

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องคอมพิวเตอร์ จำนวน 1 ชุด
2. ซอฟต์แวร์สำเร็จ MATLAB
3. ซอฟต์แวร์สำเร็จ Microsoft Office

วิธีการ

1. ออกแบบชุดส่งลมเย็นสำหรับห้องทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1.1 ตรวจสอบภาระความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นภายในห้องทดสอบ

1.2 คำนวณภาระความร้อนสูงสุดเพื่อใช้ในการออกแบบห้องทดสอบ

1.3 ออกแบบชุดส่งลมเย็นสำหรับห้องทดสอบ โดยออกแบบให้มีการนำน้ำเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็นที่นำมาทดสอบมาใช้ประโยชน์ในการลดอุณหภูมิให้กับอากาศที่ส่งให้กับห้องทดสอบและให้มีการนำอากาศภายนอกเข้ามาผสมกับอากาศย้อนกลับจากห้องทดสอบ

2. จำลองสถานะในการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 จำลองสถานะบริเวณคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า

2.1.1 จำลองที่สถานะอากาศภายนอกแตกต่างกันดังนี้

2.1.1.1 สถานะอากาศภายนอกร้อนที่สุด

2.1.1.2 สถานะอากาศภายนอกชื้นที่สุด

2.1.1.3 สถานะอากาศภายนอกเย็นที่สุด

2.1.1.4 สถานะอากาศภายนอกเย็นที่สุดและแห้ง

2.1.2 จำลองที่ปริมาณอากาศภายนอกแตกต่างกันดังนี้ คือ 0, 25, 50, 75 และ 100 % ของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ถูกส่งไปปรับภาระความร้อนจากห้องทดสอบ

2.1.3 จำลองสภาวะสำหรับการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นที่มีขนาดแตกต่างกัน 2 ขนาดดังนี้

2.1.3.1 กรณีที่อัตราการทำความเย็น 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง

2.1.3.2 กรณีที่อัตราการทำความเย็น 180,000 บีทียูต่อชั่วโมง

2.2 คำนวณอัตราการทำความเย็นสุทธิของอุปกรณ์ปรับอากาศหลักจากสภาวะอากาศที่ได้จากการจำลองคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าทีสภาวะแวดล้อมต่างๆ

3. วิเคราะห์ความต้องการของชุดส่งลมเย็นของห้องทดสอบเพื่อให้การทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นเป็นไปตามมาตรฐาน

4. วิเคราะห์การประหยัพลังงานเนื่องจากการนำอากาศภายนอกเข้ามาผสมกับอากาศย้อนกลับจากห้องทดสอบเพื่อช่วยลดภาระการทำความเย็นของเครื่องปรับอากาศหลัก

โดยในการออกแบบและการจำลองได้อ้างอิงมาตรฐานการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศของ ARI: Standard 550/590 (Performance Rating of Water-Chilling Packages using the Vapor Compression Cycle) และในการจำลองได้อ้างอิงสภาวะอากาศภายนอกของกรุงเทพมหานครจาก ASHRAE (2001)

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มีการนำน้ำเย็นที่ผลิตได้จากเครื่องทำน้ำเย็นที่นำมาทดสอบมาใช้ประโยชน์ด้วยการนำไปทำความเย็นให้กับอากาศผ่านทางคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า ก่อนที่อากาศดังกล่าวจะถูกส่งไปปรับภาระความร้อนจากห้องทดสอบ โดยในที่นี้น้ำเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็นไม่ได้ทำความเย็นให้กับอากาศโดยตรง น้ำเย็นจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่บริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนก่อนที่น้ำดังกล่าวจะถูกส่งไประบายความร้อนออกจากอากาศผ่านคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าอีกทอดหนึ่ง

เนื่องจากงานวิจัยนี้สนใจศึกษาสภาวะของอากาศก่อนเข้าอุปกรณ์ปรับอากาศหลักเมื่อสภาวะในการทดสอบเปลี่ยนแปลง ดังนั้นเพื่อความสะดวกในการจำลองจะสมมุติว่า

1. สภาวะด้านน้ำเย็น ซึ่งหมายถึงปริมาณการไหลของน้ำเย็นและอุณหภูมิเข้าออกเครื่องทำน้ำเย็นเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ
2. สภาวะอากาศบริเวณรอบๆ เครื่องทำน้ำเย็นเป็น 95FDB/75FWB ตลอดเวลา
3. ค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของอากาศมีค่าคงที่ตลอด
4. ค่าความร้อนจำเพาะและความหนาแน่นของน้ำมีค่าคงที่ตลอด
5. ไม่เกิดการสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อม

การออกแบบชุดส่งลมเย็นสำหรับห้องทดสอบเครื่องทำน้ำเย็น

แบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

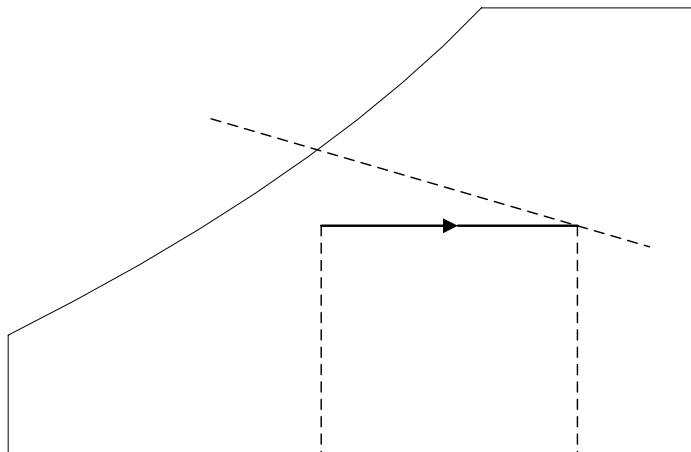
การทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศตามมาตรฐานการทดสอบของ ARI: Standard 550/590 นั้น ได้แบ่งสภาพความต้องการในการทดสอบเป็นสองส่วนหลักดังนี้ ส่วนแรก สภาพอากาศบริเวณเครื่องทำน้ำเย็นต้องมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งเท่ากับ 95 องศาฟาเรนไฮต์ ส่วนที่สอง น้ำเย็นที่ออกจากเครื่องทำน้ำเย็นต้องมีอุณหภูมิ 44 องศาฟาเรนไฮต์และมีอัตราการไหล 2.4 gpm/ton ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้เครื่องทำน้ำเย็นทำการทดสอบภายในห้องควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งจำเป็นต้องคำนวณภาระความร้อนสูงสุดที่อาจเกิดขึ้นภายในห้องทดสอบ เพื่อที่จะสามารถเลือกใช้อุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสมและทำให้การทดสอบเป็นไปตามมาตรฐาน

การตรวจสอบและคำนวณภาระความร้อนสำหรับห้องทดสอบ

การออกแบบชุดส่งลมเย็นสำหรับห้องทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นที่มีขนาดการทำความเย็นไม่เกิน 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง จะเริ่มต้นจากการตรวจสอบภาระความร้อนทั้งหมดที่อาจเกิดขึ้นภายในห้องทดสอบ ซึ่งภาระความร้อนที่เกิดขึ้นภายในห้องทดสอบในการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่มีขนาดการทำความเย็น 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง มีรายละเอียดดังนี้

1. ภาระความร้อนเนื่องจากความร้อนระบายจากเครื่องควบแน่นของเครื่องทำน้ำเย็นเท่ากับ 92.800 กิโลวัตต์
2. ภาระความร้อนเนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อนเครื่องอัดไอเท่ากับ 4.572 กิโลวัตต์
3. ภาระความร้อนเนื่องจากมอเตอร์ขับเคลื่อนพัดลมระบายความร้อนของเครื่องควบแน่นเท่ากับ 4.912 กิโลวัตต์
4. ภาระความร้อนเนื่องจากหลอดไฟฟ้าเท่ากับ 0.299 กิโลวัตต์

ดังนั้น ภาระความร้อนรวมที่ใช้ในการออกแบบห้องทดสอบเท่ากับ 102.583 กิโลวัตต์ หรือ 350027 บีทียูต่อชั่วโมง ซึ่งภาระความร้อนทั้งหมดที่เกิดขึ้นในห้องทดสอบจะมีเฉพาะภาระความร้อนสัมผัสเท่านั้น สามารถแทนกระบวนการปรับอากาศสำหรับห้องทดสอบด้วยเส้นแนวนอน a-b บนแผนภาพไซโครเมตริกได้ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 กระบวนการปรับอากาศสำหรับห้องทดสอบ

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ห้องทดสอบมีสภาวะอากาศเป็น 95FDB/75FWB ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศของ ARI: Standard 550/590 และอุณหภูมิลมส่ง (Supply air) แตกต่างจากอุณหภูมิห้อง 20 องศาฟาเรนไฮต์ หรือมีอุณหภูมิเป็น 75 องศาฟาเรนไฮต์

การออกแบบได้อ้างอิงข้อมูลเครื่องทำน้ำเย็นสำหรับการคำนวณภาระความร้อนจากบริษัท CARRIER รุ่น 30GTN020 ข้อมูลผลิตภัณฑ์และรายละเอียดการคำนวณภาระความร้อนสำหรับห้องทดสอบแสดงในภาคผนวก ก และ ค ตามลำดับ

ปริมาณอากาศส่งให้กับบริเวณปรับอากาศ

อาจแบ่งภาระทำความเย็นของห้องปรับอากาศออกได้เป็นสองประเภทคือ ภาระเนื่องจากความร้อนสัมผัส (Sensible heat load) และภาระเนื่องจากความร้อนแฝง (Latent heat load) ภาระเนื่องจากความร้อนสัมผัสจะทำให้อุณหภูมิอากาศภายในห้องสูงขึ้น ส่วนภาระเนื่องจากความร้อนแฝงจะทำให้ความชื้นของอากาศภายในห้องสูงขึ้น เรียกผลรวมของภาระทั้งสองนี้ว่า ภาระการทำความเย็นของห้องปรับอากาศ

อากาศที่ส่งเข้าห้องปรับอากาศจะต้องมีความสามารถที่จะรับภาระความร้อนรวมของห้องได้หรือมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งหรือมีความชื้นต่ำพอ ซึ่งเมื่อเข้าไปรับความร้อนและความชื้นภายในห้องปรับอากาศแล้ว จะมีอุณหภูมิกระเปาะแห้งและปริมาณความชื้นเท่ากับภาวะอากาศภายในห้องตามที่ได้ออกแบบไว้ นอกจากอากาศส่งเข้าห้องจะต้องมีสภาวะเหมาะสมแล้ว ยังต้องมีปริมาณพอดีด้วยคือไม่มากเกินไปจนกระทั่งความเร็วลมในห้องปรับอากาศสูงเกินไปจนเกิดความสบาย หรือน้อยจนเกิดการอัดลมขึ้นในห้องปรับอากาศ เราสามารถคำนวณปริมาณลมส่งให้กับห้องปรับอากาศได้จากสมการความร้อนสัมผัสดังนี้ (Sun, 1994)

$$q_s = 1.1 \times cfm \times \Delta T \quad (60)$$

ดังนั้นปริมาตรอากาศที่ส่งเข้าสู่บริเวณปรับอากาศเท่ากับ

$$cfm = \frac{q_s}{1.1 \times \Delta T} \quad (61)$$

เมื่อ q_s = ภาระความร้อนสัมผัส
 cfm = ปริมาณอากาศส่งให้กับบริเวณปรับอากาศ
 ΔT = อุณหภูมิแตกต่างระหว่างอุณหภูมิห้องกับลมส่ง

