

การควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบแผ่รังสีจากพื้น Control Strategy of Radiant Floor Cooling System

เกียรติยศ ศิริอด¹ ชโลธร ธรรมแท้² อุณัติ พินโสภณ¹ จินดา เจริญพรพาณิชย์¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร 0-2326-4197 โทรสาร 0-2326-4198 E-mail: kchchind@kmitl.ac.th

²สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต เขตสวนหลวง กรุงเทพฯ 10250

โทร 02-321-6930-9 ต่อ 212 โทรสาร 02-321-4444 E-mail ch_thumt@kbu.ac.th

Kiettiyod Deerod¹, Chalothorn Thumthae², Unnat Pinsophon¹, Chinda Charoenphonphanich¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Ladkrabang

Chalongkrung Rd. Ladkrabang Bangkok 10520 Thailand

Tel: 0-2326-4197 Fax: 0-2326-4198 E-mail: kchchind@kmitl.ac.th

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University,

Suanluang Bangkok 10250 Thailand, Tel: +66-2-321-6930-9 Ext.212 Fax: +66-2-321-4444 E-mail ch_thumt@kbu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการควบคุมการทำงานของระบบทำความเย็นแบบการแผ่รังสีความเย็นจากพื้น โดยทำการทดลองในห้องทดสอบหลักการคือให้ระบบสามารถทำความเย็นในระดับที่ต้องการโดยไม่มีปัญหาพื้นเย็นเกินไปทำให้รู้สึกไม่สบายหรือเกิดการควบแน่นที่พื้น การควบคุมทำได้โดยการปรับอัตราการไหลและอุณหภูมิของน้ำเย็นที่ป้อนเข้าไปในพื้น ตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมคือ อุณหภูมิที่พื้น อุณหภูมิ น้ำเข้า อุณหภูมิ น้ำออก ค่าความชื้นภายในห้อง จากผลการทดลองพบว่าสามารถควบคุมให้ระบบทำงานได้โดยไม่เกิดปัญหาใดๆ

Abstract

The aim of this study is to find out the suitable control strategy for radiant floor cooling system. The experiment was done in the radiant floor cooling test room. The parameters used for controlling the system are floor surface temperature, supply-return water temperature and room humidity. The final target of this study is to obtain the maximum capacity without problems of condensation and thermal comfort.

1. บทนำ

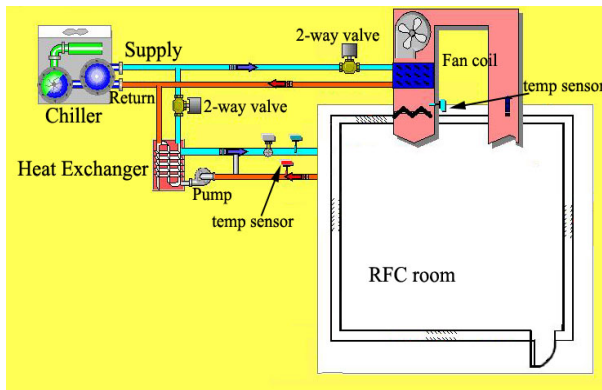
ในปัจจุบันมีการใช้พลังงานในการปรับอากาศมากขึ้นทั้งในเมืองหนาวและเมืองร้อน มีความพยายามที่จะลดการใช้พลังงานลงด้วยวิธีต่างๆ เช่น การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในการทำความเย็น การออกแบบอาคารให้มีการสูญเสียพลังงานน้อยลง อย่างไรก็ตามระบบ

