

การจำแนกการใช้ที่ดินและการตรวจสอบพื้นที่ป่าไม้ ในลุ่มน้ำชีโดยใช้ดัชนีพืชพรรณ (NDVI)

Land use classification and investigation of forest areas in Chi River Basin using Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

ชัยณรงค์ โอภาไพบูลย์¹, สรรสฤษฎ์ เอียรโพธิ์ภักษ์² และ นุชนารถ ศรีวงศิตานนท์³

^{1,2,3} ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

^{1,2,3} Remote Sensing Centre for Water Resources Management (SENSWAT) ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จ.กรุงเทพมหานคร

²กรมทรัพยากรน้ำ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม

*Corresponding author; E-mail address: chainarong.opb@gmail.com

บทคัดย่อ

การใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดินเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อระบบอุทกวิทยาและการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ในการศึกษาครั้งนี้วัตถุประสงค์เพื่อการจำแนกการใช้ที่ดินและตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไม้ในลุ่มน้ำชีระหว่างปี พ.ศ. 2544-2557 โดยใช้ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) ทั้งนี้ ดัชนี NDVI ซึ่งคำนวณจากค่าการสะท้อนกลับที่ตรวจวัดได้โดยดาวเทียม MODIS นั้น จะถูกคำนวณสำหรับทุกช่วงเวลา 16 วัน และมีความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 250 เมตร โดยในการศึกษาเริ่มด้วยการประยุกต์ใช้กระบวนการ Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS) ซึ่งมีพื้นฐานของวิธีการ Fourier transform เพื่อปรับปรุงอนุกรมเวลาของดัชนี NDVI ที่มีความผิดพลาดและที่ได้รับผลกระทบจากเมฆและสภาพบรรยากาศ จากนั้นกระบวนการจำแนกแบบไม่มีการกำกับถูกนำมาใช้กับอนุกรมเวลาของดัชนี NDVI ในแต่ละปีซึ่งมีจำนวนภาพทั้งสิ้น 23 ภาพ เพื่อการจำแนกประเภทการใช้ที่ดิน ทั้งนี้วิธีการ Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm (ISODATA) ได้ถูกนำมาใช้เพื่อเลือกจำนวนประเภทการใช้ที่ดินที่เหมาะสมของการใช้ที่ดินในแต่ละปีโดยการเปลี่ยนแปลงจำนวนประเภทการใช้ที่ดินจาก 25 ถึง 100 ประเภท จำนวนประเภทการใช้ที่ดินที่ให้ค่าสูงสุดของค่าความสามารถในการแบ่งแยกต่ำสุด (Minimum separability) ได้ถูกเลือกเพื่อกำหนดประเภทการใช้ที่ดิน ผลการศึกษาพบว่า จำนวนของประเภทการใช้ที่ดินที่ได้รับการคัดเลือกมีค่าระหว่าง 61 ถึง 97 และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82 ต่อจากนั้นวิธีการ Hierarchical classification ได้ถูกนำมาใช้เพื่อรวมกลุ่มประเภทการใช้ที่ดิน โดยในการศึกษานี้ได้พิจารณาเฉพาะกลุ่มของพื้นที่ป่าไม้เท่านั้น โดยค่าความถูกต้องของการจำแนกพื้นที่ป่าไม้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับข้อมูลพื้นที่ป่าไม้ 4 ช่วงเวลา ที่เผยแพร่โดยกรมพัฒนาที่ดินพบว่ามีค่าเฉลี่ยประมาณ 78.36% ซึ่งนับว่าเป็นความถูกต้องที่สามารถยอมรับได้

คำสำคัญ: การจำแนกการใช้ที่ดิน, ป่าไม้, ดัชนี NDVI, HANTS, ISODATA

Abstract

Land use and land cover are very important factors affecting hydrologic cycle and water resources management. The objective of this study is to classify land use and to investigate the changes of forest areas in Chi River Basin between 2001 and 2014 using NDVI. NDVI - which is calculated using reflectance data detected by MODIS - has been produced on 16-day interval and at a spatial resolution of 250 m. The harmonic analysis of time series (HANTS) algorithm based on Fourier transform was used to reconstruct the time series of NDVI to remove random noise and cloud contamination. An unsupervised classification was later applied to annual time series of NDVI - comprising 23 images - to classify land use classes. The Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm (ISODATA) was used to identify the most suitable number of land use classes by varying the number between 25 and 100. The number which provides the maximum value of minimum separability year was selected to identify land use classes. The results show that the selected number of each year varies between 61 to 97 with the average number of 82. The hierarchical classification model was later used to group the number of classes to be the main groups. In this study, forest area is the only group to be considered. The classification of forest areas was compared to the 4 periods of forest data provided by Land Development Department and the results of the accuracy was shown to be 78.36% which is accepted.