โดยปริมาณอากาศที่ส่งเข้าห้องปรับอากาศนั้นจะเป็นปริมาณอากาศที่จะรับความร้อนทั้งหมดทั้งความร้อนสัมผัสและความร้อนแฝงไปทั้งยังเครื่องปรับอากาศ โดยปกติอุณหภูมิอากาศส่งเข้าห้องจะต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายในห้องประมาณ 15 ถึง 30 องศาฟาเรนไฮต์ หรือประมาณต่ำกว่าไม่เกิน 2 องศาฟาเรนไฮต์ ต่อความสูงห้องหนึ่งฟุต (สุรพล, 2529)

เมื่อภาระความร้อนสูงสุดที่ใช้ในการออกแบบห้องทดสอบสำหรับการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นที่มีขนาดไม่เกิน 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง เท่ากับ 102.583 กิโลวัตต์ หรือ 350027 บีทียูต่อชั่วโมง และเมื่อออกแบบให้อุณหภูมิลมส่งต่ำกว่าอุณหภูมิภายในห้อง 20 องศาฟาเรนไฮต์ ปริมาตรลมส่งสูงสุดจะเท่ากับ

$$\begin{aligned} cfm &= \frac{350027}{1.1 \times 20} \\ &= 16000 \text{ cfm} \end{aligned}$$

ดังนั้นควรเลือกเครื่องส่งลมที่มีขนาด 16,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที

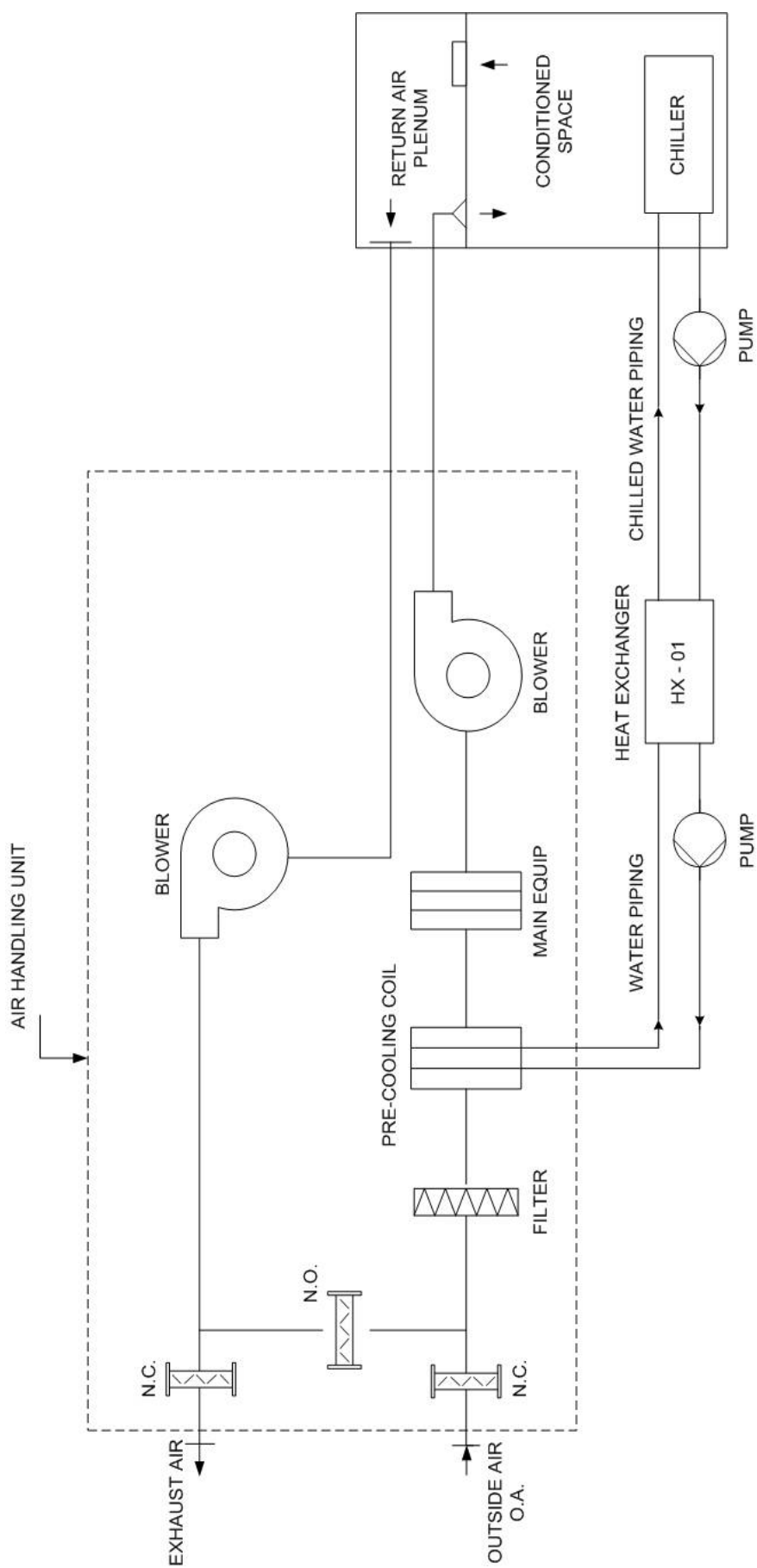
ระบบส่งลมเย็นที่ออกแบบเป็นระบบลมจ่ายแปรเปลี่ยน (Variable air volume, VAV) คือ หากภาระความร้อนภายในห้องมีค่าเปลี่ยนแปลง ปริมาตรลมที่ถูกส่งเข้าห้องจะเปลี่ยนแปลงให้เหมาะสมกับปริมาณภาระความร้อนที่เกิดขึ้น โดยที่อุณหภูมิลมที่ส่งเข้าห้องจะคงที่ แม้ระบบลมจ่ายแปรเปลี่ยนจะมีค่าใช้จ่ายเริ่มต้นสูงแต่ก็เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากกว่าระบบลมจ่ายคงที่ (CAV) และลดการสูญเสียพลังงาน (Ameen, 2005)

ชุดส่งลมเย็นสำหรับห้องทดสอบ

การออกแบบชุดส่งลมเย็นสำหรับห้องทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่ควบคุมสภาวะอากาศภายในห้องไว้ที่ 95FDB/75FWB ได้ออกแบบให้มีการนำอากาศภายนอกที่มีสภาวะเหมาะสมเข้ามารับภาระความร้อนจากห้องทดสอบ รวมทั้งมีการนำน้ำเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็นที่นำมาทดสอบไปทำความเย็นให้กับอากาศที่คอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าของชุดส่งลมเย็น (Air handling unit, AHU) เพื่อไม่ให้ความเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็นสูญเสียไป โดยชุดส่งลมเย็นของห้องทดสอบจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักที่มีรายละเอียดดังนี้

1. คอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า (Pre-cooling coil) เป็นคอยล์แบบ Continuous plate-fin-tube อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง โดยมีพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนด้านอากาศประมาณ 143 ตารางเมตร และมีพื้นที่ผิวถ่ายเทความร้อนด้านน้ำประมาณ 11.3 ตารางเมตร ซึ่งรายละเอียดการคำนวณขนาดคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าแสดงในภาคผนวก ข
2. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HX-01 เป็นแบบเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger) ชนิด One-shell pass อัตราการถ่ายเทความร้อนสูงสุด 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง มีพื้นที่ผิวแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำเย็นกับน้ำประมาณ 6 ตารางเมตร ซึ่งรายละเอียดการคำนวณพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HX-01 แสดงในภาคผนวก ข
3. เครื่องส่งลม (Blower) ชนิดปริมาตรเปลี่ยนแปลงที่มีปริมาตรลมส่งสูงสุด 16,000 ลูกบาศก์ฟุตต่อนาที จำนวน 2 ตัว โดยใช้อินเวอร์เตอร์เป็นตัวปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เพื่อปรับปริมาณลมส่งให้เหมาะสมกับภาระความร้อนภายในห้องทดสอบ
4. อุปกรณ์ปรับอากาศหลัก เป็นอุปกรณ์ที่ปรับให้สภาวะอากาศในการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานและสามารถทำการทดสอบได้ในทุกๆ สภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ออกแบบให้อุณหภูมิอากาศหลังผ่านอุปกรณ์ปรับอากาศหลักเท่ากับ 75FDB และมีอัตราส่วนความชื้นเท่ากับภายในห้องทดสอบ

นอกจากอุปกรณ์หลักที่ได้กล่าวมาแล้ว ชุดส่งลมเย็นยังประกอบด้วยอุปกรณ์อื่นๆ เช่น แผ่นกรองอากาศ (Filter) บานปรับลม (Damper) กล่องผสมอากาศ (Plenum) มอเตอร์ของเครื่องส่งลมและอุปกรณ์ควบคุมต่างๆ โดยตัวอย่างชุดส่งลมเย็นของห้องทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศแสดงได้ดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 ชุดส่งเย็นของห้องทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศ

ชุดส่งลมเย็นโดยทั่วไปจะใช้หลักการนำอากาศย้อนกลับจากบริเวณปรับอากาศ (Return air, R.A.) และอากาศภายนอก (Outside air, O.A.) มาผสมกันก่อนที่จะลดหรือเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศผสมดังกล่าวโดยคอยล์ทำความเย็น (Cooling coil) หรือคอยล์ทำความร้อน (Heating coil) แล้วส่งเข้าสู่บริเวณปรับอากาศต่อไป สามารถหาอุณหภูมิอากาศผสมระหว่างอากาศภายนอกกับอากาศย้อนกลับจากห้องปรับอากาศได้ดังนี้ (อักรเดช, 2543)

$$t_M = \frac{cfm_1 t_1 + cfm_2 t_2}{cfm_1 + cfm_2} \quad (62)$$

เมื่อ	t_M	=	อุณหภูมิอากาศผสม
	t_1	=	อุณหภูมิอากาศย้อนกลับจากห้องปรับอากาศที่เข้ามาผสม
	t_2	=	อุณหภูมิอากาศภายนอกที่เข้ามาผสม
	cfm_1	=	ปริมาณอากาศย้อนกลับจากห้องปรับอากาศที่เข้ามาผสม
	cfm_2	=	ปริมาณอากาศภายนอกที่เข้ามาผสม