ปรับอากาศที่ผ่านมาใช้ระบบการพาความร้อนด้วยอากาศซึ่งมีข้อจำกัดเรื่องประสิทธิภาพ จึงมีการคิดค้นการปรับอากาศโดยใช้การแผ่รังสีจากผนังหรือพื้นโดยส่งท่อน้ำไว้ใต้ผนังหรือพื้น ระบบดังกล่าวมีข้อดีคือประสิทธิภาพสูง เนื่องจากสัมประสิทธิ์ของการแลกเปลี่ยนความร้อนของของเหลวดีกว่าก๊าซ การปรับอากาศทำได้สม่ำเสมอว่าการเป่าอากาศออกมาเป็นจุดเพราะการแผ่รังสีเกิดขึ้นพร้อมกันทั่วพื้นหรือผนังที่มีการส่งท่อน้ำไว้ข้างใต้ อย่างไรก็ตามการปรับอากาศโดยการแผ่รังสีนี้ไม่สามารถจัดการกับความชื้นในอากาศได้ จึงมักต้องใช้ร่วมกับระบบปรับอากาศเดิมที่ใช้อากาศเป็นตัวกลางช่วยดูดซับความชื้นภายในอาคาร ระบบปรับอากาศแบบนี้เริ่มมีใช้มากขึ้นในต่างประเทศโดยเฉพาะในเมืองหนาว โดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบระบบทำความร้อน ในเมืองไทยยังไม่มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากยังไม่ค่อยเป็นที่รู้จัก อาคารที่จะนำระบบนี้มาใช้แห่งแรกคือสนามบินสุวรรณภูมิ ระบบการทำความเย็นด้วยการแผ่รังสีนี้มีข้อจำกัดมากกว่าการทำความร้อนเนื่องจากผลของการควบแน่นของไอน้ำในอากาศ

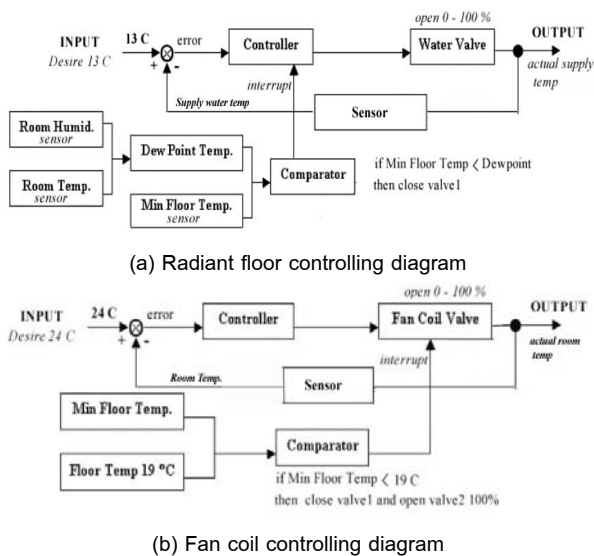
มีงานวิจัยที่ศึกษาระบบนี้ในต่างประเทศซึ่งศึกษาถึงข้อจำกัดและสมรรถนะการทำความเย็นของระบบนี้ [1 - 3] แต่ในกรณีสนามบินสุวรรณภูมิเป็นการทำความเย็นซึ่งมีแสงแดดตกกระทบบนพื้นโดยตรงในพื้นที่บางส่วนซึ่งการควบคุมการทำความเย็นจะแตกต่างจากกรณีที่ใช้ในประเทศอื่นๆ [4] งานวิจัยนี้ศึกษาถึงวิธีการควบคุมการทำความเย็นแบบการแผ่รังสีให้ทำความเย็นได้มากที่สุดโดยหลีกเลี่ยงการเกิดการควบแน่นและความรู้สึกรู้สึกไม่สบายซึ่งเกิดจากพื้นเย็นเกินไป

2. ห้องทดสอบและวิธีการทดลอง

รูปที่ 1 แสดงการทำงานของระบบการทำความเย็นในห้องทดสอบ ประกอบด้วยสองส่วนคือน้ำเย็นที่ป้อนจากซิลเลอร์ไปยังพื้นและไปยัง fan coil โดยมีทวี่วาล์วในการปรับปริมาณน้ำที่จะส่งไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนเพื่อส่งพลังงานไปยังพื้นและไปยัง fan coil พื้นเย็นจะทำหน้าที่แผ่รังสีความเย็นเข้าไปในห้องในขณะที่ fan coil จะควบคุมอุณหภูมิของอากาศและความชื้นภายในห้อง



