บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.1 ระบบของ Cooling Tower

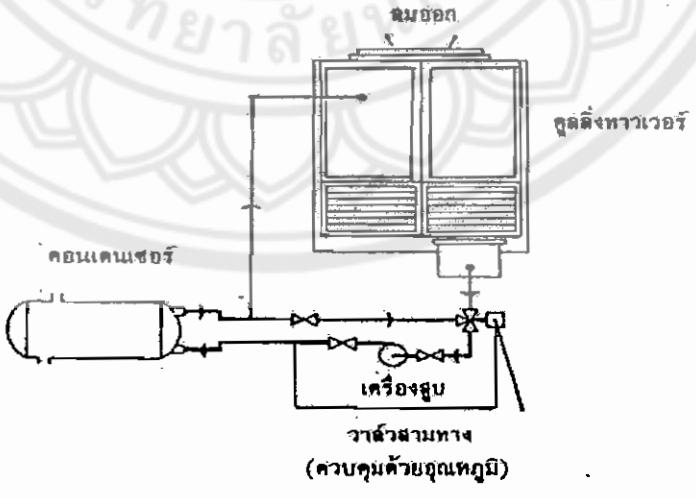
Cooling Tower เป็นอุปกรณ์กำจัดความร้อนส่วนเกินในกระบวนการต่างๆ โดยใช้น้ำเป็นตัวแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งน้ำร้อนจะถูกปั๊มขึ้นไปที่ด้านบนของหอ จากนั้นจะปล่อยลงมาด้านล่าง ขณะเดียวกันจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศทำให้อุณหภูมิของน้ำลดลง

Cooling Tower ที่ใช้ในระบบต่างๆ

ในกระบวนการผลิตจำเป็นต้องมีการควบคุมระดับอุณหภูมิของผลิตภัณฑ์และตัวอุปกรณ์ที่ใช้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องอาศัย Cooling Tower กับระบบเหล่านั้นด้วย เช่น

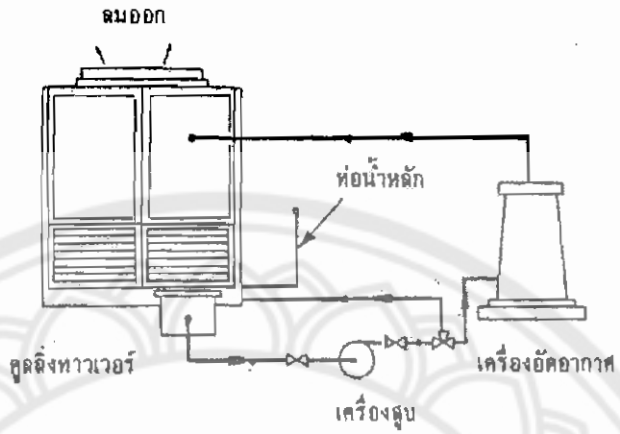
1. การใช้ Cooling Tower กับงานด้านความเย็น (รูปที่ 2.1)

ในโรงงานด้านความเย็นใช้ Cooling Tower ระบายความร้อนน้ำร้อนจากคอนเดนเซอร์ในระบบทำความเย็นของโรงงาน สำหรับคอนเดนเซอร์ที่ระบายความร้อนด้วยน้ำ เมื่อน้ำยาหรือสารทำความเย็นผ่านมายัง คอนเดนเซอร์จะควบแน่นกลายเป็นของเหลวและนำไปใช้ทำความเย็นต่อ น้ำหล่อเย็นในระบบคอนเดนเซอร์จะมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ฉะนั้นจึงต้องมีการระบายความร้อนโดยอาศัย Cooling Tower เพื่อลดอุณหภูมิน้ำหล่อเย็นให้ได้อุณหภูมิควบแน่นของน้ำยา

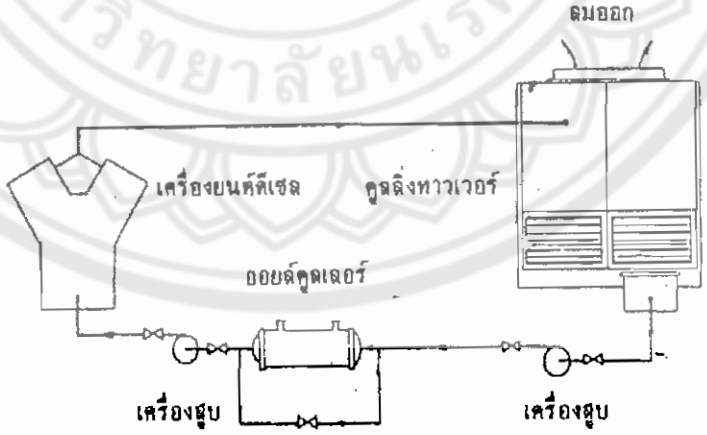


รูปที่ 2.1 Cooling Tower ในระบบปรับอากาศ

(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 135 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)



รูปที่ 2.2 Cooling Tower ในเครื่องอัดอากาศ
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 135 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)



รูปที่ 2.3 Cooling Tower ในเครื่องยนต์ดีเซล
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 135 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)

2. การใช้ Cooling Tower กับเครื่องอัดอากาศ (รูปที่ 2.2)

อากาศภายใต้การอัดตัวจะมีอุณหภูมิสูงดังนั้นในเครื่องอัดอากาศจะเกิดความร้อน ซึ่งจะใช้น้ำหล่อเย็นตามเสื้อสูบของเครื่องอัดอากาศ ในกรณีเครื่องอัดขนาดเล็กจะใช้อากาศเป็นสารหล่อเย็น และเครื่องอัดอากาศที่ใช้ตามโรงงานอุตสาหกรรมจะใช้น้ำเป็นสารหล่อเย็น

3. การใช้ Cooling Tower กับเครื่องยนต์ (รูปที่ 2.3)

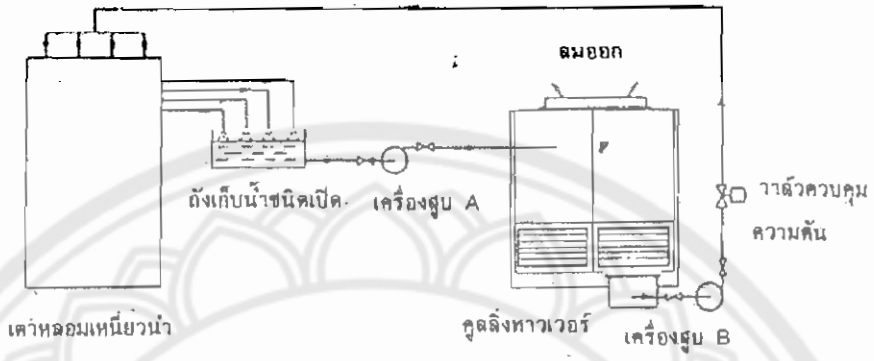
Cooling Tower ใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลจะทำหน้าที่ระบายความร้อนออกจากห้องเครื่องยนต์ เพื่อควบคุมระดับอุณหภูมิของผนังเสื้อสูบอยู่ที่ประมาณ 70-80 $^{\circ}$C ทั้งนี้เพื่อให้การเผาไหม้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

4. การใช้ Cooling Tower กับเตาหลอมเหนี่ยวนำ (รูปที่ 2.4)

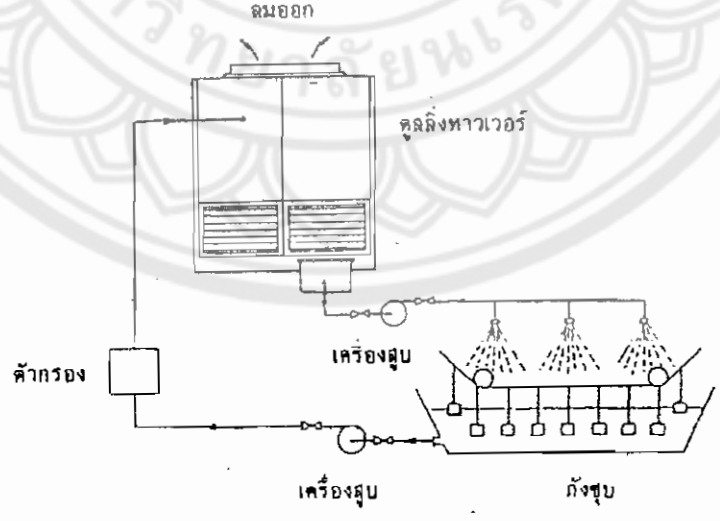
ภายในผนังเตาหลอมเหนี่ยวนำโดยรอบจะมีการระบายความร้อนเพื่อควบคุมให้อุณหภูมิผนังเตาไม่สูงจนเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดการเสียหายต่อตัวเตาได้ วงจรระบายความร้อนในผนังเตาหลอมเหนี่ยวนำจะใช้เครื่องสูบ 2 ตัว น้ำที่ระบายความร้อนแล้วจะถูกนำเอาออกส่งถังเก็บชนิดเปิด ระดับน้ำในถังเก็บชนิดเปิดจะถูกควบคุมด้วยสวิตช์ลูกลอยและจะสตาร์ตเครื่องสูบ A เมื่อต้องการ ส่วนเครื่องสูบ B จะถูกควบคุมการทำงานด้วยสวิตช์ความดันซึ่งจะป้องกันไม่ให้เตาหลอมทำงานในขณะที่ไม่มีน้ำหล่อเย็นไหลในวงจร

5. การใช้ Cooling Tower กับกระบวนการชุบแข็ง (รูปที่ 2.5)

กระบวนการชุบแข็ง เป็นกระบวนการทำให้โลหะร้อนเย็นตัวลงอย่างรวดเร็ว โดยการนำโลหะจุ่มลงในถังน้ำหรือถังน้ำมัน ปริมาณความร้อนมหาศาลจะถ่ายเทลงสู่ถังชุบภายในระยะเวลาอันสั้น เนื่องจากระดับอุณหภูมิของน้ำ หรือน้ำมันต้องควบคุมให้คงที่อยู่ตลอดเวลา ดังนั้นจึงต้องอาศัยวงจรการระบายความร้อนจาก Cooling Tower



