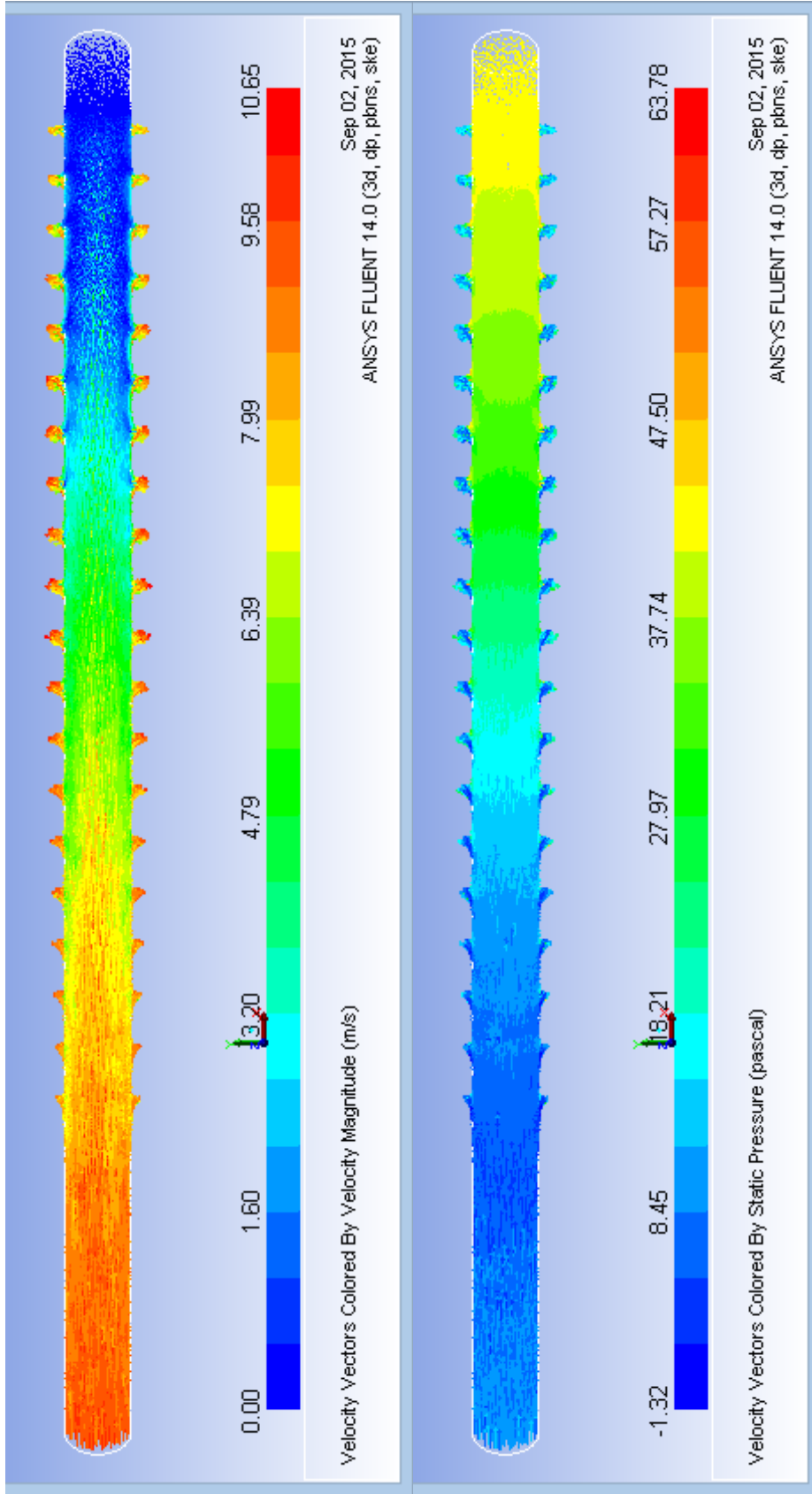
รูปที่ ง-14 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณที่ 2.7



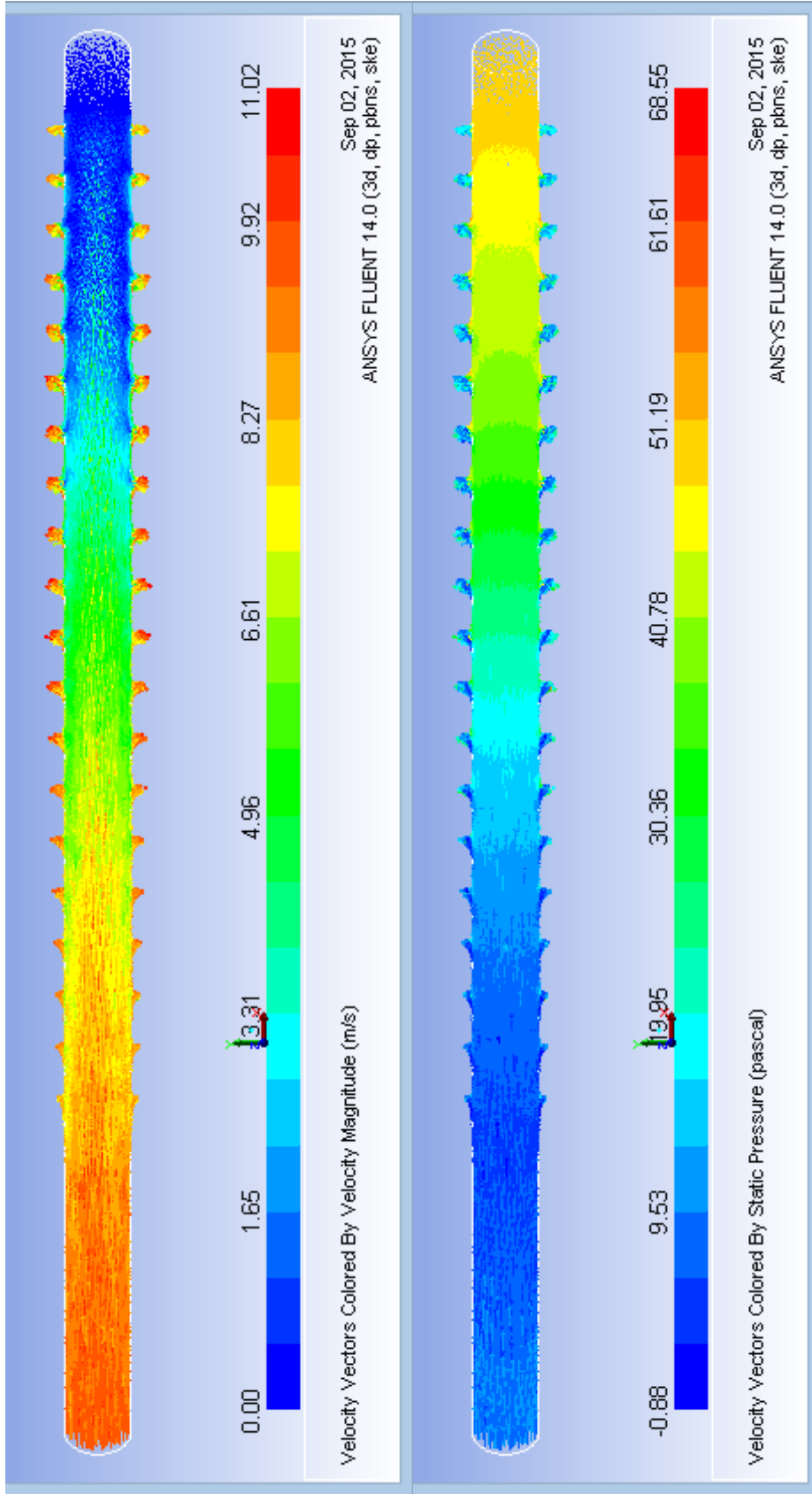
รูปที่ ง-15 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณที่ 3.1



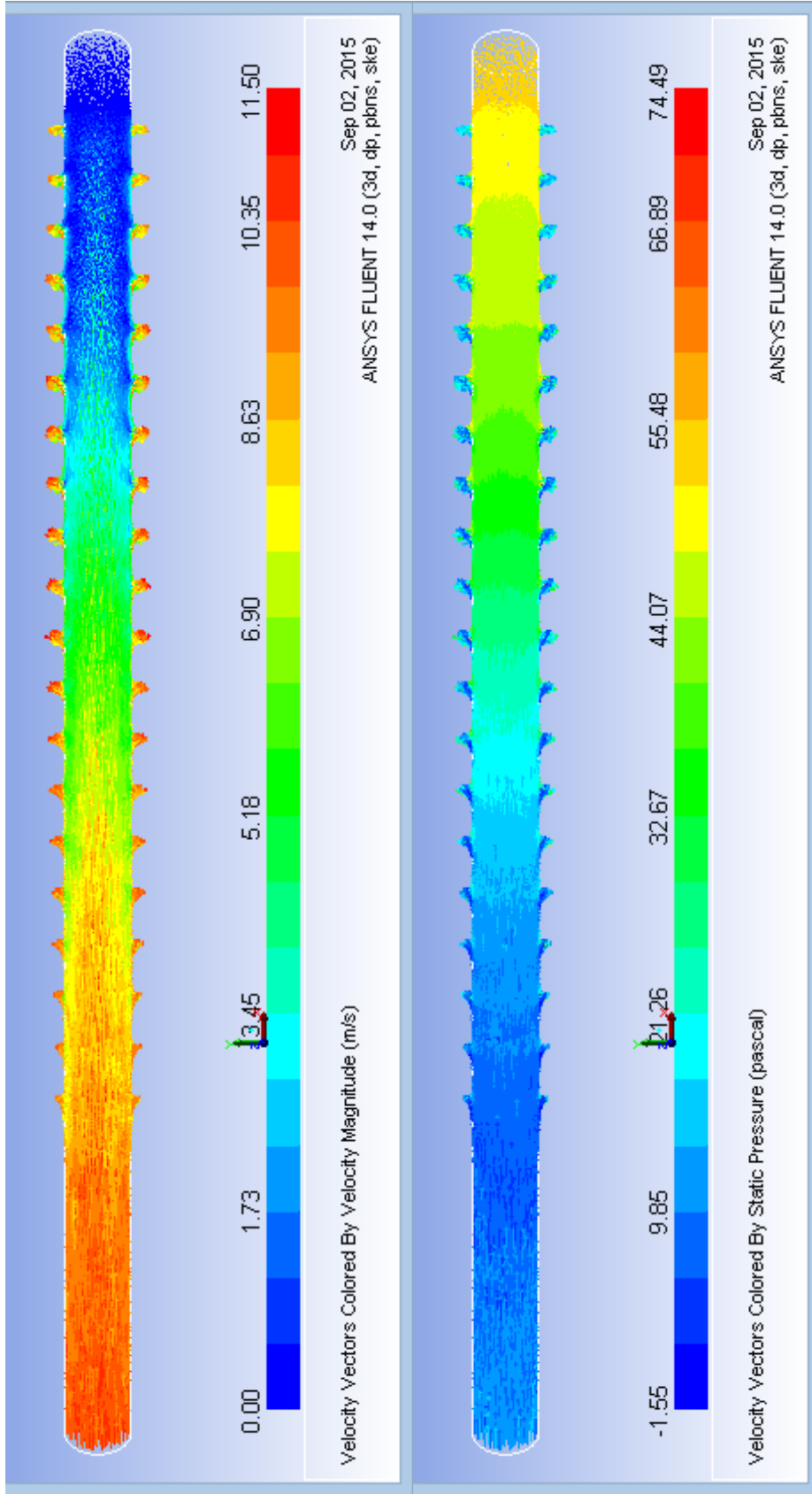
รูปที่ ง-16 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วมวลและการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณีสที่ 3.2



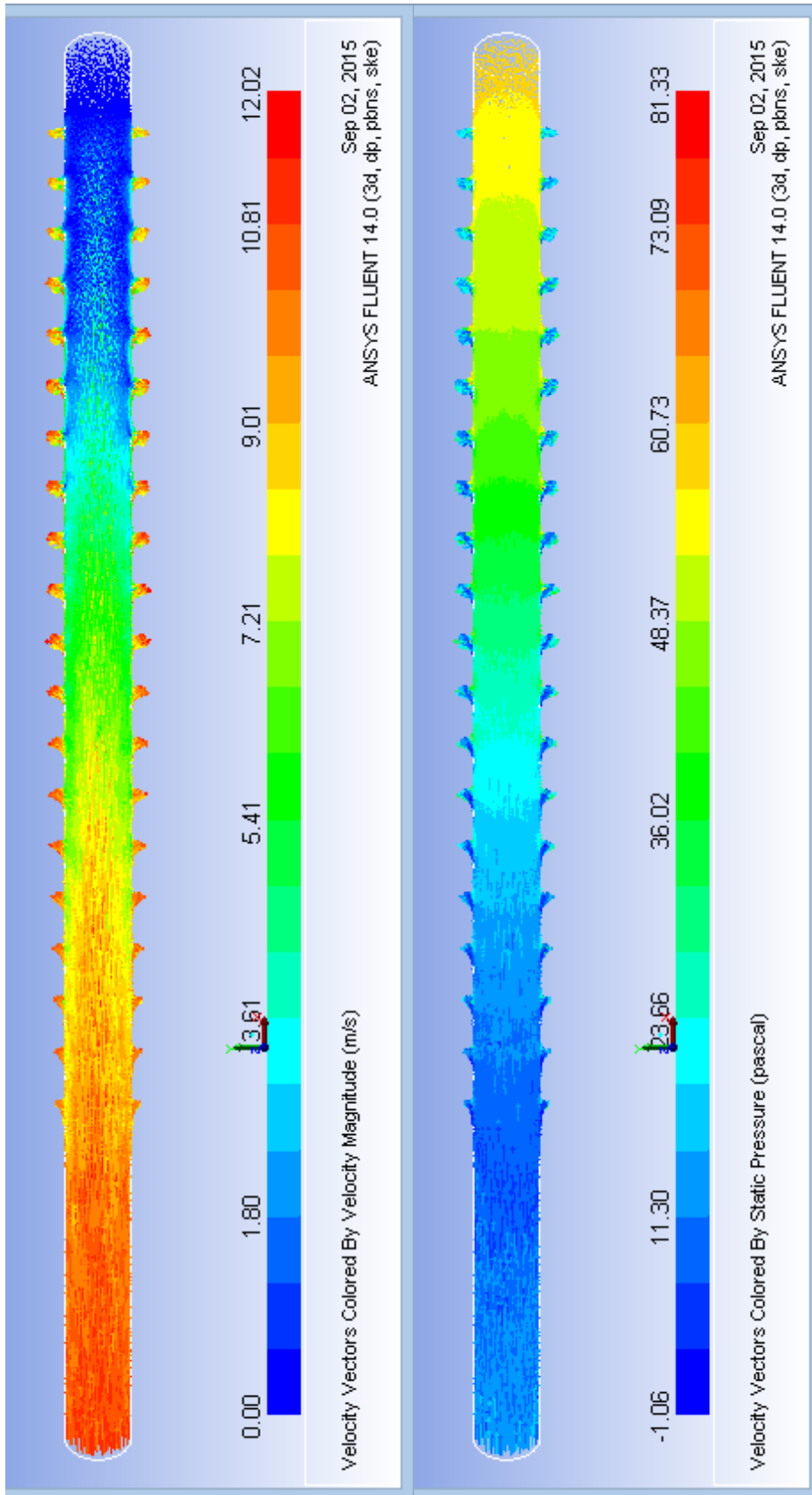
รูปที่ ง-17 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วมวลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณีที่ 3.3



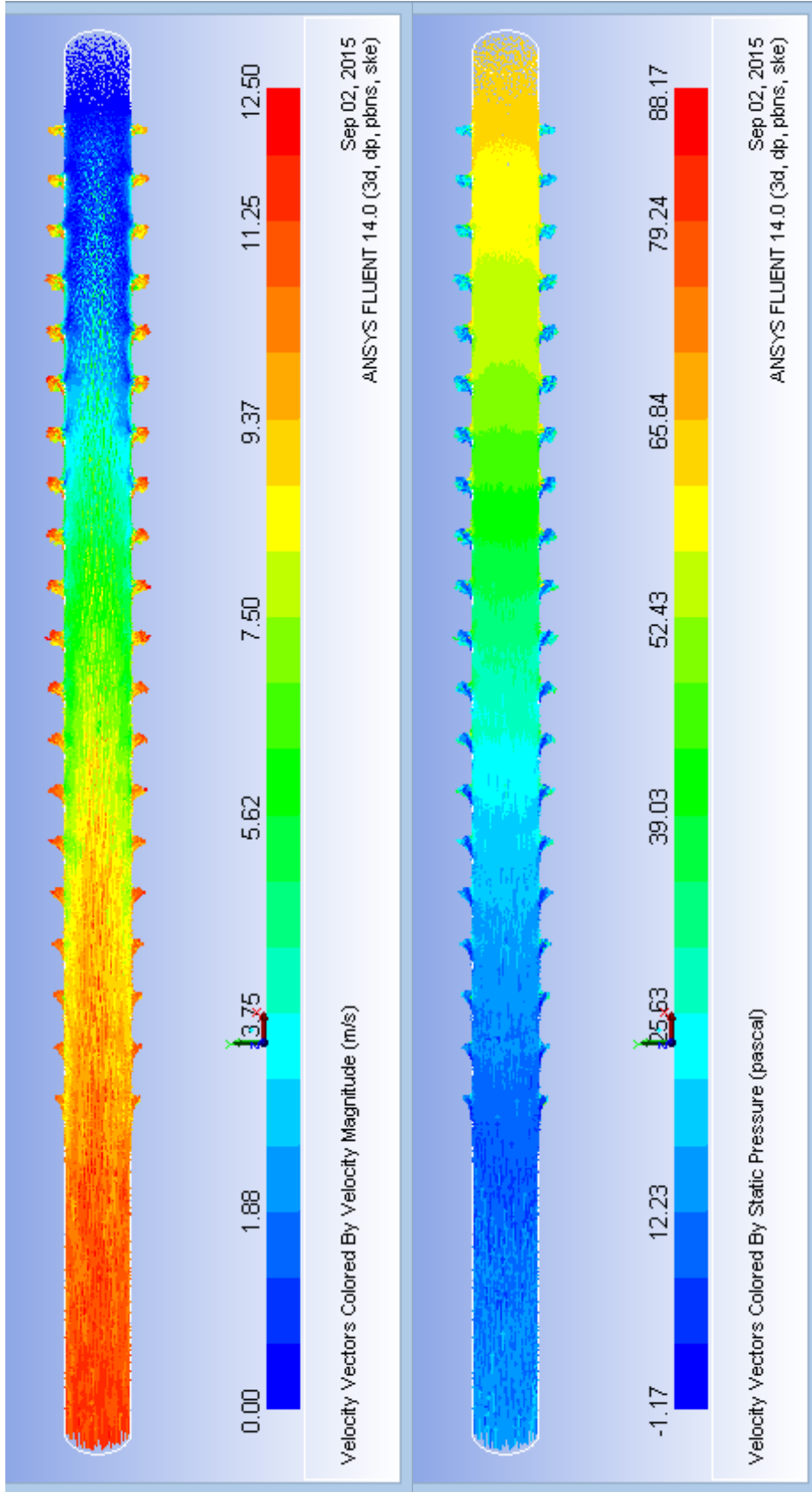
รูปที่ ง-18 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณที่ 3.4



