บทที่ 2

เอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทความที่ผ่านมา

สระน้ำระบายความร้อนทำหน้าที่เป็นแหล่งระบายความร้อนทิ้ง โดยรับพลังงานความร้อนที่ถูกระบายเข้ามาในคอนเดนเซอร์ และระบายความร้อนนี้ออกสู่บรรยากาศ ซึ่งพลังงานความร้อนที่เพิ่มเข้ามาในสระน้ำระบายความร้อน ได้มาจากการถ่ายเทความร้อนโดยตรงในคอนเดนเซอร์ การดูดซับการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ (การแผ่รังสีคลื่นสั้น) การดูดซับการแผ่รังสีจากบรรยากาศ (การแผ่รังสีคลื่นยาว) และน้ำเติม พลังงานความร้อนนี้จะระบายออกจากสระน้ำระบายความร้อน โดยการแผ่รังสีออกจากตัวสระน้ำระบายความร้อนเอง การพาความร้อน การระเหยของน้ำ และน้ำซึ่งไหลออกจากสระน้ำ การถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำในสระ และพื้นดินสามารถละทิ้งได้เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณที่กล่าวมาข้างต้น

แนวคิดในการคำนวณอุณหภูมิของน้ำโดยวิธีสมดุลพลังงาน เริ่มต้นจาก Cummings and Richardson (1927)

ต่อมา Lima (1936) เป็นคนแรกที่เปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดได้จากสระน้ำระบายความร้อน กับค่าที่คำนวณได้ Lima (1936) ได้เก็บข้อมูลของสระน้ำระบายความร้อนจากโรงไฟฟ้ากำลังหลายแห่ง นำมาเขียนเป็นชุดของกราฟที่ได้จากการทดลอง กราฟเหล่านี้สามารถนำมาใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างสระน้ำ กับบรรยากาศ (K=ความร้อนที่ถ่ายเทสู่บรรยากาศ ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ต่อหนึ่งหน่วยของความแตกต่างระหว่างความดันไอของน้ำในอากาศ และความดันไอของน้ำที่อุณหภูมิของผิวหน้าสระน้ำ) เมื่อทราบความเร็วลม อุณหภูมิอากาศ และกำลังของโรงไฟฟ้ากำลัง กราฟที่ได้จากการทดลองของ Lima (1936) สามารถใช้ทำนายอุณหภูมิของสระน้ำในช่วงที่ทำการศึกษาได้ โดยมีค่าความผิดพลาดประมาณ $\pm$ 5 °F แต่ไม่สามารถทำนายอุณหภูมิของสระน้ำนอกช่วงที่ทำการศึกษาได้อย่างถูกต้องนัก กราฟที่ได้จากการทดลองนี้ใช้ในการทำนายเฉพาะอุณหภูมิเฉลี่ยของสระน้ำ โดยไม่พิจารณาถึงผลของการกระจายของอุณหภูมิตามแนวตั้ง และแนวยาวได้

ต่อมา Throne (1951) ได้คิดค้นขบวนการวิเคราะห์เพื่อทำนายอุณหภูมิของสระน้ำระบายความร้อนด้วยพื้นฐานของวิธีสมดุลพลังงาน Throne (1951) เสนอเทคนิคในการสร้างกราฟ โดยอุณหภูมิของสระน้ำสามารถหาได้ถ้าทราบอุณหภูมิของอากาศ ความเร็วลม และกำลัง

ของโรงไฟฟ้ากำลัง Throne (1951) เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทำนายของเขากับข้อมูลที่เก็บจากโรงงานใน Colorado ทุกๆเดือน เป็นเวลา 298 เดือน ปรากฏว่ามีความผิดพลาดอยู่ในช่วง ± 5 °F ในการสร้างกราฟจำเป็นจะต้องทราบอุณหภูมิที่จุดสมดุลของสระน้ำในขณะที่ไม่มีพลังงานความร้อนที่ถูกทิ้งออกจากโรงไฟฟ้ากำลัง และกราฟนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานของอุณหภูมิที่ผิวหน้าสระน้ำเท่ากันตลอด และมีอุณหภูมิเบี่ยงเบนในแนวตั้งฉากจากผิวหน้าสระน้ำถึงก้นสระไม่เกิน 4 °F เปรียบเทียบกับกรณีของกราฟที่ได้จากการทดลองที่คิดโดย Lima (1936) แล้วเทคนิคของ Throne (1951) ไม่ได้รวมพฤติกรรมของสภาวะคงตัว หรือการประมาณนอกช่วงไว้อย่างชัดเจน

