

สมรรถนะการป้องกันความร้อนของแผงกันแดดไม้เลื้อยในสภาพแวดล้อมเขตร้อนชื้น

Thermal Performance of Facade Greening in the Tropical Environment

รศ.พาสินี สุนากร¹ อ.ชนิกานต์ ยิ้มประยูร²

บทคัดย่อ

การเพิ่มพื้นที่สีเขียวในเมืองเพื่อแก้ปัญหาโลกร้อนและภาวะเกาะความร้อน เป็นนโยบายที่ปฏิบัติได้ยาก และมีความเป็นไปได้น้อยลงทุกทีเนื่องจากความหนาแน่นที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ของเมือง การปลูกต้นไม้บนอาคาร เพื่อทดแทนพื้นที่สีเขียวที่สูญเสียไปนั้นอาจทำได้หลายวิธี การปลูกต้นไม้ในแนวตั้งเป็นวิธีหนึ่งที่ประหยัด ใช้พื้นที่น้อย และนอกจากจะช่วยลดความร้อนให้แก่อาคารภายนอกอาคารแล้วยังช่วยลดความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคาร ทำให้เกิดการประหยัดพลังงาน ช่วยดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ สร้างความหลากหลายทางชีวภาพ ให้สุนทรียภาพ และยิ่งกว่านั้นพืชบางชนิดอาจสามารถนำไปเป็นอาหารได้อีกด้วย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการใช้ต้นไม้ประกอบอาคาร โดยมุ่งเน้นที่ไม้เลื้อย เพื่อใช้เป็นแผงกันแดด ให้แก่อาคารสำนักงานหรืออาคารพักอาศัยความสูงปานกลาง ที่ใช้การระบายอากาศธรรมชาติ โดยทำการทดสอบคุณสมบัติในการลดการถ่ายเทความร้อน ติดตามผลตลอดการเจริญเติบโตในช่วงเวลา 3 เดือน เปรียบเทียบกับอาคารที่ใช้แผงกันแดดแบบทั่วไป โดยใช้สถานที่อาคารจริง การเลือกต้นไม้และการออกแบบวิธีการปลูกที่เหมาะสม ได้นำเสนอในงานวิจัยด้วย เพื่อประโยชน์แก่การนำไปใช้งานจริง

ผลการทดลองในขั้นต้น พบว่า ในช่วงที่อุณหภูมิสูงสุดในตอนบ่าย อุณหภูมิภายในห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เลื้อย ต่ำกว่าอากาศภายนอกอยู่ 6.84 องศาเซลเซียส และต่ำกว่าอุณหภูมิภายในห้องที่ใช้กันสาดเหล็กเคลือบรีดลอนสำเร็จรูปอื่น 1.50 เมตร อยู่ 2.92 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ

โลกร้อน เกาะความร้อน พื้นที่สีเขียว ไม้เลื้อย แผงกันแดด การถ่ายเทความร้อน การใช้ต้นไม้ประกอบอาคาร

บทนำ

วิกฤตสภาพแวดล้อมเป็นปัญหาที่ทั่วโลกต้องร่วมมือกันแก้ไข ความหนาแน่นของอาคารในเมืองใหญ่ สร้างภาวะเกาะความร้อน (urban heat island) มลภาวะ (pollution) จากไอเสียและก๊าซพิษจากโรงงาน อุตสาหกรรมสร้างปัญหาโลกร้อน (global warming) ทำให้คุณภาพชีวิตในเมืองต่ำลง แม้ว่าภายในอาคารจะสามารถปรับอุณหภูมิให้อยู่ในภาวะสบายได้โดยติดตั้งเครื่องปรับอากาศและเครื่องกรองอากาศ หากแต่เป็นการเพิ่มภาระให้แก่สภาพแวดล้อมโดยบริโภคพลังงานจำนวนมาก และปลดปล่อยความร้อนสู่บรรยากาศ

การเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้กับสภาพแวดล้อมภายนอกอาคารเป็นแนวทางแก้ปัญหาที่เป็นข้อเสนอแนะของเมืองใหญ่ทุกเมือง เพื่อที่จะลดภาวะเกาะความร้อนและดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์อันเป็นสาเหตุของภาวะ

¹ สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน จตุจักร กทม 10900 โทร.02-942-8960 ต่อ 321 E-Mail address: arcpons@ku.ac.th

² สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

50 ถนนพหลโยธิน จตุจักร กทม 10900 โทร.02-942-8960 ต่อ 318 E-Mail address: arccks@ku.ac.th

โลกร้อน หากแต่ความหนาแน่นของเมืองไม่อนุญาตให้มีพื้นที่สีเขียวในปริมาณมากเท่าที่ต้องการ การปลูกต้นไม้ ประกอบอาคารเป็นส่วนหนึ่งของผนังหรือหลังคาสามารถเพิ่มพื้นที่สีเขียวให้กับเมืองได้โดยไม่ต้องใช้พื้นที่โล่งมากนัก ทั้งยังสามารถลดการถ่ายเทความร้อนและปรับปรุงคุณภาพอากาศได้เช่นเดียวกัน ได้มีการสังเกตเห็นความสำคัญและมีนักวิจัยศึกษาคุณสมบัติของแนวคิดนี้มาเป็นเวลากว่า 20 ปี แต่ในการนำมาใช้นั้นมักติดข้อจำกัดในการดูแลรักษา ปัจจุบันการปลูกต้นไม้ประกอบเป็นส่วนหนึ่งของอาคารอาจช่วยลดความต้องการพื้นที่สีเขียวของเมืองได้ และเป็นข้อเสนอแนะที่กลับมาเป็นที่นิยมและปฏิบัติกันอย่างแพร่หลายในประเทศที่พัฒนาแล้ว เช่น สหรัฐอเมริกา แคนาดา และญี่ปุ่น เนื่องจากได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีใหม่ ๆ ของการปลูกต้นไม้บนอาคารให้ประหยัดพื้นที่ ลดความหนาของดิน มีการบำรุงรักษาที่เหมาะสมเพื่อให้ใช้งานได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

การปลูกต้นไม้ประกอบอาคารในลักษณะต่าง ๆ นอกจากจะช่วยลดภาระแก่สภาพแวดล้อมแล้ว ยังช่วยทำให้เกิดภาวะน่าสบายทางอุณหภูมิ (thermal comfort) แก่ผู้ใช้อาคารที่อยู่ภายในอาคาร จากการลดการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร โดยการป้องกันรังสีจากดวงอาทิตย์ เปรียบเสมือนแผงกันแดดที่นอกจากจะสะท้อนรังสีจากดวงอาทิตย์กลับสู่บรรยากาศน้อยกว่าวัสดุก่อสร้างทั่วไปแล้วยังสามารถดูดซับรังสีดวงอาทิตย์ส่วนหนึ่งเพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) และการคายน้ำ (evapotranspiration) ทำให้ลดปริมาณความร้อนที่ถ่ายเทเข้าสู่อาคารได้ดี ยิ่งมีความหนาแน่นของการปกคลุมของใบมากและจำนวนชั้นของใบมาก ก็ยิ่งมีคุณสมบัติที่ดียิ่งขึ้น