รูปที่ 1. แผนผังแสดงการทำงานของระบบในห้องทดสอบ

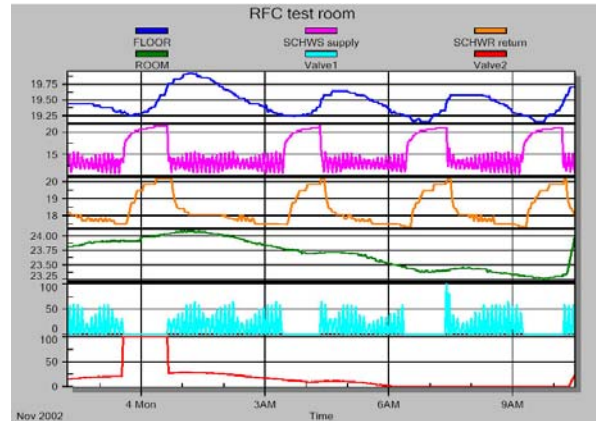


รูปที่ 2. แผนผังการควบคุมระบบของพื้นและแฟนคอยล์

ระบบควบคุมจะแบ่งออกเป็นสองชุด ชุดที่หนึ่งสำหรับควบคุมวาล์วน้ำเย็นที่จะเข้าไปยังเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนและอีกชุดสำหรับควบคุมวาล์วน้ำเย็น ที่จะเข้าที่ชุด fan coil ลักษณะการควบคุมเป็นแบบ Proportional Control โดยจะมีการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ต้องการ ซึ่งสำหรับในขั้นตอนนี้ใช้อุณหภูมิที่เข้าระบบการทำความเย็นโดยการแผ่รังสีที่พื้น (RFC) เป็นตัวกำหนดการ เปิด-ปิด ของวาล์วน้ำที่พื้น (water valve) และ ใช้อุณหภูมิเฉลี่ยของห้อง เป็นตัวกำหนดการ เปิด-ปิด ของวาล์วน้ำที่ fan coil

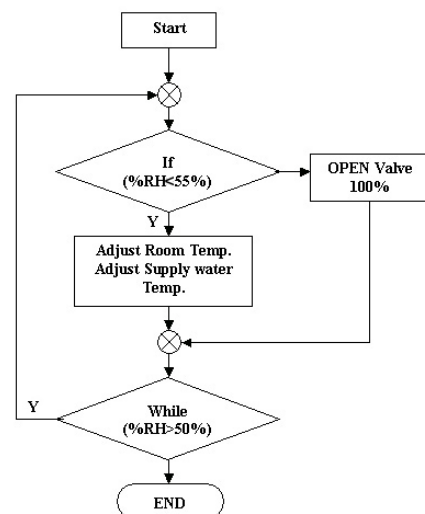
เนื่องจากการควบคุมระบบนี้มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอื่นๆด้วย เช่น การควบคุมเป็นหยดน้ำ ค่าอุณหภูมิที่ออกแบบไว้ ที่จุดอื่นๆ จึงต้องมี

