

การตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน และสิ่งปกคลุมดิน และปรากฏการณ์เกาะความร้อนของเมือง ในจังหวัดนครราชสีมา Investigation of Land Use and Land Cover Change and Urban Heat Island Phenomenon in Nakhon Ratchasima Province

เอนก ศรีสุวรรณ*

Anake Srisuwan*

โปรแกรมวิชาภูมิศาสตร์และภูมิสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา ประเทศไทย

Geography and Geoinformatics program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Ratchasima Rajabhat University, Thailand

Received : 16 September 2025, Received in revised form : 21 December 2025, Accepted : 24 December 2025

Available online : 7 January 2026

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์และที่มา : การขยายตัวของเมือง (Urbanization) ถือเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและสังคมที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อระบบนิเวศโลกในศตวรรษที่ 21 การเปลี่ยนแปลงพื้นผิวโลกจากพื้นที่ธรรมชาติที่ปกคลุมด้วยพืชพรรณไปสู่พื้นผิวที่น้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impervious Surfaces) เช่น คอนกรีตและยางมะตอย ส่งผลโดยตรงต่อสมดุลพลังงานของพื้นผิวโลก (Surface Energy Budget) การลดการระบายความร้อนแฝง (Latent Heat Flux) ผ่านการคายระเหยน้ำ และเพิ่มการสะสมความร้อนสัมผัส (Sensible Heat Flux) ทำให้เกิดปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมือง (Urban Heat Island : UHI) ซึ่งเป็นสถานะที่พื้นผิวเมืองมีอุณหภูมิสูงกว่าพื้นที่ชนบทโดยรอบอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลกระทบต่อเนื่องต่อการใช้พลังงาน สุขภาพของประชาชน และคุณภาพอากาศ จังหวัดนครราชสีมา ในฐานะศูนย์กลางทางเศรษฐกิจและการคมนาคมขนส่งที่สำคัญที่สุดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือได้เผชิญกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมืองอย่างรวดเร็วในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา อันเนื่องมาจากการลงทุนโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่และการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยในอดีตที่ศึกษาปรากฏการณ์เกาะความร้อนในพื้นที่นี้มักจำกัดอยู่เพียงการบรรยายเชิงพรรณนา หรือขาดการตรวจสอบความถูกต้องทางสถิติที่รัดกุมในการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างประเภทการใช้ที่ดิน อีกทั้งยังมักประสบปัญหาความคลาดเคลื่อนจากการใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ยังไม่ผ่านการปรับแก้ชั้นบรรยากาศที่ได้มาตรฐาน งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะเปิดช่องว่างทางองค์ความรู้ดังกล่าว โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ (1) วิเคราะห์รูปแบบและทิศทางการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินระหว่างปี ค.ศ. 2006 ถึง 2021 และ (2) ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวต่อความเข้มข้นและพลวัตของปรากฏการณ์เกาะความร้อน โดยประยุกต์ใช้ข้อมูลมาตรฐานระดับสูงและกระบวนการทางสถิติขั้นสูงเพื่อยืนยันผลการศึกษา

วิธีดำเนินการวิจัย : เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องแม่นยำของข้อมูล การศึกษานี้ใช้วิธีการวิเคราะห์แบบผสมผสาน (Hybrid Approach) สำหรับข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน ได้ใช้ฐานข้อมูลมาตรฐานปี ค.ศ. 2006 จากกรมพัฒนาที่ดินเป็นตัวแทนข้อมูลปีฐาน และทำการจำแนกข้อมูลปี ค.ศ. 2021 จากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 (บันทึกภาพเดือน

ภูมิภาพพื้นที่) ด้วยอัลกอริทึมความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Classification) โดยผลการจำแนกได้รับการตรวจสอบความถูกต้อง (Accuracy Assessment) ผ่านการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified Random Sampling) จำนวน 205 จุด ให้ค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) สูงถึงร้อยละ 95 และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa Coefficient) ที่ 0.90 สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลภูมิพื้นที่ (LST) ผู้วิจัยให้ความสำคัญสูงสุดกับการควบคุมคุณภาพข้อมูล จึงเลือกใช้ผลิตภัณฑ์มาตรฐาน USGS Collection 2 Level-2 Science Products (L2SP) จากดาวเทียม Landsat 5 (ภูมิภาพพื้นที่ 2007) และ Landsat 8 (ภูมิภาพพื้นที่ 2021) การเลือกใช้ข้อมูลในช่วงฤดูกาลเดียวกัน (ฤดูแล้ง/หนาว) และการใช้ข้อมูล LST ปี 2007 เป็นตัวแทนช่วงเวลาดำเนินการ ช่วยขจัดความคลาดเคลื่อนจากความแปรปรวนของฤดูกาล (Seasonal Variability) และการดูดซับรังสีของชั้นบรรยากาศ การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติระหว่าง LST และ LULC ดำเนินการโดยใช้การทดสอบ Welch's One-way ANOVA มีความเหมาะสมกับชุดข้อมูลที่มีความแปรปรวนไม่เท่ากัน (Heterogeneity of Variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ด้วยวิธี Games-Howell นอกจากนี้ ยังมีการประเมินความรุนแรงของการเปลี่ยนแปลงความร้อนเชิงพื้นที่ด้วยดัชนี Urban Heat Island Ratio Index (URI) และ Temperature Grade Change Index (TGCI)

ผลการวิจัย : การวิเคราะห์เมทริกซ์การเปลี่ยนแปลง (Transition Matrix) แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของเมืองที่ชัดเจน พบว่าในช่วงเวลา 15 ปี พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นสุทธิ 73.66 ตร.กม. คิดเป็นอัตราการเติบโตถึงร้อยละ 34.46 จากปีฐาน การขยายตัวนี้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพของพื้นที่เกษตรกรรม (55.32 ตร.กม.) และพื้นที่เบ็ดเตล็ด (23.35 ตร.กม.) เป็นหลัก ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้ลดลงร้อยละ 49.83 สะท้อนถึงแรงกดดันจากการพัฒนาเมืองต่อทรัพยากรธรรมชาติ ผลการวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลภูมิพื้นที่ในปี ค.ศ. 2021 แสดงให้เห็นข้อค้นพบที่สำคัญ คือ พื้นที่เมืองมีอุณหภูมิเฉลี่ย 28.4 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าพื้นที่ป่าไม้ (25.40 องศาเซลเซียส) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .001$) โดยมีผลต่างเฉลี่ยประมาณ 2.99 องศาเซลเซียส ข้อค้นพบนี้มีความแตกต่างอย่างสิ้นเชิงกับข้อมูลปี ค.ศ. 2007 ซึ่งไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างอุณหภูมิของเมืองและป่าไม้ บ่งชี้ว่าโครงสร้างเมืองในปัจจุบันมีความหนาแน่นและคุณสมบัติในการกักเก็บความร้อนเพิ่มสูงขึ้นจนเกิดเป็นเกาะความร้อนที่ชัดเจน แม้ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยภาพรวมของปี ค.ศ. 2021 จะลดลงเล็กน้อยเนื่องจากอิทธิพลของปรากฏการณ์ลานีญา (La Niña) แต่ดัชนี URI กลับชี้ให้เห็นการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างที่น่ากังวล โดยสัดส่วนพื้นที่ที่มีระดับอุณหภูมิ สูงมาก (High Temperature Grade) ได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 7.30 เป็น 7.39 ของพื้นที่ศึกษา นอกจากนี้ การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) ยืนยันว่าดัชนีสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญ และค่าสัมประสิทธิ์ความชัน (Slope) ในปี ค.ศ. 2021 บ่งชี้ว่าพื้นผิวเมืองมีความไวต่อการสะสมความร้อนเพิ่มขึ้น

สรุปผลการวิจัย : การขยายตัวของเมืองนครราชสีมาในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา ส่งผลให้ความเข้มข้นของปรากฏการณ์เกาะความร้อน (UHI Intensity) ทวีความรุนแรงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยเปลี่ยนผ่านจากสภาวะที่มีสมดุลความร้อนใกล้เคียงกับพื้นที่ธรรมชาติในอดีต มาสู่สภาวะที่เป็นเกาะความร้อนอย่างเต็มรูปแบบในปัจจุบัน ผลการพิสูจน์ทางสถิติยืนยันว่าลักษณะวิทยาของเมือง (Urban Morphology) เป็นปัจจัยหลักที่กำหนดอุณหภูมิพื้นผิว เหนือกว่าปัจจัยทางภูมิอากาศระดับภูมิภาคใน

เชิงพื้นที่ ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายจากการศึกษาเน้นย้ำถึงความจำเป็นเร่งด่วนในการบูรณาการพื้นที่สีเขียวและแหล่งน้ำเข้าสู่ผังเมืองรวม เนื่องจากผลการศึกษาชี้ชัดว่าดัชนี MNDWI และ NDVI มีความสัมพันธ์เชิงลบกับอุณหภูมิ ซึ่งแปลว่าการเพิ่มพื้นที่เหล่านี้เป็นมาตรการที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการบรรเทาผลกระทบจากเกาะความร้อนและสร้างเสริมความยืดหยุ่นทางภูมิอากาศให้กับเมืองในอนาคต

คำสำคัญ : อุณหภูมิพื้นผิว ; ปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมือง ; การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบเวกซ์ ; การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน ; จังหวัดนครราชสีมา

Abstract

Background and Objectives: Urbanization constitutes a significant physical and sociodemographic transformation of the 21st century, exerting considerable influence on global ecosystems and local microclimates. Human-induced alterations in the previously vegetated and permeable soil structure of natural landscapes, along with their transformation into concrete, asphalt, and decorative architectural developments, significantly affect the Surface Energy Budget (SEB). These alterations generate an artificial environment that disrupts the natural equilibrium of the Latent Heat Flux. Latent Heat Flux decreases exponentially because of insufficient evapotranspiration, concurrently leading to an increase in the storage and re-release of Sensible Heat Flux. The Urban Heat Island (UHI) Effect refers to the phenomenon where urban areas experience higher temperatures than their rural surroundings due to human activities and alterations in land cover. The Urban Heat Island (UHI) Effect refers to a temperature phenomenon where urbanized areas exhibit markedly elevated atmospheric and surface temperatures compared to nearby rural regions. The Urban Heat Island (UHI) Effect refers to a temperature phenomenon in which urbanized areas exhibit markedly elevated atmospheric and surface temperatures compared to nearby rural regions. The UHI Effect has significant implications, including increased energy demands for air conditioning, deterioration of air quality due to heightened ground-level ozone production, and substantial risks to human health and urban living conditions. Nakhon Ratchasima Province is strategically located as the Gateway of Isan, serving as the biggest economic, industrial, and transportation center of Northeastern Thailand. The province has undergone significant structural urbanization in the last two decades. The expansion has been driven by major infrastructure assets and an increase of industrial areas. The city is experiencing thermal challenges due to its expansion. The previous study on the UHI phenomenon in this domain has been mainly descriptive. Literature often exhibits insufficient statistical validation to quantify temperature variations among various Land Use and Land Cover (LULC) types and is frequently hindered by methodological limitations concerning satellite image data calibration. Addressing these significant studies problems. This study aims to: (1) analyze the spatiotemporal changes in land

use and land cover (LULC) from 2006 to 2021 and (2) assess the impact on structural changes in urban heat island (UHI) intensity and dynamics, by using high-quality radiometric data and robust statistical methods to verify the accuracy and reliability of the results.

Methodology: This study employed a Hybrid Classification method for the analysis of Land Use and Land Cover (LULC) for optimal accuracy of data and consistency. The 2006 LULC database published by the Land Development Department (LDD) was used as the baseline for this study. In 2021, LULC classification occurred by using multispectral imagery from the Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) sensor that was acquired during the dry season in February to avoid cloud influence and variations in the season. The classification process used the Maximum Likelihood Classification (MLC) algorithm, that is a parametric supervised learning method based on the assumption of a normal distribution of image pixels within each training class. The classification accuracy was assessed through Stratified Random Sampling involving 205 reference points, results in an Overall Accuracy of 95% and a Kappa Coefficient of 0.90, which refers to an excellent level of agreement between the LULC classified map and in-situ data. The temperature evaluation focused on capturing Land Surface Temperature (LST) and identified data quality through the selection of USGS Collection 2 Level-2 Science Products (L2SP). The measurements of temperatures have been acquired from Landsat 5 Thematic Mapper (TM) for February 2007 and from Landsat 8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) for February 2021. A selection was taken to apply data from the same temporal season (dry/cool season), and the selection of 2007 LST as a baseline estimate effectively reduced discrepancies associated with seasonal variability and atmospheric absorption. This study uses advanced statistical methods to evaluate the relationship between LST and various LULC types, expanding higher than simple descriptive statistics. Welch's One-way ANOVA was used to improve its resistance against violations of homogeneity of variance assumptions, which are often present in environmental datasets. Post-hoc pairwise comparisons were performed utilizing the Games-Howell method. The spatial impact of heat island variation has been evaluated by using the Urban Heat Island Ratio Index (URI) and the Temperature Grade Change Index (TGCI) to show and quantify heat island expansion.