Langhaar (1953) เสนอเทคนิคในการวิเคราะห์บนพื้นฐานของวิธีสมดุลพลังงาน ซึ่งสามารถใช้ทำนายลักษณะการระบายความร้อนของสระน้ำ โดยไม่ต้องวัดอุณหภูมิที่จุดสมดุลของสระน้ำในขณะที่ไม่มีพลังงานความร้อนที่ถูกทิ้งออกจากโรงไฟฟ้ากำลัง วิธีของเขาสามารถรวมผลของการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวยาว และสภาวะไม่คงตัวไว้ด้วย Langhaar (1953) ได้รวมเทคนิคการวิเคราะห์ในการหาความจุในการระบายความร้อนของน้ำไหล โดย Le Bosque (1946) และรายงานการทดลองการศึกษาสมดุลพลังงานบนทะเลสาบ Hefner โดย Anderson (1952) เข้าด้วยกัน Langhaar (1953) เสนอผลงานของเขาในรูปแบบของเอกสารที่เกี่ยวกับสระน้ำระบายความร้อนโดยเฉพาะ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ของเขากับสระน้ำที่สามารถสังเกตการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวยาวได้ ตรงกันข้ามกับสระน้ำที่สังเกตโดย Throne (1951) ซึ่งอุณหภูมิผิวหน้าของสระน้ำคงที่

Velz และ Gannon (1959) ได้ทำการปรับปรุงงานของ Langhaar (1953) และเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการทำนาย และที่ได้จากการวัดของสระน้ำระบายความร้อนที่มีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวยาวที่ตั้งอยู่บริเวณ Shreveport, LA. และแม่น้ำใน Michigan ที่ได้รับพลังงานความร้อนที่ไม่ใช้แล้ว ในทั้ง 2 กรณีพบว่า อุณหภูมิที่ได้จากการคำนวณ และที่ได้จากการวัดต่างกันไม่เกิน ± 5 °F

Messinger (1963) รายงานผลการศึกษาของการทดลองบนสายน้ำที่มีภาระทางความร้อน การศึกษานี้ใช้เทคนิค energy budget ในการทำนายการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแม่น้ำ West Branch of the Susquehanna ใน Pennsylvania ซึ่งมีการทิ้งความร้อนลงในแม่น้ำ อุณหภูมิที่ได้จากการทำนายมีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากการวัดไม่เกิน 5 °F Messinger (1963) เชื่อว่าเป็นผลของความไม่เท่ากันในการวัดปริมาณการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ และบรรยากาศ ที่บางส่วนของผิวน้ำมีร่มเงา

Edinge และ Geyer (1965) เสนอความจุในการระบายความร้อนของน้ำในเทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนโดยการทำสมการสมดุลพลังงานเป็นเส้นตรง ผลของการศึกษานี้ถูกเสนอในรูปของสมการ แผนภาพ และตารางสำหรับสระน้ำทั้งที่มีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวยาว และไม่มีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวยาว พวกเขาประยุกต์สมการเส้นตรงของพลังงานสำหรับการใช้งานที่สภาวะคงตัวของสระน้ำแบบผสม (ไม่มีทั้งการกระจายของอุณหภูมิของน้ำทั้งในแนวยาว และแนวตั้ง) และสระน้ำแบบไหลทิ้ง (มีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวยาว แต่ไม่มีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวตั้ง) เพื่อเปรียบเทียบการทำงานของสระน้ำ 2 แบบนี้ แต่ก็ไม่ได้มีการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ได้จากการทำนายและที่ได้จากการวัดของสระน้ำทั้ง 2 แบบนี้

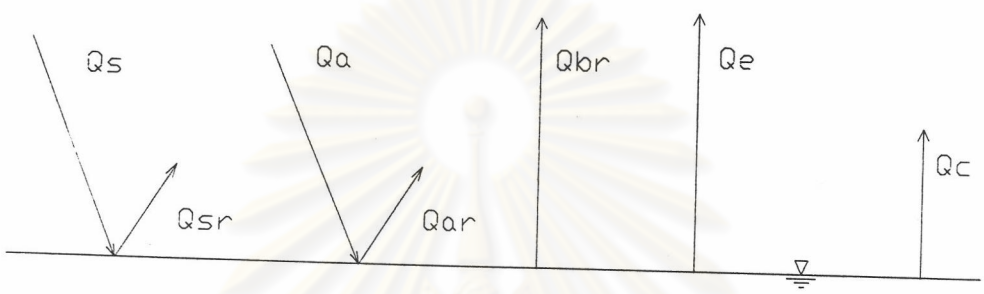
Littleton Research and Engineering Corporation (1970) เสนอ เทคนิคในการทำนายอุณหภูมิของสระน้ำระบายความร้อนด้วยวิธีสมดุลพลังงาน ซึ่งแยกการพิจารณาสระน้ำระบายความร้อนออกเป็นสระผสม (ไม่มีทั้งการกระจายของอุณหภูมิของน้ำทั้งในแนวยาว และแนวตั้ง) หรือสระไหล (มีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวยาว แต่ไม่มีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวตั้ง) อยู่ในสภาวะคงตัว หรือ สภาวะไม่คงตัว และมีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวตั้ง หรือไม่มีการกระจายของอุณหภูมิของน้ำในแนวตั้ง แล้วนำผลที่ได้จากการทำนายมาเปรียบเทียบกับ ค่าที่ได้จากการวัดใน Wilkes Plant-Jefferson,Texas Kincaid Plant-Kincaid,Illinois Cholla Plant-Joseph City,Arizona Mt. Storm Plant-Mt. Storm,West Virginia Four Corners Plant-Farmington,New Mexico

