

ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิพื้นผิวในเมืองขอนแก่น

Factors in Relation to Land Surface Temperature in Khon Kaen City

ณัฐพงศ์ เหลาแพง^{a*} และ ดารารัตน์ คำเชียงตา^a

Natthapong Laophaeng^{a*} and Dararat Khamchiangta^a

^aคณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ประเทศไทย

^aFaculty of Architecture, Khon Kaen University, Thailand

*Corresponding Author. Email: natthapong.l@kkumail.com

Received: March 13, 2026

Revised: June 26, 2026

Accepted: August 3, 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาลักษณะอุณหภูมิพื้นผิว (Land Surface Temperature: LST) และศึกษาปัจจัยที่สัมพันธ์กับค่าความร้อนในเขตพื้นที่ผังเมืองรวมเมืองจังหวัดขอนแก่น (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 พ.ศ. 2562) ครอบคลุมพื้นที่เมืองขอนแก่นประมาณ 239.52 ตารางกิโลเมตร รวม 11 องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น การศึกษาลักษณะอุณหภูมิพื้นผิวใช้การคำนวณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 และ Landsat-9 ในช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม (ฤดูร้อน) โดยใช้ ปี พ.ศ. 2567 เป็นปีฐานในการศึกษา ส่วนการศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อน ผู้วิจัยได้แบ่งปัจจัย ออกเป็น 2 ปัจจัย คือ (1) ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) และ (2) ค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (Normalized Difference Built-up Index: NDBI) ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่เมืองขอนแก่น มีอุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 21.11-32.41 °C โดยพื้นที่ทางด้านทิศตะวันตกและส่วนศูนย์กลางเมืองขอนแก่นเป็นพื้นที่ที่ร้อนที่สุด ซึ่งการใช้ประโยชน์ที่ดินส่วนใหญ่เป็นที่ดินเปิดโล่ง และพื้นที่สิ่งปลูกสร้างหนาแน่น ตามลำดับ ค่า NDVI มีความสัมพันธ์ในทิศทางตรงกันข้ามกับค่า LST ที่ระดับค่อนข้างต่ำ ($r = -0.142$) ส่วนค่า NDBI มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับค่า LST ที่ระดับสูง ($r = 0.729$) แสดงให้เห็นว่าเมื่อพื้นที่สีเขียวเพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิพื้นผิวจะลดลง และเมื่อพื้นที่สิ่งปลูกสร้างหรือพื้นผิวดาดแข็งเพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิพื้นผิวจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณระหว่างค่า $NDVI_{(x1)}$ $NDBI_{(x2)}$ และ $LST_{(y)}$ สามารถเขียนสมการทำนายได้ $y = 25.829 + 5.937 X_1 + 17.472 X_2$ จากผลการศึกษา แนวทางในการบรรเทาภาวะความร้อนในเมืองขอนแก่น ควรให้ความสำคัญกับการจัดการรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน ควบคู่กับการออกแบบองค์ประกอบทางกายภาพของเมือง เช่น การส่งเสริมและขยายพื้นที่สีเขียวในรูปแบบสวนสาธารณะ พื้นที่สีเขียวระดับชุมชน แนวต้นไม้ริมถนน รวมถึงการส่งเสริมให้ใช้วัสดุปูพื้นที่สามารถซึมน้ำได้ทดแทนพื้นที่คอนกรีตทั่วไป เพื่อลดการสะสมความร้อนในพื้นที่ผิววัสดุ นอกจากนี้ การควบคุมความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างภายในเมือง ทำให้เกิดการไหลเวียนของอากาศได้ดีขึ้นและช่วยถ่ายเทความร้อนออกนอกพื้นที่เมืองได้มากขึ้น

ABSTRACT

This research focuses on the characteristics of Land Surface Temperature (LST) and identifies the factors in relation to warming in Khon Kaen city. The study area was defined by Khon Kaen Comprehensive Plan (3rd revision, 2019), covering an area of approximately 239.52 km² and incorporating 11 local administrative organizations. Land Surface Temperature (LST) was derived from Landsat-8 and 9 imageries. Study period extended from mid-February to mid-May (summer season), using 2024 as the base year. To examine factors related to warming, we divided factors into 2 variables (1) Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and (2) Normalized Difference Built-up Index (NDBI). The results show that the mean of LST in Khon Kaen city ranges from 21 °C to 32 °C. The hottest areas are found in the western part and the city center of Khon Kaen, representing the open spaces and densely built-up zones, respectively. NDVI illustrates a weak negative correlation with LST ($r = -0.142$), while NDBI shows a strong positive correlation ($r = 0.729$). This indicated that an increase in green space leads to decrease in LST, whereas an increase in built-up areas or impervious surface results in a corresponding increase in LST. The analysis of multiple regression of $LST_{(y)}$ on $NDVI_{(x1)}$ and $NDBI_{(x2)}$ shows the predictive equation: $y = 25.829 + 5.937 X_1 + 17.472 X_2$. Based on the study findings, strategies to mitigate urban heat in Khon Kaen should prioritize land use management alongside the design of physical urban elements. Recommended measures include expanding green spaces such as public parks, pocket parks, and street-tree plantings as well as encouraging the use of permeable paving materials instead of concrete surface to reduce heat absorption in the city. Furthermore, regulating building density within the city will enhance urban airflow and facilitate the dissipation of accumulated heat from the city core.

คำสำคัญ: ปัจจัย อุณหภูมิพื้นผิว เกาะความร้อนเมือง ดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ ดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง

Keywords: Factors, Land Surface Temperature, Urban Heat Island, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Built-up Index (NDBI)

บทนำ

ปัจจุบันปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมือง (Urban Heat Island: UHI) เป็นปัญหาสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อเมืองใหญ่ทั่วโลก ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็วและการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Use Change) ซึ่งทำให้โครงสร้างทางกายภาพของเมืองเปลี่ยนแปลงไป การพัฒนาเมืองที่เน้นการก่อสร้างอาคารสูง ถนนลาดยาง และพื้นผิวคอนกรีต ที่สร้างแทนที่พื้นที่ธรรมชาติ เช่น พื้นที่สีเขียวและแหล่งน้ำ ส่งผลให้เกิดการสะสมและการคายความร้อนภายในเมือง ซึ่งทำให้ค่าความร้อนในเมืองสูงขึ้น และก่อให้เกิดปัญหาปรากฏการณ์

เกาะความร้อนเมือง ซึ่งปัญหานี้ยังส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชาชนในเขตเมือง (IPCC, 2022; Oke, 1982; Weng et al., 2004)

ปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมือง (Urban Heat Island: UHI) เป็นปรากฏการณ์ที่อุณหภูมิในเขตเมืองมีค่าสูงกว่าพื้นที่ชานเมือง โดยอุณหภูมิในพื้นที่เมืองอาจสูงกว่าพื้นที่ชานเมืองประมาณ 2-3 องศาเซลเซียส (°C) หรืออาจมากกว่านั้น เนื่องจากปัจจัยหลายประการ เช่น วัสดุก่อสร้างในพื้นที่เมืองมีการดูดซับและกักเก็บความร้อน การใช้พลังงานจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น ยานพาหนะ เครื่องปรับอากาศและกิจกรรมด้านอุตสาหกรรม รวมถึงการลดลงของพื้นที่สีเขียวที่มีบทบาทในการดูดซับความร้อนและระบายความร้อนผ่านการระเหยของน้ำ ในทางตรงกันข้ามพื้นที่ชานเมืองมีอุณหภูมิต่ำกว่าเนื่องจากมีพื้นที่สีเขียวมากกว่า ซึ่งช่วยลดการสะสมความร้อน อีกทั้งยังมีการถ่ายเทอากาศที่ดีกว่า เพราะไม่มีอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างหนาแน่นเหมือนในพื้นที่เมือง จึงส่งผลให้เกิดการระบายความร้อนได้ดีกว่าพื้นที่เขตเมือง (Oke, 1982; Rizwan et al., 2008; Santamouris, 2014)

ปรากฏการณ์ UHI สามารถจำแนกได้เป็น 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ เกาะความร้อนเมืองแบบพื้นผิว (Surface Urban Heat Island: SUHI) และเกาะความร้อนเมืองแบบอากาศหรือบรรยากาศ (Air/Atmospheric Urban Heat Island: AUHI) โดย SUHI พิจารณาจากความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวดิน (Land Surface Temperature: LST) ซึ่งสามารถคำนวณจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม เช่น Landsat เพื่อสะท้อนความร้อนของพื้นผิวเมือง ส่วน AUHI พิจารณาจากความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศระหว่างพื้นที่เมืองและพื้นที่โดยรอบ โดยสามารถแบ่งย่อยได้เป็น Canopy Layer UHI ซึ่งเกิดในชั้นอากาศระดับพื้นดินถึงระดับยอดอาคาร และ Boundary Layer UHI ซึ่งเกิดในชั้นอากาศเหนือระดับหลังคาอาคารขึ้นไป ทั้งนี้ SUHI มักปรากฏเด่นชัดในช่วงกลางวัน เนื่องจากพื้นผิวเมืองได้รับรังสีดวงอาทิตย์โดยตรง ขณะที่ AUHI มักเด่นชัดในช่วงกลางคืนจากการคายความร้อนสะสมของอาคารและพื้นผิวดาดแข็ง (Khamchiangta & Dhakal, 2019; U.S. EPA, 2008; Voogt & Oke, 2003)

จังหวัดขอนแก่นเป็นอีกพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบจากเกาะความร้อนเมือง เนื่องจากจังหวัดขอนแก่นเป็นหนึ่งในจังหวัดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอันดับต้น ๆ ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ โดยเป็นศูนย์กลางของการค้า การลงทุน การศึกษา และการคมนาคมของภูมิภาค ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในเขตอำเภอเมืองขอนแก่น (สำนักงานสถิติแห่งชาติ, 2565) ซึ่งเห็นได้จากการเติบโตของเศรษฐกิจ และการเพิ่มขึ้นของผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัด (GPP) โดยในปี พ.ศ. 2563 มี GPP เท่ากับ 208,248 ล้านบาท และปี 2564 เพิ่มขึ้นเป็น 213,039 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการคลัง กระทรวงการคลัง, 2565)

ค่าความร้อนเฉลี่ยสูงสุดของเดือนเมษายนอำเภอเมืองขอนแก่น (ข้อมูลจากสถานีวัดอุณหภูมิ) ซึ่งเป็นเดือนที่มีอุณหภูมิสูงสุด ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2557 - 2567 พบว่า ถึงกราฟมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงแต่ค่าอุณหภูมิสูงสุดของอำเภอเมืองขอนแก่นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2567 อุณหภูมิพุ่งสูงขึ้นถึง 40.3 °C เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2557 ที่มีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 36 °C โดยอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดเพิ่มขึ้นร้อยละ 0.43 ต่อปี (สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน), 2568)

จากสภาพปัญหาการเพิ่มขึ้นของค่าความร้อนในพื้นที่เมืองขอนแก่นดังที่กล่าวมาข้างต้น ในการศึกษาเชิงวิชาการยังไม่มีการศึกษาลักษณะอุณหภูมิพื้นผิวของจังหวัดขอนแก่น รวมถึงปัจจัยที่สัมพันธ์กับความร้อนในเมืองขอนแก่น ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาลักษณะอุณหภูมิพื้นผิวของพื้นที่เมืองขอนแก่น และศึกษาปัจจัย

ที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิพื้นผิวของพื้นที่เมืองขอนแก่น ทั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวในพื้นที่เมืองออกเป็น 2 ปัจจัย ดังนี้

(1) ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)

(2) ค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (Normalized Difference Built-up Index: NDBI)