เงื่อนไขในการควบคุมระบบเพิ่มขึ้น เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และตรงตามที่ได้ออกแบบไว้ เงื่อนไขที่เพิ่มขึ้นมากก็คือจะต้องไม่ให้อุณหภูมิต่ำสุดของพื้นต่ำกว่าอุณหภูมิการควบแน่นเป็นหยดน้ำ (อุณหภูมิจุดน้ำค้างหรือ Dew Point Temperature) หากเงื่อนไขนี้เกิดขึ้นจะให้ตัวควบคุมไปสั่งการให้ปิดวาล์วน้ำที่พื้นทันที และรอนกว่าอุณหภูมิที่พื้นจะสูงกว่าอุณหภูมิจุดน้ำค้าง 0.5°C จึงเริ่มให้วาล์วเปิดทำงานอีกครั้ง และหากพื้นมีอุณหภูมิเย็นลงจนใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ออกแบบที่ 19°C จะทำการปิดวาล์วที่พื้น และจะให้เปิดวาล์วที่ fan coil เต็มที่ เพื่อรักษาอุณหภูมิที่พื้นไม่ให้ต่ำเกินไป และดึงเอาความชื้นออกจากระบบเพื่อให้ระบบกลับสู่สภาวะทำงาน

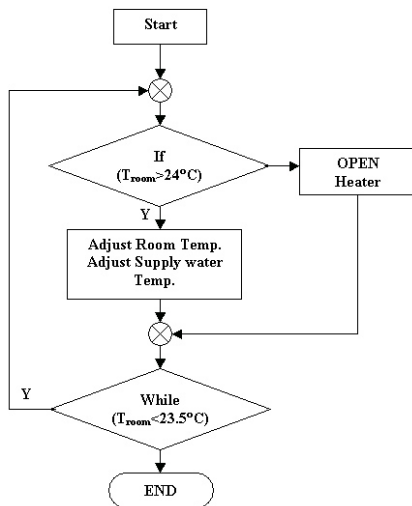


รูปที่ 3. แสดงการเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิและสถานะของวาล์วที่เวลาต่างๆ

ผลที่ได้จากการควบคุมในขั้นต้นได้แสดงดังรูปที่ 3 เมื่ออุณหภูมิของพื้นลดต่ำลงจนถึงค่าวิกฤติที่ตั้งไว้ วาล์วน้ำของพื้นจะปิดเพื่อไม่ให้น้ำที่เข้าสู่ระบบ RFC เย็นเกินไป เมื่อปิดวาล์วอุณหภูมิน้ำเข้าจะสูงกว่าอุณหภูมิที่พื้น ความร้อนจากน้ำจึงถ่ายเทสู่พื้นทำให้น้ำออกมีอุณหภูมิต่ำกว่าน้ำเข้าและพื้นมีอุณหภูมิที่สูงขึ้น ในขณะเดียวกันวาล์วที่ fan coil ก็เปิดเต็มที่ได้เพื่อให้อุณหภูมิคอยล์เย็นเย็นจัดเพื่อดึงเอาน้ำออกจากระบบและจะทำให้อุณหภูมิจุดน้ำค้างลดต่ำลง สภาวะนี้จะคงอยู่นกว่าค่าต่างๆจะกลับสู่ปรกติ วาล์วทั้งสองตัวจึงจะทำงานตามปรกติอีกครั้ง



รูปที่ 4 การทำงานของแฟนคอยล์เพื่อควบคุมความชื้น



รูปที่ 5. แผนผังการทำงานของขดลวดทำความร้อน

รูปที่ 4 และ 5 แสดงการควบคุมความชื้นโดยแฟนคอยล์วาล์วจะเปิดเต็มที่เมื่อความชื้นเกินค่าที่กำหนดเพื่อลดความชื้นออกจากระบบ ในขณะที่ฮีตเตอร์ซึ่งติดตั้งไว้ที่หัวจ่ายจะถูกเปิดให้ทำงานเพิ่มอุณหภูมิในห้องมีอุณหภูมิต่ำเกินไป

การทดลองทำที่สภาวะเหมือนจริงของสภาพการแผ่รังสีความร้อนจากดวงอาทิตย์ตลอด 24 ชั่วโมง เปิดไฟให้รังสีความร้อนลงที่พื้นให้คล้ายกับรังสีจากดวงอาทิตย์ตลอดวัน