Patrick J.Ryan และ Donald R.F.Harleman (1973) ได้เสนอการทำนายอุณหภูมิของสระน้ำระบายความร้อนด้วยสมการอนุรักษ์ความร้อน ซึ่งสามารถทำนายอุณหภูมิได้ถึง 3 มิติ แล้วนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการทดลอง นอกจากนี้ยังนำมาเปรียบเทียบกับอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจากสระน้ำระบายความร้อน Harzlewood และทะเลสาบ Norman

Gerhard H.Jirka, Masataka Watanabe, Kathleen Hurley Octavio, Carl F.Cerco และ Donald R.F.Harleman (1978) ได้เสนอแนวทางในการออกแบบสระน้ำระบายความร้อน โดยศึกษาผลของทางเข้าสระน้ำ รูปแบบของสระน้ำ และผลของการมีบ่อลึกที่ทางออกของสระน้ำ

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สิ่งที่มีความสำคัญที่สุดในการทำนายพฤติกรรมของสระน้ำระบายความร้อน คือ ความรู้ที่ถูกต้องของฟลักซ์ความร้อนที่ผ่านผิวสระน้ำ ฟลักซ์เหล่านี้ประกอบด้วย การแผ่รังสีจากภายนอกสู่ผิวสระน้ำ, การแผ่รังสีกลับจากผิวสระน้ำ, การระเหยของน้ำ และการพาความร้อน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กลไกในการถ่ายเทความร้อนที่ผิวน้ำ

Q_s คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์

Q_{sr} คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ

Q_a คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศ

Q_{ar} คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ

Q_{br} คือ การแผ่รังสีจากผิวน้ำ

Q_e คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ

Q_c คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อน

มีการสร้างวิธีที่นำค่าที่ได้จากการทดลอง มาทำการประเมินค่าการถ่ายเทความร้อนขององค์ประกอบต่างๆสำหรับผิวน้ำธรรมชาติ อย่างไรก็ตามสำหรับพื้นผิวน้ำร้อนที่จำลองขึ้น เช่น สระน้ำระบายความร้อน ยังมีองค์ประกอบที่ยังไม่ทราบดีนัก คือ การระเหยของน้ำ และการพาความร้อน ในที่นี้จะนำสูตรใหม่ๆในการหาการระเหยของน้ำสำหรับพื้นผิวน้ำร้อนที่จำลองขึ้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ทั้งในห้องทดลอง และภาคสนาม มาใช้ในการวิเคราะห์ และองค์ประกอบอื่นๆ จะอธิบายอย่างสั้นๆ

1. การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ (Q_s)

การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์เป็นการแผ่รังสีความยาวคลื่นสั้น จะมีเฉพาะในเวลากลางวัน รังสีทั้งหมดที่แผ่มาจากแสงอาทิตย์จะมากระทบชั้นบรรยากาศภายนอกของโลก บางส่วนจะสะท้อนกลับไปในอากาศ บางส่วนผ่านชั้นบรรยากาศลงมากระทบพื้นโลก และบางส่วนถูกดูดซับโดยไอน้ำ เมฆ และโอโซนในชั้นบรรยากาศ ซึ่งปริมาณทั้ง 3 ส่วนที่กล่าวมานี้ซับซ้อนในการคำนวณ ดังนั้นปริมาณการแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์จึงนิยมการวัดมากกว่าการคำนวณ โดยการวัดสามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. วัดค่าการแผ่รังสีโดยตรง
2. หาค่าการแผ่รังสีโดยการวัดค่าที่วัดได้ง่าย และสามารถนำไปหาค่าการแผ่รังสีได้

