



การศึกษาวิธีการออกแบบระบบท่อลมที่คำนึงถึงผลของการรั่ว
และการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อ

Study on the Air Duct System Design Method with Design Considerations on the
Effect of Air Leakage and Heat Loss inside the Air Duct

เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์^{1*} และ ตุลยวัต แสงวิเชียรกิจ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10300

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10300

*Email: chirdpun@hotmail.com, Tel: 02-218-6622, Fax: 02-252-2889

บทคัดย่อ

ท่อลมในระบบปรับอากาศมีหน้าที่หลักคือส่งและกระจายอากาศที่ปรับสถานะแล้วจากเครื่องทำความเย็นไปสู่บริเวณต่าง ๆ โดยจะต้องรักษาสถานะของอากาศภายในท่อลมให้คงสภาพเดิมให้ได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัติการประกอบท่อลมจะอาศัยการพับขึ้นรูปและตีตะเข็บตามรอยต่อของท่อโดยไม่มีการเชื่อมและใช้วัสดุประเภทกาวกันซึม ทาตามรอยตะเข็บรวมทั้งใช้ยึดฉนวนเข้ากับผิวท่อ ส่งผลให้ท่อลมนั้นเมื่อมีการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง มักจะเกิดปัญหาเรื่องลมรั่วตลอดจนการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อ ซึ่งส่งผลกระทบต่อสถานะของลมทั้งในแง่ของปริมาณลม ความดันรวม ความดันสถิต ความเร็วและอุณหภูมิของลมภายในท่อ ดังนั้น เพื่อให้ได้สมรรถนะการทำงานของท่อลมที่ตรงกับความ เป็นจริง การออกแบบท่อลมจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยทั้งสองดังกล่าวข้างต้น

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำวิธีการออกแบบท่อลมบนพื้นฐานวิธี Static Regain แต่คำนึงถึงการรั่วของลม และการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อที่พัฒนาขึ้นโดย ตุลยวัต และ เชิดพันธ์ [1,2] ตลอดจนใช้โปรแกรมที่พัฒนา มาจากวิธีดังกล่าวมาออกแบบท่อลมและทำการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบท่อลมโดยวิธี Static Regain จากการศึกษาพบว่า การออกแบบท่อลมด้วยโปรแกรมจะให้ค่าความดันรวมลดลงในท่อตรงมากกว่าวิธี Static Regain ส่วนค่าความดันสถิตของพัดลมที่ได้จากโปรแกรมจะมากกว่าค่าที่ได้จากวิธี Static Regain ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางของท่อตรงที่ได้จากโปรแกรมมีขนาดใกล้เคียงกับที่ได้จากวิธี Static Regain ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ของท่อแยกที่ได้จากโปรแกรมจะมีขนาดใหญ่กว่าที่ได้จากวิธี Static Regain การกระจายตัวของความดันสถิตภายในท่อ ตรงที่ได้จากการออกแบบทั้งสองวิธีมีลักษณะเหมือนกัน แต่ค่าความดันสถิตภายในท่อตรงที่ออกแบบด้วยโปรแกรมจะมี ค่าสูงกว่าวิธี Static Regain นอกจากนี้อัตราการลดลงของความดันรวมที่ได้จากโปรแกรมยังสูงกว่าที่ได้จากวิธี Static Regain ด้วย ในส่วนของการรั่วและการสูญเสียความร้อนพบว่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรและการถ่ายเทความร้อนจะมี ค่าสูงที่ท่อตรงบริเวณต้นทางมากกว่าท่อตรงบริเวณอื่น ๆ

คำหลัก: ท่อลม, การสูญเสียความร้อน, การรั่วไหล, Static Regain, โปรแกรม

Abstract

The main function of duct in air conditioning system is to supply and distribute conditioning air from refrigeration unit to any required spaces. This conditioning air has to be maintained its condition as much as possible inside the duct. However, in normal practice, duct is fabricated by folding and seaming along duct joints without welding. The leak proofing adhesive is applied along these joints and this adhesive is also used for attaching insulations on the duct surfaces. Under this fabrication process, the air leakage and heat loss from the duct are normally happened after being used for a certain period of time. This affects the condition of the air in term of air quantity, total pressure, static pressure, air velocity and temperature. Therefore to obtained the actual duct performance, it is necessary to account these two loss factors as mentioned before in the duct design methodology.

The objective of this study is to apply the duct design methodology based on static regain method but with air leakage and heat loss consideration developed by Tulyawat and Chirdpun [1,2] to design a duct system by using nomograms developed from the method as designing tools. The results are then compared with those obtained from static regain method. It is found that the total pressure drop in straight duct obtained from nomograms is higher than that from static regain while fan static pressure obtained from nomograms is higher than that from static regain. The straight duct diameters obtained from nomograms are approximately the same as those from static regain but with larger branch duct diameters. Both methods provide the same static pressure distribution characteristic in the straight duct with higher static pressures obtained from nomograms than those from static regain. Moreover, the rate of total pressure drop obtained from nomograms is higher than that from static regain. For air leakage and heat loss, the rate of air leakage and heat loss are higher at straight duct near the entrance than those at other locations of straight ducts in the system.

Keywords: Air Duct, Heat Loss, Leakage, Static Regain, Nomogram.

1. บทนำ

การออกแบบท่อลมในระบบปรับอากาศที่นิยมใช้กันทั่วไป จะเป็นวิธีการออกแบบตามมาตรฐาน ASHARE ซึ่งได้ให้วิธีการออกแบบท่อลมไว้ 4 วิธี ดังนี้คือ วิธี Equal Friction ซึ่งผู้ออกแบบจะกำหนดขนาดของความดันลดต่อความยาวท่อที่ยอมให้เกิดขึ้นได้และใช้ขนาดความดันลดดังกล่าวในการหาขนาดท่อแต่ละท่อนในระบบท่อลม, วิธี Static Regain ซึ่งผู้ออกแบบจะกำหนดความเร็วลมของท่อต้นทาง และใช้เงื่อนไขของการได้ค่าความดันสถิตของลมกลับคืนมาเท่ากับความดันลดในท่อลมท่อนถัดไปเมื่อลมไหลผ่านทุก ๆ ทางแยกของท่อ ซึ่งเป็นผลมาจาก

ความเร็วลมที่ลดลง อันเนื่องมาจากมวลที่ลดลงในแต่ละท่อแยก, วิธี Velocity Reduction ซึ่งผู้ออกแบบจะกำหนดขนาดของความเร็วลมที่ต้องการในแต่ละท่อในระบบท่อลมมาหาขนาดท่อ และ วิธี T-Method ซึ่งใช้หลักการเดียวกับวิธี Static Regain แต่ในการหาขนาดของท่อลมเพื่อให้ได้ค่าความดันสถิตของลมกลับคืนมาในแต่ละท่อแยกจะมีเงื่อนไขของต้นท่อนท่อลมเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้วิธีดังกล่าวเป็นการหาขนาดท่อที่เหมาะสมในระบบท่อลมที่ทำให้ต้นท่อนของระบบท่อลมนั้นต่ำที่สุด อย่างไรก็ตาม วิธีการออกแบบดังกล่าวข้างต้นทั้งหมดตั้งอยู่บนสมมติฐานของท่อลมที่มีความสมบูรณ์