การปลูกต้นไม้บนหลังคาโดยการทำสวนหลังคา (roof garden) ในปัจจุบันมีการนำไปใช้อย่างแพร่หลาย และมีวิธีการปลูกแบบ extensive roof garden ซึ่งไม่ต้องใช้ดินหนามากเหมือนสวนหลังคาสมัยก่อนซึ่งต้องรองรับน้ำหนักจำนวนมากและต้องมีระบบระบายน้ำและกันน้ำที่ซับซ้อนยุ่งยาก แนวคิดนี้สามารถทดแทนพื้นที่สีเขียวซึ่งเสียไปกับการสร้างอาคารบนพื้นดินได้ และช่วยปรับปรุงคุณภาพอากาศของเมือง ลดความร้อนที่ถ่ายเทที่ระดับหลังคาเข้าสู่อาคาร และออกจากอาคารกลับสู่บรรยากาศของเมืองได้เป็นอย่างดี Wong Nyuk Hien (2006) ได้ทำการวิจัยเรื่อง Study of Thermal Performance of Extensive Rooftop Greenery Systems in the Tropical Climate พบว่า การใช้ระบบการปลูกพืชบนหลังคาแบบ extensive roof garden ในภูมิอากาศแบบร้อนชื้นในสิงคโปร์ สามารถลดความร้อนที่ถ่ายเทสู่อาคารทางหลังคาได้มากถึง 60 เปอร์เซ็นต์ และยังลดการแผ่รังสีของหลังคากลับสู่อากาศเหนือหลังคาได้อีกด้วย

การปลูกต้นไม้แนวตั้งเป็นข้อเสนอแนะอีกข้อหนึ่งในเมืองซึ่งขาดพื้นที่โล่ง อันที่จริงเป็นวิธีที่ประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่าแต่ยังไม่เป็นที่นิยมแพร่หลายเท่ากับการปลูกบนหลังคาด้วยข้อจำกัดในการดูแลรักษาในระยะยาว Ken Yeang (2000) สถาปนิกชาวมาเลเซียได้เสนอแนวคิด bioclimatic skyscraper โดยเสนอให้มีการใช้ต้นไม้ปกคลุมผนังของอาคารสูงในลักษณะ vertical landscape ซึ่งในอาคารสูงหลังแรก ๆ ที่เขาออกแบบ เช่น Menara Mesiniga ไม่สามารถดูแลรักษาให้ออกงามได้จริง แต่สามารถพัฒนาแนวคิดนี้ในอาคารที่มีความสูงปานกลางได้ นอกจากนี้ในงาน Expo 2005 ที่ Aichi ประเทศญี่ปุ่น ได้มีการเสนอแนวคิด biolung เป็นผนังขนาดใหญ่ มีความสูง 20 เมตร ยาว 150 เมตร ปลูกไม้ดอกชนิดต่าง ๆ ในแนวตั้งเป็นผนังอาคาร สร้างความสดชื่นให้แก่เมือง ลดความร้อน และสร้างคุณภาพอากาศที่ดีในระดับที่อยู่อาศัยสัมผัสได้เนื่องจากสามารถมองเห็น ทั้งยังสร้างสุนทรียภาพให้แก่อาคารและเมืองอีกด้วย

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นการเสนอการออกแบบวิธีการปลูกต้นไม้ประกอบอาคารเป็นแผงกันแดดในแนวตั้ง โดยคัดเลือกพันธุ์ไม้ท้องถิ่นที่เหมาะสมกับภูมิอากาศของประเทศไทย ดูแลรักษาง่ายและสามารถดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี นำมาทดลองปลูกเข้ากับอาคารจริง และทำการศึกษาคุณสมบัติในการลดการถ่ายเท

ความร้อนสู่อาคาร โดยเปรียบเทียบกับอาคารที่ไม่ได้ปลูกต้นไม้ โดยทำการทดลองปลูกเข้ากับอาคารจริง ผลการทดลองสามารถนำไปใช้เป็นข้อแนะนำแก่ประชาชนเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการประหยัดพลังงานแก่อาคาร ปรับปรุงคุณภาพอากาศ และคืนพื้นที่สีเขียวให้แก่สภาพแวดล้อมในเมือง

การทบทวนเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sandifer and Givoni (2000) ได้ทำการทดสอบคุณสมบัติในการป้องกันความร้อนของไม้เลื้อยบนผนังทึบ โดยทดสอบแบบจำลองสภาพและทดสอบ ณ สถานที่จริง การทดสอบแบบจำลองสภาพใช้แผ่นอลูมิเนียมบนโฟมแทนผนัง ปลูกไม้เลื้อยชนิดต่าง ๆ แผ่นทาสีขาวครึ่งหนึ่งสีน้ำตาลครึ่งหนึ่ง หันหน้าไปทางทิศใต้และตะวันตก ใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิที่ด้านหลังเปรียบเทียบกับอุณหภูมิอากาศ (ambient air) เพื่อใช้เป็นตัวบอกระสิทธิภาพของการให้ร่มเงาของไม้เลื้อยนั้น ผลการทดสอบพบว่าไม้เลื้อยที่มีความหนา 30 - 35 เซนติเมตรจะสามารถลดอุณหภูมิผิวของผนังได้จนต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ และที่ความหนาเดียวกัน สีของผิวผนังจะไม่มีผลต่ออุณหภูมิผิวผนังอีกต่อไป การทดลองในสถานที่จริงพบว่า การปลูกไม้เลื้อยบนผนังอาคารโดยตรงที่ความหนา 30 - 35 เซนติเมตร สามารถถ่ายเทความร้อนในทิศตะวันตกได้อย่างมีนัยสำคัญ ความหนาแน่นของใบมีผลต่ออุณหภูมิที่ลดลงด้วย ต้น Trumpet Wine และ Lonicera ซึ่งมีความหนาแน่นของใบมากสามารถลดอุณหภูมิได้ถึง 12 - 21 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิผิวผนังที่ไม่มีต้นไม้ปกคลุม ส่วนต้น Jasmine ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่าลดอุณหภูมิผิวผนังได้ 8 - 15 องศาเซลเซียส เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองบนผนังอลูมิเนียมและผนังอิฐพบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน เว้นแต่ว่าเมื่ออุณหภูมิสูงสุดของแผ่นอลูมิเนียมอยู่ในเวลาใกล้เคียงกับอุณหภูมิอากาศ ในขณะที่อุณหภูมิสูงสุดของผนังอิฐจะเกิดขึ้นช้ากว่า 2 ชั่วโมง ส่วนการปลูกไม้เลื้อยบนระเบียงด้านทิศตะวันตกใช้ Wisteria Sinesis ปลูกเป็นซุ้มกันแดดให้กับหน้าต่างกระจก ผลการทดลองพบว่าความแตกต่างอุณหภูมิสูงสุดของอากาศเหนือระแนงต้นไม้และใต้ระแนงต้นไม้เท่ากับ 6-7 องศาเซลเซียส

Lam (2005) ได้ทำการวิจัยเรื่องผลของการป้องกันความร้อนจากการใช้ไม้เลื้อยเป็นแผงกันแดดแนวตั้งบนหน้าต่างกระจก โดยการทดสอบในสถานที่จริงในห้องสำนักงานขนาด 3 เมตร x 3 เมตร ต้นไม้ที่เลือกใช้เป็นไม้เลื้อยผลัดใบในฤดูหนาว การติดตามผลใช้เวลา 1 ปี เพื่อบันทึกการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิตามการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของใบตามฤดูกาล กับคำนวณค่า thermal transmittance และ shading coefficient ที่เปลี่ยนแปลงไปโดยวัดปริมาณรังสีหน้าและหลังแผงกันแดดต้นไม้ รวมทั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เปรียบเทียบอย่างต่อเนื่อง เพื่อนำไปใช้พิสูจน์ theoretical model ที่ได้ทำขึ้นเพื่อคำนวณคุณสมบัติการป้องกันความร้อนของแผงกันแดดไม้เลื้อยซึ่งแปรตามการปกคลุมและจำนวนชั้นของใบ จากนั้นได้นำผลลัพธ์ซึ่งเป็นค่า dynamic shading coefficient ไปใช้ในการจำลองสภาพความร้อนโดยใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ ซึ่งจะสามารถนำไปประเมินคุณสมบัติทางสภาพแวดล้อมของอาคารในลักษณะอื่น ๆ ได้ด้วย