รูปที่ ง-19 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณีที่ 3.5



รูปที่ ง-20 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านท่อลมฟ้า กรณที่ 3.6

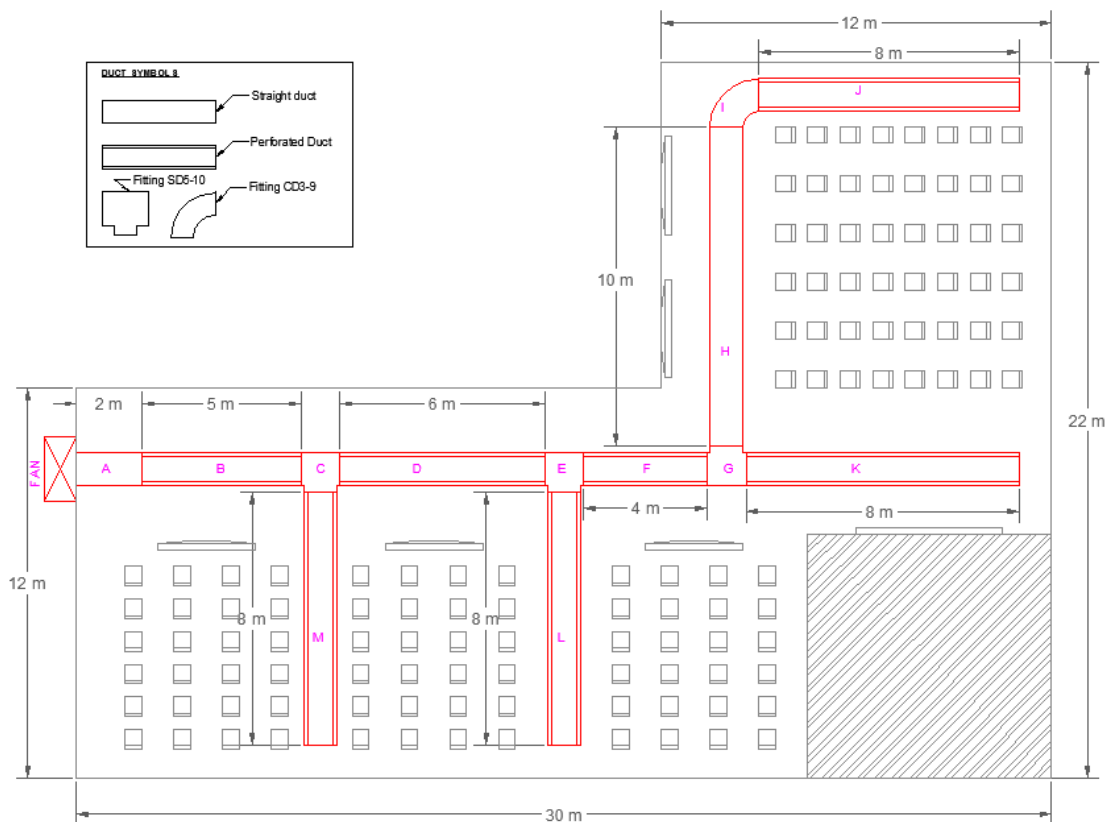


รูปที่ ง-21 เวกเตอร์เส้นระดับของความเร็วกวโรการไหลและความดันสถิต ในการไหลผ่านทอลมฟ้า กรณที่ 3.7

ภาคผนวก จ

ตัวอย่างการออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยโปรแกรมและวิธีของผู้ผลิต DUCTSOX

แสดงภาคผนวกนี้แสดงตัวอย่างการออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยการใช้โปรแกรมจากหัวข้อ 7.3 และเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับการออกแบบตามวิธีของผู้ผลิต DUCTSOX^[29] โดยกำหนดความเร็วเริ่มต้นที่ 8.1 m/s [1600 FPM] ซึ่งมีแนวท่อลมผ้ากับข้อมูลของท่อแต่ละส่วนดังรูปที่ จ-1 และตารางที่ จ-1



รูปที่ จ-1 ตัวอย่างแนวท่อลมของการออกแบบระบบท่อลมผ้า

ตารางที่ จ-1 ข้อมูลของท่อลมแต่ละส่วน

| SECTION | DUCT TYPE | Q ₁ | Q ₂ | Q ₃ | q ₀ | L | T ₅₀ |
|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----|-----------------|
| | | [L/s] | [L/s] | [L/s] | [L/s] | [m] | [m] |
| A | Straight Duct | 6200 | 6200 | - | - | 2 | - |
| B | Perforated Duct | 6200 | 5600 | - | 600 | 5 | 4 |
| C | Fitting SD5-10 | 5600 | 4600 | 1000 | - | - | - |
| D | Perforated Duct | 4600 | 4000 | - | 600 | 6 | 4 |
| E | Fitting SD5-10 | 4000 | 3000 | 1000 | - | - | - |
| F | Perforated Duct | 3000 | 2600 | - | 400 | 4 | 4 |
| G | Fitting SD5-10 | 2600 | 1300 | 1300 | - | - | - |
| H | Straight Duct | 1300 | 1300 | - | - | 10 | - |
| I ¹ | Fitting CD3-9 | 1300 | 1300 | - | - | - | - |
| J | Perforated Duct | 1300 | 0 | - | 1300 | 8 | 6 |
| K | Perforated Duct | 1300 | 0 | - | 1300 | 8 | 6 |
| L | Perforated Duct | 1000 | 0 | - | 1000 | 8 | 8 |
| M | Perforated Duct | 1000 | 0 | - | 1000 | 8 | 8 |

¹ ไม่มีการจัดทำโนโมแกรมสำหรับข้อต่อนี้ การคำนวณให้คิดจาก $P_{s,2} = P_{s,1} - (K) \left(\frac{1}{2} \rho V_1^2 \right)$ โดยค่า K หาจาก ASHRAE Fitting Database^[10] แบบจำลองข้อต่อ CD3-9

จ.1 รายละเอียดการออกแบบระบบท่อลมฟ้าด้วยการใช้โนโมแกรม

เริ่มการออกแบบจากส่วนขาเข้าของแนวท่อลมฟ้า (ท่อน A+B) และตามด้วยส่วนต่อขยาย ไล่ตามลำดับจนครบทุกแนวท่อลมฟ้า โดยผลลัพธ์การออกแบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ จ-2 ถึง จ-7 และรูปที่ จ-2 ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบแต่ละท่อนดังนี้

1. ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมฟ้า A+B

- ทราบค่า $Q_1=6.2 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=5.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $L_{0-1}=2 \text{ m}$, $L_{1-2}=5 \text{ m}$
- กำหนด $V = 8.1 \text{ m/s}$ [$\approx 1600 \text{ FPM}$]
- โนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ V แล้วเลือก $D=1.016 \text{ m}$ (40 in) และอ่านค่าใหม่ได้ $V=7.7 \text{ m/s}$ กับ $\Delta P_t/L = 0.50 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t, \text{straight}} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right) L_{1-2} = 2.5 \text{ Pa}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6a ทราบค่า Q_1, Q_2, D เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_0=6.4$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6b ทราบค่า $Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_1=6.5$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6c ทราบค่า $Q_1, D, q_0, \Delta P_{t, \text{straight}}$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_2=0.8$
- กำหนด $C_{PR}=0.90$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6d ทราบค่า c_1, c_2, C_{PR} เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $P_{s1}=75.0 \text{ Pa}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-7 ทราบค่า P_{s1}, C_{PR}, q_0 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $d_0=0.316 \text{ m}$
- คำนวณค่า $P_{s,2} = \frac{P_{s,1}}{C_{PR}} = 83.3 \text{ Pa}$ และ $P_{s, \text{fan}} = P_{s,1} + \left(\frac{\Delta P}{L}\right) \times L_{0 \rightarrow 1} = 76.0 \text{ Pa}$
- นำค่า $D=1.016 \text{ m}$ และ $P_{s,2}=83.3 \text{ Pa}$ ไปใช้ในข้อต่อ C

2. ส่วนต่อขยาย: ข้อต่อ C

- ทราบค่า $Q_1=5.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=4.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{s1}=83.3 \text{ Pa}$, $D_1=1.016 \text{ m}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-8 ทราบค่า Q_1, Q_2, D_1 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $D_2=0.965 \text{ m}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-9 ทราบค่า Q_1, Q_3, D_1 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $D_3=0.610 \text{ m}$
- นำค่า $D_2=0.965 \text{ m}$ และ $P_{s2}=P_{s1}=83.3 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน D
- นำค่า $D_3=0.610 \text{ m}$ และ $P_{s3}=P_{s1}=83.3 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน M

3. ส่วนต่อขยาย: ท่อที่มีช่องเปิด D

- ทราบ $Q_1=4.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=4.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=6 \text{ m}$, $D=0.965 \text{ m}$, $P_{s1}=83.3 \text{ Pa}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D และอ่านค่าได้ $\Delta P_t/L = 0.35 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t, \text{straight}} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right)L = 2.1 \text{ Pa}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6a ทราบค่า Q_1, Q_2, D เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_0=5.8$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6b ทราบค่า $Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_1=5.6$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6c ทราบค่า $Q_1, D, q_0, \Delta P_{t, \text{straight}}$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_2=0.7$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6d ทราบค่า c_1, c_2, P_{s1} เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $C_{PR} = 0.920$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-7 ทราบค่า P_{s1}, C_{PR}, q_0 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $d_0=0.310 \text{ m}$
- คำนวณค่า $P_{s,2} = \frac{P_{s,1}}{C_{PR}} = 90.6 \text{ Pa}$
- นำค่า $D=0.965 \text{ m}$ และ $P_{s,2}=90.6 \text{ Pa}$ ไปใช้ในข้อต่อ E

4. ส่วนต่อขยาย: ข้อต่อ E

- ทราบค่า $Q_1=4.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=3.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{s1}=90.6 \text{ Pa}$, $D_1=0.965 \text{ m}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-8 ทราบค่า Q_1, Q_2, D_1 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $D_2=0.864 \text{ m}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-9 ทราบค่า Q_1, Q_3, D_1 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $D_3=0.711 \text{ m}$
- นำค่า $D_2=0.864 \text{ m}$ และ $P_{s2}=P_{s1}=90.6 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน F
- นำค่า $D_3=0.711 \text{ m}$ และ $P_{s3}=P_{s1}=90.6 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน L

5. ส่วนต่อขยาย: ท่อที่มีช่องเปิด F

- ทราบ $Q_1=3.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=2.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=0.4 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=4 \text{ m}$, $D=0.864 \text{ m}$, $P_{s1}=90.6 \text{ Pa}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D และอ่านค่าได้ $\Delta P_t/L = 0.28 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t, \text{straight}} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right)L = 1.1 \text{ Pa}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6a ทราบค่า Q_1, Q_2, D เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_0=3.7$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6b ทราบค่า $Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_1=3.5$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6c ทราบค่า $Q_1, D, q_0, \Delta P_{t, \text{straight}}$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_2=0.3$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6d ทราบค่า c_1, c_2, P_{s1} เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $C_{PR} = 0.945$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-7 ทราบค่า P_{s1}, C_{PR}, q_0 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $d_0=0.250 \text{ m}$
- คำนวณค่า $P_{s,2} = \frac{P_{s,1}}{C_{PR}} = 95.9 \text{ Pa}$

- นำค่า $D=0.864$ m และ $P_{s2}=95.9$ Pa ไปใช้ในข้อต่อ G

6. ส่วนต่อขยาย: ข้อต่อ G

- ทราบค่า $Q_1=2.6$ m³/s, $Q_2=1.3$ m³/s, $Q_3=1.3$ m³/s, $P_{s1}=95.9$ Pa, $D_1=0.864$ m
- โนโมแกรมรูปที่ 7-8 ทราบค่า Q_1, Q_2, D_1 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $D_2=0.660$ m
- โนโมแกรมรูปที่ 7-9 ทราบค่า Q_1, Q_3, D_1 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $D_3=0.813$ m
- นำค่า $D_2=0.660$ m และ $P_{s2}=P_{s1}=95.9$ Pa ไปใช้ในท่อน K
- นำค่า $D_3=0.813$ m และ $P_{s3}=P_{s1}=95.9$ Pa ไปใช้ในท่อน H

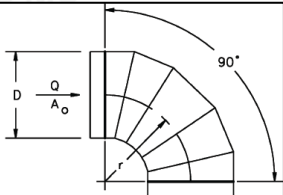
7. ส่วนต่อขยาย: ท่อตรง H

- ทราบค่า $Q_1=1.3$ m³/s, $L=10$ m, $P_{s1}=95.9$ Pa, $D_1=0.813$ m
- โนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $\Delta P_t/L = 0.08$ Pa/m, $V=2.5$ m/s
- คำนวณค่า $P_{s,2} = P_{s,1} - \left(\frac{\Delta P}{L}\right) \times L = 95.1$ Pa
- นำค่า $D=0.813$ m และ $P_{s2}=95.1$ Pa ไปใช้ในท่อน I

8. ส่วนต่อขยาย: ข้องอ I

- ทราบค่า $Q_1=1.3$ m³/s, $P_{s1}=95.1$ Pa, $D=0.813$ m, $V=2.5$ m/s
- จากตารางข้อมูลของข้องอ CD3-9 จะทราบ $K=0.12$

| CD3-9 Elbow, 5 Gore, 90 Degree, $r/D = 1.5$ | | | | | | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| D, mm | 75 | 150 | 230 | 300 | 380 | 450 | 530 | 600 | 690 | 750 | 1500 |
| C_o | 0.51 | 0.28 | 0.21 | 0.18 | 0.16 | 0.15 | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |



- คำนวณค่า $P_{s,2} = P_{s,1} - (K) \left(\frac{1}{2} \rho V_1^2\right) = 94.6$ Pa
- นำค่า $D=0.813$ m และ $P_{s2}=94.6$ Pa ไปใช้ในท่อน J

9. ส่วนต่อขยาย: ท่อที่มีช่องเปิด J

- ทราบ $Q_1=1.3$ m³/s, $Q_2=0$ m³/s, $q_0=1.3$ m³/s, $L=8$ m, $D=0.813$ m, $P_{s1}=94.6$ Pa
- โนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D และอ่านค่าได้ $\Delta P_t/L = 0.10$ Pa/m
- คำนวณค่า $\Delta P_{t, straight} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right) L = 0.8$ Pa
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6a ทราบค่า Q_1, Q_2, D เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $C_0=4.2$

- โนโมแกรมรูปที่ 7-6b ทราบค่า $Q_1, D, \Delta P_{t, straight}, c_0$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_1=4.0$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6c ทราบค่า $Q_1, D, q_0, \Delta P_{t, straight}$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_2=0.4$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6d ทราบค่า c_1, c_2, P_{s1} เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $C_{PR} = 0.950$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-7 ทราบค่า P_{s1}, C_{PR}, q_0 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $d_0=0.440$ m
- คำนวณค่า $P_{s,2} = \frac{P_{s1}}{C_{PR}} = 99.6$ Pa

10. ส่วนต่อขยาย: ท่อที่มีช่องเปิด K

- ทราบ $Q_1=1.3$ m³/s, $Q_2=0$ m³/s, $q_0=1.3$ m³/s, $L=8$ m, $D=0.660$ m, $P_{s1}=95.9$ Pa
- โนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D และอ่านค่าได้ $\Delta P_t/L = 0.22$ Pa/m
- คำนวณค่า $\Delta P_{t, straight} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right)L = 1.8$ Pa
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6a ทราบค่า Q_1, Q_2, D เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_0=9.6$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6b ทราบค่า $Q_1, D, \Delta P_{t, straight}, c_0$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_1=9.2$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6c ทราบค่า $Q_1, D, q_0, \Delta P_{t, straight}$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_2=1.1$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6d ทราบค่า c_1, c_2, P_{s1} เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $C_{PR} = 0.910$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-7 ทราบค่า P_{s1}, C_{PR}, q_0 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $d_0=0.438$ m
- คำนวณค่า $P_{s,2} = \frac{P_{s1}}{C_{PR}} = 105.3$ Pa

