

การคำนวณสมรรถนะคูลิ่งทาวเวอร์แบบไหลสวนทางอย่างง่าย โดยอ้างอิงมาตรฐาน CTI A Simplified Method to Evaluate Counter Flow Cooling Tower using CTI Standard

ศุภวัฒน์ ตรีอุทก¹, วันชัย อัสวภูษิตกุล¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพฯ 10140
ติดต่อ: โทรศัพท์: 02-4709123, โทรสาร: 02-4709111, E-mail: wanchai.asv@kmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอวิธีการทดสอบสมรรถนะของคูลิ่งทาวเวอร์อย่างง่าย ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการทดสอบที่ยุ่งยากและความต้องการเครื่องมือการทดสอบที่มีความถูกต้องและความแม่นยำสูง ตามมาตรฐาน CTI มุ่งเน้นให้บุคคลทั่วไปที่ไม่มีความรู้เรื่องคูลิ่งทาวเวอร์สามารถใช้วิเคราะห์ขีดความสามารถของคูลิ่งทาวเวอร์ได้ วิธีการทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายที่นำเสนอจะนำไปใช้ในการประมาณค่าสมรรถนะการทำงานของคูลิ่งทาวเวอร์ที่จุดการทำงานต่างจากสภาวะออกแบบ (off-design) ข้อมูลการออกแบบคูลิ่งทาวเวอร์หรือข้อมูลที่ได้จากการทดสอบ จะถูกนำมาใช้เป็นจุดเริ่มต้นและขบวนการคำนวณตามมาตรฐาน CTI จะนำมาใช้ในการหาค่า Merkel number ที่สภาวะนอกจุดออกแบบ หรือหาค่าอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากคูลิ่งทาวเวอร์ โดยใช้เส้นความชัน(slope) ของเส้นคุณลักษณะของคูลิ่งทาวเวอร์(cooling tower characteristic curve) ทำให้รู้ว่คูลิ่งทาวเวอร์ยังสามารถทำงานภายใต้สภาวะที่กำหนด หรือควรทำการปรับปรุงคูลิ่งทาวเวอร์ โดยทั่วไปค่าความชัน n มีค่าระหว่าง 0.4 - 0.6 ซึ่งบทความที่นำเสนอจะวิเคราะห์ผลจากการประมาณค่า $n=0.5$ เพื่อดูผลความแม่นยำและขอบเขตการใช้งานกับสภาพอากาศที่เปลี่ยนแปลง โดยให้ค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศต่างจากสภาวะออกแบบอยู่ในช่วง $+3^{\circ}\text{C}$ / -17°C , อัตราการไหลของน้ำ $\pm 5\%$ และอุณหภูมิน้ำเข้าคูลิ่งทาวเวอร์ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ของสภาวะออกแบบ

คำสำคัญ: คูลิ่งทาวเวอร์, สมรรถนะ, มาตรฐาน CTI, ทฤษฎี Merkel, วิธีคำนวณอย่างง่าย

Abstract

This paper is present, a simplified method to evaluate cooling towers performance. The method could reduce requirement of complex procedure and that of high accuracy equipments in the measurement according to the CTI standard. The main purpose of the method was to help a person in checking the cooling tower capacity with no requirement of any knowledge about the cooling tower. A simple mathematical method was proposed to estimate the cooling tower performance at the off-design ambient conditions. The design (or measured) conditions were used to determine the operating characteristics for the cooling tower being considered. The CTI code calculation procedure of the Merkel number at off-design was applied to predicted outlet water temperature by using the slope of cooling tower characteristics curve. By this method, the tower operating capability was known. And the operator

could determine whether to continue using or improve the cooling tower. In general, the value of slope (n) is in a range of 0.4 – 0.6. Then, this method was presented applying a slope of 0.5 to evaluation of test results. Accordingly, the following limitations were considered to be adequate for practical use: air wet-bulb temperatures were within $+3^{\circ}\text{C}$ / -17°C of that design temperature, the water flow rates within $\pm 5\%$ of design flow rate, and inlet water temperatures within $\pm 2^{\circ}\text{C}$ of that design temperature.

Keywords: cooling tower, performance, CTI standard, Merkel theory, Simplified Method

1. บทนำ

ปัจจุบันเครื่องหล่อเย็นถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เครื่องหล่อเย็นที่ทำงานตามสมรรถนะที่ถูกออกแบบจะสามารถระบายความร้อนได้เพียงพอกับความต้องการ แต่เมื่อสภาวะการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไปและระยะเวลาการใช้งานเครื่องหล่อเย็นที่มากขึ้น จะทำให้สมรรถนะของเครื่องหล่อเย็นต่างไปจากสภาวะออกแบบ และอาจไม่สามารถระบายความร้อนได้เพียงพอกับความต้องการ ดังนั้น การทดสอบที่โรงงานจึงเป็นทางเลือกที่จะประกันสมรรถนะการทำงานของเครื่องหล่อเย็น ขบวนการทดสอบดังกล่าวมีขั้นตอนการทดสอบที่ยุ่งยากและความต้องการเครื่องมือการทดสอบที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำสูง ตามมาตรฐาน CTI ทำให้การทดสอบมีค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลานาน จึงควรทำการทดสอบเมื่อมีความจำเป็น

สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องหล่อเย็นมีความสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความต้องการทางความร้อน โดยสภาพอากาศที่ทำงานเป็นตัวกำหนดซึ่งอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศจะมีอิทธิพลต่อสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องหล่อเย็นโดยตรง การออกแบบเครื่องหล่อเย็นจะกำหนดตามอุณหภูมิกระเปาะเปียกค่าหนึ่ง แต่สภาพอากาศมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาและสถานที่ติดตั้ง ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงสภาวะของอากาศจะมีผลต่อสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องหล่อเย็น ทำให้เครื่องหล่อเย็นที่จุดการทำงานต่างจากสภาวะออกแบบ(off-design) โดยทั่วไปเครื่องหล่อเย็นจะระบายความร้อนออกจากระบบได้ตามสมรรถนะทางความร้อนที่ออกแบบไว้เมื่ออุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศต่ำกว่า หรือ เท่ากับ

อุณหภูมิที่ออกแบบไว้ แต่ถ้าสภาพอากาศสูงเกินอุณหภูมิกระเปาะเปียกที่ออกแบบไว้ สมรรถนะทางความร้อนของเครื่องหล่อเย็นจะลดลง ผลทำให้เครื่องหล่อเย็นไม่สามารถระบายความร้อนได้เพียงพอกับความต้องการ

ข้อมูลการออกแบบหรือข้อมูลการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องหล่อเย็น ตามมาตรฐาน CTI สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการพิจารณาการทำงานและสมรรถนะการทำงานของเครื่องหล่อเย็น เพื่อทำนายสภาวะการทำงานของเครื่องหล่อเย็น ภายใต้สภาวะอากาศที่เปลี่ยนแปลง [2] อีกทั้งสามารถวิเคราะห์ขีดความสามารถทางความร้อนของเครื่องหล่อเย็น เอกสารนี้นำข้อมูลที่ได้จาก ศุภวัฒน์ ตรีอุทก และ วันชัย อัครภูมิติกุล [2] ซึ่งอธิบายและแสดงวิธีการทำนายสภาวะการทำงานของเครื่องหล่อเย็นเมื่อสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง และการวิเคราะห์ขีดความสามารถสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องหล่อเย็นนำเสนอในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาวะการทำงานของเครื่องหล่อเย็นเพื่อลดขั้นตอนการคำนวณค่า KaV/L สำหรับผู้ที่ไม่คุ้นเคยกับตัวแปรนี้ โดยนำข้อมูลการออกแบบหรือข้อมูลการทดสอบสมรรถนะ มาใช้เพื่อทำนายสภาวะการทำงานและขีดความสามารถสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องหล่อเย็นโดยผลความถูกต้องแม่นยำขึ้นกับค่า n ซึ่งเป็นค่าความชันของเส้นคุณลักษณะของเครื่องหล่อเย็น การทำนายที่รู้ค่า n อย่างถูกต้อง มีความแม่นยำเมื่อเทียบกับผลการทดสอบตามมาตรฐาน CTI ที่ค่าผิดพลาดไม่เกิน $\pm 3.15\%$ [2] แต่การใช้งานจริงไม่สามารถรู้ค่า n ของเครื่องหล่อเย็นที่ใช้งานอยู่ได้เนื่องจากเป็นข้อมูลเฉพาะของบริษัทที่ผลิต วิธีการ

เดียวที่รู้ได้คือทำการทดสอบตามมาตรฐาน CTI ที่ค่า L/G ต่างกัน ดังนั้นการประมาณค่า n เพื่อใช้ทำนายสภาวะการทำงานของเครื่องทำความเย็นเมื่อสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง และการวิเคราะห์ขีดความสามารถสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำความเย็นจึงมีความจำเป็น

จุดมุ่งหมายของเอกสารฉบับนี้ เพื่อนำเสนอวิธีการทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำความเย็นอย่างง่าย ซึ่งสามารถลดขั้นตอนการทดสอบที่ยุ่งยากและความต้องการเครื่องมือการทดสอบที่มีความถูกต้องและมีความแม่นยำสูง ตามมาตรฐาน CTI โดยมุ่งเน้นให้บุคคลทั่วไปสามารถใช้วิเคราะห์ขีดความสามารถของเครื่องทำความเย็นได้ การวิเคราะห์ขีดความสามารถของเครื่องทำความเย็นตามวิธีนี้จะวิเคราะห์จากความสัมพันธ์ของตัวแปร Range (ผลต่างของอุณหภูมิเข้า-ออกเครื่องทำความเย็น) และ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ (T_{wb}) ทำให้รู้ว่าการทำความเย็นยังสามารถทำงานภายใต้สภาวะที่กำหนด หรือควรทำการปรับปรุงเครื่องทำความเย็น นอกจากนี้ยังแสดงผลจากการประมาณค่า $n=0.5$ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำนายสภาวะการทำงานและขีดความสามารถสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำความเย็น

2. ทฤษฎี

สมรรถนะของเครื่องทำความเย็นในเทอมของ Tower characteristic ratio (KaV/L) หาได้จากทฤษฎีของ Merkel โดยที่ทฤษฎีนี้วิเคราะห์จากผิวของน้ำมี film บางๆเคลือบอยู่ โดย film จะมีสภาวะเป็นอากาศอิ่มตัวและมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิ bulk ของน้ำ อากาศรอบๆ film ของน้ำมีอุณหภูมิต่ำกว่า film ของน้ำ ทำให้ค่า Enthalpy ทางด้านผิวเคลือบน้ำ (Water film) สูงกว่าค่า Enthalpy ทางด้านอากาศ ความแตกต่างของอุณหภูมิและ Enthalpy นี้เองจะเป็นแรงขับ (Driving force) ให้เกิดการถ่ายเทความร้อนแฝง (Latent heat) และความร้อนสัมผัส (Sensible heat) จากน้ำไปยังอากาศ จึงทำให้น้ำมีอุณหภูมิลดลง โดยมี

สมการพื้นฐานในการคำนวณสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น (KaV/L) ดังนี้ [5,6]

$$\frac{KaV}{L} = c_{pw} \int_{T_{w,o}}^{T_{w,i}} \frac{dT_w}{h_w - h} \quad (1)$$