การศึกษาเพื่อหาวิธีการควบคุมที่เหมาะสมที่สุดเพื่อให้งานระบบเป็นไปอย่างราบเรียบยิ่งขึ้นจึงต้องทำการทดลองการควบคุมแบบต่างๆ ที่สนใจ ซึ่งจะสามารถแบ่งได้ตามลักษณะการควบคุมเป็น 4 กรณีดังนี้

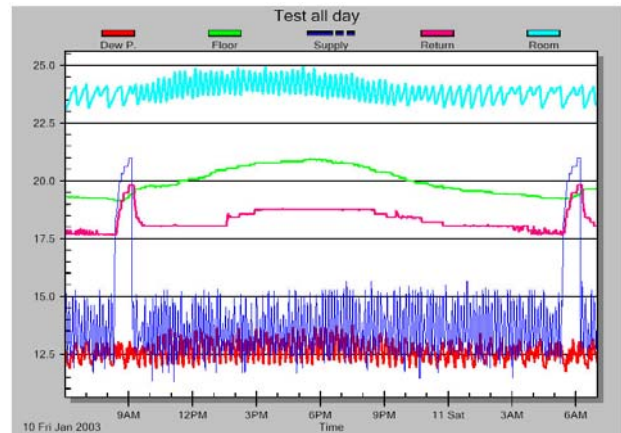
1. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้คงที่
2. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าตามอุณหภูมิพื้น
3. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก (return-supply)
4. ควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก

3. ผลการทดลอง

3.1 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้คงที่

การทดลองเปิดไฟให้รังสีความร้อนลงที่พื้นให้คล้ายกับรังสีจากดวงอาทิตย์ตลอดวัน และคุมความชื้นที่ 50-55 %RH อุณหภูมิห้องอยู่ที่ 24°C อุณหภูมิพื้นคุมไว้ไม่ให้ต่ำกว่า 19 °C เพื่อไม่ให้พื้นเย็นเกินไป อุณหภูมิน้ำเข้าตั้งไว้ให้คงที่อยู่ที่ 13.5 °C ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 6 อุณหภูมิจุดน้ำค้าง ต่ำกว่าอุณหภูมิที่ผิวพื้นมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการควบคุมความชื้น ปัญหาการเกิดหยดน้ำที่ผิวหน้าของพื้นจะหมดไปอย่างแน่นอน อุณหภูมิจุดน้ำค้าง เฉลี่ยต่ำกว่าอุณหภูมิน้ำเข้าโดยเฉลี่ย แต่ก็มีส่วนที่คาบเกี่ยวกันอยู่ด้วยซึ่งอาจจะยังคงเกิดฟิล์มของน้ำบางๆ ที่ผิวหน้าเข้า อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ เมื่อลองสังเกตด้วยตาเปล่าและสัมผัสด้วยมือ พบว่าผิวหน้าเข้าไม่มีน้ำเกาะอยู่เลย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ที่หน้าเย็นอยู่ใกล้กับ fan coil ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าความชื้นสัมพัทธ์บริเวณจุดนั้นต่ำกว่าความชื้นของห้องจึงทำให้อุณหภูมิจุดน้ำค้างของท่อน้ำเย็นต่ำลงไปอีกจึงไม่มีน้ำเกาะ และอาจจะเป็น