หลังจากได้อากาศผสมที่สถานะหนึ่ง อากาศดังกล่าวจะไหลผ่านคอยล์ทำความเย็นเพื่อลดอุณหภูมิอากาศลง โดยการทำความเย็นที่ไม่มีการควบแน่นของไอน้ำในอากาศจะมีแต่อุณหภูมิที่ลดลงเท่านั้น เรียกว่า การทำความเย็นสัมผัส (Sensible cooling) ส่วนการทำความเย็นที่มีการลดความชื้นด้วยจะเรียกว่าการทำความเย็นและลดชื้น (Cooling and dehumidifying)

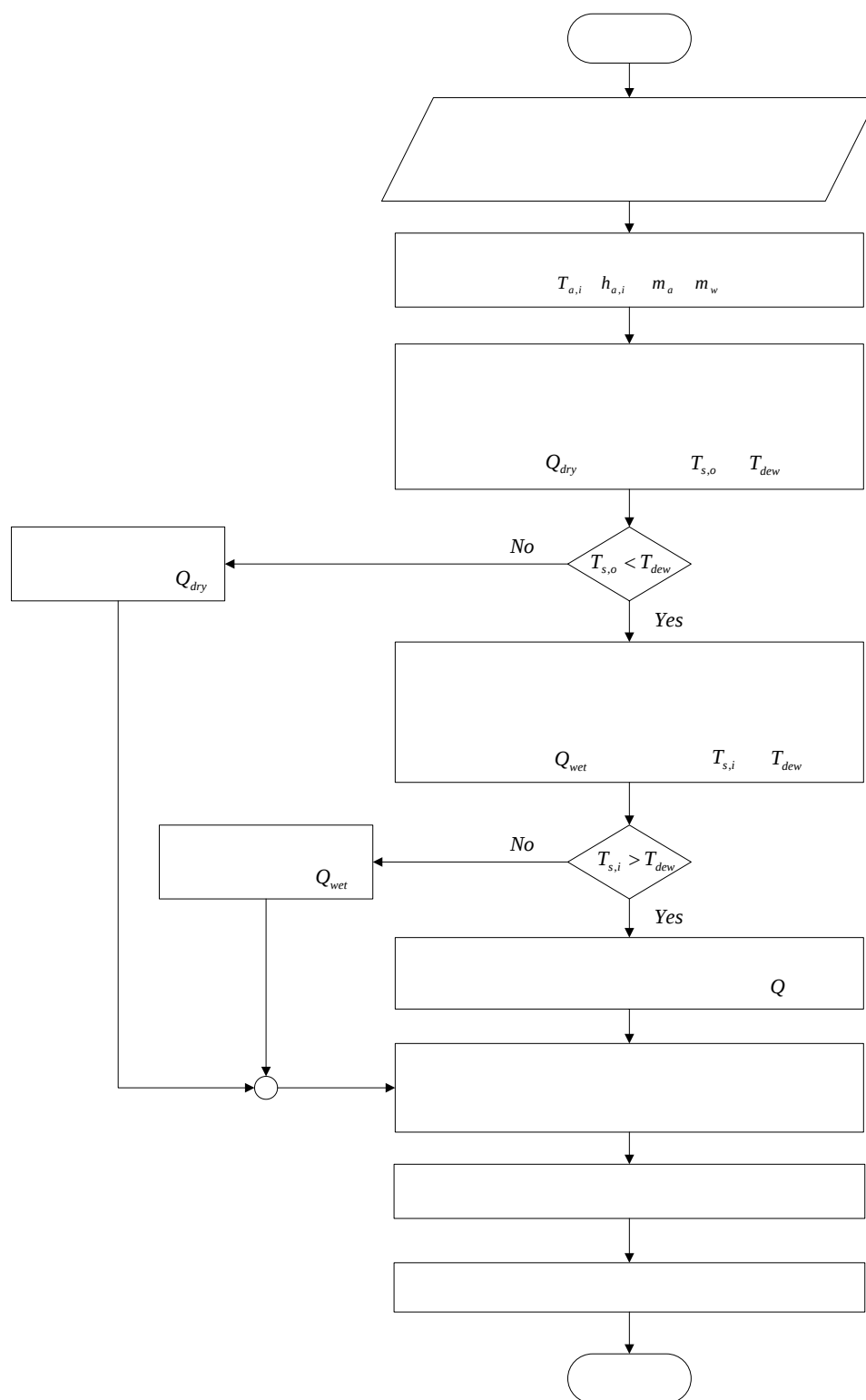
ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้มีการนำน้ำเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็นที่ทดสอบมาทำความเย็นให้กับอากาศผ่านทางคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า โดยน้ำเย็นจะแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่บริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HX-01 ก่อนที่น้ำดังกล่าวจะไปทำความเย็นให้กับอากาศอีกทอดหนึ่ง

การจำลองสถานะในการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็น

เนื่องจากได้ออกแบบให้มีการนำอากาศภายนอกเข้ามาผสมกับอากาศย้อนกลับจากห้องทดสอบและมีการนำน้ำเย็นมาทำความเย็นให้กับอากาศ เพื่อช่วยลดภาระการทำความเย็นของอุปกรณ์ปรับอากาศหลัก ดังนั้นปริมาณการทำความเย็นของอุปกรณ์ปรับอากาศหลักจึงขึ้นอยู่กับตัวแปรดังนี้คือ ภาระความร้อนภายในห้องทดสอบ สถานะและปริมาณของอากาศภายนอกที่นำเข้ามาในระบบ และปริมาณการทำความเย็นให้กับอากาศที่คอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า

เพื่อให้สะดวกต่อการวิเคราะห์ปริมาณการทำความเย็นของอุปกรณ์ปรับอากาศหลักเมื่อตัวแปรต่างๆ ที่กล่าวมาเปลี่ยนแปลง จึงได้จำลองการทดสอบที่สถานการณ์ต่างๆ เพื่อให้ทราบถึงปริมาณการทำความเย็นของอุปกรณ์ปรับอากาศหลักและสามารถเลือกขนาดของอุปกรณ์ปรับอากาศหลักได้อย่างเหมาะสม

การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองสภาวะในการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นที่สถานการณ์ต่างๆ ในการเขียนโปรแกรมจะใช้วิธีการของนิวตัน-ราฟสัน ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้เป็นเทคนิคการประมาณกราฟของฟังก์ชันที่พิจารณาด้วยเส้นสัมผัสกราฟของฟังก์ชันนั้น และเป็นวิธีที่จะต้องใช้อย่างระมัดระวัง เพราะถ้าสมมติค่าตัวแปรใดๆ ที่ห่างไกลจากผลลัพธ์ที่ถูกต้องมากๆ การคำนวณจะไม่ลู่เข้าหาคำตอบและบางครั้งการพิจารณาลักษณะของฟังก์ชันที่ทำการแก้ปัญหานั้นจะสามารถช่วยแก้ปัญหาได้มาก (Stoecker, 1989) โดยขั้นตอนการจำลองสภาวะในการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นเพื่อหาปริมาณการทำความเย็นของอุปกรณ์ปรับอากาศหลักแสดงได้ด้วยภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ขั้นตอนการจำลองสถานะในการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นเพื่อหาปริมาณการทำความเย็นของอุปกรณ์ปรับอากาศหลัก

วิธีของนิวตัน-ราฟสันสำหรับหลายสมการและตัวไม่รู้ค่าหลายตัว

สมมติให้สมการเป็นสมการที่ไม่ใช่สมการเชิงเส้น 3 สมการ จะต้องทำการแก้ปัญหาคู่แปรไม่ทราบค่า 3 ตัว คือ x_1, x_2, x_3

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2, x_3) &= 0 \\ f_2(x_1, x_2, x_3) &= 0 \\ f_3(x_1, x_2, x_3) &= 0 \end{aligned} \quad (63)$$

ข้อปฏิบัติสำหรับการแก้ปัญหของสมการ คือการทดลองแทนค่าใดๆ ซึ่งมีขั้นตอนตามลำดับดังนี้ (Stoecker, 1989)

1. เขียนสมการใหม่เพื่อให้เทอมทั้งหมดอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของเครื่องหมายเท่ากับ
2. สมมติค่าใดๆ ขึ้นมาสำหรับตัวแปรดังเช่น x_{1t}, x_{2t} และ x_{3t}
3. คำนวณค่าของ f_1, f_2 และ f_3 ที่ค่าใดๆ ที่สมมติขึ้นของ x_1, x_2 และ x_3
4. คำนวณอนุพันธ์ย่อยของฟังก์ชันทั้งหมดเทียบกับตัวแปรทั้งหมด
5. ใช้การกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์เพื่อสร้างกลุ่มของสมการเชิงเส้น สามารถเขียนการกระจายของอนุกรมเทย์เลอร์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} f_1(x_{1t}, x_{2t}, x_{3t}) &= f_1(x_{1c}, x_{2c}, x_{3c}) + \frac{\partial f_1(x_{1t}, x_{2t}, x_{3t})}{\partial x_1} (x_{1t} - x_{1c}) \\ &\quad + \frac{\partial f_1(x_{1t}, x_{2t}, x_{3t})}{\partial x_2} (x_{2t} - x_{2c}) + \frac{\partial f_1(x_{1t}, x_{2t}, x_{3t})}{\partial x_3} (x_{3t} - x_{3c}) \end{aligned}$$

กลุ่มของสมการเหล่านี้คือ

$$\begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x_1 & \partial f_1 / \partial x_2 & \partial f_1 / \partial x_3 \\ \partial f_2 / \partial x_1 & \partial f_2 / \partial x_2 & \partial f_2 / \partial x_3 \\ \partial f_3 / \partial x_1 & \partial f_3 / \partial x_2 & \partial f_3 / \partial x_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1t} - x_{1c} \\ x_{2t} - x_{2c} \\ x_{3t} - x_{3c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (64)$$

6. แก้ปัญหาของกลุ่มสมการเชิงเส้นเพื่อหาคำตอบ เพื่อหาค่าของ $x_{1t} - x_{1c}$, $x_{2t} - x_{2c}$ และ $x_{3t} - x_{3c}$

