การทำนายอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ของคูลลิ่งทาวเวอร์แบบไหลสวนทางตามมาตรฐาน CTI ATC 105

Estimation of the Cold Water Temperatures of a Counter - Flow Cooling Tower on ATC105 - Code CTI Standard

มนตรี พิรุณเกษตร

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

Email : fengmtp@ku.ac.th

บทคัดย่อ

การทำนายอุณหภูมิน้ำเย็นที่ภาวะนอกเหนือการออกแบบ (อุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ และพิสัยระบายความร้อนที่ไม่ใช่ภาวะการออกแบบ) นำไปสู่การหาแอปโพรชที่สัมพันธ์กับค่าของพารามิเตอร์ตามลักษณะเฉพาะของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่ภาวะการออกแบบ สามระเบียบวิธีทั่วไป ได้แก่ วิธีแรงม้าเบรกพัดลมคงที่ วิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ และวิธีอัตราการไหลโดยมวลของอากาศคงที่ เพื่อใช้คำนวณหาอัตราส่วนการไหลของน้ำต่ออากาศ (L/G) ภายใต้ค่ากำหนดของอุณหภูมิกระเปาะเปียก และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศ ระเบียบวิธีทั้งสามนำมาใช้โดยการสมมติค่าอุณหภูมิของอากาศอิ่มตัวทางออก (หรือค่าอัตราส่วนการไหลของน้ำต่ออากาศ) และการคำนวณซ้ำจะดำเนินต่อไปจนกว่ากำลังม้าเบรกของพัดลมที่ภาวะนอกเหนือการออกแบบนั้นเท่ากับกำลังม้าเบรกของพัดลมที่ภาวะการออกแบบ สำหรับวิธีแรงม้าเบรกพัดลมคงที่อัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ภาวะนอกเหนือการออกแบบนั้นเท่ากับอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศที่ภาวะการออกแบบ สำหรับวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ และอัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่ภาวะนอกเหนือการออกแบบนั้นเท่ากับอัตราการไหลโดยมวลของอากาศที่ภาวะการออกแบบสำหรับวิธีอัตราการไหลโดยมวลของอากาศคงที่

การศึกษานี้พิจารณากราฟสมรรถนะการทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่ได้มาจากการคำนวณตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ ผลการวิเคราะห์ตามเทคนิคการคำนวณซ้ำดังกล่าวจะได้พิสัยระบายความร้อนจริง และอัตราส่วนการไหลของน้ำต่ออากาศจริงภายใต้ค่ากำหนดของอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ ค่ากำหนดของลักษณะเฉพาะของคูลลิ่งทาวเวอร์ (ลักษณะเฉพาะของแผงขยายฟิล์มน้ำ) พิสัยระบายความร้อนจริง และอัตราส่วนการไหลของน้ำต่ออากาศจริง จากพารามิเตอร์เหล่านี้สามารถนำไปใช้หาค่าของแอปโพรชจริง และอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ที่ภาวะนอกเหนือการออกแบบ ในที่สุดจึงสามารถพล็อตกราฟสมรรถนะของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่ภาวะการออกแบบและภาวะนอกเหนือการออกแบบได้ กราฟสมรรถนะนี้นำเสนอด้วยอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้กับอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ ซึ่งพล็อตที่ 80 100 และ 120% ของพิสัยระบายความร้อนค่าออกแบบ สำหรับ 90 100 และ 110% ของอัตราการไหลค่าออกแบบของน้ำหมุนเวียน ตามมาตรฐานของ CTI

คำสำคัญ

ซีทีไอ ภาวะนอกเหนือการออกแบบ อุณหภูมิน้ำเย็น

Abstract

The prediction of cold water temperature at the off-design conditions (ambient wet bulb temperature and cooling range other than design conditions) is to find an approach satisfying the cooling tower characteristic values at the design condition. There are three conventional methods namely, the constant fan BHP, the constant fan pitch, and the constant air mass flow rate are used to find the actual water to air flow ratio (L/G). On the given ambient wet bulb temperature and inlet relative humidity , all three methods can be applied by assuming the exit saturated air temperature (water to air flow ratio) and the iteration is continued until the net fan power at the off-design condition equals the net fan power at the design condition for the constant fan BHP method, the air volume flow rate at the off-design condition equals the air volume flow rate at the design condition for the constant fan pitch method, and the air mass flow rate at the off-design condition equals the air mass flow rate at the design condition for the constant air mass flow rate method, respectively.

In this study, the performance curves of cooling tower are based on the constant fan pitch method. Accordingly, the results of this iteration technique are actual range and actual water to air flow ratio. On the given ambient wet bulb temperature, given cooling tower characteristics, actual range, and actual water to air flow ratio, these parameter can be used to find an actual approach and cold water temperature at the off-design point. Finally, the performance (cold water temperature) curves of cooling tower can be plotted at the design and off-design conditions. These performance curves presenting the cold water temperature versus the ambient wet bulb temperature are plotted for 80, 100, and 120% of the design cooling range on 90, 100 and 110% of the design flow rate of circulated water which are based on CTI standards.