แต่อย่างไรก็ตามได้มีการคิดค้นสูตรจากการหาการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สภาวะท้องฟ้าโปร่ง แล้วนำมาปรับใช้กับสภาวะที่มีเมฆปกคลุมท้องฟ้าไว้ดังสมการ (2.1)

$$Q_s = Q_{sc}(1 - 0.65C^2) \qquad (2.1)$$

เมื่อ Q_s คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ (W/m^2)

Q_{sc} คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สภาวะท้องฟ้าโปร่ง (W/m^2)

C คือ เศษส่วนของเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า

2. การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ (Q_{sr})

วิธีที่สะดวกในการหาปริมาณนี้ คือ การหาอัตราส่วนระหว่าง การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ กับ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่เกิดขึ้นบนผิวน้ำ เรียกอัตราส่วนนี้ว่า ค่าการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์

$$R_{sr} = Q_{sr} / Q_s \qquad (2.2)$$

เมื่อ R_{sr} คือ ค่าการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์

Q_{sr} คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ (W/m^2)

Q_s คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ (W/m^2)

ค่าการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์นี้จะได้มาจากการวัด แล้วนำมาเขียนเป็นกราฟ

กราฟที่ได้จากการทดลองหาค่าการสะท้อนรังสีแสดงให้เห็นว่า การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากผิวสระน้ำมีอิทธิพลมาจาก ความสูงของดวงอาทิตย์ และปริมาณเมฆ ดังนั้นค่าการสะท้องรังสีจากแสงอาทิตย์ และการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์จะขึ้นอยู่กับเวลาในแต่ละวัน โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.05 – 0.10 ค่าที่จะนำไปใช้จะเป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งค่าเฉลี่ยของการสะท้อนรังสีจากแสงอาทิตย์อยู่ที่ประมาณ 0.06

การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์สุทธิสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.3)

$$Q_{sn} = Q_s - Q_{sr}$$
$$= 0.94\, Q_{sc} (1 - 0.65C^2) \qquad (2.3)$$

เมื่อ Q_{sn} คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์สุทธิ (W / m^2)

Q_s คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ (W / m^2)

Q_{sr} คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ (W / m^2)

Q_{sc} คือ การแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ที่สภาวะท้องฟ้าโปร่ง (W / m^2)

C คือ เศษส่วนของเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า

3. การแผ่รังสีจากบรรยากาศ (Q_a)

การแผ่รังสีจากบรรยากาศ เป็นการแผ่รังสีความยาวคลื่นยาว ปริมาณความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีจากบรรยากาศเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากในดุลยภาพทางความร้อน ในหลายๆกรณี การแผ่รังสีจากบรรยากาศมีปริมาณมากเป็นอันดับ 2 รองจากการแผ่รังสีจากผิวสระน้ำ โดยทั่วไป การแผ่รังสีจากบรรยากาศจะมีปริมาณมากกว่าค่าเฉลี่ยของการแผ่รังสีจากแสงอาทิตย์ประมาณ 50% การแผ่รังสีจากบรรยากาศนี้มีทั้งในเวลากลางวัน และกลางคืน ทั้งในเวลาที่มีเมฆมาก และมีเมฆน้อย แต่ในเวลากลางคืน และเวลาที่มีเมฆมาก จะมีปริมาณน้อยกว่า ในเวลากลางวัน และเวลาที่มีเมฆน้อย ความเข้มข้นของการแผ่รังสีนี้เป็นฟังก์ชันที่ซับซ้อนของหลายตัวแปร เช่น อุณหภูมิของบรรยากาศ ปริมาณ และการกระจายของ โอโซน ไอน้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ตัวแปรที่มีผลกับปริมาณ การแผ่รังสีจากบรรยากาศอย่างเห็นได้ชัด คือ อุณหภูมิของอากาศ และปริมาณไอน้ำ ซึ่งปริมาณการแผ่รังสีจากบรรยากาศจะเพิ่มขึ้นเมื่อ

อุณหภูมิของอากาศ และปริมาณไอน้ำเพิ่มขึ้น สมการพื้นฐานสำหรับหาค่าการแผ่รังสีจากบรรยากาศคือ

$$Q_a = \varepsilon\sigma T_a^4 \qquad (2.4)$$

เมื่อ Q_a คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศ (W/m^2)

ε คือ ค่าการเปล่งรังสีเฉลี่ยของอากาศ

σ คือ ค่าคงที่ Stefan Boltzmann

$= 5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2.K^4$

T_a คือ อุณหภูมิของอากาศ (K)