Keywords: Land use classification, Forest, NDVI, HANTS, ISODATA

1. คำนำและที่มาของงานวิจัย

การใช้ที่ดินและสิ่งปกคลุมดิน (Land-use land-cover, LULC) มีความสำคัญต่อการบริหารจัดการทรัพยากรในหลาย ๆ ด้าน อาทิเช่น ด้านการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ ด้านการบริหารจัดการทรัพยากรดิน เพื่อสร้างความมั่นคงและยั่งยืนของการใช้ประโยชน์ที่ดินและสิ่งแวดล้อมโดยรวม เป็นต้น อย่างไรก็ตาม การจัดเก็บข้อมูลการใช้ที่ดินต้องใช้ทรัพยากรบุคคลและงบประมาณในปริมาณมาก สำหรับประเทศไทย กรมพัฒนาที่ดินทำหน้าที่ในการจัดเก็บข้อมูลการใช้ที่ดินโดยการประมวลผลจากข้อมูลภาคสนามและข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศเป็นข้อมูลหลัก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการเก็บข้อมูลดังกล่าวต้องใช้เวลานานในการจัดเก็บและการประมวลผล ดังนั้น ข้อมูลที่เผยแพร่จึงเป็นข้อมูลที่ครอบคลุมช่วงเวลาหลายปี ทำให้สร้างความสับสนในการใช้เป็นตัวแทนการใช้ที่ดินที่ถูกต้องในแต่ละช่วงเวลาเผยแพร่ นอกจากนั้นแล้ว ข้อมูลการใช้ที่ดินที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลภาคสนาม มีลักษณะเป็นข้อมูลสำหรับเฉพาะช่วงเวลาที่ทำกรจัดเก็บ จึงไม่มีความเป็นปัจจุบัน ดังนั้น ในการบริหารจัดการทรัพยากรที่เกี่ยวข้องจึงต้องมีการประเมินจากข้อมูลการใช้ที่ดินในอดีต ซึ่งอาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการนำไปใช้เพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรด้านต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการตรวจสอบการใช้ที่ดินจากข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ซึ่งได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากเป็นวิธีการที่ไม่ยุ่งยากเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเก็บข้อมูลภาคสนามโดยตรง และสามารถเข้าถึงข้อมูลที่มีความเป็นปัจจุบันมากกว่าการใช้วิธีการเก็บข้อมูลภาคสนาม รวมทั้งเป็นข้อมูลที่ครอบคลุมทุกจุดภาพของพื้นที่ศึกษาและทุกช่วงเวลาจากอดีตที่เริ่มนำมาใช้งานจนถึงสถานภาพปัจจุบัน ทั้งนี้ ดัชนีที่ได้จากเทคนิคการรับรู้จากระยะไกลที่ถูกนำมาใช้เพื่อตรวจสอบการใช้ที่ดินที่เป็นที่นิยมมากที่สุดคือ ดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) [1] ซึ่งคำนวณจากผลต่างระหว่างค่าการสะท้อนกลับของช่วงคลื่นแสงสีแดงที่ตามองเห็นได้ (Visible red, VIR) ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 0.63 ถึง 0.70 ไมโครเมตร และค่าการสะท้อนกลับของช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near-infrared, NIR) ซึ่งมีความยาวคลื่นในช่วง 0.7 ถึง 1.1 ไมโครเมตร หาดด้วยผลรวมของค่าการสะท้อนกลับของช่วงคลื่นทั้งสองช่วงคลื่น (NDVI = (NIR-VIR)/(NIR+VIR) โดยพืชใบเขียวมีคุณสมบัติในการดูดซับแสงในช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ ในขณะที่มีคุณสมบัติในการสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ ดังนั้น พืชใบเขียวจึงมีค่า NDVI สูง ทำให้สามารถนำดัชนี NDVI มาใช้เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของพืชพรรณได้ [2] ทั้งนี้ NDVI มีค่าระหว่าง -1 ถึง 1 โดยค่าใกล้ 0 และน้อยกว่า หมายถึงการสะท้อนกลับจากพื้นที่ที่ไม่มีใบพืชสีเขียว และค่าใกล้ 1 หมายถึงการสะท้อนกลับจากพื้นที่ที่มีใบพืชสีเขียว ในปริมาณมาก ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงได้มีการนำดัชนี NDVI มาใช้ตรวจสอบปริมาณคลอโรฟิลล์ในใบพืช นอกจากนั้นแล้ว ดัชนี NDVI สามารถนำมาใช้เพื่อตรวจสอบประเภทการใช้ที่ดินได้ [3] ทั้งนี้เนื่องจากประเภทการใช้ที่ดินมีส่วนเกี่ยวข้องกับปริมาณคลอโรฟิลล์ที่แตกต่างกัน

โดยที่พื้นที่ป่าไม้จะมีปริมาณคลอโรฟิลล์มากทำให้ NDVI มีค่าสูง ในขณะที่พื้นที่เกษตรกรรมจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ลดลงทำให้ NDVI มีค่าต่ำกว่าในพื้นที่ป่าไม้ และสำหรับพื้นที่ว่างเปล่าและพื้นที่เมืองจะมีปริมาณคลอโรฟิลล์ที่ลดน้อยลงไป ทำให้ NDVI มีค่าต่ำกว่าในพื้นที่ป่าไม้และพื้นที่เกษตรกรรม ตามลำดับ ทั้งนี้ งานวิจัยส่วนใหญ่เป็นการตรวจสอบประเภทการใช้ที่ดินสำหรับพื้นที่ศึกษา ณ เวลาใด ๆ อยางไรก็ตาม Aredehey et al. [4] ได้ทำการตรวจสอบประเภทการใช้ที่ดินโดยการใช้อินพุทของภาพดัชนี NDVI จำนวน 23 ภาพในช่วงเวลา 1 ปี ทำให้ได้ผลการตรวจสอบประเภทการใช้ที่ดินที่มีความถูกต้องมากขึ้น โดยการศึกษาดังกล่าวได้นำกระบวนการ Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS) [5] มาปรับแก้ความผิดพลาดของดัชนี NDVI เพื่อลดผลกระทบจากเมฆปกคลุมและผลกระทบจากสภาพภูมิอากาศก่อนที่จะนำไปตรวจสอบประเภทการใช้ที่ดิน