ตัวแปรด้านขวามือของสมการ (1) เป็นตัวแปรอิสระที่ขึ้นอยู่กับสภาวะทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของน้ำและอากาศที่ไหลผ่านเครื่องทำความเย็น และเป็นตัวแปรอิสระที่สามารถเปลี่ยนแปลงค่าออกแบบสมรรถนะของเครื่องทำความเย็น (KaV/L) ได้ การ Integrate ค่าในสมการ (1) สามารถคำนวณโดยใช้วิธีของ Tchebyshev's[4] ตามมาตรฐาน CTI [1] ดังนี้

$$\int_{-1}^1 f(x) dx = \frac{2}{m} \sum_{j=1}^m f(x_j) \quad (2)$$

เมื่อ x_j เป็นตัวแสดงค่าจริงของ Tchebyshev quadrature polynomial โดยขึ้นกับค่า m สำหรับ $m = 4$ ค่า x_j ให้เป็น ± 0.187592 และ ± 0.794654 จากสมการ (1) ประยุกต์วิธีการของ Tchebyshev's ในการคำนวณสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำความเย็นได้ดังนี้

$$\frac{KaV}{L} = c_{pw} \left(\frac{T_{w,i} - T_{w,o}}{4} \right) \sum_{j=1}^4 \frac{1}{\Delta h_j} \quad (3)$$

โดยรายละเอียดขั้นตอนการคำนวณสามารถศึกษาได้จากมาตรฐาน CTI[1] และคุณสมบัติของอากาศอิ่มตัวดูได้จาก Toshihiko Fujita, Shunichi Tezuka[6]

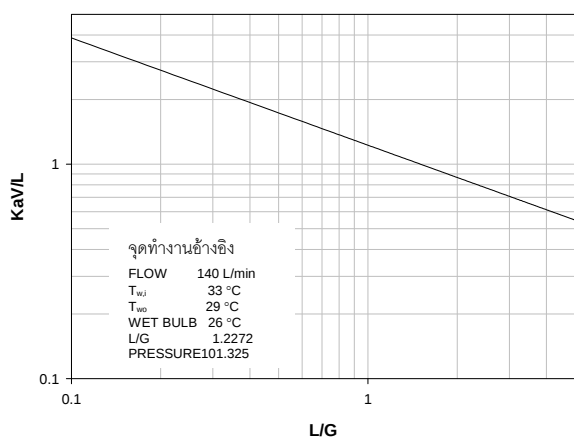
2.1 เส้นลักษณะเฉพาะของเครื่องทำความเย็น

ค่า Integrate ในสมการ (1) โดยทั่วไปจะหมายถึงลักษณะเฉพาะของเครื่องทำความเย็น, KaV/L เป็นตัวแปรไร้มิติ ซึ่งบอกถึงความยากในการทำหน้าที่ในการระบายความร้อน โดยผู้ออกแบบเครื่องทำความเย็นจะต้องเลือกใช้อุปกรณ์ให้เหมาะสม และในทางปฏิบัติจะเป็นตัวแปรในการตรวจสอบสมรรถนะทางความร้อน สภาวะการทำงานของเครื่องทำความเย็นจะมีการเปลี่ยนแปลงเกือบตลอดเวลา และจะต่างจากจุดออกแบบ ตัวแปรที่

เปลี่ยนแปลงน้อยมากคือ อุณหภูมิกระเปาะเปียก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกระเปาะเปียกจะมีผลต่อ Range (ผลต่างของอุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้ากับน้ำออก จากเครื่องทาวเวอร์) และ Approach (ผลต่างของ อุณหภูมิระหว่างอุณหภูมิน้ำออกกับอุณหภูมิกระเปาะเปียก) แต่ค่าลักษณะเฉพาะของเครื่องทาวเวอร์ (KaV/L) จะไม่เปลี่ยน โดย KaV/L เป็นฟังก์ชันของ L/G ตามความสัมพันธ์[1]

$$\frac{KaV}{L} = C \left(\frac{L}{G} \right)^{-n} \quad (4)$$

สำหรับ C และ n เป็นค่าคงตัวในเครื่องทาวเวอร์ โดยค่า n ของเครื่องทาวเวอร์ชนิดพัดลมดูดทางกลแบบไหลสวนทาง โดยทั่วไปมีค่า $n = 0.4 - 0.6$ [3] และค่า C ขึ้นอยู่กับลักษณะของเครื่องทาวเวอร์แต่ละตัว สำหรับเครื่องทาวเวอร์ใดๆ ที่ทราบค่า C และ n การทำนายสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทาวเวอร์ที่จุดทำงานใดๆ สามารถทำได้ โดยเอกสารนี้ใช้ค่า $n=0.5$ เพื่อทำนายสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทาวเวอร์ ดังแสดงในกราฟรูปที่ 1