7. หาค่าที่ถูกต้องการ

$$x_{1,new} = x_{1,old} - (x_{1t} - x_{1c})$$

$$x_{2,new} = x_{2,old} - (x_{2t} - x_{2c})$$

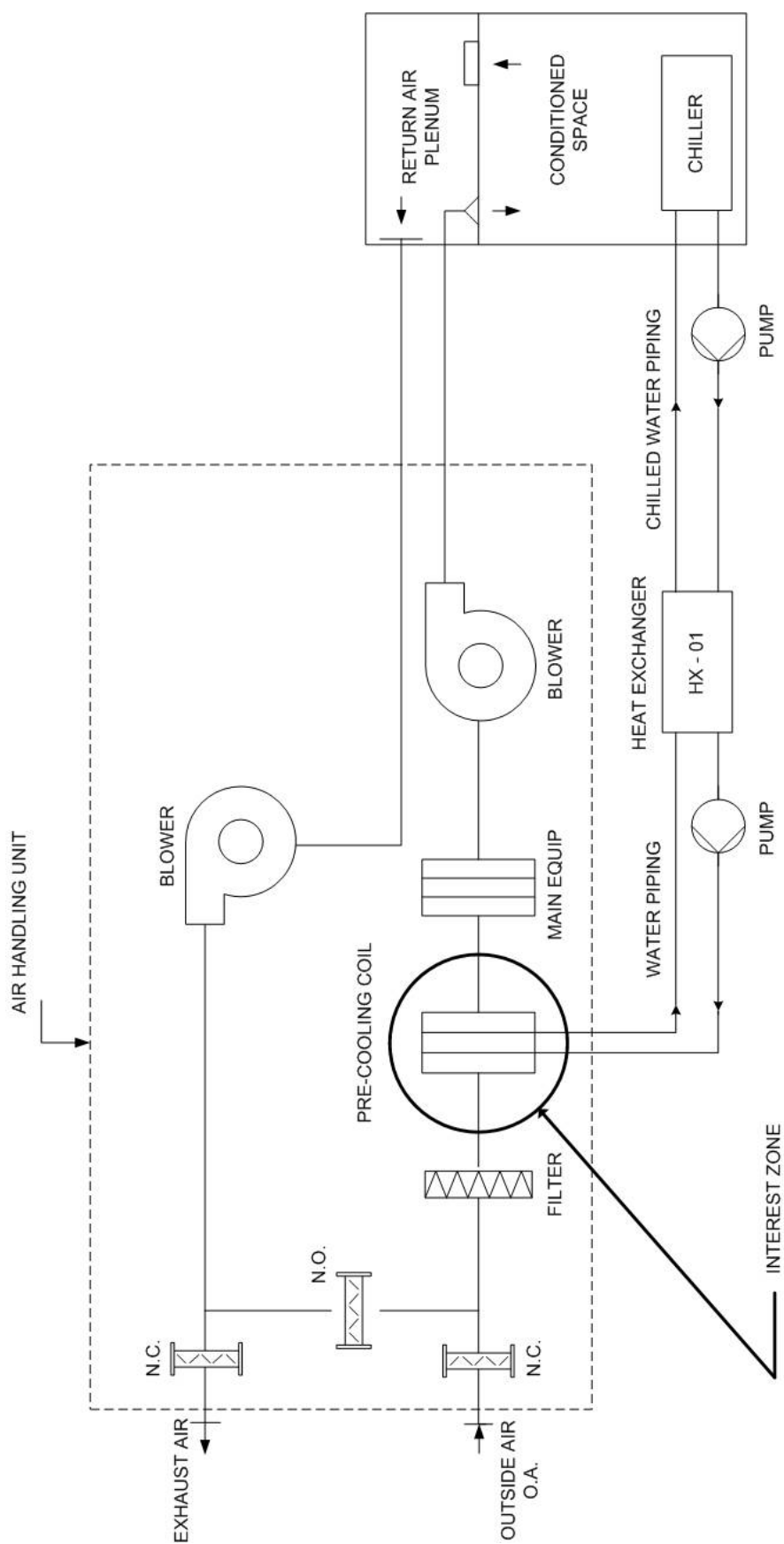
$$x_{3,new} = x_{3,old} - (x_{3t} - x_{3c})$$

8. ทดสอบการเข้าสู่ของคำตอบ ถ้าค่าสมมูลของฟังก์ชันทั้งหมดหรือค่า Δx ทั้งหมดมีค่าน้อยเพียงพอแล้วจะทำการหยุดคำนวณ หรืออีกประการหนึ่ง ถ้าหากยังไม่เพียงพอก็จะให้ย้อนกลับไปสู่ขั้นตอนที่ 3 เพื่อทำการคำนวณใหม่

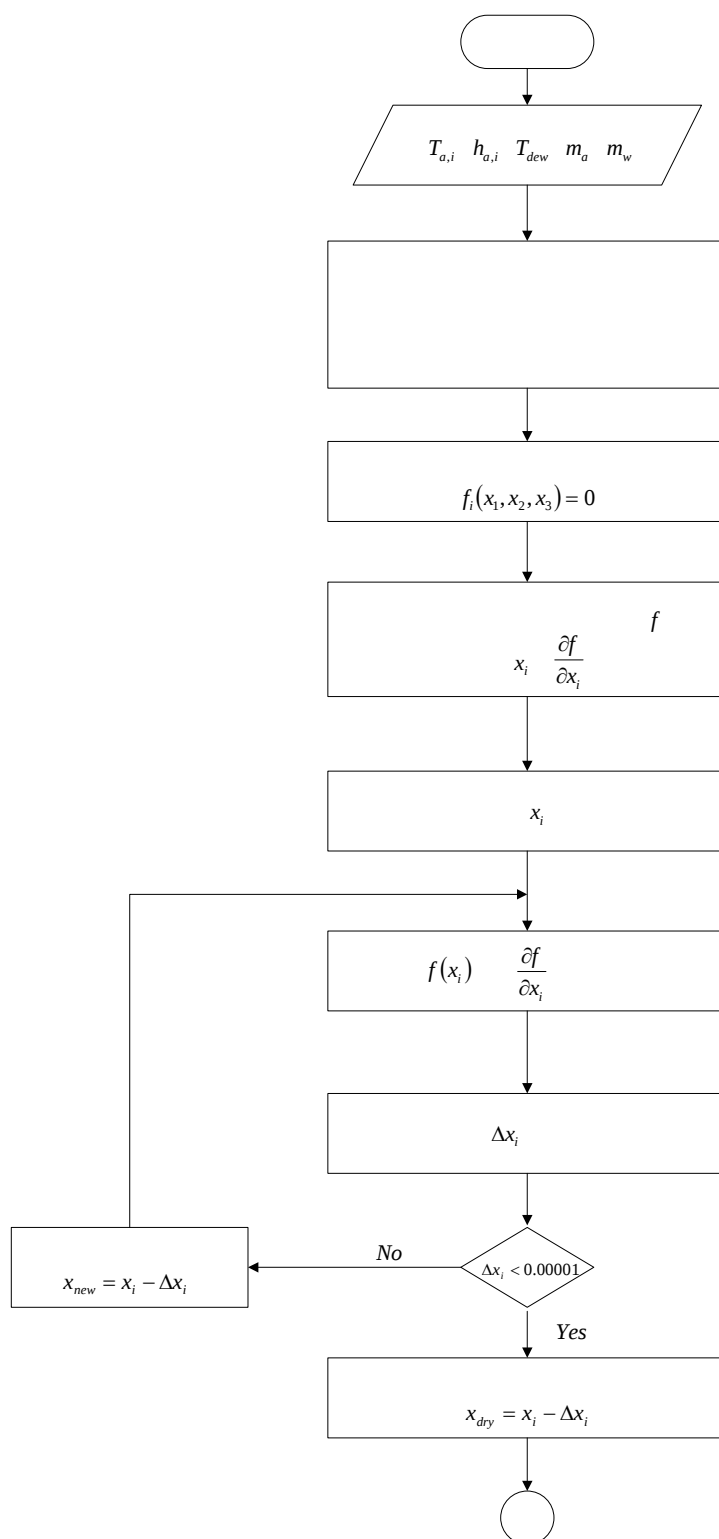
โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ซอฟต์แวร์สำเร็จ MATLAB ในการจำลองสถานะในการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่มีขนาดการทำความร้อนไม่เกิน 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง

การจำลองสถานะที่บริเวณคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า

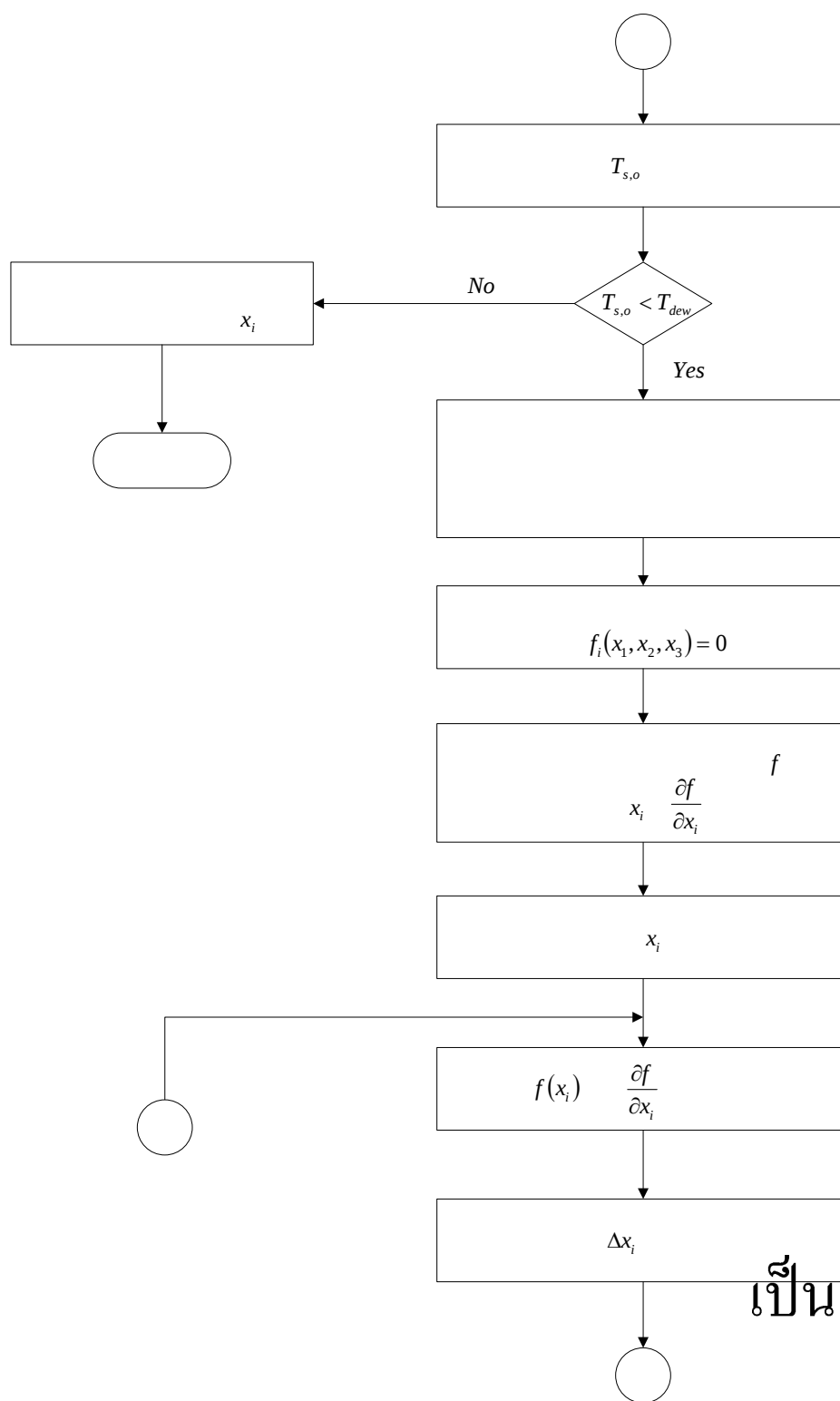
เมื่อใช้การวิเคราะห์คอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าในภาพที่ 12 ด้วยวิธีประสิทธิผล (Braun *et al.*, 1989) โดยสมการที่ใช้ในการจำลองคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าจะแบ่งเป็น 2 ชุดสมการดังนี้คือ ชุดสมการที่ใช้วิเคราะห์เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิในอากาศไม่เกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวคอยล์ทำความเย็นหรือเป็นคอยล์แห้ง (Dry coil analysis) และชุดสมการที่ใช้วิเคราะห์เมื่อกำหนดให้อุณหภูมิในอากาศเกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวคอยล์หรือเป็นคอยล์ชื้น (Wet coil analysis) โดยขั้นตอนการจำลองสถานะที่บริเวณคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าแสดงได้ดังภาพที่ 13 ส่วนรายละเอียดการสร้างฟังก์ชันเพื่อใช้ในการจำลองจะแสดงในลำดับถัดไป