กล่าวคือเป็นท่อที่ไม่มีการรั่วไหลและไม่มีการถ่ายเทความร้อนของลมภายในท่อ แต่ท่อลมในทางปฏิบัติทั่วไป มักจะมีการรั่วและสูญเสียความร้อนทั้งการสูญเสียความร้อนที่ไปกับการรั่วไหลของลมและการสูญเสียความร้อนที่ผิวของท่อ เนื่องจากการประกอบท่อลมจะอาศัยการพิบขึ้นรูปและการตีตะเข็บตามแนวรอยต่อของท่อโดยไม่มีการเชื่อมและอาศัยวัสดุประเภทกาวกันซึมทาตามรอยตะเข็บรวมทั้งใช้การยัดฉนวนเข้ากับผิวท่อ เพื่อลดการรั่วไหลและการเกิดช่องว่างของอากาศระหว่างฉนวนและผิวท่อ ซึ่งหากทำไม่ดีพอ จะมีผลกระทบต่อสภาวะของลมภายในท่อ นอกจากนี้ ท่อลมที่ผ่านการใช้งานไประยะเวลาหนึ่ง จะเกิดการสึกกร่อนของผนังท่อลม ทำให้เกิดรูรั่ว รวมทั้งวัสดุกันซึมที่หมดอายุ ทำให้เกิดช่องว่างอากาศระหว่างผิวท่อลมกับฉนวนหุ้มท่อ ทั้งหมดนี้ล้วนแล้วแต่ส่งผลกระทบต่อสภาวะของลมภายในท่อทั้งในแง่ของปริมาณลม ความดันรวม ความดันสถิต ความเร็วและอุณหภูมิของลมภายในท่อ [1,2] ดังนั้น เพื่อให้ได้สมรรถนะการทำงานของท่อลมที่ตรงกับความเป็นจริง การออกแบบท่อลมจำเป็นจะต้องคำนึงถึงปัจจัยทั้งสองดังกล่าวข้างต้น

งานวิจัยนี้ได้นำวิธีการออกแบบท่อลมบนพื้นฐานวิธี Static Regain แต่คำนึงถึงการรั่วไหลและการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อที่พัฒนาขึ้นโดยตุลยวัตรและเชิดพันธ์ [1, 2] โดยใช้โปรแกรมที่พัฒนามาจากวิธีดังกล่าวมาออกแบบท่อลมและทำการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้กับผลลัพธ์ที่ได้จากการออกแบบท่อลมโดยวิธี Static Regain เพื่อหาผลกระทบต่าง ๆ ที่มีต่อสภาวะของลมภายในท่อจากการรั่วไหลและการสูญเสียความร้อน

2. วรรณกรรมปริทัศน์

2.1 แบบจำลองการรั่วไหลแบบเลขยกกำลัง (Power Law Model)

SMACNA [3] แนะนำแบบจำลองทำนายอัตราการรั่วไหลในรูปสมการเลขยกกำลัง ดังนี้

$$Q = C_l(\Delta P_s)^{0.65} \quad (1)$$

โดย ΔP_s คือ ความแตกต่างระหว่างความดันสถิตภายในและภายนอกท่อลม

C_l คือ ระดับชั้นการรั่วไหล (Leakage Class)

2.2 แบบจำลองพื้นที่การรั่วไหลประสิทธิผล (Effective Leakage Area)

M.P. Modera, et al. [4] ศึกษาลักษณะทางกายภาพของการรั่วไหลจากระบบท่อลมในอาคารขนาดใหญ่ ได้สมการเพื่อใช้ในการประมาณพื้นที่การรั่วไหล ดังนี้

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

โดย ELA คือ Effective Leakage Area

n คือ เลขชี้กำลัง มีค่า 0.65 สำหรับการไหลแบบปั่นป่วน

$\Delta p_{s,ref}$ คือ ความดันสถิตอ้างอิงมีค่า 250 Pa

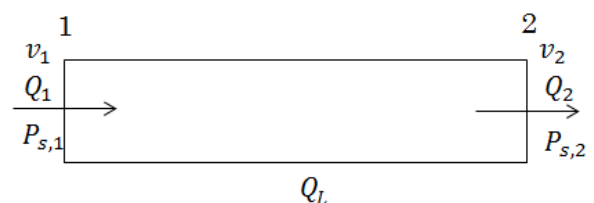
2.3 ผลของการไหลต่อการถ่ายเทความร้อนและความดันลด

ตุลยวัตรและเชิดพันธ์ [2] ทำการทดลองพบว่าการเพิ่มขึ้นของค่า Reynold No. ส่งผลให้เกิดการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น อีกทั้งยังทำให้ความดันรวมลดในท่อเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของลมในท่อยังส่งผลให้ความดันรวมลดเพิ่มมากขึ้นด้วย

3. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ตุลยวัตร และ เชิดพันธ์ [1, 2, 5] ได้พัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนต่าง ๆ ของท่อในระบบท่อลม ได้แก่

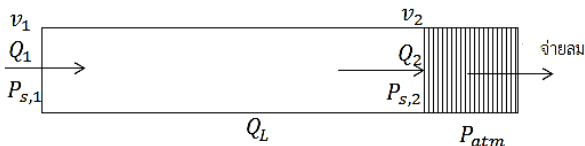
3.1 ท่อตรงที่มีรอยต่อและตะเข็บ



รูปที่ 1 แบบจำลองท่อตรงที่มีรอยต่อและตะเข็บ

โดยสมการที่ใช้จะประกอบไปด้วย 3 สมการหลัก ได้แก่ สมการอนุรักษ์มวลที่คิดรวมการรั่วไหล สมการทำนายอัตราการรั่วไหลของลม และสมการพลังงานที่คิดรวมการถ่ายเทความร้อนและการรั่วไหล

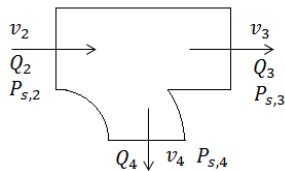
3.2 ท่อตรงที่มีรอยต่อและตะเข็บในท่อที่มีการจ่ายลมสู่บริเวณปรับอากาศ



รูปที่ 2 แบบจำลองท่อตรงที่มีรอยต่อและตะเข็บในท่อที่มีการจ่ายลมสู่บริเวณปรับอากาศ

สมการที่ใช้ประกอบไปด้วย 4 สมการหลักได้แก่ สมการอนุรักษ์มวลที่คิดรวมการรั่วไหล สมการทำนายอัตราการรั่วไหลของลม สมการพลังงานที่คิดรวมการถ่ายเทความร้อนและการรั่วไหลและสมการระยะส่งลม

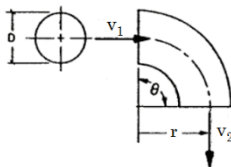
3.3 ข้อต่อแยกแบบ 3 ทาง



รูปที่ 3 แบบจำลองข้อต่อแยกแบบ 3 ทาง

สมการที่ใช้ประกอบไปด้วย 2 สมการหลักได้แก่ สมการอนุรักษ์มวลและสมการพลังงาน โดยไม่คิดการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนของลมผ่านผนังของข้อต่อ เนื่องจากข้อต่อมีความยาวสั้นเมื่อเทียบกับความยาวท่อตรง

3.4 ข้องอ



รูปที่ 4 แบบจำลองข้องอ

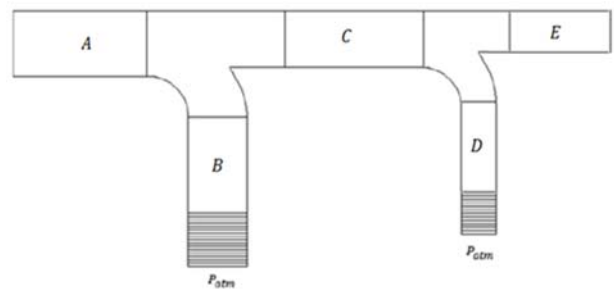
สมการที่ใช้มี 1 สมการคือสมการพลังงาน โดยไม่คิดการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนเช่นเดียวกับข้อต่อแยก

หมายเหตุ รายละเอียดของชุดสมการในแบบจำลองต่าง ๆ หาอ่านเพิ่มเติมได้ใน [1,2,5]

ในแต่ละแบบจำลองจะมีตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการไหลดังนี้ อัตราการไหลที่แต่ละหน้าตัดของท่อ (Q_i , m^3/s) อัตราการรั่วไหลของลมในท่อแต่ละท่อน (Q_{Li} , m^3/s) ความเร็วลมที่แต่ละหน้าตัดของท่อ (v_i , m/s) ความดันสถิตที่แต่ละหน้าตัดของท่อ ($P_{s,i}$, Pa) อัตราการถ่ายเทความร้อนผ่านผนังท่อแต่ละท่อน ($q_{D,i-j}$, W) อัตราการถ่ายเทความร้อนจากการรั่วไหล ($q_{L,i-j}$, W) ระยะส่งลมเฉลี่ยที่ความเร็วลมปลายทางเท่ากับ 50 FPM (T_{50} , M) ความดันเกจสถิตที่คร่อมหัวจ่าย (P_{gs} , Pa) โดยค่าตัวประกอบความเสียหายได้จากการทดลองโดย ตูสยวัตร และเชิดพันธ์ [1,2] ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียรองสำหรับข้อต่อแยกและข้องอมาจาก ASHRAE [6]