รูปที่ 2.4 Cooling Tower ในเตาหลอมเหนี่ยวนำ
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 135 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)



รูปที่ 2.5 Cooling Tower ในกระบวนการชุบแข็ง
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 135 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)

Cooling Tower ประกอบด้วยระบบที่สำคัญดังนี้คือ

2.1.1 ระบบการไหลของอากาศ หน้าที่ของอากาศจะรับความร้อนที่ถ่ายเทมาจากน้ำ การเพิ่มอัตราการไหลของอากาศที่เหมาะสมผ่าน Cooling Tower จึงเป็นเป้าหมายหลักที่ช่วยปรับปรุงสมรรถนะให้สูงขึ้น

2.1.2 ระบบการกระจายน้ำ รูปแบบการกระจายน้ำจะถูกบังคับไว้ด้วยลักษณะการไหลของน้ำและช่อง Orifice ที่ติดตั้งในอ่างกระจายน้ำร้อน รูปแบบที่ใช้จะปล่อยน้ำออกมาเป็นลำลงสู่แผ่นที่จะสาดน้ำออกทั่วผิวบนของแผงขยายฟิล์มน้ำ ในการปรับปรุงสมรรถนะจะต้องทำให้การกระจายตัวของน้ำเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

2.1.3 ระบบพื้นผิวถ่ายเทความร้อน การติดตั้งแผงขยายฟิล์มน้ำ เมื่อน้ำตกลงมาจากด้านบนจะกระทบแผงขยายฟิล์มน้ำ น้ำแต่ละหยดจะถูกแผ่เป็นแผ่นบางๆ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวระเหยความร้อน และจะทำให้กระแสอากาศเข้ามาระบายความร้อนจากหยดน้ำได้เร็วยิ่งขึ้น

2.2 ชนิดของ Cooling Tower

แบ่งตามวิธีการหมุนเวียนของอากาศ Cooling Tower แบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

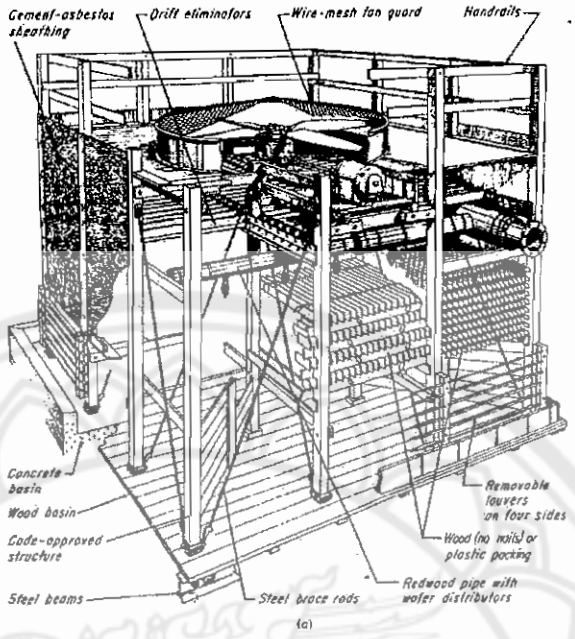
2.2.1 Natural Draft

จะให้อากาศเคลื่อนไหวตามธรรมชาติ เมื่อได้รับความร้อนจะทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศเอง Cooling Tower แบบนี้สมรรถนะของ Cooling Tower จะขึ้นอยู่กับความเร็วของลมที่พัดผ่านโดยทั่วไปจึงติดตั้ง Cooling Tower ชนิดนี้ไว้กลางแจ้งเพื่อให้ลมพัดผ่านได้คล่องตัว

2.2.2 Mechanical Draft

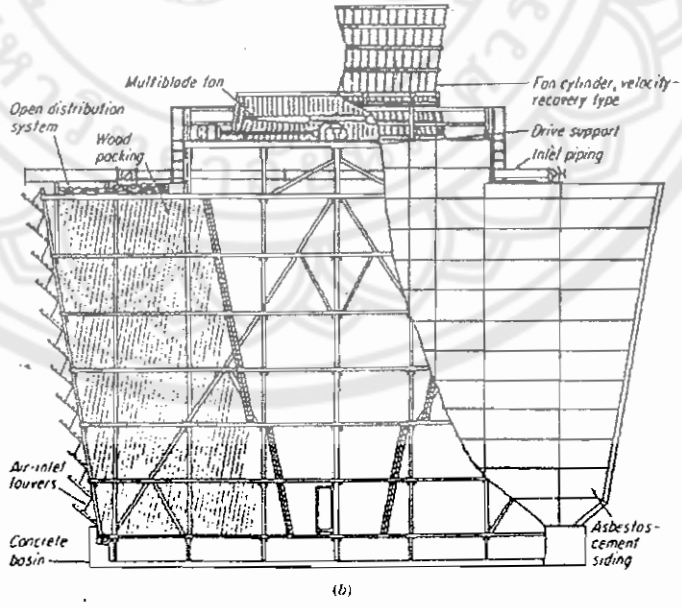
จะใช้พัดลมทำให้อากาศหมุนเวียน แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดพัดลมดูด (Induced Draft) และชนิดพัดลมเป่า (Forced Draft) โดยปกติถ้าใช้พัดลมจะเป็นชนิดดูด และถ้าใช้ Blower จะเป็นชนิดพัดลมเป่า เนื่องจาก Cooling Tower ชนิดนี้มีพัดลม หรือ Blower พัดพาอากาศจึงสามารถติดตั้งไว้ในที่ร่มได้ และเมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ Cooling Tower ชนิด Mechanical Draft จะมีประสิทธิภาพสูงกว่า ชนิด Natural Draft

โดยทั่วไป Cooling Tower ชนิด Natural Draft และ Mechanical Draft จะสามารถแบ่งย่อยได้เป็น 2 รูปแบบ คือ แบบไหลสวนทาง (Counter flow tower) และแบบไหลขวาง (Cross flow tower) ซึ่งต่างก็ประกอบด้วยชิ้นส่วนร่วมกัน คือระบบการไหลของอากาศ ระบบการกระจายน้ำ และระบบพื้นผิวที่ถ่ายเทความร้อน เพียงแต่มีการจัดวางต่างกันไปเท่านั้น



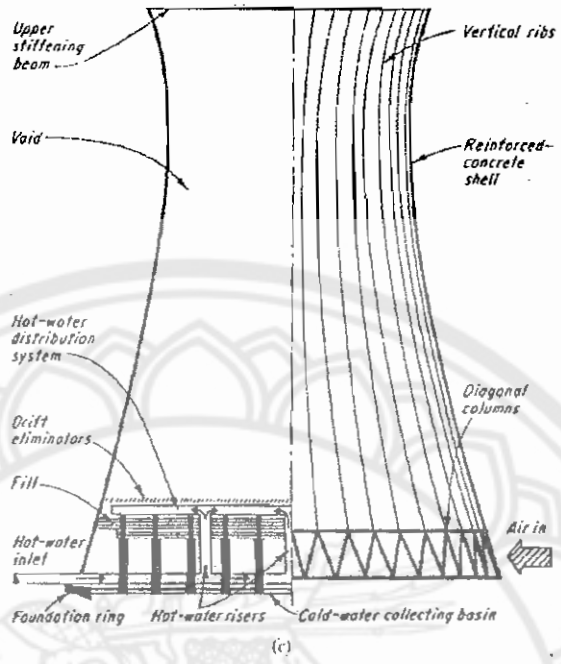
รูปที่ 2.6 Cooling Tower ชนิด Mechanical draft counter flow

(ที่มา: Power Plant Technology , M.M.El-Wakil ,1984,Mc Graw Hill)



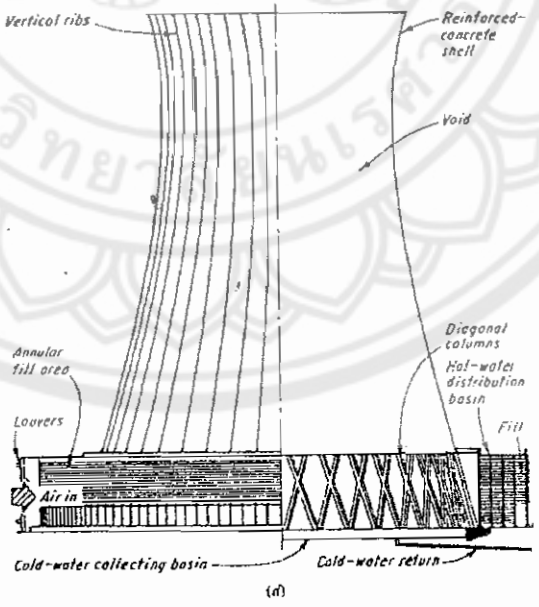
รูปที่ 2.7 Cooling Tower ชนิด Mechanical draft cross flow

(ที่มา: Power Plant Technology , M.M.El-Wakil ,1984,Mc Graw Hill)



รูปที่ 2.8 Cooling Tower ชนิด Natural draft counter flow

(ที่มา: Power Plant Technology , M.M.El-Wakil ,1984,Mc Graw Hill)