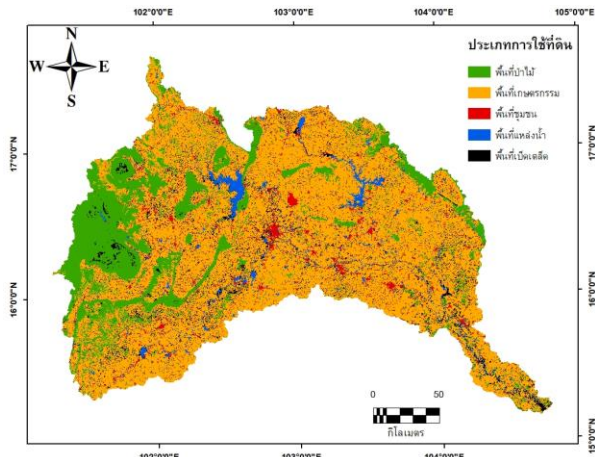
ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำดัชนี NDVI ที่ได้จากผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 ซึ่งมีความละเอียดของจุดภาพเท่ากับ 250 เมตร และมีความถี่ของข้อมูลทุก 16 วัน ที่ครอบคลุมพื้นที่ลุ่มน้ำชี ในระหว่างปี พ.ศ. 2544-2557 มาใช้เพื่อตรวจสอบประเภทการใช้ที่ดินในช่วงเวลาดังกล่าว โดยใช้วิธีการจำแนกแบบไม่มีการกำกับ จากนั้นทำการแยกพื้นที่ป่าไม้ออกจากประเภทการใช้ที่ดินอื่น ๆ เพื่อนำไปเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ป่าไม้ในแต่ละปี ทั้งนี้ ก่อนที่จะนำดัชนี NDVI มาประยุกต์ใช้ จำเป็นจะต้องผ่านกระบวนการ HANTS เพื่อปรับแก้ความผิดพลาดที่เกิดจากผลกระทบของเมฆและสภาพภูมิอากาศ เพื่อสร้างความถูกต้องให้กับผลการจำแนกพื้นที่ป่าไม้สำหรับลุ่มน้ำชีในช่วงเวลาที่ศึกษา

2. พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ลุ่มน้ำชีตั้งอยู่ทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ระหว่างเส้นละติจูด 15° 9' 29.81" ถึง 17° 39' 54.04" เหนือ และระหว่างเส้นลองจิจูด 101° 15' 29.96" ถึง 104° 46' 6.9" ตะวันออก และมีพื้นที่ลุ่มน้ำประมาณ 49,132 ตารางกิโลเมตร ทิศเหนือติดกับลุ่มน้ำโขง ทิศใต้ติดกับลุ่มน้ำมูล ทิศตะวันออกติดกับลุ่มน้ำโขงและลุ่มน้ำมูล และทิศตะวันตกติดกับลุ่มน้ำป่าสัก สภาพภูมิประเทศของลุ่มน้ำชีประกอบด้วยเทือกเขาสูง โดยมีเทือกเขาภูพานในบริเวณทางทิศตะวันออกและทิศเหนือ และเทือกเขาตองพญาเย็นในบริเวณทิศตะวันตก โดยเทือกเขาทั้งสองเป็นต้นกำเนิดของแม่น้ำชีและแม่น้ำสาขาที่สำคัญหลายสาย ส่วนพื้นที่ตอนกลางเป็นที่ราบถึงลูกคลื่นลอนลาดและมีเนินเล็กน้อยทางตอนใต้ของลุ่มน้ำ การใช้ที่ดินของลุ่มน้ำชีตามข้อมูลแผนที่การใช้ที่ดินปี พ.ศ. 2553-2556 ของกรมพัฒนาที่ดิน แสดงดังในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่แหล่งน้ำ และพื้นที่เบ็ดเตล็ด จำนวน 19.80%, 66.50%, 5.01%, 3.81% และ 4.90% ตามลำดับ โดยในการศึกษานี้จะให้ความสำคัญของการตรวจสอบเฉพาะพื้นที่ป่าไม้ในช่วงเวลาระหว่างปี พ.ศ. 2544 ถึง 2557 เท่านั้น โดยแยกพื้นที่การใช้ที่ดินประเภทอื่น ๆ ออกจากพื้นที่ป่าไม้

3. ข้อมูลที่ใช้ประกอบการศึกษา

3.1 ดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)