งานวิจัยทั้งสองเป็นการทดลองในภูมิอากาศเขตอบอุ่น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาวิธีการปลูกต้นไม้ประกอบภายนอกอาคารในลักษณะแผงกันแดด ที่สามารถลดการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. คัดเลือกพันธุ์ไม้ที่เหมาะสมกับภูมิอากาศของประเทศไทย ดูแลรักษาง่าย มีความสวยงาม สามารถตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดี

3. เพื่อทดสอบคุณสมบัติในการป้องกันการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่อาคาร
4. เพื่อบันทึกคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเจริญเติบโตของต้นไม้ (ไม่รวมอยู่ในบทความนี้)

ขอบเขตของงานวิจัย

1. เสนอรูปแบบการปลูกต้นไม้ประกอบอาคาร 1 รูปแบบ ในลักษณะแผงกันแดดแนวตั้ง บนหน้าต่างอาคารที่มีการระบายอากาศแบบธรรมชาติ ในเขตอากาศร้อนชื้น
2. คัดเลือกพันธุ์ไม้ที่เหมาะสมแก่การใช้งาน 1 ชนิด
3. ทดสอบคุณสมบัติในด้านการป้องกันความร้อนของแผงกันแดดต้นไม้ในอาคารที่หันสู่ทิศตะวันตก
4. ติดตามคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงในช่วงการเจริญเติบโต (ไม่รวมอยู่ในบทความนี้)

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนที่ 1 สุ่มคัดเลือกพันธุ์ไม้ที่นำมาใช้จากไม้เลื้อยชนิดต่าง ๆ จำนวน 5 ชนิด ที่เป็นพืชท้องถิ่น (local plant) ในเขตร้อนชื้น (tropical climate) โดยใช้เกณฑ์เบื้องต้นในการคัดเลือก ดังนี้

1. ต้องการดูแลรักษาน้อย และอายุยืน
2. ความสูงไม่ต่ำกว่าอาคาร 1 ชั้น (3 เมตร)
3. โตเร็วและใบปกคลุมทั่วถึงในแนวตั้ง
4. ใบมีความหนาแน่นปานกลาง
5. ใบเขียวตลอดปี และใบร่วงน้อย

ขั้นตอนที่ 2 คัดเลือกพันธุ์ไม้เลื้อย 3 ชนิดมาทำการปลูกบนแผงระแนงแนวตั้งขนาด 1 เมตร x 1 เมตร เพื่อทำการทดสอบการตรึงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้เครื่องมือ CO₂ Analyser (ขั้นตอนนี้ไม่รวมอยู่ในบทความนี้) พันธุ์ไม้ที่มีอัตราการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์สูงสุดได้นำมาทำการทดลองขั้นต่อไป

ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบวิธีการปลูกต้นไม้เป็นแผงกันแดดประกอบเข้ากับอาคารจริง พร้อมทั้งระบบการให้น้ำ ทำการก่อสร้างและลงต้นไม้

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อต้นไม้เริ่มอยู่ตัว ติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเข้มแสง และปริมาณความร้อน ณ ตำแหน่งต่างๆ เปรียบเทียบผลระหว่างห้องที่มีแผงกันแดดต้นไม้และห้องที่ไม่มีแผงกันแดดต้นไม้

เครื่องมือที่ใช้

1. Pyranometer และ Photometer
2. เซ็นเซอร์วัดอุณหภูมิ NTC
3. เซ็นเซอร์วัดความชื้นสัมพัทธ์
4. Testo 454 – 20 Channel Data Logger และ Hobo Data Logger

ขั้นตอนที่ 5 วิเคราะห์ผลและวิจารณ์

สถานที่ทดลอง

หน้าต่างห้องพักชั้น 6 อาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 2 ห้องมีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ห้องหนึ่งเป็นสภาพเดิมมีแผงกันแดดสำเร็จรูปยื่น 1.50 เมตร อีกห้องหนึ่งถอดแผงกันแดดเดิมออก เพื่อติดตั้งแผงกันแดดไม้เลื้อย ทั้งสองห้องมีหน้าต่างเปิดด้านเดียว



รูปที่ 1 หน้าต่างห้องพักชั้น 6 อาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ช่องเปิดหันด้านทิศตะวันตก

ผลการคัดเลือกพันธุ์ไม้

การคัดเลือกพันธุ์ไม้จาก 5 ชนิดเหลือ 3 ชนิด ใช้คุณสมบัติตามเกณฑ์ 5 ข้อ ประเมินโดยการสังเกตจากต้นไม้ที่ปลูกขึ้นจริง พันธุ์ไม้ 5 ชนิดได้แก่ สร้อยอินทนิล พวงชมพู อัญชัน คำลิง และเล็บมือนาง

1. **สร้อยอินทนิล** (*Thumbergia Grandiflora*) มีคุณสมบัติตรงตามเกณฑ์มากที่สุดสามารถปกคลุมได้ดีในแนวตั้งโดยทั้งเลื้อยขึ้นและห้อยลง ใบดกหนาแน่นปานกลาง มีดอกสีม่วงสวยงามตลอดปี แต่ก็มีข้อเสียคือดอกร่วงค่อนข้างมาก

2. **คำลิง** (*Coccinia Grandis*) เป็นพืชที่ไม่ค่อยมีผู้นำมาใช้ประกอบอาคารในปัจจุบัน แม้ว่าจะเป็นรื้อบ้านไทยมาแต่โบราณ มีคุณประโยชน์นานัปการ เป็นทั้งอาหารและสมุนไพร เมื่อปลูกปกคลุมในแนวตั้งจะให้การแผ่กระจายของใบที่ดี มีความโปร่งพอเหมาะ มีดอกสีขาวและผลแก่สีแดง ข้อเสียคืออายุของใบสั้นใบจะไหม้ในเวลาประมาณ 3 เดือนและต้องการการตัดแต่งให้ใบแตกใหม่ หรือตัดไปปรับปรุแทน เหมาะสำหรับอาคารพักอาศัยที่มีความสูง 1-2 ชั้นซึ่งระดับความสูงอยู่ในระยะที่ตัดได้ง่าย

3. **พวงชมพู** (*Antigonon leptopus*) เป็นไม้เลื้อยมีเถายึดจับละเอียด ใบปกคลุมปานกลาง แต่ใบอายุสั้นคล้ายคำลิง เจริญเติบโตเร็วและสามารถขึ้นเองตามธรรมชาติ มีดอกสวยงามตลอดปี ต้องการตัดแต่งคล้ายคำลิง

ส่วนอัญชันมีลักษณะคล้ายคำลิงและพวงชมพู คือใบมีอายุสั้นและมีช่วงใบไหม้เป็นสีน้ำตาล และร่วงการปกคลุมของใบไม่ทั่วถึงเท่าคำลิงและพวงชมพู เล็บมือนางมีพุ่มใบหนาแน่นมาก แต่ลักษณะการปกคลุมในแนวนอนดีกว่าในแนวตั้ง โดยมักพบว่าเถาจะเลื้อยขึ้นไปสูงเพื่อหาระนาบแนวนอนและแผ่ใบปกคลุมบนหลังคามีดอกจำนวนมากซึ่งร่วงเมื่อหมดอายุ