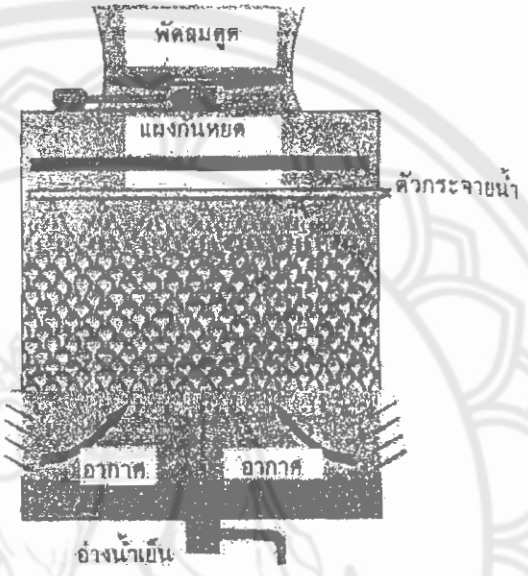


รูปที่ 2.9 Cooling Tower ชนิด Natural draft cross flow

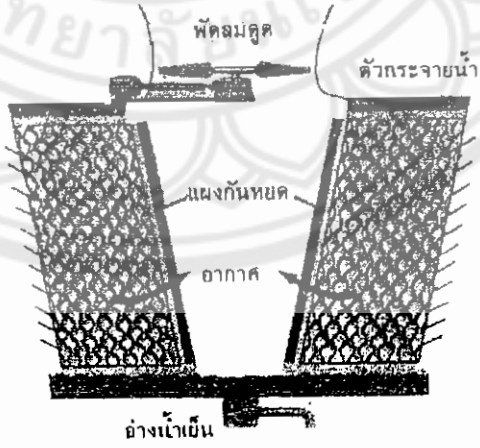
(ที่มา: Power Plant Technology , M.M.El-Wakil ,1984,Mc Graw Hill)

แบบไหลสวนทาง (Counter flow tower) การสัมผัสจะเกิดในแนวสวนทางกัน คือ อากาศจะไหลขึ้นจากทางด้านล่าง สวนทางกับน้ำที่ตกลงมาจากด้านบน

แบบไหลขวาง (Cross flow tower) อากาศเย็นจะไหลในแนวราบผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ และสัมผัสในแนวตั้งฉากกับน้ำที่ไหลลงมาจากด้านบน



รูปที่ 2.10 Cooling Tower ชนิด Mechanical draft counter flow
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 105, ไพบูลย์ ศรีภาสกร)

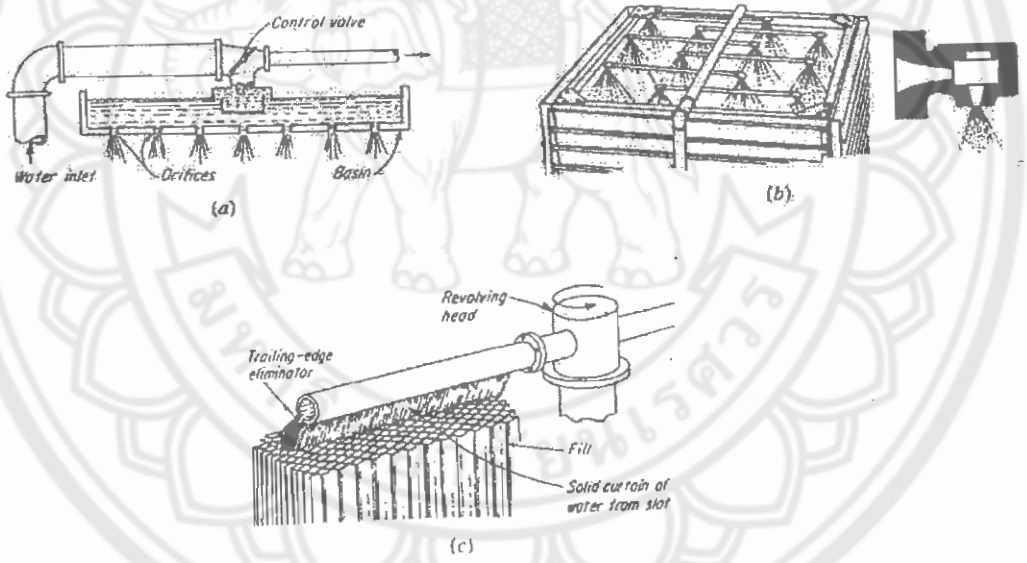


รูปที่ 2.11 Cooling Tower ชนิด Mechanical draft cross flow
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 105, ไพบูลย์ ศรีภาสกร)

2.3 ส่วนประกอบของ Cooling Tower

2.3.1 ตัวถังและเกร็ดช่องลม

ตัวถังและแผงขยายฟิล์มน้ำจะต้องอยู่ชิดกัน มิฉะนั้นอากาศจะพัดผ่านบริเวณช่องไปโดยไม่สัมผัสกับฟิล์มน้ำ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนลดลง ตัวเกร็ดช่องลมช่วยป้องกันการกระจายของน้ำออกจาก Cooling Tower และเป็นช่องกระจายการเคลื่อนที่ของอากาศ เกร็ดช่องลมจะต้องมีขนาดสม่ำเสมอและให้รูปการกระจายอากาศที่ดี ส่วนตัวถังจะต้องมีความทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศ และการสั่นสะเทือน



รูปที่ 2.12 ระบบกระจายน้ำ (a)Gravity (b)Spray (c)Rotary

(ที่มา: Power Plant Technology , M.M.El-Wakil ,1984,Mc Graw Hill)

2.3.2 ระบบกระจายน้ำ

ระบบต้องรับน้ำที่ถูกหมุนเวียนมาทำการกระจายให้ได้อย่างสม่ำเสมอ ระบบกระจายน้ำของแบบอากาศเคลื่อนที่สวนทางกับน้ำ จำเป็นต้องใช้แรงดันน้ำในการฉีดออกไปปะทะกับอากาศที่สวนทางมา

หลักการออกแบบระบบกระจายน้ำ มี 4 วิธีดังนี้

1. ระบบกระจายน้ำโดยใช้ถาดรองน้ำแบบเปิด

ระบบกระจายน้ำแบบนี้จะใช้ถาดรองน้ำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากับหน้าตัดขวางของแผงขยายฟิล์มน้ำ ถาดรองน้ำจะถูกเจาะรูหลายๆรูเพื่อกระจายน้ำร้อนให้เต็มทั่วแผงขยายฟิล์มน้ำ

2. ระบบกระจายน้ำโดยใช้อ่างน้ำพร้อมรางน้ำล้น

ระบบกระจายน้ำแบบนี้ประกอบด้วยอ่างซึ่งเจาะรูหลายๆรูที่ก้นอ่าง ซึ่งแนวรูเจาะจะตรงกันกับแนวรางน้ำล้นที่อยู่ด้านล่าง ซึ่งมีด้วยกันหลายๆราง และจัดแนวครอบคลุมเหนือแผงขยายฟิล์มน้ำ

3. ระบบกระจายน้ำโดยอาศัยหัวฉีดเป็นฝอยน้ำ

หัวฉีดที่ใช้ทำมาจาก PVC ระบบกระจายน้ำมีลักษณะการทำงานคือ เมื่อน้ำถูกส่งเข้าท่อส่งหลักจะแยกออกไปยังท่อสาขาที่ติดหัวฉีดไว้เป็นระยะๆหลายหัวฉีด

4. อ่างน้ำยาวที่ทำจากไม้

อ่างน้ำนี้จะถูกยึดแน่นด้วยหัวฉีดจำนวนมากเพื่อที่จะส่งน้ำไปยังถ้วยกระเซ็นน้ำเป็นการพัฒนาระบบกระจายน้ำไปยังแผงขยายฟิล์มน้ำระบบกระจายน้ำจะอาศัยเครื่องสูบและการเดินท่อที่เหมาะสมการกระจายน้ำลักษณะนี้มักจะพบใน Cooling Tower ขนาดใหญ่

2.3.3 แผงขยายฟิล์มน้ำ

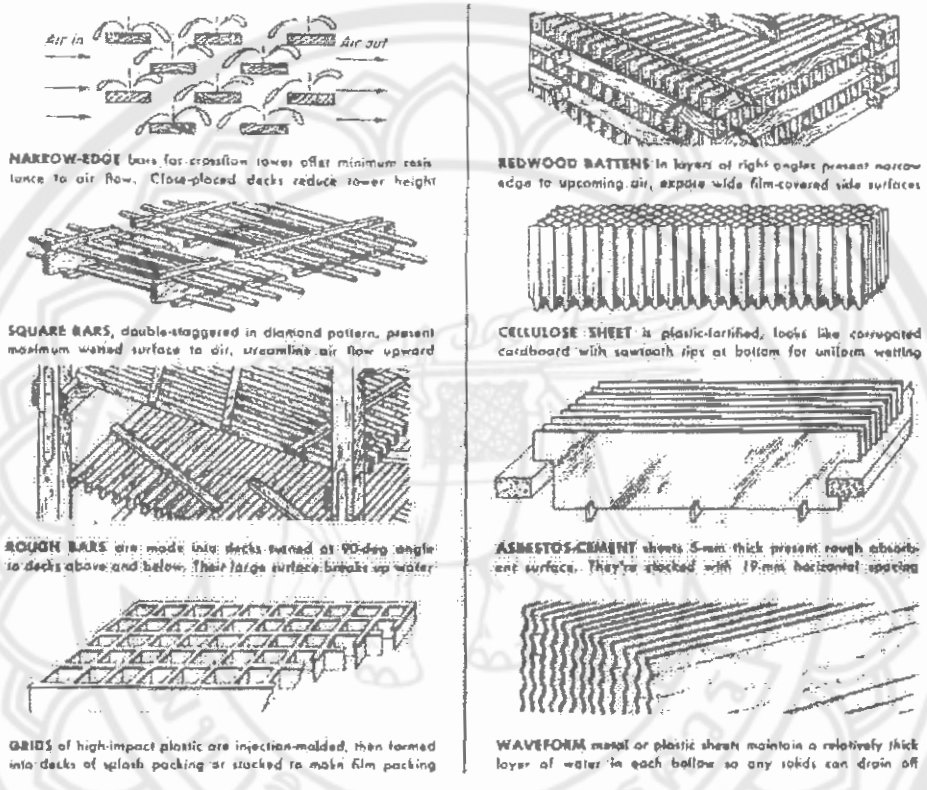
1. แผงขยายฟิล์มน้ำแบบปะทะกระเซ็น

แผงขยายฟิล์มน้ำลักษณะนี้ จะปล่อยน้ำร้อนจากด้านบนของ Cooling Tower ลงมาปะทะกับแผงไม้ทำให้น้ำกระเซ็นเป็นหยดละอองขนาดเล็ก ในขณะเดียวกันจะมีอากาศไหลขึ้นจากด้านล่างสู่ด้านบน และดึงความร้อนออกจากหยดน้ำเหล่านั้นทำให้น้ำมีอุณหภูมิลดลง