11. ส่วนต่อขยาย: ท่อที่มีช่องเปิด L

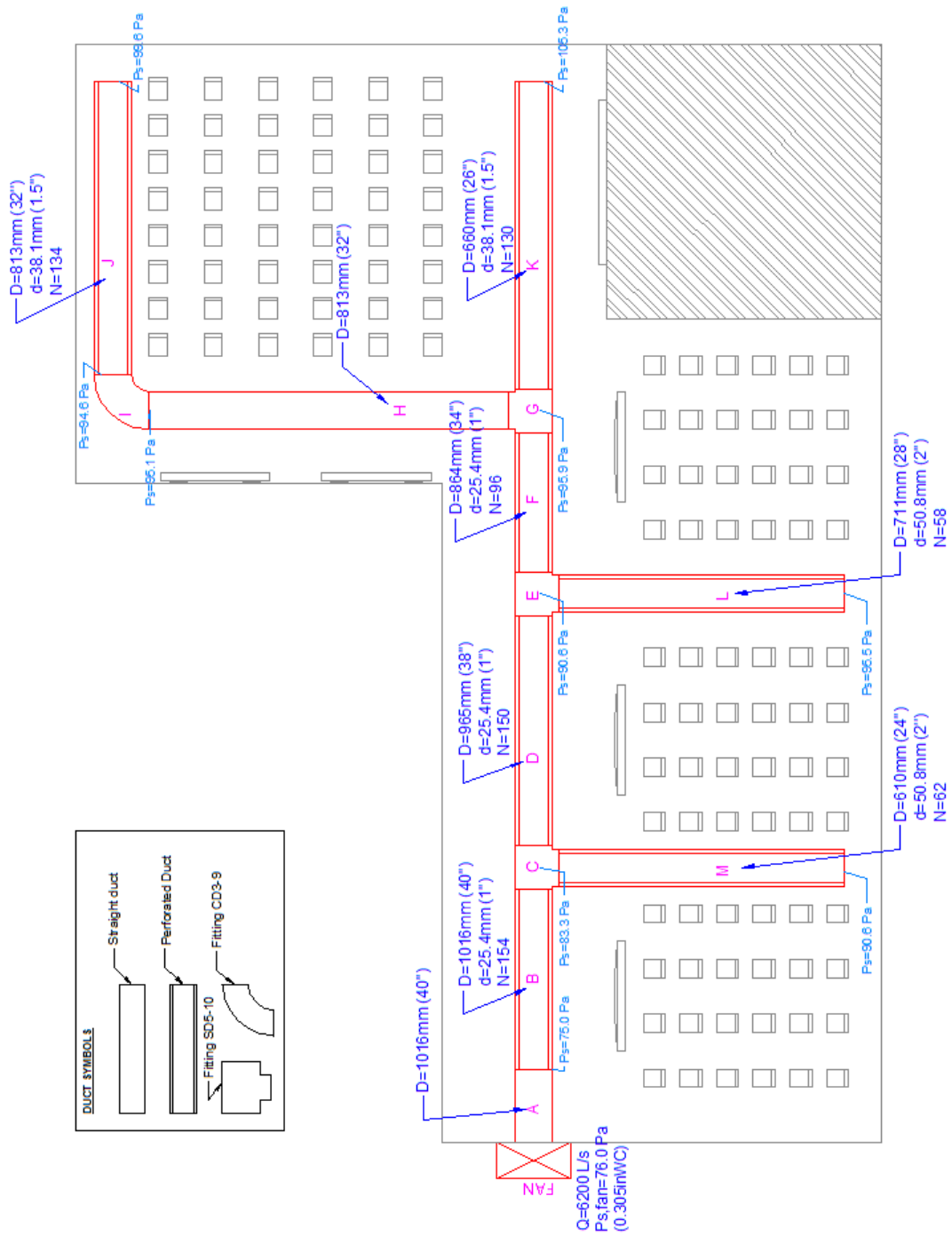
- ทราบ $Q_1=1.0$ m³/s, $Q_2=0$ m³/s, $q_0=1.0$ m³/s, $L=8$ m, $D=0.711$ m, $P_{s1}=90.6$ Pa
- โนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D และอ่านค่าได้ $\Delta P_t/L = 0.10$ Pa/m
- คำนวณค่า $\Delta P_{t, straight} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right)L = 0.8$ Pa
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6a ทราบค่า Q_1, Q_2, D เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_0=3.6$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6b ทราบค่า $Q_1, D, \Delta P_{t, straight}, c_0$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_1=3.5$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6c ทราบค่า $Q_1, D, q_0, \Delta P_{t, straight}$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_2=0.4$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6d ทราบค่า c_1, c_2, P_{s1} เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $C_{PR} = 0.948$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-7 ทราบค่า P_{s1}, C_{PR}, q_0 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $d_0=0.390$ m
- คำนวณค่า $P_{s,2} = \frac{P_{s1}}{C_{PR}} = 95.5$ Pa

12. ส่วนต่อขยาย: ท่อที่มีช่องเปิด M

- ทราบ $Q_1=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=8 \text{ m}$, $D=0.610 \text{ m}$, $P_{s1}=83.3 \text{ Pa}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-5 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D และอ่านค่าได้ $\Delta P_t/L = 0.20 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t, \text{straight}} = \left(\frac{\Delta P_t}{L}\right)L = 1.6 \text{ Pa}$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6a ทราบค่า Q_1, Q_2, D เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_0=6.6$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6b ทราบค่า $Q_1, D, \Delta P_{t, \text{straight}}, c_0$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_1=6.0$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6c ทราบค่า $Q_1, D, q_0, \Delta P_{t, \text{straight}}$ เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $c_2=0.9$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-6d ทราบค่า c_1, c_2, P_{s1} เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $C_{PR} = 0.920$
- โนโมแกรมรูปที่ 7-7 ทราบค่า P_{s1}, C_{PR}, q_0 เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ $d_0=0.400 \text{ m}$
- คำนวณค่า $P_{s,2} = \frac{P_{s1}}{C_{PR}} = 90.6 \text{ Pa}$

13. การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

- ทราบ T_{50} , q_0 และ d_0 ของท่อน B,D,F,J,K,L,M
- โนโมแกรมรูปที่ 7-10 ลากเส้นตรงระหว่าง d_0 กับ q_0 มาตัดที่สเกล R_{10} แล้วลากเส้นตรงระหว่าง R_{10} ที่ได้กับ T_{50} มาตัดที่แกน d โดยเลือกขนาด d ที่ใกล้เคียง และนำ d ที่เลือกนี้ ลากเส้นตรงกับค่า R_{10} เพื่ออ่านค่า $T_{50, \text{real}}$ จริง
- โนโมแกรมรูปที่ 7-11 ทราบค่า d_0, d เมื่อลากเส้นบนโนโมแกรมจะได้ค่า N
- ผลลัพธ์ของแต่ละท่อนแสดงได้ดังตาราง จ-7



รูปที่ จ-2 ผลลัพธ์ของการออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยโปรแกรม

ตารางที่ จ-2 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า

| SECTION | Q ₁ | Q ₂ | q ₀ | L ₀₋₁ | L ₁₋₂ | D | V | ΔP _t /L | ΔP _{t,0-1} | ΔP _{t,straight} | C ₀ | C ₁ | C ₂ | C _{PR} | P _{s1} | d ₀ | P _{s2} | P _{sfan} |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|-------|-------|--------------------|---------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-------------------|
| | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m] | [m] | [m] | [m/s] | [Pa/m] | [Pa] | [Pa] | [-] | [-] | [-] | [-] | [Pa] | [m] | [Pa] | [Pa] |
| A+B | 6.2 | 5.6 | 0.6 | 2 | 5 | 1.016 | 7.70 | 0.50 | 1.00 | 2.50 | 6.4 | 6.5 | 0.8 | 0.900 | 75.0 | 0.316 | 83.3 | 76.0 |

ตารางที่ จ-3 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนต่อขยาย: ท่อตรง

| SECTION | Q ₁ | L | P _{s1} | D | V | ΔP _t /L | P _{s2} |
|---------|---------------------|-----|-----------------|-------|-------|--------------------|-----------------|
| | [m ³ /s] | [m] | [Pa] | [m] | [m/s] | [Pa/m] | [Pa] |
| H | 1.30 | 10 | 95.9 | 0.813 | 2.5 | 0.08 | 95.1 |

ตารางที่ จ-4 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนต่อขยาย: ท่อที่มีช่องเปิด

| SECTION | Q ₁ | Q ₂ | q ₀ | L | D | P _{s1} | ΔP _t /L | ΔP _{t,straight} | C ₀ | C ₁ | C ₂ | C _{PR} | d ₀ | P _{s2} |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|-----|-------|-----------------|--------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m] | [m] | [Pa] | [Pa/m] | [Pa] | [-] | [-] | [-] | [-] | [m] | [Pa] |
| D | 4.60 | 4.00 | 0.60 | 6 | 0.965 | 83.3 | 0.35 | 2.1 | 5.8 | 5.6 | 0.7 | 0.920 | 0.310 | 90.6 |
| F | 3.00 | 2.60 | 0.40 | 4 | 0.864 | 90.6 | 0.28 | 1.1 | 3.7 | 3.5 | 0.3 | 0.945 | 0.250 | 95.9 |
| J | 1.30 | 0.00 | 1.30 | 8 | 0.813 | 94.6 | 0.10 | 0.8 | 4.2 | 4.0 | 0.4 | 0.950 | 0.440 | 99.6 |
| K | 1.30 | 0.00 | 1.30 | 8 | 0.660 | 95.9 | 0.22 | 1.8 | 9.6 | 9.2 | 1.1 | 0.910 | 0.438 | 105.3 |
| L | 1.00 | 0.00 | 1.00 | 8 | 0.711 | 90.6 | 0.10 | 0.8 | 3.6 | 3.5 | 0.4 | 0.948 | 0.390 | 95.5 |
| M | 1.00 | 0.00 | 1.00 | 8 | 0.610 | 83.3 | 0.20 | 1.6 | 6.6 | 6.0 | 0.9 | 0.920 | 0.400 | 90.6 |

ตารางที่ จ-5 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนต่อขยาย: ข้อต่อ SD5-10

| SECTION | Q_1 | Q_2 | Q_3 | D_1 | $P_{s1}=P_{s2}=P_{s3}$ | Q_2/Q_1 | D_2 | Q_3/Q_1 | D_3 |
|---------|---------------------|---------------------|---------------------|-------|------------------------|-----------|-------|-----------|-------|
| | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m ³ /s] | [m] | [Pa] | [-] | [m] | [-] | [m] |
| C | 5.60 | 4.60 | 1.00 | 1.016 | 83.3 | 0.82 | 0.965 | 0.18 | 0.610 |
| E | 4.00 | 3.00 | 1.00 | 0.965 | 90.6 | 0.75 | 0.864 | 0.25 | 0.711 |
| G | 2.60 | 1.30 | 1.30 | 0.864 | 95.9 | 0.50 | 0.660 | 0.50 | 0.813 |

ตารางที่ จ-6 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนต่อขยาย: ข้อต่อ CD5-9

| SECTION | Q_1 | P_{s1} | D | V | K_{CD3-9} | P_{s2} |
|---------|---------------------|----------|-------|-------|-------------|----------|
| | [m ³ /s] | [Pa] | [m] | [m/s] | [-] | [Pa] |
| I | 1.30 | 95.1 | 0.813 | 2.5 | 0.12 | 94.6 |

ตารางที่ จ-7 ผลลัพธ์การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

| SECTION | T_{50} | q_b | d_b | d | $T_{50,real}$ | N |
|---------|----------|---------------------|-------|--------|---------------|-----|
| | [m] | [m ³ /s] | [m] | [m] | [m] | [-] |
| B | 4 | 0.60 | 0.316 | 0.0254 | 5.0 | 154 |
| D | 4 | 0.60 | 0.310 | 0.0254 | 5.2 | 150 |
| F | 4 | 0.40 | 0.250 | 0.0254 | 5.4 | 96 |
| J | 6 | 1.30 | 0.440 | 0.0381 | 8.4 | 134 |
| K | 6 | 1.30 | 0.438 | 0.0381 | 8.5 | 130 |
| L | 8 | 1.00 | 0.390 | 0.0508 | 10.8 | 58 |
| M | 8 | 1.00 | 0.400 | 0.0508 | 10.3 | 62 |



จ.2 การออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยวิธีของผู้ผลิต DUCTSOX

จ.2.1 วิธีการออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยวิธีของผู้ผลิต DUCTSOX

การออกแบบระบบท่อลมผ้าของผู้ผลิตได้อ้างอิงจาก DUCTSOX Engineering and Design Manual^[29] ซึ่งใช้วิธีการกำหนดความเร็วที่เหมาะสม (Velocity Method) ทำให้ได้สามารถออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลมผ้าในทุกๆท่อนได้สะดวกรวดเร็ว

อย่างไรก็ตาม หากทราบขนาดท่อลมผ้าอย่างเดียวไม่สามารถกลายเป็นระบบท่อลมผ้าที่สมบูรณ์ได้ จึงต้องวิเคราะห์ถึงการกระจายตัวของความดันสถิต เพื่อให้สามารถออกแบบขนาดและจำนวนช่องเปิดย่อยได้ ดังนั้นการออกแบบระบบท่อลมผ้าของผู้ผลิต DUCTSOX จะแบ่งการออกแบบเป็น 3 ส่วนดังนี้

1. ออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมผ้า

- กำหนดความเร็วลมขาเข้า (V_{in}) ที่เหมาะสม
- จากตารางที่ จ-8 เลือกขนาดท่อลมผ้า (D) ในแต่ละท่อน ด้วยความเร็วที่กำหนดและปริมาณลม (Q) ที่ทราบ แล้วคำนวณหาความเร็วลมจริงจากสมการ $V=Q/A$

2. วิเคราะห์การกระจายตัวของความดันสถิตที่เกิดขึ้นทั้งระบบ

การวิเคราะห์จะมีหลักการเช่นเดียวกับท่อลมปกติ คือวิเคราะห์ตั้งแต่ท่อนแรกไปจนถึงท่อนสุดท้ายตามแนวท่อลมผ้าทุกแนว ซึ่งทราบขนาดท่อลม (D), ปริมาณลม(Q) และความยาวท่อ(L) ของทุกๆท่อน โดยทางผู้ผลิตได้กำหนดความดันสถิตขาเข้าที่เหมาะสม ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง ¼ ถึง 1½ inWC ทำให้สามารถเริ่มวิเคราะห์ตั้งแต่ท่อนแรกได้ตามลักษณะของท่อลมดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ส่วนท่อตรง

- ทราบขนาดท่อลม (D), ปริมาณลม(Q), ความยาวท่อ(L) และความดันสถิตขาเข้า (P_{s1})
- วิเคราะห์เช่นเดียวกับท่อลมปกติ ด้วยสมการเบอร์นูลลี โดยใช้กราฟการออกแบบท่อลมโลหะใน ASHRAE Fundamental Handbook 2013^[10] (รูปที่ จ-3) หรือการใช้ DUCTULATOR เพื่อหาความดันสถิตปลายท่อ $[P_{s,2} = P_{s,1} - \left(\frac{\Delta P}{L} \right) \times L]$

2.2 การวิเคราะห์ส่วนท่อที่มีช่องเปิด

- ทราบขนาดท่อลม (D), ปริมาณลม(Q_1, Q_2, q_0), ความยาวท่อ(L) และความดันสถิตขาเข้า (P_{s1})
- วิเคราะห์ความดันรวมลด ($\Delta P_{t,fabric}$) ที่เกิดขึ้นในการไหลผ่านท่อลมผ้าโดยประมาณด้วยกราฟการออกแบบท่อลมโลหะรูปที่ จ-3 ใน ASHRAE Fundamental Handbook 2013^[10] หรือการใช้ DUCTULATOR แล้วคูณด้วย 0.35 กับค่าความเสียดทานที่ได้ หรือเขียนเป็นสมการได้ $\Delta P_{t,fabric} = (0.35)(L) \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_{ashrae}$
- พิจารณาการเพิ่มขึ้นของความดันสถิต (Static Pressure Regain, SPR) เท่ากับผลต่างของความดันจลน์ที่ขาเข้าและปลายท่อ $SPR = P_{v1} - P_{v2}$ เมื่อ $P_{vi} = \left(\frac{V_i}{1.291} \right)^2$
- พิจารณาความดันสถิตเฉลี่ยที่เกิดขึ้น (Average Pressure, AP) จากสมการ

$$AP = P_{s1} + 0.65(SPR - \Delta P_{t,fabric})$$
- พิจารณาความดันสถิตปลายท่อ (P_{s2}) จากสมการ

$$P_{s2} = P_{s1} + SPR - \Delta P_{t,fabric}$$

2.3 การวิเคราะห์ส่วนข้อต่อหรือข้องอ

- ทราบขนาดท่อลม (D_1, D_2, D_3), ปริมาณลม(Q_1, Q_2, Q_3) และความดันสถิตขาเข้า (P_{s1})
- พิจารณาการหาค่า K จาก ASHRAE FITTING DATABASE^[10] ตามรูปแบบของข้อต่อหรือข้องอนั้น (สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อต่อ SD5-10 และข้องอ CD3-9 โดยแสดงข้อมูลได้ดังรูปที่ จ-4 และ จ-5 ตามลำดับ)
- พิจารณาความดันสถิตปลายท่อ (P_{si}) จากสมการเบอร์นูลลี

| | |
|--------------------------|---|
| สำหรับข้อต่อทิศทาง 1-->2 | $P_{s,2} = P_{s,1} + P_{v,1} - P_{v,2} - K_{1 \rightarrow 2} P_{v,2}$ |
| สำหรับข้อต่อทิศทาง 1-->3 | $P_{s,3} = P_{s,1} + P_{v,1} - P_{v,3} - K_{1 \rightarrow 3} P_{v,3}$ |
| สำหรับข้องอ | $P_{s,2} = P_{s,1} - (K)(P_{v,1})$ |