3.5 การแก้ชุดสมการในแบบจำลองเพื่อประยุกต์ใช้กับระบบท่อลม

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างแนวเดินท่อลมโดยทั่วไปที่สามารถสร้างขึ้นเพื่อการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 5 แสดงแนวเดินท่อลมโดยทั่วไป

การหาค่าต่าง ๆ ในสมการแบบจำลองจะเริ่มจากการกำหนดความเร็วลมขาเข้าของท่อ A จากนั้นทำการแก้ชุดสมการในแบบจำลองท่อตรงท่อนแรก (ท่อ A), ข้อต่อแยกเส้นทางการไหล A – B และ ท่อตรงที่มีการจ่ายลมออกสู่บริเวณปรับอากาศ (ท่อ B) ไปพร้อม ๆ กัน เพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ B อัตราการรั่วไหลในท่อ A และ B รวมทั้งอุณหภูมิขาออกของท่อ A และท่อ B เมื่อได้ค่าต่าง ๆ แล้ว จึงมาทำการแก้ชุดสมการ

แบบจำลองข้อต่อแยก เส้นทางไหล A – C โดยใช้เงื่อนไขวิธี Static Regain ซึ่งจะกำหนดให้ได้ความดันสถิตของลมในตอนต้นกลับคืนมาที่ทุกจุดทางแยก เพื่อหาขนาดท่อ C หรือท่อตรงที่ไม่มีการจ่ายลมออกสู่บริเวณปรับอากาศ แล้วจึงใช้ชุดสมการแบบจำลองท่อตรงที่ไม่มีการจ่ายลมออกสู่บริเวณปรับอากาศ (ท่อ C) เพื่อหาค่าอัตราการรั่วไหลและอุณหภูมิขาออกของท่อ C หลังจากนั้นจึงไปคำนวณข้อต่อแยก เส้นทางไหล C – D เพื่อหาขนาดของท่อ D ส่วนการคำนวณในท่อท่อนถัดไป (ท่อ E) จะเริ่มจากสมการแบบจำลองข้อต่อแยก เส้นทางไหล C – E ซึ่งจะกลับไปซ้ำกับการคำนวณข้อต่อแยก เส้นทางไหล A – C ดังที่กล่าวมาก่อนหน้า ทั้งนี้ขั้นตอนการคำนวณจะเริ่มวนซ้ำหากมีท่อลมต่อออกจากท่อ E อีก จนกว่าท่อลมจะสิ้นสุด

4. โนโมแกรม

เนื่องจากชุดสมการในแบบจำลองมีความซับซ้อน [1,2] ดังนั้น เพื่อให้สามารถนำไปใช้งานได้ในงานปฏิบัติ งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้การสร้างชุดโนโมแกรม หรือชุดแผนภาพเชิงเส้นที่มีค่าของตัวแปรต่าง ๆ ในชุดสมการมาใช้ในการหาคำตอบ ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถหาคำตอบในแต่ละขั้นตอนของการคำนวณทันที โดยชุดโนโมแกรมที่สร้างขึ้นนี้ประกอบด้วย

- 4.1 ชุดโนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาเข้าท่อตรงท่อนแรก ($P_{s,1}$)_A แสดงไว้ในรูปที่ 6 และ 7
- 4.2 โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกจากท่อตรง ($P_{s,2}$) แสดงไว้ในรูปที่ 8
- 4.3 โนโมแกรมเพื่อหาอัตราการรั่วไหล (Q_L) แสดงไว้ในรูปที่ 9
- 4.4 โนโมแกรมเพื่อหาอุณหภูมิขาออก (T_2) แสดงไว้ในรูปที่ 10
- 4.5 โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อสาขา ($v_{1,B}$) แสดงไว้ในรูปที่ 11

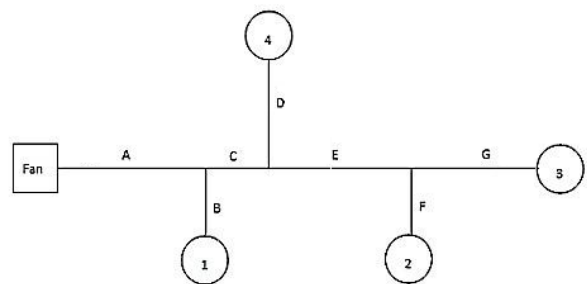
4.6 โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนถัดไป ($v_{1,C}$) แสดงไว้ในรูปที่ 12

4.7 โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อสาขา ($P_{s,2}$)_B แสดงไว้ในรูปที่ 13

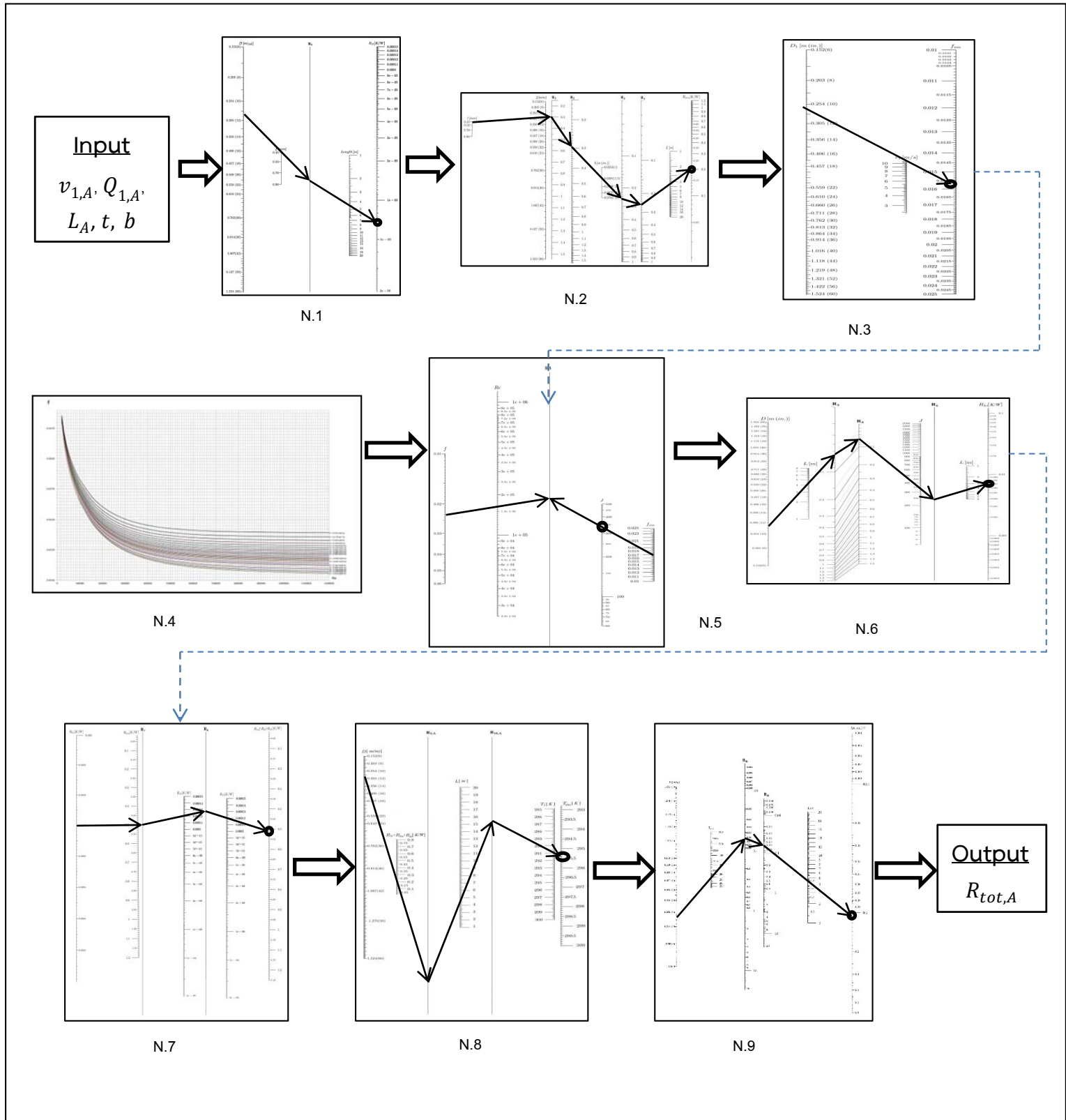
สำหรับท่อลมและข้อต่อท่อนถัดไป (หากมี) สามารถหาขนาดท่อได้โดยอาศัยการกระทำซ้ำตามขั้นตอนในหัวข้อ 4.2 ถึง 4.7 ไปเรื่อย ๆ จนกว่าท่อลมจะสิ้นสุด ทั้งนี้เมื่อดำเนินการตามขั้นตอนดังกล่าวกับท่อลมทุกท่อนแล้ว ก็จะสามารถหาค่าตัวแปรที่สำคัญในระบบท่อลม ได้แก่ ความดันสถิตขาออก ($P_{s,2}$), อัตราการรั่วไหล (Q_L), อุณหภูมิขาออก (T_2), ความเร็วขาเข้า (v_1) และ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแต่ละท่อน (D) ได้