2. แผงขยายฟิล์มน้ำแบบขยายพื้นที่ผิวถ่ายเท

แผงขยายฟิล์มน้ำลักษณะนี้จะอาศัยหลักการทำงานคือ น้ำร้อนที่ปล่อยลงมาจากด้านบนจะถูกกระจายออกทั่วพื้นที่ผิวของแผงขยายฟิล์มน้ำ ทำให้เพิ่มที่พื้นผิวถ่ายเทความร้อนของน้ำมากขึ้น PVC เป็นวัสดุที่นำมาใช้ทำแผงขยายฟิล์มน้ำอย่างแพร่หลายที่สุด แผงขยายฟิล์มน้ำที่ทำจากพลาสติกจะมีข้อดีดังนี้

- น้ำ หนักเบา ง่ายต่อการขนย้าย
- ไม่ทำปฏิกิริยากับน้ำในสภาพกรดหรือด่าง
- ไม่เกิดการเสียหายได้ง่ายเมื่อมีตะกอนจับ
- ยับยั้งการเจริญเติบโตของคราบตะกอน
- ทำจากวัสดุที่ไม่ใช่อาหารของแบคทีเรียและเชื้อรา
- เป็นฉนวนไฟฟ้าและขึ้นรูปเป็นทรงต่างๆได้ง่าย สำหรับ PVC ไม่ไหม้ไฟ

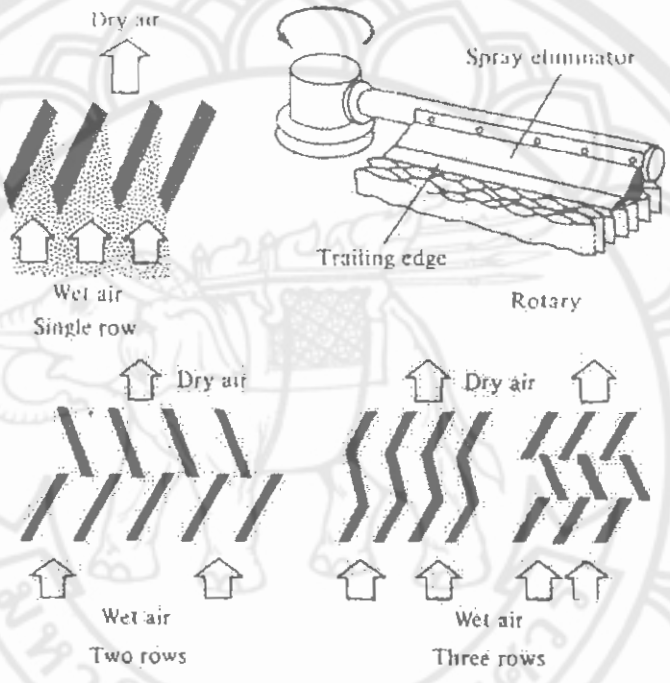


รูปที่ 2.13 แผงขยายฟิล์มน้ำ (a) Splash (b) Film

(ที่มา: Power Plant Technology , M.M.El-Wakil ,1984,Mc Graw Hill)

2.3.4 แผงกันน้ำกระเซ็น

จุดประสงค์เบื้องต้นของแผงกันน้ำกระเซ็น คือควบคุมการสูญเสียน้ำโดยไม่จำเป็นและลดเสียงรบกวนโดยติดตั้งไว้เหนือระบบกระจายน้ำเพื่อควบคุมอากาศให้พัดพาเอา ละอองน้ำออกไปจาก Cooling Tower ให้น้อยลง ปริมาณน้ำกระเซ็นควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.25 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 2.14 แผงกันน้ำกระเซ็น

(ที่มา: Power Plant Technology , M.M.El-Wakil ,1984,Mc Graw Hill)

2.3.5 อ่างเก็บน้ำเย็น

อ่างเก็บน้ำเย็นที่ใช้กันนี้ หมายถึง อ่างหรือสระที่เก็บน้ำหลังจากผ่านการลดอุณหภูมิแล้ว ในอ่างเก็บน้ำเย็นจะมีข้อต่อต่างๆ ดังนี้

1. ข้อต่อกับท่อเติมน้ำ Make up อาศัยการเปิดปิดด้วยวาล์วลูกลอยควบคุมระดับน้ำในอ่างเก็บ
2. ข้อต่อเข้ากับตัวกรองและอุปกรณ์บำบัดน้ำ
3. ข้อต่อสำหรับเพริจระบบ ซึ่งสามารถควบคุมได้อย่างอัตโนมัติ โดยควบคุมปริมาณความเข้มข้นของสารเจือปนในน้ำของระบบ
4. ข้อต่อท่อน้ำล้น ข้อต่อสำหรับท่อนำน้ำเย็นกลับและควรมีข้อต่อสำหรับท่อน้ำทิ้งที่ก้นอ่าง

2.3.6 พัดลมและชุดขับ

การเลือกใช้พัดลมและชุดขับมีหลักเกณฑ์พิจารณาจากความสัมพันธ์หรือผลกระทบต่างๆ ที่ตามมาดังนี้ คือ

- อัตราการไหลของอากาศเปลี่ยนแปลงโดยตรงกับอัตราเร็วรอบของพัดลม

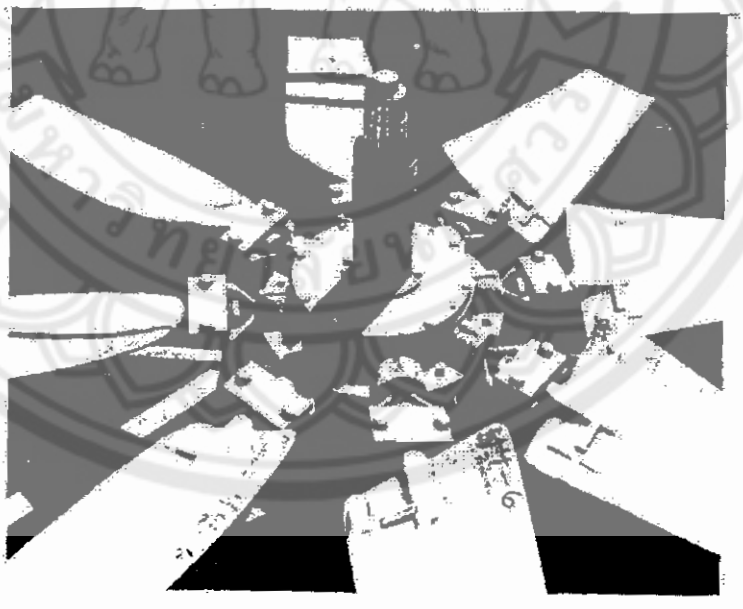
- ความดันของอากาศเปลี่ยนแปลงตามอัตราเร็วรอบของพัดลมยกกำลังสอง

- กำลังเปลี่ยนแปลงตามอัตราเร็วรอบของพัดลมยกกำลังสาม

- พัดลมอัตราเร็วรอบสูงจะให้เสียงดัง

- ใบพัดลมขนาดใหญ่จะให้อัตราการไหลของอากาศสูง

ปกติอัตราการไหลโดยปริมาตรของอากาศจะวัดในหน่วยของ (m^3 / s) สำหรับอัตราการไหลของอากาศอยู่ประมาณ 0.5 - 50 m^3 / s กรณี Cooling Tower ขนาดใหญ่จะต้องมีปริมาณอากาศมากกว่านี้ คือ ประมาณ 500 m^3 / s

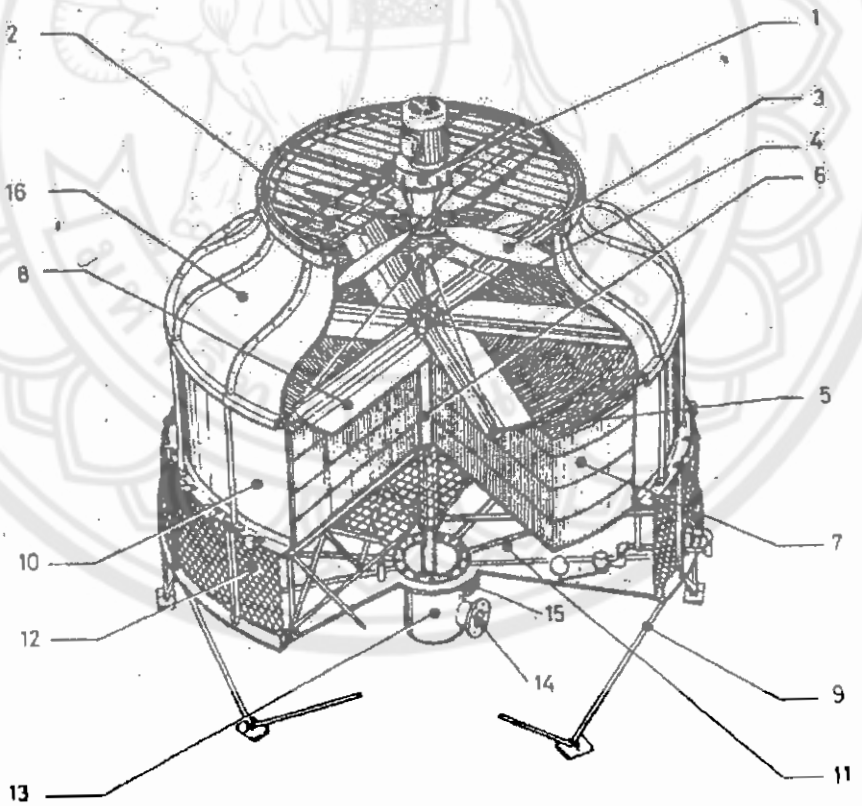


รูปที่ 2.15 พัดลมชนิด Induce draft fan

(ที่มา: Power Plant Technology , M.M.El-Wakil ,1984,Mc Graw Hill)

2.4 หลักการทำงานของ Cooling Tower แบบอากาศไหลสวนทางกับน้ำ

การทำงานของ Cooling Tower แบบอากาศไหลสวนทางกับน้ำ (ดูรูปที่ 2.16) น้ำร้อนจะไหลเข้าสู่ท่อน้ำร้อนเข้า (14) ผ่านท่อน้ำร้อนออก (6) ผ่านหัวจ่ายน้ำ (4) และจะจ่ายน้ำร้อนออกที่ท่อจ่ายน้ำ (5) น้ำร้อนขณะไหลออกจากท่อจะมีแรงขับดันทำให้ท่อจ่ายน้ำหมุนรอบแกนหัวจ่ายน้ำ (4) น้ำร้อนจะราดลงบนแผงขยายฟิล์มน้ำ (7) แผงขยายฟิล์มน้ำจะทำหน้าที่แผ่กระจายน้ำร้อนออกเป็นพื้นที่กว้าง น้ำร้อนจะไหลลงสู่เบื้องล่างด้วยแรงดึงดูดของโลก พัดลม (3) จะดูดอากาศเข้าทางช่องอากาศเข้า (12) ผ่านแผงขยายฟิล์มน้ำ (7) สวนทางกับทิศการไหลของน้ำ ขณะที่น้ำไหลสวนทางกับอากาศ น้ำร้อนจะถ่ายเทความร้อนให้กับอากาศ กลายเป็นน้ำเย็น (11) น้ำเย็นในถาดรองรับน้ำเย็นจะถูกใช้ระบายความร้อนกลายเป็นน้ำร้อนกลับเข้าทางท่อน้ำร้อนเข้า (14)

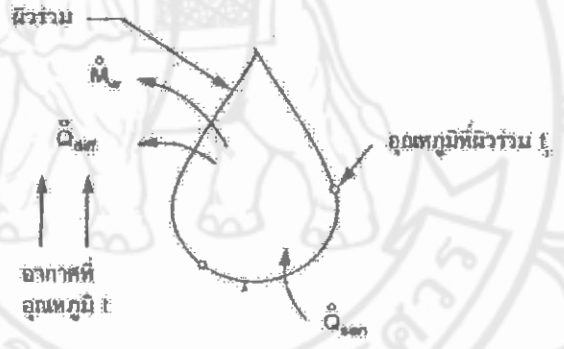


รูปที่ 2.16 การทำงานของ Cooling Tower ชนิด Mechanical draft counter flow

(ที่มา: 65 เรื่องน่ารู้เทคนิคเครื่องกล , สิทธิชัย วงษ์ธนสุภรณ์)

2.5 ปริมาณความร้อนถ่ายเทระหว่างหยดน้ำกับอากาศ

ของไหลทำงานที่ไหลผ่าน Cooling Tower มี 2 ชนิด คือ น้ำ และอากาศ ขณะที่น้ำไหลผ่านแผงกระจายน้ำจะทำให้น้ำกระจายแผ่เต็มแผงขยายฟิล์มน้ำ จึงทำให้น้ำขณะไหลผ่านสัมผัสกับอากาศนั้นจะระเหยตัวกลายเป็นไอน้ำและเข้าไปในอากาศจึงทำให้อากาศมีความชื้นสูงขึ้น ส่วนน้ำจะเย็นลงเนื่องจากมีการดึงความร้อนจากน้ำ เพื่อใช้ระเหยตัวและแพร่กระจายผ่านผิวร่วม (Interface) ระหว่างหยดน้ำและอากาศ กลไกในการถ่ายเทจึงมีทั้งการถ่ายเทมวล และการถ่ายเทความร้อน จากความร้อนทั้งหมดที่ถ่ายเทออกจากหยดน้ำนั้นประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นความร้อนแฝงที่ติดไปกับไอน้ำที่ถ่ายเทความร้อนผ่านผิวร่วม และการถ่ายเทสู่อากาศโดยการพาความร้อนต่อไป



รูปที่ 2.17 การถ่ายเทมวลและความร้อนระหว่างหยดน้ำกับอากาศ
(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 141 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)

ดังนั้นอัตราความร้อนที่แพร่กระจายติดไปกับไอน้ำที่ระเหยออกจากหยดน้ำ คำนวณจาก

$$\dot{Q}_{diff} = \dot{M}_w \lambda_w \qquad (2.1)$$

$\dot{M}_w$ = อัตราการแพร่มวลไอน้ำผ่านผิวร่วม , kg / s

λ_w = ความร้อนแฝงจำเพาะของไอน้ำที่แพร่กระจายออก , kJ / kg

$\dot{Q}_{diff}$ = อัตราความร้อนแพร่กระจายติดไปกับไอน้ำ , kW

เนื่องจากอุณหภูมิกระเปาะเปียกต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศ (อุณหภูมิกระเปาะแห้ง) ดังนั้นอุณหภูมิผิวร่วม (t_i) จึงต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศ (t) จึงทำให้ความร้อนถ่ายเทออกจากอากาศสู่หยดน้ำโดยการพาความร้อน ซึ่งคำนวณจาก

$$Q^{\bullet}_{sen} = \alpha A_i (t - t_i) \qquad (2.2)$$

$Q^{\bullet}_{sen}$ = อัตราความร้อนถ่ายเทจากอากาศสู่หยดน้ำโดยการพาความร้อน

α = สัมประสิทธิ์การพาความร้อนที่ผิวร่วม , $kW / m^2 K$

A_i = พื้นที่ผิวหยดน้ำ , m^2

ภายใต้จุดสมดุล อุณหภูมิของหยดน้ำจะคงที่และเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียก ถ้าอุณหภูมิกระเปาะเปียกเสถียรที่จุดนี้ จะพบว่า $Q^{\bullet}_{diff} = Q^{\bullet}_{sen}$

สำหรับอัตราการแพร่มวลไอน้ำผ่านผิวร่วมสามารถหาในรูปของความดันย่อย ดังนี้

$$M^{\bullet}_{w} = K_g A_i (P_i - P_a) \qquad (2.3)$$

K_g = สัมประสิทธิ์ฟิล์มของการแพร่ , s / m

P_i = ความดันย่อยของไอน้ำที่ผิวร่วม , kPa

P_a = ความดันย่อยของไอน้ำในอากาศ , kPa

หรือเขียนในรูปสมการของ

$$M^{\bullet}_{w} = K_a' A (w_i - w_a) \qquad (2.4)$$

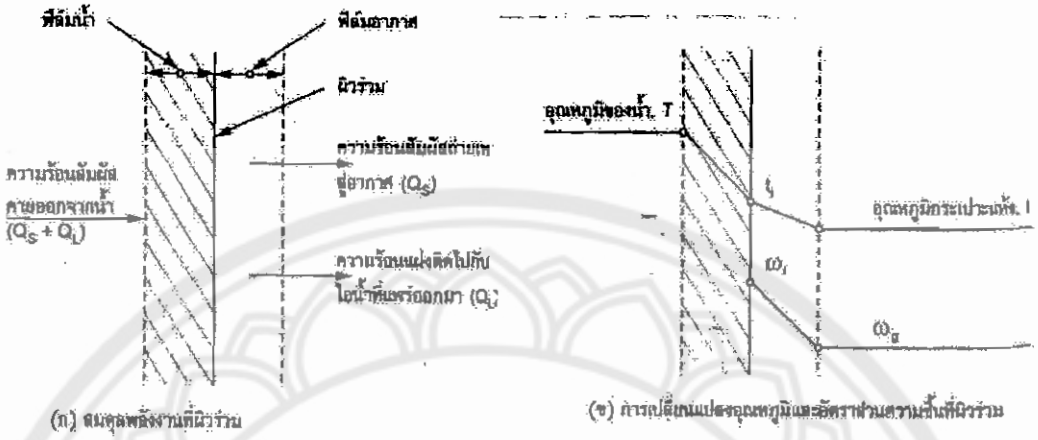
K_a' = สัมประสิทธิ์การแพร่ , $kg / m^2 s$

w_i = อัตราส่วนความชื้นที่ผิวร่วม , kg / kg

w_a = อัตราส่วนความชื้นในอากาศ , kg / kg

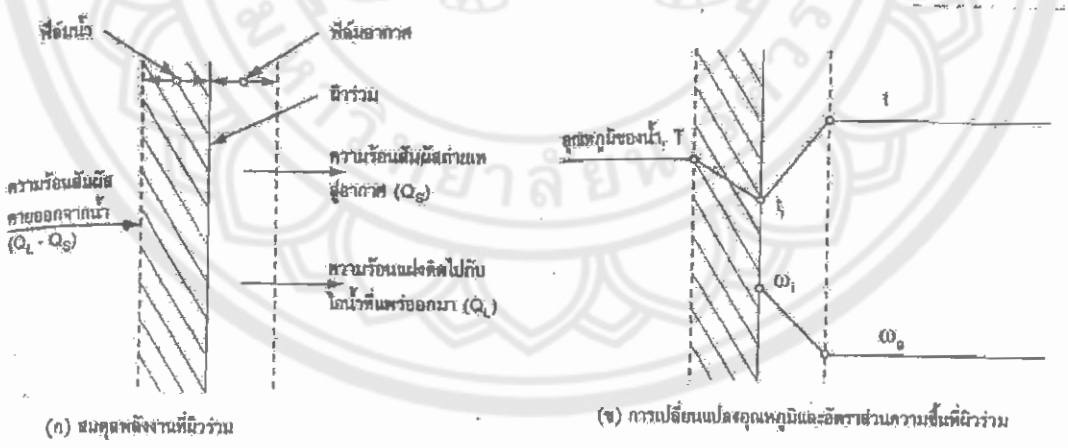
จากสมการ (2.1) , (2.2) และ (2.4) พิจารณาที่จุดสมดุล อุณหภูมิหยดน้ำเท่ากับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศ

$$w_i - w_a = \alpha (t_i - t_a) / K_a' \lambda_w \qquad (2.5)$$



รูปที่ 2.18 การถ่ายเทความร้อนใน Cooling Tower เมื่ออุณหภูมิน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ

(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 141 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)



รูปที่ 2.19 การถ่ายเทความร้อนใน Cooling Tower เมื่ออุณหภูมิน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะ แห้งของอากาศ

(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 141 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)

2.6 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและอัตราส่วนความชื้นที่ผิวร่วม

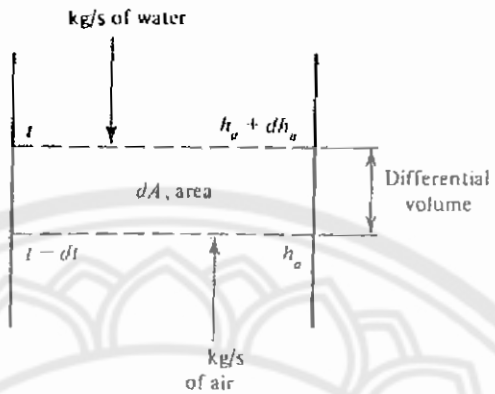
พิจารณาการถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำและอากาศที่ไหลสวนทางกันใน Cooling Tower โดยมีน้ำไหลลงจากด้านบนสู่ด้านล่าง ปกติน้ำบริเวณด้านบนมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ ส่วนน้ำที่ตกลงมาตรงบริเวณด้านล่างจะมีอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้ง ดังนั้นจึงวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนในหอลดอุณหภูมิเป็น 2 กรณี คือ กรณีอุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ และกรณีอุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ

กรณีอุณหภูมิของน้ำสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะแห้งของอากาศ ($T > t$) ความร้อนถ่ายเทจากผิวร่วมสู่อากาศมีสองส่วน คือ ความร้อนสัมผัสถ่ายเทสู่อากาศ (Q_S) ซึ่งเนื่องมาจากอุณหภูมิแตกต่าง ($T - t$) และความร้อนแฝง (Q_L) เนื่องจาก $w_i > w_a$

กรณีอุณหภูมิของน้ำต่ำกว่าอุณหภูมิกระเปราะแห้งของอากาศ ($T < t$) ความร้อนถ่ายเทสู่ผิวร่วมมีสองส่วน ส่วนหนึ่งเป็นความร้อนที่ได้จากน้ำ ($Q_L - Q_S$) และอีกส่วนหนึ่งเป็นความร้อนที่ได้จากอากาศ (Q_S)

จากทั้งสองกรณีข้างต้น น้ำบริเวณด้านบนจะมีการถ่ายเทความร้อนสู่อากาศ ในปริมาณมากกว่า การถ่ายเทความร้อนจากน้ำบริเวณด้านล่าง โดยเฉพาะบริเวณฐานด้านล่างจะมีศักย์ขับความร้อน (Driving Force) ต่ำสุด (ศักย์ขับความร้อนในที่นี้หมายถึง ผลต่างของอุณหภูมิ , ผลต่างของความดันย่อย และผลต่างของอัตราส่วนความชื้น ในกรณีศักย์ขับความร้อนมีค่าต่ำสุดพบว่า ความร้อนสัมผัสจากอากาศเข้าสู่ผิวร่วม (Q_S) นั้นมีค่าเกือบเท่ากับความร้อนแฝงที่ติดไปกับไอน้ำที่แพร่ออกจากผิวร่วมสู่อากาศ (Q_L) ซึ่งหมายถึงไม่มีความร้อนสัมผัสคายออกจากน้ำนั่นเอง

2.7 การถ่ายเทความร้อนใน Cooling Tower



รูปที่ 2.20 การแลกเปลี่ยนพลังงานใน Cooling Tower ชนิด Mechanical draft counter flow (ที่มา:Refrigeration and Air Condition ,Wilbert F.Stoecker,Jerold W.Jones,2nd edition,McGraw-Hill)

จาก *Analysis of a counter flow cooling tower

$$dQ^{\bullet} = m^{\bullet}_{a}\, dh_a = m^{\bullet}_{w} Cp_w\, dt \qquad (2.6)$$

$$\int dQ^{\bullet} = \int m^{\bullet}_{a}\, dh_a = \int m^{\bullet}_{w} Cp_w\, dt$$

จะได้

$$Q^{\bullet}_{a} = Q^{\bullet}_{w}$$

$$m^{\bullet}_{a} (h_{ao} - h_{ai}) = m^{\bullet}_{w} Cp_w (t_{wi} - t_{wo}) \qquad (2.7)$$

ดังนั้นจะได้

$$Q^{\bullet}_{a} = m^{\bullet}_{a} (h_{ao} - h_{ai}) \qquad (2.8)$$

และจะได้

$$Q^{\bullet}_{w} = m^{\bullet}_{w} Cp_w (t_{wi} - t_{wo}) \qquad (2.9)$$

และในการคำนวณประสิทธิผลการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower (Effectiveness of A Counterflow Cooling Tower)สามารถหาได้จากสมการ

$$\varepsilon = Q^{\bullet}_{actual} / Q^{\bullet}_{theory}$$

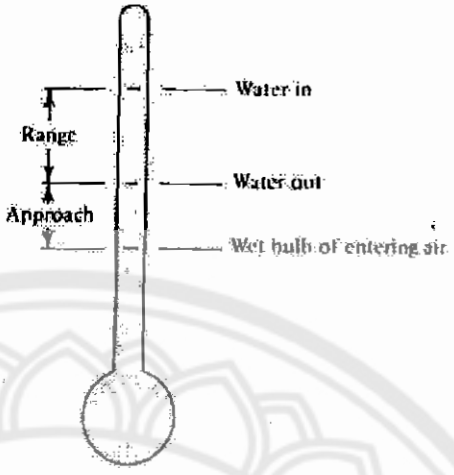
$$= m^{\bullet}_{w} Cp_w (t_{wi} - t_{wo}) / m^{\bullet}_{w} Cp_w (t_{wi} - t_{wbi})$$

$$\varepsilon = (t_{wi} - t_{wo}) / (t_{wi} - t_{wbi}) \qquad (2.10)$$

$$\text{Range} = t_{wi} - t_{wo}$$

$$\text{Approach} = t_{wo} - t_{wbi}$$

ดังนั้นจะได้ ε = Range / (Range+Approach)



รูปที่ 2.21 Range and approach in a Cooling Tower

(ที่มา:Refrigeration and Air Condition ,Wilbert F.Stoecker,Jerold W.Jones,2nd edition,McGraw-Hill)

เมื่อ $\dot{Q}_{actual}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนจริงของ Cooling Tower

$\dot{Q}_{theory}$ = อัตราการถ่ายเทความร้อนทางทฤษฎีของ Cooling Tower

ε = ประสิทธิผลการถ่ายเทความร้อนของ Cooling Tower (Effectiveness of a Counterflow Cooling Tower)

$\dot{Q}_w$ = อัตราความร้อนถ่ายเทออกจากน้ำทั้งหมด , kW

$\dot{Q}_a$ = อัตราความร้อนถ่ายเทสู่อากาศ , kW

$\dot{m}_w$ = อัตราการไหลของน้ำ , kg / s

$\dot{m}_a$ = อัตราการไหลของอากาศ , kg / s

Cp = ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำที่ความดันคงที่

= 4.19 kJ / kg K

t_{wi} = อุณหภูมิของน้ำทางเข้า Cooling Tower , °C

t_{wo} = อุณหภูมิของน้ำทางออก Cooling Tower , °C

t_{wbi} = อุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเข้า Cooling Tower , °C

h_{ai} = เอนทาลปีของอากาศตรงทางเข้า Cooling Tower , kJ / kg

h_{ao} = เอนทาลปีของอากาศตรงทางออก Cooling Tower , kJ / kg

Range = ค่าผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้ากับอุณหภูมิน้ำออก

Approach = ผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำออกกับอุณหภูมิกระเปาะเปียกของอากาศเข้า

จากสมการที่ (2.7) เป็นสมการสมดุลพลังงานโดยไม่คิดการสูญเสียความร้อนออกสู่ภายนอก คุณสมบัติ h_a หาจากตารางที่ 3

2.8 การคำนวณความสูงของแผงกระจายน้ำ

ระยะระหว่างเส้นโค้งอิ่มตัว และเส้นสภาวะอากาศก็คือผลต่างของเอนทาลปี (ศักย์ขับความร้อน) นอกจากนี้การคำนวณหาศักย์ความร้อนเฉลี่ยยังสามารถใช้ตัวประกอบสตีเว่น (Stephen W.L , f) ได้ดังสมการ

