กลไกการระบายความร้อนของสระน้ำระบายความร้อน
Cooling Mechanism in Cooling Pond

สรรพงศ์ รุ่งแสงมนูญ
ตรวจทานและแก้ไขโดย ดร. เชิดพันธ์ วิทูราภรณ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

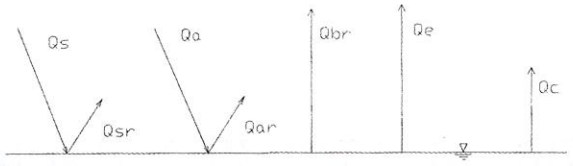
บทนำ

สระน้ำระบายความร้อนเป็นระบบระบายความร้อนที่มีการใช้กันอยู่อย่างแพร่หลายในโรงจักรไฟฟ้ากำลัง ปัจจุบันได้มีการนำสระน้ำระบายความร้อนมาใช้เพื่อการระบายความร้อนในระบบปรับอากาศ โดยนำมาเปรียบเทียบกับหอผึ่งน้ำซึ่งเป็นอุปกรณ์หลักที่ทำหน้าที่ระบายความร้อนให้กับระบบปรับอากาศ สระน้ำระบายความร้อนนั้นมีข้อดีหลายประการ เช่น มีค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ ประหยัดพลังงาน และที่สำคัญคือ มีความเฉื่อยทางด้านความร้อนสูง การที่สระน้ำระบายความร้อนมีความเฉื่อยทางด้านความร้อนสูงนั้นทำให้สระน้ำระบายความร้อนที่ได้รับการออกแบบอย่างเหมาะสมจะมีอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากสระน้ำค่อนข้างคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของสภาพอากาศบริเวณนั้น หรือการเปลี่ยนแปลงกำลังการผลิตของโรงจักรไฟฟ้ากำลังมากนัก นอกจากนี้สระน้ำระบายความร้อนก็มีผลต่อการเกิดหมอกน้อย เพราะมีพื้นที่ในการถ่ายเทความร้อนสู่บรรยากาศมาก ส่งผลให้สระน้ำระบายความร้อนมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าระบบปิดอื่นๆ อย่างไรก็ตาม สระน้ำระบายความร้อนก็มีข้อเสียกล่าวคือ ความที่สระน้ำระบายความร้อนต้องการพื้นที่มาก จึงเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้การใช้สระน้ำระบายความร้อนไม่เป็นที่นิยมมากนัก รวมทั้งพฤติกรรมของสระน้ำระบายความร้อนนั้นทำนายได้ค่อนข้างยาก

เนื่องจากว่าสระน้ำระบายความร้อนที่มีการใช้กันอยู่นั้นจะมีการใช้พื้นที่ของสระน้ำมากกว่าพื้นที่ที่ต้องการใช้จริงในการระบายความร้อน ถึงแม้ว่าการใช้พื้นที่ของสระน้ำระบายความร้อนที่เกินความต้องการนี้ไม่ได้ก่อให้เกิดปัญหาที่รุนแรง แต่จะมีผลกระทบต่อการพิจารณาทางเศรษฐศาสตร์ในการที่จะเลือกวิธีในการระบายความร้อน เพราะต้นทุนค่าที่ดินจะเพิ่มขึ้น การศึกษาการระบายความร้อนของสระน้ำระบายความร้อนจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยสามารถเขียนเป็นสมการการถ่ายเทความร้อน และมวล บนพื้นฐานของสมดุลพลังงาน ดังที่จะกล่าวต่อไป

สมการการถ่ายเทความร้อน

การถ่ายเทความร้อนผ่านผิวน้ำในสระน้ำระบายความร้อน แสดงได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงกลไกในการถ่ายเทความร้อนที่ผิวน้ำของสระน้ำระบายความร้อน

1. การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ (Q_s)

การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์เป็นการแผ่รังสีความยาวคลื่นสั้น มีเฉพาะในเวลากลางวัน โดยรังสีทั้งหมดจะมากระทบชั้นบรรยากาศภายนอกโลก บางส่วนจะสะท้อนกลับไปในอากาศ บางส่วนทะลุผ่านชั้นบรรยากาศลงมากระทบพื้นโลก และบางส่วนถูกดูดซับโดยไอน้ำ เมฆ และโอโซนในชั้นบรรยากาศ การคำนวณหาดังกล่าวจะกระทำได้ยุ่งยาก ดังนั้นจึงนิยมใช้การวัดมากกว่าการคำนวณ แต่กระนั้นก็ดี ก็มีผู้คิดค้นสมการในการหาค่าไว้ดังนี้

$$Q_s = Q_{sc}(1-0.65C^2)$$

เมื่อ Q_s = การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์

Q_{sc} = การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์เมื่อไม่มีเมฆ

C = เศษส่วนของเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า

2. การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากผิวสระน้ำ (Q_{sr})

วิธีที่สะดวกในการหาปริมาณนี้ คือ การหาค่าอัตราส่วนระหว่างการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากผิวสระน้ำ กับ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นบนผิวน้ำ เรียกอัตราส่วนนี้ว่า ค่าการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์, R_{sr}

$$R_{sr} = Q_{sr} / Q_s$$

ค่าการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์นี้จะหาได้จากการวัดแล้วนำมาเขียนเป็นกราฟ ซึ่งกราฟที่ได้จากการทดลองหาค่าการสะท้อนรังสีแสดงให้เห็นว่า ค่าการสะท้อนรังสีจะขึ้นอยู่กับระดับความสูงของดวงอาทิตย์ และปริมาณเมฆ โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.05 - 0.10

3. การแผ่รังสีจากบรรยากาศ (Q_a)

การแผ่รังสีจากบรรยากาศเป็นการแผ่รังสีความยาวคลื่นยาว การแผ่รังสีจากบรรยากาศนี้มีทั้งในเวลากลางวันและกลางคืน ทั้งในเวลาที่มีเมฆมากและมีเมฆน้อย แต่ในเวลากลางคืนและเวลาที่มีเมฆมาก จะมีปริมาณน้อยกว่าในเวลากลางวันและเวลาที่มีเมฆน้อย ความเข้มข้นของการแผ่รังสีนี้เป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนของหลายตัวแปร เช่น อุณหภูมิของบรรยากาศ ปริมาณและการกระจายตัวของโอโซน ไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ตัวแปรที่มีผลกับปริมาณการแผ่รังสีจากบรรยากาศอย่างเห็นได้ชัด คือ อุณหภูมิของอากาศและปริมาณไอน้ำ ซึ่งปริมาณการแผ่รังสีจากบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิของอากาศและปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น Swinbank ได้เสนอสูตรที่ได้จากการทดลองดังนี้

$$Q_a = 1.2 \times 10^{-3}(T_a + 460)^4(1 + 0.17C^2) \text{ Btu / ft}^2 \text{ / day}$$

เมื่อ Q_a = การแผ่รังสีจากบรรยากาศ

C = เศษส่วนของเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า

T_a = อุณหภูมิอากาศ, °F

4. การแผ่รังสีจากบรรยากาศที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ (Q_{ar})

ค่าการสะท้อนรังสีจากบรรยากาศ

$$R_{ar} = Q_{ar} / Q_a$$

Gier และ Dunkle ได้เขียนรายงานที่เกี่ยวกับค่าการสะท้อนรังสีจากบรรยากาศลงในหนังสือ "A Treatise on Limnology" โดยกล่าวว่าค่าการสะท้อนรังสีจากบรรยากาศของน้ำมีค่าประมาณคงที่อยู่ที่ 0.03

5. การแผ่รังสีจากผิวสระน้ำ (Q_{br})