5. ผลการออกแบบระบบท่อลมด้วยโนโมแกรมและวิธี Static Regain

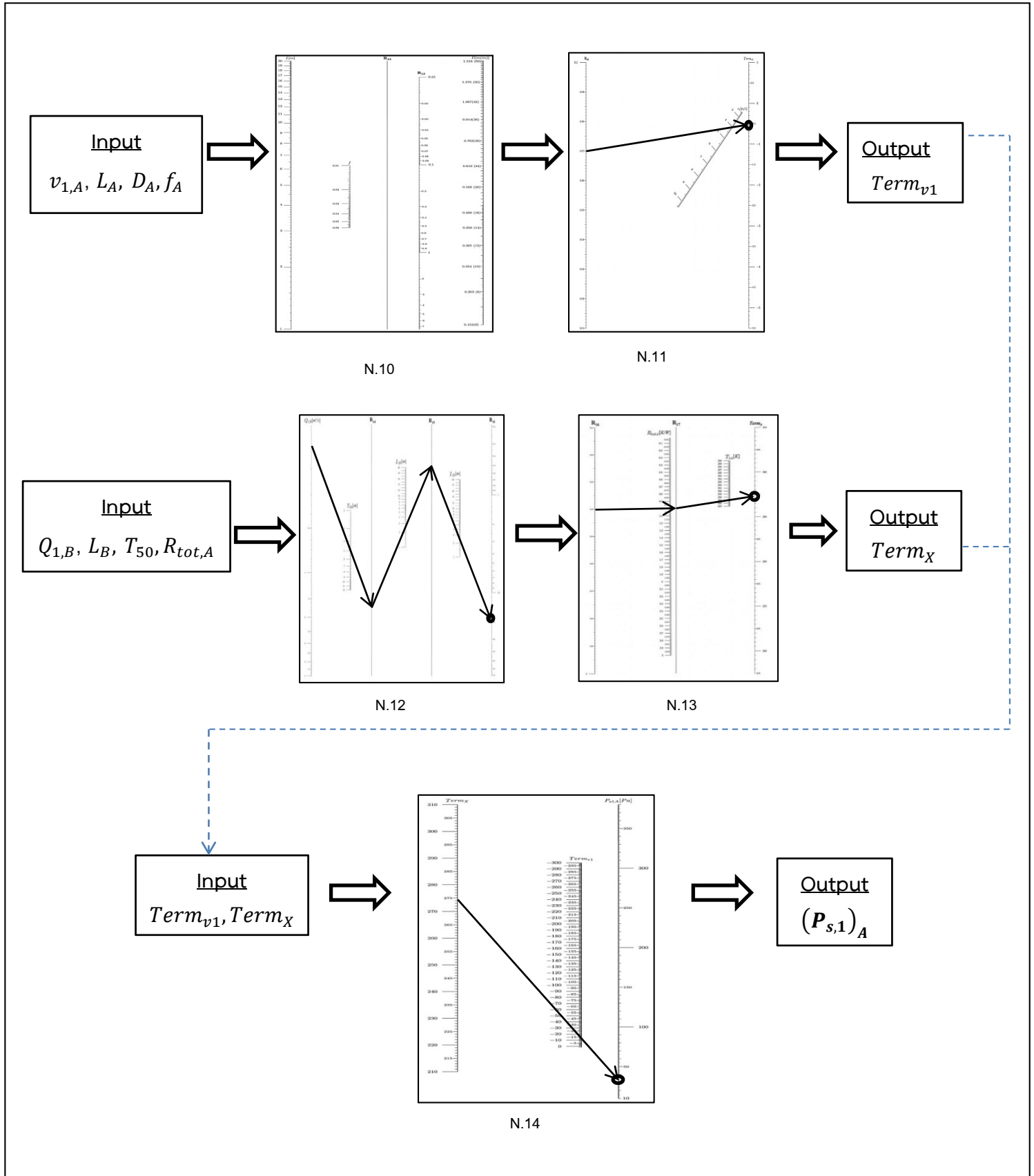
รูปที่ 14 แสดงรูปแบบการเดินท่อลมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อเปรียบเทียบ โดยตารางที่ 1 และ 2 แสดงความยาวของท่อลมแต่ละท่อนและอัตราการจ่ายลมในแต่ละจุด ส่วนตารางที่ 3 แสดงผลลัพธ์เปรียบเทียบความดันรวมที่ลดลงจากการออกแบบด้วยโนโมแกรมและวิธี Static Regain



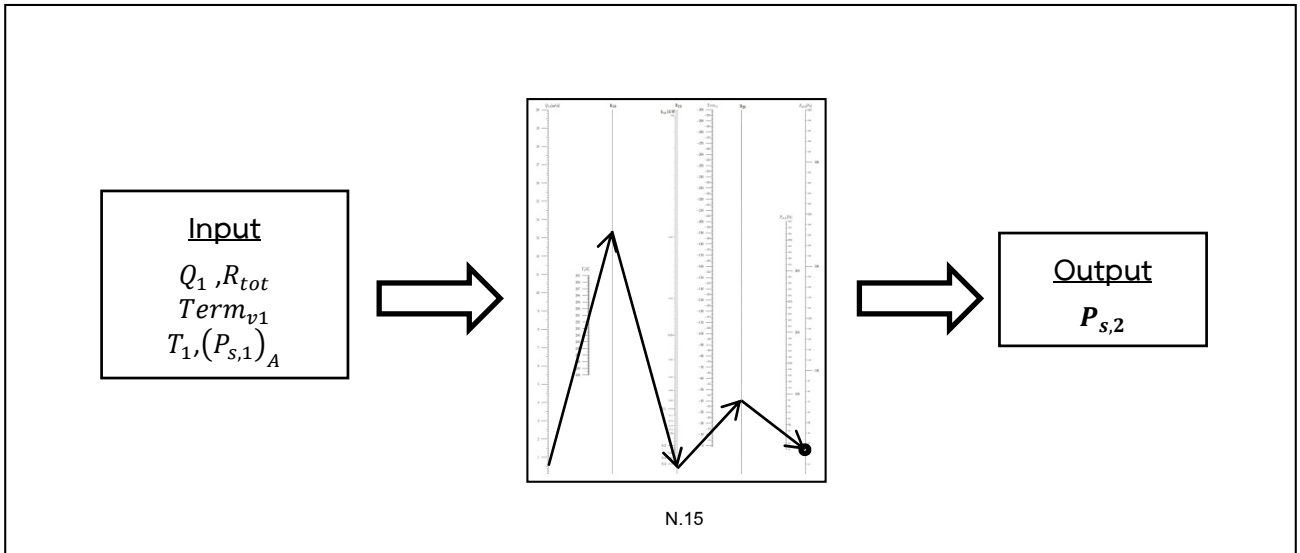
รูปที่ 14 แบบท่อลมที่ใช้ในการออกแบบเพื่อเปรียบเทียบ