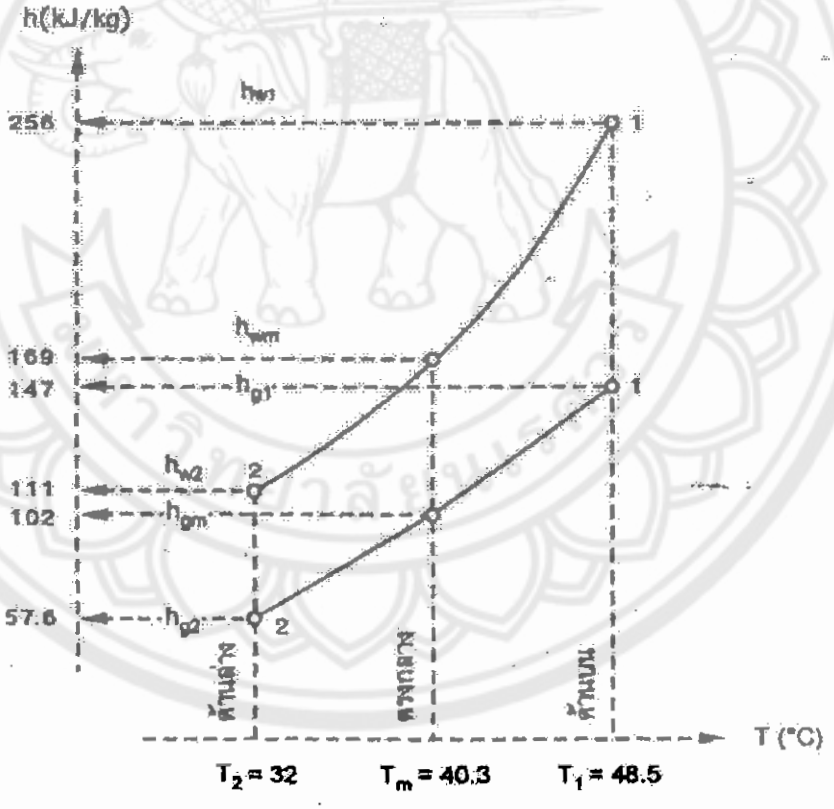
$$Q^{\bullet}_{w} = Q^{\bullet}_{a} = K_a LA(\Delta h_m)$$

L = ความสูงของแผงขยายฟิล์มน้ำ , m

A = พื้นที่ภาคตัดขวางของแผงขยายฟิล์มน้ำ , m^2

K_a = สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตร , kg/m^3-s

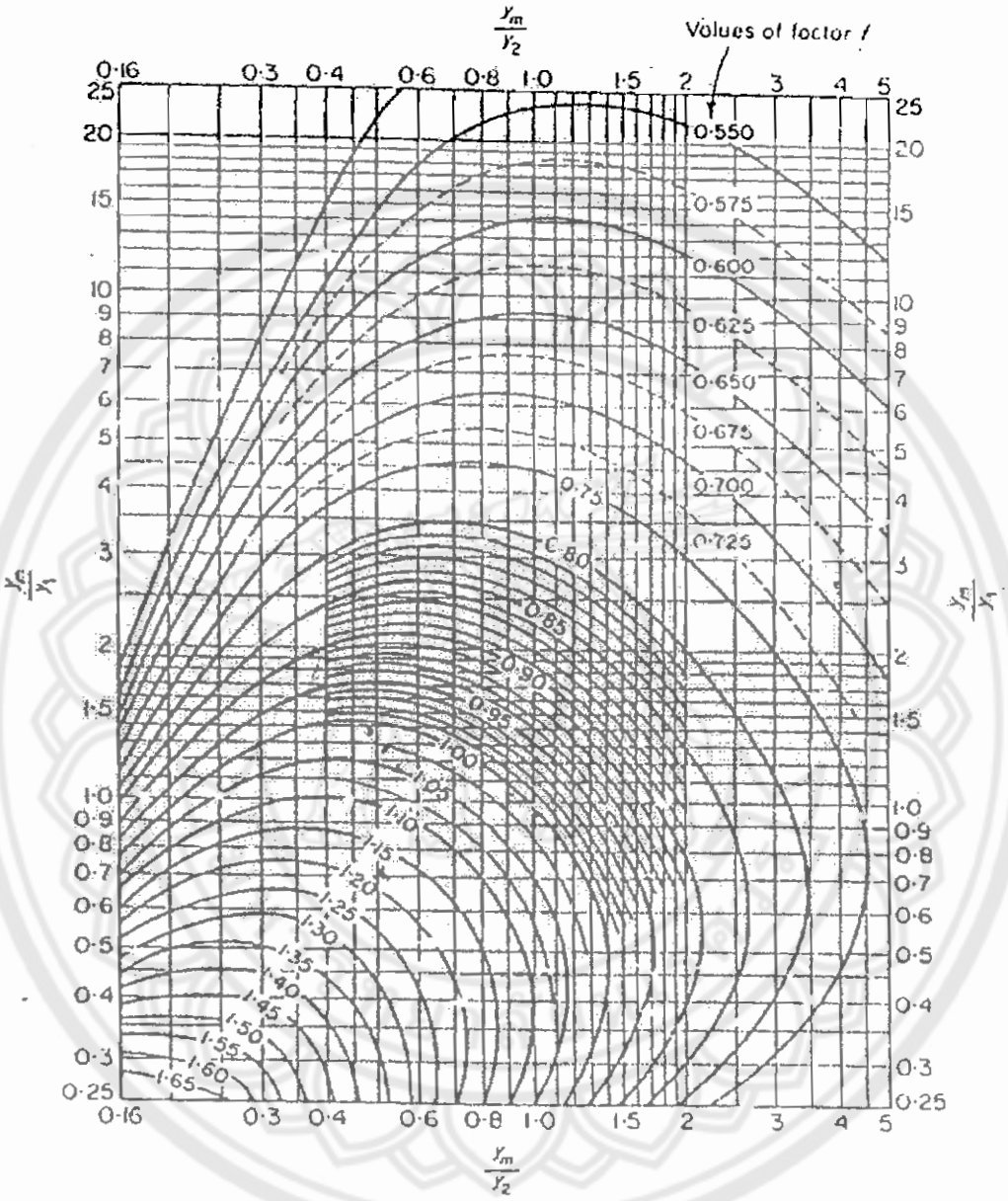
Δh_m = ศักย์ขับความร้อนเฉลี่ย , kJ / kg



รูปที่ 2.22 ศักย์ความร้อนของ Cooling Tower

(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 141 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)

ห้องสมุดคณะวิศวกรรมศาสตร์



รูปที่ 2.23 แผนภูมิหาตัวประกอบสตีเฟ่น (STEPHENS W.L.)

(ที่มา:เทคนิค ไฟฟ้า เครื่องกล อุตสาหการ ฉบับที่ 141 , รศ.มนตรี พิรุณเกษตร)

จากสมการ (2.8) และ (2.11) จะได้

$$K_a = \dot{m}_a (h_{ao} - h_{ai}) / LA(\Delta h_m)$$

จากสมการ (2.9) และ (2.10) จะได้

$$K_a = \dot{m}_w Cp_w (t_{wi} - t_{wo}) / LA(\Delta h_m)$$

ในทางปฏิบัติตัวที่รู้ค่าได้แก่ h_{ao} , h_{ai} , $\dot{m}_w$, $\dot{m}_a$, t_{wi} และ t_{wo} ส่วนเส้นสภาวะของ อากาศให้ลากขึ้นโดยลากเส้นตรงเชื่อมระหว่างจุด h_{ao} และ h_{ai} จากสเกลอุณหภูมิของน้ำในแกนแนวในรูปที่ 2.21 กำหนดที่อุณหภูมิ t_{wi} , t_{wo} และ t_m ($t_m = t_{wi} + t_{wo} /2$) จะให้ศักย์ขับความร้อนที่ด้านบนของ Cooling Tower $(h_{wi} - h_{ao})$, ศักย์ขับความร้อนที่อุณหภูมิเฉลี่ย $(h_{wm} - h_{am})$และศักย์ขับความร้อนที่ด้านล่างของ Cooling Tower $(h_{wo} - h_{ai})$ ซึ่งพล็อตลงในแผนภูมิของสตีเฟ่นเป็นค่าของ γ_1 , γ_m และ γ_2 ตามลำดับ โดยจะพล็อตออกมาเป็นอัตราส่วนของ γ_m / γ_1 บนแกนนอนและอัตราส่วนของ γ_m / γ_2 บนแกนตั้ง ถ้าทราบค่า γ_1 , γ_m และ γ_2 จะสามารถหาตัวประกอบของสตีเฟ่น (f) ในแผนภูมิรูปที่ 2.23

ดังนั้นศักย์ขับความร้อนเฉลี่ยหาจาก

$$\Delta h_m = f_{\gamma_m} = f(h_{wm} - h_{am}) \qquad (2.11)$$

เมื่อ f = ตัวประกอบสตีเฟ่น

h_{wm} = เอนทาลปีของเส้นโค้งอิ่มตัวที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_m

h_{am} = เอนทาลปีสภาวะของอากาศที่อุณหภูมิเฉลี่ย T_m

สำหรับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนเชิงปริมาตรเขียนเป็นสมการคำนวณได้ดังนี้

$$K_a = c (m_w / A)^m (m_a / A)^n \qquad (2.12)$$

เมื่อ c , m , n = ค่าคงที่สำหรับแผงขยายฟิล์มน้ำ

$c = 0.84$, $m = -0.2$, $n = 0.27$

2.9 การคำนวณมวลอากาศจาก Orifice

การคำนวณจาก Orifice สามารถคำนวณได้จาก Discharge Coefficient และ Flow Coefficient

การไหลในท่อแบบ Incompressible Flow จะใช้ Bernoulli's Equation เมื่อ $\Delta P.E = 0$ จะได้

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g_c} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g_c} \qquad (2.13)$$

จากสมการการไหลแบบ Continuity Equation จะได้ค่า V_1,

$$V_1 = V_2 (A_2/A_1) \qquad (2.14)$$

แทนค่าสมการ (2.13) ในสมการ (2.14) จะได้

$$V_2 = \frac{1}{\left[1-(A_2/A_1)^2\right]^{1/2}} \left[2g_c\,(p_1-p_2)/\rho\right]^{1/2} \qquad (2.15)$$