รูปที่ 1 การใช้ที่ดินของพื้นที่ลุ่มน้ำซีที่เผยแพร่โดยกรมพัฒนาที่ดิน ในปี พ.ศ. 2553-2556

การศึกษานี้ได้พิจารณาเลือกใช้ผลิตภัณฑ์ดัชนี NDVI ซึ่งอยู่ในชุดผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 ที่เป็นข้อมูลที่ประมวลผลจากภาพถ่ายดาวเทียม Terra ที่ตรวจวัดข้อมูลการสะท้อนกลับโดยตัวรับรู้ MODIS ทั้งนี้ ดัชนี NDVI เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไป เนื่องจากมีความละเอียดเชิงพื้นที่และเวลาในระดับที่ดี กล่าวคือมีความละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ 250 เมตร และความถี่ของข้อมูลราย 16 วัน โดยจำนวนภาพของดัชนี NDVI ในแต่ละปีมีทั้งสิ้น 23 ภาพ ทั้งนี้ ในการศึกษานี้ได้เลือกใช้ดัชนี NDVI ที่ครอบคลุมพื้นที่ที่ลุ่มน้ำซีในระหว่างปี พ.ศ.2544-2557

3.2 ข้อมูลการใช้ที่ดิน

การศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมข้อมูลการใช้ที่ดินของประเทศไทยที่ทำการจัดเก็บข้อมูลโดยกรมพัฒนาที่ดินในระหว่างปี พ.ศ. 2543 จนถึงปี พ.ศ. 2556 โดยในช่วงเวลาดังกล่าว กรมพัฒนาที่ดินได้ทำการเผยแพร่ข้อมูลการใช้ที่ดินสำหรับ 4 ช่วงเวลา คือ ในระหว่างปี พ.ศ. 2543-2545, 2549-2550, 2551-2552 และ 2553-2556 โดยข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้ถูกจำแนกเป็น 5 ประเภท คือ พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ป่าไม้ พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง พื้นที่แหล่งน้ำ และพื้นที่เบ็ดเตล็ด ในการศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินสำหรับพื้นที่ป่าไม้ในช่วงเวลาดังกล่าวเท่านั้น ดังนั้น ในตารางที่ 1 จึงได้แสดงพื้นที่ของการใช้ที่ดินในทุกประเภทตามรายละเอียดการใช้ที่ดิน จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ป่าไม้ที่มีการเผยแพร่โดยกรมพัฒนาที่ดินใน 4 ช่วงเวลา มีพื้นที่เท่ากับ 9,482, 10,154, 10,082, 9,729 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 19.3%, 20.7%, 20.5% และ 19.8% ของพื้นที่ลุ่มน้ำซี ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,862 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 20.1% ของพื้นที่ลุ่มน้ำซี

4. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

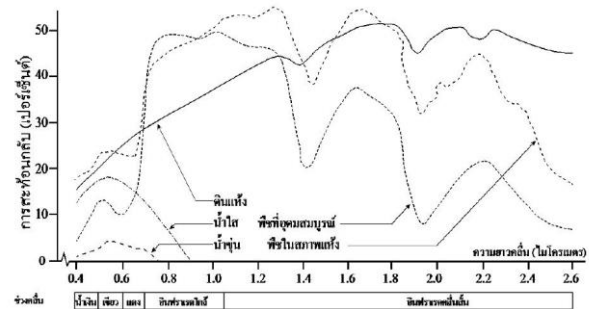
4.1 ดัชนีพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)

NDVI เป็นดัชนีที่ใช้แสดงลักษณะของพืชพรรณและสิ่งปกคลุมดินที่ถูกนำเสนอโดย Rouse et al. [1] โดยดัชนี NDVI อาศัยคุณสมบัติการตอบสนองต่อช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ (Visible, VIS) ซึ่งมีความยาวคลื่น 0.4 ถึง 0.7 ไมโครเมตร และการตอบสนองต่อช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (Near Infrared, NIR) ซึ่งมีความยาวคลื่น 0.7 ถึง 1.1

ไมโครเมตร โดยใช้หลักที่คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ซึ่งเป็นเม็ดสีที่ทำหน้าที่สังเคราะห์แสงในใบพืช มีการดูดกลืนแสงที่ตามองเห็นได้มากจึงมีค่าการสะท้อนกลับน้อย ในขณะที่ช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้จะสามารถสะท้อนกลับจากมีโซฟิลล์ (Mesophyll) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของใบพืชได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับสิ่งปกคลุมดินประเภทอื่น อย่างไรก็ตาม ค่าการสะท้อนกลับจากพืชที่อุดมสมบูรณ์หรือแห้งจะมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้น ค่าการสะท้อนกลับจากช่วงคลื่น NIR จึงสามารถใช้เป็นตัวอ้างอิงเพื่อเทียบกับการสะท้อนกลับจากช่วงคลื่น VIS ซึ่งมีค่ามากในกรณีของพืชที่แห้งและมีค่าน้อยในพืชที่อุดมสมบูรณ์ ทั้งนี้ ลักษณะการสะท้อนกลับต่อช่วงคลื่น VIS และ NIR ของพืชที่อุดมสมบูรณ์และพืชในสภาพแห้งแสดงไว้ในรูปที่ 2 (นุชนารถ [6]) ซึ่งจากลักษณะการตอบสนองที่แสดงนี้ Tucker et al. [2] ได้นำข้อมูลการสะท้อนกลับของช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ เฉพาะในช่วงคลื่นสีแดง (Visible red, VIR) ซึ่งมีความยาวช่วงคลื่นระหว่าง 0.63 ถึง 0.70 ไมโครเมตร ที่ตอบสนองได้เฉพาะเจาะจงกว่าการใช้ช่วงคลื่นที่ตามองเห็นได้ทั้งหมด และข้อมูลการสะท้อนกลับของช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) ซึ่งมีความยาวคลื่นดังกล่าวข้างต้น มาสร้างเป็นอัตราส่วนซึ่งกันและกัน ซึ่งช่วยให้ประสิทธิภาพในการจำแนกพืชเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งวิธีการในการคำนวณค่าดัชนี NDVI แสดงในสมการที่ (1)