Main Results: The Transition Matrix analysis showed that the city's urban morphology changed a lot in terms of structure throughout the 15 years of research. Urban and built-up areas grew by a net of 73.66 square kilometers, which is a huge growth rate of 34.46% compared to the baseline. This urban and built-up area expansion primarily occurred on agricultural land (55.32 sq. km.) while other of LULC (23.35 sq. km.). Additionally, the analysis found that forest land decreased by 49.83%, which shows how significantly people are placing stress on natural resources and their buffers. Statistical analysis of the 2021 LST data found important proof of the UHI effect. The average

surface temperature in urban and built-up areas was 28.4°C, which was significantly greater than the average surface temperature in forests land (25.40°C), with a statistical significance of $p < .001$. The average temperature difference of about 2.99°C shows how urbanization impacts the temperature. The result is distinct from the baseline LULC data from 2007, that showed a lack of statistical significance between urban and built-up areas and forest area temperatures. This indicates that the city has changed from a temperature balanced condition to a distinct island. In 2021, the mean temperature in the area decreased into slightly because of the La Niña phenomenon, which decreases the region. However, the location inside thermal structure became more severe. The URI analysis showed that the number of regions classified as "High Temperature Grade" increased from 7.30% to 7.39% of the whole area studied. This indicates that the increase due to urbanization is strong enough to cause local cooling patterns in the surrounding environment. The Linear Regression study also showed a strong positive relation between the Normalized Difference Built-up Index (NDBI) and LST. The coefficient of slope increasing higher in 2021 shows that the current urban surface elements in Nakhon Ratchasima are becoming increasingly prone to heat accumulation and retention.

Conclusions : This study shows that the fast urbanization of Nakhon Ratchasima during the past fifteen years has greatly exacerbated the UHI phenomena. The city has transitioned from thermal equilibrium to a fully developed heat island, mostly due to alterations in urban morphology rather than regional climatic influences. The results have serious effects on urban planning and policy. Statistical evidence indicates that there is a major negative relationship between LST and NDVI and MNDWI. Therefore, city planners require that they quickly add "Blue-Green Infrastructure" to the city's overall strategy. Several actions that should be implemented are to protect the original forest areas, build green spaces in cities, and restore water bodies. These actions have been shown to be the most effective approaches to decrease UHI intensity, increase Nakhon Ratchasima more comfortable in hot weather, as well as making it more resilient to climate change as the future urban expansion.

Keywords : Land Surface Temperature (LST) ; Urban Heat Island (UHI) ; Welch's ANOVA ;

land use and land cover change ; Nakhon Ratchasima Province

*Corresponding author. E-mail : Anake.s@nrru.ac.th

Introduction

การกลายเป็นเมือง (Urbanization) ถือเป็นปรากฏการณ์ทางสังคมและกายภาพที่ส่งผลกระทบวงกว้างต่อระบบนิเวศโลกในศตวรรษที่ 21 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศกำลังพัฒนาที่อัตราการขยายตัวของเมืองเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและไร้

ทิศทาง (Urban Sprawl) กระบวนการนี้มักนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (Land Use and Land Cover : LULC) อย่างถาวร การเปลี่ยนสภาพพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่ธรรมชาติที่มีคุณสมบัติในการระบายความร้อนผ่านการคายระเหยน้ำ (Evapotranspiration) ไปเป็นพื้นที่สิ่งปลูกสร้างที่ใช้วัสดุเก็บกักความร้อนและน้ำซึมผ่านไม่ได้ (Impervious Surfaces) เช่น คอนกรีตและยางมะตอย การเปลี่ยนแปลงสมดุลพลังงานที่พื้นผิวนั้นเป็นปัจจัยขับเคลื่อนหลักที่ก่อให้เกิดปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมือง (Urban Heat Island : UHI) ซึ่งเป็นสภาวะที่อุณหภูมิในเขตเมืองสูงกว่าพื้นที่ชนบทโดยรอบอย่างมีนัยสำคัญ ส่งผลกระทบต่อเนื่องต่อการใช้พลังงานในอาคาร คุณภาพอากาศ และสุขภาพของประชาชน (Khamchiangta & Dhakal, 2020) ปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมืองเป็นหนึ่งในปรากฏการณ์ที่เกิดจากมนุษย์ที่สำคัญที่สุดและมักส่งผลให้เขตเมืองร้อนขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเทียบกับพื้นที่ชนบทโดยรอบ ผลกระทบของ UHI ขึ้นอยู่กับละติจูดที่สัมพันธ์กับสภาพอากาศ ขนาดพื้นที่และช่วงเวลาของฤดูกาล (Kalnay & Cai, 2003; McCarthy *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2014; Basara *et al.*, 2010; Lin *et al.*, 2008) การขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็วจะเปลี่ยนรูปทรงเรขาคณิตของพื้นผิวในเขตเมือง – ลดปัจจัยในการมองเห็นท้องฟ้าซึ่งในที่สุดก็มีบทบาทสำคัญในการเป็นตัวดักจับความร้อน (Mushore *et al.*, 2019) และยังรบกวนกระบวนการระบายความร้อนตามธรรมชาติของความร้อนในเมืองสภาพแวดล้อม การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมในระดับท้องถิ่น ระดับภูมิภาคและระดับโลกเป็นหนึ่งในปัจจัยการขับเคลื่อนที่สำคัญของการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศโลก ตามรายงานของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ (IPCC) ในปี ค.ศ. 2007 กิจกรรมของมนุษย์ เช่น การขยายตัวของเมืองและเกษตรกรรมคิดเป็น 90% ของภาวะโลกร้อน (Yao *et al.*, 2015) การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินมีอิทธิพลต่อสภาพอากาศในท้องถิ่นและภูมิภาคผ่านกลไกการตอบสนองทางชีวเคมีและชีวฟิสิกส์ เห็นได้จากการเปลี่ยนแปลงของของชั้นบรรยากาศจากความเข้มข้นของก๊าซเรือนกระจก (GHGs) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินยังมีบทบาทสำคัญในระบบภูมิอากาศด้วยผลกระทบทางชีวภาพ กลไกการตอบสนองทางชีวภูมิศาสตร์ส่งผลโดยตรงต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิพื้นผิว ความชื้น ความเร็วลม และฝุ่นละออง ทำให้เกิดสภาพอากาศที่ซับซ้อนขึ้น (Deng *et al.*, 2013; Deng *et al.*, 2018) มีงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามตรวจสอบการใช้ประโยชน์ที่ดินและการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ปกคลุมโดยใช้เทคโนโลยีภูมิสารสนเทศ โดยพบว่ากิจกรรมเกี่ยวกับมนุษย์มีอิทธิพลต่อสภาพแวดล้อมในเมืองอย่างมาก (Alberti *et al.*, 2008; Andersson, 2006; Lundholm & Richardson, 2010) และด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องให้ความสนใจในการติดตามการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและการปกคลุมของที่ดินในเมือง (Stow & Chen, 2002) นอกจากนี้พารามิเตอร์ทางภูมิอากาศหลายประการยังเปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของพืชพรรณในเมือง (Cui & Shi, 2012; Kometa & Akoh, 2012; Voogt & Oke, 2003; Zhao *et al.*, 2006) เช่น งานวิจัยของ Kalnay & Cai, (2003) พบว่าอุณหภูมิต่ำสุดและสูงสุดเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสิ่งปกคลุมดิน

ในบริบทของประเทศไทย การศึกษาส่วนใหญ่มักมุ่งเน้นไปที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑล อย่างไรก็ตาม เมืองระดับภูมิภาค (Regional Cities) เช่น จังหวัดนครราชสีมา ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางทางเศรษฐกิจและการคมนาคมขนส่งที่สำคัญที่สุดของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ กำลังเผชิญกับความท้าทายจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมืองอย่างรุนแรงในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา การส่งเสริมให้เป็นศูนย์กลางโลจิสติกส์และการขยายตัวของโครงสร้างพื้นฐานคมนาคมได้เร่งอัตราการ

ขยายตัวของเมือง (Chotchaiwong & Wijitkosum, 2019) แม้จะมีความสำคัญเชิงยุทธศาสตร์ แต่การศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับพลวัตความร้อนในเมืองนครราชสีมายังมีอยู่อย่างจำกัด งานวิจัยในอดีตส่วนใหญ่มักเป็นการพรรณนาการกระจายตัวของอุณหภูมิ หรือขาดการตรวจสอบความถูกต้องทางสถิติที่รัดกุมในการเปรียบเทียบความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างประเภทการใช้ที่ดิน อีกทั้งยังมักประสบปัญหาความคลาดเคลื่อนจากการใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่ยังไม่ผ่านการปรับแก้ชั้นบรรยากาศที่ได้มาตรฐาน ซึ่งอาจนำไปสู่ข้อสรุปที่คลาดเคลื่อนได้

เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกล (Remote Sensing: RS) และระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) ได้รับการยอมรับว่าเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการติดตามการเปลี่ยนแปลง การใช้ประโยชน์ที่ดิน และสิ่งปกคลุมดิน และประเมินอุณหภูมิพื้นผิว ในระดับเมืองและภูมิภาค งานวิจัยร่วมสมัยหลายชิ้นได้ประยุกต์ใช้ดัชนีเชิงสเปกตรัม เช่น ดัชนีสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) และดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ในการอธิบายความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ (Guha *et al.*, 2020) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์เพียงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์อาจไม่เพียงพอที่จะยืนยันความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติของแต่ละสภาพพื้นที่ได้ การประยุกต์ใช้สถิติขั้นสูง เช่น Welch's ANOVA ซึ่งมีความทนทานต่อความแปรปรวนที่ไม่เท่ากันของข้อมูลสิ่งแวดล้อมจึงเป็นแนวทางที่ช่วยลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความน่าเชื่อถือให้กับผลการทดสอบทางสถิติได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Welch, 1951)

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อ (1) วิเคราะห์รูปแบบและทิศทางการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดิน และสิ่งปกคลุมดินในจังหวัดนครราชสีมา ระหว่างปี ค.ศ. 2006 และ 2021 และ (2) ประเมินผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวต่อความเข้มข้นและพลวัตของปรากฏการณ์เกาะความร้อน จุดเด่นของการศึกษานี้ คือ การเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ข้อมูลดาวเทียมมาตรฐานระดับที่ 2 จาก USGS เพื่อขจัดความคลาดเคลื่อนทางบรรยากาศ และการใช้ดัชนีชี้วัดความรุนแรงของเกาะความร้อน (Urban Heat Island Ratio Index : URI) ร่วมกับการทดสอบทางสถิติที่เข้มข้น เพื่อให้ได้ข้อค้นพบเชิงประจักษ์ที่สามารถนำไปสู่การกำหนดนโยบายการวางผังเมืองที่ยั่งยืนและการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระดับท้องถิ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Methodology

การศึกษานี้ได้กำหนดกรอบแนวคิดและขั้นตอนการวิจัยโดยประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการรับรู้ระยะไกล ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ และการวิเคราะห์ทางสถิติขั้นสูง เพื่อประเมินความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน และปรากฏการณ์เกาะความร้อน โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษา ได้แก่ อำเภอเมืองนครราชสีมา ตั้งอยู่บริเวณตอนกลางของจังหวัดบนที่ราบสูงโคราช ระหว่างละติจูดที่ 14-15 องศาเหนือ และลองจิจูดที่ 101-102 องศาตะวันออก มีความสูงจากระดับน้ำทะเลปานกลางประมาณ 180-210 เมตร ครอบคลุมพื้นที่ 762.70 ตร.กม. สภาพภูมิประเทศโดยรวมมีความลาดเอียงจากทิศใต้ไปสูทิศเหนือ พื้นที่ตอนใต้มีลักษณะเป็น

ลูกคลื่นลอนลาดและเป็นที่ตั้งของป่าสงวนแห่งชาติป่าครบุรี (ป่าห้วยยาง) ส่วนพื้นที่ตอนกลางและตอนเหนือมีลักษณะเป็นที่ราบลุ่มแม่น้ำ มีลำตะคองและคลองส่งน้ำชลประทานไหลผ่านซึ่งเป็นแหล่งน้ำสำคัญของเมือง (Nakhon Ratchasima Provincial Office, 2020) (Figure 1)

ลักษณะภูมิอากาศ จากการวิเคราะห์สถิติภูมิอากาศในรอบ 30 ปี (ค.ศ. 1991–2020) ของสถานีตรวจอากาศ นครราชสีมา พบว่าพื้นที่ศึกษามีอุณหภูมิเฉลี่ย 27.7 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 33.2 องศาเซลเซียส และต่ำสุดเฉลี่ย 23.2 องศาเซลเซียส) มีปริมาณน้ำฝนรวมเฉลี่ย 1,122.9 มิลลิเมตรต่อปี และมีจำนวนวันฝนตกเฉลี่ย 107.6 วันต่อปี (Thai Meteorological Department, 2023)

2. ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษา

การรวบรวมและคัดเลือกข้อมูล (Data Acquisition) เพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องทางรังสีวิทยา (Radiometric Accuracy) และลดความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศ การศึกษานี้เลือกใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมาตรฐานระดับที่ 2 (Landsat Collection 2 Level-2 Science Products : L2SP) ซึ่งผลิตและเผยแพร่โดย United States Geological Survey (USGS) ข้อมูลชุดนี้ประกอบด้วยค่าการสะท้อนแสงที่ผิวโลก (Surface Reflectance) และอุณหภูมิพื้นผิว (Surface Temperature) ที่ผ่านการปรับแก้ชั้นบรรยากาศด้วยอัลกอริทึมมาตรฐาน (LaSRC และ LEDAPS)

ในการคัดเลือกข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ผู้วิจัยให้ความสำคัญกับการควบคุมปัจจัยฤดูกาล (Seasonal Consistency) เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลต่างอุณหภูมิและการจำแนกพืชพรรณได้อย่างแม่นยำ โดยเลือกใช้ภาพในช่วงฤดูแล้ง (Dry Season) ที่มีปริมาณเมฆน้อยที่สุด ดังนี้

ข้อมูลตัวแทนปีฐาน (Baseline Period) การศึกษาค้างนี้ใช้ภาพจากดาวเทียม Landsat 5 TM ที่บันทึกเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 2007 เพื่อเป็นตัวแทนข้อมูลอุณหภูมิและสภาพพื้นผิวสำหรับช่วงปี ค.ศ. 2006

ข้อมูลปัจจุบัน (Current Period) การศึกษาค้างนี้ใช้ภาพจากดาวเทียม Landsat 8 OLI/TIRS ที่บันทึกเมื่อเดือนกุมภาพันธ์ ค.ศ. 2021 (Table 1)

3. ขั้นตอนการศึกษา

ขั้นตอนการศึกษาแบ่งเป็น 3 คือ 1) การจำแนกข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน 2) การประเมินปรากฏการณ์เกาะความร้อนของเมือง และ 3) การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่ระหว่างการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินและอุณหภูมิพื้นผิว (Figure 2) โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนดังนี้

3.1 การจำแนกข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (LULC Classification)

การศึกษานี้ใช้วิธีการจำแนกข้อมูลแบบผสมผสาน (Hybrid Approach) เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องสูงสุดสำหรับแต่ละช่วงเวลา ดังนี้

การจำแนกข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน ปี ค.ศ. 2006 ใช้ข้อมูลชุดภูมิมาตรฐานจาก กรมพัฒนาที่ดิน มีความละเอียดและความถูกต้องสูง ผู้วิจัยได้จัดกลุ่มประเภทการใช้ที่ดินใหม่ (Reclassification) จาการหัสมาตรฐานเดิม

ให้เป็น 5 ประเภทหลัก ได้แก่ (1) พื้นที่เกษตรกรรม (2) พื้นที่ป่าไม้ (3) พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง (4) แหล่งน้ำ และ (5) พื้นที่เบ็ดเตล็ด เพื่อให้สอดคล้องกับการจำแนกในปี ค.ศ. 2021

การจำแนกข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน ปี ค.ศ. 2021 ดำเนินการจำแนกข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 OLI (Surface Reflectance Bands 1-7) ด้วยอัลกอริทึมความน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum Likelihood Classification: MLC) ซึ่งเป็นวิธีทางสถิติแบบพารามิเตอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการจำแนกข้อมูลที่มีการแจกแจงแบบปกติ (Curran, 1985)

Table 1 Geoinformatics data source

Data type	Data	Source
Remote sensing (RS): raster data	Landsat 5 TM:	United States Geological Survey (USGS)
	LT05_L2SP_128050_20070208_20200831_02_T1	https://earthexplorer.usgs.gov/
	Landsat 8 OLI/TIR:	
	LC08_L2SP_128050_20210214_20210301_02_T1	
Geographic information system (GIS): vector data	Land use and land cover in 2006	Land development department (LDD)
Global Navigation Satellite System (GNSS): vector data	Land use and land cover point	In situ data and Google Earth data

การประเมินความถูกต้องของการจำแนก (Accuracy Assessment) เพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของแผนที่ LULC ปี 2021 ใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบแบ่งชั้นภูมิ (Stratified Random Sampling) จำนวนทั้งสิ้น 205 จุด โดยใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็นแบบแจกแจงทวินาม (Fitzpatrick-Lins, 1981) การตรวจสอบความถูกต้องโดยเปรียบเทียบกับภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูงจาก Google Earth และคำนวณค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) และสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa Coefficient)

$$N = \frac{Z^2(p)(q)}{E^2} \quad (1)$$

โดยที่ p คือ เปอร์เซ็นต์ความถูกต้องโดยรวมที่ต้องการ, q คือ $100 - p$,

E คือ ความผิดพลาดที่ยอมให้เกิดขึ้นได้ Z คือ ค่า Z จากตารางความเบี่ยงเบนมาตรฐานปกติ ณ ระดับความเชื่อมั่นที่กำหนด โดยกำหนดผลความถูกต้องโดยรวมอย่างน้อยร้อยละ 80 และความผิดพลาดที่ยอมรับได้ที่ร้อยละ 5 จึงจะนำข้อมูลไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน ในขั้นตอนนี้จะนำผลการวิเคราะห์ข้อมูลสถานภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินในปี ค.ศ. 2006 และ 2021 ในรูปแบบชั้นแรสเตอร์ โดยใช้เครื่องมือที่ชื่อ Matrix ในโปรแกรม

ERDAS IMAGINE การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแบบฟอร์มทิว (from to) เป็นระยะเวลา ห่างกัน 15 ปี เพื่อให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ดินและสิ่งปกคลุมดินแต่ละประเภทมีพื้นที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเท่าใด และการเพิ่มขึ้นหรือลดลงนั้นแปรเปลี่ยนไปเป็นพื้นที่การใช้ประโยชน์ที่ดินประเภทใด ผลที่ได้จะทำให้ทราบถึงอัตราการขยายตัวของพื้นที่เมืองที่เพิ่มขึ้นในระยะเวลาห่างกัน 15 ปี

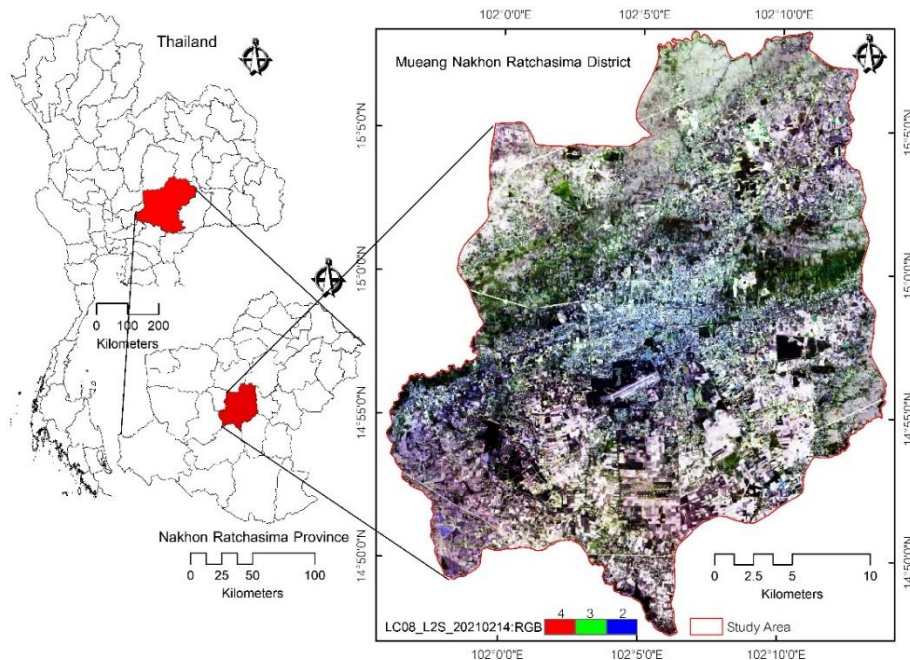


Figure 1 Study area; Mueang Nakhon Ratchasima district and surrounding area, Nakhon Ratchasima Province

3.2 การประเมินปรากฏการณ์เกาะความร้อนของเมือง

การศึกษานี้ได้กำหนดช่วงเวลาของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมให้อยู่ในฤดูกาลเดียวกัน (Seasonal Consistency) คือ ช่วงฤดูแล้ง โดยเลือกใช้ข้อมูลปี ค.ศ. 2007 เป็นตัวแทนปีฐาน (Baseline Proxy) เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มียุทธศาสตร์ข้อมูล สมบูรณ์และปราศจากเมฆปกคลุมมากที่สุดเมื่อเทียบกับปี ค.ศ. 2006 การศึกษานี้หลีกเลี่ยงการคำนวณอุณหภูมิด้วยตนเองที่ อาจเกิดความคลาดเคลื่อนจากการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ โดยเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ Surface Temperature จากข้อมูล Level-2 ของ USGS โดยตรง ข้อมูลดังกล่าวผ่านการคำนวณด้วยอัลกอริทึม Single Channel ที่มีการบูรณาการข้อมูลการแผ่รังสีของชั้น บรรยากาศและค่า Emissivity ที่แม่นยำ (Cook *et al.*, 2014) โดยทำการแปลงค่า (Rescaling) จากข้อมูลดิจิทัล (Digital Number : DN) ให้เป็นหน่วยองศาเซลเซียส และดำเนินการคัดกรองพื้นที่เมฆและเงาเมฆ (Cloud Masking) ออกจากพื้นที่ ศึกษาอย่างเคร่งครัด โดยใช้ข้อมูลจากแถบคุณภาพ (QA Band) เพื่อป้องกันความผิดพลาดของค่าอุณหภูมิ

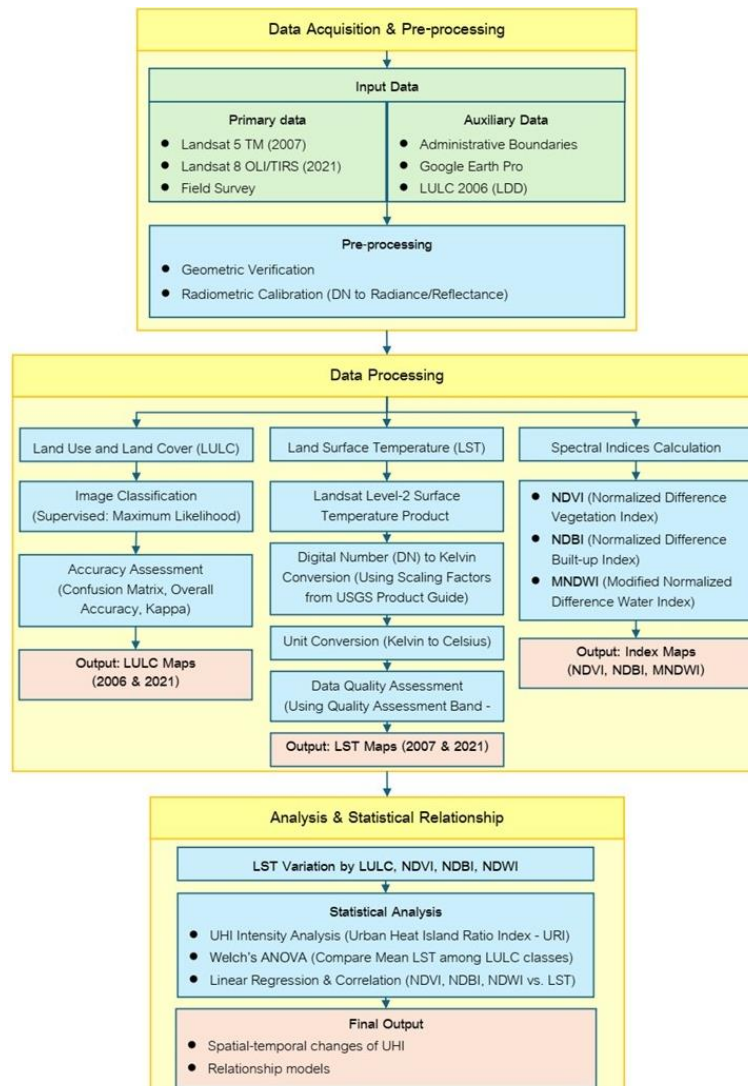


Figure 2 Research Methodology Framework

ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมมาตรฐาน Level-2 จะถูกแปลงค่าจากข้อมูลดิจิทัล (DN) ให้เป็นค่าทางฟิสิกส์ด้วยสมการเชิงเส้นตามคู่มือของ USGS (2021) ดังสมการ (2) และ (3)

อุณหภูมิพื้นผิว (Land surface Temperature : LST)

$$LST (^{\circ}C) = (DN \times 0.00341802 + 149.0) - 273.15 \quad (2)$$

การสะท้อนแสง (Surface Reflectance)

$$\rho\lambda = (DN \times 0.0000275) - 0.2 \quad (3)$$

การวิเคราะห์ดัชนีเชิงสเปกตรัม (Spectral Indices Analysis) เพื่อจำแนกคุณลักษณะของพื้นผิวโลกและวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิพื้นผิว การศึกษานี้ได้คำนวณดัชนีเชิงสเปกตรัมจากภาพถ่ายดาวเทียมที่ผ่านการปรับแก้ค่าการสะท้อนแสง (Surface Reflectance) เรียบร้อยแล้ว โดยใช้อัตราส่วนความแตกต่างของช่วงคลื่นและดัชนีเชิงสเปกตรัม 3 ประเภท เพื่อจำแนกคุณลักษณะของพื้นผิวและวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยมีรายละเอียดสมการและเกณฑ์การจำแนกดังแสดงใน Table 2

Table 2 Spectral indices used in this study

Index	Equation	Source
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$NDVI = (NIR-RED) / (NIR+RED)$	Tucker (1979)
Normalized Difference Built-up Index (NDBI)	$NDBI = (SWIR1-NIR) / (SWIR1+NIR)$	Zha <i>et al.</i> , (2003)
Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)	$MNDWI = (Green-SWIR1) / (Green+SWIR1)$	Xu (2006)

Note : NIR = Near-Infrared, SWIR1 = Shortwave Infrared 1; derived from Level-2 Surface Reflectance products

3.3 การวิเคราะห์ทางสถิติและความสัมพันธ์ (Statistical Analysis)

การวิเคราะห์ทางสถิติและความสัมพันธ์เพื่อทดสอบความสัมพันธ์ของอุณหภูมิพื้นผิวและประเภทการใช้ที่ดิน และสิ่งปกคลุมดิน โดยใช้การวิเคราะห์ทางสถิติขั้นสูง ดังนี้

การทดสอบความแตกต่าง เนื่องจากข้อมูลอุณหภูมิมีความแปรปรวนระหว่างกลุ่มไม่เท่ากัน (Levene's test, $p < 0.05$) จึงเลือกใช้สถิติ Welch's One-way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของแต่ละประเภทการใช้ที่ดิน และทำการเปรียบเทียบความแตกต่างรายคู่ (Post-hoc comparison) ด้วยวิธี Games-Howell การวิเคราะห์ทางสถิติทั้งหมดดำเนินการโดยใช้โปรแกรม jamovi เวอร์ชัน 2.6 (The jamovi project, 2024)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ การศึกษาครั้งนี้ใช้การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิว (LST) กับดัชนีเชิงสเปกตรัม ได้แก่ ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ดัชนีสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) และดัชนีแหล่งน้ำ (MNDWI) ด้วยโปรแกรม GeoDa (Anselin *et al.*, 2006)

3.4 การประเมินปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมือง (UHI Assessment)

ระดับความรุนแรงของเกาะความร้อนประเมินด้วยดัชนี URI และการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิด้วยดัชนี TGCI ดังสมการ Urban Heat Island Ratio Index (URI) คำนวณจากการจำแนกอุณหภูมิออกเป็น 5 ระดับ ตามเกณฑ์ Mean-SD ของ Brightness Temperature grade: BTG (Dan *et al.*, 2010) (Table 3) เพื่อใช้วัดสัดส่วนความรุนแรงของความร้อนในภาพรวม ใช้สำหรับการอธิบายระดับการพัฒนาของเกาะความร้อน (Xu & Chen, 2004) หมายความว่ายิ่งค่า URI ยิ่งสูง การเกิดปรากฏการณ์เกาะความร้อนยิ่งทวีความรุนแรงขึ้นเท่านั้น ดังสมการ (4)

$$URI = \frac{1}{100m} \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad (4)$$

โดยที่ m คือจำนวนระดับชั้นของระดับชั้นของอุณหภูมิ n คือ จำนวนของระดับชั้นของอุณหภูมิในเขตพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง ที่มีค่าสูงกว่าพื้นที่ในเขตย่านชานเมือง W คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก ซึ่งจะใช้ค่าระดับชั้นของอุณหภูมิ และ P คือ ร้อยละของพื้นที่

Temperature Grade Change Index (TGCI) ใช้วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิรายพิกเซล เพื่อระบุตำแหน่งพื้นที่ที่มีการสะสมความร้อนเพิ่มขึ้น (Warming) หรือลดลง (Cooling) ในเชิงพื้นที่ TGCI เป็นดัชนีชี้วัดที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ แนวโน้มการเปลี่ยนแปลง (Temperature Trend) ของอุณหภูมิความสว่างในภาพรวมตลอดช่วงเวลาการศึกษา เพื่อระบุว่าปรากฏการณ์เกาะความร้อนของเมืองนั้นมีแนวโน้ม รุนแรงขึ้น หรือ บรรเทาลง ในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา ทั้งหมด (Xu & Chen, 2004; Ongsomwang *et al.*, 2018) ดังสมการ (5)

$$TGCI = \sum_{i=1}^n w_i \times GB_i \quad (5)$$

โดยที่ n คือ จำนวนของระดับชั้นของอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนแปลงระดับชั้น GB คือ ค่าการเปลี่ยนแปลงระดับชั้นของอุณหภูมิ หากระดับชั้นของอุณหภูมิลดลง GB จะเป็นลบ ในทางตรงกันข้ามหากระดับชั้นของอุณหภูมิเพิ่มขึ้น GB จะเป็นบวก และ W คือ ร้อยละของพื้นที่

Table 3 Temperature Grade classification using mean-standard deviation method.

Brightness Temperature Grade	Interval of Temperature Values
Low temperature area	$LST < \text{Mean} - 1.0 \text{ SD}$
Secondary low temperature	$\text{Mean} - 1.0 \text{ SD} \leq LST < \text{Mean} - 0.5 \text{ SD}$
Medium temperature	$\text{Mean} - 0.5 \text{ SD} \leq LST < \text{Mean} + 0.5 \text{ SD}$
Secondary high temperature area	$\text{Mean} + 0.5 \text{ SD} \leq LST \leq \text{Mean} + 1.0 \text{ SD}$
High temperature area	$LST > \text{Mean} + 1.0 \text{ SD}$

Source: Dan *et al.*, 2010

Results

1. สถานการณ์และการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (LULC Dynamics)

1.1 สถานการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินปี ค.ศ. 2006

จากการจำแนกข้อมูลโดยใช้ฐานข้อมูลมาตรฐานจากกรมพัฒนาที่ดิน พบว่าในปี ค.ศ. 2006 พื้นที่ศึกษาถูกปกคลุมด้วยพื้นที่เกษตรกรรมเป็นหลัก ครอบคลุมพื้นที่ 460.59 ตร.กม. หรือร้อยละ 60.39 ของพื้นที่ทั้งหมด รองลงมาคือพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง จำนวน 213.77 ตร.กม. หรือร้อยละ 28.03 กระจายตัวอยู่อย่างหนาแน่นในบริเวณศูนย์กลางเมือง

และตามแนวเส้นทางคมนาคมหลัก ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้และพื้นที่แหล่งน้ำมีสัดส่วนเพียงเล็กน้อย คือร้อยละ 2.26 และ 2.15 ตามลำดับ (Figure 3a and Table 4)

1.2 สถานการณ์การใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินปี 2021

ในปี ค.ศ. 2021 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพื้นที่อย่างชัดเจน แม้ว่าพื้นที่เกษตรกรรมยังคงเป็นองค์ประกอบหลัก (411.27 ตร.กม. หรือร้อยละ 53.92) แต่สัดส่วนลดลงอย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างขยายตัวเพิ่มขึ้นเป็น 287.43 ตร.กม. หรือร้อยละ 37.69 ของพื้นที่ศึกษา มีการขยายตัวออกสู่พื้นที่ชานเมืองในลักษณะกระจัดกระจาย (Urban Sprawl) มากยิ่งขึ้น (Figure 3b and Table 4)

1.3 ความถูกต้องของการจำแนกข้อมูล (Accuracy Assessment)

ผลการตรวจสอบความถูกต้องของแผนที่การใช้ประโยชน์ที่ดินปี ค.ศ. 2021 ที่จำแนกจากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 ด้วยวิธี Maximum Likelihood โดยเปรียบเทียบกับจุดอ้างอิงภาคสนามและภาพถ่ายดาวเทียมรายละเอียดสูงจำนวน 205 จุด พบว่ามีค่าความถูกต้องโดยรวม (Overall Accuracy) ร้อยละ 95.00 และค่าสัมประสิทธิ์แคปปา (Kappa Coefficient) เท่ากับ 0.90 ซึ่งจัดอยู่ในระดับดีเยี่ยม (Almost Perfect) ตามเกณฑ์ของ Landis & Koch, (1977) ผลลัพธ์นี้บ่งชี้ว่าข้อมูลแผนที่ที่ได้มีความน่าเชื่อถือสูงและเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการนำไปวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ในลำดับต่อไป (Table 5)

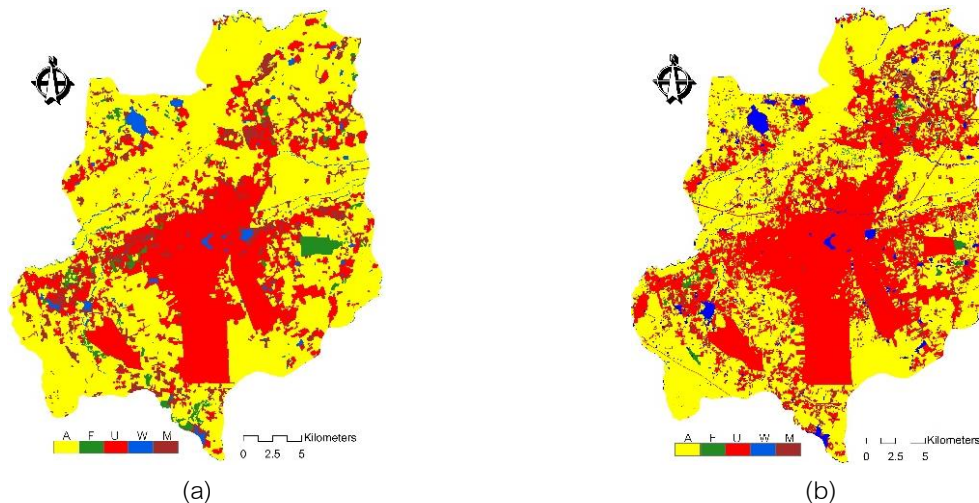


Figure 3 Land use and land cover in (a) 2006 and (b) 2021

Table 4 Land use and land cover area in 2006 and 2021

LULC Type	LULC in 2006		LULC in 2021	
	km ²	Percent	km ²	Percent
Agriculture Land (A)	460.59	60.39	411.27	53.92
Forest Land (F)	17.22	2.26	8.64	1.13
Urban or Built-Up Land (U)	213.77	28.03	287.43	37.69
Water Body (W)	16.36	2.15	22.49	2.95
Miscellaneous Land (M)	54.75	7.18	32.86	4.31
Total	762.70	100.00	762.70	100.00

1.4 การเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (Change Detection Analysis)

เมื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงระหว่างสองช่วงเวลา (Table 6) พบพลวัตการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญ คือ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีอัตราการเติบโตสูงที่สุด (+34.46%) มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นสุทธิ 73.66 ตร.กม. จากการวิเคราะห์เมทริกซ์การเปลี่ยนแปลง (Transition Matrix) การขยายตัวนี้เกิดจากการเปลี่ยนสภาพของ พื้นที่เกษตรกรรม (55.32 ตร.กม.) และพื้นที่เบ็ดเตล็ด (23.35 ตร.กม.) เป็นหลัก ในทางตรงกันข้าม พื้นที่ป่าไม่มีการสูญเสียพื้นที่สุทธิร้อยละ 49.83 (-8.58 ตร.กม.) ซึ่งสะท้อนถึงผลกระทบของการพัฒนาเมืองที่มีต่อพื้นที่ทางธรรมชาติ (Figure 4 and Table 6)

Table 5 Error matrix for accuracy assessment of land use land cover classification in 2021

LULC in 2021	LULC reference						User's Accuracy (%)	Commission Error (%)
	A	F	U	W	M	Total		
A	145	0	0	0	2	147	1	0
F	1	6	0	0	0	7	0.99	0.01
U	0	0	23	0	4	27	0.86	0.14
W	0	0	0	6	0	6	0.73	0.27
M	1	1	0	0	16	18	1	0
Total	147	7	23	6	22	205		
Producer's Accuracy (%)	98.64	85.71	100	100	72.73			
Omission Error (%)	1.36	14.29	0	0	27.27			
Overall Accuracy		0.95						
Kappa coefficient		0.90						

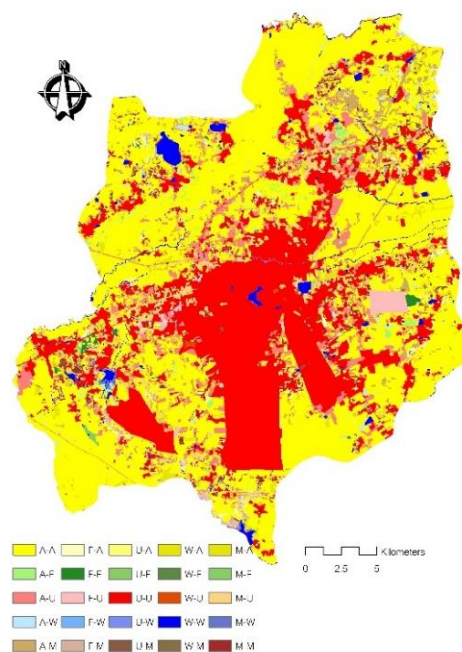


Figure 4 Land use and Land cover change from 2006 to 2021

Table 6 Transition Matrix of Land use Land cover change from 2006 to 2021

LULC 2006 (km ²)	LULC2021 (km ²)					Total
	A	F	U	W	M	
A	373.60	5.22	55.32	7.50	18.95	460.59
F	5.00	1.79	8.05	0.16	2.23	17.22
U	10.47	0.32	199.14	1.15	2.71	213.77
W	2.17	0.15	1.57	12.08	0.39	16.36
M	20.03	1.16	23.35	1.61	8.59	54.75
Total	411.27	8.64	287.43	22.49	32.86	762.70
Change (km ²)	-49.32	-8.58	73.66	6.13	-21.89	
Annual average change (km ²)	-3.29	-0.57	4.91	0.41	-1.46	
% Change (percent)	-10.71	-49.83	34.46	11.20	-39.98	

2. การกระจายตัวและความแตกต่างของอุณหภูมิพื้นผิวจำแนกตามการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Spatiotemporal Variations of LST)

2.1 ลักษณะอุณหภูมิพื้นผิวในปัฐาน (ค.ศ. 2007)

การวิเคราะห์สถิติอุณหภูมิพื้นผิว (LST) จากภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 5 เป็นตัวแทนของช่วงฤดูแล้ง แสดงให้เห็นว่าพื้นที่เกษตรกรรมมีค่าเฉลี่ยอุณหภูมิสูงสุดที่ 40.9 องศาเซลเซียส (S.D. = 3.01) สูงกว่าพื้นที่เมืองและสิ่งปลูกสร้าง (39.6 องศาเซลเซียส) และพื้นที่ป่าไม้ (39.5 องศาเซลเซียส) เล็กน้อย จากการทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยสถิติ Welch's One-way ANOVA พบว่าประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดินส่งผลต่ออุณหภูมิพื้นผิวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($F(4, 146) = 17.1, p < .001$) อย่างไรก็ตาม ผลการเปรียบเทียบรายคู่ด้วยวิธี Games-Howell ชี้ให้เห็นลักษณะเฉพาะของฤดูแล้ง โดยไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างพื้นที่เมืองและพื้นที่ป่าไม้ ($p = 1.000$) รวมถึงระหว่างพื้นที่เกษตรกรรมกับพื้นที่เมือง ($p = 0.081$) ชะสะท้อนให้เห็นว่าในสภาวะแห้งแล้ง พื้นที่ธรรมชาติที่มีความชื้นต่ำสามารถสะสมความร้อนได้ใกล้เคียงกับวัสดุสิ่งปลูกสร้าง ในขณะที่พื้นที่แหล่งน้ำเป็นเพียงกลุ่มเดียวที่มีอุณหภูมิต่ำกว่ากลุ่มอื่นอย่างชัดเจน (เฉลี่ย 34.7 องศาเซลเซียส) (Table 7)

2.2 ลักษณะอุณหภูมิพื้นผิวในปัจจุบัน (ค.ศ. 2021)

ในปี ค.ศ. 2021 แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางความร้อนที่ชัดเจน โดยที่สถิติ Welch's ANOVA ยืนยันความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างกลุ่มอย่างมีนัยสำคัญ ($F(4, 220) = 48.2, p < .001$) ผลการเปรียบเทียบรายคู่แสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของเกาะความร้อนที่เด่นชัดขึ้น พบว่าพื้นที่เมืองและสิ่งปลูกสร้างมีอุณหภูมิเฉลี่ย 28.4 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าพื้นที่ป่าไม้ (25.4 องศาเซลเซียส) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < .001$) โดยมีผลต่างอุณหภูมิเฉลี่ยเท่ากับ 2.99 องศาเซลเซียส การเปลี่ยนแปลงนี้บ่งชี้ว่าโครงสร้างเมืองในปัจจุบันมีบทบาทในการกักเก็บความร้อนที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับพื้นที่ทางธรรมชาติแตกต่างจากปัฐานอย่างสิ้นเชิง นอกจากนี้ ยังพบว่าพื้นที่ป่าไม้ยังแสดงศักยภาพในการเป็นแหล่งกักเก็บความเย็น (Cooling Source) ที่ดีที่สุดในปัฐาน โดยมีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นที่แหล่งน้ำ (26.6 องศาเซลเซียส) เล็กน้อย (Table 7)

Table 7 Comparison of Land Surface Temperature across land use categories in 2007 and 2021

Land Use type	2007					2021				
	N	Mean (°C)	S.D.	F (Welch's)	p	N	Mean (°C)	S.D.	F (Welch's)	p
A	66	40.9	3.01	17.1	< .001*	102	29.9	2.54	48.2	< .001*
F	59	39.5	2.85			83	25.4	2.49		
U	56	39.6	2.37			88	28.4	2.06		
W	58	34.7	4.87			93	26.6	2.85		
M	61	39.6	3.25			84	29.2	2.49		
Total	300	39.0	3.95			450	28.0	3.01		

Note: * Significant at .05 level. Welch's ANOVA was used due to unequal variances (Levene's test: $p < .05$).

3. การกระจายตัวของพื้นที่ของอุณหภูมิพื้นผิวและดัชนีเชิงสเปกตรัม

จากการประมวลผลข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมเพื่อคำนวณอุณหภูมิพื้นผิว (LST) และดัชนีเชิงสเปกตรัม ได้แก่ ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ดัชนีสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) และดัชนีแหล่งน้ำ (MNDWI) ดังแสดงใน Figure 5 และสรุปค่าสถิติใน Table 8 พบลักษณะการกระจายตัวที่สำคัญดังนี้ (Figure 5)

3.1 ลักษณะการกระจายตัวของพื้นที่ของอุณหภูมิพื้นผิวและดัชนีเชิงสเปกตรัมในปีฐาน (2007)

ในปี ค.ศ. 2007 อุณหภูมิพื้นผิวมีค่าเฉลี่ยสูงถึง 39.00 องศาเซลเซียส พื้นที่ที่มีอุณหภูมิสูงกระจายตัวสอดคล้องกับพื้นที่ที่มีค่าดัชนี NDBI สูง (สีส้ม-แดง) ได้แก่ บริเวณเมืองและพื้นที่เกษตรกรรมที่ว่างเปล่า ในขณะที่บริเวณที่มีค่าดัชนี NDVI สูง (สีเขียวเข้ม) และ MNDWI สูง (สีน้ำเงิน) จะปรากฏเป็นพื้นที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าอย่างชัดเจน

3.2 ลักษณะการกระจายตัวของพื้นที่ของอุณหภูมิพื้นผิวและดัชนีเชิงสเปกตรัมในปีปัจจุบัน (ค.ศ. 2021)

ในปี ค.ศ. 2021 อุณหภูมิเฉลี่ยลดลงมาอยู่ที่ 28.00 องศาเซลเซียส แต่รูปแบบการกระจายตัวของความร้อนยังคงกระจุกตัวหนาแน่นในบริเวณเขตเมืองและชุมชนที่มีการขยายตัว สอดคล้องกับค่าดัชนี NDBI ที่เพิ่มความหนาแน่นขึ้นในบริเวณชานเมือง เมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่พบว่าพื้นที่ที่มีพืชพรรณหนาแน่น (High NDVI) และแหล่งน้ำ (High MNDWI) ยังคงทำหน้าที่เป็นแหล่งความเย็น (Cool Island) ที่สำคัญท่ามกลางการขยายตัวของเมือง

4. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวและดัชนีเชิงสเปกตรัม (Correlation Analysis)

การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิพื้นผิวกับดัชนีเชิงสเปกตรัมของสภาพพื้นผิวด้วยสมการถดถอยเชิงเส้น ณ ระดับนัยสำคัญทางสถิติ .01 ($p < .01$) แสดงให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของความสัมพันธ์ในแต่ละช่วงเวลา ดังนี้

4.1 ความสัมพันธ์ในปีฐาน (ค.ศ. 2007)

ปี ค.ศ. 2007 (Figure 6a and Table 9) ซึ่งเป็นตัวแทนของช่วงฤดูแล้ง พบว่า NDBI มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิพื้นผิวในระดับสูงมาก มีค่าสัมประสิทธิ์ความชัน (Slope) เท่ากับ 29.38 บ่งชี้ว่าในสภาวะอากาศแห้งแล้ง พื้นที่ที่มีค่าการสะท้อนแสงแบบสิ่งปลูกสร้างหรือพื้นที่เปิดโล่งจะตอบสนองต่อการสะสมความร้อนอย่างรุนแรง ในทางตรงกันข้าม MNDWI แสดงบทบาทในการลดอุณหภูมิอย่างชัดเจนที่สุด (Slope = -54.04) อย่างไรก็ตาม พบความผิดปกติของ NDVI ที่แสดงความสัมพันธ์เชิงบวกกับอุณหภูมิ (Slope = 98.31) เป็นผลสืบเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของฤดูแล้ง พื้นที่เกษตรกรรมส่วนใหญ่เป็นทุ่งหญ้าแห้งหรือตอซังข้าวที่มีอุณหภูมิสูงกว่าแหล่งน้ำ

Table 8 Descriptive statistics of Land Surface Temperature and spectral indices in 2007 and 2021

statistics	2007				2021			
	LST	NDVI	NDBI	MNDWI	LST	NDVI	NDBI	MNDWI
Minimum	16.31	-0.30	-0.78	-0.71	16.23	-0.92	-0.94	-1.00
Maximum	56.89	0.72	0.64	0.78	42.61	0.98	0.90	0.96
Mean	39.78	0.28	0.06	-0.39	28.94	0.42	-0.03	-0.46
Standard Deviation	3.08	0.08	0.11	0.13	2.57	0.16	0.14	0.16

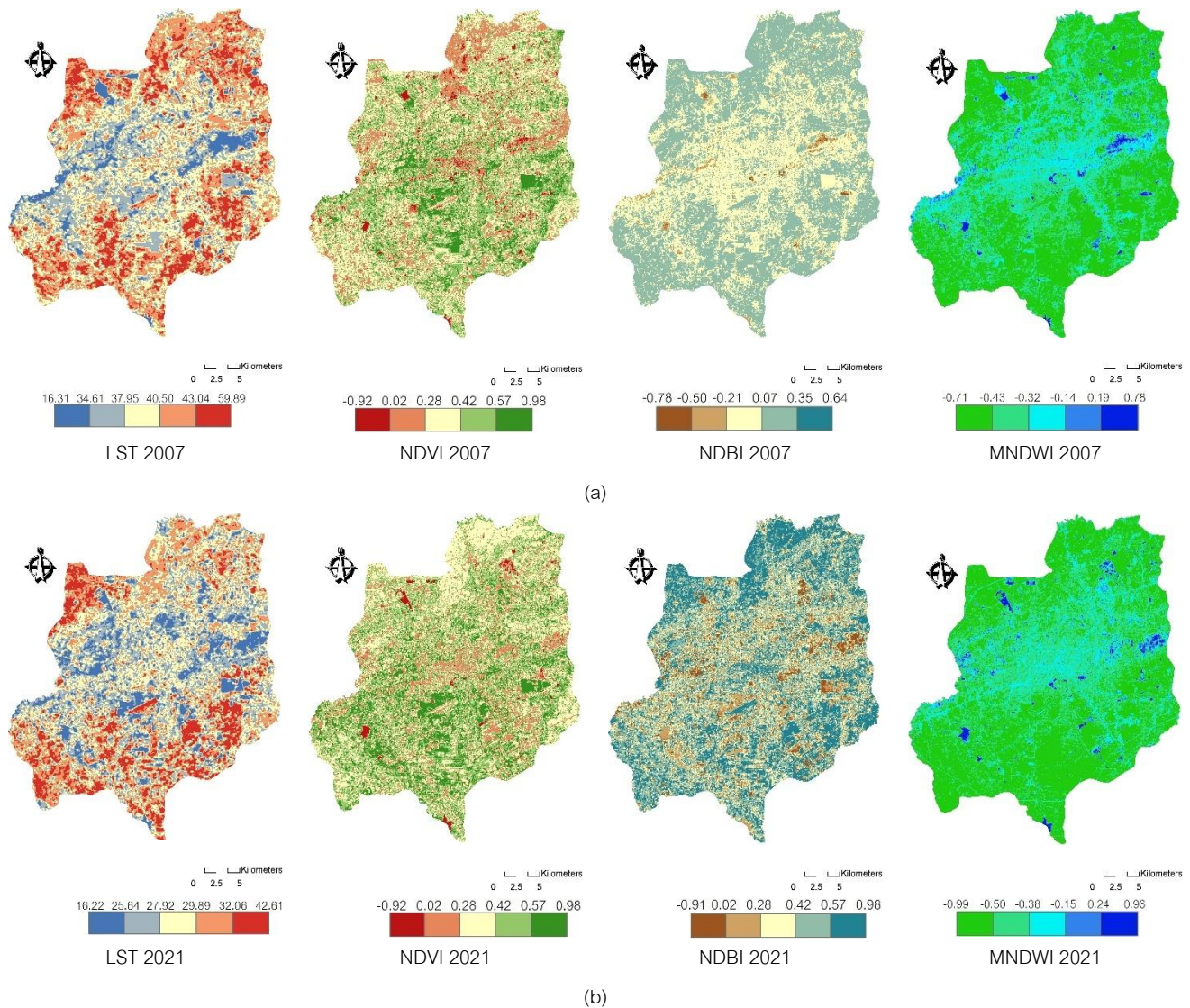


Figure 5 Spatial distribution of Land Surface Temperature (LST) and spectral indices (NDVI, NDBI, MNDWI) in 2007 (a) and 2021 (b)

4.2 ความสัมพันธ์ในปัจจุบัน (ค.ศ. 2021)

สำหรับปี ค.ศ. 2021 (Figure 6b and Table 9) แสดงรูปแบบความสัมพันธ์มีความสอดคล้องกับทฤษฎีเกาะความร้อนในเมืองทั่วไปมากขึ้น โดย NDBI ยังคงเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลเชิงบวกต่ออุณหภูมิ (Slope = 13.36) แต่มีความชันลดลงเมื่อเทียบกับปีฐาน อาจเป็นผลมาจากความชื้นในดินที่สูงขึ้นจากอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศแบบลาเนียนา ในขณะที่ NDVI แสดงความสัมพันธ์เชิงลบตามปกติ (Slope = -0.80) บ่งชี้ว่าพืชพรรณที่มีความชื้นสมบูรณ์สามารถช่วยลดอุณหภูมิพื้นผิวได้ และ

MNDWI ยังคงแสดงความสัมพันธ์เชิงลบ (Slope = -4.11) ยืนยันสถานะของการเป็นแหล่งความเย็น (Cooling Island) ที่สำคัญในพื้นที่เมือง

5. พลวัตความรุนแรงของเกาะความร้อนในเมือง (UHI Intensity Dynamics)

5.1 การเปลี่ยนแปลงระดับความรุนแรงของเกาะความร้อน (URI Analysis)

จากการประเมินสถานการณ์ความร้อนด้วยดัชนี (URI) คำนวณจากสัดส่วนพื้นที่ในแต่ละระดับอุณหภูมิ (Table 10) พบการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างที่มีความซับซ้อน โดยค่าดัชนี URI รวมมีการปรับตัวลดลงเล็กน้อยจาก 0.53 (Figure 7a) ใน ค.ศ. 2007 เป็น 0.52 (Figure 7b) ใน ค.ศ. 2021 สะท้อนถึงอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศระดับมหภาค (Macro-climate) โดยเฉพาะปรากฏการณ์ลานีญาในปี ค.ศ. 2021 ที่มีความชื้นสัมพัทธ์สูง ส่งผลให้สัดส่วนพื้นที่ในกลุ่ม อุณหภูมิต่ำ (Low Temperature) และค่อนข้างต่ำ (Secondary Low) มีการกระจายตัวครอบคลุมพื้นที่มากขึ้นในภาพรวม อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาเจาะลึกในระดับอุณหภูมิสูง (High Temperature Area) ซึ่งเป็นพื้นที่วิกฤตของเกาะความร้อนกลับพบว่า มีการขยายตัวเพิ่มขึ้นจาก 55.69 ตร.กม. (ร้อยละ 7.30) ในปี ค.ศ. 2007 เป็น 56.37 ตร.กม. (ร้อยละ 7.39) ในปี ค.ศ. 2021 (Figure 5c) บ่งชี้ว่าแม้สภาพอากาศโดยรวมจะเย็นลง แต่โครงสร้างเมืองยังคงทำหน้าที่สะสมความร้อนอย่างเข้มข้นและมีการขยายขอบเขตพื้นที่ร้อนจัดออกไปอย่างต่อเนื่อง สวนทางกับแนวโน้มอุณหภูมิเฉลี่ยของจังหวัด

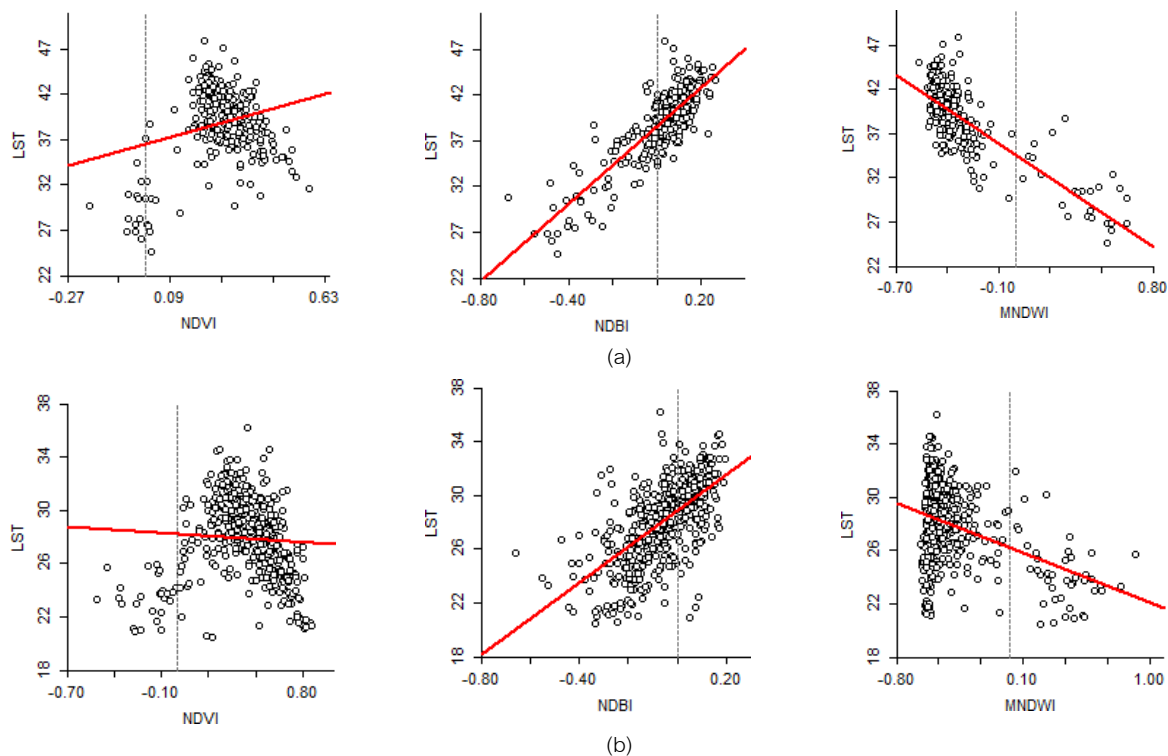


Figure 6 Scatter plots illustrate the linear relationships between Land Surface Temperature (LST) and spectral indices (NDBI, NDVI, MNDWI) in (a) 2007 and (b) 2021

Table 9 summarizes the changes in regression coefficients, highlighting the influence of seasonal moisture variability on the thermal behavior of different land use and land cover types

Spectral Indices	Slope 2007	R ²	Slope 2021	R ²	Change & Interpretation
NDBI	+21.16	0.693	+13.36	0.384	Consistent Positive Correlation: The relationship remained positive in both periods, confirming built-up areas as primary heat drivers. However, the slope magnitude decreased in 2021, possibly due to higher soil moisture levels (La Niña effect) dampening the thermal response.
NDVI	+8.75	0.061	-0.80	0.004	Seasonal Directional Shift: The 2007 data exhibited an anomalous positive slope (+8.75), likely driven by the high thermal emittance of dry vegetation/crop stubble in the extreme dry season. In contrast, 2021 showed a standard negative correlation, reflecting the cooling capacity of healthy vegetation.
MNDWI	-12.94	0.602	-4.11	0.147	Highest Cooling Potential: Both years demonstrated a negative correlation. The steeper negative slope in 2007 (-12.94) highlights that water bodies were the most significant cooling source amidst a thermally dry landscape compared to 2021.

5.2 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเชิงพื้นที่ (TGCI Spatial Distribution)

ผลการวิเคราะห์ดัชนีการเปลี่ยนแปลงระดับอุณหภูมิ TGCI (Figure 8) แสดงให้เห็นการกระจุกตัวของพื้นที่ที่มีแนวโน้มอุณหภูมิสูงขึ้น (Warming Trend: สีแดง) ในบริเวณชานเมืองและพื้นที่เกษตรกรรมที่เปลี่ยนสภาพเป็นสิ่งปลูกสร้าง ในขณะที่พื้นที่ส่วนใหญ่ของอำเภอเมืองแสดงแนวโน้มอุณหภูมิลดลง (Cooling Trend: สีน้ำเงิน) สอดคล้องกับอิทธิพลของสภาพภูมิอากาศที่มีความชื้นสูงขึ้นในปัจจุบัน โดยสามารถจำแนกพื้นที่ออกเป็น 2 ลักษณะ (Figure 8) ดังนี้

พื้นที่ที่มีแนวโน้มอุณหภูมิสูงขึ้นมีค่า TGCI เป็นบวก กระจุกตัวอยู่อย่างหนาแน่นในบริเวณขอบเมือง (Urban Fringe) และพื้นที่เกษตรกรรมชานเมืองที่มีการเปลี่ยนสภาพเป็นที่อยู่อาศัยและย่านพาณิชยกรรมใหม่ สอดคล้องกับการขยายตัวของเมืองในแนวราบ (Urban Sprawl) ที่เปลี่ยนพื้นผิวระบายความร้อนให้กลายเป็นพื้นผิวเก็บกักความร้อนพื้นที่ที่มีแนวโน้มอุณหภูมิลดลงมีค่า TGCI เป็นลบ กระจายตัวอยู่ในพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่โล่งนอกเขตเมือง ได้รับอิทธิพลจากความชื้นในดินที่สูงขึ้นตามฤดูกาลและสภาพอากาศแบบลาเนียนา ช่วยลดทอนอุณหภูมิพื้นผิวลงในช่วงเวลาที่ทำการศึกษา

Discussion

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์ผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินต่ออุณหภูมิพื้นผิวและพลวัตของเกาะความร้อนในเมืองนครราชสีมา โดยอาศัยการวิเคราะห์เชิงสถิติขั้นสูงและการเปรียบเทียบข้อมูลมาตรฐานระดับที่ 2 ซึ่งผลการศึกษาชี้ประเด็นที่น่าสนใจมาอภิปราย ดังนี้

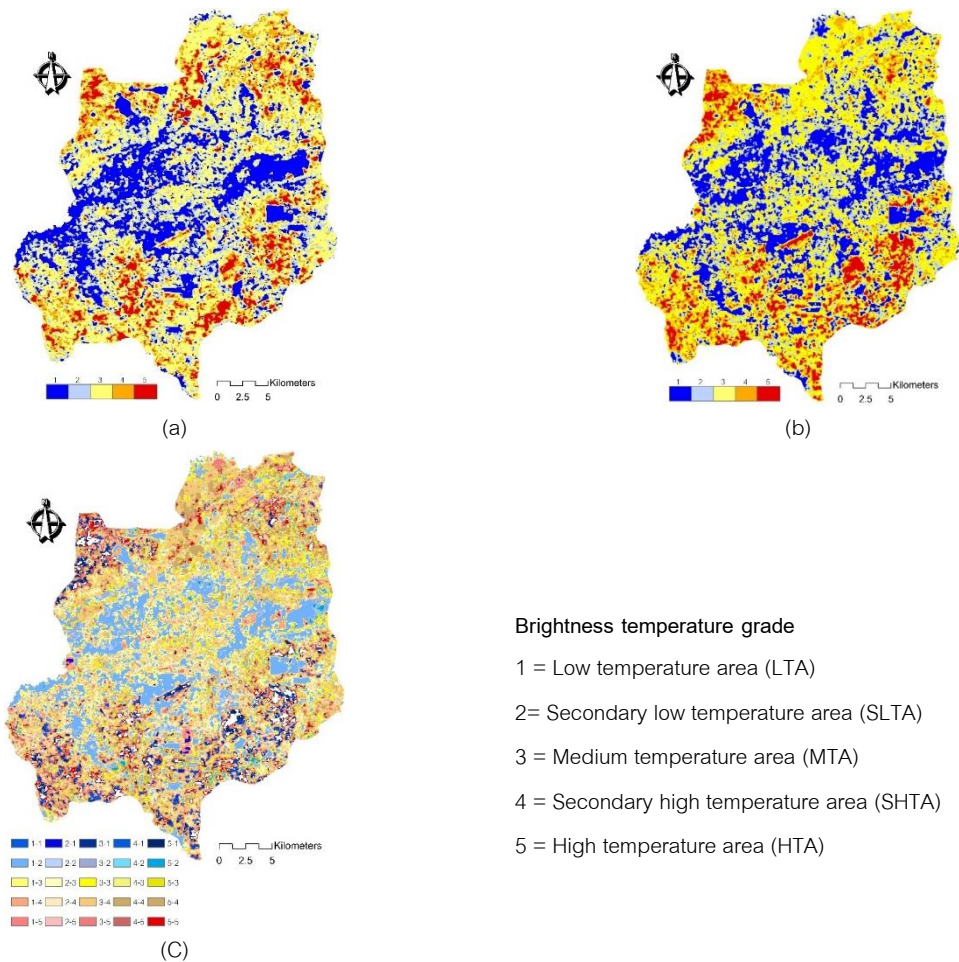


Figure 7 Brightness temperature grade distribution in 2007 (a) and 2021 (b). Brightness temperature grade distribution change between 2007 and 2021 (c)

1. ความยั่งยืนระหว่างสภาพภูมิอากาศและโครงสร้างเมือง (Climate Variability vs. Urban Structure)

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นความสัมพันธ์เชิงซ้อนระหว่างการขยายตัวของเมืองและอุณหภูมิพื้นผิว แม้ว่าพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างจะมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นอย่างมาก (ร้อยละ 34.46) ในช่วง 15 ปีที่ผ่านมา แต่ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิพื้นผิวในปี ค.ศ. 2021 กลับมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปีฐาน (ค.ศ. 2007) ปรากฏการณ์นี้สามารถอธิบายได้ด้วยอิทธิพลของความแปรปรวนสภาพภูมิอากาศรายปี (Inter-annual climate variability) โดยข้อมูลจากกรมอุตุนิยมวิทยาบ่งชี้ว่า ในปี ค.ศ. 2007 พื้นที่ศึกษาได้รับอิทธิพลจากปรากฏการณ์เอลนีโญ (El Niño) ระดับอ่อนถึงปานกลาง ส่งผลให้เกิดสภาวะฝนทิ้งช่วงและความชื้นในอากาศต่ำเอื้อต่อการสะสมความร้อนของพื้นผิว ในขณะที่ปี ค.ศ. 2021 พื้นที่ศึกษาอยู่ภายใต้อิทธิพลของปรากฏการณ์ลานีญา (La Niña) ที่ส่งผลให้ปริมาณฝนและความชื้นในดิน (Soil Moisture) สูงกว่าค่าปกติ (Thai Meteorological Department,

2022) ทำหน้าที่เป็นกลไกธรรมชาติในการลดทอนอุณหภูมิพื้นผิวในภาพรวม สอดคล้องกับงานวิจัยของ Meechai *et al.*, (2025) ที่พบว่าในปิลานีญา พื้นที่เกษตรและป่าไม้จะมีอุณหภูมิต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญ อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาในเชิงโครงสร้างผ่านดัชนี URI กลับพบหลักฐานเชิงประจักษ์ว่า โครงสร้างเมืองยังคงทำหน้าที่สะสมความร้อนอย่างเข้มข้น โดยพื้นที่ระดับอุณหภูมิสูงมาก (High Temperature Grade) ได้ขยายตัวเพิ่มขึ้นสวนทางกับค่าเฉลี่ยอุณหภูมิรวม สิ่งนี้ยืนยันข้อค้นพบของ Kalnay & Cai (2003), Cui & Shi (2012) และ Deng *et al.*, (2013) ที่ระบุว่า การเปลี่ยนแปลงสิ่งปกคลุมดินเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิพื้นผิว โดยเฉพาะการแทนที่พื้นที่ธรรมชาติด้วยวัสดุสิ่งปลูกสร้างที่กักเก็บความร้อน (Tan *et al.*, 2020; Saha *et al.*, 2021) ผลการศึกษาในครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของวัสดุเมือง (Urban Materials) มีความรุนแรงเพียงพอที่จะต้านทานผลของการเย็นลงจากสภาพภูมิอากาศระดับภูมิภาคได้ในระดับพื้นที่เฉพาะจุด (Local Scale) เมื่อพิจารณาในรายละเอียดเชิงพื้นที่ พบว่าบริเวณที่มีอุณหภูมิพื้นผิวสูงปรากฏให้เห็นเด่นชัดตั้งแต่บริเวณทิศตะวันออกเฉียงใต้ซึ่งเป็นที่ตั้งของนิคมอุตสาหกรรมสุรนารี ทิศตะวันตกเฉียงใต้ในเขตตำบลหนองจะบกและโพธิ์กลาง ทิศตะวันตกเฉียงเหนือบริเวณตำบลพุดซา (เหนือพื้นที่บึงพุดซาและบึงประเสริฐ) ไปจนถึงทิศตะวันออกเฉียงเหนือในเขตตำบลจอหอและบริเวณบ้านบึงทับช้าง นอกจากนี้ ยังพบการสะสมความร้อนกระจุกตัวหนาแน่นบริเวณขอบเมือง (Urban Fringe) โดยเฉพาะพื้นที่เกษตรกรรมชานเมืองที่มีการเปลี่ยนสภาพเป็นที่อยู่อาศัยและย่านพาณิชยกรรมใหม่ ปรากฏการณ์นี้สะท้อนถึงรูปแบบการขยายตัวของเมืองในแนวราบ (Urban Sprawl) ที่เปลี่ยนพื้นผิวระบายความร้อนให้กลายเป็นพื้นผิวเก็บกักความร้อน ส่งผลให้ค่าดัชนีสิ่งปลูกสร้าง (NDBI) ในบริเวณดังกล่าวเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ

Table 10 Transition matrix of Land Surface Temperature grades between 2007 and 2021 and URI (Unit: km²)

2007 (Unit: km ² .)	2021 (Unit: km ² .)						Percent	URI (2007)
	LTA	SLTA	MTA	SHTA	HTA	Total		
LTA	99.19	40.31	24.68	2.88	0.98	168.05	22.02	0.53
SLTA	33.97	42.3	51.85	4.13	1.27	133.52	17.50	
MTA	33.94	55.71	165.97	38.38	15.53	309.53	40.56	
SHTA	5.02	7.07	42.26	23.42	18.63	96.39	12.63	
HTA	2.4	2.68	16.93	13.72	19.96	55.69	7.30	
Total	174.51	148.07	301.69	82.53	56.36	763.17	100.00	0.52
Percent	22.87	19.40	39.53	10.81	7.38	100.00	22.02	
URI (2021)		0.52						

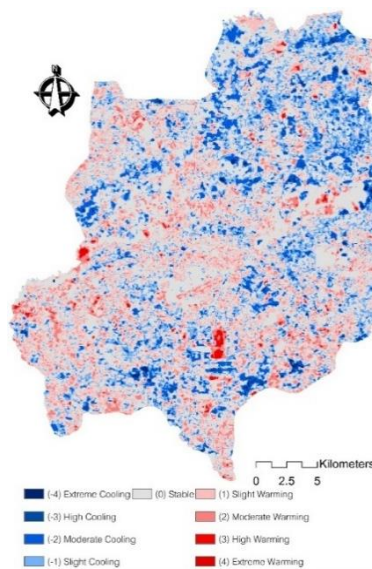


Figure 8 Spatial distribution of Temperature Grade Change Index (TGCI) indicating thermal trends between 2007 and 2021

2 พลวัตความร้อนที่เปลี่ยนไปตามฤดูกาลและสิ่งปกคลุมดิน (Seasonal Dynamics of Thermal Behavior)

การประยุกต์ใช้สถิติ Welch's ANOVA และ Games-Howell แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมทางความร้อนที่ซ่อนอยู่ โดยพบว่าในปฐาน (ค.ศ. 2007) ซึ่งเป็นตัวแทนของฤดูแล้งจัด พื้นที่เมืองและพื้นที่ป่าไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิอย่างมีนัยสำคัญ ปรากฏการณ์นี้สอดคล้องกับบริบทของป่าเขตร้อนแบบผลัดใบที่เมื่อขาดน้ำจะมีความจุความร้อนใกล้เคียงกับวัสดุเมือง ในขณะที่ปี ค.ศ. 2021 ความชื้นที่สูงขึ้นช่วยฟื้นฟูสภาพการระบายความร้อนของป่าไม้ ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่าง เมือง (ร้อน) และ ป่า (เย็น) อย่างชัดเจนถึง 2.99 องศาเซลเซียส

ผลการวิเคราะห์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยระดับนานาชาติหลายชิ้น เช่น Deng *et al.* (2018), Guechi *et al.* (2021), และ Njoku & Tenenbaum, (2022) ที่ยืนยันว่าพื้นที่เมืองและพื้นที่เบ็ดเตล็ดมีแนวโน้มที่จะมีค่า LST สูงกว่าประเภทการใช้ที่ดินอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากคุณสมบัติการสะท้อนแสงสูงและการปกคลุมของพืชพรรณ นอกจากนี้ การลดลงของพื้นที่ป่าไม้ในการศึกษานี้ยังสะท้อนถึงการสูญเสียกลไกกันชนทางธรรมชาติ (Natural Buffer) ที่ช่วยลดความร้อนซึ่ง Teuling *et al.*, (2010) ได้ย้ำถึงบทบาทสำคัญของป่าไม้ในการเป็นพื้นที่กันชนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ

3 ความสัมพันธ์ของดัชนีชี้วัดและการจัดการเมือง (Indices Correlation & Urban Management)

ผลการวิเคราะห์หัตถดอยืนยันว่า NDBI เป็นตัวแปรที่มีอิทธิพลเชิงบวกต่ออุณหภูมิสูงสุด ในขณะที่ MNDWI และ NDVI มีอิทธิพลเชิงลบในการช่วยลดความร้อน ข้อค้นพบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในต่างประเทศ เช่น แอฟริกาและยุโรป ที่พบว่ารูปแบบทางกายภาพของเมืองและสัดส่วนพื้นที่สีเขียวมีอิทธิพลต่อการกระจายตัวของอุณหภูมิพื้นผิว (Mushore *et al.*, 2019; Baró *et al.*, 2015)

นัยสำคัญเชิงนโยบายจากการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าการวางผังเมืองนครราชสีมาควรให้ความสำคัญกับการเพิ่มพื้นที่สีเขียวและพื้นที่แหล่งน้ำ (Blue-Green Infrastructure) เพื่อเป็นกลยุทธ์หลักในการบรรเทาผลกระทบเกาะความร้อน โดยเฉพาะในบริเวณที่มีการขยายตัวของเมืองใหม่และพื้นที่เบ็ดเตล็ดที่มีความเสี่ยงต่อการสะสมความร้อนสูง สอดคล้องกับแนวคิดการพัฒนาเมืองยั่งยืนที่เน้นการใช้ประโยชน์จากบริการของระบบนิเวศในการควบคุมภูมิอากาศระดับจุลภาค

Conclusions

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน กับพลวัตของอุณหภูมิพื้นผิวและปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเมืองในเขตอำเภอเมืองนครราชสีมา ระหว่างปี ค.ศ. 2007 ถึง ค.ศ. 2021 โดยประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ข้อมูลดาวเทียมมาตรฐานระดับที่ 2 ร่วมกับการวิเคราะห์ทางสถิติขั้นสูง ผลการศึกษาสามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้

การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมืองในช่วงเวลา 15 ปี พื้นที่ศึกษาเผชิญกับกระบวนการกลายเป็นเมืองอย่างรวดเร็ว โดยพื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้างมีการขยายตัวเพิ่มขึ้นสุทธิ 73.66 ตร.กม. (คิดเป็นอัตราการเติบโตร้อยละ 34.46 จากปีฐาน) การขยายตัวนี้เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนสภาพของพื้นที่เกษตรกรรมและพื้นที่เบ็ดเตล็ดเป็นหลัก ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้ลดลงเกือบร้อยละ 50 สะท้อนถึงการสูญเสียพื้นที่สีเขียวและพื้นที่รับน้ำตามธรรมชาติอย่างมีนัยสำคัญ

พลวัตของอุณหภูมิและเกาะความร้อน ผลการทดสอบทางสถิติ (Welch's ANOVA) ยืนยันว่าการเปลี่ยนแปลงการใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินส่งผลโดยตรงต่อระบบความร้อนของเมือง แม้ว่าอุณหภูมิพื้นผิวเฉลี่ยโดยรวมในปี ค.ศ. 2021 จะลดลงเนื่องจากอิทธิพลของความชื้นจากปรากฏการณ์ลานีญา แต่ความเข้มข้นของเกาะความร้อน (UHI Intensity) กลับทวีความรุนแรงขึ้นในเชิงโครงสร้าง โดยพบว่าความแตกต่างของอุณหภูมิจากพื้นที่เมืองและพื้นที่ป่าไม้เพิ่มสูงขึ้นอย่างชัดเจน (ผลต่างเฉลี่ย 2.99 องศาเซลเซียส) เมื่อเทียบกับปีฐานที่ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ พื้นที่ระดับอุณหภูมิสูงมาก ยังคงขยายตัวเพิ่มขึ้นครอบคลุมพื้นที่ 56.36 ตร.กม. สอดคล้องกับทิศทางการขยายตัวของเมือง

ปัจจัยกำหนดความร้อน การวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงพื้นที่บ่งชี้ว่า NDBI เป็นปัจจัยหลักที่เร่งให้เกิดการสะสมความร้อน ในขณะที่ MNDWI และ NDVI มีบทบาทสำคัญในการลดอุณหภูมิพื้นผิว

ผลการศึกษานี้มีนัยสำคัญต่อการกำหนดนโยบายการจัดการเมืองในอนาคต ผู้วิจัยขอเสนอแนะแนวทางเชิงปฏิบัติ ดังนี้ ประการแรก ควรมีการกำหนดมาตรการทางผังเมืองเพื่อควบคุมการขยายตัวในแนวราบ และส่งเสริมการพัฒนาเมืองแบบกะชับ (Compact City) เพื่อลดการเปลี่ยนสภาพพื้นผิวระบายความร้อน ประการที่สอง ควรมุ่งเน้นการเพิ่มพื้นที่สีเขียวและพื้นที่แหล่งน้ำ (Blue-Green Infrastructure)แทรกซึมเข้าไปในเขตเมืองหนาแน่น เนื่องจากผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสเปกตรัมยืนยันแล้วว่าเป็นกลไกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดอุณหภูมิ และ ประการสุดท้าย สำหรับการพัฒนาระบบใหม่ ควรส่งเสริมการใช้วัสดุที่มีค่าการสะท้อนความร้อนสูง (Cool Materials) เพื่อลดการกักเก็บความร้อนของอาคารและสิ่งปลูกสร้าง ซึ่งจะเป็นกุญแจสำคัญในการสร้างเสริมความยืดหยุ่นของเมืองต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศในระยะยาว

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดที่ควรพิจารณา กล่าวคือ การใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat ที่มีความละเอียดจุดภาพ 30 เมตร อาจมีข้อจำกัดในการจำแนกความซับซ้อนของวัสดุเมืองในระดับจุลภาค (Micro-scale) นอกจากนี้ การศึกษานี้เน้นการวิเคราะห์ในมิติระนาบ (2D) โดยยังมิได้นำปัจจัยความสูงของอาคารและรูปทรงสามมิติของเมือง (3D Urban Structure) ซึ่งมีผลต่อการเกิดเงาและการระบายอากาศมาพิจารณาร่วมด้วย ดังนั้น งานวิจัยในอนาคตควรพิจารณาประยุกต์ใช้ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมความละเอียดสูง หรือบูรณาการข้อมูล LiDAR เพื่อจำลองแบบจำลองเมืองสามมิติ ซึ่งจะช่วยในการประเมินพลวัตความร้อนในเขตเมืองมีความละเอียดและแม่นยำยิ่งขึ้น

Acknowledgments

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินงบประมาณแผ่นดิน: กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (กองทุน ววน.) : งบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรม ประเภท Fundamental Fund ประจำปีงบประมาณ 2565 รหัสโครงการ 165563

References

- Anselin, L., Syabri, I., & Kho, Y. (2006). GeoDa: An introduction to spatial data analysis. *Geographical Analysis*, 38(1), 5–22. <https://doi.org/10.1111/j.0016-7363.2005.00671.x>
- Alberti, M., Marzluff, J. M., Shulenberger, E., Bradley, G., Ryan, C., & Zumbunnen, C. (2008). Integrating humans into ecology: Opportunities and challenges for studying urban ecosystems. *Urban Ecology: An International Perspective on the Interaction Between Humans and Nature*, 53(12), 143–158.
- Andersson, E. (2006). Urban landscapes and sustainable cities. *Ecology and Society*, 11(1). <https://doi.org/10.5751/ES-01639-110134>
- Baró, F., Haase, D., Gómez-Baggethun, E., & Frantzeskaki, N. (2015). Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: A quantitative assessment in five European cities. *Ecological Indicators*, 55, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.013>.
- Basara, J. B., Basara, H. G., Illston, B. G., & Crawford, K. C. (2010). The impact of the Urban Heat Island during an intense heat wave in Oklahoma City. *Advances in Meteorology*, 2010, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2010/230365>

- Chotchaiwong, P., & Wijitkosum, S. (2019). Relationship between land surface temperature and land use in Nakhon Ratchasima City, Thailand. *Engineering Journal*, 23(4), 1–14.
<https://doi.org/10.4186/ej.2019.23.4.1>
- Cook, M., Schott, J. R., Mandel, J., & Raqueno, N. (2014). Development of an operational calibration methodology for the Landsat thermal data archive and initial testing of the atmospheric compensation component of a Land Surface Temperature Product. *Remote Sensing*, 6(11), 11244-11266.
- Cui, L., & Shi, J. (2012). Urbanization and its environmental effects in Shanghai, China. *Urban Climate*, 2, 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2012.10.008>
- Curran, P. J. (1985). Principles of Remote Sensing. Longman, London.
- Dan, S., Xu, H., Xue, W., He, J., & Dan, B. (2010). Comparison and analysis of research methods for urban heat island effect based on Landsat TM6. *2010 2nd IITA International Conference on Geoscience and Remote Sensing (IITA-GRS 2010)*, 1, 161–164. <https://doi.org/10.1109/IITA-GRS.2010.5602992>
- Deng, X., Zhao, C., & Yan, H. (2013). Systematic modeling of impacts of land use and land cover changes on regional climate: A review. *Advances in Meteorology*, 2013, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2013/317678>
- Deng, Y., Wang, S., Bai, X., Tian, Y., Wu, L., Xiao, J., Chen, F., & Qian, Q. (2018). Relationship among land surface temperature and LUCC, NDVI in typical karst area. *Scientific Reports*, 8(1), 641.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-19088-x>
- Fitzpatrick-Lins, K. (1981). Comparison of sampling procedures and data analysis for a land-use and land-cover map. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 47(3), 343-351.
- Guechi, I., Gherraz, H., & Alkama, D. (2021). Correlation analysis between biophysical indices and Land Surface Temperature using remote sensing and GIS in Guelma city (Algeria). *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*. <https://doi.org/10.25518/0037-9565.10457>.
- Guha, S., Govil, H., Gill, N., & Dey, A. (2020). Analytical study on the relationship between land surface temperature and land use/land cover indices. *Annals of GIS*, 26(2), 201–216.
<https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1754291>

- Kalnay, E., & Cai, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 423(6939), 528–531.
<https://doi.org/10.1038/nature01675>
- Khamchiangta, D., & Dhakal, S. (2020). Time series analysis of land use and land cover changes related to urban heat island intensity: Case of Bangkok Metropolitan Area, Thailand. *Journal of Urban Management*, 9(4), 383-395.
- Kometa, S. S., & Akoh, N. R. (2012). The hydro-geomorphological implications of urbanisation in Bamenda, Cameroon. *Journal of Sustainable Development*, 5(6). <https://doi.org/10.5539/jsd.v5n6p64>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159–174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lin, Y. P., Lin, Y. Bin, Wang, Y. T., & Hong, N. M. (2008). Monitoring and predicting land-use changes and the hydrology of the urbanized Paochiao watershed in Taiwan using remote sensing data, urban growth models and a hydrological model. *Sensors*, 8(2), 658–680. <https://doi.org/10.3390/s8020658>
- Lundholm, J. T., & Richardson, P. J. (2010). Habitat analogues for reconciliation ecology in urban and industrial environments. *Journal of Applied Ecology*, 47(5), 966–975. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01857.x>
- McCarthy, M. P., Best, M. J., & Betts, R. A. (2010). Climate change in cities due to global warming and urban effects. *Geophysical Research Letters*, 37(9). <https://doi.org/10.1029/2010GL042845>
- Meechai, W., Khonkaen, P., Chuesaard, T., et al. (2025). Impacts of El Niño and La Niña Phenomena on Land Surface Temperature Changes Due to Different Land Uses in Phrae Province. *Thai Forest Ecological Research Journal*, 9(1), 93-110. (in Thai)
- Mushore, T. D., Dube, T., Manjowe, M., Gumindoga, W., Chemura, A., Rousta, I., Odindi, J., & Mutanga, O. (2019). Remotely sensed retrieval of Local Climate Zones and their linkages to land surface temperature in Harare metropolitan city, Zimbabwe. *Urban Climate*, 27, 259–271.

- Nakhon Ratchasima Provincial Office. (2020). *Nakhon Ratchasima Provincial Development Plan 2018–2022. Revised edition, fiscal year 2022. Strategy and Information for Provincial Development Group*. Nakhon Ratchasima Provincial Office. (in Thai)
- Njoku, E. A., & Tenenbaum, D. E. (2022). Quantitative assessment of the relationship between land use/land cover (LULC), topographic elevation and land surface temperature (LST) in Ilorin, Nigeria. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 27, 100780. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100780>
- Ongsomwang, S., Dasananda, S., & Prasomsup, W. (2018). Spatio-Temporal Urban Heat Island Phenomena Assessment using Landsat Imagery: A Case Study of Bangkok Metropolitan and its Vicinity, Thailand. *Environment and Natural Resources Journal* 2018, 16(2), 29-44.
- Saha, S., Saha, A., Das, M., Saha, A., Sarkar, R., & Das, A. (2021). Analyzing spatial relationship between land use/land cover (LULC) and land surface temperature (LST) of three urban agglomerations (UAs) of Eastern India. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100507. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100507>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., Zarco-Tejada, P. J., Sepulcre-Cantó, G., & de Miguel, E. (2006). Land surface temperature derived from airborne hyperspectral scanner thermal infrared data. *Remote Sensing of Environment*, 102(1–2), 99–115. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.001>
- Stow, D. A., & Chen, D. M. (2002). Sensitivity of multitemporal NOAA AVHRR data of an urbanizing region to land-use/land-cover changes and misregistration. *Remote Sensing of Environment*, 80(2), 297–307. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00311-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00311-X)
- Tan, J., Yu, D., Li, Q., Tan, X., & Zhou, W. (2020). Spatial relationship between land-use/land-cover change and land surface temperature in the Dongting Lake area, China. *Scientific Reports*, 10(1), 9245. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66168-6>
- Teuling, A. J., Seneviratne, S. I., Stöckli, R., Reichstein, M., Moors, E., Ciais, P., Luyssaert, S., van den Hurk, B., Ammann, C., Bernhofer, C., Dellwik, E., Gianelle, D., Gielen, B., Grünwald, T., Klumpp, K., Montagnani, L., Moureaux, C., Sottocornola, M., & Wohlfahrt, G. (2010). Contrasting response of European forest and

- grassland energy exchange to heatwaves. *Nature Geoscience*, 3(10), 722–727.
<https://doi.org/10.1038/ngeo950>
- Thai Meteorological Department. (2022). *El Niño/La Niña Monitoring Report (February 21, 2022)*. Meteorological Development Division.
- Thai Meteorological Department. (2023). *Climatological data of Thailand for 30 year period (1991–2020)* (Meteorological Data Report No. 551.586-13-2023). Bangkok: Thai Meteorological Department.
- The jamovi project (2024). *jamovi*. (Version 2.6) [Computer Software]. <https://www.jamovi.org>.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- U.S. Geological Survey. (2021). *Landsat Collection 2 Level-2 Science Products* (USGS Fact Sheet 2021-3055). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/fs20213055>
- 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)
- Welch, B. L. (1951). On the comparison of several mean values: An alternative approach. *Biometrika*, 38(3/4), 330–336. <https://doi.org/10.2307/2332579>
- Xu, H. (2006). Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3025–3033.
<https://doi.org/10.1080/01431160600589179>
- Xu, H. Q., & Chen, B. Q. (2004). Remote sensing of the urban heat island and its changes in Xiamen City of SE China. *Journal of Environmental Sciences*, 16, 276–281.
- Yao, X., Wang, Z., & Wang, H. (2015). Impact of urbanization and land-use change on surface climate in middle and lower reaches of the Yangtze River, 1988–2008. *Advances in Meteorology*, 2015, 1–10.
<https://doi.org/10.1155/2015/395094>

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.

Zhao, H. Y., Guo, J. Q., Zhang, C. J., Sun, L. D., Zhang, X. D., Lin, J. J., Wang, Y. H., Fang, F., Ma, P. L., Liu, C. H., Li, Y. C., Fang, J. G., Li, L., Li, H. M., Zheng, G. F., Deng, Z. Y., & Dong, A. X. (2014). Climate change impacts and adaptation strategies in Northwest China. *Advances in Climate Change Research*, 5(1), 7-16.

Zhao, S., Peng, C., Jiang, H., Tian, D., Lei, X., & Zhou, X. (2006). Land use change in Asia and the ecological consequences. *Ecological Research*, 21(6), 890-896. <https://doi.org/10.1007/s11284-006-0048-2>