3. การออกแบบขนาดและจำนวนช่องเปิดย่อย

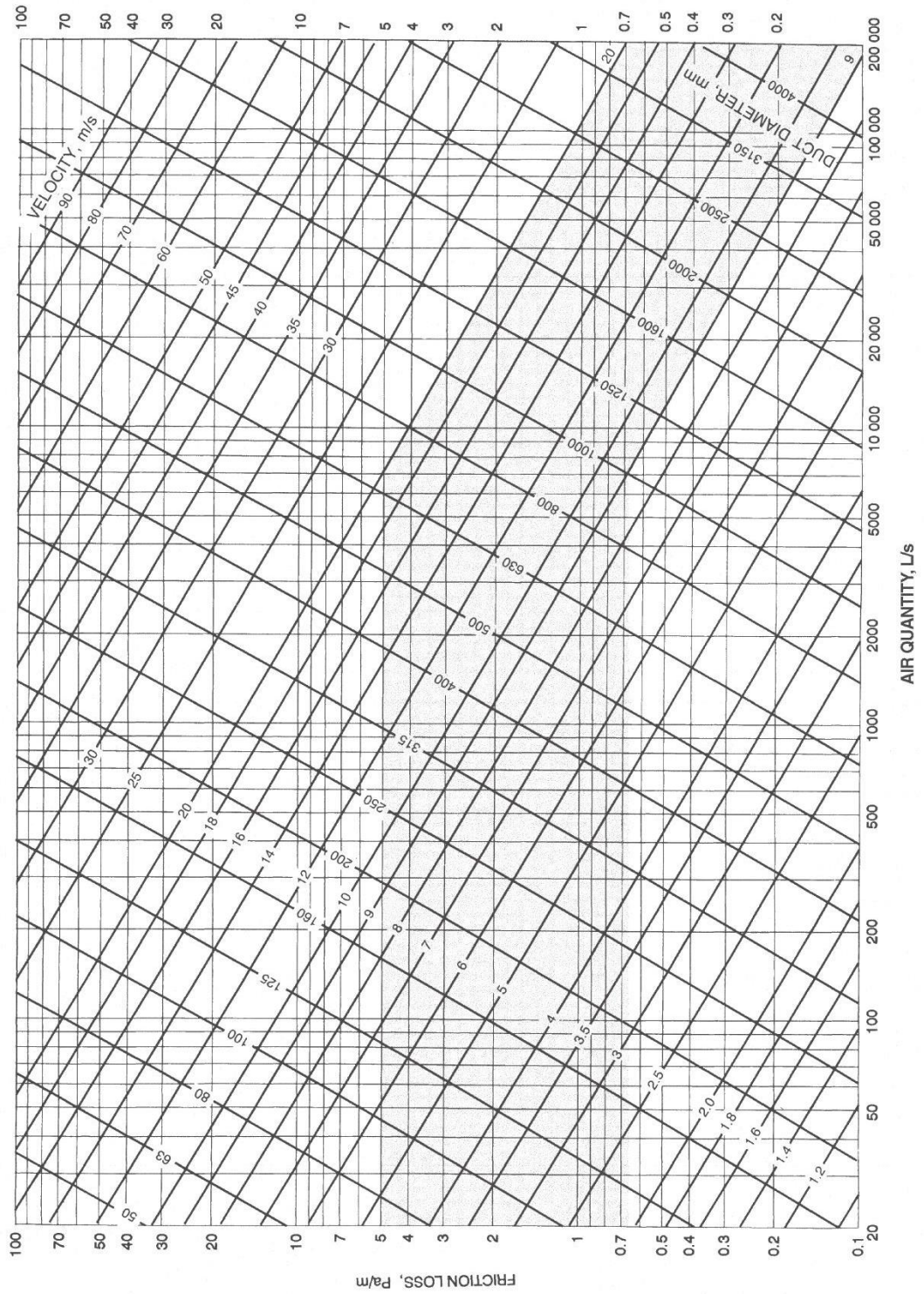
- ทราบ T_{50} และ q_0 จากแนวท่อลม รวมทั้ง AP ของท่อที่มีช่องเปิดจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของความดันสถิตที่เกิดขึ้นทั้งระบบ
- ตารางที่ จ-9 พิจารณาค่า AP และ T_{50} เพื่อเลือกขนาดช่องเปิดย่อย d แล้วนำค่า d กับ AP คำนวณเพื่อหาอัตราการไหลผ่านช่องเปิด 1 ช่อง (q) และระยะส่งลมจริง ($T_{50,real}$) ด้วยวิธีประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolate)
- คำนวณจำนวนช่องเปิดย่อยจาก อัตราการไหลผ่านช่องเปิดทั้งหมด q_0 ต่อ อัตราการไหลผ่านช่องเปิด 1 ช่อง [$N = q_0/q$]

ตารางที่ จ-8 เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมผ้า (DUCTSOX^[29])

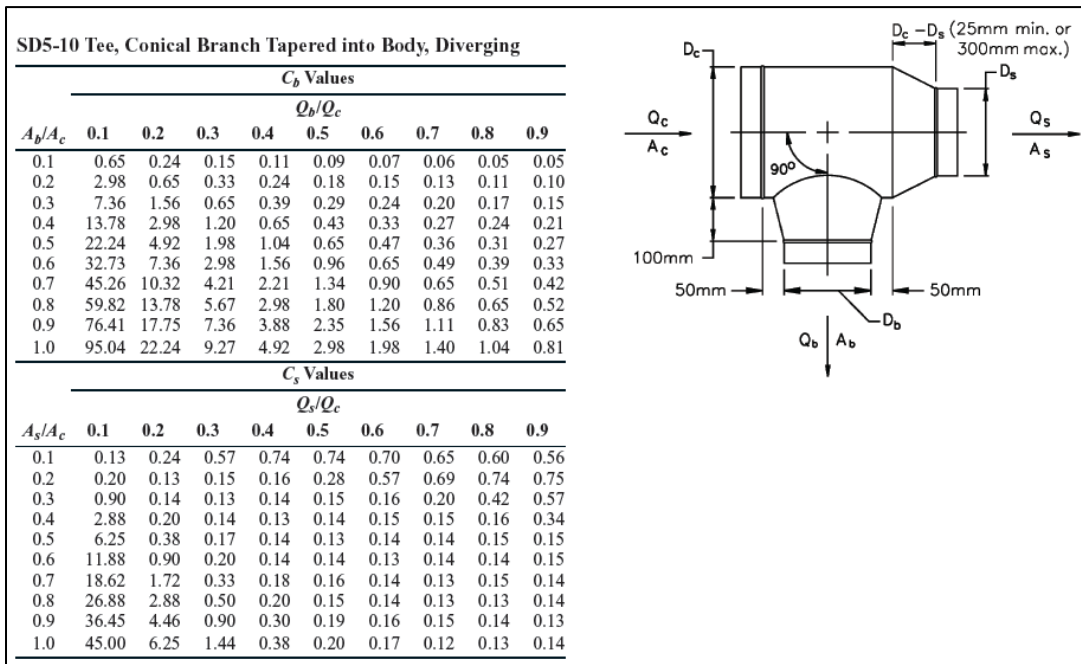
| DIAMETER | | Inlet Velocity | | | | | | | | | |
|----------|------|----------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|----------|
| | | 1000 FPM | 5.1 m/s | 1200 FPM | 6.1 m/s | 1400 FPM | 7.1 m/s | 1600 FPM | 8.1 m/s | 2000 FPM | 10.2 m/s |
| inch | mm | CFM | L/s | CFM | L/s | CFM | L/s | CFM | L/s | CFM | L/s |
| 8 | 203 | 349 | 165 | 419 | 198 | 489 | 231 | 559 | 264 | 698 | 330 |
| 10 | 254 | 545 | 257 | 654 | 309 | 764 | 360 | 873 | 412 | 1091 | 515 |
| 12 | 305 | 785 | 371 | 942 | 445 | 1100 | 519 | 1257 | 593 | 1571 | 741 |
| 14 | 356 | 1069 | 505 | 1283 | 605 | 1497 | 706 | 1710 | 807 | 2138 | 1009 |
| 16 | 406 | 1396 | 659 | 1676 | 791 | 1955 | 923 | 2234 | 1054 | 2793 | 1318 |
| 18 | 457 | 1767 | 834 | 2121 | 1001 | 2474 | 1168 | 2827 | 1335 | 3534 | 1668 |
| 20 | 508 | 2182 | 1030 | 2618 | 1236 | 3054 | 1442 | 3491 | 1648 | 4363 | 2059 |
| 22 | 559 | 2640 | 1246 | 3168 | 1495 | 3696 | 1744 | 4224 | 1994 | 5280 | 2492 |
| 24 | 610 | 3142 | 1483 | 3770 | 1779 | 4398 | 2076 | 5027 | 2373 | 6283 | 2966 |
| 26 | 660 | 3687 | 1740 | 4424 | 2088 | 5162 | 2436 | 5899 | 2784 | 7374 | 3481 |
| 28 | 711 | 4276 | 2018 | 5131 | 2422 | 5986 | 2826 | 6842 | 3229 | 8552 | 4037 |
| 30 | 762 | 4909 | 2317 | 5890 | 2780 | 6872 | 3244 | 7854 | 3707 | 9817 | 4634 |
| 32 | 813 | 5585 | 2636 | 6702 | 3163 | 7819 | 3691 | 8936 | 4218 | 11170 | 5272 |
| 34 | 864 | 6305 | 2976 | 7566 | 3571 | 8827 | 4166 | 10088 | 4762 | 12610 | 5952 |
| 36 | 914 | 7069 | 3336 | 8482 | 4004 | 9896 | 4671 | 11310 | 5338 | 14137 | 6673 |
| 38 | 965 | 7876 | 3717 | 9451 | 4461 | 11026 | 5204 | 12601 | 5948 | 15752 | 7435 |
| 40 | 1016 | 8727 | 4119 | 10472 | 4943 | 12217 | 5767 | 13963 | 6590 | 17453 | 8238 |
| 42 | 1067 | 9621 | 4541 | 11545 | 5449 | 13470 | 6358 | 15394 | 7266 | 19242 | 9082 |
| 44 | 1118 | 10559 | 4984 | 12671 | 5981 | 14783 | 6978 | 16895 | 7974 | 21118 | 9968 |
| 46 | 1168 | 11541 | 5447 | 13849 | 6537 | 16157 | 7626 | 18466 | 8716 | 23082 | 10895 |
| 48 | 1219 | 12566 | 5931 | 15080 | 7118 | 17593 | 8304 | 20106 | 9490 | 25133 | 11863 |
| 50 | 1270 | 13635 | 6436 | 16362 | 7723 | 19090 | 9010 | 21817 | 10297 | 27271 | 12872 |
| 52 | 1321 | 14748 | 6961 | 17698 | 8353 | 20647 | 9745 | 23597 | 11138 | 29496 | 13922 |
| 54 | 1372 | 15904 | 7507 | 19085 | 9008 | 22266 | 10510 | 25447 | 12011 | 31809 | 15014 |
| 56 | 1422 | 17104 | 8073 | 20525 | 9688 | 23946 | 11302 | 27367 | 12917 | 34208 | 16146 |
| 58 | 1473 | 18348 | 8660 | 22017 | 10392 | 25687 | 12124 | 29356 | 13856 | 36696 | 17320 |
| 60 | 1524 | 19635 | 9268 | 23562 | 11121 | 27489 | 12975 | 31416 | 14828 | 39270 | 18535 |

ตารางที่ จ-9 เลือกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิดย่อย (DUCTSOX^[29])

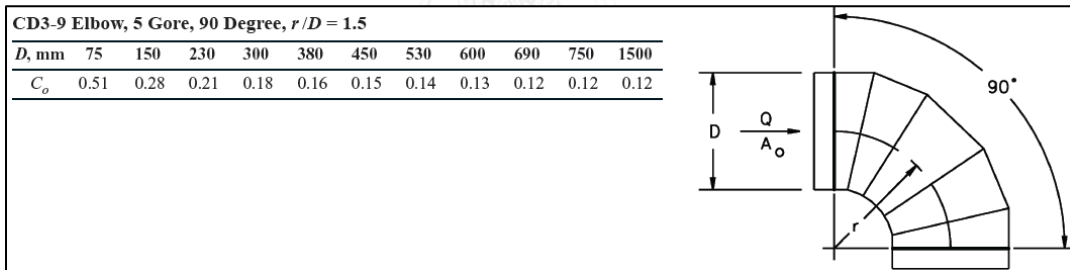
| Orifice Size | | AP | | Airflow | | Terminal Velocity | |
|--------------|-------|-------|-----|----------------|----------------|-------------------|---------|
| inch | mm | inWC | Pa | (CFM) per hole | (L/s) per hole | 50 FPM | 0.3 m/s |
| 0.5 | 12.7 | 0.125 | 31 | 1.16 | 0.547 | 6 | 1.7 |
| | | 0.250 | 62 | 1.64 | 0.774 | 8 | 2.4 |
| | | 0.500 | 124 | 2.32 | 1.094 | 11 | 3.4 |
| | | 0.750 | 187 | 2.85 | 1.344 | 14 | 4.3 |
| | | 1.000 | 249 | 3.29 | 1.551 | 16 | 4.9 |
| | | 1.250 | 311 | 3.67 | 1.733 | 18 | 5.5 |
| 1 | 25.4 | 0.125 | 31 | 4.64 | 2.189 | 11 | 3.5 |
| | | 0.250 | 62 | 6.56 | 3.096 | 16 | 4.9 |
| | | 0.500 | 124 | 9.28 | 4.378 | 23 | 7.0 |
| | | 0.750 | 187 | 11.39 | 5.376 | 28 | 8.5 |
| | | 1.000 | 249 | 13.14 | 6.204 | 32 | 9.8 |
| | | 1.250 | 311 | 14.69 | 6.933 | 36 | 11.0 |
| 1.5 | 38.1 | 0.125 | 31 | 10.43 | 4.925 | 17 | 5.2 |
| | | 0.250 | 62 | 14.76 | 6.965 | 24 | 7.3 |
| | | 0.500 | 124 | 20.87 | 9.850 | 34 | 10.4 |
| | | 0.750 | 187 | 25.63 | 12.096 | 42 | 12.7 |
| | | 1.000 | 249 | 29.57 | 13.958 | 48 | 14.7 |
| | | 1.250 | 311 | 33.05 | 15.600 | 54 | 16.4 |
| 2 | 50.8 | 0.125 | 31 | 18.55 | 8.756 | 23 | 6.9 |
| | | 0.250 | 62 | 26.23 | 12.383 | 32 | 9.8 |
| | | 0.500 | 124 | 37.10 | 17.512 | 45 | 13.7 |
| | | 0.750 | 187 | 45.56 | 21.505 | 56 | 17.1 |
| | | 1.000 | 249 | 52.57 | 24.815 | 64 | 19.5 |
| | | 1.250 | 311 | 58.76 | 27.733 | 72 | 21.9 |
| 2.5 | 63.5 | 0.125 | 31 | 28.99 | 13.681 | 28 | 8.6 |
| | | 0.250 | 62 | 40.99 | 19.348 | 40 | 12.2 |
| | | 0.500 | 124 | 57.97 | 27.362 | 57 | 17.4 |
| | | 0.750 | 187 | 71.19 | 33.601 | 69 | 21.0 |
| | | 1.000 | 249 | 82.15 | 38.774 | 80 | 24.4 |
| | | 1.250 | 311 | 91.81 | 43.333 | 90 | 27.4 |
| 3 | 76.2 | 0.125 | 31 | 41.74 | 19.701 | 34 | 10.4 |
| | | 0.250 | 62 | 59.03 | 27.861 | 48 | 14.6 |
| | | 0.500 | 124 | 83.48 | 39.401 | 68 | 20.7 |
| | | 0.750 | 187 | 102.51 | 48.386 | 83 | 25.3 |
| | | 1.000 | 249 | 118.29 | 55.834 | 96 | 29.3 |
| | | 1.250 | 311 | 132.20 | 62.399 | 108 | 32.9 |
| 3.5 | 88.9 | 0.125 | 31 | 56.81 | 26.815 | 40 | 12.1 |
| | | 0.250 | 62 | 80.34 | 37.922 | 56 | 17.1 |
| | | 0.500 | 124 | 113.62 | 53.629 | 79 | 24.2 |
| | | 0.750 | 187 | 139.53 | 65.859 | 97 | 29.7 |
| | | 1.000 | 249 | 161.01 | 75.996 | 112 | 34.3 |
| | | 1.250 | 311 | 179.94 | 84.932 | 126 | 38.3 |
| 4 | 101.6 | 0.125 | 31 | 74.20 | 35.023 | 45 | 13.8 |
| | | 0.250 | 62 | 104.94 | 49.530 | 64 | 19.5 |
| | | 0.500 | 124 | 148.40 | 70.047 | 91 | 27.7 |
| | | 0.750 | 187 | 182.24 | 86.020 | 111 | 33.8 |
| | | 1.000 | 249 | 210.30 | 99.260 | 128 | 39.0 |
| | | 1.250 | 311 | 235.03 | 110.932 | 144 | 43.9 |