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

โดยที่ ρ_{NIR} คือ ค่าการสะท้อนกลับจากพื้นผิวในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ และ ρ_{VIR} คือ ค่าการสะท้อนกลับจากพื้นผิวในช่วงคลื่นแสงสีแดงที่ตามองเห็นได้



รูปที่ 2 การสะท้อนกลับเชิงสเปกตรัมสำหรับพืช ดิน และน้ำ

4.2 กระบวนการ Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS)

ดัชนี NDVI ซึ่งประเมินได้จากการใช้ความแตกต่างของการตอบสนองต่อช่วงคลื่น 2 ช่วงคลื่น ดังกล่าวข้างต้น พบว่า ช่วงคลื่นดังกล่าวได้รับผลกระทบจากเมฆและสภาพบรรยากาศ [7] ทำให้การเปลี่ยนแปลงของดัชนีตามเวลาอาจไม่มีเสถียรภาพ ดังนั้น จึงต้องมีการปรับปรุงอนุกรมเวลาของข้อมูล NDVI ให้มีความถูกต้องมากขึ้น โดยมีกระบวนการที่ได้รับการพัฒนาขึ้นเพื่อปรับปรุงข้อมูลที่เป็นที่นิยมใช้ อาทิเช่น (1) วิธีการ The Best Index Slope Extraction (BISE) ที่พัฒนาขึ้นโดย Viovy et al. [8] และ (2) วิธีการ Harmonic Analysis ที่พัฒนาขึ้นโดย Jakubauskas et al. [9] โดยวิธีการ Harmonic Analysis เป็นการประยุกต์ใช้การแปลงแบบฟูเรียร์และได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมในเวลาต่อมาโดย Menenti et al. [10] และ Verhoef [11] จนกลายเป็นวิธี

ตารางที่ 1 พื้นที่และเปอร์เซ็นต์การใช้ที่ดินทุกประเภทของกลุ่มน้ำชี ที่เผยแพร่โดยกรมพัฒนาที่ดินระหว่างปี พ.ศ.2543-2556

| ประเภทการใช้ที่ดิน | | พื้นที่ของข้อมูลในปี พ.ศ. (ตารางกิโลเมตร) | | | | พื้นที่เฉลี่ย (ตารางกิโลเมตร) |
|--------------------|------------------------------|---|----------------|----------------|----------------|----------------------------------|
| | | 2543-2545 | 2549-2550 | 2551-2552 | 2553-2556 | |
| A | พื้นที่เกษตรกรรม | 33,719 (68.6%) | 32,914 (67.0%) | 32,826 (66.8%) | 32,656 (66.5%) | 33,029 (67.2%) |
| F | พื้นที่ป่าไม้ | 9,482 (19.3%) | 10,154 (20.7%) | 10,082 (20.5%) | 9,729 (19.8%) | 9,862 (20.1%) |
| U | พื้นที่ชุมชนและสิ่งปลูกสร้าง | 1,889 (3.8%) | 2,225 (4.5%) | 2,278 (4.6%) | 2,459 (5.0%) | 2,213 (4.5%) |
| W | พื้นที่แหล่งน้ำ | 1,345 (2.7%) | 1,675 (3.4%) | 1,657 (3.4%) | 1,874 (3.8%) | 1,638 (3.3%) |
| M | พื้นที่เบ็ดเตล็ด | 2,694 (5.5%) | 2,160 (4.4%) | 2,288 (4.7%) | 2,409 (4.9%) | 2,388 (4.9%) |

การที่เรียกว่า Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS) และได้ถูกนำไปใช้ในงานวิจัยอย่างแพร่หลายอาทิเช่น ผลงานวิจัยที่ดำเนินการโดย Roerink et al. [12] และ Zhou et al. [13]