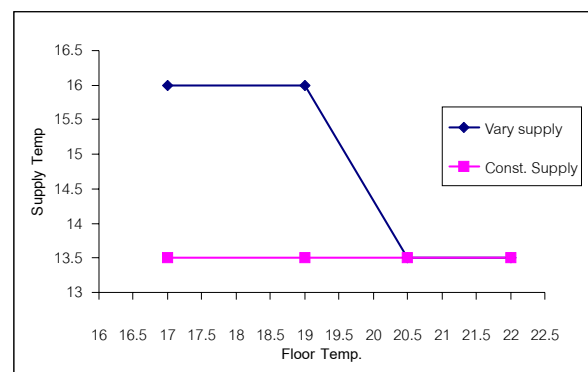
เพราะการแกว่งขึ้นลงที่ค่อนข้างรวดเร็วของอุณหภูมิจุดน้ำค้างเองที่ช่วยให้ไม่เกิดน้ำเกาะที่ท่อ ในขณะที่ภาระการทำความเย็นต่ำๆ จะมีการป้องกันไม่ให้อุณหภูมิที่ผิวของพื้นไม่ให้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่ออกแบบไว้โดยการปิดวาล์วสวิตช์ ซึ่งจะมีสูญเสียความร้อนจากพื้นคืนให้กับน้ำเพื่อให้พื้นมีอุณหภูมิสูงขึ้น ระบบจึงจะกลับมาทำงานตามปกติ ซึ่งในจุดนี้อาจจะเป็นการสูญเสียพลังงานไปโดยเปล่าประโยชน์



รูปที่ 6. ผลการทดลองเมื่อทำการควบคุมให้อุณหภูมิน้ำเข้ามีค่าคงที่วิเคราะห์ผลการทดลอง

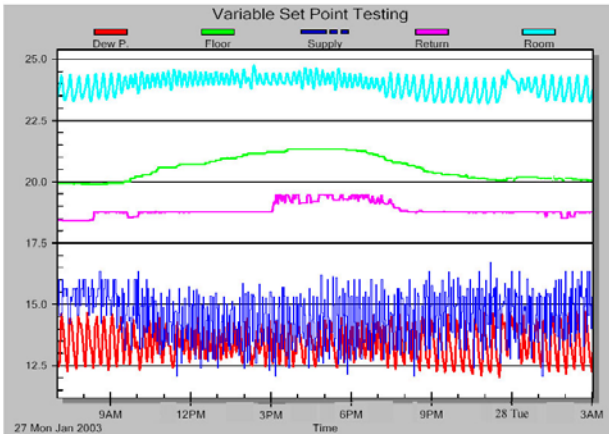
3.2 ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าด้วยอุณหภูมิพื้น

ปรับค่า set point เป็นค่าอุณหภูมิน้ำเข้าโดยให้ขึ้นกับอุณหภูมิของพื้น โดยถ้าผิวพื้นมีค่าต่ำกว่า 19 °C ให้น้ำเข้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 16 °C และถ้าผิวพื้นมีค่าสูงกว่า 20.5 °C ให้น้ำเข้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 13.5 °C และผิวพื้นมีค่าอยู่ระหว่าง 19-20.5 °C ให้น้ำเข้ามีอุณหภูมิอยู่ที่ 16 - 13.5 °C (กำหนดการควบคุมดังกราฟต่อไปนี้)



รูปที่ 7 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามอุณหภูมิที่ผิวของพื้น

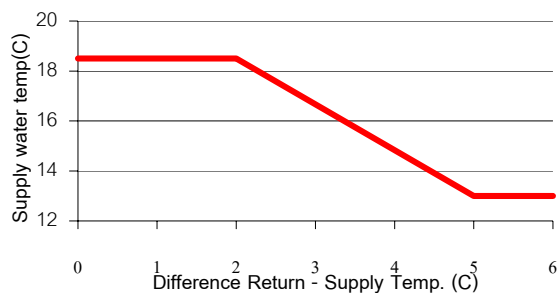
จากผลการทดลองในรูปที่ 8 จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของน้ำเข้ามีค่าไม่คงที่ โดยที่เมื่ออุณหภูมิพื้นมีค่าสูงขึ้น อุณหภูมิน้ำเข้าจะลดลงเพื่อการทำความร้อน แต่เมื่ออุณหภูมิพื้นมีค่าลดลง อุณหภูมิน้ำเข้าจะมีค่าสูงขึ้นเพื่อรักษาไม่ให้อุณหภูมิที่พื้นต่ำเกินไป และไม่เกิดการปิดวาล์วที่พื้นซึ่งแสดงถึงการควบคุมที่ดีและราบเรียบยิ่งขึ้น