รูปที่ จ-3 กราฟความเสียดทานของท่อกลม
(ASHRAE Fundamental Handbook 2013^[10])



รูปที่ จ-4 ข้อมูลของแบบจำลองข้อต่อ SD5-10 อ้างอิงจาก Ashrae Fitting Database^[10]



รูปที่ จ-5 ข้อมูลของแบบจำลองข้องอ CD3-9 อ้างอิงจาก Ashrae Fitting Database^[10]

จ.2.2 รายละเอียดการออกแบบระบบท่อลมผ้า

การออกแบบระบบท่อลมผ้าจากแนวท่อลมผ้ารูปที่ จ-1 จะกำหนดความเร็วการไหล 8.1 m/s [1600 FPM] และกำหนดค่าความดันสถิตตั้งต้นหรือ $P_{s, fan}=76$ Pa จากตัวอย่างการออกแบบด้วยโนโมแกรม เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการออกแบบด้วยวิธีทั้งสองได้ โดยผลลัพธ์การออกแบบด้วยวิธีของผู้ผลิตสามารถแสดงได้ดังตารางที่ จ-10 ถึง จ-14 และรูปที่ จ-6 ซึ่งมีรายละเอียดการออกแบบดังนี้

1. ออกแบบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมผ้า

- กำหนดความเร็วลม $V=8.1$ m/s [1600 FPM]
- จากตารางที่ จ-8 เลือกขนาดท่อลมผ้าในแต่ละท่อนด้วยความเร็วที่กำหนดและปริมาณลมที่ทราบ แสดงผลการออกแบบขนาดท่อได้ดังตาราง

| | | SECTION | | | | | | | | |
|---|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | A | B | D | F | H | J | K | L | M |
| D | [m] | 1.016 | 1.016 | 0.864 | 0.711 | 0.457 | 0.457 | 0.457 | 0.406 | 0.406 |
| | [inch] | 40 | 40 | 34 | 28 | 18 | 18 | 18 | 16 | 16 |
| V | [m/s] | 7.7 | 7.7 | 7.8 | 7.6 | 7.9 | 7.9 | 7.9 | 7.7 | 7.7 |

2. วิเคราะห์การกระจายตัวของความดันสถิตที่เกิดขึ้นในระบบท่อลมผ้า

เมื่อทราบขนาดท่อลมผ้าส่วนต่างๆแล้ว จะต้องทำการวิเคราะห์การกระจายตัวของความดันสถิตที่เกิดขึ้นในแต่ละตำแหน่ง เพื่อให้สามารถออกแบบขนาดและจำนวนช่องเปิดย่อยได้ โดยกำหนดค่าความดันสถิตตั้งต้นหรือ $P_{s, fan}=76$ Pa

2.1 ส่วนท่อตรง A

- ทราบค่า $Q_1=6.2$ m³/s, $L=2$ m, $P_{s1}=76.0$ Pa, $D_1=1.016$ m
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 0.50$ Pa/m
- คำนวณค่า $P_{s,2} = P_{s,1} - \left(\frac{\Delta P}{L}\right) \times L = 75$ Pa
- นำค่า $P_{s2}=75$ Pa ไปใช้ในท่อน B

2.2 ส่วนท่อที่มีช่องเปิด B

- ทราบ $Q_1=6.2 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=5.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=5 \text{ m}$, $D=1.016 \text{ m}$, $P_{s1}=75.0 \text{ Pa}$
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 0.50 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t,fabric} = (0.35) \left(\frac{\Delta P}{L}\right) L = 0.88 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{v1} = \left(\frac{V_1}{1.291}\right)^2 = 35.6 \text{ Pa}$, $P_{v2} = \left(\frac{V_2}{1.291}\right)^2 = 28.6 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $SPR = P_{v1} - P_{v2} = 6.9 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $AP = P_{s1} + 0.65(SPR - \Delta P_{t,fabric}) = 78.9 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{s2} = P_{s1} + SPR - \Delta P_{t,fabric} = 81.1 \text{ Pa}$
- นำค่า $P_{s2}=81.1 \text{ Pa}$ ไปใช้ในข้อต่อ C

2.3 ส่วนข้อต่อ C

- ทราบค่า $Q_1=5.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=4.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{s1}=81.1 \text{ Pa}$
 $D_1=1.016 \text{ m}$, $D_2=0.864 \text{ m}$ และ $D_3=0.406 \text{ m}$
- จากข้อมูลของข้อต่อ SD5-10 รูปที่ จ-4 จะได้ค่า $K_{1-2}=0.14$ และ $K_{1-3}=0.80$
- จากสมการเบอร์นูลลีจะได้ $P_{s,2} = P_{s,1} + P_{v,1} - P_{v,2} - K_{1-2}P_{v,2} = 67.6 \text{ Pa}$
 $P_{s,3} = P_{s,1} + P_{v,1} - P_{v,3} - K_{1-3}P_{v,3} = 45.3 \text{ Pa}$
- นำค่า $P_{s2}= 67.6 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน D
- นำค่า $P_{s3}= 45.3 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน M

2.4 ส่วนท่อที่มีช่องเปิด D

- ทราบ $Q_1=4.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=4.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=0.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=6 \text{ m}$, $D=0.864 \text{ m}$, $P_{s1}=67.6 \text{ Pa}$
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 0.62 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t,fabric} = (0.35) \left(\frac{\Delta P}{L}\right) L = 1.30 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{v1} = \left(\frac{V_1}{1.291}\right)^2 = 36.5 \text{ Pa}$, $P_{v2} = \left(\frac{V_2}{1.291}\right)^2 = 27.9 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $SPR = P_{v1} - P_{v2} = 8.6 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $AP = P_{s1} + 0.65(SPR - \Delta P_{t,fabric}) = 72.3 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{s2} = P_{s1} + SPR - \Delta P_{t,fabric} = 74.9 \text{ Pa}$
- นำค่า $P_{s2}=74.9 \text{ Pa}$ ไปใช้ในข้อต่อ E

2.5 ส่วนข้อต่อ E

- ทราบค่า $Q_1=4.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=3.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{s1}=74.9 \text{ Pa}$
 $D_1=0.864 \text{ m}$, $D_2=0.711 \text{ m}$ และ $D_3=0.406 \text{ m}$
- จากข้อมูลของข้อต่อ SD5-10 รูปที่ จ-4 จะได้ค่า $K_{1-2}=0.14$ และ $K_{1-3}=0.92$
- จากสมการเบอร์นูลลีจะได้

$$P_{s,2} = P_{s,1} + P_{v,1} - P_{v,2} - K_{1 \rightarrow 2} P_{v,2} = 63.7 \text{ Pa}$$

$$P_{s,3} = P_{s,1} + P_{v,1} - P_{v,3} - K_{1 \rightarrow 3} P_{v,3} = 34.1 \text{ Pa}$$
- นำค่า $P_{s2}= 63.7 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน F
- นำค่า $P_{s3}= 34.1 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน L

2.6 ส่วนท่อที่มีช่องเปิด F

- ทราบ $Q_1=3.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=2.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=0.4 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=4 \text{ m}$, $D=0.711 \text{ m}$, $P_{s1}=63.7 \text{ Pa}$
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 0.74 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t,fabric} = (0.35) \left(\frac{\Delta P}{L}\right) L = 1.04 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{v1} = \left(\frac{V_1}{1.291}\right)^2 = 34.7 \text{ Pa}$, $P_{v2} = \left(\frac{V_2}{1.291}\right)^2 = 25.7 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $SPR = P_{v1} - P_{v2} = 8.9 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $AP = P_{s1} + 0.65(SPR - \Delta P_{t,fabric}) = 68.9 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{s2} = P_{s1} + SPR - \Delta P_{t,fabric} = 71.6 \text{ Pa}$
- นำค่า $P_{s2}=71.6 \text{ Pa}$ ไปใช้ในข้อต่อ G

2.7 ส่วนข้อต่อ G

- ทราบค่า $Q_1=2.6 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_3=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{s1}=71.6 \text{ Pa}$
 $D_1=0.711 \text{ m}$, $D_2=0.457 \text{ m}$ และ $D_3=0.457 \text{ m}$
- จากข้อมูลของข้อต่อ SD5-10 รูปที่ จ-4 จะได้ค่า $K_{1-2}=0.14$ และ $K_{1-3}=0.43$
- จากสมการเบอร์นูลลีจะได้

$$P_{s,2} = P_{s,1} + P_{v,1} - P_{v,2} - K_{1 \rightarrow 2} P_{v,2} = 54.4 \text{ Pa}$$

$$P_{s,3} = P_{s,1} + P_{v,1} - P_{v,3} - K_{1 \rightarrow 3} P_{v,3} = 43.5 \text{ Pa}$$
- นำค่า $P_{s2}= 54.4 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน K
- นำค่า $P_{s3}= 43.5 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน H

2.8 ส่วนท่อตรง H

- ทราบค่า $Q_1=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=10 \text{ m}$, $P_{s1}=43.5 \text{ Pa}$, $D_1=0.457 \text{ m}$
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 1.40 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $P_{s,2} = P_{s,1} - \left(\frac{\Delta P}{L}\right) \times L = 29.5 \text{ Pa}$
- นำค่า $P_{s2}=29.5 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน I

2.9 ส่วนข้องอ I

- ทราบค่า $Q_1=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $P_{s1}=29.5 \text{ Pa}$, $D=0.457 \text{ m}$, $V=7.9 \text{ m/s}$
- จากข้อมูลของข้องอ CD3-9 รูปที่ จ-5 จะทราบ $K=0.12$
- คำนวณค่า $P_{s,2} = P_{s,1} - (K) \left(\frac{1}{2} \rho V_1^2\right) = 24.9 \text{ Pa}$
- นำค่า $P_{s2}=24.9 \text{ Pa}$ ไปใช้ในท่อน J

2.10 ส่วนท่อที่มีช่องเปิด J

- ทราบ $Q_1=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=8 \text{ m}$, $D=0.457 \text{ m}$, $P_{s1}=24.9 \text{ Pa}$
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 1.40 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t,fabric} = (0.35) \left(\frac{\Delta P}{L}\right) L = 3.92 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{v1} = \left(\frac{V_1}{1.291}\right)^2 = 37.4 \text{ Pa}$, $P_{v2} = \left(\frac{V_2}{1.291}\right)^2 = 0 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $SPR = P_{v1} - P_{v2} = 37.4 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $AP = P_{s1} + 0.65(SPR - \Delta P_{t,fabric}) = 46.7 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{s2} = P_{s1} + SPR - \Delta P_{t,fabric} = 58.5 \text{ Pa}$

2.11 ส่วนท่อที่มีช่องเปิด K

- ทราบ $Q_1=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=1.3 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=8 \text{ m}$, $D=0.457 \text{ m}$, $P_{s1}=54.4 \text{ Pa}$
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 1.40 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t,fabric} = (0.35) \left(\frac{\Delta P}{L}\right) L = 3.92 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{v1} = \left(\frac{V_1}{1.291}\right)^2 = 37.4 \text{ Pa}$, $P_{v2} = \left(\frac{V_2}{1.291}\right)^2 = 0 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $SPR = P_{v1} - P_{v2} = 37.4 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $AP = P_{s1} + 0.65(SPR - \Delta P_{t,fabric}) = 76.2 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{s2} = P_{s1} + SPR - \Delta P_{t,fabric} = 87.9 \text{ Pa}$

2.12 ส่วนท่อที่มีช่องเปิด L

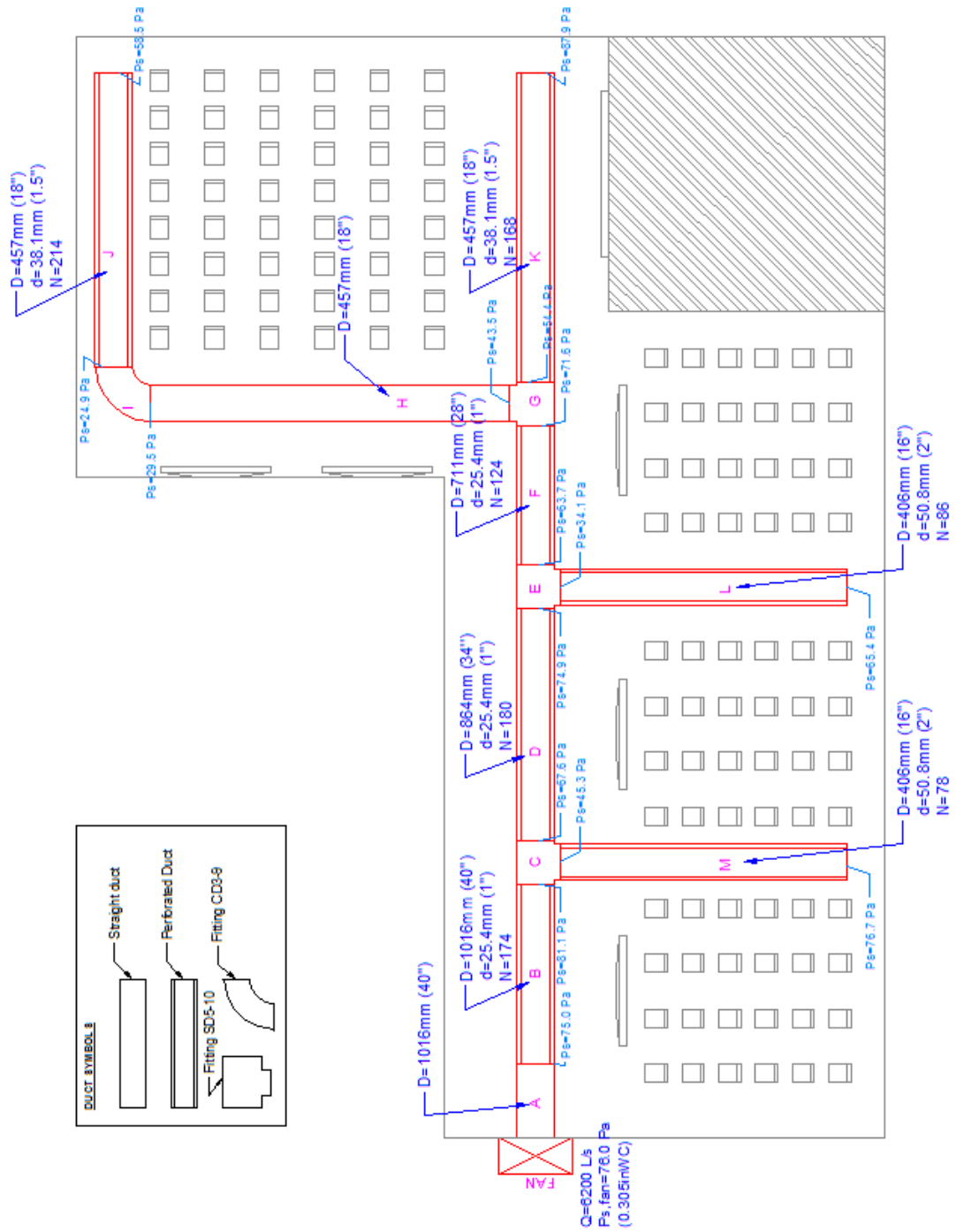
- ทราบ $Q_1=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=8 \text{ m}$, $D=0.406 \text{ m}$, $P_{s1}=34.1 \text{ Pa}$
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 1.50 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t,fabric} = (0.35) \left(\frac{\Delta P}{L}\right) L = 4.20 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{v1} = \left(\frac{V_1}{1.291}\right)^2 = 35.6 \text{ Pa}$, $P_{v2} = \left(\frac{V_2}{1.291}\right)^2 = 0 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $SPR = P_{v1} - P_{v2} = 35.6 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $AP = P_{s1} + 0.65(SPR - \Delta P_{t,fabric}) = 54.5 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{s2} = P_{s1} + SPR - \Delta P_{t,fabric} = 65.4 \text{ Pa}$

2.13 ส่วนท่อที่มีช่องเปิด M

- ทราบ $Q_1=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_2=0 \text{ m}^3/\text{s}$, $q_0=1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, $L=8 \text{ m}$, $D=0.406 \text{ m}$, $P_{s1}=45.3 \text{ Pa}$
- จากรูปที่ จ-3 ลากเส้นตรงระหว่าง Q_1 กับ D จะได้ $(\Delta P_t/L)_{ashrae} = 1.50 \text{ Pa/m}$
- คำนวณค่า $\Delta P_{t,fabric} = (0.35) \left(\frac{\Delta P}{L}\right) L = 4.20 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{v1} = \left(\frac{V_1}{1.291}\right)^2 = 35.6 \text{ Pa}$, $P_{v2} = \left(\frac{V_2}{1.291}\right)^2 = 0 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $SPR = P_{v1} - P_{v2} = 35.6 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $AP = P_{s1} + 0.65(SPR - \Delta P_{t,fabric}) = 65.7 \text{ Pa}$
- คำนวณค่า $P_{s2} = P_{s1} + SPR - \Delta P_{t,fabric} = 76.7 \text{ Pa}$

3. การออกแบบขนาดและจำนวนช่องเปิดย่อย

- ทราบ T_{50} , q_0 และ AP ของท่อน B,D,F,J,K,L,M
- ตารางที่ จ-9 พิจารณาค่า AP และ T_{50} เพื่อเลือกขนาดช่องเปิดย่อย d แล้วนำค่า d กับ AP คำนวณเพื่อหาอัตราการไหลผ่านช่องเปิด 1 ช่อง (q) และระยะส่งลมจริง ($T_{50,real}$) ด้วยวิธีประมาณค่าในช่วงเชิงเส้น (Linear Interpolate)
- คำนวณจำนวนช่องเปิดย่อยจาก อัตราการไหลผ่านช่องเปิดทั้งหมด q_0 ต่อ อัตราการไหลผ่านช่องเปิด 1 ช่อง $[N=q_0/q]$
- ผลลัพธ์ของการออกแบบขนาดและจำนวนช่องเปิดแต่ละท่อนแสดงได้ดังตาราง จ-14