กระบวนการ HANTS เป็นวิธีการที่ใช้พื้นฐานจากการพิจารณา รูปแบบความถี่พื้นฐานหลักของข้อมูลด้วยวิธีการแปลงแบบฟูเรียร์อย่างง่าย (Fast Fourier Transform, FFT) ร่วมกับการวิเคราะห์โค้งถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด (Least squares curve fitting) ในการสร้างความสัมพันธ์ของจุดข้อมูลกับโค้งความสัมพันธ์ ทั้งนี้ กระบวนการคำนวณเริ่มด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบของฮาร์โมนิกของชุดข้อมูล จากนั้นตัดข้อมูลที่ค่าสูงหรือต่ำกว่าปกติออกไปจากชุดข้อมูล แล้วตามด้วยการสร้างโค้งถดถอยกำลังสองน้อยที่สุดระหว่างจุดข้อมูลที่เหลืออยู่กับโค้งฮาร์โมนิกที่เลือกใช้ กระบวนการจะดำเนินการทำวนซ้ำจนกว่าจะได้ฮาร์โมนิกที่มีความถี่ แอมพลิจูด และเฟส เข้ากับข้อมูลได้ดีที่สุด สำหรับข้อดีของวิธีการนี้ คือ มีการพิจารณาองค์ประกอบของฮาร์โมนิกที่มีความถี่และอนุกรมเวลาจำนวนมากได้ดีกว่าวิธีการอื่น ๆ แต่มีข้อเสียคือต้องใช้เวลาประมวลผลที่นานมากกว่า

Zhou et al. [14] ได้ทำการศึกษาความไวของพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ HANTS โดยการใช้ข้อมูลผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 พบว่า พารามิเตอร์ของกระบวนการ HANTS มีความใกล้เคียงกับผลจากการศึกษาอื่น ๆ โดยค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ประกอบด้วย (1) อนุกรมเวลาที่ควรเลือกใช้ควรเป็นรายปี (2) จำนวนฮาร์โมนิก เท่ากับ 3 ฮาร์โมนิก (3) ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของ NDVI ในอนุกรม เท่ากับ 1 และ -0.2 ตามลำดับ (4) ตัดข้อมูลเฉพาะที่มีค่าต่ำกว่าปกติออกจากอนุกรมของข้อมูล เนื่องจากความผิดพลาดที่เกิดจากเมฆและบรรยากาศจะทำให้ค่า NDVI มีค่าต่ำกว่าปกติ (5) พารามิเตอร์อื่น ๆ คือ Degree of over-determination, Fit error tolerance และ Delta กำหนดให้เท่ากับ 5, 0.05 และ 0.5 ตามลำดับ

4.3 การจำแนกการใช้ที่ดินแบบไม่มีการกำกับโดยวิธีการ Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm (ISODATA)

การจำแนกแบบไม่มีการกำกับ (Unsupervised classification) เป็นการจำแนกโดยไม่มีการสร้างข้อมูลฝึกหัดเพื่อเป็นพื้นฐานสำหรับการจำแนก เช่น ข้อมูลภาคสนาม เป็นต้น แต่เป็นการจำแนกชุดข้อมูลทั้งหมดโดยการประเมินจากค่าของจุดในภาพถ่ายและทำการจำแนกข้อมูลโดยจัดกลุ่มตามค่าของจุดในภาพถ่าย ทั้งนี้ พื้นฐานของการจัดกลุ่ม คือ ในกลุ่มเดียวกันจะมีค่าของการสะท้อนกลับที่ใกล้เคียงกัน

ในขณะที่ข้อมูลที่อยู่ต่างกลุ่มกันจะมีค่าแตกต่างอย่างชัดเจน สำหรับวิธีการจำแนกแบบไม่มีการกำกับที่เป็นที่นิยมมาก คือ วิธีการ K-means และวิธี The Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique (ISODATA) ซึ่งโดยพื้นฐานของวิธีการทั้ง 2 วิธี มีความใกล้เคียงกัน แต่วิธีการ ISODATA ได้รับการพัฒนาให้ค่อนข้างมีประสิทธิภาพและเสถียรภาพในการจำแนกที่ดีกว่า

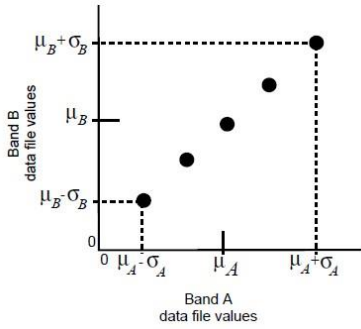
วิธีการ ISODATA เป็นการจำแนกข้อมูลโดยใช้ระยะห่างของค่าข้อมูลแต่ละจุดกับค่าเฉลี่ยของข้อมูลในแต่ละกลุ่ม ซึ่งกระบวนการเริ่มต้นจากการคำนวณค่าทางสถิติของข้อมูลทั้งหมด แล้วกำหนดค่าจุดศูนย์กลางที่เป็นตัวแทนกลุ่มตั้งแสดงในรูปที่ 3(ก) จากนั้นกระบวนการจำแนกรอบที่หนึ่งเริ่มต้นโดยการหาค่าระยะทางของข้อมูลจุดใด ๆ ไปยังจุดศูนย์กลางที่เป็นตัวแทนกลุ่มที่ใกล้ที่สุดซึ่งจะถูกจำแนกให้อยู่ในกลุ่มนั้น ตั้งแสดงในรูปที่ 3(ข) จากนั้นขั้นตอนถัดไปจะทำการหาค่าจุดศูนย์กลางของกลุ่มใหม่โดยเฉลี่ยจากข้อมูลในแต่ละกลุ่ม แล้วทำการจัดกลุ่มใหม่ในลักษณะของกระบวนการทำซ้ำซึ่งจะสิ้นสุดลงเมื่อจุดของข้อมูลมีการเปลี่ยนแปลงกลุ่มจากครั้งก่อนหน้าไม่เกินกว่าที่กำหนดไว้ ซึ่งจะได้ผลลัพธ์สุดท้ายดังแสดงรูปที่ 3(ค)