โดยผลลัพธ์ของการศึกษานี้สามารถนำไปสู่แนวทางในการพัฒนาพื้นที่เมืองขอนแก่น เพื่อบรรเทาความร้อนในพื้นที่เมือง และเพื่อที่จะสามารถลดปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมืองในพื้นที่เมืองขอนแก่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะอุณหภูมิพื้นผิวในพื้นที่เมืองขอนแก่น
2. เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนในพื้นที่เมืองขอนแก่น

การทบทวนวรรณกรรม

1. ปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมือง (Urban Heat Island: UHI)

หมายถึง ภาวะที่พื้นที่เมืองมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นที่ชนบทโดยรอบอย่างมีนัยสำคัญ อันเป็นผลมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินและโครงสร้างทางกายภาพของเมือง โดยเฉพาะการเพิ่มขึ้นของสิ่งปลูกสร้างและพื้นผิวที่ไม่ซึมน้ำ เช่น คอนกรีตและแอสฟัลต์ ซึ่งมีคุณสมบัติในการดูดซับและกักเก็บพลังงานความร้อนจากรังสีดวงอาทิตย์ได้สูง (Oke, 1982) ประกอบกับการลดลงของพื้นที่สีเขียว ที่ทำหน้าที่ช่วยระบายความร้อนผ่านกระบวนการคายน้ำของพืช รวมถึงความร้อนที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ เช่น การคมนาคม การใช้พลังงานในอาคาร และกิจกรรมทางเศรษฐกิจ ส่งผลให้เกิดการสะสมและคายความร้อนในเขตเมืองมากกว่าพื้นที่ชนบท (Voogt & Oke, 2003) ปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมืองสามารถจำแนกได้เป็น 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ เกาะความร้อนเมืองแบบพื้นผิว (Surface Urban Heat Island: SUHI) และเกาะความร้อนเมืองแบบอากาศหรือบรรยากาศ (Air/Atmospheric Urban Heat Island: AUHI) โดย SUHI เป็นการศึกษาค่าความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวดิน (Land Surface Temperature: LST) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม เช่น Landsat เพื่อสะท้อนลักษณะการสะสมความร้อนของพื้นผิวเมืองและความสัมพันธ์กับปัจจัยทางกายภาพของเมือง ขณะที่ AUHI เป็นการศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิอากาศระหว่างพื้นที่เมืองและพื้นที่ชนบทหรือพื้นที่โดยรอบ โดยมีอาศัยข้อมูลจากสถานีอุตุนิยมวิทยา การตรวจวัดภาคสนาม หรือการสำรวจแบบเคลื่อนที่ ทั้งนี้ AUHI สามารถแบ่งย่อยได้เป็น Canopy Layer UHI ซึ่งเกี่ยวข้องกับชั้นอากาศระดับพื้นดินถึงระดับยอดอาคาร และ Boundary Layer UHI ซึ่งเกิดในชั้นอากาศเหนือระดับหลังคาอาคารขึ้นไป (Khamchiangta & Dhakal, 2019; U.S. EPA, 2008; Voogt & Oke, 2003; Weng et al., 2004)

2. ดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)

หมายถึงค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) เป็นตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินระดับของพืชพรรณในพื้นที่หนึ่ง โดยอาศัยค่าการสะท้อนแสงจากภาพถ่ายดาวเทียมในย่านคลื่นแสงสีแดง (Red) และใกล้อินฟราเรด (Near-Infrared: NIR) พืชที่มีสุขภาพดีจะดูดซับแสงสีแดงและสะท้อนแสงใกล้อินฟราเรดกลับมาในระดับสูง ทำให้สามารถคำนวณ NDVI

ได้จากสมการ $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$ ซึ่งค่าดัชนี NDVI มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 โดยค่าที่สูง (ประมาณ 0.5–1.0) แสดงถึงพื้นที่ที่มีพืชพรรณหนาแน่นและมีความสมบูรณ์สูง ค่าปานกลาง (ประมาณ 0.2–0.5) มักเป็นพื้นที่พืชพรรณเบาบางหรือพื้นที่เกษตรกรรม ขณะที่ค่าต่ำใกล้ศูนย์แสดงถึงพื้นที่ว่างเปล่าหรือสิ่งปลูกสร้าง และค่าติดลบมักสัมพันธ์กับพื้นที่แหล่งน้ำ (Jensen, 2007; Rouse Jr et al., 1974)

3. ดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (Normalized Difference Built-up Index: NDBI)

หมายถึงดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) เป็นดัชนีที่ใช้ระบุพื้นที่ที่มีสิ่งปลูกสร้างหรือมีลักษณะเป็นพื้นที่เมือง โดยอาศัยหลักการสะท้อนพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า ที่แตกต่างกันของพื้นผิวประเภทต่าง ๆ ในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared: NIR) และช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น (Shortwave Infrared: SWIR) ซึ่งพื้นผิวที่เป็นสิ่งปลูกสร้าง เช่น อาคาร ถนน และพื้นที่พัฒนาเมือง จะมีค่าการสะท้อนในช่วงคลื่น SWIR สูงกว่าช่วงคลื่น NIR อย่างเด่นชัด ส่งผลให้สามารถแยกพื้นที่เมืองออกจากพื้นที่พืชพรรณและแหล่งน้ำได้ ซึ่งสามารถคำนวณ NDBI ได้จากสมการ $NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$ ซึ่งค่าดัชนี NDBI มีช่วงค่าระหว่าง -1.0 ถึง +1.0 โดยค่าดัชนีที่เป็นบวกสูง (ประมาณ 0.2–1.0) แสดงถึงพื้นที่สิ่งปลูกสร้างหรือพื้นที่เมือง เนื่องจากพื้นผิวประเภทอาคาร ถนน และโครงสร้างพื้นฐานมีการสะท้อนพลังงานในช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น (SWIR) สูงกว่าช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) ค่าดัชนีระดับปานกลางใกล้ศูนย์ (ประมาณ 0.0–0.2) มักพบในพื้นที่ดินเปลือย หรือพื้นที่ผสมระหว่างสิ่งปลูกสร้างกับพืชพรรณ ขณะที่ค่าดัชนีติดลบ (น้อยกว่า 0) มักสัมพันธ์กับพื้นที่พืชพรรณและแหล่งน้ำ (Zha et al., 2003)

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

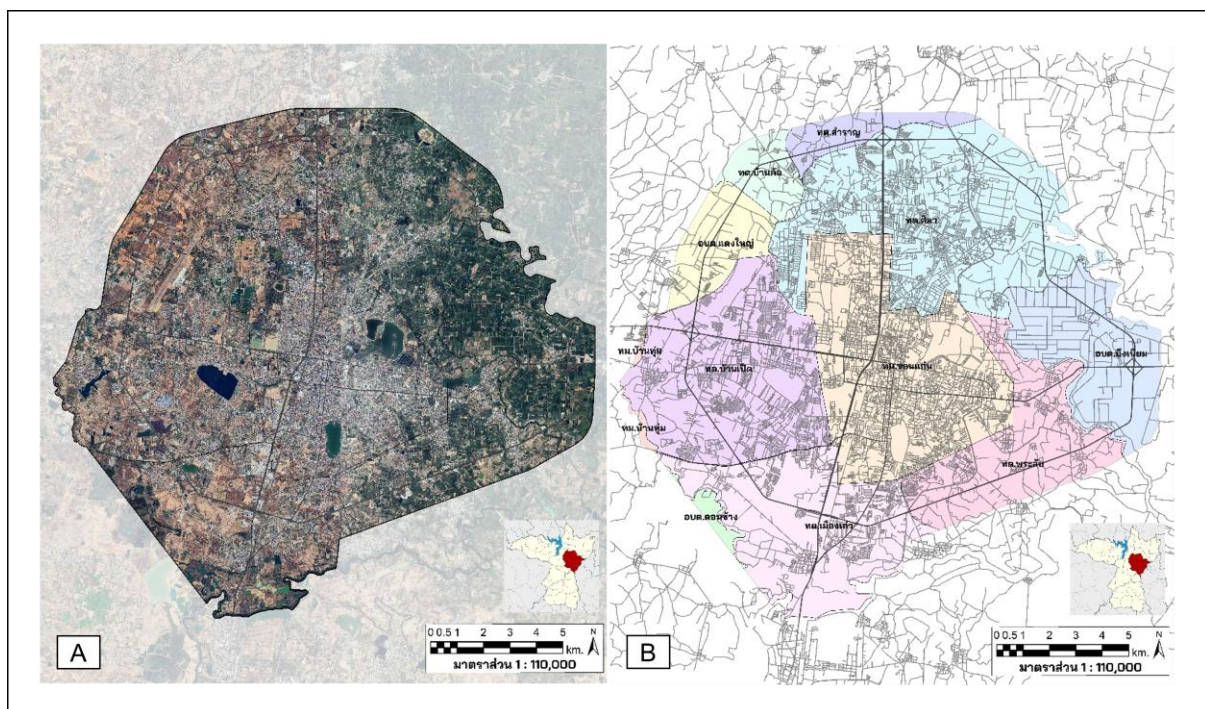
งานวิจัยของ ธัญญรัตน์ ไชยคราม และคณะ (2566) ศึกษาการติดตามรูปแบบปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมืองปทุมธานีด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียมหลายช่วงเวลา ได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมือง (Urban Heat Island: UHI) ในช่วงระยะเวลา 30 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2533 - 2563 โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat หลายช่วงเวลาในการวิเคราะห์อุณหภูมิพื้นผิวดิน (Land Surface Temperature: LST) ร่วมกับดัชนีเชิงพื้นที่ ได้แก่ ดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) และดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (Normalized Difference Built-up Index: NDBI) เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินกับการกระจายตัวของความร้อนในเขตเมือง ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ที่มีค่า NDVI สูงมีแนวโน้มแสดงค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินต่ำ ในขณะที่พื้นที่ที่มีค่า NDBI สูงซึ่งสะท้อนความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างมีอุณหภูมิพื้นผิวสูง โดยเฉพาะบริเวณที่มีการขยายตัวของเมืองและพื้นที่พาณิชยกรรมอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ แนวโน้มพื้นที่อุณหภูมิสูงเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สอดคล้องกับการลดลงของพื้นที่สีเขียวและการเพิ่มขึ้นของพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติยังแสดงให้เห็นว่า LST มีความสัมพันธ์เชิงลบกับ NDVI และมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ NDBI อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสะท้อนบทบาทสำคัญของโครงสร้างการใช้ที่ดินต่อการเกิดปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมือง และชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นของการวางแผนการใช้ที่ดิน การอนุรักษ์พื้นที่สีเขียว และการควบคุมการขยายตัวของเมือง เพื่อบรรเทาผลกระทบด้านความร้อนในอนาคต

งานวิจัยของ Khamchiangta & Dhakal (2019) ศึกษาปัจจัยทางกายภาพและปัจจัยที่ไม่ใช่กายภาพที่ส่งผลต่อปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมืองระดับพื้นผิว (Surface Urban Heat Island: SUHI) ในเขตกรุงเทพมหานคร โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ในการคำนวณค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (Land Surface Temperature: LST)

จากช่วงคลื่นความร้อน (Thermal Infrared Sensor: TIRS) และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยด้านโครงสร้างเมืองกับการกระจายตัวของอุณหภูมิพื้นผิว ควบคู่กับการวิเคราะห์ดัชนีพืชพรรณ Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) และลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างพื้นที่เมืองและพื้นที่โดยรอบ ผลการศึกษาพบว่า พื้นที่ที่มีความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างและพื้นผิวที่ไม่ซึมน้ำสูงมีแนวโน้มที่จะมีค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินสูงกว่าพื้นที่ที่มีพืชพรรณปกคลุม ขณะที่พื้นที่สีเขียวและแหล่งน้ำมีบทบาทสำคัญในการช่วยลดอุณหภูมิพื้นผิวเมือง นอกจากนี้ยังพบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างค่า NDVI และ LST กล่าวคือ พื้นที่ที่มีความหนาแน่นของพืชพรรณสูงมักมีค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินต่ำกว่า ในขณะที่พื้นที่เมืองที่มีการพัฒนาอย่างหนาแน่น เช่น พื้นที่พาณิชยกรรมและอุตสาหกรรม มีค่าความรุนแรงของปรากฏการณ์ SUHI สูงกว่าพื้นที่เกษตรกรรมหรือพื้นที่ที่มีพืชพรรณปกคลุม ผลการศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่าการขยายตัวของเมืองและการลดลงของพื้นที่สีเขียวเป็นปัจจัยสำคัญ ที่สัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพื้นผิวและความรุนแรงของปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมืองในพื้นที่เมือง

จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจในการศึกษาลักษณะอุณหภูมิพื้นผิวและปัจจัยที่มีผลและสัมพันธ์กับอุณหภูมิพื้นผิว โดยแบ่งปัจจัยออกเป็น ลักษณะดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) และลักษณะดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) ในบริบทของเมืองขอนแก่น เพื่อให้ให้นักวิชาการและหน่วยงานรัฐบาลที่เกี่ยวข้องสามารถนำผลลัพธ์ที่ได้ไปใช้ในการวางแผนและบรรเทาความร้อนในพื้นที่เมืองขอนแก่นต่อไป

พื้นที่ศึกษา



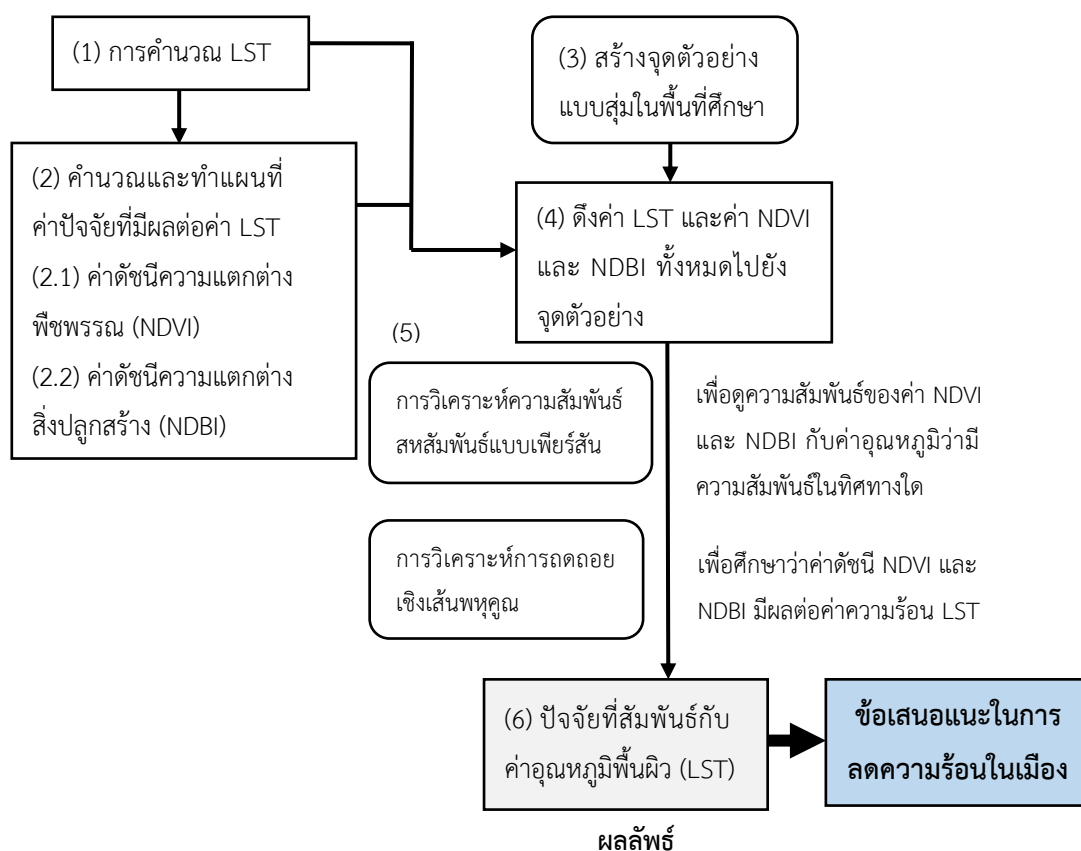
ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษา (A) ขอบเขตพื้นที่เมืองขอนแก่นจากภาพถ่ายดาวเทียม และ (B) ขอบเขตการปกครอง
ในพื้นที่เมืองขอนแก่น

อำเภอเมืองขอนแก่นเป็นศูนย์กลางสำคัญของภาคตะวันออกเฉียงเหนือในด้านคมนาคม การศึกษา และการแพทย์ ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของเมืองและการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินอย่างต่อเนื่อง โดยมีพื้นที่ประมาณ 953.4 ตารางกิโลเมตร แบ่งเขตการปกครองเป็น 18 ตำบล 267 หมู่บ้าน มีประชากร 99,495 คน และมีความหนาแน่นเฉลี่ย 104.33 คนต่อตารางกิโลเมตร (สำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง, 2566)

พื้นที่ศึกษาในงานวิจัยนี้กำหนดขอบเขตตามผังเมืองรวมจังหวัดขอนแก่น (ฉบับปรับปรุงครั้งที่ 3 พ.ศ. 2562) ครอบคลุมพื้นที่เมืองขอนแก่นประมาณ 239.52 ตารางกิโลเมตร รวม 11 องค์การปกครองส่วนท้องถิ่น ได้แก่ เทศบาลนครขอนแก่น เทศบาลเมืองบ้านทุ่ม เทศบาลเมืองบ้านเป็ด เทศบาลเมืองศิลา เทศบาลตำบลเมืองเก่า เทศบาลตำบลพระลับ เทศบาลตำบลสำราญ เทศบาลตำบลบ้านค้อ องค์การบริหารส่วนตำบลแดงใหญ่ องค์การบริหารส่วนตำบลดอนช้าง และองค์การบริหารส่วนตำบลบึงเนียม

ระเบียบวิธีวิจัย

ในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้เลือกใช้ข้อมูลในการศึกษา มีทั้งหมด 3 ชุดข้อมูล (1) ข้อมูลค่าอุณหภูมิพื้นผิว (2) ข้อมูลค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ และ (3) ข้อมูลค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง ทั้ง 3 ชุดข้อมูล คำนวณจากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 และ 9 โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและที่มาของแหล่งข้อมูลทั้งหมดในงานวิจัยนี้แสดงในตารางที่ 1



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาและที่มาของแหล่งข้อมูล

ข้อมูลที่ต้องการ	ช่วงเวลา	แหล่งที่มา และโปรแกรมที่ใช้
คำนวณจากข้อมูล ภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 และ Landsat-9 ความละเอียด Band 10	ฤดูร้อน (ก.พ. - พ.ค.)	1) USGS, 2567
100 × 100 เมตรต่อพิกเซล	ปี พ.ศ. 2567	2) Google Earth Pro
Landsat-8 และ Landsat-9		3) โปรแกรม ArcMap เวอร์ชัน 10.8
(2) ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ ในพื้นที่เมืองขอนแก่น คำนวณจาก Band 4 และ Band 5 ความละเอียด 30 × 30 เมตรต่อพิกเซล		
(3) ค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง ในพื้นที่เมืองขอนแก่น คำนวณจาก Band 5 และ Band 6 ความละเอียด 30 × 30 เมตรต่อพิกเซล		

วิธีการศึกษา

การศึกษานี้ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 และ Landsat-9 นำมาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่าอุณหภูมิพื้นผิว ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ และ ค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (ในช่วงเวลาเดียวกัน) เพื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางสถิติ โดยขั้นตอนการดำเนินงานแสดงในภาพที่ 2 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) คำนวณค่าอุณหภูมิพื้นผิว (Land Surface Temperature: LST) จากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 และ Landsat-9 โดยใช้แบนด์ความร้อน TIRS Band 10 มีความละเอียด 100 × 100 เมตรต่อพิกเซล ที่ใช้ในการวิเคราะห์ร่วมกัน โดยในช่วงกลางเดือนกุมภาพันธ์ถึงกลางเดือนพฤษภาคม ปี พ.ศ. 2567 มีภาพถ่ายดาวเทียมที่มีคุณภาพ (ไม่มีเมฆปกคลุม) และสามารถนำมาใช้คำนวณได้ทั้งหมด 9 ภาพ ดังนี้ (1) 7 กุมภาพันธ์ 2567 (2) 15 กุมภาพันธ์ 2567 (3) 23 กุมภาพันธ์ 2567 (4) 18 มีนาคม 2567 (5) 3 เมษายน 2567 (6) 19 เมษายน 2567 (7) 27 เมษายน 2567 (8) 5 พฤษภาคม 2567 และ (9) 13 พฤษภาคม 2567

2) คำนวณค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) จากภาพถ่ายดาวเทียมทั้ง 9 ภาพ โดยใช้ Red Band 4 และ Near Infrared (NIR) Band 5 ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ 30 × 30 เมตรต่อพิกเซล

3) คำนวณค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (Normalized Difference Built up Index: NDBI) จากภาพถ่ายดาวเทียมทั้ง 9 ภาพ โดยใช้ Shortwave Infrared (SWIR) Band 6 และ Near Infrared (NIR) Band 5 ซึ่งมีความละเอียดเชิงพื้นที่ 30 × 30 เมตรต่อพิกเซล

4) คำนวณค่าเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิพื้นผิว ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ และค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง

5) สร้างจุดตัวอย่างแบบสุ่ม (Random Sample point) ในพื้นที่ศึกษา เพื่อให้จุดตัวอย่างกระจายครอบคลุมพื้นที่ศึกษา โดยพิจารณาการกระจายของจุดตัวอย่าง ให้ครอบคลุมทุกประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินและเขตการปกครอง

ภายในพื้นที่ศึกษา ซึ่งมีขนาดพื้นที่รวม 239.52 ตารางกิโลเมตร งานวิจัยนี้กำหนดให้จุดตัวอย่างห่างกันไม่น้อยกว่า 500 เมตร เพื่อไม่ให้จุดตัวอย่างใกล้กันมากเกินไป ซึ่งอาจทำให้ได้ค่าข้อมูลจากบริเวณที่มีลักษณะใกล้เคียงกันหรือซ้ำกันมากเกินไป เนื่องจากภาพถ่ายดาวเทียมที่ใช้คำนวณค่า LST คือแบนด์ความร้อน TIRS Band 10 ซึ่งมีขนาดพิกเซล 100×100 เมตร เมื่อนำมาคำนวณตามสมการเราจะได้จำนวนจุดตัวอย่างทั้งหมด ($N = \text{พื้นที่ทั้งหมด} / (\text{ระยะห่าง})^2$) ($958 = 239.52 / (0.5)^2$) ดังนั้นจากจำนวนจุดตัวอย่างที่ได้ 958 จุด ผู้วิจัยจึงสร้างจุดตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์ทางสถิติเป็นจำนวน 1,000 จุดเพื่อลดความคลาดเคลื่อนของข้อมูล

6) ดึงข้อมูลค่าเฉลี่ยของค่าอุณหภูมิพื้นผิว ค่าเฉลี่ยดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ และค่าเฉลี่ยดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง ใส่ในจุดตัวอย่าง โดยใช้เทคนิคการดึงค่าข้อมูลจากชั้นข้อมูลราสเตอร์ไปยังตำแหน่งจุดตัวอย่าง (Raster Value Extraction to Points) เพื่อให้จุดตัวอย่างแต่ละจุดมีค่าข้อมูล LST, NDVI และ NDBI อยู่ในตารางคุณลักษณะ สำหรับนำไปใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติในขั้นตอนต่อไป