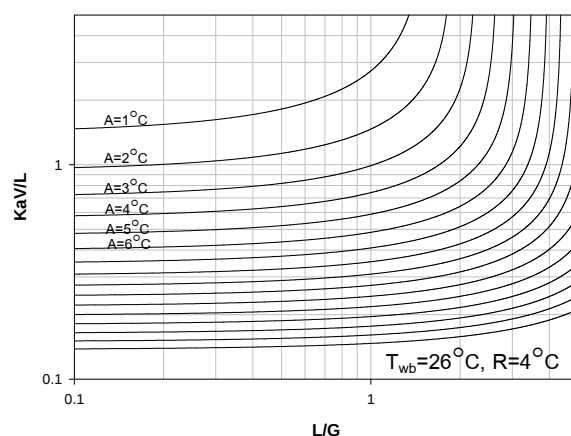


รูปที่ 1 กราฟลักษณะเฉพาะของเครื่องทาวเวอร์

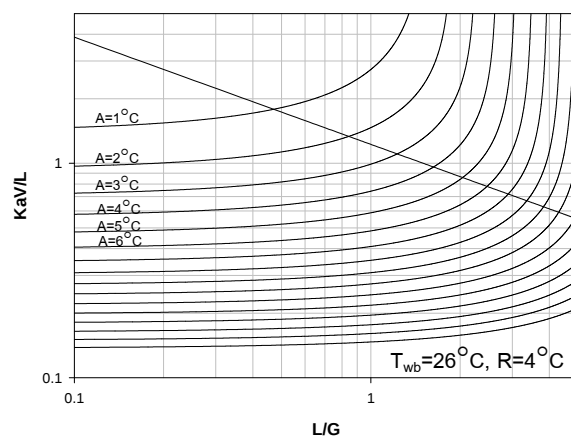
2.2 กราฟความต้องการของเครื่องทาวเวอร์

กราฟความต้องการของเครื่องทาวเวอร์(Demanded curve) เป็นกราฟความความสัมพันธ์ระหว่างค่า KaV/L กับ L/G ตามสมการ (3) โดยเส้นกราฟที่ได้จะทำการคำนวณและพล็อตที่สภาวะการทำงานต่างๆ ตามค่าอุณหภูมิกระเปาะเปียก และ Range ที่กำหนด

($R = T_{w,i} - T_{w,o}$) ดังแสดงในรูปที่ 2 ในรูปของค่า Approach ($A = T_{w,o} - t_{wb}$) กราฟที่ได้เป็นตัวอย่างบอกถึงคุณลักษณะของเครื่องทาวเวอร์ที่ต้องการที่สภาวะการทำงานที่กำหนด ดังนั้นจุดตัดของเส้นกราฟในสมการที่ (4) และกราฟความต้องการของเครื่องทาวเวอร์ คือจุดทำงานของเครื่องทาวเวอร์ ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 กราฟความต้องการของเครื่องทาวเวอร์

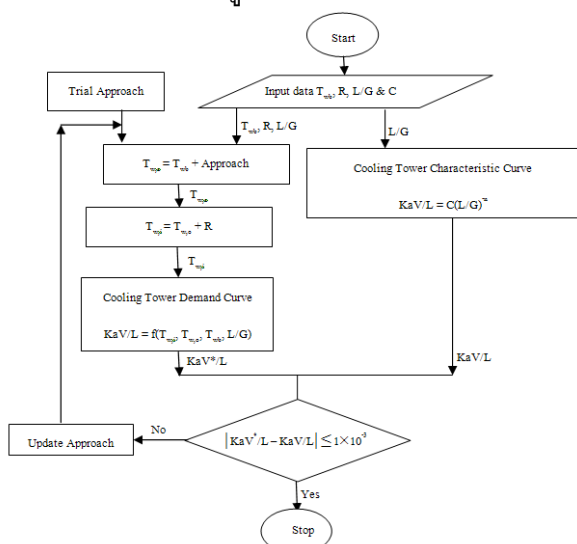


รูปที่ 3 กราฟสภาวะการทำงานของเครื่องทาวเวอร์ที่สภาวะอากาศที่ต้องการทำนายผล

2.3 การทำนายสภาวะการทำงานของเครื่องทาวเวอร์

กราฟรูปที่ 3 เป็นผลของการพล็อตกราฟลักษณะเฉพาะของเครื่องทาวเวอร์ร่วมกับกราฟความต้องการของเครื่องทาวเวอร์ ซึ่งจุดตัดของกราฟแต่ละจุดบอกถึงจุดทำงานของเครื่องทาวเวอร์ที่สภาวะอากาศนั้นๆ เมื่อทำการพล็อตกราฟลักษณะเฉพาะร่วมกับกราฟความต้องการของเครื่องทาวเวอร์ที่สภาวะอากาศ

เปลี่ยนแปลง กราฟที่ได้สามารถรู้สภาวะการทำงาน
ของคูลิ่งทาวเวอร์เมื่อสภาวะอากาศเปลี่ยนแปลง
เช่นกัน อย่างไรก็ตามการหาจุดตัดของกราฟมีความ
ยุ่งยาก ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการคำนวณเพื่อ
หาจุดทำงานของคูลิ่งทาวเวอร์เมื่อสภาวะอากาศ
เปลี่ยนแปลง เมื่อรู้จุดออกแบบหรือข้อมูลการทดสอบ
ของคูลิ่งทาวเวอร์ สามารถคำนวณเส้นลักษณะเฉพาะ
ของคูลิ่งทาวเวอร์ได้จากสมการ (4) (เอกสารนี้ใช้ค่า
 $n=0.5$) ตามขั้นตอนในรูปที่ 4 เป็นการคำนวณเส้น
ความต้องการของคูลิ่งทาวเวอร์จากสมการ (3) เพื่อได้
ค่า KaV/L ที่เท่ากับสมการ (4) โดยค่า L/G มีค่า
เท่ากัน ผลที่ได้คือรู้ค่า $T_{w,i}$, $T_{w,o}$, A เมื่อสภาวะ
อากาศเปลี่ยนแปลง นำข้อมูลที่ได้พล็อตในรูป
ความสัมพันธ์ที่ง่ายดังรูปที่ 9 - 12



รูปที่ 4 ไตอะแกรมขั้นตอนการคำนวณของโปรแกรม
คอมพิวเตอร์เพื่อหาจุดทำงานของคูลิ่งทาวเวอร์แบบไหล
สวนทางกัน