รูปที่ จ-6 ผลลัพธ์ของการออกแบบระบบท่อลมผ้าด้วยวิธีของผู้ผลิต DUCTSOX

ตารางที่ จ-10 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนท่อตรง

| SECTION | Q ₁ [m ³ /s] | L [m] | P _{s1} [Pa] | D [m] | V [m/s] | (ΔP _t /L) ^{ashrae} [Pa/m] | P _{s2} [Pa] |
|---------|---------------------------------------|----------|-------------------------|----------|------------|--|-------------------------|
| A | 6.2 | 2 | 76.0 | 1.016 | 7.7 | 0.50 | 75.0 |
| H | 1.3 | 10 | 43.5 | 0.457 | 7.9 | 1.40 | 29.5 |

ตารางที่ จ-11 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนท่อที่มีช่องเปิด

| SECTION | Q ₁ [m ³ /s] | Q ₂ [m ³ /s] | q ₀ [m ³ /s] | L [m] | P _{s1} [Pa] | D [m] | V _{in} [m/s] | (ΔP _t /L) ^{ashrae} [Pa/m] | ΔP _t ^{fabric} [Pa] | P _{v1} [Pa] | P _{v2} [Pa] | SPR [Pa] | AP [Pa] | P _{s2} [Pa] | C _{PR} [-] |
|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------|-------------------------|----------|--------------------------|--|---|-------------------------|-------------------------|-------------|------------|-------------------------|------------------------|
| B | 6.2 | 5.6 | 0.6 | 5 | 75.0 | 1.016 | 7.7 | 0.50 | 0.88 | 35.6 | 28.6 | 6.9 | 78.9 | 81.1 | 0.925 |
| D | 4.6 | 4.0 | 0.6 | 6 | 67.6 | 0.864 | 7.8 | 0.62 | 1.30 | 36.5 | 27.9 | 8.6 | 72.3 | 74.9 | 0.903 |
| F | 3.0 | 2.6 | 0.4 | 4 | 63.7 | 0.711 | 7.6 | 0.74 | 1.04 | 34.7 | 25.7 | 8.9 | 68.9 | 71.6 | 0.890 |
| J | 1.3 | 0.0 | 1.3 | 8 | 24.9 | 0.457 | 7.9 | 1.40 | 3.92 | 37.4 | 0.0 | 37.4 | 46.7 | 58.5 | 0.427 |
| K | 1.3 | 0.0 | 1.3 | 8 | 54.4 | 0.457 | 7.9 | 1.40 | 3.92 | 37.4 | 0.0 | 37.4 | 76.2 | 87.9 | 0.619 |
| L | 1.0 | 0.0 | 1.0 | 8 | 34.1 | 0.406 | 7.7 | 1.50 | 4.20 | 35.6 | 0.0 | 35.6 | 54.5 | 65.4 | 0.521 |
| M | 1.0 | 0.0 | 1.0 | 8 | 45.3 | 0.406 | 7.7 | 1.50 | 4.20 | 35.6 | 0.0 | 35.6 | 65.7 | 76.7 | 0.591 |

ตารางที่ จ-12 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนข้อต่อ SD5-10

| SECTION | Q ₁ [m ³ /s] | Q ₂ [m ³ /s] | Q ₃ [m ³ /s] | D ₁ [m] | P _{s1} [Pa] | D ₂ [m] | A ₂ /A ₁ [-] | Q ₂ /Q ₁ [-] | K ₁₋₂ [-] | P _{s2} [Pa] | D ₃ [m] | A ₃ /A ₁ [-] | Q ₃ /Q ₁ [-] | K ₁₋₃ [-] | P _{s3} [Pa] |
|---------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| C | 5.60 | 4.60 | 1.00 | 1.016 | 81.1 | 0.864 | 0.72 | 0.82 | 0.14 | 67.6 | 0.406 | 0.16 | 0.18 | 0.80 | 45.3 |
| E | 4.00 | 3.00 | 1.00 | 0.864 | 74.9 | 0.711 | 0.68 | 0.75 | 0.14 | 63.7 | 0.406 | 0.22 | 0.25 | 0.92 | 34.1 |
| G | 2.60 | 1.30 | 1.30 | 0.711 | 71.6 | 0.457 | 0.41 | 0.50 | 0.14 | 54.4 | 0.457 | 0.41 | 0.50 | 0.43 | 43.5 |

ตารางที่ จ-13 ผลลัพธ์การออกแบบส่วนข้อต่อ CD3-9

| SECTION | Q ₁ [m ³ /s] | P _{s1} [Pa] | D [m] | V [m/s] | K _{cd3-9} [-] | P _{s2} [Pa] |
|---------|---------------------------------------|-------------------------|----------|------------|---------------------------|-------------------------|
| I | 1.30 | 29.5 | 0.457 | 7.9 | 0.12 | 24.9 |

ตารางที่ จ-14 ผลลัพธ์การออกแบบขนาดและจำนวนช่องเปิดย่อย

| SECTION | T ₅₀ [m] | q ₀ [m ³ /s] | AP [Pa] | d [m] | q (m ³ /s) per hole | T _{50,real} [m] | N |
|---------|------------------------|---------------------------------------|------------|----------|-----------------------------------|-----------------------------|-----|
| B | 4 | 0.6 | 78.9 | 0.0254 | 0.00344 | 5.5 | 174 |
| D | 4 | 0.6 | 72.3 | 0.0254 | 0.00331 | 5.3 | 180 |
| F | 4 | 0.4 | 68.9 | 0.0254 | 0.00324 | 5.1 | 124 |
| J | 6 | 1.3 | 46.7 | 0.0381 | 0.00605 | 6.4 | 214 |
| K | 6 | 1.3 | 76.2 | 0.0381 | 0.00772 | 8.1 | 168 |
| L | 8 | 1.0 | 54.5 | 0.0508 | 0.01161 | 9.2 | 86 |
| M | 8 | 1.0 | 65.7 | 0.0508 | 0.01275 | 10.1 | 78 |

จ.3 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการออกแบบด้วยโนโมแกรมกับวิธีของผู้ผลิต DUCTSOX

จากตัวอย่างแนวท่อลมผ้ารูปที่ จ-1 ได้ถูกออกแบบด้วยวิธีการใช้โนโมแกรมและวิธีของผู้ผลิต DUCTSOX เมื่อกำหนดความเร็วลม 8.1 m/s [1600 FPM] ซึ่งแสดงผลลัพธ์ได้ดังรูปที่ จ-2 และ จ-4 ตามลำดับ โดยแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการออกแบบด้วยวิธีทั้งสองดังตารางที่ จ-15 และสามารถสรุปผลการเปรียบเทียบได้ดังนี้

■ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อลมผ้า

การออกแบบด้วยวิธีของผู้ผลิตจะให้ขนาดท่อลมผ้าที่เล็กกว่าการออกแบบด้วยโนโมแกรม เนื่องจากการออกแบบด้วยวิธีของผู้ผลิต เป็นการกำหนดความเร็วในแต่ละท่อน ทำให้ท่อลมผ้าแต่ละส่วนมีอิสระต่อกัน ขณะที่การออกแบบด้วยโนโมแกรมจะมีความสัมพันธ์กันทั้งระบบตั้งแต่ส่วนแรกของแนวท่อลมผ้าจนถึงปลายท่อใดๆ

■ การกระจายตัวของความดันสถิต

ในที่นี้ได้แสดงการเปรียบเทียบในรูปของตัวแปร C_{PR} หรืออัตราส่วนความดันสถิต P_{s1}/P_{s2} เพื่อแสดงให้เห็นการเพิ่มขึ้นของความดันสถิตที่เกิดขึ้นจากการออกแบบทั้งสองวิธี พบว่าการออกแบบด้วยวิธีของผู้ผลิตจะมีค่า C_{PR} โดยเฉลี่ยน้อยกว่าการออกแบบด้วยโนโมแกรม ส่งผลให้ความสม่ำเสมอของความดันสถิตและอัตราการไหลผ่านช่องเปิดลดลง

สาเหตุเกิดจากการออกแบบด้วยวิธีของผู้ผลิตจะได้ขนาดท่อจากการกำหนดความเร็วลม ซึ่งละเอียดเรื่องของความดันสถิตที่ลดลง ณ ตำแหน่งข้อต่อหรือข้องอ ทำให้ส่งผลต่อความดันสถิตขาเข้าของท่อลมผ้าแต่ละท่อน รวมทั้งการประมาณความดันรวมลดที่เกิดขึ้นของการไหลผ่านท่อลมผ้าด้วย

ดังนั้นทางผู้ผลิตจึงจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์ปรับการไหลของลม (Adjustable Flow Device, AFD) ในท่อลมผ้าตามมาตรฐานที่ทางผู้ผลิตได้กำหนดไว้ เพื่อให้การกระจายตัวของความดันสถิตและอัตราการไหลผ่านช่องเปิดมีความสม่ำเสมอมากขึ้น

- ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและจำนวนช่องเปิดย่อย

การออกแบบทั้งสองวิธีให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่องเปิดย่อย (d) เท่ากัน แต่จำนวนช่องเปิดย่อย (N) แตกต่างกัน โดยการออกแบบด้วยวิธีของผู้ผลิตจะมีจำนวนช่องเปิดย่อยโดยเฉลี่ยมากกว่าการออกแบบด้วยโนโมแกรม

เนื่องจากวิธีของผู้ผลิตเกิดความดันสถิตลดมาก จากท่อลมผ้าทุกๆท่อนที่มีความเร็วการไหลเข้าเท่ากัน รวมทั้งความดันสถิตลดที่เกิดจากข้อต่อหรือข้องอ แล้วส่งผลให้ความดันสถิตโดยเฉลี่ยน้อยกว่าความดันสถิตโดยเฉลี่ยของการออกแบบด้วยโนโมแกรม ทำให้ต้องระบบต้องมีจำนวนช่องเปิดย่อยมากกว่าถึงจะได้ปริมาณลมไหลผ่านช่องเปิดตามที่ต้องการ



ตารางที่ จ-15 เปรียบเทียบผลลัพธ์ของการออกแบบระบบพอลิเมอร์ด้วยโมโนแกรมกับวิธีของฟูเลิต DUCTSOX

| SECTION | DIAMETER, D [m (inch)] | | C _{PR} | | DIAMETER OF HOLE, d [m (inch)] | | NUMBER OF HOLES, N | | THROW, T ₅₀ [m] | |
|---------|------------------------|-------------|-----------------|---------|--------------------------------|---------------|--------------------|---------|----------------------------|---------|
| | NOMOGRAM | DUCTSOX | NOMOGRAM | DUCTSOX | NOMOGRAM | DUCTSOX | NOMOGRAM | DUCTSOX | NOMOGRAM | DUCTSOX |
| B | 1.016 (40") | 1.016 (40") | 0.900 | 0.925 | 0.0254 (1.0") | 0.0254 (1.0") | 154 | 174 | 5.0 | 5.5 |
| D | 0.965 (38") | 0.864 (34") | 0.920 | 0.903 | 0.0254 (1.0") | 0.0254 (1.0") | 150 | 180 | 5.2 | 5.3 |
| F | 0.864 (34") | 0.711 (28") | 0.945 | 0.890 | 0.0254 (1.0") | 0.0254 (1.0") | 96 | 124 | 5.4 | 5.1 |
| J | 0.813 (32") | 0.457 (18") | 0.950 | 0.427 | 0.0381 (1.5") | 0.0381 (1.5") | 134 | 214 | 8.4 | 6.4 |
| K | 0.660 (26") | 0.457 (18") | 0.910 | 0.619 | 0.0381 (1.5") | 0.0381 (1.5") | 130 | 168 | 8.5 | 8.1 |
| L | 0.711 (28") | 0.406 (16") | 0.948 | 0.521 | 0.0508 (2.0") | 0.0508 (2.0") | 58 | 86 | 10.8 | 9.2 |
| M | 0.610 (24") | 0.406 (16") | 0.920 | 0.591 | 0.0508 (2.0") | 0.0508 (2.0") | 62 | 78 | 10.3 | 10.1 |

ภาคผนวก ฉ

ชุดคำสั่งทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์

ฉ.1 ชุดคำสั่ง MATLAB ของการวิเคราะห์แนวท่อลมผ้า

ฉ.1.1 ชุดคำสั่งหลัก

```
fprintf('\n*****INPUT CONDITION OF FLUID AND DUCT*****\n');
roh = input ('Density of AIR [kg/m^3] : ');
miu = input ('Dynamic Viscosity of AIR [kg/m.s] : ');
e = input ('Coefficient Friction of Duct[m] : ');
ISP = input ('INLET STATIC PRESSURE [Pa] : ');

ans = double(SUB_00_FIRST (ISP,roh,miu,e)) ;
d0 = ans(1,4)
ansHOLE = double(SUB_HOLES (d0));
Ps1 = ans(1,6)
Ps2 = ans(1,3)
Ps_fan = ans(1,5)
Ps0 = Ps_fan-ISP
D2 = ans(1,1)
Q2 = ans(1,2)

while (Q2>0)
    %FOR NEXT SECTION
    Q1 = Q2 ;
    D1 = D2 ;
    Ps1 = Ps2 ;
    SUB_NO = input ('TYPE OF SECTION (1=STRAIGHT,2=OUTLET,3=FITTINGS) : ');
    if (SUB_NO == 1)
        L = input ('LENGTH (L [m]) : ');
        ans = double(SUB_01_STRAIGHT (Q1,Ps1,D1,L,roh,miu,e)) ;
    elseif (SUB_NO == 2)
        q0 = input ('AIR QUANTITY OF OUTLET (q [m3/s]) : ');
        L = input ('LENGTH (L [m]) : ');
        ans = double(SUB_02_OUTLET (Q1,q0,Ps1,D1,L,roh,miu,e)) ;
    elseif (SUB_NO == 3)
        Q3 = input ('AIR QUANTITY OF BRANCH (Q3 [m3/s]) : ');
        ans = double(SUB_03_FITTING (Q1,Q3,Ps1,D1,roh,miu,e)) ;
    end

    D2 = ans(1,1)
    Q2 = ans(1,2) ;
    Ps2 = ans(1,3)
    d0 = ans(1,4)
    ansHOLE = double(SUB_HOLES (d0,T50)) ;

end

fprintf('END CALCULATION');
```

ป้อนค่าตัวแปร
(ρ, μ, e, ISP)

วิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า

วิเคราะห์การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

วิเคราะห์ส่วนขยาย
แนวท่อลมผ้า

วิเคราะห์การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย (ถ้ามี)

สิ้นสุดกระบวนการวิเคราะห์

ฉ.1.2 ชุดคำสั่งการวิเคราะห์ส่วนขาเข้าของแนวท่อลมผ้า

```
function ans = SUB_00_FIRST (ISP,roh,miu,e)
Q0 = input ('INLET AIR QUANTITY (Q_input [m3/s]) : ');
L01 = input ('LENGTH (L01 [m]) : ');
L12 = input ('LENGTH (L12 [m]) : ');
Q3 = input ('AIR QUANTITY OF OUTLET (q [m3/s]) : ');
V0 = input ('INPUT VELOCITY (V_input [m/s]) : ');
D0 = sqrt(4*Q0/pi()/V0);
Q1=Q0 ; Q2=Q1-Q3 ; D1=D0 ; D2=D0 ;
A=pi()*(D0^2)/4 ;
Pv0 = (8*roh/(pi()^2))* (Q0^2)/(D0^4) ;
Pv1 = Pv0 ;
Pv2 = (8*roh/(pi()^2))* (Q2^2)/(D2^4) ;
Rey0 = (4*roh/pi()/miu)* (Q0/D0) ;
Rey1=Rey0 ;
f0 = 0.25*((log10((e/(D0*3.7)))+(5.74/(Rey0)^0.9)))^-2) ;
Pt_drop01=(f0*L01/D0)*Pv0 ;
while (Ps0<0)
syms d0 Ps1 d0cal
x = input ('RATIO Ps1/Ps2 [-] : ');
Ps2=Ps1/x;
d0 = input ('ASSUME d0 [m] : ');
ERROR = 100 ;
while (ERROR>0.001)
syms Ps1
g=((log10((e/D1)/3.7)+(5.74/(Rey1)^0.9)))^-2)*
(0.707175-0.055455*(d0/D1)-0.131255*log10(Rey1)+0.02341
*(d0/D1)*log10(Rey1));
BERNOULLI_EQ = (Ps1+Pv1)-((g*L12/D1)*Pv1)-(Ps2+Pv2) ;
Ps1=solve(BERNOULLI_EQ,Ps1);
OUTLET_EQ = (Ps1/x)-(-roh*(-Q3^2/(0.65^2*(pi()*
(d0cal^2)/4)^2) + Ps1/roh));
d0new = solve(OUTLET_EQ,d0cal) ;
d0new=double(d0new(1,1)) ;
ERROR = double(abs((d0new-d0)/d0)) ;
d0=d0new ;
end
Ps1=double(Ps1)
Ps2=Ps1/x
Ps0=-ISP+Ps1+Pt_drop01
Ps_fan=Ps0+ISP
end
ans = [D2,Q2,Ps2,d0,Ps_fan,Ps1] ;
```

-ป้อนค่าตัวแปร (Q₀,Q₃,ISP, L_{0→1},L_{1→2})