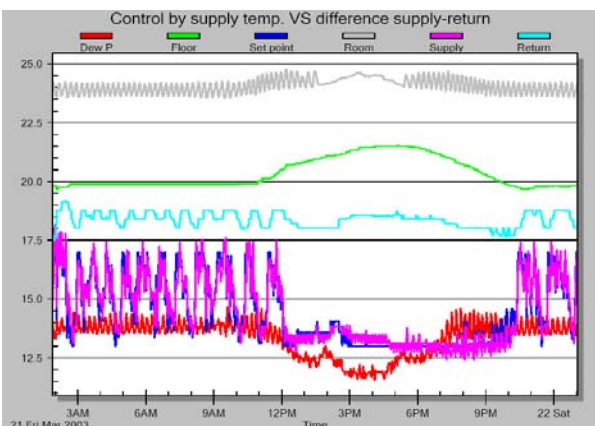
รูปที่ 8. ผลการทดลองการควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามอุณหภูมิผิวของพื้น

3.3 ควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออกแบบต่อเนื่อง

ปรับปรุงการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิน้ำเข้า ตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและออก ตามกราฟการควบคุมต่อไปนี้



รูปที่ 9 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า-ออก



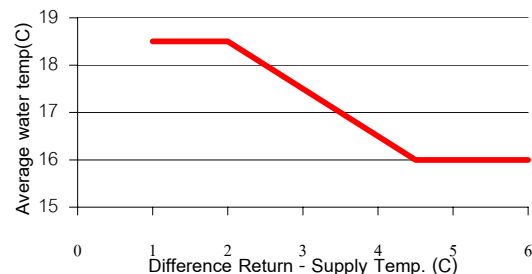
รูปที่ 10. ผลการทดลองเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าแปรตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า-น้ำออก

จากผลการทดลองในรูปที่ 10 พบว่าค่า set point มีค่าแกว่งตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่แกว่งอย่างมาก แม้ว่าจะระบบสามารถควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยได้ใกล้เคียงกับค่า set point แต่ผลที่ได้ก็ยังไม่ค่อยดีนักเนื่องจาก set point ที่มีค่าแกว่งนั่นเอง อุณหภูมิผิวพื้นห้องเปลี่ยนแปลงอย่างราบเรียบ ถึงแม้ว่าอุณหภูมิต่างๆจะแกว่งอย่างมาก

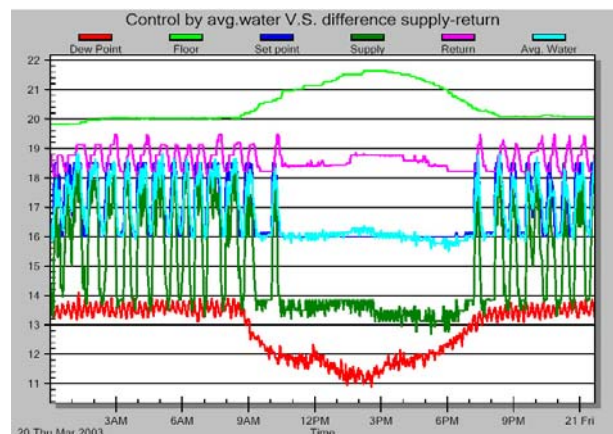
การปรับปรุงครั้งนี้จะพบว่าในช่วงที่ระบบมีภาระจากแสง ค่าอุณหภูมิที่ได้จะค่อนข้างนิ่ง เนื่องจากในช่วงนี้จะเข้าเงื่อนไขการควบคุมที่ทำให้ค่า set point มีค่าคงที่ (7AM - 8PM) ถึงแม้ว่าระบบควบคุม สามารถทำให้ค่าอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยมีค่าใกล้เคียงกับ set point การปรับปรุงการควบคุมยังคงต้องมีต่อไป จากกราฟพบว่าระบบ RFC สามารถที่จะรับพลังงานจากแสงในช่วงของค่าที่ต้องการได้ และอุณหภูมิผิวพื้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างราบเรียบถึงแม้ว่า อุณหภูมิน้ำเย็นจะแกว่งอย่างมากก็ตาม อุณหภูมิน้ำเย็นค่อนข้างอยู่ห่างจากอุณหภูมิจุดน้ำค้างพอสมควร ทำให้ไม่เกิดน้ำเกาะที่ท่อ