ค่าการเปล่งรังสี ε เฉลี่ย เป็นสัดส่วนระหว่าง การแผ่รังสีจากบรรยากาศทั้งหมดต่อ การแผ่รังสีของวัตถุดำทั้งหมดที่อุณหภูมิเดียวกัน ค่าการเปล่งรังสีมีค่าเปลี่ยนแปลงจากประมาณ 0.7 สำหรับอุณหภูมิต่ำ และท้องฟ้าโปร่ง จนถึงเกือบ 1.0 สำหรับอุณหภูมิสูง และสภาวะที่มีเมฆมาก ทำให้การสมมติ ε = 1.0 ทำให้เกิดข้อผิดพลาดอย่างรุนแรงในการประเมินค่าการแผ่รังสีจากบรรยากาศมากเกินไป

สูตรในการหาค่าการแผ่รังสีจากบรรยากาศส่วนใหญ่ เริ่มต้นจากการหาสูตรสำหรับท้องฟ้าโปร่ง และนำมาปรับเป็นสมการที่มีผลของเมฆปกคลุมท้องฟ้าในภายหลัง พิจารณาสูตรสำหรับท้องฟ้าโปร่งที่สำคัญ ดังนี้

2 สูตรในช่วงแรกที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ สูตรของ Brunt (1932) และ Angstrom (1918) ซึ่งตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ ε ขึ้นอยู่กับความดันไอของอากาศเพียงอย่างเดียว สมการของ Brunt (1932) สำหรับการแผ่รังสีจากบรรยากาศในสภาวะท้องฟ้าโปร่ง คือ

$$Q_{ac} = \sigma T_a^4 (a + b\sqrt{P_{va}}) \qquad (2.5)$$

เมื่อ Q_{ac} คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศที่สภาวะท้องฟ้าโปร่ง (W/m^2)

σ คือ ค่าคงที่ Stefan Boltzmann

$= 5.67 \times 10^{-8}\ W/m^2.K^4$

T_a คือ อุณหภูมิของอากาศ (K)

P_{va} คือ ความดันไอของอากาศ (Pa)

a, b เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

และสูตรของ Angstrom (1918)

$$Q_{ac} = \sigma T_a^4 (c - de^{-\beta P_{va}}) \qquad (2.6)$$

เมื่อ Q_{ac} คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศที่สภาวะท้องฟ้าโปร่ง (W / m^2)

σ คือ ค่าคงที่ Stefan Boltzmann

= $5.67 \times 10^{-8} W / m^2.K^4$

T_a คือ อุณหภูมิของอากาศ (K)

P_{va} คือ ความดันไอของอากาศ (Pa)

c, d และ β เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง

Swinbank (1963) และ Idso กับ Jackson (1969) ได้เสนอสูตรซึ่ง ε ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของอากาศเพียงอย่างเดียว Idso กับ Jackson (1969) แสดงว่า เลขชี้กำลังของอุณหภูมิของอากาศเป็น 6 จะให้ผลดีที่สุดที่อุณหภูมิต่ำ และยังให้ผลดีที่อุณหภูมิสูง ต่อมาได้มีการทดสอบสูตรทั้ง 2 ซึ่งให้ผลที่ดีเทียบกับข้อมูลจากหลายๆสถานที่

Morgan, Pruitt และ Laurence (1971) ทำการเปรียบเทียบสูตรในการหาการแผ่รังสีจากบรรยากาศกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่ Davis, California ผลที่ดีที่สุดได้จากการใช้สูตรของ Brunt ต่อมา Wunderlich (1972) ทดสอบสูตรหลายๆสูตร เทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการทดลองที่ Tennessee และพบว่าสูตรของ Swinbank (1963) ให้ผลที่ใกล้เคียงที่สุด Wunderlich (1972) แนะนำให้ใช้สูตรของ Swinbank (1963) ที่อุณหภูมิของอากาศสูงกว่า 5 °C และใช้สูตรของ Idso กับ Jackson (1969) ที่อุณหภูมิของอากาศต่ำกว่า 5 °C

สูตรของ Swinbank (1963)

$$Q_a = 3.97 \times 10^{-13} (T_a + 273)^6 \qquad (2.7)$$

เมื่อ Q_a คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศ (W / m^2)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศ (°C)

สูตรของ Idso กับ Jackson (1969)

$$Q_a = 1.93 \times 10^{-7} (T_a + 273)^6 (1 - 0.261e^{-\phi}) \qquad (2.8)$$

เมื่อ ϕ = $7.78 \times 10^{-4} T_a^2$

Q_a คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศ (W / m^2)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศ (°C)