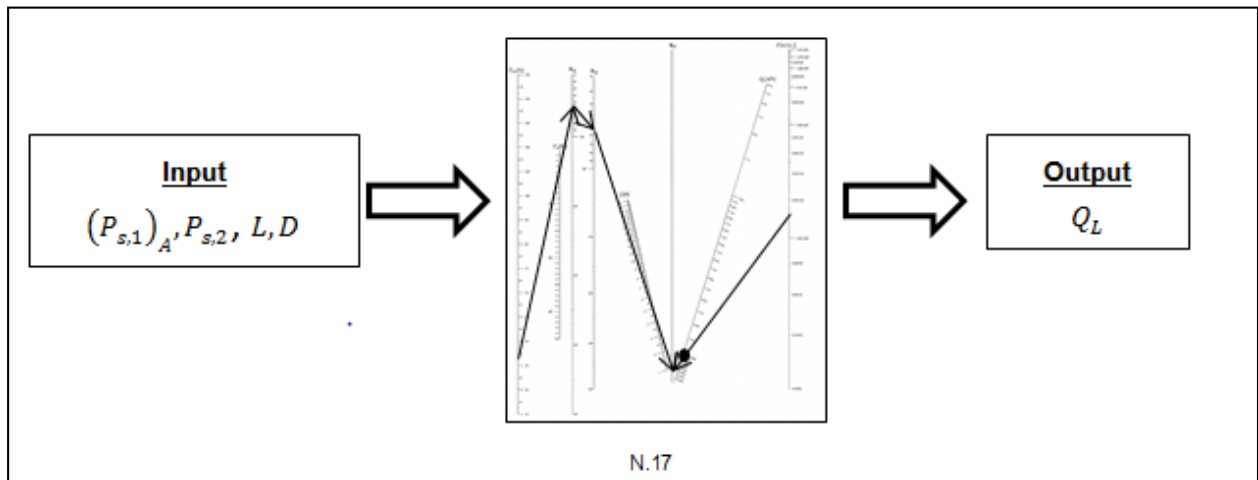
รูปที่ 6 แผนผังการใช้โปรแกรมเพื่อหาความต้านทานเชิงความร้อนรวม (R_{tot})



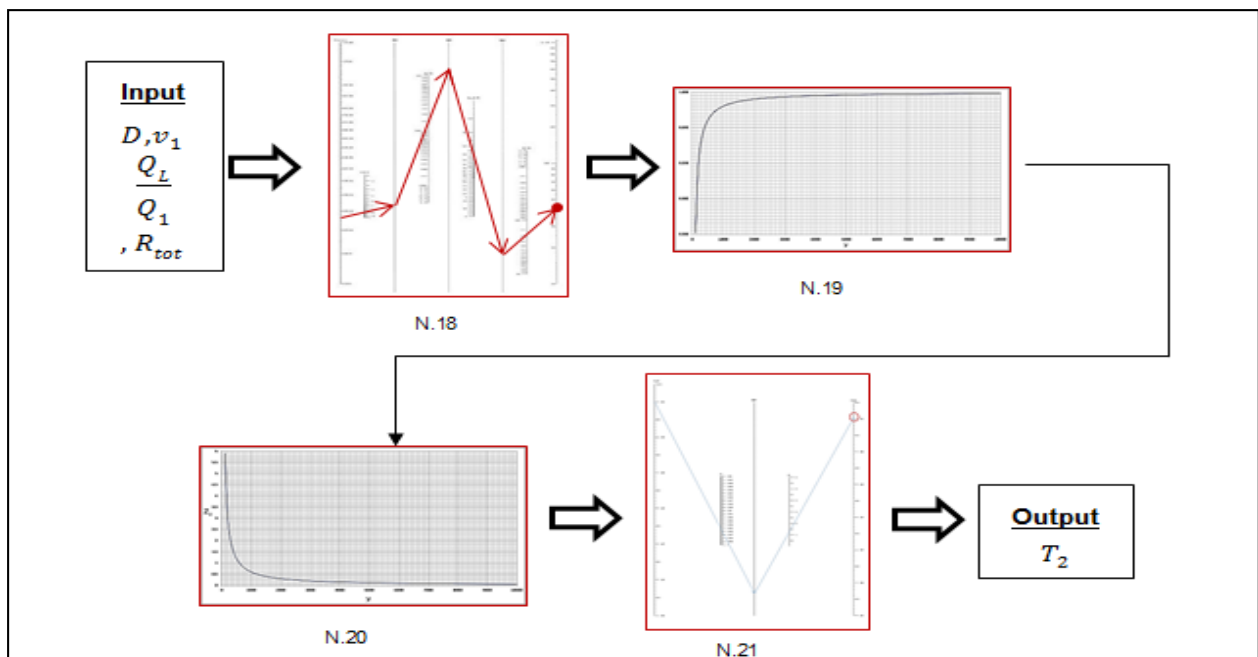
รูปที่ 7 แผนผังการใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาเข้าท่อลมท่อนแรก หรือ ความดันพัคลม $(P_{s,1})_A$



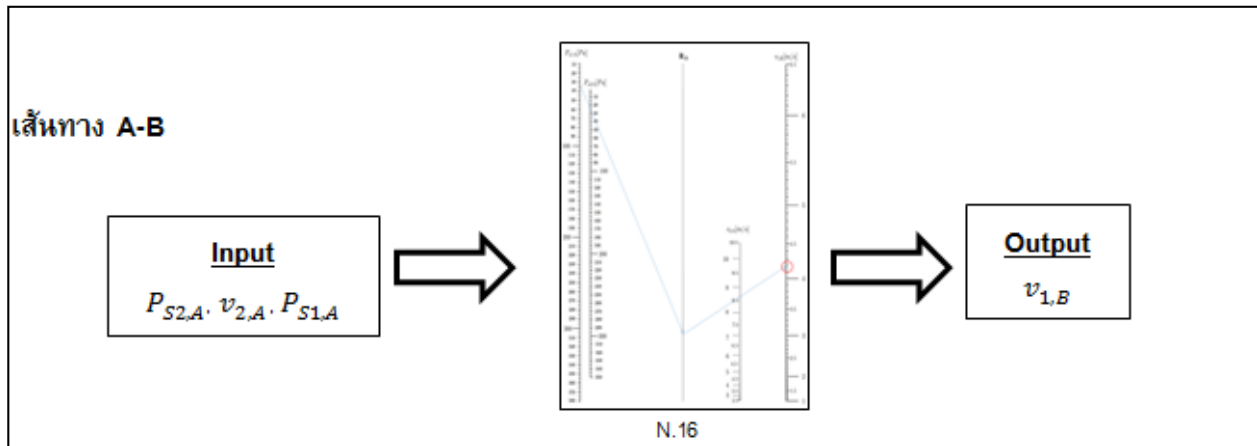
รูปที่ 8 แผนผังการใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออก ($P_{s,2}$)



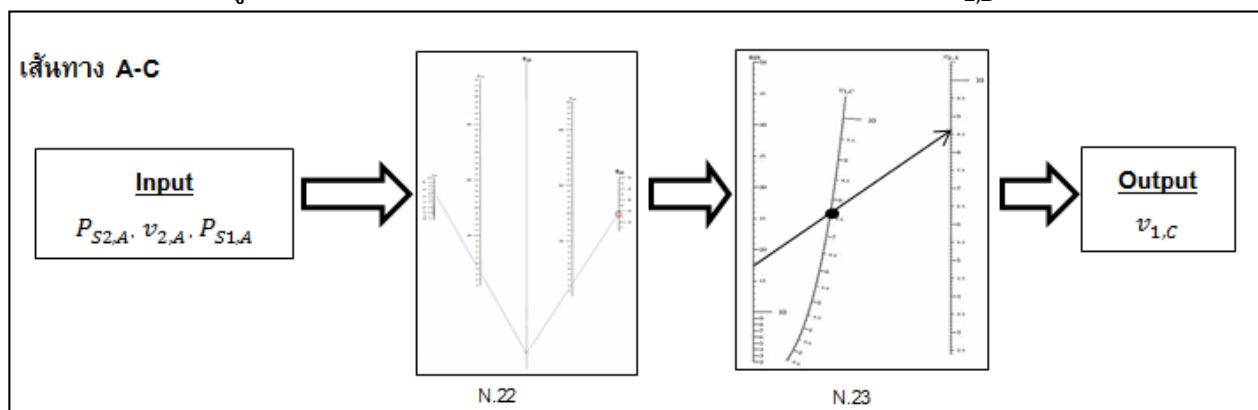
รูปที่ 9 แผนผังการใช้โนโมแกรมเพื่อหาอัตราการรั่วไหล (Q_L)