3.4 ควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยด้วยผลต่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก

ปรับให้ set point เป็นค่าอุณหภูมิน้ำเฉลี่ย โดยเปลี่ยนแปลงตามผลต่างระหว่างอุณหภูมิน้ำเข้าและออก (Return-Supply) และกำหนดการควบคุมตามกราฟต่อไปนี้



รูปที่ 11 การควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยแปรตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า-ออก



รูปที่ 12. ผลการทดลองเมื่อควบคุมอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยแปรตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้า-ออก

จากผลการทดลองตามรูปที่ 12 ค่า set point ยังคงแกว่งอยู่ตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำที่แกว่งอย่างมาก อย่างไรก็ตามมีบางช่วงที่ไม่แกว่งมากนัก พบว่าในช่วงที่ระบบมีภาระจากแสง ค่าที่ได้จะค่อนข้างนิ่ง เนื่องจากในช่วงนี้จะเข้าเงื่อนไขการควบคุมที่ทำให้ค่า จากกราฟพบว่าระบบ RFC สามารถที่จะรับพลังงานจากแสงในช่วงของค่าที่ต้องการได้ และอุณหภูมิผิวพื้นจะเปลี่ยนแปลงอย่างราบเรียบถึงแม้ว่า อุณหภูมิน้ำเย็นจะแกว่งอย่างมากก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบกับระบบการควบคุมแบบกรณีที่สองคือคุมอุณหภูมิน้ำเข้าตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าออกแล้วการแกว่งของอุณหภูมิน้ำเข้าจะมีมากกว่า

4. สรุป

จากผลการทดลองที่ได้จากวิธีการควบคุมแบบต่างๆซึ่งนำเสนอไปข้างต้น พบว่าการควบคุมการทำงานของระบบ RFC ให้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและราบเรียบทั้ง 4 วิธี เมื่อเปรียบเทียบแล้ววิธีการควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้คงที่เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดแต่จะมีปัญหาในเวลากลางคืนซึ่งจะมีแนวโน้มทำให้อุณหภูมิที่ผิวพื้นเย็นเกินไป วิธีที่จะควบคุมให้ได้ผลดีคือการควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าให้แปรตามอุณหภูมิที่พื้นหรือควบคุมอุณหภูมิน้ำเข้าตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าและออก ทั้งสองวิธีนี้สามารถควบคุมอุณหภูมิที่ผิวของพื้นได้เป็นอย่างดีแต่วิธีหลังจะเกิดการแกว่งตัวของอุณหภูมิน้ำเข้า สำหรับวิธีสุดท้ายคือควบคุมอุณหภูมิเฉลี่ยของน้ำเข้าและออกตามผลต่างของอุณหภูมิน้ำเข้าออกจะทำให้การแกว่งของอุณหภูมิน้ำเข้ามากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Olesen, B.W. "Possibilities and Limitations of Radiant Floor Cooling" ASHRAE Transactions P.103 (1): 1997
- [2] Olesen, B.W. and Michel E. "Heat exchange coefficient between floor surface and space by floor cooling theory or a question of definition" ASHRAE Transactions P.684: 2000
- [3] Richard D. Watson and Kirby S. Chapman, "Radiant Heating&Cooling Handbook", McGrawHill, 2002
- [4] Peter Simmonds, "Using Radiant Cooled Floors to Condition Large Spaces and Maintain Comfort Conditions" ASHRAE Transactions P.695: 2000