7) คำนวณและวิเคราะห์สถิติการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ (Correlation Analysis) และสถิติการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) เพื่อหาความสัมพันธ์และปัจจัยที่มีผลต่อค่าความร้อนพื้นผิว จากจุดตัวอย่างทั้ง 1,000 จุด

1. การคำนวณค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (Land Surface Temperature: LST)

ขั้นตอนการคำนวณค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินโดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1.1 แปลงค่าดิจิตอล (DN) เป็นค่าการแผ่รังสี (Radiance)

$$L\lambda = ML \times Q_{cal} + AL$$

โดยที่ $L\lambda$ คือ ค่าการแผ่รังสี; ML คือ ค่าคงที่จากข้อมูลดาวเทียม; Q_{cal} คือ ค่าตัวเลขดิจิตอล (DN) และ AL คือ ค่าคงที่จากข้อมูลดาวเทียม

1.2 แปลงค่าการแผ่รังสีเป็นค่าอุณหภูมิความสว่าง (Brightness Temperature)

$$TB = K2 / \ln((K1 / L\lambda) + 1) - 273.15$$

โดยที่ TB คือ อุณหภูมิความสว่างเป็นองศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$); $L\lambda$ คือ ค่าความสว่างของสเปกตรัมของเซนเซอร์ Landsat-8 (OLI/TIRS) และ $K1, K2$ คือ ค่าคงที่จากแบนด์ 10 ของเซนเซอร์ Landsat-8 และ Landsat-9

1.3 การคำนวณค่าการแผ่รังสีพื้นผิว

(1) การคำนวณค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI

ค่าดัชนี NDVI สามารถคำนวณได้จากค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นใกล้อินฟราเรด (NIR) และช่วงคลื่นสีแดง (Red) ของข้อมูลจากดาวเทียม Landsat-8 และ Landsat-9 ตามสมการ:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

โดยที่ NDVI คือ ค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ; NIR คือ ค่าการสะท้อนในแถบคลื่นใกล้อินฟราเรด (Band 5) และ R คือ ค่าการสะท้อนในแถบคลื่นสีแดง (Band 4)

(2) การคำนวณสัดส่วนพืชพรรณ (Proportion of Vegetation: PV)

เมื่อได้ค่า NDVI แล้ว สามารถคำนวณสัดส่วนพืชพรรณในแต่ละพิกเซลได้จากสมการ

$$PV = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2$$

ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิพื้นผิวในเมืองขอนแก่น
ณัฐพงศ์ เหลาแพง และ ดารารัตน์ คำเชียงตา

(3) การคำนวณค่าความเป็นการแผ่รังสีของพื้นผิว (Emissivity: E)

$$E = 0.0004 \times PV + 0.986$$

โดยที่ E คือ การแผ่รังสีของพื้นผิว และ PV คือ สัดส่วนพืชพรรณ

(4) การคำนวณค่าความเป็นการแผ่รังสีของพื้นผิว

เมื่อได้ค่า Emissivity แล้ว สามารถนำมาใช้ในการคำนวณอุณหภูมิพื้นผิวดิน โดยใช้สมการ

$$LST = TB / [1 + ((\lambda \times \sigma \times TB) / \rho) \times \ln(E)]$$

โดยที่ LST คือ อุณหภูมิพื้นผิวดิน หน่วยเป็นองศาเซลเซียส (°C); TB คือ อุณหภูมิความสว่าง
เป็นองศาเซลเซียส (°C); λ คือความยาวคลื่นของแถบสเปกตรัม (Band 10) จากเซนเซอร์ Landsat-8 และ Landsat-9;
 σ คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (1.38×10^{-23} J/K); h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (6.626×10^{-34} Js); c คือ ความเร็วของ
แสงในสุญญากาศ (2.998×10^8 m/s) และ E คือ การแผ่รังสีของพื้นผิว (Avdan & Jovanovska, 2016; Carlson &
Ripley, 1997; Khallaf, 2023; Khallaf et al., 2020; Rouse Jr et al., 1974; U.S. Geological Survey, n.d.)

2. การคำนวณค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ

การคำนวณดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) จาก
Landsat-8 และ Landsat-9 NDVI เป็นดัชนีที่ใช้ตรวจสอบความเขียวขจี หรือความสมบูรณ์ของพืชพรรณ โดยการนำ
ข้อมูลแถบคลื่นใกล้อินฟราเรด (NIR: Band 5) และแถบคลื่นสีแดง (Red: Band 4) มาคำนวณได้จากสมการนี้ (Jensen,
2007; Rouse Jr et al., 1974)

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

3. การคำนวณค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง

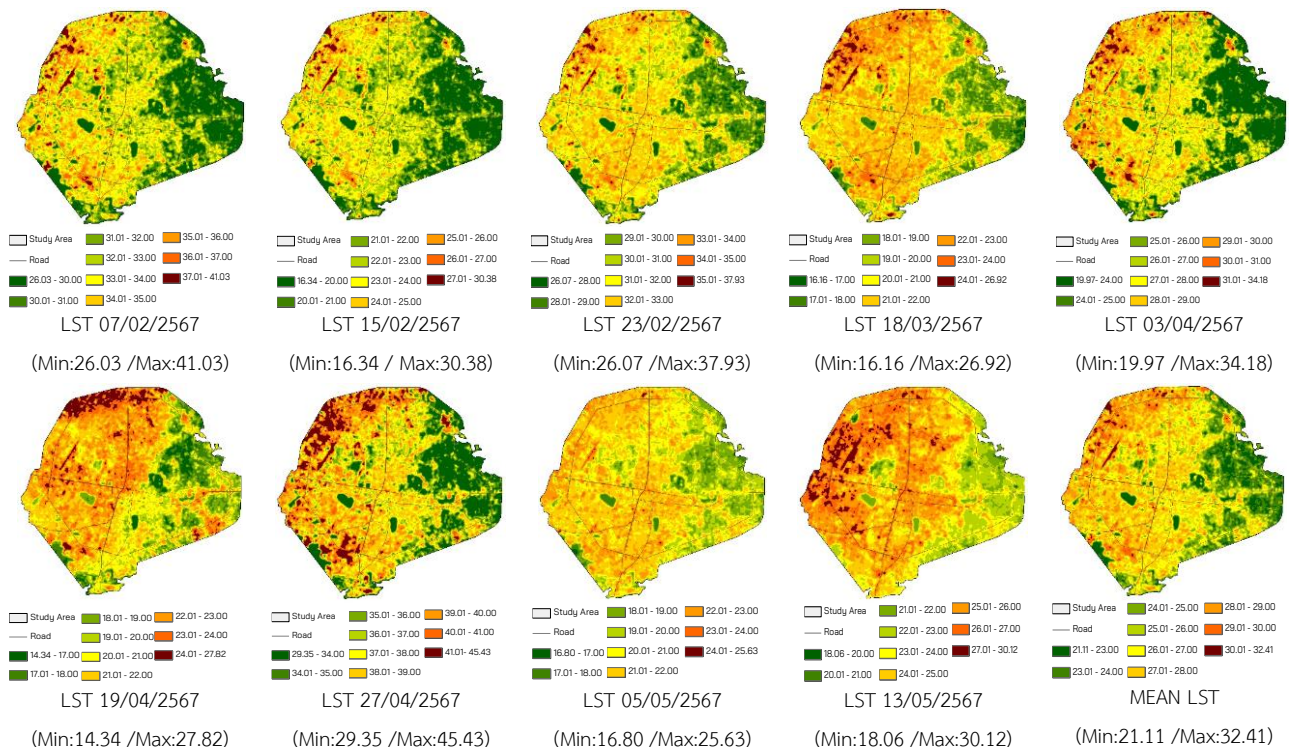
การคำนวณดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (Normalized Difference Built-up Index: NDBI) จาก
Landsat-8 และ Landsat-9 NDBI เป็นดัชนีที่ใช้จำแนกพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง โดยการนำข้อมูลแถบคลื่นอินฟราเรด
ช่วงคลื่นสั้น (SWIR: Band 6) และแถบคลื่นใกล้อินฟราเรด (NIR: Band 5) มาคำนวณได้จากสมการนี้ (Zha et al.,
2003)

$$NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR)$$

ผลการศึกษา

ผลการศึกษาที่น่าสนใจคือการวิเคราะห์ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินและปัจจัยที่สัมพันธ์กับค่าความร้อนในพื้นที่เมือง
ขอนแก่น โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 และ Landsat-9 ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2567
ซึ่งเป็นช่วงฤดูร้อนของพื้นที่ศึกษา ดังแสดงในภาพต่อไปนี้

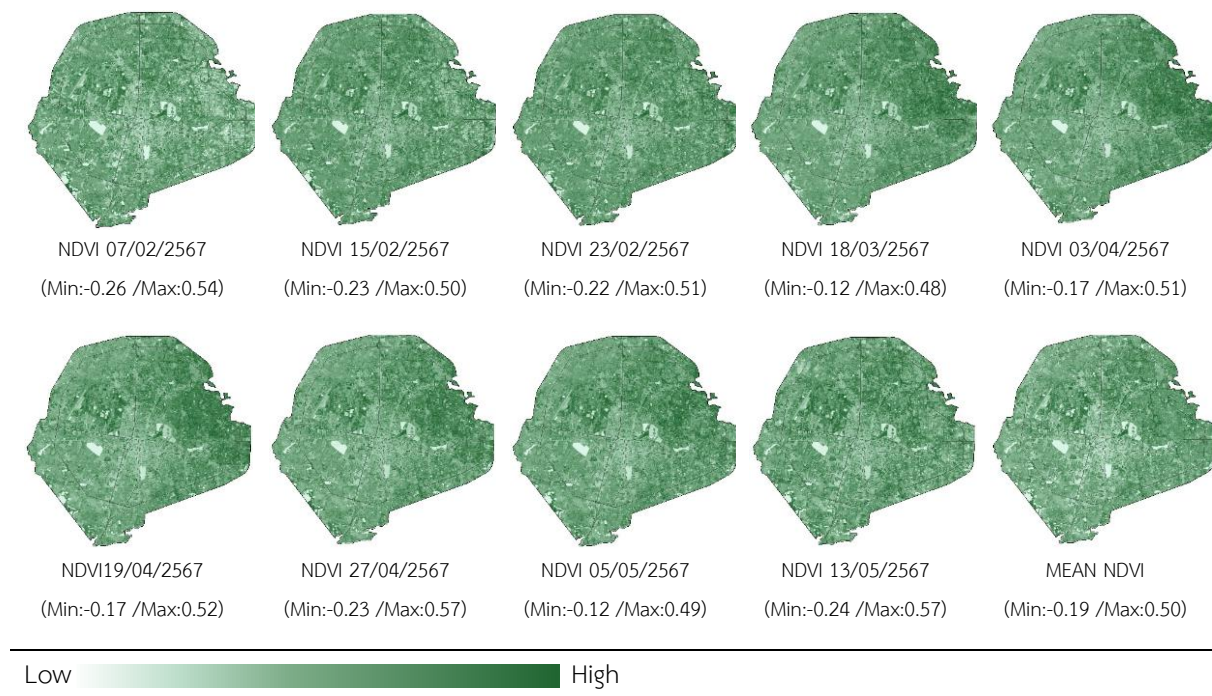
1. ค่าอุณหภูมิพื้นผิว (Land Surface Temperature: LST)



ภาพที่ 3 ค่าอุณหภูมิพื้นผิวของเมืองขอนแก่นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2567