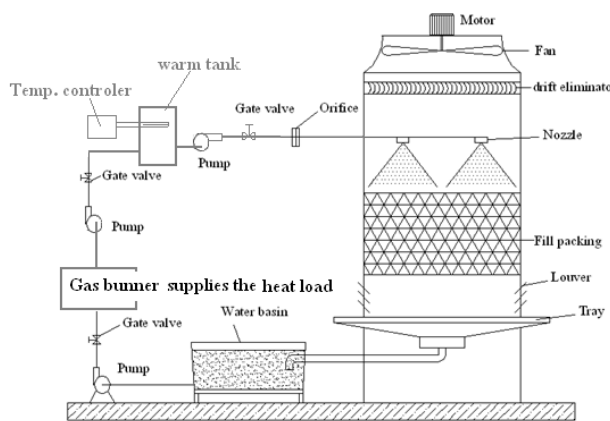
3 การทดสอบสมรรถนะทางความร้อน ของคูลิ่งทาวเวอร์อย่างง่าย

3.1 เครื่องมือ

คูลิ่งทาวเวอร์แบบไหลสวนทางถูกใช้เพื่อทดสอบ
สมรรถนะทางความร้อนของคูลิ่งทาวเวอร์ ซึ่งมี
ลักษณะรูปร่างโครงสร้างเป็นสี่เหลี่ยม (square type)
ขนาด 1000mm × 1000mm ความสูง 3350mm โดย

สามารถปรับเปลี่ยนความสูงของแผงกระจายละอองน้ำ
ได้ถึง 1500mm โดยข้อมูลสภาวะการทำงานของคูลิ่ง
ทาวเวอร์แสดงดังตารางที่ 1 ไตอะแกรมชุดทดสอบ
แสดงดังรูปที่ 5 หัวฉีดซึ่งถูกติดตั้งด้านบนของคูลิ่ง
ทาวเวอร์ ทำหน้าที่กระจายน้ำให้ทั่วพื้นที่หน้าตัดของ
แผงกระจายละอองน้ำ โดยความสูงระหว่างพื้นที่ได้
แผงกระจายละอองน้ำกับถาดรับน้ำสูง 400mm(rain
zone) อัตราการไหลของน้ำถูกส่งเข้าหัวฉีดโดยปั้มน้ำ
ที่ควบคุมอัตราการไหลโดย Glove Valve และวัด
อัตราการไหลโดย Orifice Flow meter ความร้อน
จากเตาแก๊ส ขนาด 70kW จ่ายให้กับน้ำที่หมุนเวียนใน
ระบบ ถึงพักน้ำอุ่นควบคุมอุณหภูมิน้ำให้คงที่ค่าหนึ่ง
โดย heater ขนาด 9kW สองตัว ก่อนจ่ายเข้าสู่คูลิ่ง
ทาวเวอร์ ความเร็วของอากาศที่ทางออกคูลิ่งทาวเวอร์
วัดโดย Anemometer เพื่อใช้คำนวณอัตราการไหล
ของอากาศที่ไหลผ่านคูลิ่งทาวเวอร์ อุณหภูมิเกเปาะ
เปียก, เกเปาะแห้งของอากาศ, อุณหภูมิน้ำทางเข้า
และออก คูลิ่งทาวเวอร์ วัดโดย RTD temperature
probe เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังตารางที่ 2
ตารางที่ 1 สภาวะการทำงานอ้างอิงของคูลิ่งทาวเวอร์

สภาวะการทำงานอ้างอิง		
อัตราการไหลของน้ำ(G)	140	L/min
อุณหภูมิน้ำทางเข้า ($T_{w,i}$)	33	°C
อุณหภูมิน้ำทางออก ($T_{w,o}$)	29	°C
อุณหภูมิเกเปาะเปียก ($T_{wb,i}$)	26	°C
อุณหภูมิเกเปาะแห้ง ($T_{db,i}$)	33	°C
กำลังพัดลม	350	w
Barometric press.	1.013	bar
L/G	1.2272	



รูปที่ 5 ชุดทดสอบสมรรถนะคูลิ่งทาวเวอร์

ตารางที่ 2 เครื่องมือวัด

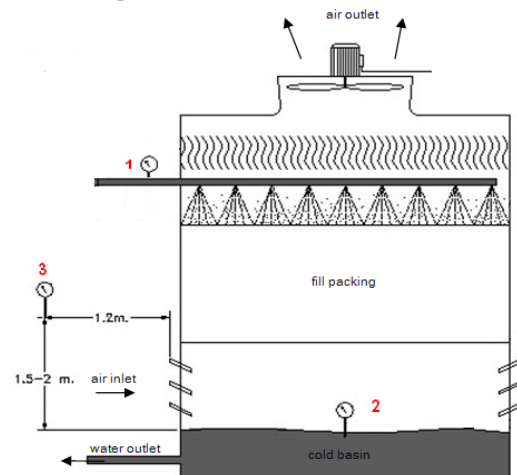
การวัด	เครื่องมือ	Accuracy	Resolution
G	orifice	-	1 mm _{Hg}
$T_{w,i}$, $T_{w,o}$	RTD temp. probe	-	0.1 °C
T_{wb}	wet bulb instrument	±3%RH	0.1%RH
T_{db}	wet bulb instrument	±0.8°C	0.1°C
ความเร็วลม	Anemometer	± 2 %	0.1 m/s
กำลังไฟฟ้า	Multi meter	-	1Volt, 0.1A