ภาพที่ 12 คอยล์ทำความเย็นส่วนหน้าของชุดส่งลมเย็น

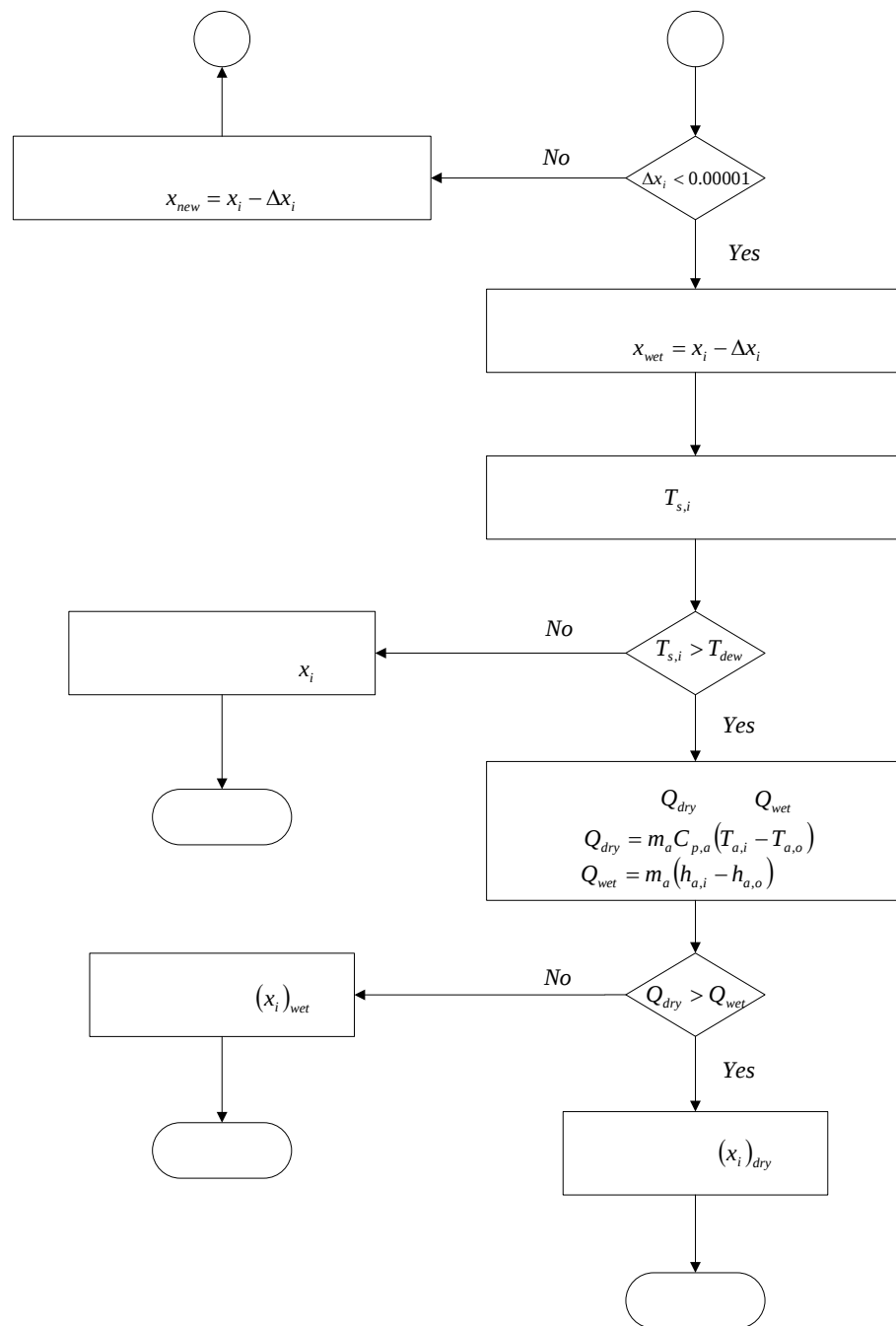


ภาพที่ 13 แผนภาพขั้นตอนการจำลองคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า



เป็นคอลล์แห่งส
แสดงพ

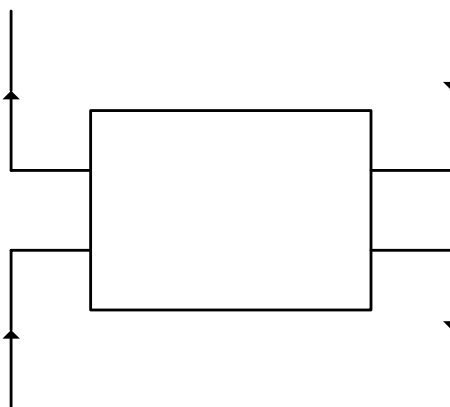
ภาพที่ 13 (ต่อ)



ภาพที่ 13 (ต่อ)

ฟังก์ชันที่ใช้สำหรับหาคำตอบในกรณีที่คอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าเป็นคอยล์แห้ง

พิจารณาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HX-01 ซึ่งมีน้ำเย็นจากเครื่องทำน้ำเย็นที่มีอัตราไหล m_w มาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่มาจากคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าของชุดส่งลมเย็นโดยน้ำมีอัตราไหล M_w สถานะที่เกิดขึ้นบริเวณเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแสดงได้ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างน้ำกับน้ำเย็น

สมการการถ่ายเทความร้อนของของไหลด้านที่อุณหภูมิสูงกว่า (Hot fluid) เป็นดังนี้

$$Q = C_h (T_{h,in} - T_{h,out}) \quad (65)$$

อุณหภูมิของของไหลร้อนที่บริเวณทางออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหาได้จาก

$$T_{h,out} = T_{h,in} - \frac{Q}{C_h} \quad (66)$$

$$T_{w,2} = T_{w,1} - \frac{C_c (T_{ch,2} - T_{ch,1})}{C_h}$$

เมื่ออัตราความจุความร้อนของของไหลเย็น (Cold fluid) และของไหลร้อน (Hot fluid) มีค่าดังนี้

$$C_c = m_w C_{p,w} \quad \text{และ} \quad C_h = M_w C_{p,w}$$

เมื่อแทนค่าอุณหภูมิน้ำเย็นบริเวณทางเข้าและทางออกจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนด้วย $T_{ch,1} = 44\text{ }^{\circ}\text{F}$ และ $T_{ch,2} = 54\text{ }^{\circ}\text{F}$ จะได้

$$T_{w,2} = T_{w,1} - \frac{m_w C_{p,w} (54 - 44)}{M_w C_{p,w}}$$

หรือ

$$T_{w,2} = T_{w,1} - \frac{10m_w}{M_w}$$

อัตราการถ่ายเทความร้อนระหว่างของไหลทั้งสองที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนหาได้จาก

$$Q = \varepsilon C_{\min} (T_{h,in} - T_{c,in}) \quad (67)$$

กำหนดให้ ε_1 เป็นค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HX-01 และแทนแทนค่าอุณหภูมิน้ำเย็น $T_{ch,1}$ และ $T_{ch,2}$ ลงในสมการข้างต้นจะได้

$$\begin{aligned} 54 - 44 &= \varepsilon_1 (T_{w,1} - 44) \\ 10 &= \varepsilon_1 (T_{w,1} - 44) \end{aligned}$$

ค่าประสิทธิผลของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนแบบไหลสวนทาง (Counter-flow heat exchanger) หาได้จาก (Ozisik, 1985)

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-N(1-C)]}{1 - C \exp[-N(1-C)]} \quad (68)$$

เมื่อ $N = \frac{UA}{C_{\min}}$ และ $C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$

เมื่อแทนค่า UA , $C_{\min}$, $C_{\max}$ สำหรับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้จะได้

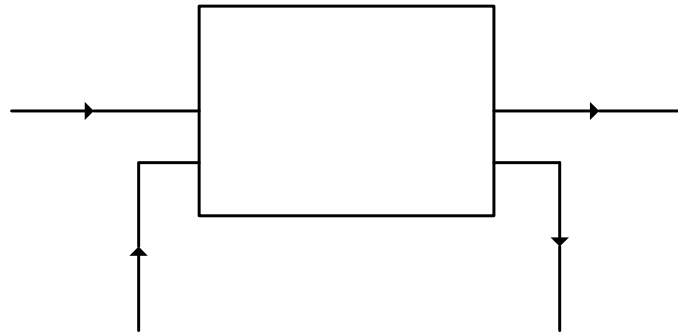
$$N_1 = \frac{(UA)_{HX}}{m_w C_{p,w}} \quad \text{และ} \quad C_1 = \frac{m_w C_{p,w}}{M_w C_{p,w}} = \frac{m_w}{M_w}$$

โดย $(UA)_{HX} =$ ค่า UA ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HX-01

$$\text{ดังนั้น} \quad \varepsilon_1 = \frac{1 - \exp[-N_1(1 - C_1)]}{1 - C_1 \exp[-N_1(1 - C_1)]}$$

$$\text{หรือ} \quad \varepsilon_1 - \varepsilon_1 C_1 \exp[-N_1(1 - C_1)] = 1 - \exp[-N_1(1 - C_1)]$$

พิจารณาคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้ากรณีที่เป็นคอยล์แห้งหรือไอน้ำในอากาศที่ผ่านคอยล์ ไม่เกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวคอยล์ตลอดความยาวของคอยล์ ซึ่งจะมีน้ำจากเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อน HX-01 ที่มีอัตราการไหล M_w มารับความร้อนจากอากาศที่ต้องการส่งเข้าสู่ห้องทดสอบ โดยที่อากาศมีอัตราการไหล m_a และอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าคอยล์เท่ากับ $T_{a,i}$ ซึ่งสภาวะที่บริเวณ คอยล์ทำความเย็นแสดงได้ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 คอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าเมื่อพิจารณาเป็นคอยล์แห้ง