พันธุ์ไม้ทั้งสามที่คัดเลือกคือ สร้อยอินทนิล คำลิงและพวงชมพู ได้นำมาทดลองปลูกในกระบะซีดีบนระแนงขนาด 1 เมตร x 1 เมตร ทำด้วยเอ็นโปร่งใส เพื่อให้รับได้แสงเต็มที่ ทำการติดตามผลการเติบโตในเวลาประมาณ 3 เดือน แล้วทำการทดสอบในช่วงที่ 2 เรื่องการตรึงคาร์บอนไดออกไซด์ของแผงไม้เลื้อยขนาด 1 ตาราง



สร้อยอินทนิล

พวงชมพู

ตำลึง

รูปที่ 2 พันธุ์ไม้ 3 ชนิดที่เลือกใช้ในการทดลอง

การทดลองเปรียบเทียบคุณสมบัติการถ่ายเทความร้อนและระดับความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างห้องที่มีแผงกันแดดไม้
 เลื้อย และห้องที่ใช้กันสาดหลักเคลื่อนที่รถลอนสำเร็จรูป ในห้องพักอาคารคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ชั้น 6

ตามทฤษฎีการถ่ายเทความร้อนของพืช ระบุว่าใบไม้จะสะท้อนรังสีความร้อนจากแสงที่มองเห็นได้ 10
 เปอร์เซ็นต์ และดูดซับไป 80 เปอร์เซ็นต์ เพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงและการคายน้ำ อย่างไรก็ตามยังคงเหลือรังสี
 ความร้อน 10 เปอร์เซ็นต์ และรังสีอินฟราเรดเป็นส่วนใหญ่ที่ใบไม้ดูดซับได้น้อย สะท้อนออก และส่งผ่านประมาณ 30
 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้น จึงยังคงเหลือความร้อนได้ใบอยู่ส่วนหนึ่ง และหากมีใบไม้หลายชั้น คุณสมบัติในการลดการ
 ถ่ายเทความร้อนก็จะดีขึ้นอีกตามลำดับ (Brown and Gillespie, 1995) แต่ขณะเดียวกันใบไม้จะคายน้ำในช่วงเช้าถึง
 บ่ายซึ่งจะเป็นผลให้ความชื้นสัมพัทธ์บริเวณใกล้เคียงสูงขึ้น ซึ่งอาจมีผลต่อสภาวะน่าสบายในเขตร้อน

การทดลองในช่วงนี้อยู่ในช่วงเดือนที่ 4 หลังจากเริ่มลงต้นไม้ ซึ่งต้นสร้อยอินทนิลมีใบปกคลุมแผงกัน
 แดดประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ และมีใบ 1 ชั้นเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 3 แผงกันแดดไม้เลื้อยที่ปลูก ณ ทิศตะวันตกของอาคาร

ตัวแปรต้น

1. แผงกันแดดไม้เลื้อยแนวตั้ง

2. กันสาดเหล็กเคลือบรีดลอนขึ้น 1.50 เมตร (เป็นกันสาดเดิมของอาคาร)
- ตัวแปรตาม
1. อุณหภูมิหน้าใบ หลังใบ กลางห้องที่มีแผงกันแดดไม้เลื้อย และอุณหภูมิกลางห้องที่มีกันสาดอลูมิเนียม
 2. ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศภายในห้องทดลองทั้งสอง
- ตัวแปรควบคุม
- ห้องทดลอง 2 ห้องที่มีลักษณะเหมือนกันทุกประการ ตั้งอยู่ติดกัน หันหน้าทางทิศตะวันตก และมีตัวแปรควบคุม ดังนี้
1. ปริมาณการแผ่รังสีความร้อนของดวงอาทิตย์
 2. อุณหภูมิอากาศ
 3. ความชื้นสัมพัทธ์อากาศ
 4. ความเร็วลม
- ในการทดลองนี้ มีการเก็บข้อมูลต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 1 เดือน โดยมีข้อมูลทุก 30 นาที อันประกอบด้วย
1. อุณหภูมิอากาศภายนอก
 2. อุณหภูมิของผิวหน้าใบ อากาศหลังใบ ผิวมุ้งลวด กลางห้องที่มีแผงกันแดด ไม้เลื้อย
 3. อุณหภูมิอากาศกลางห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูป
 4. ความชื้นสัมพัทธ์อากาศภายนอก
 5. ความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดลอง 2 ห้อง
 6. ปริมาณรังสีความร้อนของดวงอาทิตย์

การวิเคราะห์ข้อมูล นำมาสร้างแผนภูมิเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิและระดับความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่ใช้แผงกันแดด ไม้เลื้อย และกลางห้องที่ใช้กันสาดอลูมิเนียมสำเร็จรูป

ผลการทดลอง

ในช่วงเดือนเมษายน – พฤษภาคม 2550 หลังจากที่ดินสร้อยอินทนิลเริ่มอยู่ตัว ได้ติดตามผลการทดลอง และปรับแต่งรูปแบบของแผงกันแดดไม้เลื้อยให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเหมาะแก่การนำไปใช้งานจริง สภาพจริงของห้องทดลองทำให้ระยะห่างของแผงกันแดดถูกกำหนดโดยขนาดของหน้าต่างที่เปิดออก ทำให้เกิดการเว้นช่องประมาณ 0.75 เมตร และมีการปิดด้านบนด้วยหลังคาโปร่งใสเพื่อกันฝนสาดและไม่ให้ต้นไม้ขาดแสง ซึ่งกลายเป็นผลให้เกิดการดักความร้อนภายใต้หลังคาใส อันทำให้อุณหภูมิภายในห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เลื้อยสูงกว่าห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูปในช่วงสูงสุด (peak) ประมาณ 0.5 องศาเซลเซียส ในช่วงดังกล่าวมีอัตราการปกคลุมของใบประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์

สัปดาห์ต่อมาจึงปรับเปลี่ยนหลังคา ใช้วัสดุทึบแสงซ้อนไว้ข้างใต้เพื่อกันรังสีความร้อน และใช้ผ้าขาวกันปิดด้านข้างด้วยเพื่อกันรังสีความร้อนซึ่งอาจส่องเข้ามาด้านข้าง ในช่วงนี้พบว่า อุณหภูมิภายในห้องที่มีแผงกันแดดไม้เลื้อยยังคงสูงกว่าประมาณ 0.5-1 องศาเซลเซียส และคายความร้อนได้ช้ากว่าห้องที่ไม่มีต้นไม้ เนื่องจากการปิดด้านข้างทำให้ระบายความร้อนได้น้อยลง โดยในช่วงดังกล่าวปริมาณปกคลุมของใบยังคงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก

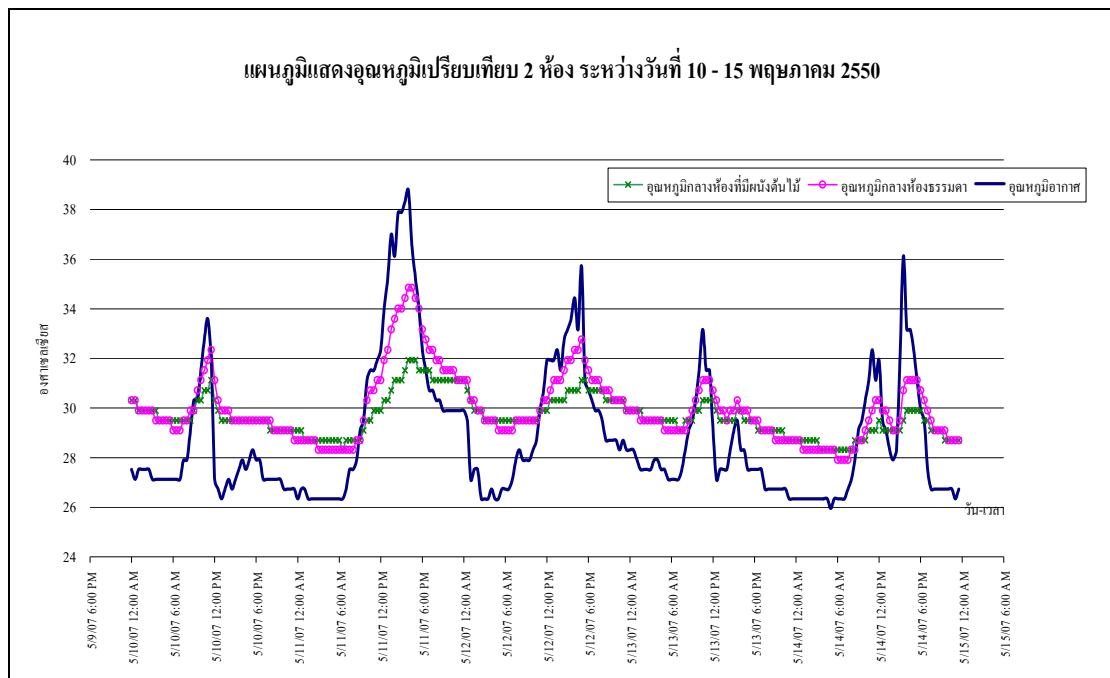
สัปดาห์ที่ 3 ปรับเปลี่ยนการปิดด้านข้างเป็นแสลนที่สี่เขียว 1 ชั้น ด้านบนหลังคาเริ่มมีต้นไม้สีเขียวขึ้นไปปกคลุม พบว่าอุณหภูมิภายในห้องที่มีแผงกันแดดไม้สีเขียวลดลงต่ำกว่าห้องที่ใช้กันสาดอลูมิเนียมสำเร็จรูปมากที่สุดประมาณ 2.92 องศาเซลเซียส ดังแสดงในรูปที่ 4 และ 5

ในช่วง 10-15 พค. 2550 มีข้อมูลสภาพอากาศทั่วไป ดังนี้

1. อุณหภูมิภายนอก

สูงสุด	38.77	เวลา	11/05/07	4.00 PM
ต่ำสุด	25.95	เวลา	15/05/07	3.30 AM
อุณหภูมิเฉลี่ย	28.61			
2. ความชื้นสัมพัทธ์

สูงสุด	94.3	เวลา	14/05/07	4.30PM
ต่ำสุด	31.3	เวลา	11/05/07	4.00 PM
ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย	76.61			
3. ค่าการแผ่รังสีความร้อนสูงสุด 748 วัตต์/ตารางเมตร เวลา 14/05/07 4.30 PM

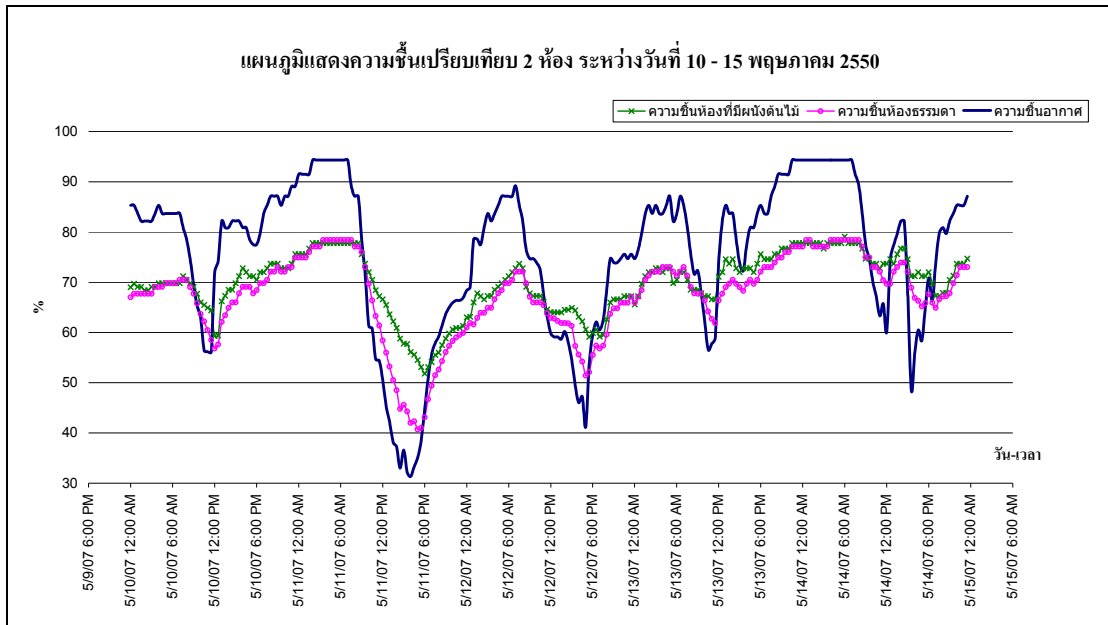


รูปที่ 4 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบอุณหภูมิกลางห้องที่มีแผงกันแดดไม้สีเขียวและห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูป กับอุณหภูมิอากาศปกติ

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบอุณหภูมิ

ข้อมูล	สูงสุด	เวลา	ต่ำสุด	เวลา	ค่าเฉลี่ยทั้งสัปดาห์
ห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้สีเขียว	31.93	11/05/07 4.00 PM	27.91	15/05/07 6.30 AM	29.46
ห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูป	34.85	11/05/07 4.00 PM	27.91	15/05/07 4.00 AM	29.74
อากาศภายนอก	38.77	11/05/07 4.00 PM	25.95	15/05/07 3.30 AM	28.61

ในช่วงที่อุณหภูมิสูงสุด ห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เลื้อยมีอุณหภูมิวัดที่กลางห้องต่ำกว่าห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูป 2.92 องศาเซลเซียส และต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก 6.84 องศาเซลเซียส



รูปที่ 5 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องที่มีแผงกันแดดไม้เลื้อยและห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูปกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความชื้นสัมพัทธ์

ข้อมูล	สูงสุด	เวลา	ต่ำสุด	เวลา	ค่าเฉลี่ยทั้งสัปดาห์
ห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เลื้อย	79.1	14/05/07 6.00PM	51.8	11/05/07 6.00PM	70.49
ห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูป	78.4	14/05/07 4.00PM	40.7	11/05/07 5.00PM	68.37
อากาศภายนอก	94.3	14/05/07 4.30PM	31.3	11/05/07 4.00 PM	76.61