เมื่อ Discharge Coefficient ,C

$$C = Q_{Actual} / Q_{Ideal} \qquad (2.16)$$

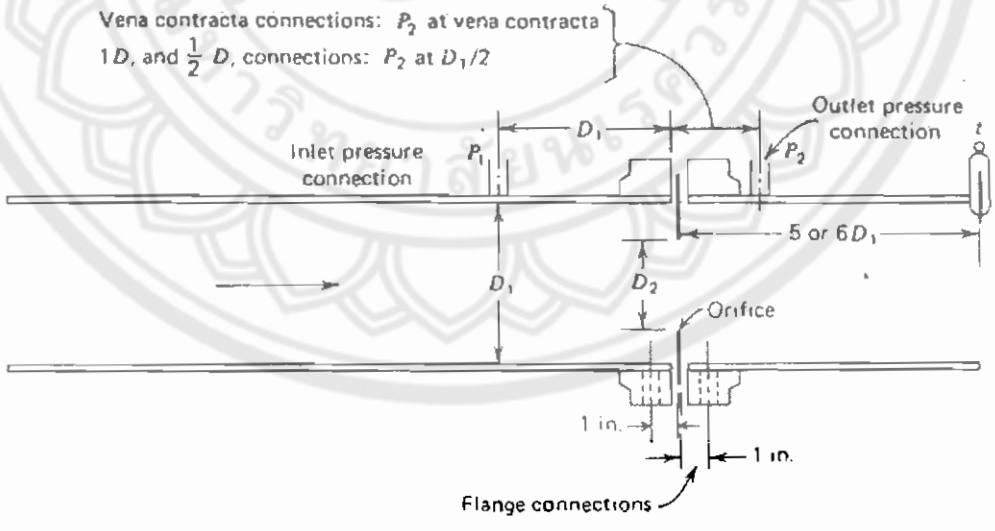
จากสมการที่ (2.15) และ (2.16) จะได้

$$Q_{Actual} = \frac{CA_2}{\left[1-(A_2/A_1)^2\right]^{1/2}} \left[2g_c\,(p_1-p_2)/\rho\right]^{1/2} \qquad (2.17)$$

ดังนั้น Flow Coefficient, C_d,

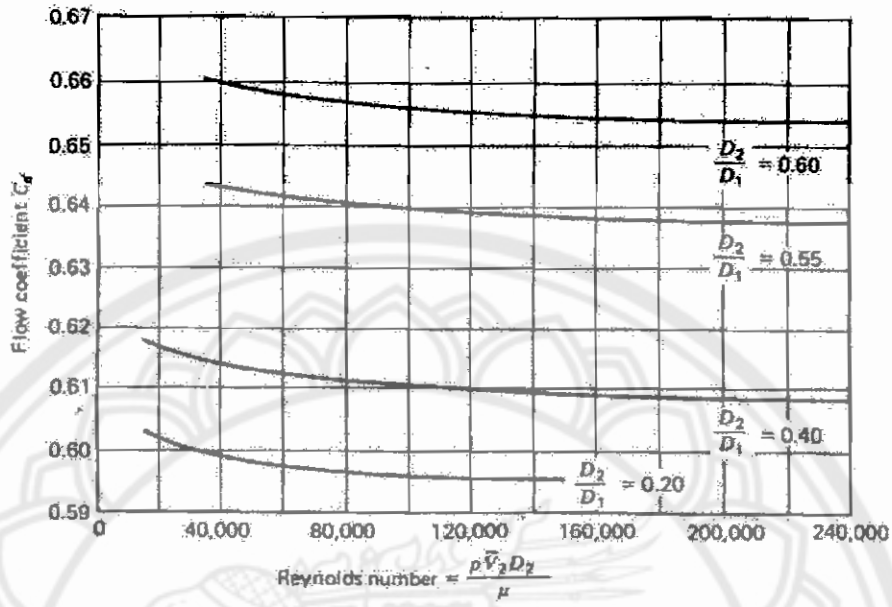
$$C_d = \frac{C}{\left[1-(A_2/A_1)^2\right]^{1/2}} \qquad (2.18)$$

และ C_d หาได้จากรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.24 Orifice plate

(ที่มา: Heating Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design , Faye C.McQuiston ,Jerald D.Parker , 4th edition , 1994 , John Wiley & Sons,Inc.)



รูปที่ 2.25 แผนภูมิ Flow Coefficient

(ที่มา : Heating Ventilating and Air Conditioning Analysis and Design , Faye C.McQuiston ,Jerald D.Parker , 4th edition , 1994 , John Wiley & Sons,Inc.)

2.10 การสูญเสียน้ำใน Cooling Tower

2.10.1 เนื่องจากการระเหยตัว

การลดอุณหภูมิของน้ำร้อนใน Cooling Tower ส่วนใหญ่เกิดจากการระเหยตัวของน้ำ

2.10.2 ละอองน้ำหลุดลอยไปกับอากาศ

อากาศที่จะไหลผ่าน Cooling Tower ถ้าเร็วเกินไปละอองน้ำก็จะลอยไปกับอากาศมาก ทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม , สิ่งแวดล้อมสกปรกและเปียก Cooling Tower ที่ดีการสูญเสียน้ำวิธีนี้ไม่ควรเกิน 0.2 % ของน้ำที่ไหลวนในระบบ

2.10.3 น้ำปล่อยทิ้งเพื่อรักษาความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ

เมื่อน้ำระเหยตัวไปน้ำใหม่ (Make-up Water) จะเข้ามาชดเชยน้ำที่ระเหยไป น้ำใหม่ที่เติมเข้าไปจะมีสารละลายปนอยู่ เมื่อใช้งานไปนานๆน้ำในระบบจะมีสารละลายเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็นเหตุทำให้เกิดตะกรันและการกัดกร่อนสร้างปัญหากับระบบน้ำหล่อเย็น เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงต้องปล่อยน้ำทิ้งเพื่อรักษาความเข้มข้นของสารละลายในน้ำโดยปล่อยน้ำทิ้งบางส่วน

2.11 ปัญหาที่เกิดกับระบบน้ำหล่อเย็น

Cooling Tower ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันเป็นแบบเปิดเป็นส่วนใหญ่ น้ำส่วนหนึ่งจะระเหยไปกับอากาศเพื่อทำให้น้ำส่วนที่เหลือเย็นลง ผลที่ตามมาก็คือ ความเข้มข้นของสารละลายจะสูงขึ้น พัดลมของ Cooling Tower จะดูดอากาศจากบรรยากาศ ซึ่งมีฝุ่น , ไอเสียของรถยนต์หรือโรงงาน ทำให้เกิดการกัดกร่อน , การจับตัวของตะกรัน และตะไคร่ กับอุปกรณ์ของระบบน้ำหล่อเย็น ทำให้เกิดความสูญเสียหลายๆอย่าง การป้องกันปัญหาดังกล่าวจะต้องมีการจัดหาและควบคุมน้ำที่เติมเข้าระบบให้มีคุณภาพที่เหมาะสม ต่อไปนี้เป็นวิธีแก้ปัญหาตะกรัน , ตะไคร่ และการกัดกร่อนในระบบน้ำหล่อเย็น ดังนี้

1. ให้ล้างระบบน้ำหล่อเย็นด้วยเคมีเป็นครั้งคราว
2. ให้ระบายน้ำออกจากระบบน้ำหล่อเย็นตามความเหมาะสม เพื่อไม่ให้ความเข้มข้นของสารละลายมีค่าสูงจนเกินไป
3. เติมสารเคมีบำบัดน้ำ เข้าระบบน้ำหล่อเย็น (เคมีป้องกันตะกรัน , ตะไคร่ และการกัดกร่อน)
4. ติดตั้งไส้กรองในระบบน้ำหล่อเย็นเพื่อกรองสิ่งสกปรก และสารแขวนลอยออกจากระบบ

2.11.1 ตะกรัน

สาเหตุ

-น้ำที่ใช้ในระบบน้ำหล่อเย็นมีคุณภาพไม่เหมาะสมมีส่วนประกอบของสารละลายทำให้เกิดการกระด้าง

- เมื่อน้ำหล่อเย็นมีอุณหภูมิสูงขึ้นก็จะทำให้สารละลายจับตัวเป็นตะกรันได้ง่าย
- ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำสูงขึ้น ทำให้สารละลายจับตัวเป็นตะกรัน

ผลที่เกิดขึ้น

- ทำให้ประสิทธิภาพของการระบายความร้อนลดลง
- ทำให้ท่อและอุปกรณ์ที่น้ำไหลผ่านเกิดการอุดตัน

วิธีแก้ไข

- **ล้างด้วยสารเคมีที่เป็นกรดผสมตัวแหล่งปฏิกิริยา**
- **เติมสารป้องกันตะกรัน เช่น tachiles polylate**
- **ควบคุมการระบายน้ำออกจากระบบให้เหมาะสม**

2.11.2. ตะไคร่

สาเหตุ

- การหล่อเย็นเมื่อน้ำมีอุณหภูมิสูงขึ้น และได้รับแสงแดดทำให้เกิดการขยายตัวของ algae ,fungi ,bacteria และเมื่อพบกับฝุ่น

ผลที่เกิดขึ้น

- ทำให้ประสิทธิภาพการระบายความร้อนลดลง
- ทำให้ท่อและอุปกรณ์น้ำไหลผ่านอุดตัน

วิธีป้องกัน

- ล้างด้วยสารเคมีเป็นกลาง
- เติมเคมีฆ่าตะไคร่ เช่น tachiles

2.11.2 การกัดกร่อน

สาเหตุ

- สารละลายของเกลือในระบบน้ำหล่อเย็นมีปริมาณสูง
- ค่า pH ลดลงเพราะน้ำมีความเข้มข้นมากขึ้น

ผลที่เกิดขึ้น

- ทำให้เกิดการกัดกร่อนที่อุปกรณ์ต่าง ๆ
- ระบบเกิดการอุดตัน
- อายุการใช้งานอุปกรณ์ที่เป็นโลหะสั้นลง

วิธีแก้ไข

- ล้างด้วยสารเคมีที่เป็นกรด เช่น stain SS , stain CL
- เติมสารป้องกันสนิม เช่น Polylate
- เติมสารป้องกันการกัดกร่อน เช่น tachiles