จากเอกสารของ Braun *et al.* (1989) อัตราการถ่ายเทความร้อนที่บริเวณคอยล์ทำความเย็น ล่วงหน้า กรณีที่บริเวณผิวคอยล์ไม่เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศหาได้จาก

$$Q_{dry} = \varepsilon_{dry} m_a C_{p,a} (T_{a,i} - T_{w,i}) \quad (69)$$

ดังนั้นอุณหภูมิอากาศหลังผ่านคอยล์ทำความเย็นจะเท่ากับ

$$T_{a,o} = T_{a,i} - \varepsilon_{dry} (T_{a,i} - T_{w,i}) \quad (70)$$

เมื่อแทนค่า ε_{dry} ด้วย ε_2 จะได้สมการเป็น

$$T_{a,o} = T_{a,i} - \varepsilon_2 (T_{a,i} - T_{w,2})$$

สมการการถ่ายเทความร้อนระหว่างอากาศกับน้ำที่บริเวณคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าในกรณีที่คอยล์ไม่เกิดการควบแน่นเป็นดังนี้

$$T_{w,o} = T_{w,i} + C(T_{a,i} - T_{a,o}) \quad (71)$$

นั่นคือ

$$T_{w,1} = T_{w,2} + C_2(T_{a,i} - T_{a,o})$$

และค่าประสิทธิภาพของคอยล์ทำความเย็นหาได้จาก

$$\varepsilon_{dry} = \frac{1 - \exp[-NTU_{dry}(1-C)]}{1 - C \exp[-NTU_{dry}(1-C)]} \quad (72)$$

จะได้เป็น

$$\varepsilon_2 = \frac{1 - \exp[-N_2(1-C_2)]}{1 - C_2 \exp[-N_2(1-C_2)]}$$

กำหนดให้ $N_2 = NTU_{dry}$ และ $C_2 = \frac{m_a C_{p,a}}{M_w C_{p,w}}$

ดังนั้นจะได้สมการเป็น

$$\varepsilon_2 - \varepsilon_2 C_2 \exp[-N_2(1-C_2)] = 1 - \exp[-N_2(1-C_2)]$$

เมื่อ

$$NTU_{dry} = \frac{NTU_o}{1 + C(NTU_o / NTU_i)} \quad (73)$$

โดยที่
$$NTU_i = \frac{U_i A_i}{M_w C_{p,w}} \quad (74)$$

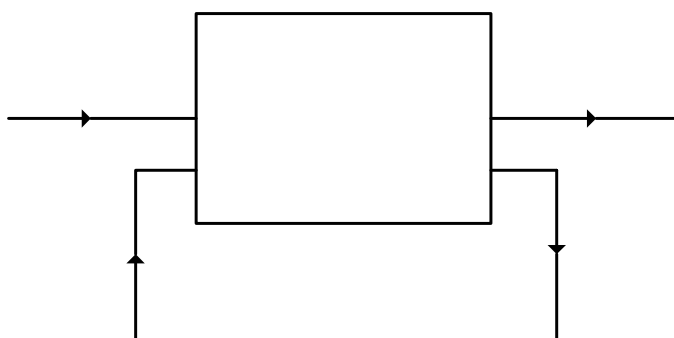
และ
$$NTU_o = \frac{h_{C,o} A_o}{m_a C_{p,a}} \quad (75)$$

กำหนดให้
$$N_3 = NTU_i \text{ และ } N_4 = NTU_o$$

ดังนั้น
$$N_2 = \frac{N_4}{1 + C_2 (N_4 / N_3)}$$

ฟังก์ชันที่ใช้สำหรับหาคำตอบในกรณีที่คอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าเป็นคอยล์ขึ้น

พิจารณาคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้ากรณีที่เป็นคอยล์ขึ้นหรือไอน้ำในอากาศที่ผ่านคอยล์เกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวคอยล์ตลอดความยาวของคอยล์ ซึ่งบริเวณคอยล์จะมีน้ำจากเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน HX-01 ที่มีอัตราการไหล M_w มารับความร้อนจากอากาศที่ต้องการส่งเข้าสู่ห้องทดสอบ โดยที่อากาศมีอัตราการไหล m_a และอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าคอยล์เท่ากับ $T_{a,i}$ ซึ่งสถานะที่บริเวณคอยล์ทำความเย็นแสดงได้ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 คอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าเมื่อพิจารณาเป็นคอยล์ขึ้น

จากเอกสารของ Braun *et al.* (1989) ในกรณีที่เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศที่บริเวณผิวคอยล์ทำความเย็น จะสามารถหาค่าเอนทาลปีจำเพาะของอากาศที่บริเวณทางออกจากคอยล์ได้จาก

$$h_{a,o} = h_{a,i} - \varepsilon_{wet} (h_{a,i} - h_{swi}) \quad (76)$$

เมื่อแทนค่า ε_{wet} ด้วย ε_3 จะได้เป็น

$$h_{a,o} = h_{a,i} - \varepsilon_3 (h_{a,i} - h_{swi})$$

และอุณหภูมิน้ำบริเวณทางออกจากคอยล์หาได้จากสมการ

$$T_{w,1} = T_{w,2} + \frac{m_a (h_{a,i} - h_{a,o})}{M_w C_{p,w}} \quad (77)$$

ซึ่งสมการข้างต้นคิดแปลงมาจากสมการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศดังต่อไปนี้

$$M_w C_{p,w} (T_{w,1} - T_{w,2}) = m_a (h_{a,i} - h_{a,o}) \quad (78)$$

เนื่องจากในการจำลองได้ใช้อัตราการไหล M_w และ m_a ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที อุณหภูมิน้ำ $T_{w,1}$ และ $T_{w,2}$ อยู่ในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์ ส่วนค่าเอนทัลปีจำเพาะของอากาศ $h_{a,i}$ และ $h_{a,o}$ อยู่ในหน่วย Btu/lb ซึ่งทำให้ทั้งสองข้างของสมการมีหน่วยต่างกัน จึงจำเป็นต้องปรับให้อยู่ในหน่วยเดียวกันคือ หน่วยกิโลวัตต์ จะได้สมการเป็น

$$T_{w,1} = T_{w,2} + \frac{4.1868 m_a (h_{a,i} - h_{a,o})}{M_w C_{p,w}} \quad (79)$$

ค่าประสิทธิภาพของคอยล์ทำความเย็นในกรณีที่ไอน้ำในอากาศที่ผ่านคอยล์เกิดการควบแน่นตลอดความยาวของคอยล์หาได้จากสมการ

$$\varepsilon_{wet} = \frac{1 - \exp[-NTU_{wet}(1-m)]}{1 - m \exp[-NTU_{wet}(1-m)]} \quad (80)$$

เมื่อกำหนดให้ $N_5 = NTU_{wet}$ และ $\varepsilon_3 = \varepsilon_{wet}$ จะได้สมการเป็น

$$\varepsilon_3 = \frac{1 - \exp[-N_5(1-m)]}{1 - m \exp[-N_5(1-m)]}$$

นั่นคือ

$$\varepsilon_3 - \varepsilon_3 m \exp[-N_5(1-m)] = 1 - \exp[-N_5(1-m)]$$

โดยที่

$$m = \frac{m_a C_s}{M_w C_{p,w}} \quad (81)$$

และค่า C_s หาได้จาก

$$C_s = \frac{h_{swi} - h_{swo}}{T_{w,i} - T_{w,o}} \quad (82)$$

เนื่องจาก h_{swi} และ h_{swo} ที่ใช้ในการจำลองอยู่ในหน่วย Btu/lb ส่วนอุณหภูมิ $T_{w,1}$ และ $T_{w,2}$ อยู่ในหน่วยองศาฟาเรนไฮต์ จำเป็นต้องปรับให้อยู่ในหน่วย $kJ/(kg \cdot ^\circ C)$ เพื่อความสะดวกในการจำลอง ได้สมการใหม่เป็น

$$C_s = \frac{4.1868 \times (h_{swi} - h_{swo})}{T_{w,i} - T_{w,o}} \quad (83)$$

จาก

$$NTU_{wet} = \frac{NTU_o}{1 + m(NTU_o / NTU_i)} \quad (84)$$

เมื่อกำหนดให้

$$N_3 = NTU_i$$

$$N_4 = NTU_o$$

และ

$$N_5 = NTU_{wet}$$

จะได้เป็น

$$N_5 = \frac{N_4}{1 + m(N_4 / N_3)}$$

กำหนดให้

$$N_3 = NTU_i \text{ และ } N_4 = NTU_o$$

โดยที่

$$NTU_i = \frac{U_i A_i}{M_w C_{p,w}}$$

$$NTU_o = \frac{h_{c,o} A_o}{m_a C_{p,a}}$$

จากแผนภาพไซโครเมตริกความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิ
น้ำที่บริเวณทางเข้าคอยล์เป็นไปตามสมการ

$$h_{swi} = 0.00009(T_{w,2})^3 - 0.0092(T_{w,2})^2 + 0.7886(T_{w,2}) - 7.6022 \quad (85)$$

เช่นเดียวกัน ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเอนทัลปีของอากาศอิ่มตัว ณ อุณหภูมิน้ำที่บริเวณ
ทางออกของคอยล์เป็นไปตามสมการ

$$h_{swo} = 0.00009(T_{w,1})^3 - 0.0092(T_{w,1})^2 + 0.7886(T_{w,1}) - 7.6022 \quad (86)$$

ดังนั้นสมการที่เกี่ยวข้องในกรณีที่คอยล์ทำความเย็นเป็นคอยล์แห้งสนิทหรือไม่เกิดการ
ควบแน่นของไอน้ำในอากาศที่ผิวคอยล์ขณะไหลผ่านคอยล์ (Completely dry) ได้แก่

$$(1) \quad T_{w,2} = T_{w,1} - \frac{10m_w}{M_w}$$

$$(2) \quad 10 = \varepsilon_1(T_{w,1} - 44)$$

$$(3) \quad \varepsilon_1 - \varepsilon_1 C_1 \exp[-N_1(1 - C_1)] = 1 - \exp[-N_1(1 - C_1)]$$

$$(4) \quad T_{a,o} = T_{a,i} - \varepsilon_2(T_{a,i} - T_{w,2})$$

$$(5) \quad T_{w,1} = T_{w,2} + C_2(T_{a,i} - T_{a,o})$$

$$(6) \quad \varepsilon_2 - \varepsilon_2 C_2 \exp[-N_2(1 - C_2)] = 1 - \exp[-N_2(1 - C_2)]$$