การประเมินผลการจำแนกแบบไม่มีการกำกับจะพิจารณาเลือกจำนวนกลุ่มที่ทำให้ผลการจำแนกที่ดีที่สุด โดยพิจารณาจากความสามารถในการแบ่งแยก (Separability) ที่ต่ำที่สุดของแต่ละจำนวนกลุ่มมาเปรียบเทียบกัน จากนั้นจะเลือกจำนวนกลุ่มที่ให้ค่าดังกล่าวสูงสุด ทั้งนี้ ความสามารถในการแบ่งแยก หมายถึง การพิจารณาว่ากลุ่มข้อมูลสองกลุ่มที่ถูกจำแนกออกจากกันนั้นมีระดับความเชื่อมั่นว่าสามารถจำแนกข้อมูลออกจากกันได้ในระดับใด ซึ่งวิธีการประเมินความสามารถในการแบ่งแยกที่นิยมใช้ คือ วิธีการ Transformed Divergence (TD) และ Bhattacharyya Distance (BD) โดยในการศึกษานี้เลือกใช้วิธีการ TD [16] ทั้งนี้ TD ที่มีค่ามากกว่า 1.9 แสดงว่า การแบ่งแยกระหว่างกลุ่มที่พิจารณามีการแบ่งแยกได้ดี ทั้งนี้ แนวทางในการคำนวณโดยวิธีการ TD แสดงดังในสมการที่ (2) และ สมการที่ (3)

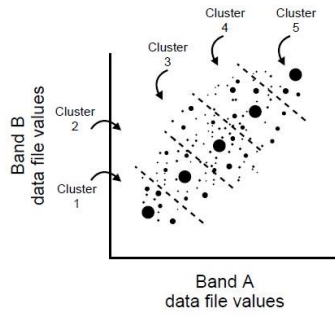
$$TD(i, j) = 2 * \left[1 - e^{-\left(\frac{D(i, j)}{8}\right)} \right] \quad (2)$$

โดยที่ TD(i,j) คือ ค่า Transformed Divergence ของกลุ่ม i และ j, ในขณะที่ D(i,j) คือ ค่า Divergence ของกลุ่ม i และ j

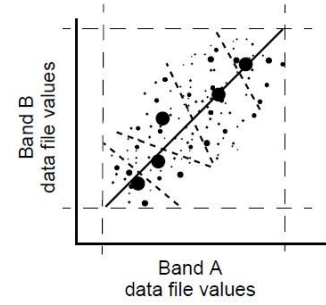
$$D(i, j) = 0.5 * T[M(i) - M(j)] * [InvS(i) + InvS(j)] * [M(i) - M(j)] + 0.5 * Trace[InvS(i) * S(j) + InvS(j) * S(i) - 2 * I] \quad (3)$$



(ก) การจัดกลุ่มเบื้องต้น



(ข) การจัดกลุ่มรอบที่หนึ่ง



(ค) การจัดกลุ่มรอบสุดท้าย

รูปที่ 3 การจำแนกโดยวิธี ISODATA

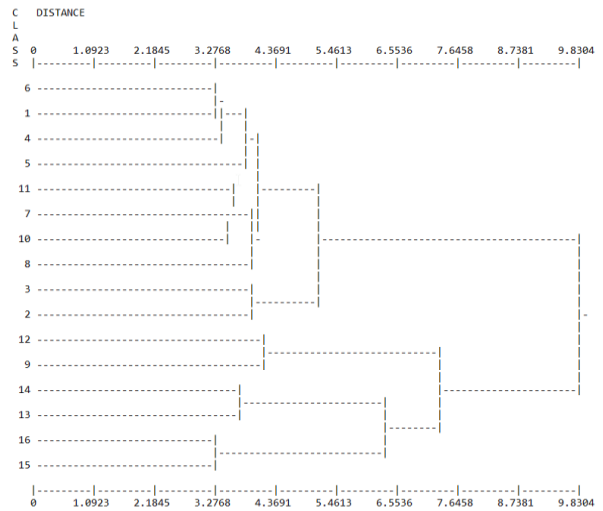
ที่มา : ERDAS (1999) [15]

โดยที่ $M(i)$ คือ เวกเตอร์ค่าเฉลี่ยของกลุ่ม i , $S(i)$ คือ ค่า covariance matrix ของกลุ่ม i , $InvS(i)$ คือ ค่า covariance matrix ผกผันของกลุ่ม i , $Trace[]$ คือ ค่า trace of matrix, $T[]$ คือ transpose matrix และ I คือ identity matrix ที่มีขนาดเท่ากับ covariance matrix