ที่อุณหภูมิสูงกว่า 10 °C ทั้ง 2 สูตรจะให้ผลใกล้เคียงกันมาก

สมการของการแผ่รังสีจากบรรยากาศที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ทั้งหมดเป็นสมการที่ใช้สำหรับสภาวะที่ท้องฟ้าโปร่ง แต่ในสภาวะจริง จะมีผลของเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้ามาเกี่ยวข้องในการคำนวณ โดยเมฆจะมีพฤติกรรมคล้ายวัตถุดำ ซึ่งจะมีผลในการเพิ่มการแผ่รังสีจากบรรยากาศ Wunderlich (1972) แนะนำสูตรในการหาการแผ่รังสีจากบรรยากาศ ดังนี้

$$Q_a = Q_{ac}(1 + 0.17C^2) \qquad (2.9)$$

เมื่อ Q_a คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศ (W / m^2)

Q_{ac} คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศที่สภาวะท้องฟ้าโปร่ง (W / m^2)

C คือ เศษส่วนของเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า

Anderson (1954) กล่าวว่า สูตรของ Brunt (1932) และ Angstrom (1918) มีข้อจำกัดในการใช้งานได้ถูกต้อง $\pm$ 10 % Morgan et. al. (1971) พบว่าสูตรของ Swinbank (1963) มีค่าความผิดพลาด $\pm$ 4 - 5 % จึงสรุปได้ว่า สูตรของ Swinbank (1963) เป็นวิธีที่ง่าย และให้ผลที่เชื่อถือได้ในการหาการแผ่รังสีจากบรรยากาศภายใต้ความผิดพลาด $\pm$ 5 %

4. การแผ่รังสีจากบรรยากาศที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ (Q_{ar})

ค่าการสะท้อนรังสีจากบรรยากาศ

$$R_{ar} = Q_{ar} / Q_a \qquad (2.10)$$

เมื่อ R_{ar} คือ ค่าการสะท้อนรังสีจากบรรยากาศ

Q_{ar} คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศที่สะท้อนกลับจากผิวน้ำ (W / m^2)

Q_a คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศ (W / m^2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Gier และ Dunkle (1957) เขียนรายงานที่เกี่ยวกับค่าการสะท้อนรังสีจากบรรยากาศลงในหนังสือ A Treatise on Limnology โดยกล่าวว่าค่าการสะท้อนรังสีจากบรรยากาศของน้ำมีค่าประมาณคงที่อยู่ที่ 0.03

สูตรในการหาการแผ่รังสีจากบรรยากาศสุทธิ จึงเป็นดังสมการ (2.11)

$$Q_{an} = 3.85 \times 10^{-13} (T_a + 273)^6 (1 + 0.17C^2) \qquad (2.11)$$

เมื่อ Q_{an} คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศสุทธิ (W / m^2)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศ ($^\circ C$)

C คือ เศษส่วนของเมฆที่ปกคลุมท้องฟ้า

สมการที่ประมาณเป็นเส้นตรงสำหรับสภาวะมีเมฆปกคลุมเฉลี่ย (C = 0.5)

$$Q_{an} = 109.36 + 6.89T_a \qquad (2.12)$$

เมื่อ Q_{an} คือ การแผ่รังสีจากบรรยากาศสุทธิ (W / m^2)

T_a คือ อุณหภูมิอากาศ ($^\circ C$)

5. การแผ่รังสีจากผิวน้ำ (Q_{br})

การแผ่รังสีความยาวคลื่นยาวจากผิวน้ำเป็นปริมาณที่ใหญ่ที่สุดในวิธีดุลยภาพทางพลังงาน มันเป็นการยากในการหาค่านี้ได้อย่างถูกต้อง เนื่องจากค่าการเปล่งรังสีของผิวน้ำ อย่างไรก็ตามถ้าเราทราบอุณหภูมิของผิวน้ำที่ถูกต้องแล้ว การหาปริมาณการแผ่รังสีจากผิวสระน้ำก็จะง่ายขึ้น Anderson (1954) กล่าวว่า ค่าการเปล่งรังสีของผิวน้ำไม่ขึ้นกับอุณหภูมิของน้ำ และความเข้มข้นของเกลือ หรือสารคอลลอยด์ในน้ำ โดยให้มีค่า 0.97 ± 0.005 เขาจึงสรุปสูตรการแผ่รังสีจากผิวน้ำไว้ดังสมการ (2.13)

$$Q_{br} = 0.97 \sigma (T_s + 273)^4$$

$$= 5.5 \times 10^{-8} (T_s + 273)^4 \qquad (2.13)$$

เมื่อ Q_{br} คือ การแผ่รังสีจากผิวน้ำ (W / m^2)

T_s คือ อุณหภูมิของผิวน้ำ ($^\circ C$)