ส่วนสมการที่เกี่ยวข้องในกรณีที่ไอน้ำในอากาศเกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวคอยล์ตลอด
ความยาวของคอยล์ (Completely wet) ได้แก่

$$(1) \quad T_{w,2} = T_{w,1} - \frac{10m_w}{M_w}$$

$$(2) \quad 10 = \varepsilon_1(T_{w,1} - 44)$$

$$\begin{aligned}
(3) \quad & \varepsilon_1 - \varepsilon_1 C_1 \exp[-N_1(1 - C_1)] = 1 - \exp[-N_1(1 - C_1)] \\
(4) \quad & h_{a,o} = h_{a,i} - \varepsilon_3(h_{a,i} - h_{swi}) \\
(5) \quad & T_{w,1} = T_{w,2} + \frac{4.1868 m_a (h_{a,i} - h_{a,o})}{M_w C_{p,w}} \\
(6) \quad & \varepsilon_3 - \varepsilon_3 m \exp[-N_5(1 - m)] = 1 - \exp[-N_5(1 - m)] \\
(7) \quad & h_{swi} = 0.00009(T_{w,2})^3 - 0.0092(T_{w,2})^2 + 0.7886(T_{w,2}) - 7.6022 \\
(8) \quad & h_{swo} = 0.00009(T_{w,1})^3 - 0.0092(T_{w,1})^2 + 0.7886(T_{w,1}) - 7.6022 \\
(9) \quad & m = \frac{m_a C_s}{M_w C_{p,w}} \\
(10) \quad & C_s = \frac{4.1868 \times (h_{swi} - h_{swo})}{T_{w,2} - T_{w,1}} \\
(11) \quad & N_5 = \frac{N_4}{1 + m(N_4 / N_3)}
\end{aligned}$$

เมื่อกำหนดให้ตัวแปร x_1 ถึง x_{13} แทนค่าสถานะที่สนใจหรือตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบ
ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
x_1 &= T_{w,1} \\
x_2 &= T_{w,2} \\
x_3 &= T_{a,o} \\
x_4 &= M_w \\
x_5 &= \varepsilon_1 \\
x_6 &= \varepsilon_2 \\
x_7 &= \varepsilon_3 \\
x_8 &= h_{swi} \\
x_9 &= h_{swo} \\
x_{10} &= h_{a,o} \\
x_{11} &= m \\
x_{12} &= C_s \\
x_{13} &= N_5
\end{aligned}$$

กำหนดให้ตัวแปรป้อนค่า v_1, v_2, v_3 และ v_4 มีค่าดังนี้

$$v_1 = T_{a,i}$$

$$v_2 = m_w$$

$$v_3 = m_a$$

$$v_4 = h_{a,i}$$

กำหนดให้ค่าคงที่ k_0, k_1, k_2, k_3 และ k_4 แทนค่าดังนี้

$$k_0 = (UA)_{HX}$$

$$k_1 = U_i A_i$$

$$k_2 = h_{C,o} A_o$$

$$k_3 = C_{p,w}$$

$$k_4 = C_{p,a}$$

เมื่อแทนค่าตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบ ตัวแปรป้อนและค่าคงที่ต่างๆ จะได้สมการสำหรับการวิเคราะห์แบบคอยล์แห้งดังต่อไปนี้

$$(1) \quad x_2 = x_1 - \frac{10v_2}{x_4}$$

$$(2) \quad 10 = x_5(x_1 - 44)$$

$$(3) \quad x_4 x_5 - v_2 x_5 \exp\left[\frac{k_0 v_2 - k_0 x_4}{k_3 v_2 x_4}\right] = x_4 - x_4 \exp\left[\frac{k_0 v_2 - k_0 x_4}{k_3 v_2 x_4}\right]$$

$$(4) \quad x_3 = v_1 - x_6(v_1 - x_2)$$

$$(5) \quad k_3 x_1 x_4 = k_3 x_2 x_4 + k_4 v_1 v_3 - k_4 v_3 x_3$$

$$(6) \quad k_3 x_4 x_6 - k_4 v_3 x_6 \exp\left[\frac{k_1 k_2 k_4 v_3 - k_1 k_2 k_3 x_4}{k_3 k_4 v_3 x_4 (k_1 + k_2)}\right] \\ = k_3 x_4 - k_3 x_4 \exp\left[\frac{k_1 k_2 k_4 v_3 - k_1 k_2 k_3 x_4}{k_3 k_4 v_3 x_4 (k_1 + k_2)}\right]$$

เช่นเดียวกัน เมื่อแทนค่าตัวแปรที่ต้องการหาคำตอบ ตัวแปรป้อนค่า และค่าคงที่ต่างๆ จะได้สมการสำหรับการวิเคราะห์แบบคอยล์ชื้นดังนี้

$$\begin{aligned}
(1) \quad & x_2 = x_1 - \frac{10v_2}{x_4} \\
(2) \quad & 10 = x_5(x_1 - 44) \\
(3) \quad & x_4x_5 - v_2x_5 \exp\left[\frac{k_0v_2 - k_0x_4}{k_3v_2x_4}\right] = x_4 - x_4 \exp\left[\frac{k_0v_2 - k_0x_4}{k_3v_2x_4}\right] \\
(4) \quad & x_{10} = v_4 - x_7(v_4 - x_8) \\
(5) \quad & x_1 = x_2 + \frac{4.1868v_3(v_4 - x_{10})}{k_3x_4} \\
(6) \quad & x_7 - x_7x_{11} \exp[x_{11}x_{13} - x_{13}] = 1 - \exp[x_{11}x_{13} - x_{13}] \\
(7) \quad & x_8 = 0.00009x_2^3 - 0.0092x_2^2 + 0.7886x_2 - 7.6022 \\
(8) \quad & x_9 = 0.00009x_1^3 - 0.0092x_1^2 + 0.7886x_1 - 7.6022 \\
(9) \quad & x_{11} = \frac{v_3x_{12}}{k_3x_4} \\
(10) \quad & x_{12} = \frac{4.1868 \times (x_8 - x_9)}{x_2 - x_1} \\
(11) \quad & x_{13} = \frac{k_2/(k_4v_3)}{1 + x_{11}\left(\frac{k_2k_3x_4}{k_1k_4v_3}\right)}
\end{aligned}$$

จะได้ฟังก์ชันในการคำนวณหาคำตอบโดยวิธีนิวตัน-ราฟสันในกรณีที่วิเคราะห์แบบคอยล์
 แห่งดังนี้

$$\begin{aligned}
f_1 &= x_1x_4 - x_2x_4 - 10v_2 = 0 \\
f_2 &= x_1x_5 - 44x_5 - 10 = 0 \\
f_3 &= x_4x_5 - v_2x_5 \exp\left[\frac{k_0v_2 - k_0x_4}{k_3v_2x_4}\right] + x_4 \exp\left[\frac{k_0v_2 - k_0x_4}{k_3v_2x_4}\right] - x_4 = 0 \\
f_4 &= v_1 - v_1x_6 + x_2x_6 - x_3 = 0 \\
f_5 &= k_3x_2x_4 + k_4v_1v_3 - k_4v_3x_3 - k_3x_1x_4 = 0 \\
f_6 &= k_3x_4x_6 - k_4v_3x_6 \exp\left[\frac{k_1k_2k_4v_3 - k_1k_2k_3x_4}{k_3k_4v_3x_4(k_1 + k_2)}\right] \\
&\quad + k_3x_4 \exp\left[\frac{k_1k_2k_4v_3 - k_1k_2k_3x_4}{k_3k_4v_3x_4(k_1 + k_2)}\right] - k_3x_4 = 0
\end{aligned}$$

จะได้ฟังก์ชันในการคำนวณหาคำตอบโดยวิธีนิวตัน-ราฟสันในกรณีวิเคราะห์แบบคอยล์
ชั้นดังนี้

$$f_1 = x_1 x_4 - x_2 x_4 - 10v_2 = 0$$

$$f_2 = x_1 x_5 - 44x_5 - 10 = 0$$

$$f_3 = x_4 x_5 - v_2 x_5 \exp\left[\frac{k_0 v_2 - k_0 x_4}{k_3 v_2 x_4}\right] + x_4 \exp\left[\frac{k_0 v_2 - k_0 x_4}{k_3 v_2 x_4}\right] - x_4 = 0$$

$$f_4 = x_{10} - v_4 + v_4 x_7 - x_7 x_8 = 0$$

$$f_5 = k_3 x_1 x_4 - k_3 x_2 x_4 - 4.1868 v_3 v_4 + 4.1868 v_3 x_{10} = 0$$

$$f_6 = x_7 - x_7 x_{11} \exp[x_{11} x_{13} - x_{13}] + \exp[x_{11} x_{13} - x_{13}] - 1 = 0$$

$$f_7 = x_8 - 0.00009x_2^3 + 0.0092x_2^2 - 0.7886x_2 + 7.6022 = 0$$

$$f_8 = x_9 - 0.00009x_1^3 + 0.0092x_1^2 - 0.7886x_1 + 7.6022 = 0$$

$$f_9 = k_3 x_4 x_{11} - v_3 x_{12} = 0$$

$$f_{10} = x_2 x_{12} - x_1 x_{12} - 4.1868 x_8 + 4.1868 x_9 = 0$$

$$f_{11} = k_1 k_4 v_3 x_{13} + k_2 k_3 x_4 x_{11} x_{13} - k_1 k_2 = 0$$

สภาวะที่ใช้ในการจำลองคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า

การจำลองสภาวะที่บริเวณคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าจำเป็นต้องทราบสภาวะอากาศก่อน
เข้าคอยล์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้สภาวะอากาศภายนอกของกรุงเทพมหานคร (ASHRAE, 2001) ใน
การจำลองสภาวะที่บริเวณคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า โดยสภาวะอากาศภายนอกที่ใช้ในการจำลอง
แสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะอากาศภายนอกที่ใช้ในการจำลอง

สภาวะอากาศภายนอก	สภาวะที่ใช้ในการจำลอง
1. สภาวะอากาศภายนอกร้อนที่สุด	99FDB/80FWB
2. สภาวะอากาศภายนอกชื้นที่สุด	94FDB/84FWB
3. สภาวะอากาศภายนอกเย็นที่สุด	82FDB/60%RH
4. สภาวะอากาศภายนอกเย็นที่สุดและแห้ง	82FDB/50%RH

มาตรฐานการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศของ ARI (2003) กำหนดให้อุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศที่มีระบายความร้อนจากคอนเดนเซอร์ของเครื่องทำน้ำเย็นเป็น 95 องศาฟาเรนไฮต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะสมมติว่า สภาวะอากาศภายในห้องทดสอบเป็น 95FDB/75FWB โดยในการทดสอบได้ออกแบบให้มีการนำอากาศภายนอกเข้ามาผสมกับอากาศที่ถูกดูดออกมาจากห้องทดสอบ ดังนั้นสภาวะอากาศก่อนเข้าคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าจะมีค่าเปลี่ยนแปลงระหว่างสภาวะอากาศภายในห้องทดสอบกับสภาวะอากาศภายนอก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณอากาศภายนอกที่นำเข้ามาผสม โดยในที่นี้กำหนดให้สัดส่วนอากาศภายนอกที่นำเข้ามาผสมเป็นดังนี้คือ 0, 25, 50, 75% และ 100% ของปริมาณอากาศทั้งหมดที่ถูกส่งให้ห้องทดสอบ แสดงรายละเอียดได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะอากาศก่อนเข้าคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า