ทั้งนี้ เนื่องจากความชื้นสัมพัทธ์ (relative humidity) เป็นปริมาณที่แสดงสัดส่วนของไอน้ำในอากาศต่อปริมาณไอน้ำอิ่มตัวในแต่ละอุณหภูมิ ไม่ใช่ค่าปริมาณไอน้ำจริง เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ค่านี้อาจแปรผันตามอุณหภูมิด้วย ดังนั้นจึงทดลองนำค่าความชื้นสัมพัทธ์ มาแปลงเป็นค่าความชื้นจำเพาะ (specific humidity) ซึ่งได้แก่ ปริมาณของไอน้ำ (โดยมวล) ต่อ ปริมาณของอากาศ(โดยมวล) ในปริมาตรหนึ่งๆ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ สำหรับสูตรการคำนวณในการแปลงค่าความชื้นสัมพัทธ์ เป็นค่าความชื้นจำเพาะที่ใช้ในการวิจัยนี้ได้แก่

$$x = 0.622 * \frac{\Phi}{100} * p_{sat} / (p - (\frac{\Phi}{100} * p_{sat}))$$

เมื่อ 0.622 = น้ำหนัก โมเลกุลน้ำหารด้วยน้ำหนัก โมเลกุลอากาศ

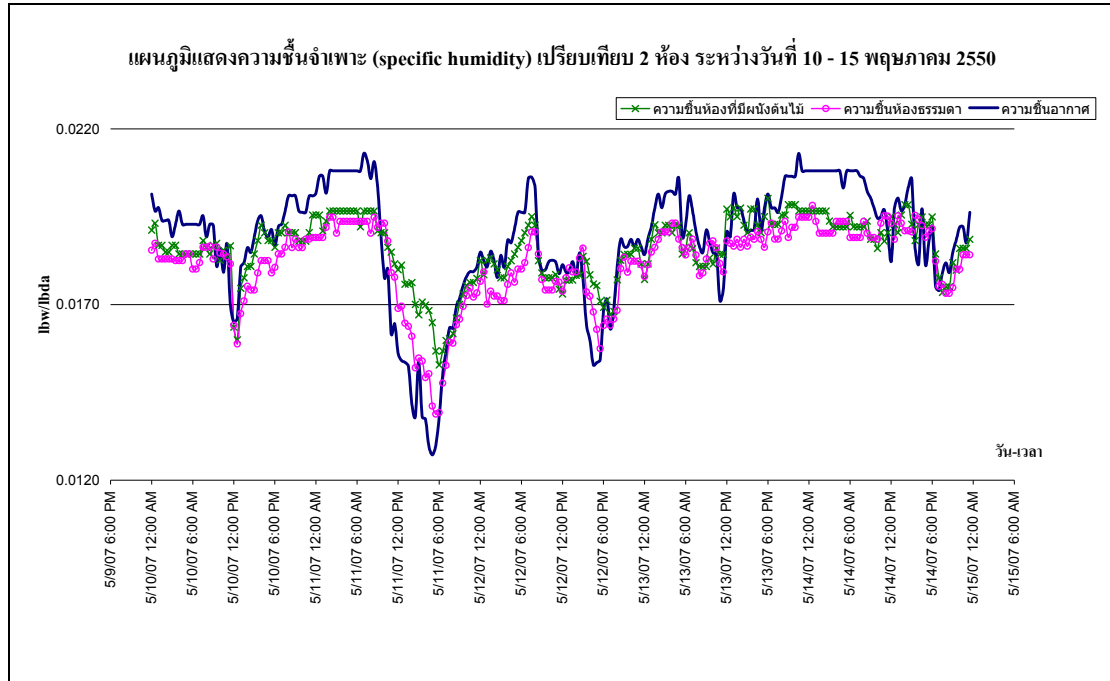
x = ค่าความชื้นจำเพาะ (lbw/lbda)

Φ = ค่าความชื้นสัมพัทธ์ (%)

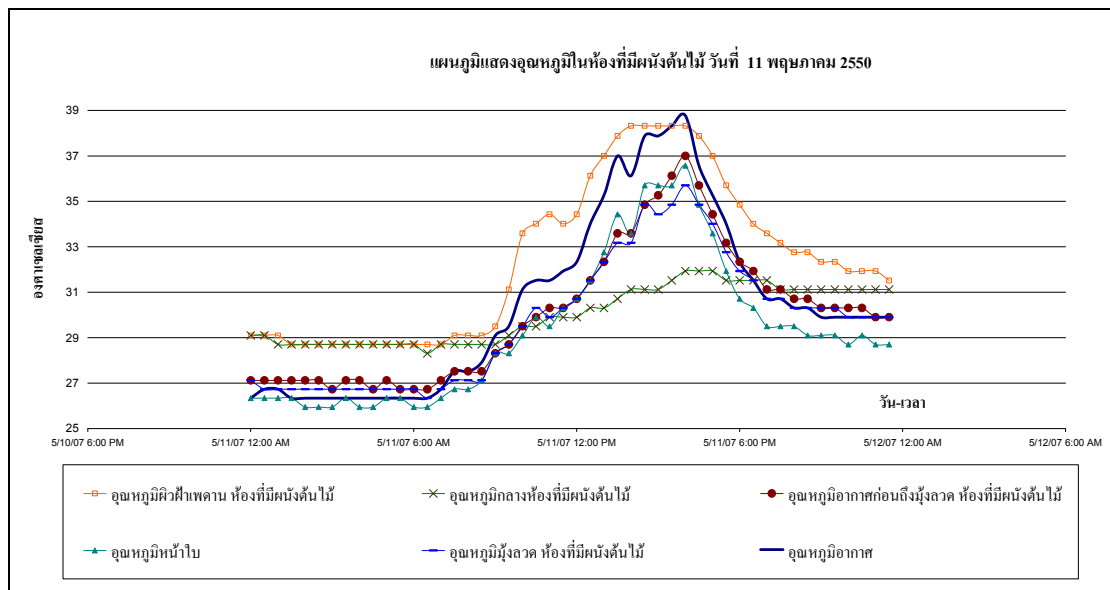
p = ความดันบรรยากาศ (psia)

p_{sat} = ความดันไอน้ำ (psia)

ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 6 ซึ่งค่าที่ได้มีความใกล้เคียงกับค่าที่เกิดจากการใช้ค่าความชื้นสัมพัทธ์



รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบปริมาณความชื้นจำเพาะภายในห้องที่มีแผงกันแดดไม้เคลื่อนและห้องที่ใช้กันแดดสำเร็จรูปกับความชื้นสัมพัทธ์อากาศ

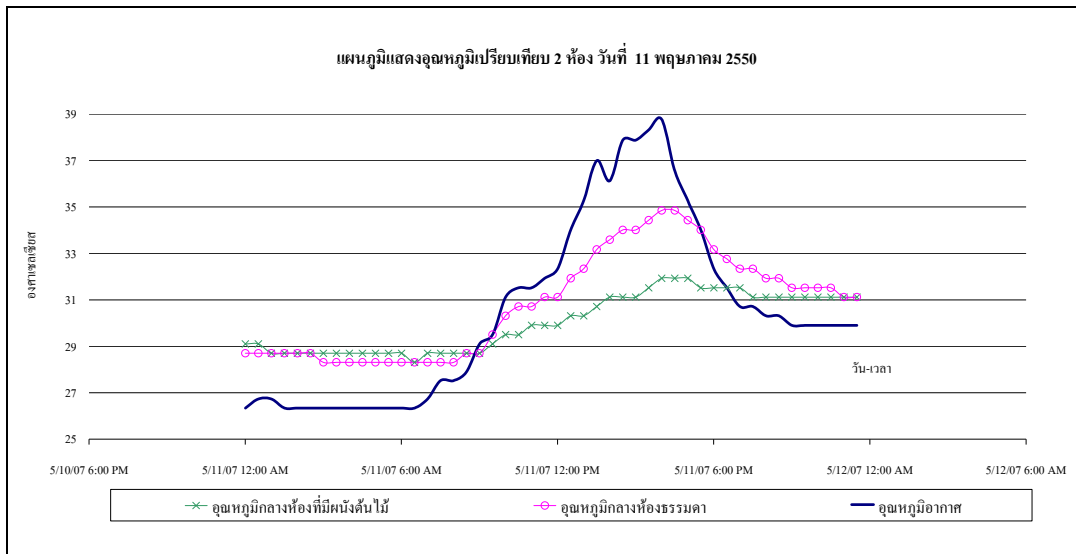


รูปที่ 7 แผนภูมิเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิอากาศภายนอกผิวใบ อากาศหลังใบ มุ้งลวด ถึงกลางห้องที่มีแผงกันแดดไม้เคลื่อนในช่วง 1 วัน

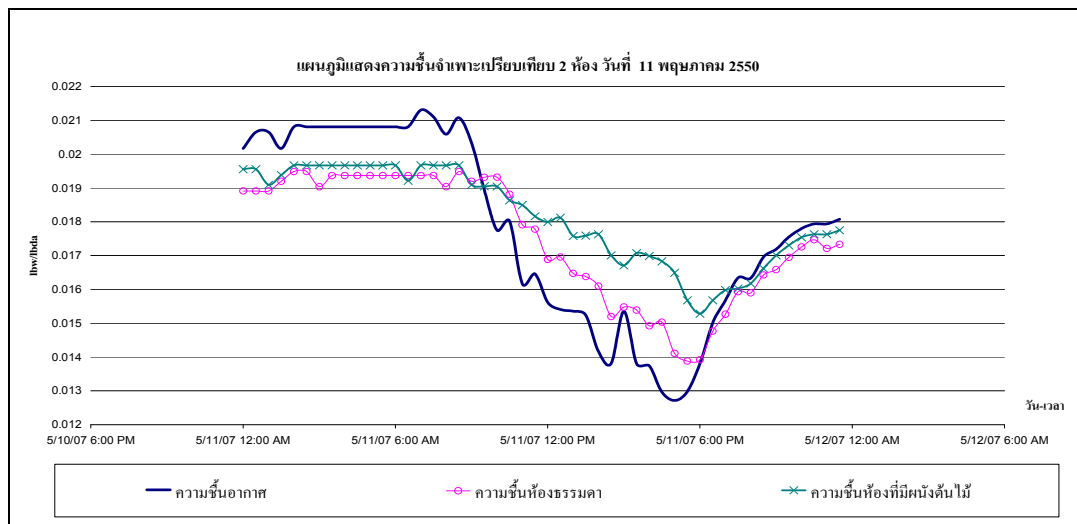
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบอุณหภูมิจากผิวใบถึงกลางห้องที่มีแสงกันแดดไม่เลี้ยง ในช่วงอุณหภูมิสูงสุด

ข้อมูล	สูงสุด	เวลา
อุณหภูมิอากาศ	38.77	11/05/07 4.00PM
อุณหภูมิผิวหน้าใบ	36.57	11/05/07 4.00PM
อุณหภูมิอากาศหลังใบ	37.00	11/05/07 4.00PM
อุณหภูมิมุ้งลวด	35.70	11/05/07 4.00PM
อุณหภูมิอากาศกลางห้อง	31.93	11/05/07 4.00PM

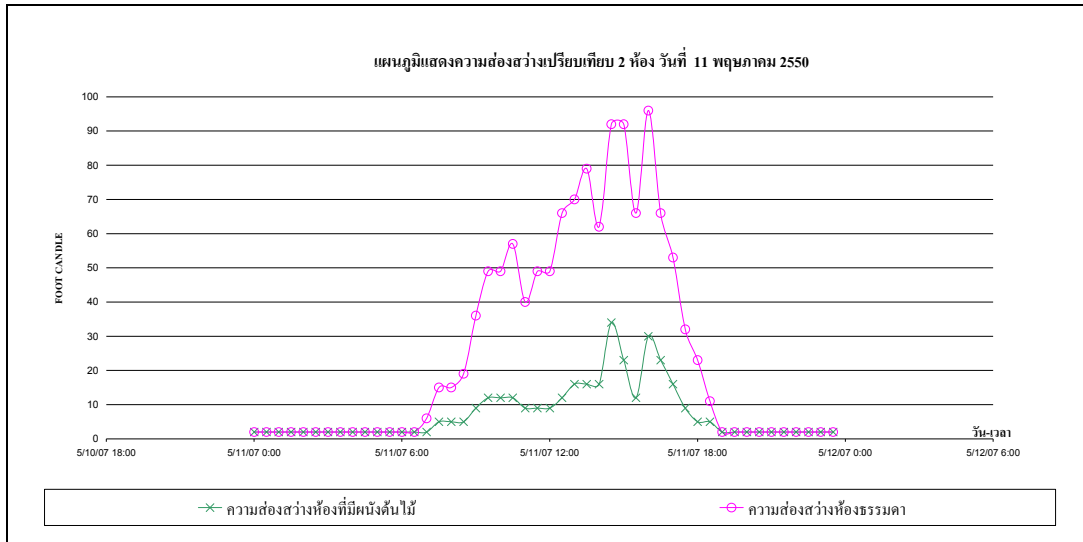
จากตารางจะเห็นว่าอุณหภูมิมิผิวใบต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศ 2.2 องศาเซลเซียส



รูปที่ 8 แผนภูมิเปรียบเทียบระดับอุณหภูมิกลางห้องทดลองทั้ง 2 ห้องในช่วง 1 วัน



รูปที่ 9 แผนภูมิเปรียบเทียบระดับความชื้นจำเพาะของอากาศภายนอกกับภายในห้องทดลองทั้ง 2 ห้อง



รูปที่ 10 แผนภูมิเปรียบเทียบความส่องสว่างจากอิทธิพลของรังสีดวงอาทิตย์ภายในห้องทดลองทั้ง 2 ห้อง

การวิเคราะห์ผล

1. อุณหภูมิที่ผิวของใบไม้ของห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เฉลี่ยต่ำกว่าอุณหภูมิอากาศภายนอก 2.2 องศาเซลเซียส แสดงถึงความสามารถในการลดความร้อนของใบไม้เป็นผลให้อุณหภูมิหลังใบไม้จนถึงกลางห้องต่ำลงตามลำดับ (รูปที่ 7) ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี

2. เมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิกลางห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เฉลี่ยและห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูปพบว่าในช่วงเช้าถึงกลางวัน (ประมาณ เวลา 6.00 น. – 12.00 น.) ห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เฉลี่ยมีอุณหภูมิต่ำกว่าห้องที่ใช้แผงกันแดดสำเร็จรูปสูงสุดที่ 2.92 องศาเซลเซียส และต่ำกว่าอากาศภายนอกสูงสุดที่ 6.84 องศาเซลเซียส ส่วนในช่วงบ่ายถึงกลางคืน ห้องทั้งสองมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน และสูงกว่าอากาศภายนอกประมาณ 1.96 องศาเซลเซียส (รูปที่ 4) เนื่องจากมีความร้อนสะสมจากตอนกลางวัน มีข้อสังเกตว่าการคายความร้อนของห้องที่มีแผงกันแดดไม้เฉลี่ย เป็นไปได้ช้ากว่าห้องที่ใช้แผงกันแดดสำเร็จรูป เล็กน้อย เนื่องมาจากการที่ตัวแผงกันแดดไม้เฉลี่ยอาจเป็นอุปสรรคในการระบายอากาศ

3. ความชื้นจำเพาะในช่วงเวลากลางวัน (ประมาณ เวลา 10.00 น. – 18.00 น.) ซึ่งความชื้นจำเพาะอากาศภายนอกอยู่ในระดับต่ำ (0.014-0.017 lbw/lbda) ห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เฉลี่ยมีระดับความชื้นจำเพาะสูงกว่าอากาศภายนอก และสูงกว่าห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูปเนื่องจากต้นไม้มีการคายน้ำในเวลาดังกล่าว(รูปที่ 9) ส่วนในช่วงกลางคืน (เวลา 20.00 น. – 24.00 น.) เมื่อความชื้นจำเพาะในอากาศภายนอกอยู่ในระดับสูง (0.016-0.017 lbw/lbda) และต้นไม้ไม่มีการคายน้ำ พบว่าห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เฉลี่ยมีระดับความชื้นจำเพาะต่ำกว่าความชื้นจำเพาะของอากาศภายนอกและใกล้เคียงกับห้องที่ใช้กันสาดสำเร็จรูป อย่างไรก็ตามความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นมากที่สุดของห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เฉลี่ย (ประมาณ ร้อยละ 11 จากรูปที่ 5) เกิดขึ้นในช่วงที่มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำที่สุดในตอนกลางวัน จึงมีผลต่อสภาวะนำสบายไม่มากนัก

4. ผลการทดลองในช่วงที่เลือกมาเป็นช่วงที่แผงกันแดดไม้เฉลี่ยมีสมรรถนะดีที่สุดและสอดคล้องกับทฤษฎีถึงแม้ว่าจะมีใบปกคลุมเพียง 1 ชั้นเป็นพื้นที่ประมาณ ร้อยละ 70 อย่างไรก็ตาม ยังพบว่าผลการทดลองในบางช่วง อุณหภูมิภายในห้องทดลองทั้ง 2 ห้อง ไม่แตกต่างกันมากนัก และในบางช่วง ห้องที่ใช้แผงกันแดดไม้เฉลี่ยมีอุณหภูมิสูงกว่าเนื่องจากมีการสะสมความร้อน ในช่วงเย็นถึงกลางคืนและคายความร้อนได้ไม่ดี เพราะระบายอากาศได้น้อยกว่าห้องทดลองที่ใช้แผงกันแดดสำเร็จรูป ซึ่งระบายอากาศได้ดีและมีชายคายื่นยาวกว่า

นอกจากนั้นยังพบว่าห้องทดลองทั้งสอง มีการแผ่รังสีความร้อนจากหลังคาและผนังทึบช่วงเหนือหน้าต่างซึ่งได้รับแสงเต็มที่ จึงได้ทำการปรับปรุงห้องทดลองทั้งสองเพื่อสังเกตผลในการวิจัยในช่วงต่อไป

สรุปผลและวิจารณ์

แผงกันแดดไม้เลื้อยแนวตั้งจากต้นสร้อยอินทนิลในทิศตะวันตก สามารถป้องกันการถ่ายเทความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการทดลองในช่วงแรก (เดือนที่ 4 หลังการปลูก) สามารถลดอุณหภูมิภายในห้องทดลองได้ต่ำกว่าอากาศภายนอกถึง 6.84 องศาเซลเซียส และต่ำกว่าห้องที่ใช้แผงกันแดดสำเร็จรูปถึง 2.92 องศาเซลเซียส ในช่วงที่อากาศภายนอกมีอุณหภูมิสูงสุด ทั้งยังช่วยลดคาร์บอนไดออกไซด์ในอากาศ เป็นต้นไม้ที่คุณสมบัติ คงทน ดูแลรักษาง่าย ปลูกดูแลได้ดี มีใบและดอกสวยงาม ลักษณะการติดตั้งที่มีประสิทธิภาพ ควรมีระยะห่างจากหน้าต่างเพื่อความสะดวกในการเปิดปิดและการถ่ายเทความร้อนออกในตอนกลางวัน ซึ่งจากการทดลองมีข้อสังเกตที่เสนอแนะดังนี้

1. ระยะห่างของแผงกันแดดไม้เลื้อยจากหน้าต่างห้อง มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนสู่ภายในห้อง แต่ก็ช่วยให้เกิดการระบายอากาศในตอนกลางวัน ยิ่งห่างมากจะทำให้แสงแดดสาดเข้ามาด้านข้างได้ แต่เนื่องจากสภาพห้องทดลองระยะห่างดังกล่าวถูกกำหนดโดยการเปิดหน้าต่างในระยะประมาณ 0.70 เมตร แต่อยู่ในทิศทางที่ไม่มีแสงแดดเข้าโดยตรง การปิดด้านข้างทึบด้วยผ้าขาวในช่วงแรกของการทดลอง จึงไม่มีผลให้อุณหภูมิลดลง แต่กลับเป็นการลดความสามารถในการคายความร้อนในตอนกลางวัน ทำให้อุณหภูมิเฉลี่ยรวมไม่ลดลง การใช้แสลนที่ปิดด้านข้างจึงเป็นทางเลือกที่ดีที่สุด เนื่องจากสามารถป้องกันรังสีความร้อนที่อาจส่องมาด้านข้าง และยังสามารถคายความร้อนออกได้ดีในตอนกลางวันเมื่อมีลมพัดผ่านด้วย

2. เมื่อไม้เลื้อยมีการปกคลุมมากขึ้นและมีใบหลายชั้น สมรรถนะในการป้องกันความร้อนในช่วงกลางวันจะดีขึ้นตามลำดับ จึงควรเก็บข้อมูลต่อเนื่องจนกระทั่งไม้เลื้อยเติบโตเต็มที่ อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของใบจะทำให้ความสามารถในการระบายอากาศ และการได้รับแสงธรรมชาติลดลง ซึ่งทำให้ควรมีการวิจัยต่อไปถึงแนวทางแก้ไข เช่น การเปิดช่องเปิดด้านตรงข้าม การใช้พัดลมดูดอากาศเข้าช่วยในการระบายอากาศ หรือเสนอการเปรียบเทียบกับสมรรถนะกับแผงกันแดดต้นไม้แบบผสมผสานแนวตั้งและแนวนอน เพื่อให้ได้แผงกันแดดต้นไม้ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

สุดสวาสดิ์ ศรีสถาปัตยกรรม. 2545. การออกแบบวัสดุพืชพันธุ์และการประหยัดพลังงาน. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ.

Architectural Institute of Japan. 2005. Architecture for a Sustainable Future .All About the Holistic Approach in Japan. Published by Institute of Environment and Energy Conservation (IBEC), Japan .

Brown and Gillespie.1995.Microclimatic landscape design : Creating Thermal Comfort and Energy Efficiency. John Wiley & Sons, Inc. New York, USA.

Lam,Martha, Ip, Kenneth and Miller, Andrew 2005. University of Brighton .Bioshaders for Office Building in the United Kingdom. World Sustainable Building Conference 2005 Proceeding, Tokyo, Japan.

National Research Council Canada 2005. Using Garden Roof Systems to Achieve Sustainable Building Envelope. Available Online at http://irc.enc.gc.ca/pubs/ctus/65_p.html.accessed 1/11/2005.

- Sandifer, Steven and Givoni, Baruch. 2000. Thermal Effects of Vines on Wall Temperature Comparing Laboratory and Field Collected Data. Department of Architecture and Urban Design, UCLA, USA.
- Stec et al. 2005 Modelling the Double Skin Façade with Plants. Energy and Buildings 37, 419-427. Elsevier Publishing.
- United States Environmental Protection Agency. 2005. Heat Island Effect, Trees and Vegetation. Available Online at <http://www.epa.gov/heatisland/strategies/vegetation.html> . accessed 1/11/2005.
- Wong et al. 2007. Study of Thermal Performance of Extensive Roof Greenery Systems in the Tropical Climate. Building and Environment 42, 25-54 Elsevier Publishing.
- Yeang, Ken , T.R. Hamzah. 2000. The Bioclimatic Skyscraper, Revised Edition, Ellipsis London, Limited.