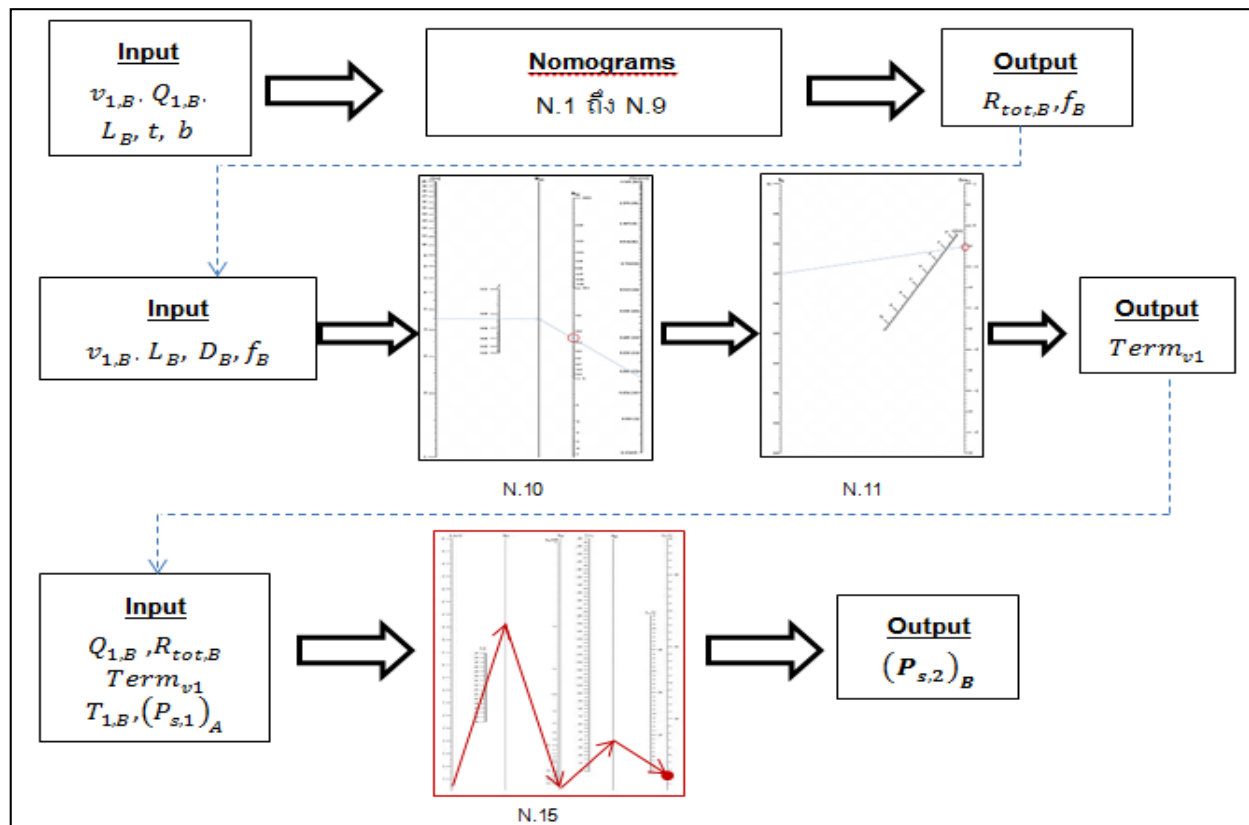
รูปที่ 10 แผนผังการใช้โนโมแกรมเพื่อหาอุณหภูมิขาออก (T_2)



รูปที่ 11 แผนผังการใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อสาขา ($v_{1,B}$)



รูปที่ 12 แผนผังการใช้โนโมแกรมเพื่อหาความเร็วขาเข้าท่อตรงท่อนัดไป ($v_{1,C}$)



รูปที่ 13 แผนผังการใช้โนโมแกรมเพื่อหาความดันสถิตขาออกท่อสาขา ($(P_{s,2})_B$)

ตารางที่ 1 ความยาวของท่อลมแต่ละส่วน

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

ตารางที่ 2 อัตราการไหลของหน้ากักจ่ายลมแต่ละจุด

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

5.1 เปรียบเทียบความดันรวมที่ลดลงในท่อลม

จากตารางที่ 3 พบว่าการออกแบบท่อลมด้วยโนโมแกรมจะมีความดันรวมที่ลดลงในท่อตรง (ท่อ A,C,E และ G) มากกว่าการออกแบบด้วยวิธี Static Regain ทั้งนี้เนื่องจากการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีการคำนึงถึงความดันพลศาสตร์ที่ลดลงเนื่องจากการรั่วไหล ทำให้ค่า Friction Factor ในท่อสูงกว่าค่า Friction Factor ที่ใช้ในการออกแบบด้วย Static Regain รวมทั้งยังคำนึงถึงความดันลดที่มาจากถ่ายเทความร้อนด้วย ผลจากปัจจัยทั้งสองนี้จึงทำให้ความดันรวมที่ลดลงมีค่ามากกว่าเมื่อเทียบกับวิธี Static Regain เมื่อมาพิจารณาที่ท่อแยกได้แก่ ท่อ B, D และ F กลับพบว่าความดันรวมที่ลดลงจากการออกแบบด้วยวิธี Static Regain จะมีค่ามากกว่าสาเหตุหลักมาจากการที่ความเร็วขาเข้าท่อแยกจากการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีค่าน้อยกว่าวิธี Static Regain โดยเฉลี่ยเท่ากับ 40% ทำให้ขนาดท่อที่ใช้มีขนาดมากกว่าแต่ส่งผ่านมวลอากาศที่เท่ากัน ส่งผลให้ความเสียดทานมีค่าน้อยลง ทำให้ความดันรวมที่ลดมีค่าน้อยลง

ตารางที่ 3 ความดันรวมที่ลดลงจากการออกแบบด้วยโนโมแกรม และ วิธี Static Regain

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

5.2 เปรียบเทียบความดันสถิตของพัดลม

จากการออกแบบพบว่าขนาดความดันสถิตของพัดลมที่ได้จากการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีขนาด 33 Pa ซึ่งมีขนาดมากกว่าขนาดพัดลมที่ได้จากวิธี Static Regain ซึ่งมีค่า 27 Pa ทั้งนี้เนื่องจากเหตุผล 2 ประการดังนี้

ก. ผลของความดันลดที่เกิดจากการรั่วไหลผ่านรอยต่อและรอยตะเข็บ ส่งผลให้ค่าความเสียดทานในท่อลมสูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าความเสียดทานในกรณีที่ไม่มีการรั่วไหล ถึงแม้ว่า จะมีการลดลงของความดันพลศาสตร์เนื่องจากการรั่วไหล มาช่วยให้ความดันสถิตขาออกในท่อลมเพิ่มขึ้น ทำให้ลดภาระของความดันสถิตขาเข้า แต่โดยรวมแล้ว ผลของความเสียดทานมีสูงกว่า จึงสรุปได้ว่าความเสียดทานในท่อลมยังเป็นตัวแปรหลักที่สำคัญต่อค่าความดันสถิตของพัดลม

ข. ความดันลดที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการสูญเสียความร้อนผ่านท่อลม ในขณะที่วิธี Static Regain ไม่ได้คำนึงถึงความดันลดส่วนนี้