สภาวะอากาศที่ใช้ในการจำลองคอยล์ทำความเย็น ล่วงหน้า	อุณหภูมิอากาศ (F)	เอนทาลปีอากาศ (Btu/lb)
1. สภาวะอากาศภายนอกร้อนที่สุด (99FDB/80FWB)		
1.1. 100% อากาศภายนอก	99	43.47200
1.2. 75% อากาศภายนอก	98	42.20375
1.3. 50% อากาศภายนอก	97	40.93550
1.4. 25% อากาศภายนอก	96	39.66725
1.5. 0% อากาศภายนอก	95	38.39900
2. สภาวะอากาศภายนอกชื้นที่สุด (94FDB/84FWB)		
2.1. 100% อากาศภายนอก	94	48.10500
2.2. 75% อากาศภายนอก	94.25	45.67850
2.3. 50% อากาศภายนอก	94.5	43.25200
2.4. 25% อากาศภายนอก	94.75	40.82550
2.5. 0% อากาศภายนอก	95	38.39900
3. สภาวะอากาศภายนอกเย็นที่สุด (82FDB/60%RH)		
3.1. 100% อากาศภายนอก	82	35.17800
3.2. 75% อากาศภายนอก	85.25	35.98325
3.3. 50% อากาศภายนอก	88.5	36.78850
3.4. 25% อากาศภายนอก	91.75	37.59375
3.5. 0% อากาศภายนอก	95	38.39900

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สภาวะอากาศที่ใช้ในการจำลองคอยล์ทำความเย็น ล่วงหน้า	อุณหภูมิอากาศ (F)	เอนทัลปีอากาศ (Btu/lb)
4. สภาวะอากาศภายนอกเย็นที่สุดและแห้ง (82FDB/50%RH)		
4.1. 100% อากาศภายนอก	82	32.54600
4.2. 75% อากาศภายนอก	85.25	34.00925
4.3. 50% อากาศภายนอก	88.5	35.47250
4.4. 25% อากาศภายนอก	91.75	36.93575
4.5. 0% อากาศภายนอก	95	38.39900

ค่าคงที่ที่ใช้ในการจำลองคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้ามีค่าเป็นดังตารางที่ 3 โดยที่มาของค่า $(UA)_{HX}$, $U_i A_i$ และ $h_{c,o} A_o$ ได้แสดงการคำนวณไว้ในภาคผนวก ข

ตารางที่ 3 ค่าคงที่ที่ใช้ในการจำลองคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้า

ค่าคงที่ k		สำหรับจำลองเครื่องทำน้ำเย็น ขนาด 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง	สำหรับจำลองเครื่องทำน้ำเย็น ขนาด 180,000 บีทียูต่อชั่วโมง
k_0	$(UA)_{HX}$	5.0876	5.0876
k_1	$U_i A_i$	8.0375	8.0375
k_2	$h_{c,o} A_o$	12.2634	10.1943
k_3	$C_{p,w}$	4.2000	4.2000
k_4	$C_{p,a}$	1.0050	1.0050

จากตารางที่ 3 ค่าของ $(UA)_{HX}$, $U_i A_i$ และ $h_{c,o} A_o$ มีหน่วยเป็น $kW / ^\circ C$ ส่วนค่า $C_{p,w}$ และ $C_{p,a}$ มีหน่วยเป็น $kJ / kg \cdot ^\circ C$

ตัวแปรป้อนค่าที่ใช้ในการจำลองคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้ามีค่าเป็นดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวแปรป้อนค่าที่ใช้ในการจำลอง

ตัวแปรป้อนค่า	สำหรับจำลองเครื่องทำน้ำเย็น ขนาด 240,000 บีทียูต่อชั่วโมง	สำหรับจำลองเครื่องทำน้ำเย็น ขนาด 180,000 บีทียูต่อชั่วโมง
v_1	-	-
v_2	3.0283	2.2712
v_3	9.4104	7.3873
v_4	-	-

ค่าตัวแปรป้อน v_2 และ v_3 แทนอัตราการไหลเชิงมวลของน้ำเย็น (m_w) และอากาศ (m_a) ตามลำดับ ในหน่วยกิโลกรัมต่อวินาที โดยวิธีการคำนวณอัตราการไหลของอากาศแสดงไว้ในภาคผนวก ก ส่วนค่าตัวแปรป้อนค่า v_1 และ v_4 ซึ่งแทนค่าอุณหภูมิอากาศก่อนเข้าคอยล์ ($T_{a,i}$) และค่าเอนทัลปีของอากาศก่อนเข้าคอยล์ ($h_{a,i}$) ตามลำดับ โดยได้แสดงไว้ในตารางที่ 2

การวิเคราะห์ด้วยวิธีประสิทธิภาพคอยล์แห้งและคอยล์ชื้น

การจำลองจะเริ่มต้นจากการสมมติว่า คอยล์ทำความเย็นที่พิจารณาเป็นคอยล์แห้งสนิท (Completely dry) หรือไอน้ำในอากาศที่ผ่านคอยล์ไม่เกิดการควบแน่นที่บริเวณผิวคอยล์ทำความเย็นเลย แล้วใช้สมการสำหรับการวิเคราะห์แบบคอยล์แห้ง (Dry coil analysis) ในการจำลองสภาวะของคอยล์ (Braun *et al.*, 1989)

จากผลการวิเคราะห์คอยล์ทำความเย็นแบบคอยล์แห้งและหาค่าตัวแปรที่สนใจด้วยวิธีนิวตัน-ราฟสัน หากอุณหภูมิผิวคอยล์ที่บริเวณทางออกคอยล์ (Outlet surface temperature), $T_{s,o}$ ที่ได้จากการจำลองคอยล์ทำความเย็นต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew-point temperature) ของอากาศที่เข้าสู่คอยล์ ถือว่าที่บริเวณผิวคอยล์ทำความเย็นไม่เกิดการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ หรือเป็นคอยล์แห้งสนิท ในทางตรงกันข้าม หากอุณหภูมิผิวคอยล์ที่บริเวณทางออกคอยล์ต่ำกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศที่เข้าสู่คอยล์ แสดงว่ามีพื้นผิวบางส่วนของคอยล์ที่เกิดการควบแน่น ดังนั้นจะต้องใช้การวิเคราะห์แบบคอยล์ชื้น (Wet coil analysis) ในการหาคำตอบต่อไป

หากอุณหภูมิผิวคอยล์บริเวณทางเข้าคอยล์ ($T_{s,i}$) ที่ได้จากการวิเคราะห์แบบคอยล์ชื้นมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้างของอากาศทางเข้า แสดงว่ามีพื้นผิวบางส่วนของคอยล์ที่ไม่เกิด

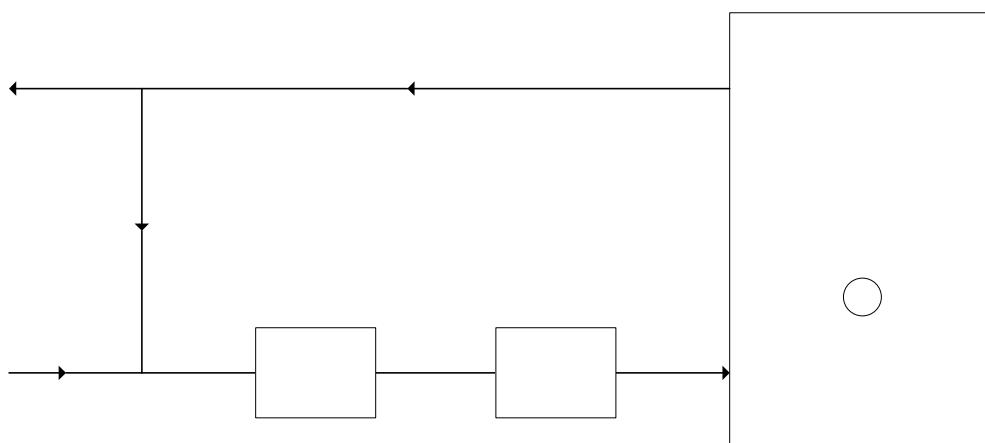
การควบคุมของไอน้ำในอากาศ ซึ่งคอยล์จะมีทั้งส่วนที่แห้งและชื้น หากเกิดกรณีนี้ขึ้น Braun *et al.* (1989) ได้แนะนำให้เลือกผลระหว่างการวิเคราะห์แบบคอยล์แห้งกับคอยล์ชื้นที่ให้ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนที่มากกว่า

วิธีการหาขนาดสุทธิของอุปกรณ์ปรับอากาศหลัก

อุปกรณ์ปรับอากาศหลักเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ปรับสถานะอากาศที่จะส่งเข้าไปรับภาระความร้อนจากห้องทดสอบให้มีสถานะเหมาะสม เมื่อเข้าไปรับภาระความร้อนจากห้องทดสอบแล้วทำให้ห้องมีสถานะเป็นไปตามมาตรฐานการทดสอบ โดยอัตราการทำความเย็นสุทธิของอุปกรณ์ปรับอากาศหลักหาได้จากสมการ

$$Q = 1.1 \times cfm \times (T_{a,o} - t_5) + 0.68 \times cfm \times (W_{a,o} - W_5) \quad (87)$$

โดยที่ t_5 และ W_5 คือ อุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นของอากาศป้อนให้กับห้องทดสอบ หรือสถานะที่ 5 ตามภาพที่ 17 ส่วน $T_{a,o}$ และ $W_{a,o}$ เป็นสถานะของอากาศหลังออกจากคอยล์ทำความเย็นล่วงหน้าหรือสถานะที่ 4 ตามภาพที่ 17



ภาพที่ 17 แผนภาพอุปกรณ์ปรับสถานะอากาศสำหรับการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็น

ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้อุณหภูมิลมส่ง (Supply air) เป็น 75 องศาฟาเรนไฮต์ และอัตราส่วนความชื้น (Humidity ratio) ของลมส่งเท่ากับ 98.9809 grain/lb ดังนั้น

$$t_5 = 75 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$W_5 = 98.9809 \text{ gr / lb}$$

โดยที่ปริมาณลมส่งจะขึ้นอยู่กับภาระความร้อนที่เกิดขึ้นในห้องทดสอบ ซึ่งการคำนวณภาระความร้อนที่เกิดขึ้นในห้องทดสอบสำหรับการทดสอบเครื่องทำน้ำเย็นแบบระบายความร้อนด้วยอากาศที่มีอัตราการทำความเย็น 240,000 และ 180,000 บีทียูต่อชั่วโมง แสดงไว้ในภาคผนวก ค