σ คือ ค่าคงที่ Stefan Boltzmann

$= 5.67 \times 10^{-8} W / m^2.K^4$

การทำสมการให้เป็นเส้นตรงอย่างง่ายสำหรับการหาค่าการแผ่รังสีจากผิวน้ำ

$$Q_{br} = 218.72 + 5.66T_s \qquad (2.14)$$

เมื่อ Q_{br} คือ การแผ่รังสีจากผิวน้ำ (W / m^2)

T_s คือ อุณหภูมิของผิวน้ำ ($^{\circ}C$)

6. ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ (Q_e)

การระเหยของน้ำจากผิวน้ำเกิดจากผลของการพาความร้อนโดยการบังคับ และการพาความร้อนโดยธรรมชาติ ทั้ง 2ส่วนนี้มีความสำคัญต่อการระเหยของน้ำ

ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำเป็นผลคูณของ 2 จำนวน คือ

- ความร้อนแฝงจำเพาะในการระเหยของน้ำ (h_{fg})
- ปริมาณการระเหยของน้ำ (m_e)

การระเหยของน้ำจากผิวน้ำสามารถเขียนได้ดังสมการ (2.15)

$$m_e = \rho F(W_z) (P_{vs} - P_{vz}) \qquad (2.15)$$

เมื่อ m_e คือ ปริมาณการระเหยของน้ำ ($kg / m^2.sec$)

ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m^3)

W_z คือ ความเร็วลมที่ความสูง z

$F (W_z)$ คือ ฟังก์ชันความเร็วลมของฟลักซ์มวลที่รวมทั้งผลของการระเหยของน้ำจากผิวน้ำเกิดขึ้นทั้งโดยการบังคับ และโดยธรรมชาติ

P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวน้ำ (Pa)

P_{vz} คือ ความดันไอที่ความสูง z (Pa)

ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอของน้ำ สามารถเขียนเป็นสมการในรูปของอุณหภูมิของผิวน้ำ ดังสมการ (2.16)

$$h_{fg} = 2501 - 2.33T_s \qquad (2.16)$$

เมื่อ h_{fg} คือ ความร้อนแฝงจำเพาะในการระเหยของน้ำ (J / kg)

T_s คือ อุณหภูมิของผิวน้ำ (°C)

ซึ่งเราจะสมมติให้เป็นค่าคงที่ (2450 J / kg) เขียนสมการการระเหยของน้ำใหม่ในรูปของฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ ได้ดังสมการ (2.17)

$$Q_e = f(W_z)\,(P_{vs} - P_{vz}) \qquad (2.17)$$

เมื่อ Q_e คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ (W / m^2)

$f(W_z)$ คือ ฟังก์ชันของความเร็วลมสำหรับฟลักซ์ความร้อน

P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวน้ำ (Pa)

P_{vz} คือ ความดันไอที่ความสูง z (Pa)

มีการค้นหาสูตรที่ใช้ในการหาค่าของ $f(W_z)$ ไว้มากมาย สามารถแยกได้ 2 วิธี คือ ทำการทดลองหาค่าของ $f(W_z)$ โดยการทำผิวน้ำร้อนเทียมขึ้น กับ เก็บข้อมูลจากน้ำในธรรมชาติ ซึ่งค่าที่ได้จากทั้ง 2 วิธีก็ไม่ตรงกันมากนัก Rohwer และ Meyer (1931) ได้เสนอสูตรในการหาค่าของ $f(W_z)$ ที่ได้จากการเก็บข้อมูลจากน้ำในธรรมชาติไว้ดังสมการ (2.18)

$$f(W_2) = 7.24 \times 10^{-3}\,(T_s - T_a)^{1/3} + 14W_2 \qquad (2.18)$$

เมื่อ W_2 คือ ความเร็วลมที่ความสูง 2 เมตร

T_s คือ อุณหภูมิของผิวน้ำ (°C)

T_a คือ อุณหภูมิของอากาศ (°C)

จะได้สมการของการหาฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำดังสมการ (2.19)

$$Q_e = 1.21 \times 10^{-3}\,(h_{fg} / c_p P)\,(T_s - T_a)^{1/3}(P_{vs} - P_{va}) \qquad (2.19)$$

เมื่อ Q_e คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ (W / m^2)

h_{fg} คือ ความร้อนแฝงจำเพาะในการระเหยของน้ำ (J / kg)

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ (J / kg.K)

P คือ ความดันบรรยากาศ (Pa)

T_s คือ อุณหภูมิของผิวน้ำ (°C)

T_a คือ อุณหภูมิของอากาศ (°C)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวน้ำ (Pa)

P_{va} คือ ความดันไอของบรรยากาศ (Pa)