5.3 เปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม

จากการเปรียบเทียบขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางพบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตรงที่ได้จากการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีขนาดใกล้เคียงกับ Static Regain ในขณะที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแยกที่ได้จากการออกแบบด้วยโนโมแกรม มีขนาดใหญ่กว่าเส้นผ่านศูนย์กลางที่ได้จากวิธี Static Regain ทั้งนี้เป็นเพราะทั้ง 2 วิธี จะเริ่มต้นการคำนวณโดยการกำหนดความเร็วขาเข้าเท่ากัน แต่เนื่องจากปริมาณการรั่วไหลที่ไม่มากทำให้ความเร็วที่ปลายทางต่างกันไม่มาก ส่งผลให้ความเร็ว

ขาเข้าของท่อลมที่อ่อนถัดไปใกล้เคียงกัน ขนาดของท่อลมในส่วนที่เป็นท่อหลักจึงมีขนาดต่างกันไม่มาก แต่ในส่วนของท่อแยก ขนาดของท่อที่แตกต่างกันเป็นผลโดยตรงจากความเร็วขาเข้าที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 5 โดยความเร็วขาเข้าท่อแยกที่คำนวณโดยโนโมแกรมจะน้อยกว่า ทำให้ต้องใช้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางท่อที่มากกว่า เมื่อคำนึงถึงมวลอากาศที่เท่ากัน

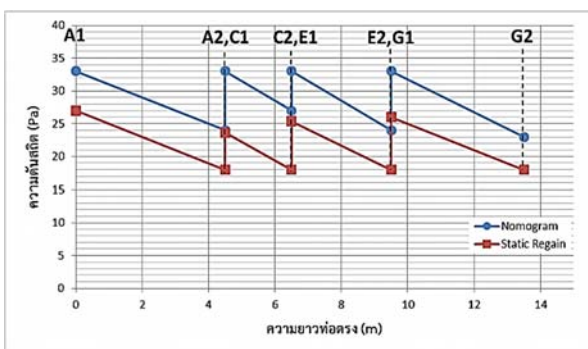
ตารางที่ 4 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อลม

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

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบความเร็วขาเข้าท่อแยก ได้แก่ท่อ B, D และ F

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

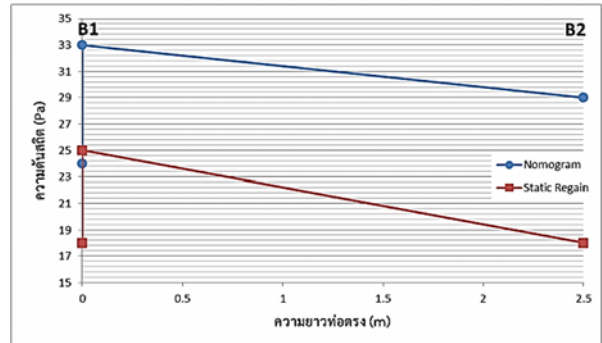
5.4 การกระจายของความดันสถิตของท่อตรง



รูปที่ 15 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาวของท่อตรง A,C,E,G (เลข 1 และ 2 ใช้แสดงตำแหน่งขาเข้าและขาออกของท่อตามลำดับ)

พบว่า การกระจายตัวของความดันสถิตภายในท่อตรงของการออกแบบจากทั้งสองวิธีมีลักษณะเหมือนกันดังแสดงในรูปที่ 15 โดยค่าความดันสถิตภายในท่อตรงที่ออกแบบด้วยโนโมแกรมจะมีค่าสูงกว่าวิธี Static Regain

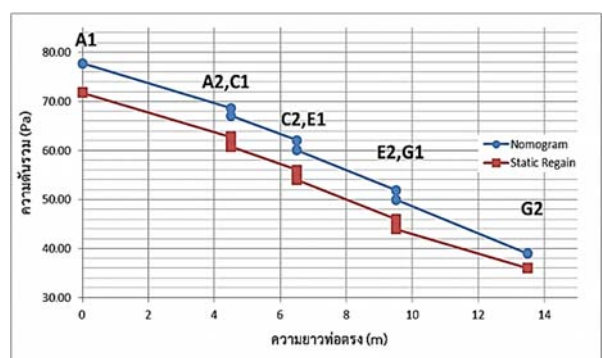
ซึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของแรงเสียดทานในท่อตรงที่มีค่ามากกว่าการเพิ่มขึ้นของความดันสถิตอันเป็นผลจากการรั่วไหลภายในท่อตรง จึงต้องใช้ความดันสถิตต้นทางที่มากกว่า



รูปที่ 16 การกระจายของความดันสถิตตามแนวความยาวของท่อ B (เลข 1 และ 2 ใช้แสดงตำแหน่งขาเข้าและขาออกของท่อตามลำดับ)

นอกจากนี้ยังพบว่าความดันสถิตที่ลดลงในท่อแยกจากวิธี Static Regain มีค่ามากกว่าผลจากการออกแบบด้วยโนโมแกรมดังแสดงในรูปที่ 16 เนื่องจากความเร็วขาเข้าที่สูงกว่าส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อที่ใช้ต่ำกว่า ทำให้ความเสียดทานสูง นอกจากนี้ จากการที่ความดันสถิตขาออกที่ได้จากวิธีการออกแบบด้วยโนโมแกรมมีค่ามากกว่าวิธี Static Regain ทำให้การกระจายลมในบริเวณปรับอากาศเป็นไปอย่างทั่วถึงมากยิ่งขึ้น

5.5 การกระจายตัวของความดันรวมภายในท่อตรง

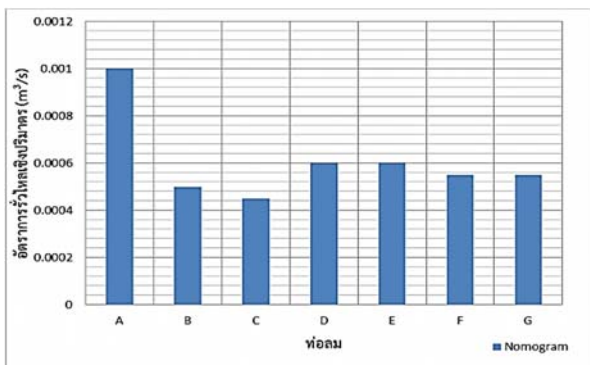


รูปที่ 17 การกระจายของความดันรวมตามแนวความยาวของท่อตรง A,C,E,G (เลข 1 และ 2 ใช้แสดงตำแหน่งขาเข้าและขาออกของท่อตามลำดับ)

พบว่าค่าความดันรวมภายในท่อตรงของทั้ง 2 วิธีลดลงตามความยาวของท่อที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 17 โดยความดันรวมที่ได้จากโนโมแกรมจะมีค่าสูงกว่าที่ได้จากวิธี Static Regain สำหรับท่อลมที่เป็นทางเข้า และ

หลังจากนั้นจะค่อย ๆ มีค่าลดลงด้วยอัตราที่สูงกว่าวิธี Static Regain ทั้งนี้เป็นผลมาจากการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อน นอกจากนี้ความยาวท่อที่มากขึ้น ทำให้ความดันรวมลดที่เกิดจากการรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนจะยิ่งมากขึ้น ทำให้ได้ข้อสรุปว่า สำหรับท่อที่มีความยาวมาก ๆ จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคำนึงถึงความดันรวมลดที่มาจาก การรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อน

5.6 เปรียบเทียบอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรในท่อลม



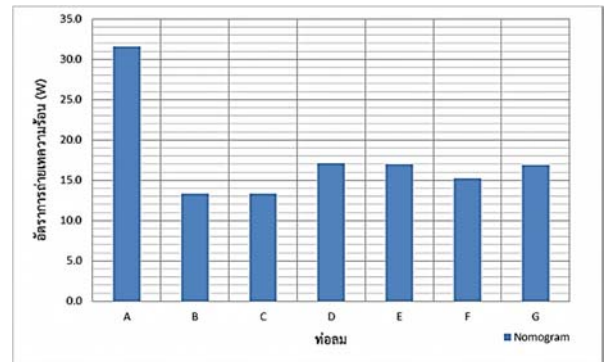
รูปที่ 18 อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรของท่อลม ตารางที่ 6 อัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวของท่อลมแต่ละท่อน

ท่อ	A	B	C	D	E	F	G
L[m]	4.5	25	20	3.0	3.0	2.5	4.0
$\Delta P/L$ [Pa/m]	2.0	1.6	3.0	1.0	3.0	0.8	2.5