กำหนดความเร็วที่ท่อต้น
แรกและหาค่า D

-จากสมการ 6.1 หาค่า Q₁
-จากสมการ 6.3 หาค่า Q₂

- กำหนดอัตราส่วน Ps1/Ps2 = C_{PR}
- แก้สมการ 6.2, 6.4 และ 6.5
- ได้คำตอบ Ps0,Ps1,d0
- ตรวจสอบค่า Ps0 > 0
- กำหนด C_{PR} ใหม่ หาก Ps0 น้อยกว่า 0

ได้ผลลัพธ์และกลับสู่ชุดคำสั่งหลัก

ฉ.1.3 ชุดคำสั่งวิเคราะห์การกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย

```
function ans = SUB_HOLES (d0)
syms d
T50 = input ('THROW T50 [m] : ');
q0 = input ('OUTLET AIR FLOWRATE (q0 [m3/s]) : ');
A0=(pi*(d0^2)/4) ;
THROW_EQ = T50-29.17*q0*sqrt(pi*(d^2)/4)/A0 ;
d=solve(THROW_EQ,d) ;
d=(double(d(1,1)))*1000/25.4
d= input ('CHOOSE d (inch) : ');
dnew= 25.4/1000*d ;
T50new=double((29.17*q0*sqrt(pi*(dnew^2)/4)/A0)) ;
N=(d0/dnew)^2;
ans = [dnew,N,T50new] ;
```

-ป้อนค่า d₀,q₀,T₅₀

แก้สมการ 6.6 หาค่า d

เลือกค่า d ที่เป็นไปได้

จากสมการ 6.6 และ 6.9
หาค่า T50 ใหม่และ N สำหรับ
ช่องเปิดขนาด d

ได้ผลลัพธ์และกลับสู่ชุดคำสั่งหลัก

ฉ.1.4 ชุดคำสั่งการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ท่อตรง

```
function ans = SUB_01_STRAIGHT (Q1,Ps1,D1,L,roh,miu,e)
Q2=Q1 ;
D2=D1 ;
Pv1 = (8*roh/(pi()^2))*(Q1^2)/(D1^4) ;
Rey1 = (4*roh/pi()/miu)*(Q1/D1) ;
f = 0.25*(log10((e/(D1*3.7))+(5.74/(Rey1)^0.9)))^-2);
Pt_drop = (f*L/D1)*Pv1 ;
Ps2 = Ps1-Pt_drop ;
ans = [D2,Q2,Ps2,0] ;
```

- ป้อนค่าตัวแปร (Q₁, P_{s1}, D, L)

- จากสมการ 6.1 หาค่า Q₂

- จากสมการ 6.2 หาค่า P_{s2}

ได้ผลลัพธ์และกลับสู่ชุดคำสั่งหลัก

ฉ.1.5 ชุดคำสั่งการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ท่อที่มีช่องเปิด

```
function ans = SUB_02_OUTLET (Q1,Q3,Ps1,D1,L,roh,miu,e)
syms d0 d0cal
Q2=Q1-Q3 ;
D2=D1 ;
A=pi()*(D1^2)/4 ;
Pv1 = (8*roh/(pi()^2))*(Q1^2)/(D1^4)
Pv2 = (8*roh/(pi()^2))*(Q2^2)/(D2^4)
Rey1 = (4*roh/pi()/miu)*(Q1/D1) ;
Rey2 = (4*roh/pi()/miu)*(Q2/D2) ;

d0 = input ('ASSUME d0 [m] : ');
ERROR = 100 ;
while (ERROR>0.001)
    d0_D = d0/D1
    g=((log10(((e/D1)/3.7)+(5.74/(Rey1)^0.9)))^-2))*
(0.707175-0.055455*(d0_D)-0.131255*log10(Rey1)+0.02341
*(d0_D)*log10(Rey1));
    Ps2=-roh*(- Q3^2/(0.65^2*(pi()*(d0cal^2)/4)^2) + Ps1/roh) ;
    BERNOULLI_EQ = (Ps1+Pv1)-((g*L/D1)*Pv1)-(Ps2+Pv2) ;
    d0new = solve(BERNOULLI_EQ,d0cal) ;
    d0new=double(d0new(1,1))
    ERROR = double(abs((d0new-d0)/d0))
    d0=d0new ;
end
Ps2 =double(-roh*(- Q3^2/(0.65^2*(pi()*(d0^2)/4)^2) + Ps1/roh)) ;

ans = [D2,Q2,Ps2,d0] ;
```

- ป้อนค่าตัวแปร (Q₀, Q₀, P_{s1}, D₁, L)

- จากสมการ 6.3 หาค่า Q₂

- แก้ชุดสมการ 6.4 และ 6.5

- ได้คำตอบ C_{PR}, d0

- และหาค่า Ps2

ได้ผลลัพธ์และกลับสู่ชุดคำสั่งหลัก

ฉ.1.6 ชุดคำสั่งการวิเคราะห์ส่วนต่อขยายของแนวท่อลมผ้า : ข้อต่อ

```
function ans = SUB_03_FITTING (Q1,Q3,Ps1,D1,roh,miu,e)
syms D2cal
Q2 = Q1-Q3 ;
Pv1 = (8*roh/(pi()^2))*(Q1^2)/(D1^4) ;
if (Q3 == 0)
    K12 = input ('INPUT K from ASHRAE DATABASE : ');
    Ps2 =Ps1-K12*Pv1 ;
    D2=D1 ;
else
    D2 = 0.9*D1 ; ERROR = 100 ; Ps2 = Ps1 ;
    %SOLVE ITERATION FOR D2
    while (ERROR>0.001)
        Q2_Q1 = double(Q2/Q1) D2_D1 = double(D2/D1)
        K12 = input ('INPUT K from ASHRAE DATABASE : ');
        Pv2 = (8*roh/(pi()^2))*(Q2^2)/(D2cal^4) ;
        BERNOULLI_EQ = Pv1-(1+K12)*Pv2 ;
        D2new = solve(BERNOULLI_EQ,D2cal) ;
        ERROR = double(abs((D2new(1,1)-D2)/D2))
        D2=double(D2new(1,1))
    end
end
ans = [double(D2),double(Q2),Ps2,0] ;
```

- ป้อนค่าตัวแปร P_{s1}, Q₁, Q₃, D₁, D₁

- จากสมการ 6.7 หาค่า Q₁

กรณีเป็นข้องอ

กรณีข้อต่อแยก

- เงื่อนไข Static Regain P_{s1}=P_{s2}

- สมมุติค่า D₁

- หาค่า K จาก ASHRAE FITTING DATABASE

- จากสมการ 6.8 หาค่า D₁

- กระทำซ้ำจนได้ค่า D₁ ที่ถูกต้อง

ได้ผลลัพธ์และกลับสู่ชุดคำสั่งหลัก

ฉ.2 ชุดคำสั่ง Pynomo ของการสร้างโนโมแกรม

ฉ.2.1 โนโมแกรมของฟังก์ชัน c_0 (รูปที่ 7-6a)

| | | |
|--|--|---|
| <pre> from pynomo.nomographer import * ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u1_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':10, 'function':lambda u:u**2, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$Q_{1}\$ \thinspace [m^{3}/s]\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } data_u2_params={ 'u_min':0, 'u_max':9, 'function':lambda u:-(u**2), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$Q_{2}\$ \thinspace [m^{3}/s]\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } data_R1_params={ 'tag':r'1-scale', 'u_min':0.1, 'u_max':12, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{1}\$\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'left', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':0, } block_11_params={ 'block_type':'type_1', 'width':4, 'height':12, 'f1_params':data_u1_params, 'f2_params':data_u2_params, 'f3_params':data_R1_params, 'isopleth_values':[[3,2.6,'x']], } ### Type 6 Ladder Block### R1_Ladder_params={ 'tag':r'1-scale', 'u_min':0.1, 'u_max':12, 'function':lambda u:u, 'title':r'', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, </pre> | <pre> } R2_Ladder_params={ 'tag':r'2-scale', 'u_min':0.1, 'u_max':12, 'function':lambda u:log10(0.924*u), 'title':r'', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } Ladder_params={ 'block_type':'type_6', 'f1_params':R1_Ladder_params, 'f2_params':R2_Ladder_params, 'width':3, 'height':12, 'mirror_x':True, 'isopleth_values':[['x','x']], } ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u3_params={ 'u_min':8, 'u_max':60, 'function':lambda u:4*log10(u*25.4/1000), 'title':r'\$D\$ \thinspace [m \thinspace (inch)]\$', 'title_y_shift':0.5, 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 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:'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:'', </pre> | <pre> 56:'1.422 (56)', 58:'', 60:'1.524 (60)') } data_u4_params={ 'u_min':2, 'u_max':30, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$c_{0}\$ \thinspace (Q_{1},Q_{2},D)\$\$', 'title_y_shift':0.5, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':5, 'tick_side':'right', } data_R2_params={ 'tag':r'2-scale', 'u_min':0.1, 'u_max':12, 'function':lambda u:-log10(0.924*u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{1}\$\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'right', } block_12_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8, 'height':12, 'f1_params':data_R2_params, 'f2_params':data_u3_params, 'f3_params':data_u4_params, 'isopleth_values':[[2.24,32,'x']], } ### MAIN PARAMETERS ### main_params={ 'filename':'2_Nomogram_c0_final02.pdf', 'paper_width':20, 'paper_height':12, 'block_params':[block_11_params,Ladder _params,block_12_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper'),('polygon')], 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thin', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, 'transparency':0.25,}], } Nomographer(main_params) </pre> |
|--|--|---|

ฉ.2.2 โนโมแกรมของฟังก์ชัน c_1 (รูปที่ 7-6b)

| | | |
|---|--|---|
| <pre> from pynomo.nomographer import * ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_R2_params={ 'tag':'r1-scale', 'u_min':-0.15, 'u_max':0.45, 'function':lambda u:u, 'scale_type':'linear smart', 'title':'r', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'right', 'tick_text_levels':0, } data_u3_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':15, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$P_{t,straight}\$\thinspace [Pa]\$', 'title_distance_center':-1, 'title_draw_center':True, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', } data_u4_params={ 'u_min':-0.4, 'u_max':0.6, 'function':lambda u:u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{3}\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'left', } block_12_params={ 'block_type':'type_2', 'width':12, 'height':12, 'f1_params':data_u4_params, 'f2_params':data_u3_params, 'f3_params':data_R2_params, 'isopleth_values':[['x',3,-0.0180]], } ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u1_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':10, 'function':lambda u:- 0.52502*log10(52519*u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$Q_{1}\$\thinspace [m^3/s]\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } </pre> | <pre> data_u2_params={ 'u_min':8, 'u_max':60, 'function':lambda u:0.52502*log10(u*0.0254)+2.8287, 'title':r'\$D\$ \thinspace [m \thinspace (inch)]\$', 'title_y_shift':0.5, 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'right', 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 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:'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)} } data_R1_params={ 'tag':'r1-scale', 'u_min':-0.15, 'u_max':0.45, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{2}\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'right', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_11_params={ 'block_type':'type_1', 'width':2, 'height':12, 'f1_params':data_R1_params, 'f2_params':data_u1_params, 'f3_params':data_u2_params, 'isopleth_values':[['x',4.6,36]], } ### MAIN PARAMETERS ### main_params={ 'filename':'xxx_final.pdf', 'paper_width':16, 'paper_height':12, 'block_params':[block_12_params,block_ 11_params], </pre> | <pre> 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)),('polygon',)], 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thin', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, 'transparency':0.25,}], Nomographer(main_params) from pynomo.nomographer import * data_u1_params={ 'u_min':3, 'u_max':30, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$\thinspace \thinspace \thinspace c_{0}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right',} data_u2_params={ 'u_min':-0.4, 'u_max':0.6, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$R_{3}\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left',} data_R1_params={ 'u_min':2, 'u_max':30, 'function':lambda u:u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$c_{1}\$\thinspace (Q_{1},D,\thinspace \thinspace P_{t,straight},c_{0})\$', 'title_distance_center':-1.7, 'title_draw_center':True, 'title_y_shift':0.3, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left',} block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':4, 'height':12, 'f1_params':data_R1_params, 'f2_params':data_u1_params, 'f3_params':data_u2_params, 'isopleth_values':[['x',4.8,-0.052]],} main_params={ 'filename':'TYPE01_TEST.pdf', 'paper_height':12, 'paper_width':4, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)),('polygon',)], Nomographer(main_params) </pre> |
|---|--|---|

ฉ.2.3 โนโมแกรมของฟังก์ชัน c_2 (รูปที่ 7-6c)

| | | |
|---|---|---|
| <pre> from pynomo.nomographer import * ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u1_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':10, 'function':lambda u:0.1654*log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$Q_{1}\$ \thinspace [m^{3}/s]\$', 'title_y_shift':0.5, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } data_u2_params={ 'u_min':8, 'u_max':60, 'function':lambda u:-0.65973- 1.1672*log10(u*0.0254), 'title':r'\$D\$ \thinspace [m \thinspace (inch)]\$', 'title_y_shift':0.5, 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'right', 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 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:'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)'} } data_R1_params={ 'tag':r'1-scale', 'u_min':0.15, 'u_max':1, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{4}\$\$', 'title_y_shift':0.4, 'tick_side':'right', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_11_params={ 'block_type':'type_1', 'width':6, 'height':14, 'f1_params':data_u1_params, 'f2_params':data_u2_params, </pre> | <pre> ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_R2_params={ 'tag':r'1-scale', 'u_min':0.15, 'u_max':1, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'right', } data_u3_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':5, 'function':lambda u:log10(1.4462)+0.5*log10(u), 'title':r'\$q_{0}\$ \thinspace [m^{3}/s]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'linear smart', } data_R3_params={ 'tag':r'2-scale', 'u_min':0.15, 'u_max':1.5, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{5}\$\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'left', } block_12_params={ 'block_type':'type_1', 'width':6, 'height':14, 'f1_params':data_R3_params, 'f2_params':data_u3_params, 'f3_params':data_R2_params, 'isopleth_values':[[0.35,0.6,'x']], } ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_R4_params={ 'tag':r'2-scale', 'u_min':0.15, 'u_max':1.5, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$S\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'left', } </pre> | <pre> data_u4_params={ 'u_min':0.2, 'u_max':15, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$P_{t, straight}\$ \thinspace [Pa] \$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } data_u5_params={ 'u_min':0.2, 'u_max':4, 'function':lambda u:log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$c_{2}\$ \thinspace (Q_{1},D,q_{0}) \thinspace \thinspace P_{t, straight})\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_13_params={ 'block_type':'type_1', 'width':6, 'height':14, 'f1_params':data_u5_params, 'f2_params':data_u4_params, 'f3_params':data_R4_params, 'isopleth_values':[['x',2.8,0.35]], } ### MAIN PARAMETERS ### main_params={ 'filename':'c2_final.pdf', 'paper_width':20, 'paper_height':12, 'block_params':[block_11_params,block_ 12_params,block_13_params], 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)),('polygon',)], 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thin', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, 'transparency':0.25,,}], } Nomographer(main_params </pre> |
|---|---|---|

ฉ.2.4 โนโมแกรมของสมการ 7.7 (รูปที่ 7-6d)

| | | |
|---|---|---|
| <pre> from pynomo.nomographer import * data_u1_params={ 'u_min':3, 'u_max':30, 'function':lambda u:(- 0.15044*(log10(u)**2)+0.11549*log10(u)+1.0673, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$c_{1}\$\thinspace (Q_{1},D,\thinspace\thinspace P_{t,straight},c_{0})\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } data_u2_params={ 'u_min':0.2, 'u_max':4, 'function':lambda u:0.0018309*u, 'title':r'\$c_{2}\$\thinspace (Q_{1},D,q_{0},\thinspace\thinspace P_{t,straight})\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, ## 'scale_type':'linear smart', 'tick_side':'left', } data_R1_params={ 'tag':r'2-scale', 'u_min':0.975, 'u_max':1.085, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{6}\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':4, 'height':12, 'f1_params':data_u2_params, 'f2_params':data_u1_params, 'f3_params':data_R1_params, 'isopleth_values':[[1,4.8,'x']], } </pre> | <pre> main_params={ 'filename':'ex01.pdf', 'paper_height':20, 'paper_width':6, 'block_params':[block_1_params], ## 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)), ('transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)),('polygon',)), 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thick', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.05, 'transparency':0.5, },], } Nomographer(main_params) from pynomo.nomographer import * data_u1_params={ 'u_min':0.975, 'u_max':1.085, 'function':lambda u:-u, 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{6}\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } data_u2_params={ 'u_min':30, 'u_max':250, 'function':lambda u:-((132.62*(u** 2)-14.025*(u**-1)), 'title':r'\$P_{s,1}\$\thinspace [Pa]\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } data_R1_params={ 'u_min':0.68, 'u_max':1.0, 'function':lambda u:u, 'title':r'\$C_{PR}\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'right', } </pre> | <pre> block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':4, 'height':12, 'f1_params':data_u1_params, 'f2_params':data_u2_params, 'f3_params':data_R1_params, 'isopleth_values':[[1.078,101.4,'x']], } main_params={ 'filename':'ex02.pdf', 'paper_height':20, 'paper_width':6, 'block_params':[block_1_params], ## 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)), ('transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)),('polygon',)), 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thick', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.05, 'transparency':0.5, },], } Nomographer(main_params) </pre> |
|---|---|---|