3.2 การดำเนินงานทดสอบ

ทดสอบสมรรถนะทางความร้อนของคูลิ่งทาวเวอร์ตามมาตรฐาน CTI และคำนวณขีดความสามารถตามมาตรฐาน CTI เพื่อใช้ยืนยันความถูกต้องของข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ขีดความสามารถของคูลิ่งทาวเวอร์โดยวิธีการทดสอบอย่างง่าย ซึ่งวิธีการทดสอบอย่างง่ายจะนำข้อมูลในส่วนของคุณค่า $T_{w,i}$, $T_{w,o}$ และ T_{wb} มาใช้เพื่อการวิเคราะห์ขีดความสามารถและสภาวะการทำงานของคูลิ่งทาวเวอร์ เอกสารนี้ขอกล่าวเฉพาะรายละเอียดของการนำข้อมูลการทดสอบอย่างง่ายมาใช้วิเคราะห์ผล โดยรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบตามมาตรฐาน CTI ศึกษาได้จากมาตรฐาน CTI[1]

ทำการทดสอบโดยควบคุมอุณหภูมิ $T_{w,i} = 33$ °C, $L/G = 1.25$ (สภาวะเปลี่ยนแปลงไม่เกิน ±5% ของสภาวะการทำงานอ้างอิง) โดยทดสอบที่สภาวะอากาศที่ต่างกัน เมื่ออุณหภูมิเข้าสู่สภาวะสมดุล (steady

state) ทำการเก็บค่าอุณหภูมิน้ำทางเข้า-ออกคูลิ่งทาวเวอร์ และอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ (T_{wb}) ทำการคำนวณค่า $\text{Range}(T_{w,i} - T_{w,o})$ นำค่า R, T_{wb} ตรวจสอบอัตราการไหลของน้ำ จากกราฟรูปที่ 7 เมื่อรู้อัตราการไหลของน้ำว่าอยู่ในช่วงใช้งาน ($L \pm 5\%$) นำค่า R, T_{wb} วิเคราะห์ขีดความสามารถของคูลิ่งทาวเวอร์ได้จากกราฟรูปที่ 8



รูปที่ 6 วิธีการและตำแหน่งการเก็บข้อมูลการทดสอบอย่างง่าย 1) อุณหภูมิน้ำเข้า, 2) อุณหภูมิน้ำออก, 3) อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ

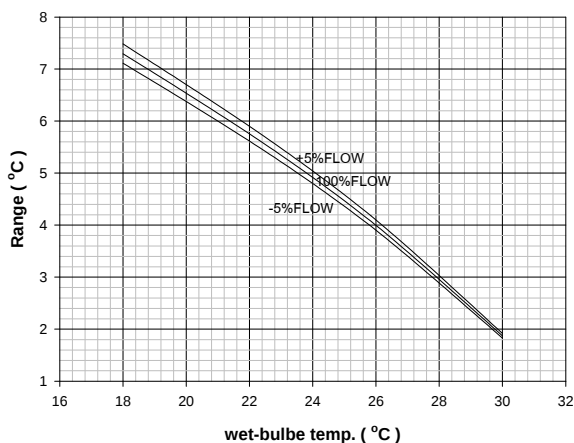
4 การใช้งานและความแม่นยำของข้อมูล

วิธีการวิเคราะห์ขีดความสามารถโดยวิธีการทดสอบอย่างง่าย ช่วงการใช้งานสามารถเปลี่ยนแปลงจากสภาวะออกแบบได้ ดังนี้ อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอยู่ในช่วง +3°C / -17°C, อัตราการไหลของน้ำ ±5% และอุณหภูมิน้ำเข้าคูลิ่งทาวเวอร์ ±2°C โดยผลของการประมาณค่า $n = 0.5$ (กรณีสมมติว่าไม่ทราบค่า n จากการออกแบบ) โดยเปรียบเทียบกับช่วงของค่า n ซึ่งอยู่ช่วงระหว่าง 0.4-0.6 สามารถสรุปค่าผิดพลาดจากการประมาณค่า $n = 0.5$ ได้ดังนี้ $KaV/L \pm 1\%$, $T_{w,i} \pm 1\%$, $T_{w,o} \pm 1\%$ และ $\text{Capacity} \pm 1\%$ ผลของการวิเคราะห์ขีดความสามารถทางความร้อนของคูลิ่งทาวเวอร์โดยการทดสอบตามมาตรฐาน CTI เมื่อเทียบกับการวิเคราะห์จากการทดสอบอย่างง่าย (ประมาณค่า $n = 0.5$) มีค่าผิดพลาดอยู่ในช่วง ± 4.5% แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งสอดคล้องกับค่าผิดพลาดจากการวัด ± 6.5%[2]

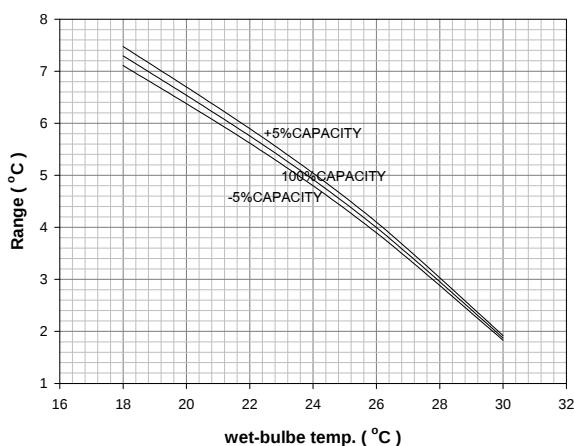
5 ผลการทำนายที่ค่า $n = 0.5$

ผลการทำนายสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทำความเย็น ถูกนำเสนอผลให้จ่ายต่อความเข้าใจดังรูปที่ 7, 8, 9, 10, 11 และ 12 ซึ่งแต่ละกราฟมีความสัมพันธ์ของข้อมูลที่ต่างกันเพื่อความสะดวกต่อการใช้งาน