จากภาพที่ 3 แสดงค่าอุณหภูมิพื้นผิวของเมืองขอนแก่น ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2567 พบว่า วันที่มีอุณหภูมิสูงสุด คือวัน 27 เมษายน พ.ศ. 2567 อุณหภูมิสูงสุดคือ 45.43 °C มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 37.39 °C รองลงมาคือวันที่ 7 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2567 อุณหภูมิอยู่ที่ 41.03 °C มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 33.53 °C ส่วนค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิทั้ง 9 วัน มีอุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 32.41 °C มีอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 26.76 °C จากแผนที่ที่แสดงค่า LST ทั้งหมด จะเห็นได้ว่า อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ทางด้านทิศตะวันตกของเมือง และส่วนศูนย์กลางเมืองขอนแก่น ส่วนพื้นที่ที่มีอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ คือพื้นที่ทางด้านทิศตะวันออกของพื้นที่การศึกษา เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายดาวเทียมของพื้นที่ศึกษา ในภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่าพื้นที่ส่วนกลางของเมืองคือพื้นที่สิ่งปลูกสร้างหนาแน่น และพื้นที่ทางด้านทิศตะวันตกส่วนมากเป็นพื้นที่ดินเปิดโล่ง ในทางกลับกันพื้นที่ทางด้านทิศตะวันออกที่มีอุณหภูมิต่ำ ค่อนข้างต่ำ ส่วนมากคือพื้นที่สีเขียวของเมืองและส่วนมากเป็นพื้นที่เกษตรกรรม นอกจากนี้ ในพื้นที่ศูนย์กลางเมืองมีบางพื้นที่ที่แสดงค่าอุณหภูมิที่ค่อนข้างต่ำ ซึ่งทั้งหมดเป็นพื้นที่น้ำผิวดินหรือพื้นที่บึงต่าง ๆ ภายในเมือง ผลของค่าความร้อนที่ได้สะท้อนให้เห็นถึงบทบาทของพืชพรรณและความชื้นผิวดินที่ช่วยลดการสะสมความร้อน ซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิพื้นผิวในพื้นที่เขตเมือง

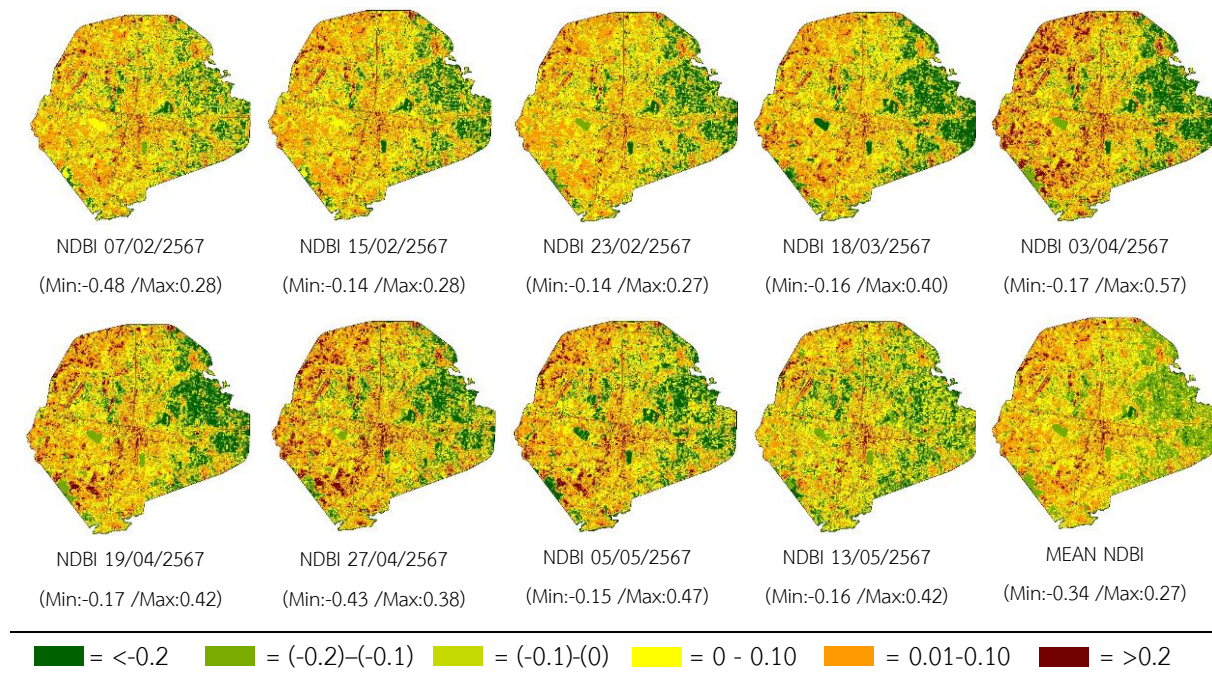
2. ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)



ภาพที่ 4 ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณของเมืองขอนแก่นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2567

จากภาพที่ 4 แสดงค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณของเมืองขอนแก่นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2567 พบว่า ค่า NDVI ทั้ง 9 วัน มีค่าต่ำสุดอยู่ที่ประมาณ -0.26 ถึง -0.12 และค่าสูงสุดประมาณ 0.48 ถึง 0.57 ค่า NDVI ที่ได้อยู่ในช่วงใกล้เคียงกัน เนื่องจากอยู่ในช่วงฤดูกาลเดียวกัน โดยค่าเฉลี่ยรวมตลอดช่วงเวลาศึกษามีค่าต่ำสุดเฉลี่ย -0.19 ค่าสูงสุดเฉลี่ย 0.50 และค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 0.16 สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนใหญ่มีการปกคลุมของพืชพรรณในระดับต่ำถึงปานกลาง ทั้งนี้ พื้นที่ที่มีค่า NDVI ต่ำมาก (ค่าใกล้ศูนย์) กระจุกตัวในเขตเมืองชั้นในและบริเวณสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น รวมถึงพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน เช่น พื้นที่คอนกรีต และ ถนน ส่วนค่าติดลบที่แสดงเป็นสีเขียวอ่อนมาก ๆ คือพื้นที่แหล่งน้ำและบึงต่าง ๆ ภายในเมือง ส่วนพื้นที่ที่มีสีเขียวเข้ม จะอยู่ทางด้านทิศตะวันออกและบางพื้นที่ทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่มหาวิทยาลัยขอนแก่นตามลำดับ

3. ค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (Normalized Difference Built-up Index: NDBI)



ภาพที่ 5 ค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้างของเมืองขอนแก่นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2567

จากภาพที่ 5 แสดงค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้างของเมืองขอนแก่นในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม พ.ศ. 2567 พบว่า ค่าเฉลี่ยของ NDBI ทั้ง 9 วัน มีค่าต่ำสุดเฉลี่ยเท่ากับ -0.34 ค่าสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 0.27 โดยพื้นที่ที่มีค่า NDBI ติดลบ (จากแผนที่คือพื้นที่สีเขียว) กระจายตัวอยู่บริเวณรอบนอกเขตเมือง โดยเฉพาะด้านทิศตะวันออก ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่เกษตรกรรม และบางพื้นที่ในเขตเมืองที่เป็นพื้นที่แหล่งน้ำและบึงต่าง ๆ ในเมือง ขณะที่พื้นที่ที่มีค่า NDBI สูง (จากแผนที่คือพื้นที่สีส้มและแดงเข้ม) พบการกระจุกตัวในบริเวณศูนย์กลางเมือง แนวโครงข่ายคมนาคม และพื้นที่พัฒนาเมืองที่มีความหนาแน่นของอาคารและโครงสร้างพื้นฐานสูง รวมถึงพื้นที่โล่งขนาดใหญ่ (พื้นที่โล่งเปิดหน้าดินทางด้านทิศตะวันตกของเมือง) เนื่องจากพื้นผิวของพื้นที่โล่งมีการสะท้อนพลังงานสูงในช่วงคลื่น Shortwave Infrared (SWIR) และสะท้อนต่ำในช่วง Near Infrared (NIR) จากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat จึงส่งผลให้ค่า NDBI อยู่ในระดับปานกลางถึงสูง

4. การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient)

4.1 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) ของค่าเฉลี่ยของค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น

		ค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI)	ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST)
ค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI)	Pearson Correlation	1	-0.142**
	Sig. (2-tailed)		<0.001
	N	1,000	1,000
ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST)	Pearson Correlation	-0.142**	1
	Sig. (2-tailed)	<0.001	
	N	1,000	1,000

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

จากตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าเฉลี่ยค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น โดยใช้สถิติค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันจากจุดตัวอย่างทั้งหมด 1,000 จุด พบว่า NDVI มีความสัมพันธ์เชิงลบกับ LST อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $r = -0.142$, Sig. (2-tailed) < 0.001 แสดงให้เห็นว่า เมื่อค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินจะมีค่าลดลง ในทางตรงกันข้ามเมื่อค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) ลดลง ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินจะมีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าอยู่ในระดับที่ไม่ได้สูงมากนัก คือ -0.142 แสดงให้เห็นว่าค่าความสัมพันธ์อยู่ในระดับต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่า NDVI สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ LST ได้เพียงบางส่วนเท่านั้น เนื่องจากอุณหภูมิพื้นผิวดินในเขตเมืองยังได้รับอิทธิพลจากปัจจัยด้านอื่นร่วมด้วย เช่น ความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้าง พื้นผิวดาดแข็ง พื้นที่ดินเปิดโล่งที่ขาดพืชพรรณปกคลุม วัสดุปูพื้นผิวเมืองที่สามารถดูดซับและกักเก็บความร้อนได้สูง เป็นต้น

4.2 การวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (Pearson's Correlation Coefficient) ของค่าเฉลี่ยของค่าดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยของค่าดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น

		ค่าดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI)	ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST)
ค่าดัชนีความแตกต่าง สิ่งปลูกสร้าง (NDBI)	Pearson Correlation	1	0.729**
	Sig. (2-tailed)		<0.001
	N	1,000	1,000
ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST)	Pearson Correlation	0.729**	1
	Sig. (2-tailed)	<0.001	
	N	1,000	1,000

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

จากตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าเฉลี่ยของค่าดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) ที่มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น โดยใช้สถิติค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน จากข้อมูลจุดตัวอย่างทั้งหมด 1,000 จุด พบว่า ค่า NDBI มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับค่า LST อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $r = 0.729$ และค่า Sig. (2-tailed) < 0.001 ซึ่งจากค่าความสัมพันธ์ แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า NDBI เพิ่มขึ้น ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินจะเพิ่มขึ้นด้วย ขณะที่เมื่อค่า NDBI ลดลง ค่าอุณหภูมิ LST ก็ลดลงตามเช่นกัน ทั้งนี้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $r = 0.729$ แสดงให้เห็นว่า NDBI และ LST มีความสัมพันธ์ที่ค่อนข้างสูง ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า ความหนาแน่นของพื้นที่สิ่งปลูกสร้างและพื้นที่ดินเปิดโล่ง (NDBI) สัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพื้นผิว (LST) อย่างเห็นได้ชัด ขณะที่ความแปรปรวนส่วนที่เหลือ อาจเกิดจากอิทธิพลของปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมและลักษณะทางกายภาพของเมืองในด้านอื่น ๆ เช่น คุณสมบัติการดูดซับความร้อนของวัสดุพื้นผิวและสิ่งปกคลุมดิน เป็นต้น

5. การวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis)

สมมติฐาน ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) (X_1) และค่าดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) (X_2) สามารถทำนายค่าอุณหภูมิพื้นผิว (LST) (y) ในพื้นที่

สามารถเขียนเป็นสมมติฐานทางสถิติ ได้แก่

H_0 : ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) และค่าดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) ไม่สามารถทำนายค่าอุณหภูมิพื้นผิว (LST) ได้

H_1 : ค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) และค่าดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) สามารถทำนายค่าอุณหภูมิพื้นผิว (LST) ได้

สถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐาน คือ การวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) โดยเลือกตัวแปรอิสระเข้าสมการการถดถอยด้วยเทคนิค Stepwise เนื่องจากมีตัวแปรอิสระ 2 ตัว ได้แก่ NDVI และ NDBI ซึ่งอาจมีอิทธิพลต่อค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินแตกต่างกัน เทคนิคดังกล่าวช่วยคัดเลือกตัวแปรที่เหมาะสมเข้าสู่สมการเพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถอธิบายค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยใช้ระดับความเชื่อมั่น 99% ดังนั้นจะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) ก็ต่อเมื่อ Sig. มีค่าน้อยกว่า 0.01 ซึ่งผลการทดสอบแสดงในตาราง 4

ตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ของค่าเฉลี่ยดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) ดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) และอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST)

แบบจำลองทางสถิติ	Sum of Squares (SS)	df	Mean Square (MS)	F	Sig.
Regression	1,992.220	2	996.110	680.301	<.001 ^b
Residual	1,459.826	997	1.464		
Total	3,452.046	999			

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

จากตารางที่ 4 แสดงการวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression Analysis) ของค่าเฉลี่ยดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) ดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) และอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) โดยใช้ข้อมูลจำนวน 1,000 จุดตัวอย่าง พบว่า แบบจำลองมีความเหมาะสมทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 โดยมีค่า $F = 680.301$ และค่า $\text{Sig.} < .001$ แสดงให้เห็นว่าตัวแปรอิสระทั้งสองสามารถร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของ LST ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า Regression Sum of Squares (SS) เท่ากับ 1,992.220 จาก Total Sum of Squares เท่ากับ 3,452.046 และมีค่า Residual Sum of Squares เท่ากับ 1,459.826 แสดงให้เห็นว่า แบบจำลองสามารถอธิบายความแปรปรวนของอุณหภูมิพื้นผิวดินได้ในสัดส่วนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับความแปรปรวนรวมทั้งหมด อีกทั้งค่า Mean Square ของ Regression เท่ากับ 996.110 และ Mean Square ของ Residual เท่ากับ 1.464 เป็นฐานในการคำนวณค่าสถิติ F และยืนยันถึงความมีนัยสำคัญของแบบจำลองในภาพรวม โดยสมการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณสามารถเขียนได้ในรูป $LST = \beta_0 + \beta_1 (NDVI) + \beta_2 (NDBI)$ ซึ่งสะท้อนความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างพื้นที่พืชพรรณและสิ่งปลูกสร้างกับอุณหภูมิพื้นผิวดิน สำหรับการวิเคราะห์เชิงลึกในด้านทิศทางและขนาดอิทธิพลของตัวแปรอิสระแต่ละตัว ตลอดจนระดับนัยสำคัญทางสถิติ สามารถพิจารณาเพิ่มเติมได้จากผลค่าสัมประสิทธิ์ถดถอยดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณ ด้วยเทคนิค Stepwise Multiple Regression Analysis ของค่าเฉลี่ยดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI), ดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) และ อุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST)

ตัวแปร	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
	B	Std. Error			
ค่าคงที่ (Constant)	25.829	0.121		213.498	<0.001
ค่าดัชนีผลต่างพืชพรรณ (NDVI) (X_1)	5.937	0.574	0.239	10.335	<0.001
ค่าดัชนีผลต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) (X_2)	17.472	0.482	0.838	36.241	<0.001
$R = 0.609$, $R^2 = 0.577$, Adjusted $R^2 = 0.576$, Std. Error of the Estimate = 1.2100492					

* มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01

จากตารางที่ 5 แสดงผลการวิเคราะห์ความถดถอยพหุคูณ ด้วยเทคนิค Stepwise Multiple Regression Analysis ของค่าเฉลี่ยดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) ดัชนีความแตกต่างสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) และอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) พบว่า ตัวแปรอิสระทั้งสองคือ NDVI (X_1) และ NDBI (X_2) มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า LST อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 ($\text{Sig.} < .001$) โดยตัวแปรทั้งสอง สามารถร่วมกันทำนาย ค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (y) ได้ร้อยละ 57.60 (Adjusted $R^2 = 0.576$) ซึ่งผู้วิจัยได้นำค่าสัมประสิทธิ์มาเขียนเป็นสมการทำนาย ค่าอุณหภูมิพื้นผิว (y) ดังนี้

$$y = 25.829 + 5.937 X_1 + 17.472 X_2$$

โดยค่าคงที่ของสมการเท่ากับ 25.829 ($t = 213.498$, $p < .001$) แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า NDVI และ NDBI

มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่า LST จะมีค่าเฉลี่ย 25.829 °C สำหรับตัวแปร NDVI (X_1) มีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (B) เท่ากับ 5.937 ($t = 10.335$, $p < .001$) และค่า Beta เท่ากับ 0.239 สะท้อนว่า NDVI มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ LST ในระดับปานกลาง ขณะที่ NDBI (X_2) มีค่าสัมประสิทธิ์ถดถอย (B) เท่ากับ 17.472 ($t = 36.241$, $p < .001$) และค่า Beta เท่ากับ 0.838 แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลเชิงบวกในระดับสูงและมีความสำคัญมากกว่า NDVI อย่างชัดเจน ทั้งนี้ แบบจำลองมีค่า R เท่ากับ 0.609 ค่า R^2 เท่ากับ 0.577 และค่า Adjusted R^2 เท่ากับ 0.576 แสดงว่าตัวแปรอิสระทั้งสองสามารถร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของค่า LST ได้ร้อยละ 57.60 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับค่อนข้างสูง และมีค่า Standard Error of the Estimate เท่ากับ 1.210 สะท้อนถึงความคลาดเคลื่อนของการพยากรณ์ที่ อยู่ในระดับยอมรับได้ในเชิงสถิติและเชิงการวิเคราะห์พื้นที่เมืองขอนแก่นในช่วงเวลาศึกษา

การสรุปผลและอภิปรายผล

ผลการศึกษาลักษณะอุณหภูมิพื้นผิวดิน (Land Surface Temperature: LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น โดยใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat-8 และ Landsat-9 (OLI/TIRS) ในช่วงฤดูร้อน (เดือนกุมภาพันธ์ถึงพฤษภาคม) ของปี พ.ศ. 2567 พบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 21.11-32.41 °C ส่วนวันที่มีอุณหภูมิร้อนที่สุดคือวันที่ 27 เมษายน พ.ศ. 2567 อุณหภูมิอยู่ระหว่าง 29.35-45.43 °C อุณหภูมิที่สูงที่สุดจะอยู่ทางด้านทิศตะวันตกของเมืองและส่วนศูนย์กลางเมืองขอนแก่น ซึ่งพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่ที่ดินเปิดโล่ง และพื้นที่สิ่งปลูกสร้างหนาแน่น ตามลำดับ ลักษณะการกระจายตัวของอุณหภูมิดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึงอิทธิพลของรูปแบบการใช้ประโยชน์ที่ดินและโครงสร้างเชิงพื้นที่ของเมืองขอนแก่น โดยบริเวณศูนย์กลางเมืองซึ่งเป็นพื้นที่เศรษฐกิจ การค้า การบริการ และการคมนาคม มีการกระจุกตัวของอาคาร ถนน และโครงสร้างพื้นฐานจำนวนมาก ซึ่งเป็นบริเวณที่มีค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินในระดับสูงเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่โดยรอบ ขณะที่พื้นที่ด้านทิศตะวันตกของเมืองซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมการเพาะปลูกและพื้นที่เปิดหน้าดินเพื่อรองรับการพัฒนาเมือง มีการปกคลุมของพืชพรรณค่อนข้างน้อย มีค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินในระดับสูงใกล้เคียงกับพื้นที่สิ่งปลูกสร้างหนาแน่นจากลักษณะความร้อนที่สัมพันธ์กับพื้นที่ดังกล่าว สะท้อนให้เห็นว่า ลักษณะพื้นดินเปิดโล่งมีผลกับค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกับพื้นที่สิ่งปลูกสร้างหนาแน่น ซึ่งผลลัพธ์ค่อนข้างต่างจากการศึกษาค่าความร้อนในพื้นที่กรุงเทพมหานคร งานวิจัย Khamchiangta & Dhakal (2019) ศึกษาปัจจัยที่ขับเคลื่อนปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร โดยผลการศึกษาในกรุงเทพมหานคร พบว่า พื้นที่สิ่งปลูกสร้างหนาแน่นบางประเภท เช่น พื้นที่อาคารเตี้ยและอาคารสูงขนาดกลางที่มีความหนาแน่นมาก มีค่าความร้อนใกล้เคียงกับค่าความร้อนในพื้นที่ดินเปิดโล่ง ขณะที่พื้นที่สิ่งปลูกสร้างบางประเภท เช่น อาคารขนาดใหญ่และอาคารประเภทอุตสาหกรรม มีค่าความร้อนที่สูงกว่าพื้นที่ดินเปิดโล่ง อยู่ประมาณ 1-2 °C ทั้งนี้ในการศึกษาในพื้นที่เมืองขอนแก่น หากมีการศึกษาโดยแบ่งประเภทของสิ่งปลูกสร้างให้ละเอียดมากขึ้น จะสามารถวิเคราะห์และอภิปรายผลได้ละเอียดมากยิ่งขึ้น

ส่วนลักษณะค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) ของพื้นที่เมืองขอนแก่น ในช่วงเวลาเดียวกัน พบว่าค่าเฉลี่ยของดัชนี NDVI ต่ำสุดอยู่ที่ -0.19 ค่าสูงสุดอยู่ที่ 0.50 พื้นที่ที่มีค่า NDVI ต่ำมาก (ค่าใกล้ศูนย์) กระจุกตัวในเขตเมืองชั้นในและบริเวณสิ่งปลูกสร้างหนาแน่น รวมถึงพื้นที่โครงสร้างพื้นฐาน เช่น พื้นที่คอนกรีต และถนน ส่วนค่าติดลบ คือพื้นที่แหล่งน้ำและบึงต่าง ๆ ภายในเมือง ส่วนพื้นที่ที่มีสีเขียวเข้มจะอยู่ทางด้านทิศตะวันออกและบางพื้นที่ทางด้านทิศตะวันตกเฉียงเหนือ ซึ่งเป็นพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่

มหาวิทยาลัยขอนแก่น ตามลำดับ สะท้อนให้เห็นว่าแม้เมืองขอนแก่นจะมีการขยายตัวของเมืองอย่างต่อเนื่อง แต่ยังคงมีพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่สีเขียวขนาดใหญ่แทรกตัวอยู่ภายในและโดยรอบเขตเมือง โดยเฉพาะพื้นที่เกษตรกรรมทางด้านทิศตะวันออกที่มีการปกคลุมของพืชพรรณในระดับสูง และพื้นที่มหาวิทยาลัยขอนแก่นซึ่งมีความหนาแน่นของเรือนยอดไม้สูง ทำหน้าที่เป็นพื้นที่สีเขียวสำคัญของเมือง ซึ่งจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น โดยใช้สถิติค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สันจากจุดตัวอย่างทั้งหมด 1,000 จุด พบว่า NDVI มีความสัมพันธ์เชิงลบกับ LST อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $r = -0.142$ แสดงให้เห็นว่า NDVI และ LST มีความสัมพันธ์กันในทิศทางตรงกันข้าม คือ เมื่อค่า NDVI ต่ำ ค่าอุณหภูมิ LST จะเพิ่มขึ้น ทั้งนี้ค่าความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรอยู่ในระดับต่ำ เพียง 0.142 เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม ผลดังกล่าวสะท้อนบทบาทของพื้นที่สีเขียว ในการลดการสะสมความร้อนผ่านกระบวนการให้ร่มเงาและการคายระเหยน้ำ (evapotranspiration) ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Oke (1982) และ Voogt and Oke (2003) ที่อธิบายว่าพื้นที่พืชพรรณมีส่วนช่วยควบคุมสมดุลพลังงานพื้นผิว นอกจากนี้ ผลการศึกษายังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Khamchiangta & Dhakal (2019) ที่พบความสัมพันธ์เชิงลบอย่างมีนัยสำคัญระหว่าง NDVI และ LST ในกรุงเทพมหานคร รวมถึงงานของ ธัญญรัตน์ ไชยคราม และคณะ (2566) ในจังหวัดปทุมธานี ที่รายงานผลในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือ พื้นที่ที่มีค่า NDVI สูงมีแนวโน้มแสดงค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินต่ำ

ลักษณะค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (Normalized Difference Built-up Index: NDBI) ของพื้นที่เมืองขอนแก่น พบว่าค่าเฉลี่ยอยู่ระหว่าง -0.34 ถึง 0.27 โดยพื้นที่ที่มีค่า NDBI ติดลบ กระจายตัวอยู่บริเวณรอบนอกเขตเมือง โดยเฉพาะด้านทิศตะวันออก ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่เกษตรกรรม และบางพื้นที่ในเขตเมืองที่เป็นพื้นที่แหล่งน้ำและบึงต่าง ๆ ในเมือง ขณะที่พื้นที่ที่มีค่า NDBI สูง พบการกระจุกตัวในบริเวณศูนย์กลางเมือง แนวโครงข่ายคมนาคม และพื้นที่พัฒนาเมืองที่มีความหนาแน่นของอาคารและโครงสร้างพื้นฐานสูง รวมถึงพื้นที่โล่งขนาดใหญ่ (พื้นที่โล่งเปิดหน้าดินทางด้านทิศตะวันตกของเมือง) ลักษณะดังกล่าวสอดคล้องกับบทบาทของเมืองขอนแก่นในฐานะศูนย์กลางด้านเศรษฐกิจ การศึกษา การแพทย์ และการคมนาคมของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ซึ่งสอดคล้องกับการกระจายตัวของพื้นที่พาณิชยกรรม พื้นที่อยู่อาศัย และโครงสร้างพื้นฐานที่ปรากฏในพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ พื้นที่เปิดหน้าดินทางด้านทิศตะวันตกของเมืองซึ่งส่วนใหญ่เป็นพื้นที่รอการพัฒนา ยังปรากฏค่า NDBI ในระดับสูง เนื่องจากลักษณะพื้นผิวดินเปลือย ลักษณะดินแห้งและไม่อุ้มน้ำ มีคุณสมบัติการสะท้อนคลื่นอินฟราเรดช่วงคลื่นสั้น (SWIR) สูงใกล้เคียงกับพื้นที่สิ่งปลูกสร้าง ส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวแสดงค่า NDBI สูง จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในพื้นที่เมืองขอนแก่น พบว่า NDBI มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ LST อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ $r = 0.729$ แสดงให้เห็นว่า NDBI และ LST มีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่อค่า NDBI สูง ค่าอุณหภูมิ LST จะสูงขึ้นด้วย ทั้งนี้ค่าความสัมพันธ์ของทั้งสองตัวแปรอยู่ในระดับที่ค่อนข้างสูง นั่นคือ 0.729 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของพื้นที่สิ่งปลูกสร้างและพื้นที่ดินเปิดโล่ง (NDBI) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับ LST ในระดับค่อนข้างสูง อันเนื่องมาจากคุณสมบัติของวัสดุไม่ซึมน้ำ เช่น คอนกรีตและแอสฟัลต์ ที่มีความสามารถในการดูดซับและกักเก็บพลังงานความร้อนสูง ส่งผลให้เกิดการสะสมและคายความร้อนอย่างช้า รวมถึงพื้นที่เปิดหน้าดินโล่งที่มีลักษณะดินแห้งและไม่อุ้มน้ำ ก็มีความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวเช่นกัน

ผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณระหว่างค่าดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) และค่าดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) พบว่า ตัวแปรทั้งสองสามารถร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของอุณหภูมิพื้นผิวได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.01$) สะท้อนให้เห็นว่าโครงสร้างการใช้ประโยชน์ที่ดินและองค์ประกอบทางกายภาพของเมืองมีบทบาทโดยตรง ต่อระดับความรุนแรงของภาวะความร้อนในพื้นที่ศึกษา โดยเฉพาะพื้นที่ศูนย์กลางธุรกิจและการค้า พื้นที่คมนาคม พื้นที่พัฒนาเมืองที่มีความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างสูง และพื้นที่เปิดโล่ง ซึ่งพบการสะสมความร้อนมากกว่าพื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่แหล่งน้ำ และพื้นที่สีเขียวขนาดใหญ่ ซึ่งผู้วิจัยได้นำค่าสัมประสิทธิ์มาเขียนเป็นสมการทำนาย ค่าอุณหภูมิพื้นผิว (y) ดังนี้

$$y = 25.829 + 5.937 X_1 + 17.472 X_2$$

โดยค่าคงที่ของสมการเท่ากับ 25.829 ($t = 213.498$, $p < .001$) แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า $NDVI_{(x1)}$ และ $NDBI_{(x2)}$ มีค่าเท่ากับศูนย์ ค่า LST จะมีค่าเฉลี่ย 25.829 °C ตัวแปรอิสระทั้งสองสามารถร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของค่า LST ได้ร้อยละ 57.60 ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับค่อนข้างสูง

จากผลการศึกษาดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิดสมดุลพลังงานเมืองของ Oke (1982) ที่อธิบายว่าพื้นผิวเมืองที่ไม่ซึมน้ำ เช่น พื้นคอนกรีต หรือพื้นที่อาคารต่าง ๆ สามารถดูดซับและกักเก็บพลังงานความร้อนได้สูง รวมทั้งสอดคล้องกับงานของ Voogt and Oke (2003), Weng et al. (2004) และ Zha et al. (2003) ที่กล่าวว่า ค่า NDVI ที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าอุณหภูมิ LST ลดลง ดังนั้นการรักษาสมดุลระหว่างพื้นที่สิ่งปลูกสร้างและพื้นที่สีเขียว โดยการเพิ่มพื้นที่สีเขียวควบคู่กับการควบคุมความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้าง จึงเป็นกลไกสำคัญในการบรรเทาปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมืองในบริบทของเมืองที่มีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว เช่น เมืองขอนแก่น เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวควรพิจารณาภายใต้ข้อจำกัดของแบบจำลองเชิงเส้น เนื่องจากแบบจำลองถดถอยพหุคูณที่ใช้ในการศึกษานี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่าความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ขณะที่ความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) และอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) ในบางช่วงค่าอาจไม่ได้เป็นเส้นตรงทั้งหมด โดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีลักษณะพืชพรรณแตกต่างกัน เช่น พื้นที่ไม้ยืนต้น พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่หญ้า หรือพื้นที่โล่งที่มีพืชปกคลุมบางส่วน ซึ่งแต่ละประเภทอาจมีความสามารถในการลดอุณหภูมิพื้นผิวดินแตกต่างกัน

แม้ว่าผลการวิเคราะห์ Pearson's correlation จะแสดงให้เห็นว่า NDVI มีความสัมพันธ์เชิงลบกับ LST กล่าวคือ พื้นที่ที่มีค่าดัชนีพืชพรรณสูงมีแนวโน้มที่จะมีอุณหภูมิพื้นผิวดินต่ำ แต่ผลการวิเคราะห์ Multiple Regression ที่พบว่า NDVI มีค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยเป็นบวกไม่ได้หมายความว่า NDVI เป็นปัจจัยที่ส่งผลให้อุณหภูมิพื้นผิวดินเพิ่มสูงขึ้นโดยตรง หากแต่สะท้อนอิทธิพลของ NDVI ต่อ LST ภายใต้เงื่อนไขที่ได้ควบคุมอิทธิพลของตัวแปรอื่นในแบบจำลอง โดยเฉพาะดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับทั้ง NDVI และ LST จึงอาจทำให้ทิศทางของสัมประสิทธิ์การถดถอยแตกต่างจากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์แบบคู่ตัวแปร (Hair Jr et al., 2019)

ในบริบทของพื้นที่เมืองขอนแก่น ผลดังกล่าวยังอาจสัมพันธ์กับลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ โดยเฉพาะพื้นที่โล่งว่าง พื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่รอบนอกเมืองทางทิศตะวันตกมีลักษณะดินร่วนปนทราย หน้าดินตื้น และมักมีชั้นดานหรือชั้นหินอยู่ตื้น ซึ่งเป็นดินที่น้ำสามารถซึมผ่านลงสู่ชั้นดินได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ดินมีความสามารถในการกักเก็บความชื้นต่ำและแห้งเร็ว เมื่อความชื้นบริเวณผิวดินลดลง พลังงานจากรังสีดวงอาทิตย์จึงมีแนวโน้ม

ถูกเปลี่ยนเป็นความร้อนสัมผัสบนพื้นผิว มากกว่าถูกใช้ไปในกระบวนการระเหยน้ำจากดินและการคายน้ำของพืช ส่งผลให้พื้นที่ดังกล่าวยังคงมีค่าอุณหภูมิพื้นผิวดินในระดับสูง

ทั้งนี้แนวทางการบรรเทาภาวะความร้อนในเมืองขอนแก่น ควรให้ความสำคัญกับการจัดการโครงสร้างการใช้ประโยชน์ที่ดินควบคู่กับการออกแบบองค์ประกอบทางกายภาพของเมือง โดยการส่งเสริมพื้นที่ที่มีค่า NDVI สูงขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การขยายพื้นที่สีเขียวในรูปแบบสวนสาธารณะ พื้นที่สีเขียวระดับชุมชน แนวต้นไม้ริมถนนตามถนนหลักของเมือง เช่น ถนนมิตรภาพ ถนนหน้าเมือง ถนนกลางเมือง และถนนหลังเมือง รวมถึงการประยุกต์ใช้หลังคาเขียว (green roof) และผนังเขียว (green wall) ในส่วนอาคารสาธารณะขนาดใหญ่ เช่นอาคารผู้โดยสารในสนามบินนานาชาติขอนแก่น อาคารผู้โดยสารของสถานีรถไฟ อาคารผู้โดยสารของสถานีขนส่งผู้โดยสารแห่งที่ 3 อาคารสำนักงานและอาคารพาณิชย์บริเวณกลางเมือง เป็นต้น ซึ่งการประยุกต์ใช้อาคารเขียวเหล่านี้สามารถช่วยลดอุณหภูมิพื้นผิวของวัสดุผ่านกลไกการให้ร่มเงาและการระเหยของน้ำจากพืชเหล่านั้น ซึ่งมีบทบาทต่อการปรับลดอุณหภูมิและถ่ายเทความร้อนในบริเวณพื้นที่เมืองได้ (Bowler et al., 2010; Oke, 1982) ทั้งนี้ การพัฒนาสวนสาธารณะและพื้นที่สีเขียวระดับชุมชนควรมุ่งเน้นในพื้นที่พาณิชยกรรมและพื้นที่อยู่อาศัยหนาแน่นที่มีพื้นที่สีเขียวจำกัด ควรส่งเสริมให้มีการเพิ่มพื้นที่สีเขียวบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ห้างสรรพสินค้าขนาดใหญ่ในเมือง เช่น ห้างสรรพสินค้าเซ็นทรัลบริเวณศูนย์กลางเมือง เป็นต้น (Akbari et al., 2001; Bowler et al., 2010) ขณะเดียวกัน พื้นที่ที่มีค่า NDBI สูง ยกตัวอย่างเช่น พื้นที่ที่มีสิ่งปลูกสร้างหนาแน่นบริเวณศูนย์กลางเมือง ควรให้ความสำคัญกับการจัดการพื้นที่เปิดโล่ง (open space) เช่น พื้นที่เปิดโล่งดังกล่าวไม่ควรเป็นเพียงพื้นที่คอนกรีตขนาดใหญ่ ควรส่งเสริมให้มีการเปลี่ยนวัสดุเหล่านั้นเป็นวัสดุที่น้ำสามารถซึมผ่านได้ (permeable pavement) หรือวัสดุที่มีค่าการสะท้อนรังสีสูง (high albedo materials) เพื่อลดการดูดซับและกักเก็บความร้อนของพื้นผิว (Santamouris, 2014; Voogt & Oke, 2003) โดยเฉพาะในพื้นที่ลานกิจกรรมสาธารณะ ลานจอดรถ และพื้นที่โดยรอบอาคารขนาดใหญ่ ซึ่งมักมีพื้นผิวดาดแข็งในสัดส่วนสูงและมีศักยภาพในการสะสมความร้อนสูงด้วย นอกจากนี้พื้นที่ที่มีค่า NDBI สูง ยังได้แก่พื้นที่เปิดหน้าดินโล่ง โดยเฉพาะพื้นที่ทางการเกษตรบางส่วนที่อยู่ในกลุ่มชุดดิน 40B และ 40C ซึ่งมีลักษณะเป็นดินร่วนปนทราย หน้าดินค่อนข้างตื้น พบชั้นดานหรือชั้นหินในระดับตื้น และมีความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำ พื้นที่ดังกล่าวควรมีการส่งเสริมการฟื้นฟูคุณสมบัติของดินควบคู่กับการเพิ่มพืชปกคลุมดิน โดยการเพิ่มอินทรีย์วัตถุ การคลุมดินเพื่อรักษาความชื้น และการปลูกพืชคลุมดินหรือไม้ยืนต้นท้องถิ่นที่ทนต่อสภาพแห้งแล้ง เช่น หญ้าแฝก มะขาม สะเดา ประดู่ และราชพฤกษ์ เพื่อเพิ่มความชื้นของพื้นผิว ส่งเสริมกระบวนการคายน้ำของพืช และลดการสะสมความร้อนของพื้นผิวดิน (Bowler et al., 2010; Oke, 1982; Voogt & Oke, 2003; Weng et al., 2004)

เมื่อพิจารณาในระดับการจัดทำผังเมืองรวมของพื้นที่เมืองขอนแก่น การส่งเสริมการเพิ่มพื้นที่สีเขียวและการลดความหนาแน่นของสิ่งปลูกสร้างในพื้นที่ศูนย์กลางเมือง สามารถเชื่อมโยงกับนโยบายและกลยุทธ์ทางด้านผังเมืองได้ เช่น การควบคุมความหนาแน่นอาคารในพื้นที่บริเวณศูนย์กลางเมืองด้วยการกำหนดค่า Floor Area Ratio (FAR) การกำหนดให้พื้นที่อาคารปกคลุมดินน้อยลงและเพิ่มพื้นที่โล่งโดยรอบอาคารให้มากขึ้นด้วยการกำหนดค่า Building Coverage Ratio (BCR) ให้น้อยลง รวมถึงการเพิ่มพื้นที่เปิดโล่งและส่งเสริมการระบายอากาศภายในเมืองด้วยการกำหนดสัดส่วนพื้นที่ว่างด้วยค่า Open Space Ratio (OSR) ตลอดจนการส่งเสริมพื้นที่สีเขียวและพื้นที่ที่มีคุณค่าทางนิเวศผ่านการกำหนดค่า Biotope Area Factor (BAF) เพื่อเพิ่มพื้นที่พืชพรรณและพื้นที่ซึมผ่านน้ำ ขณะเดียวกัน

ควรมีการควบคุมสัดส่วนพื้นผิวที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ เช่น พื้นที่คอนกรีตขนาดใหญ่ เป็นต้น ด้วยการกำหนดค่า Impervious Surface Ratio (ISR) เพื่อลดพื้นที่ลาดแข็งซึ่งเป็นแหล่งสะสมความร้อนในเขตเมือง มาตรการดังกล่าวจะช่วยลดการสะสมความร้อนของพื้นผิวเมือง เพิ่มประสิทธิภาพพื้นผิวให้น้ำซึมผ่านได้และระบายความร้อนได้ดี ทั้งนี้ การสนับสนุนการสร้างสภาพแวดล้อมเมืองที่เหมาะสมต่อการอยู่อาศัย จะสามารถนำไปสู่การพัฒนาเมืองขอนแก่นที่มีความยั่งยืนและรองรับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศได้ดียิ่งขึ้น

นอกจากนี้ควรส่งเสริมด้วยมาตรการทางกฎหมาย เช่น มาตรการทางภาษี การลดหย่อนค่าธรรมเนียม หรือ สิทธิประโยชน์ด้านการพัฒนาพื้นที่สีเขียวในโครงการขนาดใหญ่ เช่น โครงการห้างสรรพสินค้า โครงการอสังหาริมทรัพย์ อาคารอุตสาหกรรม ศูนย์กระจายสินค้า อาคารสำนักงานขนาดใหญ่ และโครงการพัฒนาแบบผสมผสาน (Mixed-use Development) เป็นต้น เพื่อจูงใจให้ภาคเอกชนมีส่วนร่วมในการเพิ่มพื้นที่สีเขียว พื้นที่ซึมน้ำ และลดพื้นผิวลาดแข็งในพื้นที่ที่มีค่า LST สูง ดังนั้น การบูรณาการมาตรการด้านพื้นที่สีเขียว การออกแบบพื้นที่เปิดโล่ง การกำกับรูปแบบการพัฒนาเมือง และการใช้เครื่องมือทางผังเมืองร่วมกับมาตรการทางกฎหมาย จึงเป็นแนวทางสำคัญในการบรรเทาปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมืองในบริบทของพื้นที่เมืองขอนแก่น (พระราชบัญญัติการผังเมือง พ.ศ. 2562; พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522; Bowler et al., 2010; Oke, 1982; Santamouris, 2014; Voogt & Oke, 2003)

ข้อเสนอแนะ

การศึกษาในครั้งนี้ใช้การประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ในการคำนวณดัชนีความแตกต่างของพืชพรรณ (NDVI) และดัชนีความแตกต่างของสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์กับค่าอุณหภูมิพื้นผิวดิน (LST) และปรากฏการณ์เกาะความร้อนเมืองในเขตเมืองขอนแก่นได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อย่างไรก็ตามเพื่อให้ผลการวิเคราะห์มีความครอบคลุมและชัดเจนมากยิ่งขึ้น การศึกษาครั้งต่อไปควรขยายขอบเขตพื้นที่ศึกษาให้ครอบคลุมในระดับอำเภอหรือจังหวัด รวมทั้งดำเนินการเก็บข้อมูลในหลายช่วงฤดูกาลตลอดทั้งปี เพื่อสะท้อนความแปรผันเชิงพื้นที่และเชิงเวลาได้อย่างครบถ้วน นอกจากนี้ ควรบูรณาการข้อมูลอุณหภูมิในชั้นบรรยากาศ (Air Temperature) ร่วมกับปัจจัยเชิงกายภาพสามมิติของเมือง เช่น ความสูงและความหนาแน่นอาคาร ลักษณะการจัดวางอาคาร โครงสร้างโครงข่ายถนน และข้อมูลด้านประชากรหรือกิจกรรมทางเศรษฐกิจและสังคม รวมถึงพิจารณาการประยุกต์ใช้เทคนิคขั้นสูง เช่น Local Climate Zone (LCZ) classification, Geographically Weighted Regression (GWR) หรือแบบจำลอง Machine Learning เพื่อพัฒนาแบบจำลองที่สามารถอธิบายพลวัตเกาะความร้อนเมืองในมิติเชิงพื้นที่ได้แม่นยำยิ่งขึ้น ทั้งนี้ ผลการศึกษาสามารถใช้เป็นฐานข้อมูล เพื่อสนับสนุนการกำหนดแนวทางด้านการวางผังเมือง และการจัดการพื้นที่เมืองให้สอดคล้องกับหลักการพัฒนาเมืองอย่างยั่งยืนและการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการวางแผนภาคและเมือง
มหาบัณฑิต สาขาการวางแผนภาคและเมือง บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น เรื่อง ลักษณะปรากฏการณ์
เกาะความร้อนเมืองและแนวทางในการบรรเทาความร้อนในเมือง กรณีศึกษา เมืองขอนแก่น

เอกสารอ้างอิง

- ธัญญรัตน์ ไชยคราม, สุพรรณิ ปลัดศรีช่วย, ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์, และ ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช. (2566). การติดตาม
รูปแบบปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมืองปทุมธานีด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียมหลายช่วงเวลา. *วารสาร
วิศวกรรมศาสตร์และนวัตกรรม*, 16(4), 88-99.
- สำนักบริหารการทะเบียน กรมการปกครอง. (2566). *สถิติประชากรและบ้าน ณ เดือนธันวาคม พ.ศ. 2566*. ระบบสถิติ
ทางการทะเบียน. <https://www.dopa.go.th>
- พระราชบัญญัติการผังเมือง พ.ศ. 2562. (29 พฤษภาคม 2562). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 136 ตอนที่ 71 ก หน้า 27-70.
- พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522. (14 พฤษภาคม 2522). *ราชกิจจานุเบกษา*. เล่ม 96 ฉบับพิเศษ ตอนที่ 80
หน้า 1-43.
- สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน). (2568). *ข้อมูลสถานีตรวจวัดอากาศรายวัน*. [https://tiwrm.hii.
or.th/v3/weather_daily/tmd](https://tiwrm.hii.or.th/v3/weather_daily/tmd)
- สำนักงานเศรษฐกิจการคลัง กระทรวงการคลัง. (2565). *ข้อมูลผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัด (Gross Provincial Product: GPP) ของประเทศไทย*. <https://www.fpo.go.th>
- สำนักงานสถิติแห่งชาติ. (2565). *สถิติผลิตภัณฑ์มวลรวมจังหวัดและข้อมูลเศรษฐกิจระดับจังหวัด*. [https://www.nso.
go.th](https://www.nso.go.th)
- Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and
improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-
092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature
Using LANDSAT 8 Satellite Data. *Journal of Sensors*, 2016(1), 1-8. [https://doi.org/10.1155/2016/
1480307](https://doi.org/10.1155/2016/1480307)
- Khallef, B. (2023). Use of remote sensing as an indicator of the urban heat island effect: The case of
the municipality of Guelma (north-east of Algeria). *Geomatics, Landmanagement and Landscape*,
2023(3), 61-72. <https://doi.org/10.15576/GLL/2023.3.61>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities:
A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147-155.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>

- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241-252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Hair Jr, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis* (8th ed.). Annabel Ainscow.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>
- Jensen, J. R. (2007). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Khallef, B., Biskri, Y., Mouchara, N., & Brahamia, K. (2020). Analysis of Urban Heat Islands Using Landsat 8 OLI/TIR Data: Case of the City of Guelma (Algeria). *Asian Journal of Environment & Ecology*, 12(4), 42-51. <https://doi.org/10.9734/AJEE/2020/v12i430167>
- Khamchiangta, D., & Dhakal, S. (2019). Physical and non-physical factors driving urban heat island: Case of Bangkok Metropolitan Administration, Thailand. *Journal of Environmental Management*, 248, 109285. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109285>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
- Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS*. In S. C. Freden, E. P. Mercanti, & M. A. Becker (Eds.), *Agriculture/Forestry/Range Resources*. Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium (pp. 309-317). National Aeronautics and Space Administration.
- Santamouris, M. (2014). Cooling the cities—A review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. *Solar Energy*, 103, 682-703. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.07.003>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA). (2008). *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics*. U.S. Environmental Protection Agency.
- U.S. Geological Survey. (n.d.). *Landsat Missions*. USGS - Science for a changing world. <https://www.usgs.gov/landsat-missions>
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370-384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)

- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). Estimation of land surface temperature–vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 89(4), 467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3), 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>