Key Words

CTI, off-design conditions, cold water temperature

1. คำนำ

กราฟสมรรถนะของคูลลิ่งทาวเวอร์นั้นแสดงด้วยเส้นกราฟทั้งหมด 3 เส้น บนกราฟที่มีแกนนอนเป็นค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ และแกนตั้งเป็นอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำคูลลิ่งทาวเวอร์สามารถทำได้ โดยแต่ละเส้นกราฟจะมีค่าพิสัยระบายความร้อนแตกต่างกันตามมาตรฐาน CTI ATC 105 (Acceptance Test Code for Water Cooling Tower) นั้น กำหนดสเกลบนกราฟทั้งแกนนอนและแกนตั้งที่เพิ่มขึ้นต่ำสุด 0.5°F และต้องไม่มากกว่า 5°F ต่อนิ้ว นอกจากนี้ตามมาตรฐาน ATC 105 การเขียนกราฟสมรรถนะนั้นต้องครอบคลุมพิสัยของค่ากำหนดของพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้ อุณหภูมิกระเปาะเปียก $\pm 15^{\circ}F$ จากค่าออกแบบ อุณหภูมิกระเปาะแห้ง $\pm 25^{\circ}F$ จากค่าออกแบบ พิสัยระบายความร้อน ±20% จากค่าออกแบบ และปริมาณน้ำหมุนเวียน ±10% จากค่าออกแบบ

ตามขั้นตอนการคำนวณซ้ำหาสภาวะทางออกของอากาศโดย 3 วิธีที่เลือกใช้ ได้แก่ วิธีแรงม้าเบรกพัดลมคงที่ วิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ และวิธีอัตราการไหลโดยมวลของอากาศคงที่ นอกจากนี้ค่าอัตราส่วนการไหล (L/G) ที่คำนวณได้ภายใต้พิสัยระบายความร้อนจริง และสภาวะบรรยากาศที่กำหนดแตกต่างกันนั้นจะนำไปใช้หาจุดตัดระหว่างเส้นบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มน้ำกับเส้นแอปโพรชจริงที่ทำได้ และทำให้สามารถคำนวณอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่สภาวะต่างๆ ที่ไม่ใช่ภาวะออกแบบ

จากข้อมูลการคำนวณในการศึกษาสมรรถนะของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่ภาวะออกแบบ และที่ภาวะนอกเหนือการออกแบบ จะนำมาเตรียมข้อมูลสำหรับการพล็อตกราฟสมรรถนะต่อไป ซึ่งได้แก่อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียน อัตราส่วนการไหล (L/G) Tower demand (KaV/L) พิสัยระบายความร้อน อุณหภูมิน้ำเย็น อุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ และกำลังม้าเบรกของมอเตอร์พัดลม

2. ภาวะออกแบบคูลลิ่งทาวเวอร์

ภาวะออกแบบ (design condition) อยู่ที่ WBT 80°F (26.67°C) RH 80% โดยมีอุณหภูมิน้ำร้อนค่าออกแบบ 104°F และอุณหภูมิน้ำเย็นค่าออกแบบ 89°F ภายใต้การทำงานที่ 100% ของอัตราการไหลของน้ำ (12500 GPM) รายละเอียดต่างๆ ในการออกแบบคูลลิ่งทาวเวอร์แบบไหลสวนทาง แสดงไว้ในตารางที่ 1

ข้อมูลและรายละเอียดเพิ่มเติมที่ใช้กำหนดการออกแบบ

- Fill Characteristics;

  $KaV/L = 1.8218(L/G)^{-0.6135}$ (1)

- สมมติฐานอากาศทางออกเป็นอากาศอิ่มตัว
- พิจารณาสมรรถนะของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่อัตราการไหล 90%, 100% และ 110% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ
- ที่อัตราการไหลของน้ำค่าหนึ่งๆนั้น พิจารณาพิสัยระบายความร้อน 3 ค่าได้แก่ 12, 15 และ 18 ° F ตามลำดับ

โดยที่ภาวะออกแบบ (design condition) อยู่ที่ inlet WBT 80°F (26.67°C) RH 80% และมีอุณหภูมิน้ำร้อนค่าออกแบบ 104°F และอุณหภูมิน้ำเย็นค่าออกแบบ 89°F ภายใต้การทำงานที่ 100% ของอัตราการไหลของน้ำ 12500 GPM

ภาวะนอกเหนือการออกแบบ (off - design) พิจารณาที่ 90%, 100% และ 110% ของอัตราการไหลของน้ำ โดยเลือกอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศเป็น 70, 75 และ 85°F ส่วนความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 80% RH และกำหนดพิสัยระบายความร้อนที่ 12, 15 และ 18° F ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ภาวะออกแบบคูลลิ่งทาวเวอร์แบบไหลสวนทาง

ภาวะออกแบบคูลลิ่งทาวเวอร์			
ระดับความสูงสถานที่ติดตั้ง	0 ft	ค่าแก้ KaV/L	0.99
อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า	80 °F	% สิ่งกีดขวาง @แผงขยายฟิล์มน้ำ	1.11 %
ความชื้นสัมพัทธ์ทางเข้า	80 %	% น้ำบายพาสลงผนัง	3.27%
จำนวนเซลทั้งหมด	1 cell	สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสีย@แผงกันละอองน้ำ 1.8	
อัตราการไหลของน้ำท่อออกแบบ	12,500 g pm	ประสิทธิภาพทั้งหมดของพัดลม	79.2%
ความยาวของเซล	42 ft	ประสิทธิภาพการถ่ายทอดกำลัง	91.2%
ความกว้างของเซล	42 ft	ส่วนเผื่อเพิ่มกำลังมอเตอร์(margin)	13.3%
ทางเข้าของอากาศแบบเปิดสองด้าน		กำลังมอเตอร์	175 hp
ความสูงทางเข้า	15 ft	เส้นผ่านศูนย์กลางพัดลม	28 ft
%สิ่งกีดขวาง@ทางลมเข้า	10 %	จำนวนพัดลมต่อเซล	1 cell
สัมประสิทธิ์ความดันสูญเสีย@ทางลมเข้า	2.5	เส้นผ่านศูนย์กลางของแผ่นซีลอากาศ	88 inch
ตัวแบบของแผงขยายฟิล์มน้ำ	CF 1900	ความสูงเวนจูรีของปล่องลม	3.66 ft
ความหนาของแผงขยายฟิล์มน้ำ	4 ft	อุณหภูมิน้ำร้อนค่าออกแบบ	104 °F
ตัวประกอบความดันสูญเสีย@แผงขยายฟิล์มน้ำ	1.0	อุณหภูมิน้ำเย็นค่าออกแบบ	89 °F
ตัวประกอบKaV/L@แผงขยายฟิล์มน้ำ	1.0	พิสัยระบายความร้อนค่าออกแบบ	15 °F

ในตารางที่ 1 อัตราการไหลของน้ำ 12500 GPM นั้นพิจารณาจาก water loading ที่เลือกใช้ในการออกแบบคูลลิ่งทาวเวอร์ เนื่องจาก water loading ขึ้นอยู่กับ design cooling range การเกิดชั้นฟิล์มบนแผงขยายฟิล์มน้ำ ถ้าเลือกอัตราการไหลค่าสูงๆ จะเกิดการไหลท่วมแผงขยายฟิล์มน้ำ หรือน้อยเกินไปทำให้เกิด water channel ส่งผลต่อการถ่ายโอนความร้อนระหว่างน้ำกับอากาศไม่ดี หรือมีประสิทธิภาพต่ำ และที่สำคัญนั้น water loading ต้องสัมพันธ์กับ air loading ในที่นี้ใช้ค่าแนะนำออกแบบสำหรับ water loading อยู่ในช่วงของ 12,000 - 16,000 kg/m^2.hr (5 - 7 GPM/ft^2) ซึ่งสัมพันธ์กับ air loading ในช่วงของ 8,000 – 10,000 kg/m^2.hr ถ้าใช้ water loading เท่ากับ 7 GPM/ft^2 และพื้นที่หน้าตัดของแผงขยายฟิล์มน้ำเท่ากับ 42 ft x 42 ft ดังนั้นจึงได้อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 12,348 GPM (ในที่นี้ใช้ค่า 12,500 GPM)

3. การคำนวณโดยวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

ภาวะนอกเหนือการออกแบบ (off - design) เป็นภาวะการทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า (inlet wet bulb temperature) พิสัยระบายความร้อน (cooling range) และอัตราการไหลของน้ำที่ไม่ตรงกับค่าในภาวะออกแบบ (design condition) สมรรถนะการทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์ในภาวะดังกล่าว สามารถทำนายได้ตามขั้นตอนการคำนวณโดยวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

วิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ตามค่ากำหนดของอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศ (Given air volume @ fan) ผ่านคูลลิ่งทาวเวอร์นั้น ภาวะนอกเหนือการออกแบบนั้นกำหนดได้ด้วยตัวแปรดังต่อไปนี้

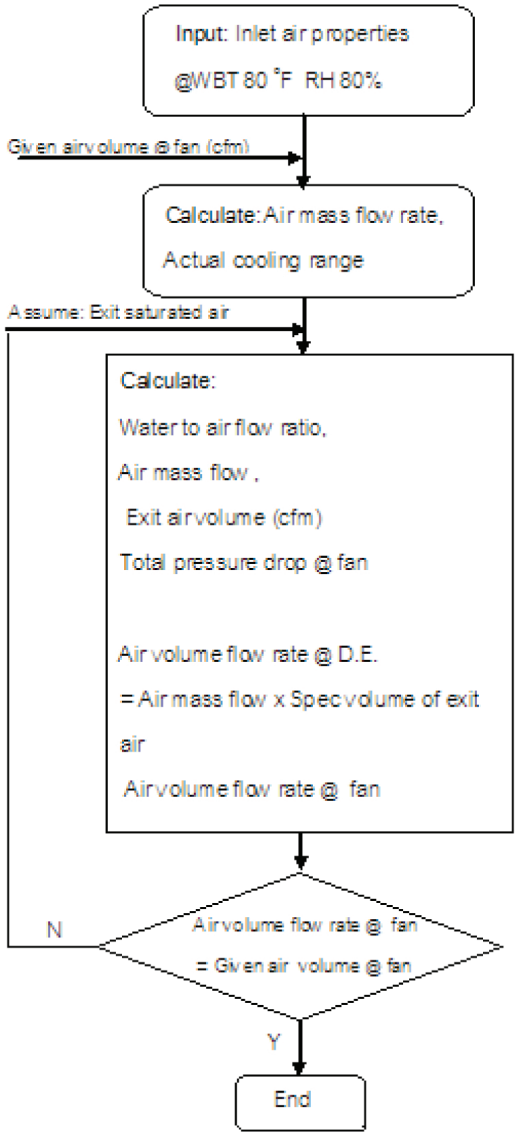
- สภาวะของบรรยากาศที่ไม่ตรงกับค่าออกแบบ (อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า และเปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์)
- ปริมาณน้ำหมุนเวียนผ่านคูลลิ่งทาวเวอร์
- พิสัยระบายความร้อน

วิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ เมื่อกำหนดค่าออกแบบที่อุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้า และ%เปอร์เซ็นต์ความชื้นสัมพัทธ์ ขั้นตอนการคำนวณ ได้แก่

1) คำนวณอุณหภูมิกระเปาะแห้งทางเข้าและสมบัติอากาศชื้นทางเข้า

2) สมมติอุณหภูมิของอากาศทางออก โดยกำหนดเป็นสภาวะอากาศอิ่มตัว

3) คำนวณความดันสูญเสียขณะอากาศไหลผ่านคูลลิ่งทาวเวอร์



ภาพที่ 1 Flow chart คำนวณหาจุดทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์โดยวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

4) คำนวณอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศทางออก จาก

Air volume flow rate @ fan = G x Specific Volume @ Exit Air (2)

5) เปรียบเทียบค่ากับ Given air volume @ fan (Given air volume @ fan ใช้ผลจากการคำนวณด้วยวิธีแรงม้าเบรกพัดลมคงที่)

ถ้า Air volume flow rate @ fan ค่าที่คำนวณนั้นยังคงแตกต่างจากค่าของ Given air volume @ fan จะต้องสมมติอุณหภูมิทางออกของอากาศค่าใหม่ แล้วเริ่มคำนวณซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 จนกว่า Air volume flow rate @ fan (ค่าคำนวณได้) นั้นเข้าใกล้ค่าของ Given air volume @ fan มากที่สุด จึงหยุดคำนวณ ในที่นี้ได้นำเสนอโปรแกรมคำนวณหาจุดทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์ภายใต้วิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ ดังแสดง Flow Chart ในภาพที่ 1

4. การคำนวณอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้

จากพิสัยระบายความร้อนและสภาวะบรรยากาศที่กำหนด ตามขั้นตอนการคำนวณซ้ำหาสภาวะทางออกของอากาศโดยวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ ผลการคำนวณสภาวะทางออกของอากาศนั้นจะสามารถคำนวณพิสัยระบายความร้อน และอัตราส่วนการไหล (L/G) ต่อจากนั้นนำไปใช้หาจุดตัดระหว่างเส้นบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มน้ำกับเส้นแอปโพรชที่ภาวะนอกเหนือการออกแบบนั้นโดยวิธีลองผิดลองถูก เพื่อหาค่าแอปโพรชจริง และจุดตัดที่ได้ ทำให้ทราบอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ และอุณหภูมิน้ำร้อนที่ทางเข้าขณะนั้นของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่ภาวะนอกเหนือการออกแบบ

อัตราส่วนการไหลของน้ำต่ออากาศ (L/G)

ภาวะออกแบบ (design condition) อยู่ที่ WBT 80°F (26.67 °C) RH 80% โดยมีอุณหภูมิน้ำร้อนค่าออกแบบ 104 °F และอุณหภูมิน้ำเย็นค่าออกแบบ 89 ° F ภายใต้การทำงานที่ 100% ของอัตราการไหลของน้ำ (12500 GPM) ภาวะนอกเหนือการออกแบบ (off- design) พิจารณาที่ 90% และ 110% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ โดยเลือกอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศเป็น 70 75 และ 85 ° F ส่วนความชื้นสัมพัทธ์กำหนด

คงที่ 80% RH และกำหนดพิสัยระบายความร้อนไว้ที่ 12 15 และ 18 °F ตามลำดับ ภายใต้ค่ากำหนดของปริมาณน้ำบายพาส (by- pass wall water) เท่ากับ 3.265% ของปริมาณน้ำหมุนเวียนทั้งหมด

อัตราส่วนการไหลที่คำนวณตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ (อัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศคงที่) ตามค่ากำหนดแต่ละค่าของอัตราการไหลของน้ำหมุนเวียน โดยกำหนดอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบที่ 12,500 GPM และสรุปไว้ในตารางที่ 2 ถึง 4

ตารางที่ 2 L/G ที่ 100% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบภายใต้วิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

Range (°F)	Actual Range (°F)	L/G			
		WBT= 70 °F	WBT= 75 °F	WBT= 80 °F	WBT= 85 °F
12	12.4050	1.3606	1.3808	1.4028	1.4259
15	15.5063	1.3763	1.3963	1.4178	1.4404
18	18.6075	1.3922	1.4116	1.4322	1.4545
% by pass water = 3.265 % , Water flow rate 12500 GPM					

ตารางที่ 3 L/G ที่ 90% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบภายใต้วิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

Range (°F)	Actual Range (°F)	L/G			
		WBT= 70 °F	WBT= 75 °F	WBT= 80 °F	WBT= 85 °F
12	12.4050	1.2186	1.2371	1.2572	1.2784
15	15.5063	1.2317	1.2498	1.2695	1.2898
18	18.6075	1.2444	1.2622	1.2813	1.3015
% by pass water = 3.265 % Water flow rate 11250 GPM					

ตารางที่ 4 L/G ที่ 110% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบภายใต้วิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

Range (°F)	Actual Range (°F)	L/G			
		WBT= 70 °F	WBT= 75 °F	WBT= 80 °F	WBT= 85 °F
12	12.4050	1.5037	1.5261	1.5498	1.5748
15	15.5063	1.5227	1.5443	1.5679	1.5924
18	18.6075	1.5416	1.5627	1.5851	1.6094
% by pass water = 3.265 % Water flow rate 13750 GPM					

อุณหภูมิน้ำเย็นที่คูลลิ่งทาวเวอร์ทำได้

ข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณอุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้จริง

- อุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ
- พิสัยระบายความร้อนจริง
- อัตราส่วนการไหลของน้ำต่ออากาศ (ค่าคำนวณได้จากวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ ซึ่งแสดงในตารางที่ 2 3 และ 4)
- สมการบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มน้ำ $KaV/L = 1.8218(L/G)^{-0.6135}$

การหาจุดทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์อยู่ภายใต้ค่ากำหนดของข้อมูลที่กล่าวข้างต้น จุดทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์คือจุดตัดระหว่างเส้นบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มน้ำที่เลือกใช้กับเส้นแอปโพรชจริง ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดค่าของอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ (inlet WBT) และพิสัยระบายความร้อน (R)
2. สมมติค่าแอปโพรช (Appr)
3. คำนวณอุณหภูมิน้ำร้อน (HWT) และอุณหภูมิน้ำเย็น (CWT)

$$CWT = \text{inlet WBT} + Appr \quad (3)$$

$$HWT = CWT + R \quad (4)$$

4. คำนวณค่าสูงสุดของอัตราส่วนน้ำต่ออากาศ $(L/G)_{max}$ จาก $(L/G)_{max} = \frac{h_{S1} - h_{a1}}{C_W (HWT - CWT)}$ (5)

5. คำนวณค่า KaV / L ในแต่ละค่าของ L / G ที่เลือกขึ้นในช่วงของ $0 < (L / G) < (L / G)_{max}$ โดยอาศัยวิธีของ Tchebycheff

6. จากผลการคำนวณที่ L / G หลายๆ ค่า จึงได้ข้อมูล $(KaV / L, L / G)$ มาพล็อตเส้นแอปโพรชนั้น

7. พล็อตเส้นบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มน้ำ จากสมการ $KaV/L = 1.8218(L/G)^{-0.6135}$ ลงในกราฟเดียวกับเส้นแอปโพรชที่ได้ ในขั้นตอนที่ 6 ได้กราฟทั้งสองเส้นตัดกัน ได้ L / G ที่จุดตัดนี้

8. ตรวจสอบคำตอบระหว่าง L / G ที่จุดตัด กับค่าที่คำนวณได้จากวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ ถ้าค่าแตกต่างกันให้สมมติค่าแอปโพรชใหม่ แล้วคำนวณซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 3 ถึง 7 จนกว่า L / G ที่จุดตัดจะเข้าใกล้ค่าที่คำนวณได้จากวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

สรุปผลการคำนวณแอปโพรช CWT และ HWT ภายใต้อุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ และพิสัยระบายความร้อนค่าต่างๆ ที่กำหนดให้ โดยพิจารณาที่ 90% 100% และ 110% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ ในตารางที่ 5 6 และ 7

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณแอปโพรช CWT และ HWT โดยใช้แผงขยายฟิล์มน้ำที่มี $KaV/L = 1.8218(L/G)^{-0.6135}$ ปริมาณน้ำหมุนเวียน 12,500 GPM

inlet WBT °C (°F)	Range °C (°F)	Required L/G	Approach °C	CWT °C	HWT °C
21.11 (70)	6.89 (12.41)	1.3606	5.42	26.53	33.42
23.89 (75)	6.89 (12.41)	1.3808	4.61	28.50	35.39
26.67 (80)	6.89 (12.41)	1.4028	3.86	30.53	37.42
29.44 (85)	6.89 (12.41)	1.4259	3.20	32.64	39.53
21.11 (70)	8.61 (15.51)	1.3763	6.27	27.38	35.99
23.89 (75)	8.61 (15.51)	1.3963	5.42	29.31	37.93
26.67 (80)	8.61 (15.51)	1.4178	4.56	31.23	39.84
29.44 (85)	8.61 (15.51)	1.4404	3.78	33.22	41.83
21.11 (70)	10.34 (18.61)	1.3922	7.17	28.28	38.62
23.89 (75)	10.34 (18.61)	1.4116	6.13	30.02	40.36
26.67 (80)	10.34 (18.61)	1.4322	5.16	31.83	42.17
29.44 (85)	10.34 (18.61)	1.4545	4.31	33.75	44.09

ตารางที่ 6 ผลการคำนวณแอปโพรช CWT และ HWT โดยใช้แผงขยายฟิล์มน้ำที่มี $KaV/L = 1.8218(L/G)^{-0.6135}$ ปริมาณน้ำหมุนเวียน 11,250 GPM

inlet WBT °C (°F)	Range °C (°F)	Required L/G	Approach °C	CWT °C	HWT °C
21.11 (70)	6.89 (12.41)	1.2186	4.78	25.89	32.78
23.89 (75)	6.89 (12.41)	1.2371	4.04	27.93	34.82
26.67 (80)	6.89 (12.41)	1.2572	3.35	30.02	36.91
29.44 (85)	6.89 (12.41)	1.2784	2.74	32.18	39.07
21.11 (70)	8.61 (15.51)	1.2317	5.61	26.72	35.33
23.89 (75)	8.61 (15.51)	1.2498	4.75	28.64	37.25
26.67 (80)	8.61 (15.51)	1.2695	3.95	30.62	39.23
29.44 (85)	8.61 (15.51)	1.2829	3.26	32.70	41.31
21.11 (70)	10.34 (18.61)	1.2444	6.35	27.46	37.80
23.89 (75)	10.34 (18.61)	1.2622	5.38	29.27	39.61
26.67 (80)	10.34 (18.61)	1.2813	4.50	31.17	41.51
29.44 (85)	10.34 (18.61)	1.3015	3.70	33.14	43.48

ตารางที่ 7 ผลการคำนวณแอปโพรช CWT และ HWT โดยใช้แผงขยายฟิล์มน้ำที่มี $KaV/L = 1.8218(L/G)^{-0.6135}$ ปริมาณน้ำหมุนเวียน 13,750 GPM

inlet WBT °C (°F)	Range °C (°F)	Required L/G	Approach °C	CWT °C	HWT °C
21.11 (70)	6.89 (12.41)	1.5037	6.05	27.16	34.05
23.89 (75)	6.89 (12.41)	1.5261	5.19	29.08	35.97
26.67 (80)	6.89 (12.41)	1.5498	4.39	31.06	37.95
29.44 (85)	6.89 (12.41)	1.5748	3.67	33.11	40.00
21.11 (70)	8.61 (15.51)	1.5227	7.07	28.18	36.79
23.89 (75)	8.61 (15.51)	1.5443	6.09	29.98	38.59
26.67 (80)	8.61 (15.51)	1.5679	5.16	31.83	40.44
29.44 (85)	8.61 (15.51)	1.5924	4.32	33.76	42.37
21.11 (70)	10.34 (18.61)	1.5416	7.96	29.07	39.41
23.89 (75)	10.34 (18.61)	1.5627	6.87	30.76	41.10
26.67 (80)	10.34 (18.61)	1.5851	5.83	32.50	42.84
29.44 (85)	10.34 (18.61)	1.6094	4.89	34.33	44.67

จากข้อมูลที่ใช้ในการลองผิดลองถูก ภายใต้อัตราการไหลของน้ำหมุนเวียน 90% 100% และ 110% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ และกำหนดค่าของอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ พิสัยระบายความร้อน อัตราส่วนการไหล และสมการบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มน้ำ

ผลการคำนวณในตารางที่ 5 6 และ 7 นำมาเขียนสรุป ไว้ในตารางที่ 8 9 และ 10

ตารางที่ 8 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ที่ 100% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ ตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

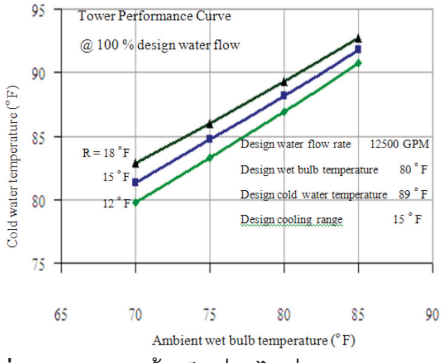
Range (° F)	Actual Range (° F)	Cold water temperature (° F)			
		WBT= 70 ° F	WBT= 75 ° F	WBT= 80 ° F	WBT= 85 ° F
12	12.4050	79.76	83.30	86.96	90.76
15	15.5063	81.28	84.76	88.21	91.80
18	18.6075	82.91	86.03	89.29	92.75

ตารางที่ 9 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ที่ 90% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ ตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

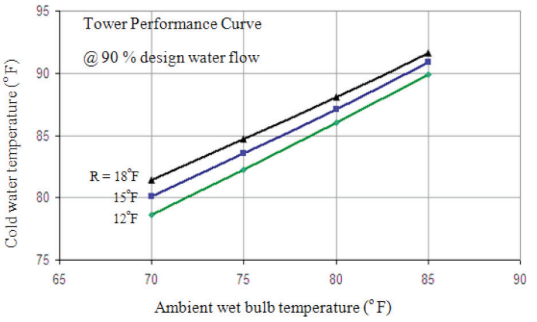
Range (° F)	Actual Range (° F)	Cold water temperature (° F)			
		WBT= 70 ° F	WBT= 75 ° F	WBT= 80 ° F	WBT= 85 ° F
12	12.4050	78.60	82.27	86.03	89.92
15	15.5063	80.09	83.55	87.11	90.85
18	18.6075	81.42	84.68	88.10	91.65

ตารางที่ 10 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ที่ 110% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ ตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

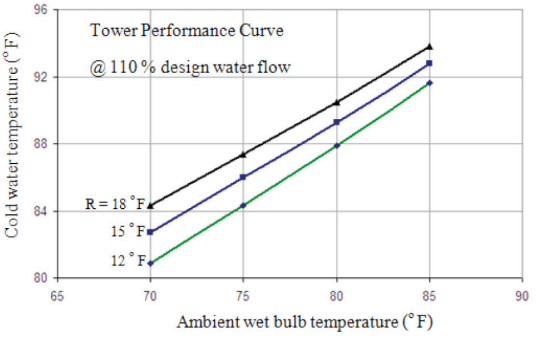
Range (° F)	Actual Range (° F)	Cold water temperature (° F)			
		WBT= 70 ° F	WBT= 75 ° F	WBT= 80 ° F	WBT= 85 ° F
12	12.4050	80.89	84.34	87.90	91.60
15	15.5063	82.73	85.96	89.29	92.78
18	18.6075	84.33	87.37	90.50	93.79



ภาพที่ 2 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ที่ 100% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ ตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่



ภาพที่ 3 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ที่ 90% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ ตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่



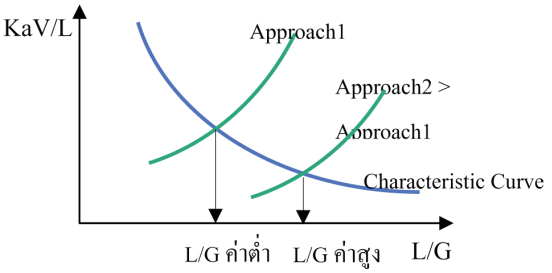
ภาพที่ 4 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ที่ 110% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ ตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

การทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่**ปริมาณน้ำหมุนเวียนคงที่หนึ่งๆ** (เช่นที่ 100% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ หรือที่ 90% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ หรือที่ 110% ของอัตราการไหลของน้ำค่าออกแบบ) ภายใต้**อุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศคงที่** พบว่า

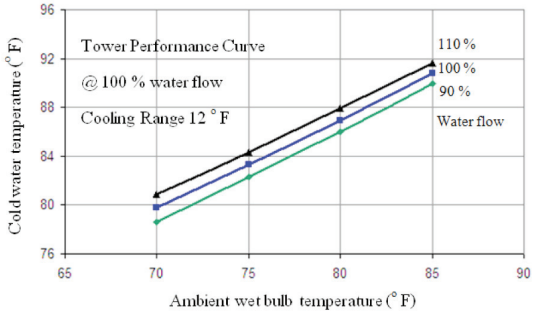
- การทำงานที่พิสัยระบายความร้อนค่าต่ำกว่านั้น ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำผ่านคูลลิ่งทาวเวอร์มีค่าต่ำ เมื่อน้ำแลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศ ทำให้อุณหภูมิทางออกของอากาศต่ำกว่า อากาศจึงมีความหนาแน่นมากกว่า ทำให้มวลอากาศไหลผ่านคูลลิ่งทาวเวอร์มากกว่า กล่าวคือคูลลิ่งทาวเวอร์ทำงานที่พิสัยระบายความร้อนค่าที่ต่ำกว่านั้น พบว่า L/G มีค่าต่ำ ซึ่ง

เปรียบเทียบกับการทำงานที่พิสัยระบายความร้อนค่าสูงกว่า

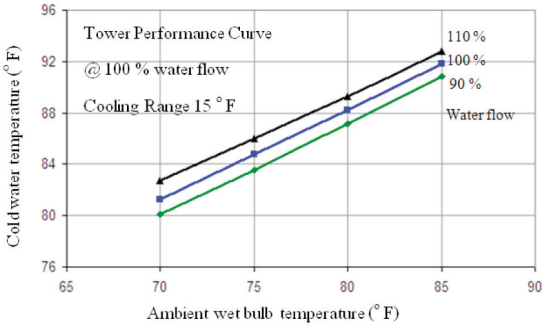
- เมื่อทราบสมการบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มน้ำ ใช้วิธีลองผิดลองถูก เพื่อหาค่าแอปโพรชจริงขณะทำงานที่พิสัยระบายความร้อนค่าต่ำนั้น (L/G ค่าต่ำ) พบว่าจุดตัดบนเส้นบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มน้ำที่ L/G ค่าต่ำกว่านั้น ให้เส้นแอปโพรชค่าต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับจุดตัดบนเส้นบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์มเดียวกันที่ L/G ค่าสูงกว่า ดังภาพที่ 5 แสดงว่าการทำงานที่พิสัยระบายความร้อนค่าต่ำนั้นให้อุณหภูมิน้ำเย็นที่ต่ำกว่า



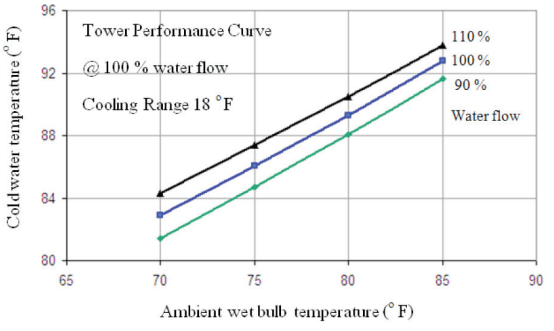
ภาพที่ 5 จุดตัดระหว่างเส้นแอปโพรชและเส้นบ่งลักษณะของแผงขยายฟิล์ม



ภาพที่ 6 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ ภายใต้พิสัยระบายความร้อน 12° F และอัตราการไหลของน้ำค่าต่างๆ โดยวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่



ภาพที่ 7 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ ภายใต้พิสัยระบายความร้อน 15 ° F และอัตราการไหลของน้ำค่าต่างๆ โดยวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่



ภาพที่ 8 อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ ภายใต้พิสัยระบายความร้อน 18 ° F และอัตราการไหลของน้ำค่าต่างๆ โดยวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่

5. สรุป

การศึกษานี้สามารถสร้างกราฟสมรรถนะการทำงานของคูลลิ่งทาวเวอร์ที่ได้มาจากการคำนวณตามวิธีระยะพิตช์ของพัดลมคงที่ กราฟสมรรถนะที่ได้พบว่า ภายใต้อุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศเดียวกัน ปริมาณน้ำหมุนเวียนที่แตกต่างกัน จะให้อุณหภูมิน้ำเย็นที่ทำได้ไม่เท่ากัน ถ้าใช้ปริมาณน้ำหมุนเวียนน้อยนั้น พบว่าคูลลิ่งทาวเวอร์จะให้อุณหภูมิน้ำเย็นที่ต่ำกว่า ไม่ว่าพิสัยระบายความร้อนจะเป็นเท่าใดก็ตาม นอกจากนี้ การทำงานภายใต้อัตราการไหลค่าเดียวกัน ภายใต้พิสัยระบายความร้อนค่าต่ำ พบว่าคูลลิ่งทาวเวอร์จะให้อุณหภูมิน้ำเย็นที่ต่ำกว่า ไม่ว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศจะเป็นเท่าใดก็ตาม

สัญลักษณ์

Appr ค่าแอปโพรช (ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเย็นกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศ)

C_w ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ 4.175 kJ/kg.K

CWT อุณหภูมิน้ำเย็นออกจากคูลลิ่งทาวเวอร์ (^{o}F)

HWT อุณหภูมิน้ำร้อนเข้าคูลลิ่งทาวเวอร์ (^{o} F)

h_{a1} เอนทัลปีของอากาศชื้นทางเข้าแผงขยายฟิล์มน้ำที่ inlet WBT (kJ/kg-dry air)

h_{S1} เอนทัลปีของอากาศอิ่มตัวที่อุณหภูมิน้ำร้อนทางเข้า (kJ/kg-dry air)

inlet WBT อุณหภูมิกระเปาะเปียกบรรยากาศหรืออุณหภูมิกระเปาะเปียกทางเข้าคูลลิ่งทาวเวอร์ (^{o}F)

KaV/L สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรของแผงขยายฟิล์มน้ำ

L/G อัตราส่วนการไหลน้ำต่ออากาศ หรือ อัตราส่วนของอัตราการไหลโดยมวลของน้ำต่ออัตราการไหลโดยมวลของอากาศ

$(L/G)_{max}$ ค่าสูงสุดของอัตราส่วนการไหลน้ำต่ออากาศ

R พิสัยระบายความร้อน

เอกสารอ้างอิง

[1] Cooling Tower Institute, Cooling Tower Performance Curves, 1967.

[2] Cooling Tower Thermal Design, Daeil Aqua Co., Ltd.

[3] Cheremisinoff N.P. and Cheremisinoff P.N. 1983. Cooling Towers (Selection, Design and Practice), Ann Arbor Press. The Butterworth Group , London,

[4] Hill G.B., Pring E.J. and Osborn P.D. 1990. Cooling Towers Principles and Practice. (Third edition) ,Butterworth-Heinemann Ltd., London

[5] Fulkerson R D. 1988. Comparative Evaluation of The Counter flow Cooling Tower Fills, CTI ,Paper no : TP88-05.