สามารถตรวจเช็คอัตราการไหลของน้ำ สามารถทำงานว่าทำงานอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของสภาวะออกแบบ โดยวิเคราะห์จากกราฟรูปที่ 7 ซึ่งกราฟมีความสัมพันธ์ระหว่างค่า Range กับอุณหภูมิกระเปาะเปียก เมื่อสภาวะทำงานของเครื่องทำความเย็นมีอัตราการไหลของน้ำอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของสภาวะออกแบบการทำนายขีดความสามารถของเครื่องทำความเย็นสามารถทำได้ โดยวิเคราะห์จากกราฟรูปที่ 8

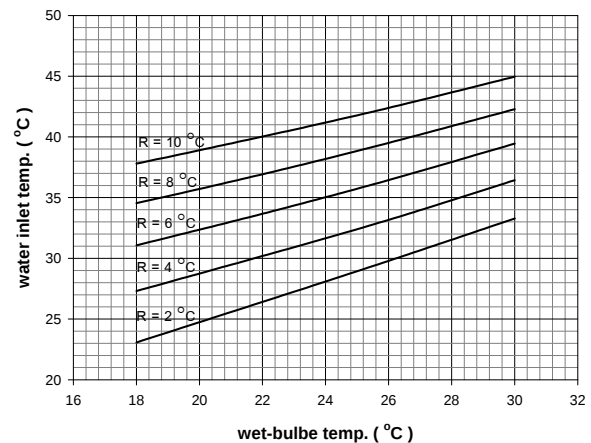


รูปที่ 7 แสดงกราฟวิเคราะห์อัตราการไหลของน้ำของเครื่องทำความเย็น ที่ $T_{w,i} = 33^{\circ}\text{C}$

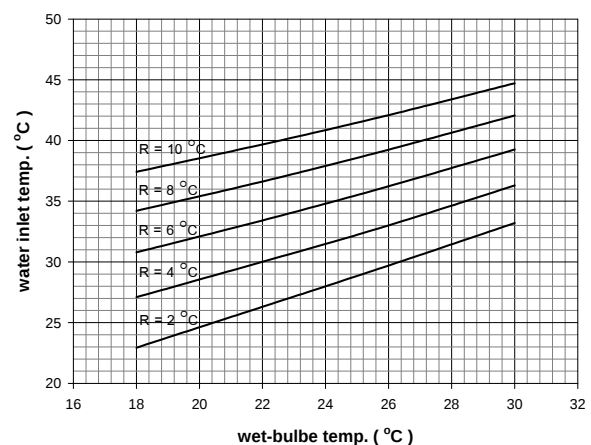


รูปที่ 8 แสดงกราฟวิเคราะห์ขีดความสามารถของเครื่องทำความเย็น ที่ $T_{w,i} = 33^{\circ}\text{C}$

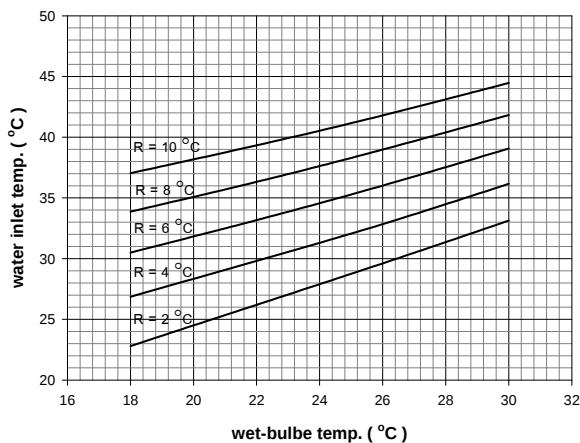
เมื่อสภาวะของอุณหภูมิกระเปาะเปียกเปลี่ยนแปลงโดยอัตราการไหลของน้ำเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของสภาวะการทำงานอ้างอิง สามารถทำนายสภาวะการทำงานของเครื่องทำความเย็นได้จากรูปที่ 9, 10 และ 11 ซึ่งกราฟแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก



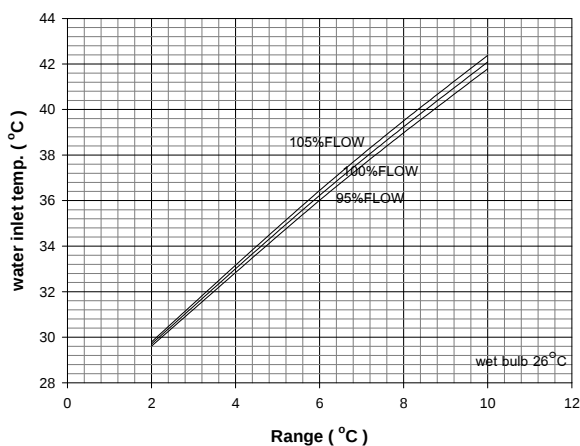
รูปที่ 9 แสดงการทำนายผลอุณหภูมิน้ำทางเข้า ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิกระเปาะเปียก ที่สภาวะอัตราการไหลของน้ำ 105% ของจุดการทำงานอ้างอิง



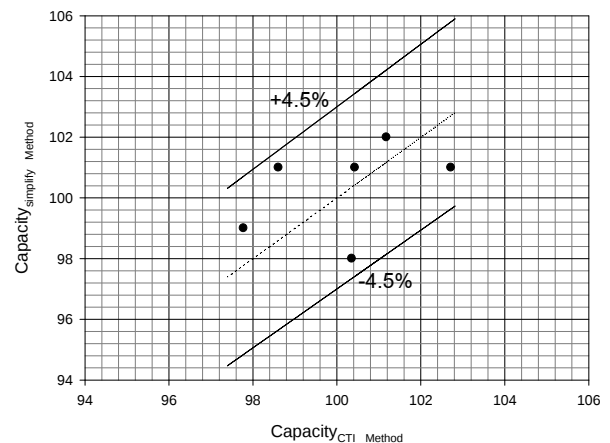
รูปที่ 10 แสดงการทำนายผลอุณหภูมิน้ำทางเข้า ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิกระเปาะเปียก ที่สภาวะอัตราการไหลของน้ำที่จุดการทำงานอ้างอิง