สำหรับสภาวะมาตรฐาน สามารถลดรูปของสมการได้เป็นสมการ (2.20)

$$Q_e = 7.24 \times 10^{-3} (T_s - T_a)^{1/3} (P_{vs} - P_{va}) \qquad (2.20)$$

เมื่อ Q_e คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ (W / m^2)

T_s คือ อุณหภูมิของผิวน้ำ (°C)

T_a คือ อุณหภูมิของอากาศ (°C)

P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิผิวน้ำ (Pa)

P_{va} คือ ความดันไอของบรรยากาศ (Pa)

7. ฟลักซ์ความร้อนออกจากสระน้ำเนื่องจากการพาความร้อน (Q_c)

การถ่ายเทความร้อนโดยการพาความร้อนคล้ายกับการระเหยของน้ำที่ถ่ายเทความร้อนจากผิวน้ำไปยังอากาศข้างบน มันสามารถหาได้โดยการหาอัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทพลังงานที่เกิดจากการพาความร้อน กับฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ

Bowen (1926) ใช้ทฤษฎีการแพร่กระจายความร้อนในการหาอัตราส่วนนี้เป็นคนแรก ต่อมาได้มีการประมาณค่าของอัตราส่วนนี้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสำหรับพื้นผิวเรียบ

$$\gamma = Q_c / Q_e \qquad (2.21)$$
$$= 240.2 (T_s - T_a) / (P_{vs} - P_{va})$$

เมื่อ γ คือ อัตราส่วนระหว่างการถ่ายเทพลังงานที่เกิดจากการพาความร้อน กับฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ

Q_e คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการระเหยของน้ำ (W / m^2)

Q_c คือ ฟลักซ์ความร้อนที่เกิดจากการพาความร้อน (W / m^2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

T_s คือ อุณหภูมิของผิวน้ำ (°C)

T_a คือ อุณหภูมิของอากาศ (°C)

P_{vs} คือ ความดันไออิ่มตัวที่อุณหภูมิของผิวน้ำ (Pa)

P_{va} คือ ความดันไอของอากาศ (Pa)

ค่า γ จากสมการข้างบนมีลักษณะคล้ายกับสมการของ Bowen (1926) ต่างกันเพียงค่าสัมประสิทธิ์ที่เป็นตัวเลขข้างหน้า

กำหนดให้ Q_n เป็นความร้อนสุทธิที่ผ่านเข้ามาในน้ำ ซึ่งเป็นการรวมการถ่ายเทความร้อนที่กล่าวมาข้างต้นไว้ด้วยกัน โดยสามารถเขียนได้ดังนี้

$$Q_n = Q_s - Q_{sr} + Q_a - Q_{ar} - Q_{br} - Q_e - Q_c \qquad (2.22)$$

เมื่อ Q_n คือ การถ่ายเทความร้อนสุทธิ

แล้วกำหนดให้ Q_r เป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดจากการแผ่รังสีสุทธิ

$$\begin{aligned} Q_r &= Q_s - Q_{sr} + Q_a - Q_{ar} \\ &= Q_{sn} + Q_{an} \\ &= Q_{sn} + 3.85 \times 10^{-13}(T_a + 273)^6(1 + 0.17C^2) \end{aligned} \qquad (2.23)$$

เมื่อ Q_r คือ การแผ่รังสีสุทธิ

จะได้ว่า

$$\begin{aligned} Q_n &= Q_r - (Q_{br} + Q_e + Q_c) \\ &= Q_r - [5.5 \times 10^{-8}(T_a + 273)^4 + f (W_2) (P_{vs} - P_{va}) \\ &\quad [1 + 240.2 (T_s - T_a) / (P_{vs} - P_{va})]] \end{aligned} \qquad (2.24)$$

เมื่อ

$$f(W_2) = 7.24 \times 10^{-3} (T_s - T_a)^{1/3} + 14W_2$$

เราสามารถเขียนสมการสมดุลพลังงานได้ดังนี้

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = mc_p \Delta T + Q_n A \qquad (2.25)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำ (kg / m^3)

c_p คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ ($J / kg.K$)

V คือ ปริมาตรของน้ำ (m^3)

$\frac{dT}{dt}$ คือ อัตราการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิของน้ำ เทียบกับเวลา ($^{\circ}C / sec$)

m คือ อัตราการไหลของน้ำ (kg / sec)

ΔT คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของน้ำที่เข้าสระน้ำ และอุณหภูมิของน้ำที่ออกจากสระน้ำ ($^{\circ}C$)

Q_n คือ การถ่ายเทความร้อนสุทธิ (W / m^2)

A คือ พื้นที่ของสระน้ำ (m^2)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย