



บทความวิจัย

การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง ด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย

ธีรพร ชื่นพี

ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยुरติกานต์ จันทรวีกรณ์*

สาขาวิชาภูมิสารสนเทศ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 09 2543 2096 อีเมล: yuratikan@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.03.004

รับเมื่อ 8 สิงหาคม 2566 แก้ไขเมื่อ 31 ตุลาคม 2566 ตอรับเมื่อ 26 ธันวาคม 2566 เผยแพร่ออนไลน์ 7 มีนาคม 2567

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

เทคนิคการทำแผนที่ดิจิทัลดินได้นำมาใช้เพื่อประเมินการกระจายความเค็มของดิน วิธีนี้สามารถทำนายความเค็มของดินในพื้นที่ขนาดใหญ่ด้วยแบบจำลองค่าการนำไฟฟ้า และตัวแปรสิ่งแวดล้อม ซึ่งการวิจัยในครั้งนี้ใช้เทคนิค DSM สำหรับการจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง พ.ศ. 2566 ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 ภาพถ่ายจาก UAV และการวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยสกัดปัจจัยตามหลัก SCORPAN และหลอมรวมจุดภาพด้วยการสอบเทียบดัชนี NDVI ด้วยสมการถดถอยเชิงเส้นตามลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน หลังจากนั้นจึงนำปัจจัยการเกิดความเค็มของดินที่ผ่านการสกัดทั้ง 23 ตัวแปร มาวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สันและขีดความซ้ำซ้อนของตัวแปร ทำให้ได้แบบจำลองถดถอยที่ประกอบด้วย 10 ตัวแปร ผลการวิจัยพบว่า แผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินมีค่าการนำไฟฟ้า 0.06 ถึง 13.61 เดซิซีเมนต่อเมตร พบความเค็มในระดับเค็มเล็กน้อยมากที่สุดในพื้นที่ราบ และที่ราบลอนลาด คิดเป็นพื้นที่ 672.52 ตารางกิโลเมตร ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการติดตามปัญหาความเค็มในแม่น้ำชีของกรมพัฒนาที่ดินและกรมควบคุมมลพิษ อีกทั้งแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินสามารถระบุค่าการนำไฟฟ้าและสถานะของความอุดมสมบูรณ์ของดินได้อีกด้วย ทั้งนี้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการบริหารจัดการพื้นที่ศึกษาสามารถนำข้อมูลการกระจายตัวความเค็มของดินไปใช้ประโยชน์ ปรับปรุง พื้นฟู และติดตามความอุดมสมบูรณ์ของดินได้

คำสำคัญ: แผนที่ดิจิทัลดิน ดินเค็ม ภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 อากาศยานไร้คนขับ

การอ้างอิงบทความ: ธีรพร ชื่นพี และ ยुरติกานต์ จันทรวีกรณ์, “การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง ด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย,” วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, ปีที่ 35, ฉบับที่ 2, หน้า 1-17, เลขที่บทความ 252-097032, เม.ย.-มิ.ย. 2568.



Digital Mapping of Soil Salinization in the Dry Season Based on Sentinel-2 and Unmanned Aerial Vehicle images in Chatturat District, Chaiphum, Thailand

Theeraporn Chuenpee

Department of Geography, Faculty of Social Science, Kasetsart University, Bangkok, Thailand

Yuratikan Jantaravikorn*

School of Geoinformatics, Institute of Science, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 09 2543 2096, E-mail: yuratikan@yahoo.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2024.03.004

Received 8 August 2023; Revised 31 October 2023; Accepted 26 December 2023; Published online: 7 March 2024

© 2025 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Digital soil mapping techniques were used to assess soil salinity distribution. This method can predict soil salinity over large areas by modeling electrical conductivity and environmental variables. This research uses the DSM technique to digitally map soil salinity in the 2023 dry season in Chatturat District, Chaiphum Province, using Sentinel-2 satellite images, UAV images, and electrical conductivity measurements. In consistent with the SCORPAN principles, factors are extracted, and image points are fused with NDVI index calibration using linear regression equations based on land use characteristics. Then, the extracted soil salinity factors of 23 variables were analyzed by Pearson correlation, and the redundancy of variables was eliminated. The regression model consisted of 10 variables. The results show the digital map of soil salinity has an electrical conductivity of 0.0564 to 13.6099 decimeters per meter. The majority of flat regions and shallowly undulating plains (672.52 square kilometers) have slightly salinity levels. This is consistent with the report on monitoring the Chi River salinity problem by the Land Development Department and the Pollution Control Department. Digital soil salinity maps can indicate the electrical conductivity and state of soil fertility. The distribution of soil salinity can be used by the agencies in charge of managing the study area to monitor, restore and improve soil fertility.

Keywords: Digital Soil Map, Soil Salinity, Sentinel-2, Unmanned Aerial Vehicle

Please cite this article as: T. Chuenpee and Y. Jantaravikorn, "Digital mapping of soil salinization in the dry season based on sentinel-2 and unmanned aerial vehicle images in Chatturat district, Chaiphum, Thailand," *The Journal of KMUTNB*, vol. 35, no. 2, pp. 1-17, ID. 252-097032, Apr.-Jun. 2025 (in Thai).

1. บทนำ

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีพื้นที่ทำการเกษตรสูงที่สุดในประเทศ รวมพื้นที่เพาะปลูกกว่า 60 ล้านไร่ แต่มีอัตราการขยายตัวของผลผลิตด้านการเกษตรต่ำที่สุด เนื่องจากประสบปัญหาเรื่องคุณภาพดิน ซึ่งปัญหาหลักที่พบในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คือ ปัญหาดินเค็ม โดยเฉพาะในพื้นที่แอ่งโคราช และแอ่งสกลนคร โดยมีสาเหตุมาจากการที่มีเกลือหินแทรกอยู่ในหมวดหินมหาสารคาม ซึ่งครอบคลุมพื้นที่กว่า 30.4 ล้านไร่ [1] ดินเค็มเป็นดินที่มีลักษณะโครงสร้างของดินที่เสียและแน่นทึบ โดยการเกิดดินเค็มมักพบในพื้นที่ลุ่มที่ใช้ในการปลูกข้าว ซึ่งความเค็มเหล่านี้มีผลกระทบต่อข้าวและพืชที่ใช้เป็นอาหารทำให้ผลผลิตลดลง นอกจากนี้ความเค็มยังสามารถแพร่สู่แหล่งน้ำธรรมชาติ อ่างเก็บน้ำ และน้ำใต้ดินได้ด้วย และส่งผลกระทบต่อพืช สัตว์ และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ในระบบนิเวศเช่นกัน ซึ่งปัญหาเหล่านี้จะส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางด้านอาหาร และการพัฒนาของภูมิภาค ทั้งนี้ยังพบว่า มีแนวโน้มการแพร่กระจายของดินเค็มที่เพิ่มขึ้นทุกปี ทำให้พื้นที่ทำการเกษตรลดลง

กรมพัฒนาที่ดิน [2] รายงานการแพร่กระจายของคราบเกลือในฤดูแล้ง บริเวณลุ่มน้ำลำคั่นฉู อำเภोजัดจรัส จังหวัดชัยภูมิว่าพื้นที่กว่า 145 ตารางกิโลเมตร ส่วนใหญ่ปรากฏคราบเกลือบริเวณริมฝั่งลำน้ำคั่นฉู ซึ่งช่วงเวลาที่พบคราบเกลือชัดที่สุด คือ ช่วงฤดูแล้ง สอดคล้องกับการรายงานการติดตามปัญหาความเค็มแม่น้ำชีของกรมควบคุมมลพิษ ใน พ.ศ. 2564 [3] ช่วงเดือนเมษายน-พฤษภาคม พ.ศ. 2564 (ปลายฤดูแล้ง) ว่าพบค่าความเค็มสูงผิดปกติรอบบึงละหาน ซึ่งมีค่าการนำไฟฟ้าช่วง 1.27-4.75 เดซิซีเมนต่อเมตร โดยมีสาเหตุมาจากตะกอนดินเค็มถูกพัดพาไหลลงสู่ลำน้ำชีในปริมาณมาก

ดินเค็ม คือ ดินที่มีปริมาณเกลือสูงจนส่งผลกระทบต่อ การเจริญเติบโตของพืช ซึ่งพิจารณาได้จากค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายสกัดจากดินที่อิ่มตัวด้วยน้ำ (ECe) มากกว่า 4 เดซิซีเมนต่อเมตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส [4] โดยการจำแนกระดับความเค็มของดินที่มีผลกระทบต่อพืช ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ระดับความเค็มของดินและผลกระทบต่อพืช

ECe (เดซิซีเมนต่อเมตร)	ปริมาณเกลือ (%)	ระดับ	ผลกระทบต่อพืช
< 2	< 0.1	ไม่เค็ม	ไม่มีผลกระทบต่อพืช
2-4	0.1-0.2	เค็มเล็กน้อย	พืชที่มีความไวต่อความเค็มมีการเจริญเติบโตลดลงเล็กน้อย
4-8	0.2-0.4	เค็มปานกลาง	จำกัดการเจริญเติบโตของพืชหลายชนิด
8-16	0.4-0.8	เค็มมาก	พืชทนเค็มเท่านั้นที่เจริญเติบโตได้ดี
>16	>0.8	เค็มจัด	พืชทนเค็มบางชนิดเท่านั้นที่เจริญเติบโตได้ดี

ที่มา: [5]

การสำรวจระยะไกลด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับการวิเคราะห์ความเค็มของดิน เนื่องจากการได้มาของข้อมูลที่รวดเร็ว ไม่ทำลายสภาพพื้นที่สำรวจ มีประสิทธิภาพ และสามารถสำรวจพื้นที่บริเวณกว้างระดับภูมิภาคได้ ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจาก UAV ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงความเค็มของดินบริเวณสามเหลี่ยมปากแม่น้ำเหลืองของประเทศจีน โดย Zhang [6] พบว่า พื้นที่การเกิดดินเค็มจำแนกตามประเภทการใช้ประโยชน์ที่ดิน ได้แก่ พื้นที่รกร้าง พื้นที่ทุ่งหญ้า พื้นที่ป่าไม้ และพื้นที่เพาะปลูก โดยมักพบพื้นที่ดินเค็มระดับรุนแรงในพื้นที่รกร้าง นอกจากนี้ความเค็มของดินยังมีความสัมพันธ์กับความชื้นในดินด้วยเช่นกัน

ปัจจัยที่มีความสัมพันธ์ต่อการเกิดความเค็มของดินตามแบบจำลอง SCORPAN ทั้ง 7 ตัวแปร ที่สัมพันธ์กับการจัดทำแผนที่ดิจิทัลดินเค็ม สรุปได้ว่า 1) คุณลักษณะดิน (Soil; S) ซึ่งใช้บ่งบอกคุณสมบัติความเค็มของดิน เช่น ข้อมูลการสะท้อนของแบนด์ภาพถ่ายจากดาวเทียม คุณสมบัติทางกายภาพ และเคมีของดิน 2) สภาพภูมิอากาศ (Climate; C)



ใช้กำหนดขอบเขตภูมิอากาศสำหรับพืช ความชื้นในดิน และการตกตะกอนของเกลือในชั้นดิน 3) ปัจจัยทางชีวภาพ (Organism; O) ซึ่งเกี่ยวข้องกับสิ่งมีชีวิตหลักที่เปลี่ยนแปลงดิน คือ พืชและมนุษย์ โดยข้อมูลที่ใช้เป็นตัวแทนคือ ประเภทพืชพรรณ การใช้ประโยชน์ที่ดิน สิ่งปกคลุมดิน และสภาพสะท้อนของแสงอินฟราเรด 4) สภาพภูมิประเทศ (Relief; R) ใช้คุณลักษณะภูมิประเทศจากข้อมูลของแบบจำลองความสูงดิจิทัล 5) วัสดุต้นกำเนิดดิน (Parent Material; P) ซึ่งเป็นองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุต้นกำเนิดดิน ใช้ในการอธิบายกระบวนการผุ่ร่อนและคุณสมบัติของดิน 6) อายุหรือเวลา (Age or Time; A) เป็นระยะการพัฒนาของดิน อัตราการก่อตัวของดินแนวตั้ง โดยพื้นที่ศึกษานี้มีเพียงหมวดหินมหาสารคามชนิดเดียวจึงตัดตัวแปรวัสดุต้นกำเนิดดินและอายุของดินออก เนื่องจากมีปัจจัยการเกิดดินที่เหมือนกัน และ 7) ตำแหน่งเชิงพื้นที่หรือตำแหน่งสัมพัทธ์ (Spatial or Relative Position; N) ตำแหน่งเชิงพื้นที่ในที่นี้ คือ พิกัดของพื้นที่ศึกษาทั้งหมด และการสร้างแบบจำลองของพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่ราบ เป็นปัจจัยตำแหน่งเชิงพื้นที่ที่ไม่ถูกนำมาคิดเช่นเดียวกับปัจจัยวัสดุต้นกำเนิดดิน และอายุของดิน [7]

แนวคิดของแบบจำลอง SCORPAN เป็นกรอบการทำงานสำหรับการทำแผนที่ระดับภูมิประเทศของ Kienast - Brown [8] ที่ระบุว่าคุณลักษณะสำคัญของแบบจำลองที่ใช้สำหรับจัดทำแผนที่ดินดิจิทัล ประกอบด้วย 1) การจำแนกปัจจัยต่าง ๆ ไม่จำเป็นต้องเป็นอิสระจากกัน อาจมีการกำหนดให้เป็นตัวแปรร่วม 2) คุณสมบัติของดินอื่น ๆ ถือเป็นตัวแปรร่วม 3) คุณสมบัติเฉพาะของแหล่งกำเนิดดิน และคุณลักษณะเชิงปริมาณที่สัมพันธ์กับหน้าที่ของตัวแปร SCORPAN อาจได้จากข้อมูลการสำรวจระยะไกล หรือเซนเซอร์ที่สามารถวัดคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องนั้น ๆ ได้ สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ได้รวบรวมตัวแปร 23 ตัวแปร ที่สัมพันธ์กับการเกิดความเค็มของดินที่นิยมใช้มากจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (ตารางที่ 3)

การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ เป็นการบูรณาการข้อมูลแผนที่พื้นฐานร่วมกับเทคโนโลยีการถ่ายภาพ

จากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจาก UAV รวมไปถึงการสำรวจ เก็บตัวอย่างดิน และการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการประเมินระดับความเค็มของดิน และระบุปัจจัยที่ก่อให้เกิดการแพร่กระจายของความเค็ม ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาองค์ความรู้ด้านภูมิสารสนเทศ การปรับปรุงฟื้นฟูความอุดมสมบูรณ์ของดิน การใช้ที่ดินและนโยบายการบริหารจัดการด้านสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 ขอบเขตการวิจัย

2.1.1 ขอบเขตเชิงระยะเวลา

ช่วงฤดูแล้ง ระหว่างวันที่ 20 กุมภาพันธ์ ถึง 6 มีนาคม พ.ศ. 2566 (ปลายฤดูหนาวถึงต้นฤดูร้อน)

2.1.2 ขอบเขตเชิงพื้นที่

พื้นที่ศึกษาครอบคลุม 9 ตำบล ในเขตอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ขนาดพื้นที่ 680.01 ตารางกิโลเมตร ลักษณะภูมิประเทศทั่วไป มีความลาดเอียงจากฝั่งตะวันตกเฉียงเหนือไปทางฝั่งตะวันออกเฉียงเหนือ สภาพพื้นที่ทั่วไปเป็นพื้นที่ราบฝั่งแม่น้ำ มีความสูงจากระดับทะเลปานกลาง 100-300 เมตร และที่ราบลอนลาด (Undulating Plains) ในแนวเหนือ-ใต้ ซึ่งเกิดขนานแนวเทือกเขาตงพญาเย็น มีลำคันทูซึ่งเป็นลำน้ำสำคัญไหลผ่านในพื้นที่ศึกษา และมีบึงละหานเป็นแหล่งกักเก็บน้ำขนาดใหญ่ ขนาดพื้นที่ 29.09 ตารางกิโลเมตร

สภาพภูมิอากาศจังหวัดชัยภูมิ ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ และมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ มีฤดูกาล 3 ฤดูกาล ได้แก่ ฤดูร้อน เริ่มตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงเดือนพฤษภาคม ฤดูฝนเริ่มตั้งแต่เดือนมิถุนายนถึงเดือนตุลาคม และฤดูหนาวเริ่มตั้งแต่เดือนพฤศจิกายนถึงเดือนกุมภาพันธ์ อุณหภูมิสูงสุดเฉลี่ย 33.1 องศาเซลเซียส

ทรัพยากรดินของพื้นที่ศึกษา ประกอบด้วยเนื้อดิน 3 ชนิด ประกอบด้วย 1) ดินร่วน ครอบคลุมพื้นที่ 342.41 ตารางกิโลเมตร 2) ดินร่วนปนเหนียว ครอบคลุมพื้นที่ 258.73 ตารางกิโลเมตร และ 3) ดินร่วนปนทราย ครอบคลุมพื้นที่ 42.43 ตารางกิโลเมตร การผุพังของดิน ในอำเภอจตุรัสได้รับอิทธิพลมาจากแม่น้ำชีทำให้เกิดเป็นภูมิลักษณะพื้นผิว

ลักษณะเกือบราบ สำหรับการประเมินการใช้ประโยชน์ที่ดิน ประจำปี พ.ศ. 2562 ของอำเภอจตุรัส พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่การเกษตรเพาะปลูกข้าวและพืชไร่ เช่น อ้อย และมันสำปะหลัง ซึ่งครอบคลุมพื้นที่รวม 523.22 ตารางกิโลเมตร พื้นที่รกร้างและพื้นที่เบ็ดเตล็ด 41.44 ตารางกิโลเมตร พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง 39.72 ตารางกิโลเมตร พื้นที่เพาะปลูกไม้ยืนต้น และทำการเกษตรประเภทอื่น ๆ 28.85 ตารางกิโลเมตร พื้นที่แหล่งน้ำ 30.91 ตารางกิโลเมตรและพื้นที่ป่าไม้ 15.87 ตารางกิโลเมตร [9]

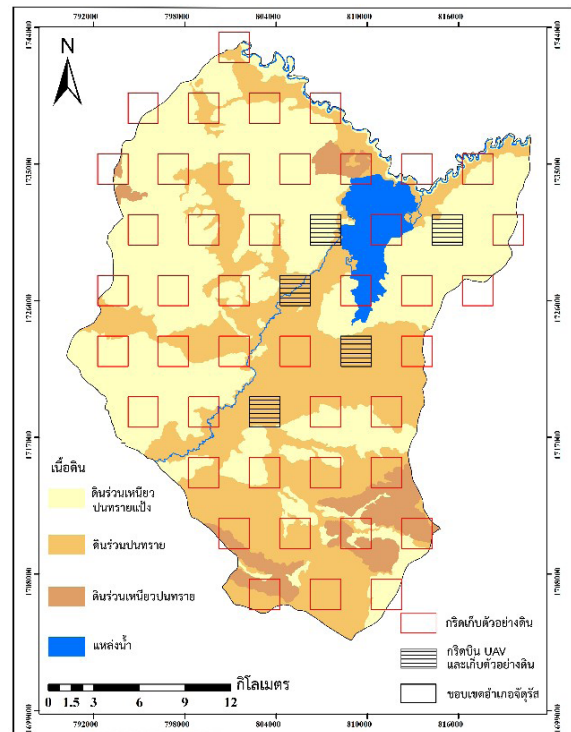
2.2 ข้อมูลและแหล่งข้อมูล

2.2.1 ข้อมูลค่าการนำไฟฟ้า (EC)

การกำหนดจำนวนกริดที่ใช้ในการสำรวจนี้ได้ทำการสุ่มประมาณการตามหลักการการสำรวจแบบค่อนข้างหายาบบ [8] ตามการจัดทำแผนที่มาตราส่วนระหว่าง 1 : 40,000 ถึง 1 : 100,000 หรือแผนที่จากภาพถ่ายทางอากาศหรือภาพถ่ายจากดาวเทียมที่ทำการตรวจสอบดินในสนาม โดยกำหนดปริมาณจุดเก็บตัวอย่างไว้ 1–2 ตารางกิโลเมตร ต่อ 1 จุด ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการสำรวจภาคสนามกระจายทั้งพื้นที่ด้วยการกำหนดตำแหน่งกริดแบบไม่จัดแนวอย่างเป็นระบบ ขนาดพื้นที่ 2 ตารางกิโลเมตร พร้อมทั้งวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าของดินจำนวน 48 กริด จากชั้นดินบนที่ระดับความลึก 0–30 เซนติเมตร (รูปที่ 1)

2.2.2 ข้อมูลภาพจากอากาศยานไร้คนขับ

การบินถ่ายภาพจากอากาศยานไร้คนขับด้วย DJI รุ่น P4 Multispectral ในวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2566 กำหนดรูปแบบการบินแบบทั่วไป หรือแนวบินวนกลับ ค่าความละเอียดของจุดภาพบนพื้นดิน (GSD) เท่ากับ 5 เซนติเมตรต่อจุดภาพ ความสูงบิน 150 เมตร ส่วนซ้อนระหว่างภาพ (Overlap) 80% และส่วนซ้อนระหว่างแนวบิน (Sidelap) 60% ประมวลผลภาพด้วยโปรแกรม Pix4D Mapper เวอร์ชัน 3.0.13 โดยพื้นที่การบินสำรวจ 5 กริด ตามสภาพการใช้ประโยชน์ที่ดินของอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ แบ่งเป็น 3 ประเภท คือ พื้นที่เปิดโล่งที่มีบางส่วนปกคลุมด้วยคราบเกลือบนผิวดิน พื้นที่เตรียมเพาะปลูกข้าว อ้อย มันสำปะหลัง และพื้นที่แหล่งน้ำ



รูปที่ 1 การกระจายตัวของกริดสำหรับการสำรวจภาคสนามและกริดในการบิน UAV บนแผนที่เนื้อดิน

ซึ่งสัมพันธ์กับการสำรวจของกรมพัฒนาที่ดิน [2] และกรมควบคุมมลพิษ [3] เพื่อใช้เป็นตัวแทนในการปรับแก้ค่าความถูกต้องของดัชนีความเค็ม และดัชนีพืชพรรณของข้อมูลจากภาพดาวเทียม Sentinel-2 ตามการศึกษาของ Jain [10] และ Sozzi [11] ทำการสอบเทียบค่า NDVI จากของภาพจาก UAV และภาพจากดาวเทียม Sentinel-2 พบว่า ค่า NDVI จาก UAV มีความไวค่อนข้างต่ำกว่าค่า NDVI จาก Sentinel-2 เนื่องจากได้รับผลกระทบจากปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมน้อยกว่า ซึ่งได้สรุปข้อมูลภาพถ่ายจาก Sentinel-2 และ UAV ไว้ในตารางที่ 2

2.2.3 ข้อมูลภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2

ภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 MSI ระดับ 2A ทำการบินถ่ายภาพวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2566 ซึ่งเป็นวันที่ใกล้เคียงกับวันที่ทำการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ในวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2566

ตารางที่ 2 ข้อมูลแบนด์ที่ใช้ในการคำนวณดัชนีสเปกตรัมเฉพาะของภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจาก UAV

ภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2A			ภาพถ่ายจาก UAV		
แบนด์	ช่วงคลื่น (นาโนเมตร)	ขนาดจุดภาพ (เมตร)	แบนด์	ช่วงคลื่น (นาโนเมตร)	ขนาดจุดภาพ (เมตร)
น้ำเงิน	439-533	10	น้ำเงิน	459-491	
เขียว	538-583	10	เขียว	546-573	0.13
แดง	650-680	10	แดง	661-675	0.13
ขอบแดง	698-748	20	ขอบแดง	711-723	0.13
อินฟราเรดใกล้	785-900	10	อินฟราเรดใกล้	814-871	0.13

ที่มา: [6]

2.3 วิธีการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัย ประกอบด้วย 5 ขั้นตอน ที่มีความเชื่อมโยงกัน ดังภาพรวมของงานวิจัยในรูปที่ 2

2.3.1 การสกัดปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดิน

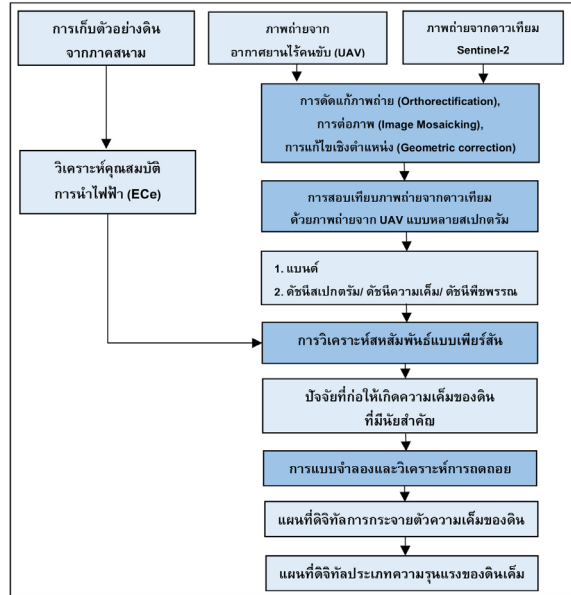
ทำการสกัดปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดิน (ตัวแปรอิสระ) จากภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และแผนที่พื้นฐานที่เกี่ยวข้อง ดังแสดงในตารางที่ 3

2.3.2 การเก็บตัวอย่างดินและการบินสำรวจ

เก็บตัวอย่างดินเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติการนำไฟฟ้า (ตัวแปรตาม) ในห้องปฏิบัติการ เนื่องจากค่า E_{Ce} ที่มีค่ามากกว่า 4 เดซิซีเมนต่อเมตร ที่ถูกใช้เป็นมาตรฐานสำหรับดินเค็มทั่วโลก ซึ่งผลผลิตทางการเกษตรลดลงเมื่อค่า E_{Ce} สูงขึ้น [12] และในส่วนของการบินสำรวจด้วย UAV เพื่อใช้ในการสร้างภาพดัชนีความเค็ม และภาพดัชนีพืชพรรณ

2.3.3 การสอบเทียบภาพถ่ายจากดาวเทียมด้วยภาพถ่ายจาก UAV แบบหลายสเปกตรัม

ทำการสอบเทียบภาพถ่ายจากดาวเทียมด้วยภาพถ่ายจาก UAV แบบหลายสเปกตรัมด้วยการปรับแก้ดัชนี NDVI ของ Sentinel-2 และดัชนี NDVI ของ UAV จากสมการถดถอยเชิงเส้นตามประเภทสิ่งปกคลุมดิน [13] ดังแสดงในสมการที่ (1) จากนั้นนำปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดินทั้ง



รูปที่ 2 ภาพรวมของงานวิจัย

23 ตัวแปร นำมาวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน โดยใช้เกณฑ์ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ *IRI* ที่มากกว่า 0.5 ขึ้นไป เพื่อระบุปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดินที่มีนัยสำคัญสัมพันธ์กับพื้นที่ศึกษา

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)} \quad (1)$$

2.3.4 การสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

สร้างแบบจำลองและวิเคราะห์การถดถอย ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ ซึ่งเป็นชุดข้อมูลสร้างแบบจำลอง (70%) และปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดินอย่างมีนัยสำคัญ โดยผลลัพธ์คือแผนที่ดิจิทัลการกระจายตัวความเค็มของดิน และใช้การประเมินระดับความเบี่ยงเบนของแบบจำลองด้วยค่าทางสถิติมาตรฐาน 2 ค่า คือ ค่า Mean Prediction Error (ME) และ Root Mean Square Error (RMSE) แสดงดังสมการที่ (2) และ (3) ตามการศึกษาของ Tajgardan [14] และ Benslama [15] ซึ่งผลการทำนายความเค็มของดินด้วยแบบจำลองสมการการถดถอยด้วย

ธีรพร ชื่นพี และ ยุทธิกานต์ จันทร์วิกรม, “การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง ด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย.”

ตารางที่ 3 ตัวแปรร่วมของปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดิน (ตัวแปรอิสระ)

ปัจจัยสร้าง ความเค็ม ของดิน	ตัวแปรร่วม	การเตรียมข้อมูล/สมการ	ประเภท ข้อมูล	ที่มา
คุณลักษณะ ดิน (Soil; S)	ค่าการนำไฟฟ้า (ECe)	วิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ	ปฐมภูมิ	ตัวอย่างดินจากภาค สนาม
ค่าความสว่าง	Sentinel-2 แบนด์ 2 แบนด์ 3 แบนด์ 4 และแบนด์ 8		ปฐมภูมิ	โครงการ EU Copernicus
	ภาพถ่ายจากอากาศยานไร้ คนขับ แบนด์ น้ำเงิน เขียว แดง และอินฟราเรดใกล้		ปฐมภูมิ	ภาพถ่ายจาก อากาศยานไร้คนขับ
ดัชนี ความเค็ม	BI; Brightness index	$BI = \sqrt{Red^2 + NIR^2}$	ทุติยภูมิ	โครงการ EU Copernicus และ UAV
	NDSI; Normalized Differential Salinity Index	$NDSI = (Red - NIR) / (Red + NIR)$	ทุติยภูมิ	
	SI; Salinity index	$SI = \sqrt{Blue * Red}$	ทุติยภูมิ	
	SI1; Salinity index 1	$SI1 = \sqrt{Green * Red}$	ทุติยภูมิ	
	SI2; Salinity index 2	$SI2 = (Blue * Red) / Green$	ทุติยภูมิ	
	SI3; Salinity index 3	$SI3 = \sqrt{Green^2 + NIR^2}$	ทุติยภูมิ	
	SI4; Salinity index 4	$SI4 = \sqrt{Red^2 + Green^2}$	ทุติยภูมิ	
	SI5; Salinity index 5	$SI5 = \sqrt{Green^2 + Red^2 + NIR^2}$	ทุติยภูมิ	
	SI6; Salinity index 6	$SI6 = \sqrt{Blue + Red}$	ทุติยภูมิ	
SI9; Salinity index 9	$SI9 = (Red * NIR) / Green$	ทุติยภูมิ		
สภาพภูมิ อากาศ (Climate; C)	ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายวัน (30 วัน)	การประมาณค่าช่วงถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน (IDW)	ทุติยภูมิ	สถาบันสารสนเทศ ทรัพยากรน้ำ
	อุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน (30 วัน)	การประมาณค่าช่วงถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน (IDW)	ทุติยภูมิ	สถาบันสารสนเทศ ทรัพยากรน้ำ
ปัจจัยทาง ชีวภาพ (Organisms; O)	EVI; Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2.5 * (NIR - Red) / (NIR + 6 * Red - 7.5 * Blue + 1)$	ทุติยภูมิ	โครงการ EU Copernicus และ UAV
	NDVI; Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$	ทุติยภูมิ	
	SAVI; Soil Adjustment Vegetation Index	$SAVI = (1 + L) * (NIR - Red) / (NIR + Red + L)$	ทุติยภูมิ	
สภาพ ภูมิประเทศ (Relief; R)	ทิศทางลาดเอียง: Aspect	สกัดจากภาพแบบจำลองความสูงดิจิทัล	ทุติยภูมิ	ภาพ ALOS DEM 12.5 เมตร ปรับความละเอียด 10 เมตร
	ความสูงภูมิประเทศ: Elevation	สกัดจากภาพแบบจำลองความสูงดิจิทัล	ทุติยภูมิ	
	ความชัน: Slope	สกัดจากภาพแบบจำลองความสูงดิจิทัล	ทุติยภูมิ	

*หมายเหตุ: ตัวแปรอิสระในตารางได้มีการศึกษาแล้วว่าเป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์และมักใช้ในการสำรวจดินเค็ม

ธีรพร ชื่นพี และ ยุตติกานต์ จันทร์วิกรม, “การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง ด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย.”



ค่า ECe ร่วมกับการวิเคราะห์ NDVI ที่แสดงค่า ME และ RMSE ต่ำสุด และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงสุด จะเป็นการประมาณค่าของแบบจำลองที่ยอมรับได้

$$ME = \sum_{i=1}^N \frac{Actual_i - Predicted_i}{N} \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(Actual_i - Predicted_i)^2}{N}} \quad (3)$$

2.3.5 การจำแนกระดับความเค็มของดิน

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบความแม่นยำเชิงพื้นที่ของแผนที่ดิจิทัลการกระจายตัวความเค็มของดิน เพื่อจำแนกระดับความเค็มของดิน ด้วยชุดทดสอบข้อมูล (30%) โดยใช้เกณฑ์ค่า Normalized Root Mean Square Error (NRMSE) ที่น้อยที่สุด เช่นเดียวกับการประมาณค่าความเค็มของดินของ Wu [16] จากนั้นทำการจำแนกความรุนแรงของดินเค็มตามตารางที่ 1

3. ผลการทดลอง

3.1 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดิน

ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดินที่ใช้ในการจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดิน ตามหลักการแบบจำลอง SCORPAN ประกอบด้วย 1) คุณลักษณะดิน 2) สภาพภูมิอากาศ 3) ปัจจัยทางชีวภาพ และ 4) สภาพภูมิประเทศ โดยตัวแปรที่ไม่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ วัตถุประสงค์กำเนิดดิน อายุของดิน และตำแหน่งเชิงพื้นที่ที่สามารถสรุปได้ดังนี้

3.1.1 คุณลักษณะดิน

ภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 ในฤดูแล้งซึ่งทำการบันทึกภาพวันที่ 20 กุมภาพันธ์ 2566 และเป็นวันที่ใกล้เคียงกับวันที่ทำการสำรวจด้วยอากาศยานไร้คนขับ ในวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2566 ซึ่งมีค่าความสว่างของแบนด์ ประกอบด้วย 4 แบนด์ ได้แก่ แบนด์ 2 (น้ำเงิน) แบนด์ 3 (เขียว) แบนด์ 4 (แดง) และแบนด์ 8 (อินฟราเรดใกล้) และดัชนีความเค็มประกอบด้วย 10 ดัชนี ได้แก่ BI, NDSI, SI, SI1, SI2, SI3, SI4, SI5, SI6 และ SI9 ดังแสดงในรูปที่ 3 และตารางแสดงค่าข้อมูล

เชิงสถิติของค่าความสว่าง และดัชนีความเค็มในตารางที่ 4 ในส่วนของผลการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้าจากห้องปฏิบัติการจำนวน 48 ตัวอย่าง พบว่ามีค่าระหว่าง 0.01–30.04 เดซิซีเมนต่อเมตร

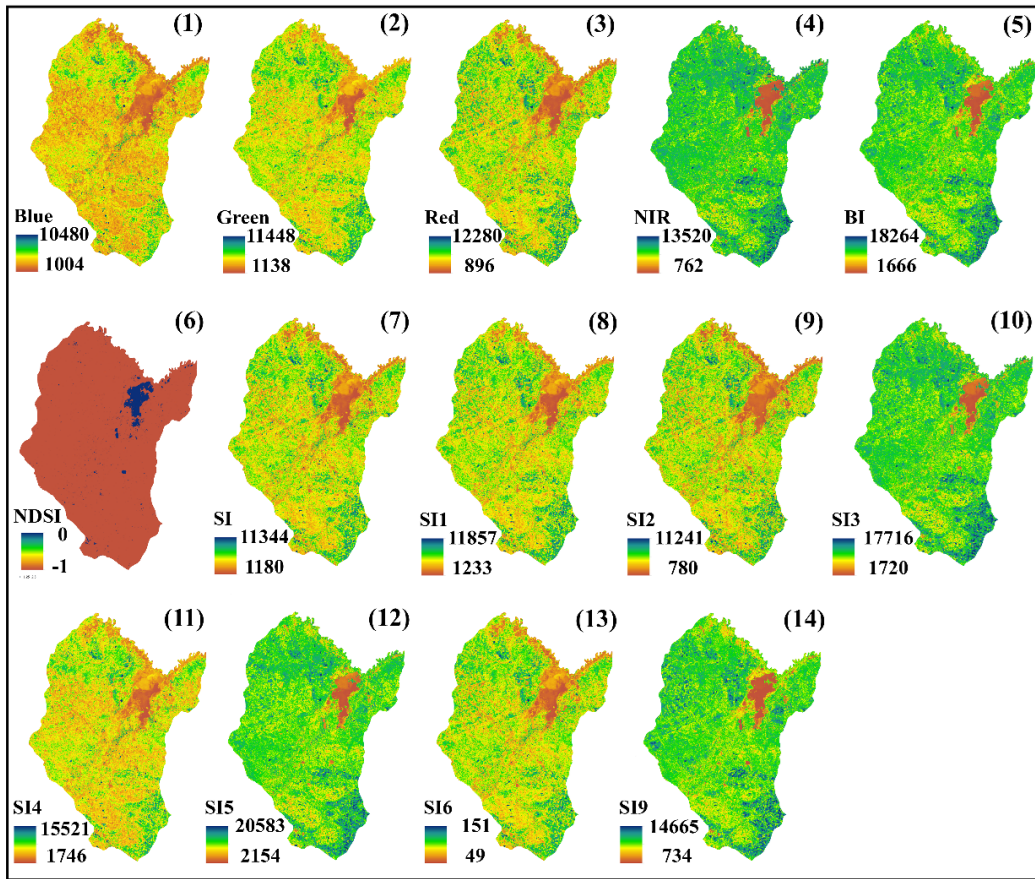
ตารางที่ 4 ข้อมูลเชิงสถิติของค่าความสว่าง และดัชนีความเค็ม ความละเอียดเชิงพื้นที่ 10 เมตร

ค่าความสว่าง/ ดัชนีความเค็ม	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
แบนด์ 2	1,004.00	10,480.00	1,743.05
แบนด์ 3	1,138.00	11,448.00	1,974.43
แบนด์ 4	896.00	12,280.00	2,222.73
แบนด์ 8	762.00	13,520.00	3,377.81
BI	1,666.00	18,264.00	4,058.34
NDSI	0.00	-1.00	-0.9697
SI	1,180.00	11,344.00	1,965.00
SI1	1,233.00	11,857.00	2,092.45
SI2	780.00	11,241.00	1,959.19
SI3	1,720.00	17,716.00	3,922.43
SI4	1,746.00	15,521.00	2,634.26
SI5	2,154.00	20,583.00	4,297.74
SI6	49.00	151.00	62.77
SI9	734.00	14,665.00	3,797.51

3.1.2 สภาพภูมิอากาศ

ข้อมูลสภาพภูมิอากาศรายวัน ประกอบด้วยปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยรายวัน และอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน จากการทำนายด้วยวิธี IDW ตามการทำนายข้อมูลภูมิอากาศ ของ Sluiter [17] ที่นำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในงานอุตุนิยมวิทยา และสอดคล้องกับการศึกษาของ Ware [18] ที่ให้ความเห็นว่าการทำนายข้อมูลภูมิอากาศเป็นข้อมูลที่ไม่มียุทธศาสตร์จากสภาพแวดล้อมทางกายภาพ เนื่องจากคุณสมบัติของบรรยากาศที่ค่อย ๆ เปลี่ยนแปลงไปตามระยะทางของการถ่วงน้ำหนัก ซึ่งเป็นรูปแบบการทำนายด้วยวิธี IDW

การทำนายข้อมูลสภาพภูมิอากาศในการศึกษาครั้งนี้ครอบคลุมช่วงเวลา 30 วัน โดยอ้างอิงข้อมูลจากสถาบัน

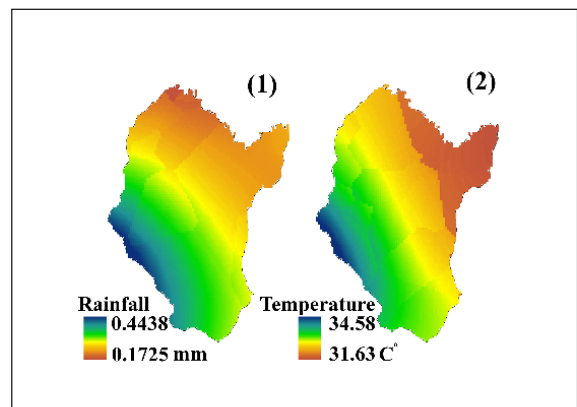


รูปที่ 3 แผนที่จากภาพถ่ายดาวเทียม Sentinel-2; (1) แบนด์ 2, (2) แบนด์ 3, (3) แบนด์ 4 (4) แบนด์ 8, (5) BI, (6) NDSI, (7) SI, (8) SI1, (9) SI2, (10) SI3, (11) SI4, (12) SI5, (13) SI6 และ (14) SI9

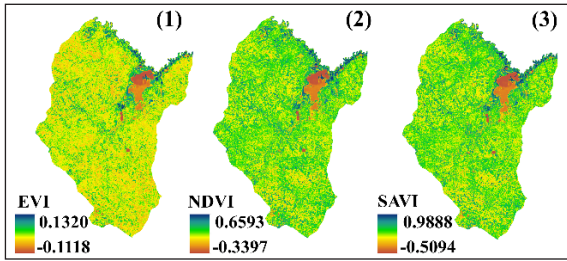
สารสนเทศทรัพยากรน้ำ [19] ในช่วงวันที่ 5 กุมภาพันธ์ ถึง 6 มีนาคม 2566 และข้อมูลปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยได้จาก 16 สถานี รอบพื้นที่ศึกษา และข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันได้จาก 20 สถานี ดังแสดงในรูปที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ข้อมูลเชิงสถิติของค่าปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย และอุณหภูมิเฉลี่ย 30 วัน (5 ก.พ.-6 มี.ค. 2566)

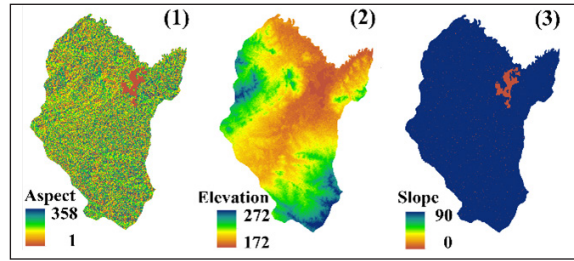
สภาพภูมิอากาศ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย (มิลลิเมตร)	0.17	0.44	0.29
อุณหภูมิเฉลี่ย (องศาเซลเซียส)	31.63	34.58	32.75



รูปที่ 4 แผนที่ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย และอุณหภูมิเฉลี่ย รายเดือน 30 วัน



รูปที่ 5 แผนที่ปัจจัยทางชีวภาพ ของภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2; EVI, NDVI และ SAVI



รูปที่ 6 แผนที่ปัจจัยสภาพภูมิประเทศ ประกอบด้วย ทิศทางลาดเอียง ความสูงภูมิประเทศ และความชัน

ข้อมูลอุณหภูมิเฉลี่ยรายวันในฤดูแล้ง จากแบบจำลอง IDW ช่วงเดือนกุมภาพันธ์ถึงเดือนมีนาคม 2566 ของพื้นที่ที่ศึกษา มีค่าเฉลี่ย 32.75 องศาเซลเซียส ซึ่งสอดคล้องกับการคาดการณ์สภาพภูมิอากาศของกรมอุตุนิยมวิทยา พ.ศ. 2566 ว่าอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุดอยู่ที่ 33.1 องศาเซลเซียส และสัมพันธ์กับลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษาที่พบว่า อุณหภูมิมีการเพิ่มขึ้นจากพื้นที่ด้านตะวันออกเฉียงเหนือสู่พื้นที่ด้านตะวันตก เช่นเดียวกับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย เนื่องจากพื้นที่ฝั่งตะวันตกของอำเภอเป็นพื้นที่เขตเงาฝนของเทือกเขาตองพญาเย็น

3.1.3 ปัจจัยทางชีวภาพ

ปัจจัยทางชีวภาพที่ใช้ในการศึกษาคครั้งนี้ ได้แก่ EVI, NDVI และ SAVI โดยคำนวณจากสูตรในตารางที่ 3 ด้วยฟังก์ชัน Raster Calculator ภายใต้โปรแกรม ArcMap ซึ่งแสดงในรูปที่ 5 และตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ข้อมูลเชิงสถิติของปัจจัยทางชีวภาพ

ปัจจัยทางชีวภาพ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
EVI	-0.1118	0.1320	0.0243
NDVI	-0.3397	0.6593	0.0302
SAVI (L = 0.5)	-0.5094	0.9888	0.0837

จากการจัดกลุ่มรูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ของปัจจัยทางชีวภาพในพื้นที่ศึกษาพบว่า ดัชนีที่มีความใกล้เคียงกันคือ NDVI และ SAVI ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการเปรียบเทียบดัชนี NDVI, EVI และ SAVI ของ Suardi [20] ที่พบว่า

ความแม่นยำของทั้ง 3 ดัชนี มีความใกล้เคียงกัน โดยอยู่ในช่วง 87-91% อีกทั้ง ผลการวิจัยในครั้งนี้ยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Shivangi [21] ที่ใช้ดัชนีพรรณพืช NDVI, SAVI, EVI และ ARVI ในการจำแนกพืชพรรณในบริเวณที่ได้รับผลกระทบจากมลพิษทางอากาศ PM 2.5 สูง พบว่า ดัชนี ARVI, NDVI และ SAVI มีความไวต่อบรรยากาศน้อยกว่าดัชนี EVI

3.1.4 สภาพภูมิประเทศ

สภาพภูมิประเทศ ประกอบด้วย 3 ตัวแปร ได้แก่ ทิศทางลาดเอียง (Aspect) ความสูงภูมิประเทศ (Elevation) และความชัน (Slope) จากภาพแบบจำลองความสูงดิจิทัล ALOS DEM มีความละเอียดที่ 12.5 เมตร ซึ่งถูกปรับแก้ความละเอียดเป็น 10 เมตร ให้เท่ากับความละเอียดของภาพ Sentinel-2 โดยแผนที่การกระจายเชิงพื้นที่ของสภาพภูมิประเทศ แสดงในรูปที่ 6 และตารางที่ 7

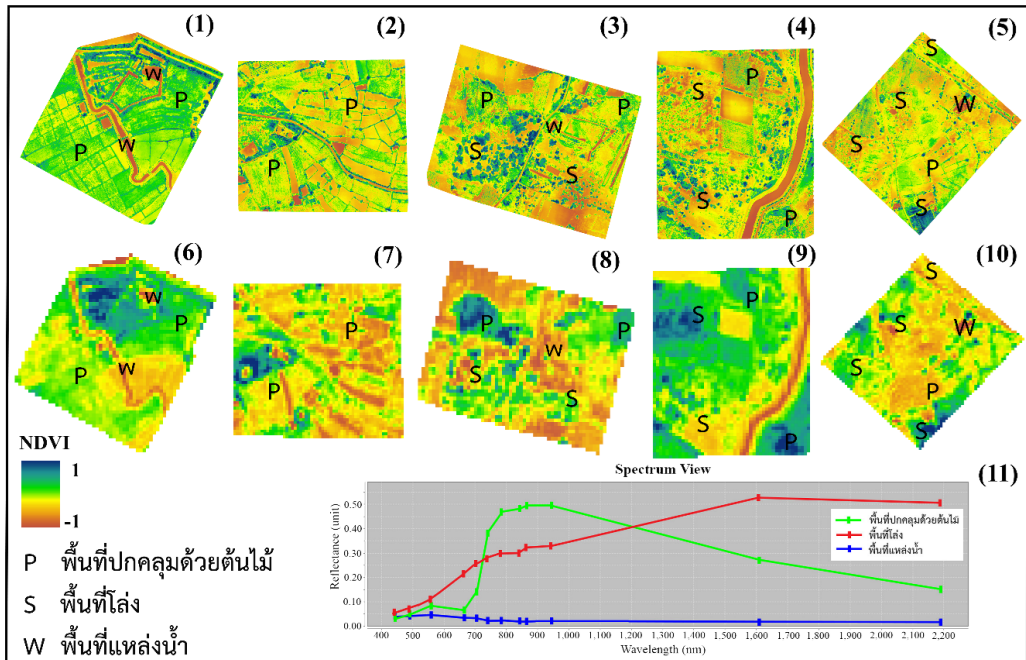
ตารางที่ 7 ข้อมูลเชิงสถิติของปัจจัยสภาพภูมิประเทศ

สภาพภูมิประเทศ	ค่าต่ำสุด	ค่าสูงสุด	ค่าเฉลี่ย
ทิศทางลาดเอียง (ดีกรี)	1.00	358.45	170.79
ความสูงภูมิประเทศ (เมตร)	172.00	272.00	211.87
ความชัน (ดีกรี)	0.00	89.99	87.78

3.2 การสอบเทียบค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ของ UAV และ Sentinel-2

การสอบเทียบค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ของ UAV และ Sentinel-2 ใน 5 พื้นที่ ด้วยสมการความสัมพันธ์ถดถอย

ธีรพร ชื่นพี และ ยุติกานต์ จันทรวีกรม, “การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง ด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย.”



รูปที่ 7 ดัชนีพืชพรรณ NDVI ด้วยภาพถ่ายจาก UAV (1-5) ภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 (6-10) และเอกลักษณ์เชิงสเปกตรัมของการใช้ประโยชน์ที่ดิน 3 ประเภท (11)

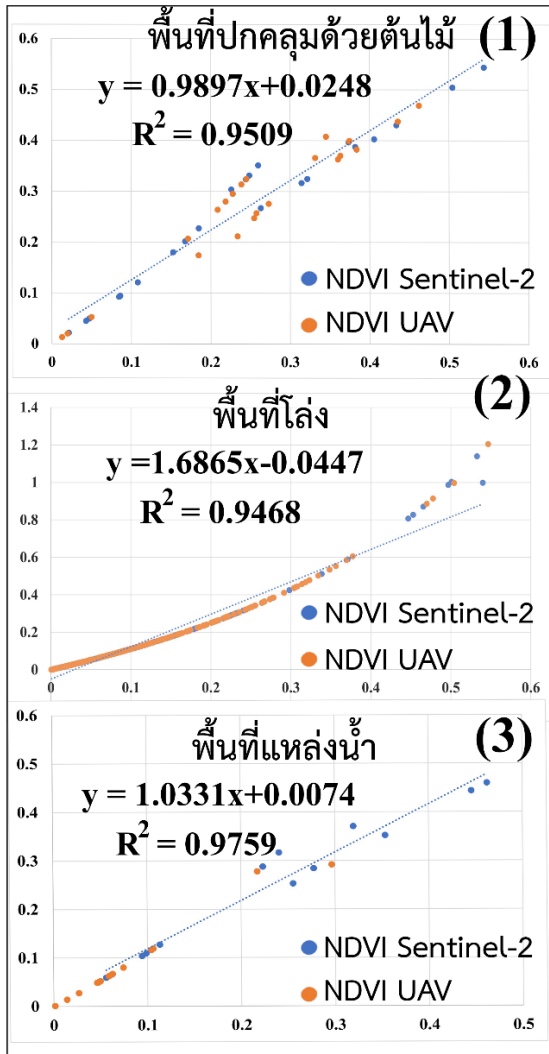
เชิงเส้นระหว่างค่า NDVI ของ UAV พื้นที่ละ 100 จุด คล้ายกับการศึกษาของ Jain [10] โดยดัชนีพืชพรรณ NDVI ของภาพถ่ายจาก UAV และ Sentinel-2 ในรูป 7 (1-5) และรูป 7 (6-10) ตามลำดับ ซึ่งแบ่งพื้นที่ออกเป็น 3 ลักษณะ ตามการใช้ประโยชน์ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดิน 2562 [3] ได้แก่ พื้นที่ปกคลุมด้วยต้นไม้ พื้นที่เปิดโล่ง และพื้นที่แหล่งน้ำ ส่วนของการแยกเอกลักษณ์เชิงสเปกตรัม 3 พื้นที่ จะใช้ช่วงคลื่น 550-700 นาโนเมตร (ช่วงคลื่นน้ำเงิน เขียว แดง) และ 700-1,200 นาโนเมตร (ช่วงคลื่นขอบแดงและอินฟราเรดใกล้) (รูปที่ 7 (11)) พบว่า พื้นที่ปกคลุมด้วยต้นไม้ ที่ช่วงคลื่น 550-700 และ 1,200-2,200 นาโนเมตร มีค่าสะท้อนต่ำกว่าพื้นที่เปิดโล่ง และช่วงคลื่น 700-1,200 นาโนเมตร มีค่าสูงกว่าพื้นที่เปิดโล่ง ส่วนเอกลักษณ์เชิงสเปกตรัมของพื้นที่แหล่งน้ำในทุกช่วงคลื่นมีค่าต่ำกว่าพื้นที่ปกคลุมด้วยต้นไม้ และพื้นที่เปิดโล่ง

การกระจายของค่า NDVI จาก UAV และ Sentinel-2 ที่เทียบตามความสัมพันธ์เชิงเส้นของ 3 พื้นที่ (รูปที่ 8) ได้แก่

พื้นที่ปกคลุมด้วยต้นไม้ มีค่า NDVI ของ UAV และ Sentinel-2 อยู่ในช่วง 0.30-0.90 และ 0.30-0.49 ตามลำดับ พื้นที่เปิดโล่งมีค่า NDVI ของ UAV และ Sentinel-2 อยู่ในช่วง 0.00-0.20 และ 0.025-0.10 ตามลำดับ ส่วนพื้นที่แหล่งน้ำมีค่า NDVI ของ UAV และ Sentinel-2 ในช่วงน้อยกว่า 0 จากการศึกษาพบว่า ค่า NDVI ของ UAV ของพื้นที่ดังกล่าวมีช่วงกว้าง และเข้าใกล้เส้นแนวโน้มมากกว่าค่า NDVI ของ Sentinel-2 ซึ่งค่า R^2 ของ UAV มีค่าระหว่าง 0.94-0.97

3.3 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน

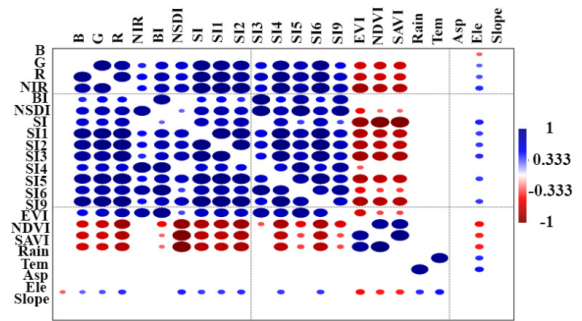
การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สันของปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดินทั้ง 23 ตัวแปร ที่ผ่านการทำข้อมูลให้เป็นมาตรฐานและใช้เกณฑ์ค่า IRI มากกว่า 0.5 (รูปที่ 9) ผลการวิเคราะห์พบปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดินอย่างมีนัยสำคัญจำนวน 17 ตัวแปร ได้แก่ แบนด์ 3, แบนด์ 4, แบนด์ 8, BI, NSDI, SI, SI1, SI2, SI3, SI4, SI5, SI6, SI9, EVI, NDVI, SAVI และอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน



รูปที่ 8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีพืชพรรณ NDVI ของ UAV และ Sentinel-2 ของพื้นที่ปกคลุมด้วยต้นไม้ พื้นที่เปิดโล่ง และพื้นที่แหล่งน้ำ

3.4 แผนที่ตั้งจิตัลการกระจายตัวความเค็มของดิน

จากการนำเข้าปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดิน อย่างมีนัยสำคัญจากการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สันทั้ง 17 ตัวแปร และค่า EC จำนวน 34 จุด (70%) ในโปรแกรม IBM SPSS Statistics เวอร์ชัน 26 และทำการสกัดปัจจัยที่ซ้ำซ้อน ด้วยการลดมิติข้อมูล (Principal Component Analysis; PCA) ซึ่งทำให้เกิดการตัดปัจจัยออกจำนวน 7 ตัวแปร ได้แก่



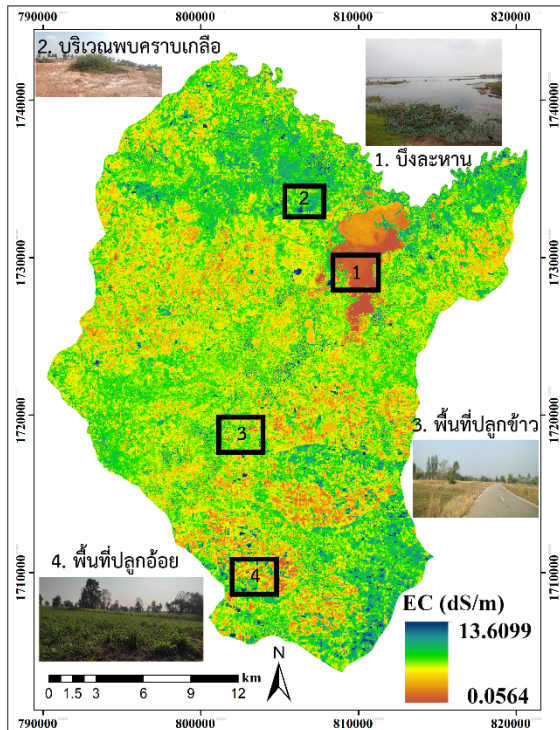
รูปที่ 9 การวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สันของปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดิน 23 ตัวแปร

BI, NSDI, SI, SI1, SI4, NDVI และอุณหภูมิเฉลี่ยรายวัน จึงทำให้เหลือตัวแปรสำหรับการวิเคราะห์แบบจำลองถดถอยที่มีความถูกต้อง และความแม่นยำมากยิ่งขึ้น โดยตัวแปรที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองจำนวน 10 ตัวแปร ได้แก่ แบนด์ 3, แบนด์ 4, แบนด์ 8, SI2, SI3, SI5, SI6, SI9, EVI และ SAVI (สมการที่ (4)) ซึ่งแบบจำลองให้ค่าระดับความเบี่ยงเบน ME และ RMSE เท่ากับ -0.51 และ 1.00 ตามลำดับ ผลลัพธ์ของการสร้างแบบจำลองการถดถอยนี้ทำให้ได้แผนที่ดิจิทัลการกระจายตัวความเค็มของดิน ดังแสดงในรูปที่ 10

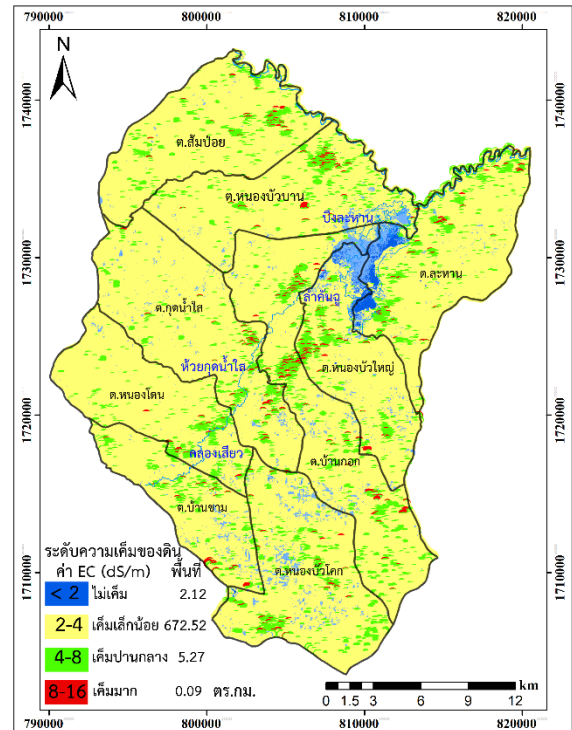
$$EC = -6.63 + 9.2Green - 7.79 * Red + 2.13 * NIR + 1.02 * SI2 - 5.84 * SI3 + 3.59 * SI5 - 1.80 * SI6 + 1.19 * SI9 + 1.89 * EVI - 1.27 * SAVI \quad (4)$$

การศึกษาในครั้งนี้มีดัชนีที่เกี่ยวข้องกับพืชพรรณ คือ SAVI เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยการเกิดความเค็มของดินอื่น ๆ สูงสุดถึง 12 ตัวแปร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Zhang [22] ซึ่งระบุว่า SAVI เป็นดัชนีที่เหมาะสมสำหรับการประเมินความเค็มของพื้นที่ที่มีลักษณะความเค็มต่ำ และพบพืชที่มีความไวต่อเกลือเช่นเดียวกับพื้นที่ศึกษา ส่วนปัจจัยที่มีความสำคัญรองลงมา คือ NDVI มีความสัมพันธ์กับปัจจัยการเกิดความเค็มของดินอื่น ๆ จำนวน 10 ตัวแปร เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ ค่า R ระหว่าง NDVI และ SAVI มีค่าเท่ากับ 1 (ความสัมพันธ์ของตัวแปรมีค่าเท่ากัน) ทั้งนี้ เนื่องจาก

ธีรพร ชื่นพี และ ยุติกานต์ จันทวิกรม, “การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง ด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย.”



รูปที่ 10 แผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้ง ในอำเภอ จัตุรัส จังหวัดชัยภูมิ



รูปที่ 11 แผนที่ดิจิทัลระดับความเค็มของดินในฤดูแล้ง ใน อำเภอจัตุรัส จังหวัดชัยภูมิ

ในขั้นการวิเคราะห์ที่ได้ลดมิติข้อมูล NDVI ซึ่งเป็นตัวแปรที่มีความซ้ำซ้อน ทำให้ถูกตัดออกในขั้นตอนการสร้างแบบจำลองถดถอยนอกจากนี้ในการศึกษาของ Shivangi [21] พบว่าดัชนี NDVI และ SAVI เป็นดัชนีที่มีความไวต่อผลกระทบจากมลพิษทางอากาศ PM 2.5 สอดคล้องกับการสำรวจในพื้นที่ศึกษาช่วงเดือนกุมภาพันธ์-มีนาคม 2566 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เกิดการลักลอบเผาอ้อย เพื่อลดระยะเวลาของการเก็บเกี่ยวผลผลิต ทำให้ลักษณะบรรยากาศทั่วไปถูกปกคลุมด้วยเถ้าละออง รวมถึงฝุ่น PM 10 และ PM 2.5 ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้ดัชนีทั้งสองเป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับพื้นที่ศึกษาสูงที่สุด

ผลลัพธ์ของแผนที่ดิจิทัลการกระจายตัวความเค็มของดินรูปที่ 10 มีค่าการนำไฟฟ้าของดินในช่วง 0.06–13.61 เดซิซีเมนต่อเมตร ซึ่งค่า EC ของการใช้ประโยชน์ที่ดิน 3 ประเภทมีความสอดคล้องกับค่า NDVI และเอกลักษณ์เชิงสเปกตรัมใน

รูปที่ 7 โดยยกตัวอย่าง 4 พื้นที่ ได้แก่ บึงสะพานเป็นตัวแทนของพื้นที่แหล่งน้ำ มีค่า EC ต่ำ มีค่าระหว่าง 0.06–1.80 เดซิซีเมนต่อเมตร พื้นที่ปลูกข้าวและพื้นที่ปลูกอ้อยเป็นตัวแทนของพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยต้นไม้ มีค่า EC ระหว่าง 1.80–4.80 เดซิซีเมนต่อเมตร และพื้นที่ที่พบคราบเกลือมักพบในพื้นที่เปิดโล่ง มีค่า EC ระหว่าง 4.28–13.61 เดซิซีเมนต่อเมตร

3.5 แผนที่ดิจิทัลระดับความรุนแรงของดินเค็ม

แผนที่ดิจิทัลระดับความเค็มของดินและขนาดพื้นที่การกระจายตัวของดินเค็ม (รูปที่ 11) ได้จากการจำแนกค่าการนำไฟฟ้าของแผนที่ดิจิทัลการกระจายตัวความเค็มของดิน (รูปที่ 10) ตามมาตรฐานของ US Soil Salinity Laboratory ให้ค่า NRMSE ของแผนที่ดิจิทัลระดับความเค็มของดินเท่ากับ 0.37 และค่า R^2 เท่ากับ 0.93



จากการศึกษาพบว่า สามารถจำแนกระดับความเค็มของดินในพื้นที่อำเภอจตุรัส ออกเป็น 4 ระดับ ได้แก่ พื้นที่ไม่พบความเค็ม พื้นที่เค็มเล็กน้อย พื้นที่เค็มปานกลาง และพื้นที่เค็มมาก โดยพื้นที่ศึกษาส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เค็มเล็กน้อย คิดเป็นขนาด 672.52 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 98.90 ของพื้นที่ ซึ่งพบกระจายอยู่ทั่วไปในพื้นที่ที่มีลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดินในช่วงฤดูแล้ง เป็นพื้นที่เตรียมเพาะปลูกข้าว อ้อย มันสำปะหลัง และพื้นที่เปิดโล่ง ก่อนเข้าสู่ฤดูกาลการเพาะปลูกในช่วงฤดูฝน ในส่วนของพื้นที่เค็มปานกลางและเค็มมาก มีขนาดพื้นที่รวม 5.36 ตารางกิโลเมตร ซึ่งมักเกิดตามแนวริมฝั่งลำคันทน์ ห้วยกุดน้ำใส คลองเสียว และบึงละหาน และพื้นที่ที่ไม่พบความเค็ม มีขนาด 2.12 ตารางกิโลเมตร พบบริเวณแหล่งน้ำที่มีค่า EC ค่อนข้างต่ำ

4. อภิปรายผลและสรุป

การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูแล้งด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย จากการวิเคราะห์ปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดินตามหลักการแบบจำลอง SCORPAN และการสอบเทียบค่าดัชนีพืชพรรณ NDVI ของ UAV และ Sentinel-2 ด้วยสมการความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นของพื้นที่ 3 ลักษณะ ได้แก่ พื้นที่ปกคลุมด้วยต้นไม้ พื้นที่เปิดโล่ง และพื้นที่แหล่งน้ำ หลังจากนั้นนำปัจจัยที่ก่อให้เกิดความเค็มของดิน 23 ตัวแปร ที่ผ่านการทำให้ข้อมูลเป็นมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์สหสัมพันธ์เพียร์สัน เพื่อการสกัดปัจจัยที่ก่อความเค็มของดินอย่างมีนัยสำคัญได้ 17 ตัวแปร และจากนั้นทำการลดมิติข้อมูลเพื่อลดความซ้ำซ้อนของตัวแปร ทำให้เหลือปัจจัยที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบจำลองถดถอย จำนวน 10 ตัวแปร ที่ให้ผลลัพธ์แบบจำลองที่ถูกต้องและแม่นยำสูงสุด

พบว่า ปัจจัยที่ก่อความเค็มของดินอย่างมีนัยสำคัญ 10 ตัวแปร ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ได้แก่ แบนด์ 3, แบนด์ 4, แบนด์ 8, SI2, SI3, SI5, SI6, SI9, EVI และ SAVI โดย SAVI เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการเกิดความเค็มสูงสุด เนื่องจาก SAVI เป็นดัชนีพืชพรรณที่เหมาะสมสำหรับการประเมิน

ความเค็มของพื้นที่ที่มีความเค็มต่ำ และมักพบพืชท้องถิ่นที่มีความไวต่อเกลือ [22] ซึ่งมีความสอดคล้องกับพื้นที่ศึกษาที่พบพืชทนเค็ม เช่น ต้นศรีธรณไชย ต้นหนามพุดอง ต้นหนามแดง เป็นต้น ส่วน NDVI เป็นตัวแปรที่มีความสัมพันธ์กับปัจจัยการเกิดความเค็มรองลงมา เนื่องจาก NDVI และ SAVI เป็นดัชนีที่มีความไวต่อผลกระทบจากมลพิษทางอากาศ PM 2.5 [21] ซึ่งมีความสอดคล้องกับการสำรวจพื้นที่ศึกษาในช่วงฤดูแล้ง ระหว่างเดือนกุมภาพันธ์-มีนาคม 2566 ซึ่งเป็นเวลาที่พื้นที่ศึกษาถูกปกคลุมด้วยฝุ่น PM 10 และ PM 2.5 ของถ้ำละอองจากการเผาไหม้วัสดุทางการเกษตร

ผลลัพธ์ของแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดิน มีค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง 0.06-13.61 เดซิซีเมนต่อเมตร ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการศึกษาของกรมควบคุมมลพิษ ในพ.ศ. 2564 ทั้งนี้ค่าการนำไฟฟ้าของการศึกษาครั้งนี้ มีช่วงค่าที่กว้างกว่า เนื่องจากการสำรวจทั่วทั้งพื้นที่อำเภอจตุรัส อีกทั้งการเกิดความเค็มของดินในพื้นที่นี้ มีความสัมพันธ์กับสภาพภูมิประเทศ ซึ่งมีลักษณะคล้าย แอ่งขนาดเล็ก พื้นที่ด้านตะวันตกเฉียงเหนือและตะวันออกเฉียงใต้มีลักษณะเป็นที่ราบลอนลาดที่มีความสูงมากกว่าที่ราบริมฝั่งลำน้ำ ส่วนที่ราบริมฝั่งลำน้ำครอบคลุมพื้นที่ตอนกลางของพื้นที่ศึกษา โดยพื้นที่ราบและที่ราบลอนลาดพบความเค็มระดับเค็มเล็กน้อยมากที่สุด คิดเป็นพื้นที่ขนาด 672.52 ตารางกิโลเมตร หรือร้อยละ 98.90 ส่วนพื้นที่ราบริมฝั่งลำคันทน์ ห้วยกุดน้ำใส และคลองเสียวเกิดความเค็มระดับปานกลาง และเค็มมาก คิดเป็นพื้นที่ขนาด 5.36 ตารางกิโลเมตร และพื้นที่ราบริมฝั่งลำน้ำเป็นพื้นที่เกิดความเค็มระดับสูงซึ่งมีความสอดคล้องกับการรายงาน ของกรมพัฒนาที่ดิน [2] และกรมควบคุมมลพิษ [3] ที่พบว่า ความเค็มระดับสูงในพื้นที่ลุ่มแม่น้ำขี้เม็กเกิดบริเวณริมตลิ่งของลำน้ำสาขา เนื่องจากมีการทับถมของตะกอนดินเค็มในปริมาณมาก

การวิจัยในครั้งนี้เป็นการจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดิน สำหรับการตรวจสอบความเค็มในพื้นที่เกษตรกรรม โดยใช้ข้อมูลของการสำรวจระยะไกลหลายสเปกตรัมประกอบด้วย ภาพถ่ายจาก UAV ภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และการวัดค่าการนำไฟฟ้า โดยการใช้ภาพถ่าย

จาก UAV ที่เป็นเทคโนโลยีใหม่ที่สามารถลดการบดบังของเมฆ มีความคล่องตัว อีกทั้งช่วยลดระยะเวลาของการสำรวจ [23] ทำให้สามารถดำเนินการตรวจสอบความเค็มที่มีผลวัดได้อย่างรวดเร็ว และแม่นยำ ซึ่งการวิเคราะห์นี้ทำให้บรรลุวัตถุประสงค์การสัดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับสเปกตรัม และดัชนีที่เกี่ยวข้องกับความเค็มของดินในพื้นที่ศึกษาขนาดใหญ่ ด้วยการสอบเทียบภาพถ่ายจาก UAV และภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 เพื่อลดความผกผันของแบบจำลองที่มีความละเอียดเชิงพื้นที่ต่ำได้

การวิจัยในครั้งนี้ยังพบว่า ในฤดูแล้งดัชนีพรรณพืช SAVI และ NDVI เป็นปัจจัยที่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความเค็มของดินมากกว่าปัจจัยจากดัชนี ความเค็ม เนื่องจากดัชนีทั้งสองมีความไวต่อผลกระทบ จากมลพิษทางอากาศ ซึ่งเป็นปัญหาในช่วงเวลาที่ทำการสำรวจ สำหรับการศึกษาระดับต้นไปควรทำการสำรวจ และจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินในฤดูฝน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และรูปแบบการกระจายตัวของความเค็มที่อาจให้ผลแตกต่างกัน เนื่องจากในฤดูฝนไม่มีผลกระทบของมลพิษทางอากาศ นอกจากนี้เพื่อให้ได้แบบจำลองที่มีความแม่นยำสูงขึ้นควรทำการเพิ่มกรดในการบิน UAV และการเก็บตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ค่าการนำไฟฟ้า [24]

5. กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัย การจัดทำแผนที่ดิจิทัลความเค็มของดินด้วยภาพถ่ายจากดาวเทียม Sentinel-2 และภาพถ่ายจากอากาศยานไร้คนขับ ในอำเภอจตุรัส จังหวัดชัยภูมิ ประเทศไทย ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยงบประมาณสนับสนุนงานมูลนิธิ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2566 และได้รับความอนุเคราะห์ ชุดอุปกรณ์อากาศยานไร้คนขับจากภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

[1] Department of Mineral Resources, “Saline soil area development in the northeast:

Geological approaches Research Report,” Bangkok, Thailand, Department of Mineral Resources Conservation and Management. 2015 (in Thai).

[2] Land Development Department, “Impact of climate change on salt crust distribution in Lam Khan Chu Basin,” Soil Resources Survey and Research Division, Land Development Department, Bangkok, Thailand, 2011, pp. 10–25 (in Thai).

[3] Pollution Control Department. (2022, May.). PCD to follow up on Chi River salinity problems. Pollution Control Department. Ministry of Natural Resources and Environment. Bangkok, Thailand [Online] (in Thai). Available: https://www.pcd.go.th/pcd_news

[4] *Glossary of Soil Sciences Terms*. SSS., United States of America, 2008, pp 88.

[5] *Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils, Agriculture Handbook No.60*, USDA., Washington, DC., 1954, pp. 160.

[6] Z. Zhang, B. Niu, X. Li, X. Kang, and Z. Hu, “Estimation and dynamic analysis of soil salinity based on UAV and Sentinel-2A multispectral imagery in the coastal area, China,” *Land*, vol. 11, no. 12, pp. 2307, 2022.

[7] J. Schulla, (2017, July). Model Description WaSiM (Water balance simulation model). Hydrology Software Consulting. Zurich, Switzerland. [Online]. Available: <http://www.wasim.ch>.

[8] *Soil Surveys in Agricultural Development: Technical Bulletin No.14*, LDD., Bangkok, 1972, pp. 3–7.

[9] Land Development Department, (2019, September). Map of land use conditions in



- Chaiyaphum Province 2019. Soil Resources Survey and Research Division, Land Development Department, Bangkok, Thailand [Online]. (in Thai) Available: http://www1.ldd.go.th/WEB_OLP/Lu_62/Lu62_NE/mapNE62/CPM2562
- [10] K. Jain and A. Pandey, "Calibration of satellite imagery with multispectral UAV imagery," *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, vol. 49, no. 3, pp. 479-490, 2020.
- [11] M. Sozzi, A. Kayad, F. Marinello, J. A. Taylor, and B. Tisseyre, "Comparing vineyard imagery acquired from Sentinel-2 and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) platform," *OENO One*, vol. 54, no. 2, pp. 189-197, 2020.
- [12] *Soil Survey Manual: USDA Handbook No.18*, USDA., Washington, DC., 1993.
- [13] L. J. Mangewa, P. A. Ndakidemi, R. D. Alward, H. K. Kija, J. K. Bukombe, E. R. Nasolwa, and L. K. Munishi, "Comparative assessment of UAV and Sentinel-2 NDVI and GNDVI for preliminary diagnosis of habitat conditions in Burunge wildlife management area, Tanzania," *Earth* vol. 3, no. 3, pp. 769-787, 2022.
- [14] T. Tajgardan, S.H. Ayubi, and F. Khormali, "Soil surface salinity prediction using ASTER data: Comparing statistical and geostatistical models," *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, vol.4, no.3, pp. 457-467, 2010.
- [15] A. Benslama, K. Khanchoul, F. Benbrahim, S. Boubehziz, F. Chikhi, and J. Navarro-Pedreño, "Monitoring the variations of soil salinity in a palm grove in Southern Algeria," *Sustainability*, vol. 12, no. 15, pp. 6117, 2020.
- [16] W. Wu, C. Zucca, A. S. Mhaimeed, W. M. Al-Shafie, A. M. Fadhil, V. Nangia, F. Zhu, and G. Liu, "Soil salinity prediction and mapping by machine learning regression in Central Mesopotamia, Iraq," *Land Degradation and Development*, vol. 29, no. 11, pp. 4005-4014, 2018.
- [17] R. Sluiter, "Interpolation methods in Interpolation methods for climate data literature review," KNMI, R&D Information and Observation Technology, De Bilt, Netherlands, Intern rapport ; IR 2009-04, pp. 11-12, 2009.
- [18] C. Ware, W. Knigh, and D. Wells, "Memory intensive statistical algorithms for multibeam bathymetric data," *Computers & Geosciences*, vol. 17, no. 7, pp. 985-993, 1991.
- [19] National Hydroinformatics Data Center, (2023, February). Daily weather monitoring, Bangkok. Thailand [Online] (in Thai). Available: <https://www.thaiwater.net/weather>
- [20] I. Suardi and D. Anggraina, "Comparison of NDVI, EVI, and SAVI methods to know vegetation density with Landsat 8 OIL images," *International Remote Sensing Applied Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 68-77, 2019.
- [21] S. S. Shivangi and M. Kumari, "Comparative analysis of different vegetation indices with respect to atmospheric particulate pollution using sentinel data," *Applied Computing and Geosciences*, vol. 7, pp. 100032, 2020.
- [22] T. T. Zhang, S.L. Zeng, Y. Gao, Z. T. Ouyang, B. Li, C. M. Fang, and B. Zhao, "Using hyperspectral vegetation indices as a proxy to monitor soil salinity," *Ecological Indicators*, vol. 11, no. 6, pp. 1552-1562, 2019.
- [23] H. Zhang, L. Wang, L. Tian, and J. Yin, "A review of unmanned aerial vehicle low-altitude



remote sensing (UAV-LARS) use in agricultural monitoring in China,” *Remote Sens*, vol. 13, no. 6, pp. 1221, 2021.

[24] S. Zhang and G. Zhao, “A harmonious satellite-

unmanned aerial vehicle-ground measurement inversion method for monitoring salinity in coastal saline soil,” *Remote Sens*, vol. 11, no. 14, pp. 1700, 2019.