รูปที่ 11 แสดงการทำนายผลอุณหภูมิทางเข้า ที่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิกระเปาะเปียก ที่สภาวะ อัตราการไหลของน้ำ 95% ของจุดการทำงานอ้างอิง เมื่อสภาวะของ อัตราการไหลของน้ำ เปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วง $\pm 5\%$ ของสภาวะการทำงาน อ้างอิง สามารถทำนายสภาวะการทำงานของเครื่องทาวเวอร์ที่สภาวะอุณหภูมิกระเปาะเปียกเท่ากับ 26°C โดยกราฟรูปที่ 12 ซึ่งกราฟแสดงในรูปความสัมพันธ์ ระหว่างอุณหภูมิทางเข้ากับค่า Range



รูปที่ 12 แสดงการทำนายผลอุณหภูมิทางเข้าที่เปลี่ยนแปลงตาม Range ที่สภาวะอุณหภูมิกระเปาะเปียกเท่ากับ 26°C



รูปที่ 13 เปรียบเทียบขีดความสามารถทางความร้อน ของเครื่องทาวเวอร์ระหว่างผลการทดสอบตามมาตรฐาน CTI กับผลการทำนายโดยการทดสอบอย่างง่าย

6.สรุป

การคำนวณสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทาวเวอร์ทางกลแบบไหลสวนทาง (Mechanical draft counterflow) ในทางปฏิบัติ ตามวิธีของ CTI มีความแม่นยำเพียงพอ ในกรณีที่สภาวะการทำงานเปลี่ยนไป การทำนายสมรรถนะการทำงานของเครื่องทาวเวอร์ที่ทราบค่าจุดออกแบบ สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณ และเขียนกราฟที่ตรงกับสภาวะการใช้งานจริง ดังเช่นกราฟรูปที่ 8 สามารถนำไปใช้ประเมินขีดความสามารถสมรรถนะทางความร้อนของเครื่องทาวเวอร์ โดยวิธีการทดสอบอย่างง่าย เมื่อเครื่องทาวเวอร์ทำงานอยู่ในช่วงที่ต่างจากจุดออกแบบ หรือสภาวะการทำงานอ้างอิงที่ทราบค่า โดยค่าความต่างของอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศอยู่ในช่วง $+3^{\circ}\text{C} / -17^{\circ}\text{C}$, อัตราการไหลของน้ำ $\pm 5\%$ และอุณหภูมิทางเข้าเครื่องทาวเวอร์ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ซึ่งค่าผิดพลาดจากการทดสอบอย่างง่ายเมื่อให้ค่า $n = 0.5$ เทียบกับการทดสอบตามมาตรฐาน CTI มีค่า $\pm 4.5\%$

7. รายการสัญลักษณ์

KaV/L Tower characteristic

L อัตราการไหลของน้ำ (kg/s)

G อัตราการไหลของอากาศ (kg/s)

L/G สัดส่วนอัตราการไหลของน้ำต่ออากาศ

n ค่าความชื้นของเส้นคุณลักษณะของคูลิ่งทาวเวอร์

$T_{w,i}$ อุณหภูมิน้ำทางเข้า ($^{\circ}\text{C}$)

$T_{w,o}$ อุณหภูมิน้ำทางออก ($^{\circ}\text{C}$)

t_{wb} อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ ($^{\circ}\text{C}$)

A หรือ Approach อุณหภูมิแตกต่างระหว่าง $T_{w,o}$ กับ t_{wb}

R หรือ Range อุณหภูมิแตกต่างระหว่าง $T_{w,i}$ กับ $T_{w,o}$

C_{pw} ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (KJ/kg K)

h_w Enthalpy of water at saturated wet bulb

temperature (kJ/kg dry air)

h Enthalpy of air (kJ/kg dry air)

8. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย(สกว.) สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการเชื่อมโยงภาคการผลิตกับงานวิจัย ทุน สกว.-อุตสาหกรรม และบริษัทไทยคูลิ่งเทอาเออร์ ที่ให้คำปรึกษา และสนับสนุนข้อมูลการคำนวณ

9. เอกสารอ้างอิง

- [1] CTI Code Tower (1990), "Acceptance Test Code for Water-Cooling Tower", CTI Code ATC-105, Cooling Tower Institute.
- [2] ศุภวัฒน์ ตรีอุทก และ วันชัย อัครภูษิตกุล(2553). การคำนวณวิสัยสามารถสมรรถนะทางความร้อนของคูลิ่งทาวเวอร์แบบไหลสวนทาง, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย, TSF021
- [3] Baker, D.,1984, "Cooling Tower Performance," Chemical Publishing Co. Inc, New York
- [4] Mohiuddin, A.K.M.,Kant K.(1995), "Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers",Int J. Refrig, Vol. 19, No. 1, Paper No. 43 – 60.
- [5] Stephen A. Leeper(1981), "Wet Cooling Tower: 'Rule-of-Thumb' Design and Simulation", U.S. Department of Energy Assistant Secretary for Resource Application, Office of Geothermal, under DOE Contract No. DE-AC07-76ID01570.

- [6] Toshihiko Fujita, Shunichi Tezuka (1984), "Calculations on Thermal Performance Capability of Mechanical Draft Cooling Towers", Bulletin of JSEM, Vol. 27, No. 225, Paper No. 225 – 18.