การแผ่รังสีความยาวคลื่นยาวจากผิวสระน้ำเป็นปริมาณที่ใหญ่ที่สุดในวิธีดุลยภาพทางพลังงาน การหาค่านี้ได้อย่างถูกต้องค่อนข้างจะยาก เนื่องจากค่าการเปล่งรังสีของผิวน้ำ อย่างไรก็ตาม ถ้าเราทราบค่าอุณหภูมิของผิวน้ำที่ถูกต้องแล้ว การหาปริมาณการแผ่รังสีจากผิวสระน้ำก็จะง่ายขึ้น Anderson กล่าวว่า ค่าการเปล่งรังสีของผิวน้ำไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำ และความเข้มข้นของเกลือหรือสารคอลลอยด์ในน้ำ โดยให้มีค่า 0.97 $\pm$ 0.005 เขาจึง

สรุปสูตรการแผ่รังสีจากผิวน้ำไว้ดังนี้

$$Q_{br} = 0.97\sigma(Ts + 460)^4$$

$$= 4 \times 10^{-8}(T_s + 460)^4 \text{ Btu / ft}^2 \text{ /day}$$

เมื่อ Q_{br} = การแผ่รังสีจากผิวสระน้ำ

T_s = อุณหภูมิของผิวน้ำ, °F

σ = ค่าคงที่ Stefan - Boltzmann

$= 4.12 \times 10^{-8}$ Btu / ft^2 /day / (°R)^4

6. ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ (Q_e)

การระเหยของน้ำบนบริเวณผิวน้ำเกิดขึ้นทั้งโดยการพาความร้อนแบบบังคับและโดยธรรมชาติ ซึ่งทั้งสองส่วนนี้ต่างมีความสำคัญต่อการระเหยของน้ำ

ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำเป็นผลคูณของสองจำนวน คือ

➢ specific enthalpy (h_e) ต่อไอน้ำที่ระเหย 1 ปอนด์

➢ ปริมาณไอน้ำที่ระเหย (m_e)

ปริมาณตัวแรกสามารถหาได้ง่ายจากตารางคุณสมบัติของน้ำ แต่ปริมาณตัวที่สองขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ เช่น ความเร็วลมเฉลี่ย การกระจายของความเร็วลมในแนวตั้ง อุณหภูมิของผิวน้ำ และความดันไอในอากาศ สูตรในการหาปริมาณการระเหยของน้ำสามารถเขียนได้ดังนี้

$$m_e = \rho f(W_z) (P_{vs} - P_{va})$$

เมื่อ m_e = ฟลักซ์มวล (มวล / พื้นที่ / เวลา)

ρ = ความหนาแน่นของน้ำ

W_z = ความเร็วลมที่ความสูง z

$f(W_z)$ = ฟังก์ชันความเร็วลมของฟลักซ์มวลที่รวมทั้งผลของการระเหยของน้ำจากผิวน้ำที่เกิดขึ้นทั้งโดยการพาความร้อนแบบบังคับและโดยธรรมชาติ (ความยาว / เวลา / ความดัน)

P_{vs} = ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวน้ำ

P_{vz} = ความดันไอที่ความสูง z

มีการค้นหาสูตรที่ใช้ในการหาค่าของ $f(W_z)$ ไว้มากมาย โดยสามารถแยกหาได้ 2 วิธี คือ ทำการทดลองหาค่าของ $f(W_z)$ โดยการทำผิวน้ำร้อนเทียมขึ้นกับโดยการเก็บข้อมูลจากน้ำในธรรมชาติ ซึ่งค่าที่ได้จากทั้ง 2 วิธีก็ไม่ตรงกันมากนัก Rohwer และ Meyer ได้เสนอสูตรในการหาค่าของ $f(W_z)$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากน้ำในธรรมชาติไว้ดังนี้

$$f(W_z) = 22.4 (T_s - T_a)^{1/3} + 14W_z$$

เมื่อ W_z = ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร

T_s = อุณหภูมิของผิวน้ำ, °F

T_a = อุณหภูมิของอากาศ, °F

7. ฟลักซ์ความร้อนออกจากสระน้ำเนื่องจากการพาความร้อน (Q_c)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนคล้ายกับการระเหยของน้ำที่ถ่ายเทความร้อนจากผิวน้ำไปยังอากาศข้างบน ซึ่งสามารถหาได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทพลังงานที่เกิดจากการพาความร้อนกับฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ

Bowen ใช้ทฤษฎีการแพร่กระจายความร้อนในการหาอัตราส่วนนี้เป็นคนแรก ต่อมาได้มีการประมาณค่าของอัตราส่วนนี้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับพื้นผิวเรียบ

$$\gamma = Q_c / Q_e$$

$$= 3.245 \times 10^{-4} (T_s - T_a)P_{bar} / (P_s - P_a)$$

เมื่อ T_s = อุณหภูมิของผิวน้ำ

T_a = อุณหภูมิของอากาศ

P_{vs} = ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิของผิวน้ำ

P_{va} = ความดันไอของอากาศ

P_{bar} = ความดันของอากาศ, psia

ค่า γ จากสมการข้างบนมีลักษณะคล้ายกับสมการของ Bowen ต่างกันเพียงค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นตัวเลขข้างหน้า

กำหนดให้ Q_n เป็นความร้อนสุทธิที่ผ่านเข้ามาในน้ำ ซึ่งเป็นการรวมการถ่ายเทความร้อนที่กล่าวมาข้างต้นไว้ด้วยกัน โดยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_n = Q_s - Q_{sr} + Q_a - Q_{ar} - Q_{br} - Q_e - Q_c$$

กำหนดให้ Q_r เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีสุทธิ

$$Q_r = Q_s - Q_{sr} + Q_a - Q_{ar}$$

$$= Q_{sn} + Q_{an}$$

$$= Q_{sn} + 1.16 \times 10^{-13}(T_a + 460)^6(1 + 0.17C^2)$$

จะได้ว่า

$$Q_n = Q_r - (Q_{br} + Q_e + Q_c)$$
$$= Q_r - (4 \times 10^{-8}(T_a + 460)^4 + f (W_z) ((P_{vs} - P_{va}) + 3.245 \times 10^{-4} (T_s - T_a)P_{bar}))$$

เมื่อ

$$f(W_z) = 22.4 (T_s - T_a)^{1/3} + 14W_z$$

สำหรับสภาวะคงที่ เราสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$mc\partial T = Q_n \partial A$$

เมื่อ m = อัตราการไหลของมวลของน้ำ

c = ความจุความร้อนของน้ำ

สรุป

สระน้ำระบายความร้อนเป็นหนึ่งในวิธีการระบายความร้อนที่มีปริมาณความร้อนมาก สระน้ำระบายความร้อนมีข้อดีอยู่มากมาย แต่ข้อเสียที่สำคัญของสระน้ำระบายความร้อนคือ ความที่สระน้ำระบายความร้อนต้องการพื้นที่มาก จึงได้มีการศึกษากลไกในการระบายความร้อนของสระน้ำระบายความร้อน โดยนำส่วนประกอบที่มากมายของการระบายความร้อนที่พื้นผิวของน้ำมาวิเคราะห์ และสร้างเป็นสมการบนพื้นฐานของสมดุลพลังงานเพื่อทำนายการถ่ายเทความร้อน ทำให้สามารถลดพื้นที่ของสระน้ำระบายความร้อนลงได้

เอกสารอ้างอิง

An Engineering - Economic Study of Cooling Pond Performance, Littleton Research and Engineering Corporation, Environmental Protection Agency, May 1970

Patrick J. Ryan, and Donald R.F. Harleman, An Analytical and Experimental Study of Transient Cooling Pond Behavior, Report No. 161, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, January 1973

Gerhard H. Jirka, Masataka Watanabe, Kathleen Hurley Octavio, Carl F. Cerco, and Donald R.F. Harleman, Mathematical Predictive Model for Cooling Ponds, Report No. 238, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, December 1978