ฉ.2.5 โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเทียบเท่าพื้นที่ช่องเปิดรวม (รูปที่ 7-7)

| | | |
|---|---|---|
| <pre> from pynomo.nomographer import * ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u1_params={ 'u_min':30, 'u_max':250, 'function':lambda u:0.5*log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$P_{s1}\$ \thinspace [Pa]\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } data_u2_params={ 'u_min':0.68, 'u_max':1.00, 'function':lambda u:0.5*log10(1+(u**(-1))), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$C_{PR}\$ ', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':4, 'tick_text_levels':3, 'tick_side':'left', } data_R1_params={ 'tag':r'1-scale', 'u_min':8, 'u_max':20, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'left', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_11_params={ 'block_type':'type_1', 'width':2, 'height':20, 'f1_params':data_u2_params, 'f2_params':data_u1_params, 'f3_params':data_R1_params, 'isopleth_values':[[0.818,45,'x']], } ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u3_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':5, 'function':lambda u:log10(u), </pre> | <pre> 'title':r'\$q_{0}\$ \thinspace [m^3/s]\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', 'scale_type':'linear smart', } data_u4_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':1, 'function':lambda u:- log10(0.47814*(u**2)), 'title':r'\$d_{0}\$ \thinspace [m]\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'right', } data_R2_params={ 'tag':r'1-scale', 'u_min':8, 'u_max':20, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{7}\$', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'tick_side':'right', } block_12_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8, 'height':20, 'f1_params':data_R2_params, 'f2_params':data_u3_params, 'f3_params':data_u4_params, 'isopleth_values':[[10,0.6,'x']], } </pre> | <pre> ### MAIN PARAMETERS ### main_params={ 'filename':'d0_final.pdf', 'paper_width':12, 'paper_height':20, 'block_params':[block_11_params,block_ 12_params], 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)),('polygon',)], 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thin', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, 'transparency':0.25,}], } Nomographer(main_params) </pre> |
|---|---|---|

ฉ.2.6 โนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศทางการไหล 1→2 (รูปที่ 7-8)

| | | |
|---|---|---|
| <pre> from pynomo.nomographer import * ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u1_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':10, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$Q_{1}\$ \thinspace [m^{3}/s]\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'left', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } data_u2_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':10, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$Q_{2}\$ \thinspace [m^{3}/s]\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'right', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } data_R_1_params={ 'tag':'exitance', 'u_min':0.1, 'u_max':1.0, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{8}\$\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'right', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_11_params={ 'block_type':'type_1', 'width':6.0, 'height':20.0, 'f1_params':data_u1_params, 'f2_params':data_u2_params, 'f3_params':data_R_1_params, 'isopleth_values':[[5.6,4.6,'x']], } ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u3_params={ 'u_min':8, 'u_max':60, 'function':lambda u:-log10(u*0.0254), 'title':r'\$D_{1}\$ \thinspace [m \thinspace (inch)]\$', </pre> | <pre> 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 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:'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)'} } data_u4_params={ 'u_min':8, 'u_max':60, 'function':lambda u:log10(u*0.0254), 'title':r'\$D_{2}\$ \thinspace [m \thinspace (inch)]\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 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:'0.762 (30)', 32:'0.813 (32)', </pre> | <pre> 34:'0.864 (34)', 36:'0.914 (36)', 38:'0.965 (38)', 40:'1.016 (40)', 42:'1.067 (42)', 44:'1.118 (44)', 46:'1.168 (46)', 48:'1.219 (48)', 50:'1.270 (50)', 52:'1.321 (52)', 54:'1.372 (54)', 56:'1.422 (56)', 58:'1.473 (58)', 60:'1.524 (60)'} } data_R_2_params={ 'tag':'exitance', 'u_min':0.1, 'u_max':1.0, 'function':lambda u:-log10(- 0.4812*(u**2)+1.2691*u+0.2177), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'left', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_12_params={ 'block_type':'type_1', 'width':6.0, 'height':20.0, 'f1_params':data_R_2_params, 'f2_params':data_u3_params, 'f3_params':data_u4_params, 'isopleth_values':[['x',38,36]], } ### MAIN PARAMETERS ### main_params={ 'filename':'3_nomogram_D2_final.pdf', 'paper_height':20.0, 'paper_width':12.0, 'block_params':[block_11_params,block_ 12_params], 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)),('polygon',)], 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thin', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, 'transparency':0.25,,}], } Nomographer(main_params) </pre> |
|---|---|---|

ฉ.2.7 โนโมแกรมสำหรับข้อต่อ SD5-10 ทิศทางการไหล 1→3 (รูปที่ 7-9)

| | | |
|--|--|---|
| <pre> from pynomo.nomographer import * ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u1_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':10, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$Q_{1}\$ \thinspace [m^3/s]\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'left', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } data_u2_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':10, 'function':lambda u:-log10(u), 'title':r'\$Q_{3}\$ \thinspace [m^3/s]\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'right', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } data_R_1_params={ 'tag':'exitance', 'u_min':0.1, 'u_max':0.9, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{9}\$\$', 'title_y_shift':0.3, 'tick_side':'right', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_11_params={ 'block_type':'type_1', 'width':6.0, 'height':20.0, 'f1_params':data_u1_params, 'f2_params':data_u2_params, 'f3_params':data_R_1_params, 'isopleth_values':[[5.6,0.9,'x']], } ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u3_params={ 'u_min':8, 'u_max':60, 'function':lambda u:-log10(u*0.0254), 'title':r'\$D_{1}\$ \thinspace [m \thinspace (inch)]\$', </pre> | <pre> 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':1, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 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:'0.762 (30)', 32:'0.813 (32)', 34:'0.864 (34)', 36:'0.914 (36)', } data_u4_params={ 'u_min':8, 'u_max':60, 'function':lambda u:-log10(u*0.0254), 'title':r'\$D_{3}\$ \thinspace [m \thinspace (inch)]\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 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:'0.762 (30)', 32:'0.813 (32)', 34:'0.864 (34)', 36:'0.914 (36)', } </pre> | <pre> 40:'1.016 (40)', 42:'1.067 (42)', 44:'1.118 (44)', 46:'1.168 (46)', 48:'1.219 (48)', 50:'1.270 (50)', 52:'1.321 (52)', 54:'1.372 (54)', 56:'1.422 (56)', 58:'1.473 (58)', 60:'1.524 (60)' } data_R_2_params={ 'tag':'exitance', 'u_min':0.1, 'u_max':0.9, 'function':lambda u:-log10(- 1.0872*(u**2)+1.9889*u+0.2639), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'left', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_12_params={ 'block_type':'type_1', 'width':6.0, 'height':20.0, 'f1_params':data_R_2_params, 'f2_params':data_u3_params, 'f3_params':data_u4_params, 'isopleth_values':[['x',38,22]], } ### MAIN PARAMETERS ### main_params={ 'filename':'3_nomogram_D3_final.pdf', 'paper_height':20.0, 'paper_width':12.0, 'block_params':[block_11_params,block_ 12_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper'),('polygon')], 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thin', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, 'transparency':0.25,,}], } Nomographer(main_params) </pre> |
|--|--|---|

ฉ.2.8 โนโมแกรมสำหรับการกระจายช่องเปิดรวมเทียบเท่าให้เป็นช่องเปิดย่อย (รูปที่ 7-10)

| | | |
|--|--|--|
| <pre> from pynomo.nomographer import * ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u1_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':5, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$q_{0} \text{thinspace [m}^{\{3\}}/s\}\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'right', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } data_u2_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':1.0, 'function':lambda u:-2*log10(u), 'title':r'\$d_{0} \text{thinspace [m]}\\$', 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'left', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } data_R_1_params={ 'tag':'exitance', 'u_min':1, 'u_max':10, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'\$R_{10}\\$', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'right', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_11_params={ 'block_type':'type_1', 'width':8, 'height':20.0, 'f1_params':data_u2_params, 'f2_params':data_u1_params, 'f3_params':data_R_1_params, 'isopleth_values':[[0.235,0.4,'x']], } ### TYPE 1 3-LINE BLOCK ### data_u3_params={ 'u_min':2, 'u_max':12, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$T_{50} \text{thinspace [m]}\\$', </pre> | <pre> 'scale_type':'linear smart', 'title_y_shift':0.2, 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } data_u4_params={ 'u_min':0.5, 'u_max':4, 'function':lambda u:- log10(32.915*u*0.0254), 'title':r'\$d \text{thinspace [m} \text{thinspace (inch)}\\$', 'title_y_shift':0.7, 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 0.5:'0.0127 (0.5 in)', 1.0:'0.0254 (1.0 in)', 1.5:'0.0381 (1.5 in)', 2.0:'0.0508 (2.0 in)', 2.5:'0.0635 (2.5 in)', 3.0:'0.0762 (3.0 in)', 3.5:'0.0889 (3.5 in)', 4.0:'0.1016 (4.0 in)'} } data_R_2_params={ 'tag':'exitance', 'u_min':1, 'u_max':10, 'function':lambda u:-log10(u), 'scale_type':'linear smart', 'title':r'', 'title_y_shift':0.2, 'tick_side':'left', 'tick_levels':0, 'tick_text_levels':0, } block_12_params={ 'block_type':'type_1', 'width':6.0, 'height':20.0, 'f1_params':data_R_2_params, 'f2_params':data_u4_params, 'f3_params':data_u3_params, 'isopleth_values':[[7.24,1,'x']], } </pre> | <pre> ### MAIN PARAMETERS ### main_params={ 'filename':'4_nomogram_d.pdf', 'paper_height':20.0, 'paper_width':12.0, 'block_params':[block_11_params,block_ 12_params], 'transformations':[('rotate',0.01),('scale paper'),('polygon')], 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thin', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.07, 'transparency':0.25,,}], } Nomographer(main_params) </pre> |
|--|--|--|

ฉ.2.9 โนโมแกรมสำหรับวิเคราะห์จำนวนช่องเปิดทั้งหมด (รูปที่ 7-11)

| | | |
|---|--|--|
| <pre> ### Type1-Isopleth.py### from pynomo.nomographer import * S_params={ 'u_min':0.1, 'u_max':1.8, 'function':lambda u:-2*log10(u), 'title':r'\$d_{0}\$\thinspace\thinspace [m]\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, } P_params={ 'u_min':0.5, 'u_max':4.0, 'function':lambda u:2*log10(u*0.0254), 'title':r'\$d\$\thinspace\thinspace [m]\$', 'tick_levels':2, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', 'scale_type':'manual line', 'manual_axis_data': { 0.5:'0.0127 (0.5 in)', 1.0:'0.0254 (1.0 in)', 1.5:'0.0381 (1.5 in)', 2.0:'0.0508 (2.0 in)', 2.5:'0.0635 (2.5 in)', 3.0:'0.0762 (3.0 in)', 3.5:'0.0889 (3.5 in)', 4.0:'0.1016 (4.0 in)'} } V_params={ 'u_min':10, 'u_max':1000, 'function':lambda u:log10(u), 'title':r'\$N\$', 'tick_levels':3, 'tick_text_levels':2, 'tick_side':'left', } </pre> | <pre> block_1_params={ 'block_type':'type_1', 'width':12.0, 'height':20, 'f1_params':S_params, 'f2_params':P_params, 'f3_params':V_params, 'isopleth_values':[[0.3,1,'x']], } main_params={ 'filename':'4_nomogram_N.pdf', 'paper_height':20, 'paper_width':12.0, 'block_params':[block_1_params], 'transformations':[(('rotate',0.01),('scale paper',)), ('polygon',)], 'isopleth_params':[{'color':'red', 'linewidth':'thick', 'linestyle':'dashed', 'circle_size':0.10, 'transparency':0.0, },], } Nomographer(main_params) </pre> | |
|---|--|--|

ภาคผนวก ข

เครื่องมือการวัดสำหรับการทดลอง

ในการทดลองจะเลือกใช้เครื่องมือวัดที่สามารถหาได้โดยสะดวก และใช้งานง่ายไม่ซับซ้อนมาก โดยเลือกชนิดที่สามารถให้ความแม่นยำและช่วงของการวัดที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. มานอมิเตอร์แบบเอียง (Inclined Manometer)

ใช้งานโดยต่อสายยางขนาด ¼ นิ้ว (2 หุน) เข้ากับหัวโพรบ ที่ทำจากหัวเข็มฉีดยาขนาด 1.6 มิลลิเมตร โดยติดตั้งที่ตำแหน่งผนังท่อเพื่อวัดความดันสถิตที่ขาเข้าและออกของท่อลม และติดตั้งกับ Pitot Tube ในการวัดความเร็วที่ตำแหน่งช่องเปิดใดๆ

| | | |
|----------------|---|------------------------------------|
| Model | : | Dwyer Instrument Inc. |
| Pressure Range | : | 0 – 250 mm. of water (0 – 2450 Pa) |
| Resolution | : | 0.1 mm. of water (1 Pa) |



รูปที่ ข-1 มานอมิเตอร์แบบเอียง

2. เครื่องวัดความดันแบบดิจิตอล (Pressure Transducer)

เป็นเครื่องมือวัดความดันที่แสดงผลเป็นตัวเลขดิจิตอล ใช้งานควบคู่ไปกับหัวโพรบ (Probe) ซึ่งทำมาจากหัวเข็มฉีดยาซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.6 มิลลิเมตร โดยเครื่องมือวัดความดันแบบดิจิตอล มีหน้าที่ในการวัดความดันรวมของลมที่ไหลภายในท่อทั้งขาเข้าและขาออก

| | | |
|----------------|---|-------------------------------------|
| Model | : | Alnor AXD 510 |
| Pressure Range | : | 0 – 19.99 inch of water (0-4975 Pa) |
| Resolution | : | 0.01 inch of water (2.5 Pa) |



รูปที่ ซ-2 เครื่องมือวัดความดันยี่ห้อ Alnor รุ่น AXD 510

3. เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

เป็นเครื่องมือวัดความเร็วลมที่แสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัล โดยจะถูกใช้วัดความเร็วลมที่ตำแหน่งขาออกของท่อลมหรือตำแหน่งช่องเปิดต่างๆ และค่าที่อ่านได้จะถือว่าเป็นความเร็วลมเฉลี่ยที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งช่องเปิดนั้น

Velocity Range : 0.4 - 30 m/s

Resolution : 0.1 m/s



รูปที่ ซ-3 เครื่องวัดความเร็วลม (Anemometer)

4. เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์

เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศที่แสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัล โดยจะถูกติดตั้งภายนอกท่อลมใกล้บริเวณขาเข้าของวอลุ่มแคมเปอร์ เพื่อวัดค่าอุณหภูมิและความชื้นของอากาศ ณ ขณะทำการทดลอง แล้วนำไปพิจาณากับแผนภูมิไซโครเมตริก เพื่อจะได้ทราบคุณสมบัติของอากาศที่ทำการทดลอง

| | | |
|------------|---|--|
| Model | : | Digicon HT-765 |
| %RH Range | : | 10%RH to 95%RH |
| TEMP | : | 0-50 องศา C / 32-122 องศา F |
| Resolution | : | 0.01%RH 0.01 องศาเซลเซียส/ 0.01 องศาฟาเรนไฮต์ |

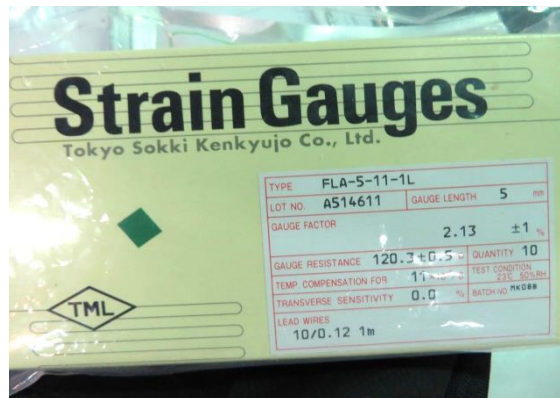


รูปที่ ข-4 เครื่องวัดความชื้นยี่ห้อ Digicon รุ่น HT-765

5. สเตรนเกจ (Strain Gauge)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดแรงดึงเครียด (strain) ของวัสดุ โดยเมื่อเสตรนเกจถูกแรงหรือความดันกระทำ จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในลักษณะยืดหรือหด ทำให้ความต้านทานของวัสดุที่ทำสเตรนเกจนั้นเปลี่ยนแปลงไปตามแรงกระทำที่เกิดขึ้น ซึ่งการนำไปใช้จะต้องต่อกับวงจรวิทสโตนบริดจ์ (Wheatstone bridge) เพื่อแปลงค่าความแตกต่างที่เปลี่ยนแปลงไปให้เป็นความเครียดที่เกิดขึ้น และแสดงผลในรูปของตัวเลขดิจิทัล

| | | |
|-----------------------------------|---|-------------------|
| Model | : | TML FLA-5-11-1L |
| Total leadwire resistance / meter | : | 0.32 Ω |
| Gauge Size | : | L 5 mm , W 1.5 mm |
| Resistance | : | 120 Ω |



รูปที่ ช-5 แสดงสเตรนเกจที่ใช้ในการทดลอง

6. Data logger

เป็นเครื่องมือวัดความเครียดของวัสดุด้วยการแปลงค่าความเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้า และแสดงผลเป็นตัวเลขดิจิทัล โดยจะถูกติดตั้งกับเกจวัดความเครียดที่ติดอยู่บนท่อลมผ้า เพื่ออ่านค่าความเครียดที่เกิดขึ้น ขณะที่วัสดุนั้นเริ่มคงรูปอย่างเหมาะสม

Model : KYOWA SMD-10A
 Measuring Range : (0 to ±19900) $\mu\text{m}/\text{m}$
 Resolution : 1 $\mu\text{m}/\text{m}$



รูปที่ ช-6 แสดง Data Logger ที่ใช้ในการทดลอง

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทวีพงศ์ สิริคุตตานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 14 กันยายน พ.ศ. 2534 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร เป็นบุตรชายคนที่สองของนายสมเกียรติ สิริคุตตานนท์ และนางสถาพร สิริคุตตานนท์ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอัสสัมชัญ ปีการศึกษา 2552 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2556 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2557