จากรูป 18 จะเห็นว่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรจะมีค่าสูงที่ท่อตรงบริเวณต้นทางคือ ท่อ A มากกว่าท่อตรงท่อนอื่น ๆ ทั้งนี้เป็นผลมาจากค่าอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวของท่อ A มีค่าน้อยกว่าท่อตรงท่อนอื่น ๆ ทำให้ความดันสถิตในท่อตรง A ลดลงไม่มาก ประกอบกับท่อมีความยาวมาก ทำให้มีพื้นที่ผิวประสิทธิผลของการรั่วสูง จึงทำให้อัตราการรั่วไหลสูง ในขณะที่ ท่อตรง C มีค่าอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวสูงกว่า แต่มีความยาวท่อน้อย ทำให้มีพื้นที่ผิวประสิทธิผลของการรั่วน้อย ค่าอัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรจึงต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในส่วนของท่อ E และ G พบว่า ท่อ E กลับมีอัตราการรั่วเชิงปริมาตรที่สูงกว่าท่อ G ทั้ง ๆ ที่มีอัตราส่วนความดันลดต่อความยาวสูงกว่าและมีความยาวท่อน้อยกว่า ซึ่งอาจเป็นเพราะการไหลในท่อตรง G เป็นการไหลส่วนปลายสุดของท่อ

ออกสู่ภายนอกโดยตรง ไม่เกิดการได้คืนมาของความดันสถิตอีก ทำให้สภาพความต้านทานการไหลที่เกิดขึ้นน้อย อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรที่เกิดขึ้นในตัวท่อจึงน้อย ในส่วนของท่อแยก B, D, F พบว่าท่อแยก B มีค่าอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวสูง ทำให้ความดันสถิตในท่อลดลงส่งผลให้อัตราการรั่วไหลเชิงปริมาตรต่ำ เมื่อเทียบกับท่อแยก D และ F ในขณะที่ท่อแยก D มีค่าอัตราส่วนความดันสถิตลดในท่อต่อความยาวน้อยกว่าแต่มีความยาวท่อนมากกว่า ทำให้มีพื้นที่ผิวประสิทธิผลของการรั่วไหลสูง จึงมีอัตราการรั่วไหลสูงกว่าท่อแยกอื่น ๆ

5.7 เปรียบเทียบอัตราการถ่ายเทความร้อนในท่อลม



รูปที่ 19 อัตราการถ่ายเทความร้อนของท่อลม

จากรูปที่ 19 จะเห็นว่าอัตราการถ่ายเทความร้อนจะมีค่าสูงที่ท่อตรงบริเวณต้นทางคือ ท่อ A มากกว่าท่อตรงท่อนอื่น ๆ ทั้งนี้เป็นผลมาจากท่อ A มีพื้นที่ผิวมากกว่าท่ออื่น อีกทั้งเป็นท่อที่ลมมีความเร็วสูงกว่าท่อตรงท่อนอื่น ๆ ด้วย จึงเป็นปัจจัยเสริมให้มีการถ่ายเทความร้อนมากขึ้น ในขณะที่ท่อลมท่อนอื่น ๆ ถึงแม้บางท่อนจะมีค่าความเร็วในท่อที่สูงกว่า แต่จากการที่มีพื้นที่ผิวท่อต่างกันไม่มาก ทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนไม่ต่างกันมากและมีค่าน้อยกว่าท่อ A นอกจากนี้ยังมีข้อสังเกตว่า ถึงแม้ความเร็วลมภายในท่อจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อน แต่ขนาดของความเร็วนั้นถูกจำกัด เพราะต้องคำนึงถึงระดับความเข้มเสียง ความเร็วของลมจึงมีอิทธิพลไม่มากต่อการถ่ายเทความร้อน เมื่อเทียบกับอิทธิพลจากพื้นที่ผิว ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า พื้นที่ผิวท่อเป็นปัจจัยสำคัญในการส่งถ่ายความร้อนออกจากตัวท่อ โดยท่อลมที่ยาวและมีขนาดใหญ่มาก

จำเป็นจะต้องคำนึงถึงอัตราการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลถึงความดันลดยที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวมาข้างต้น

6. สรุปผล

จากการใช้โนโมแกรมที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อทำการ ออกแบบท่อลมโดยคำนึงถึงการรั่วไหลและการถ่ายเท ความร้อนที่เกิดขึ้น เทียบกับการใช้วิธี Static Regain พบว่า

1. การออกแบบท่อลมด้วยโนโมแกรมจะมีความดันรวมที่ลดลงในท่อตรงมากกว่าการออกแบบด้วยวิธี Static Regain ในขณะที่ท่อแยกกลับพบว่าความดันรวมที่ลดลง จากการออกแบบด้วยวิธี Static Regain จะมีค่ามากกว่า

2. ค่าความดันสถิตของพัดลมที่ใช้สำหรับระบบท่อ ลมที่ออกแบบโดยใช้โนโมแกรมจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ได้จาก การออกแบบโดยวิธี Static Regain

3. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อตรงหลักในระบบ ท่อลมที่ได้จากทั้ง 2 วิธี มีความแตกต่างกันไม่มาก ในขณะที่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อแยกจะมีขนาดแตกต่างกันอย่างชัดเจน โดยขนาดท่อลมที่ได้จากการใช้โนโมแกรมจะมีขนาดมากกว่า

4. การรั่วไหลและการถ่ายเทความร้อนในท่อลม มีผล ทำให้เกิดความเสียดทานมากขึ้น โดยผลกระทบจะเพิ่ม มากขึ้นตามความยาวของท่อตรงที่เพิ่มขึ้น

5. ท่อลมที่ได้จากการออกแบบโดยใช้โนโมแกรมจะมีการกระจายลมที่ดีกว่า อันเนื่องมาจากความดันสถิตใน ท่อแยกที่สูงกว่า ทำให้มีระยะส่งลมที่ไกลกว่า

7. เอกสารอ้างอิง

[1] ตฤยวัตร แสงวิเชียรภักจ และ เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์ (2561). การพัฒนาแบบจำลองของท่อลมที่คำนึงถึงการ รั่วและการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อและการ พัฒนาโนโมแกรมเพื่อหาค่าตอบของแบบจำลอง, การ ประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 32, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

[2] ตฤยวัตร แสงวิเชียรภักจ, การพัฒนาแบบจำลองของท่อ ลมที่คำนึงถึงการรั่วและการสูญเสียความร้อนของลม ภายในท่อ, วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต, วิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2559.

[3] SMACNA, HVAC Air Duct Leakage Test Manual in Conjunction with the HVAC Duct Construction Standards. 1985. pp. 1-8.

[4] M.P. Modera, et al., Sealing Ducts in Large Commercial Buildings with Aerosolized Sealant Particles, Energy and Buildings, 2002.

[5] ตฤยวัตร แสงวิเชียรภักจ และ เชิดพันธ์ วิฑูราภรณ์ (2556). การศึกษาแบบจำลองของท่อลมที่คำนึงถึงการรั่ว และการสูญเสียความร้อนของลมภายในท่อ, การประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 27, มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี

[6] ASHRAE, ASHRAE Fundamental Handbook. 2009.

[7] C. Aydin and B. Ozerdem, Air Leakage Measurement and Analysis in Duct Systems, Energy and Building 2006. 38: pp. 207-213

[8] R.L. Howell, W.J. Coad, and H.J. Sauer, Principles of Heating Ventilating and Air Conditioning. Atlanta, United States of America: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., 2009.

[9] ณัฐวุฒิ วลัยกนก, การระบายอากาศโดยวิธีธรรมชาติ, การคำนวณหาสัมประสิทธิ์ของอัตราการไหลในช่องเปิดที่ ซับซ้อน (การไหลแบบราบเรียบ).วิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิต, วิศวกรรมเครื่องกล, จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย, 2544.

[10] F. Carrie, et al., Duct leakage in European buildings: status and perspectives, Energy and Buildings, 2005. 32: pp. 235-243.

[11] E. H. Mathews, et al., Problems with Static Regain Method, Energy and Building 1999. : pp. 391 – 400.