4.4 การจำแนกการใช้ที่ดินประเภทป่าไม้โดยวิธีการ Hierarchical classification

วิธีการ Hierarchical classification เป็นวิธีการในการจำแนกความแตกต่างของกลุ่มประชากรวิธีการหนึ่งซึ่งนำมาใช้ในการพิจารณาความใกล้ชิดกันของประชากร 2 กลุ่มใด ๆ ในกลุ่มประชากรทั้งหมด [17] โดยการคำนวณจากค่า 2 ค่า คือ (1) เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง (Percentage Different; PD) ของค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มใด ๆ เปรียบเทียบกับกลุ่มประชากรทั้งหมด และ (2) ค่าความแตกต่างเชิงระยะทาง (Euclidean distance; ED) ของค่าเฉลี่ยของประชากร 2 กลุ่มใด ๆ

ผลที่ได้จากการคำนวณความแตกต่างจะถูกนำมาใช้ในการสร้างแผนภาพเดนโดแกรม (Dendrogram) ซึ่งจะแสดงให้เห็นคู่ของกลุ่มประชากรคู่ที่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งผู้ใช้งานสามารถพิจารณาตัดสินใจรวมข้อมูลของประชากร 2 กลุ่ม นั้นให้เป็นกลุ่มเดียวกันได้ ดังตัวอย่างในรูปที่ 4 ซึ่งเป็นกรณีวิเคราะห์ Hierarchical classification ของการจำแนกการใช้ที่ดินที่ถูกจำแนกออกเป็น 16 กลุ่ม โดยค่าที่แสดงประกอบด้วยหมายเลขประจำกลุ่มที่จำแนก (Class) และความแตกต่างเชิงระยะทางของกลุ่มการจำแนก 2 กลุ่ม ที่มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งสามารถนำมารวมเป็นกลุ่มเดียวกันได้ เช่น กลุ่มที่มีหมายเลขประจำกลุ่ม 15 กับ 16 มีความใกล้เคียงกันมากที่สุดสามารถนำมารวมเป็นกลุ่มเดียวกันได้ หรือตัวอย่างของกลุ่มที่มีหมายเลขประจำกลุ่ม 13 กับ 14 มีความใกล้เคียงกันมากที่สุดสามารถนำมารวมเป็นกลุ่มเดียวกันได้เช่นเดียวกัน สำหรับการดำเนินการในลำดับถัดไปจะพบว่าถ้ามีการรวมประชากรกลุ่มที่ 15 กับ 16 เข้าด้วยกัน และมีการรวมประชากรกลุ่มที่ 13 กับ 14 เข้าด้วยกันแล้ว กลุ่มที่ 13, 14, 15 และ 16 จะมีความใกล้เคียงกันมากกว่ากลุ่มอื่น ๆ จึงสามารถพิจารณารวมเข้าด้วยกันได้เช่นกัน



รูปที่ 4 ตัวอย่างการแสดงผลของวิธีการ Hierarchical classification ด้วยแผนภาพ Dendrogram

5. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยเรื่องการจำแนกการใช้ที่ดินและการตรวจสอบพื้นที่ป่าไม้ในลุ่มน้ำชีโดยใช้ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) มีขั้นตอนในการดำเนินงานดังต่อไปนี้

1. รวบรวมข้อมูลผลิตภัณฑ์ MOD13Q1 ดัชนี NDVI ราย 16 วัน ความละเอียดเชิงพื้นที่ 250 เมตร ที่ครอบคลุมลุ่มน้ำชีในช่วงเวลา 14 ปี ระหว่างปี พ.ศ.2544-2557 โดยในแต่ละปีจะมีจำนวนภาพของดัชนี NDVI ทั้งหมด 23 ภาพ
2. ประยุกต์ใช้กระบวนการ Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS) เพื่อปรับแก้ความผิดพลาดของดัชนี NDVI ที่เกิดจากผลกระทบของเมฆและปัจจัยต่าง ๆ ของสภาพภูมิอากาศ
3. นำภาพดัชนี NDVI ที่ผ่านกระบวนการ HANTS จำนวน 23 ภาพในแต่ละปี ทั้ง 14 ปี มาจำแนกการใช้ที่ดินด้วยกระบวนการจำแนกแบบไม่มีการกำกับโดยวิธี ISODATA ทั้งนี้ ได้จำแนกประเภทการใช้ที่ดินในแต่ละปีตั้งแต่ 25 ถึง 100 ประเภท จากนั้นนำมาวิเคราะห์จำนวนประเภทการใช้ที่ดินที่เหมาะสมในแต่ละปี โดยพิจารณาจากประเภทการใช้ที่ดินที่ให้ค่าสูงสุดของค่าความสามารถในการแบ่งแยกต่ำสุด (Minimum separability)

4. ประยุกต์ใช้วิธีการ Hierarchical classification ในการรวมกลุ่มประเภทการใช้ที่ดินเพื่อแบ่งแยกการใช้ที่ดินประเภทป่าไม้จากการใช้ที่ดินประเภทอื่น ๆ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลการใช้ที่ดินประเภทป่าไม้ทุกประเภทของกรมพัฒนาที่ดินในปีที่มีการเผยแพร่ข้อมูลเพื่อทำให้เกิดความสอดคล้องกันของพื้นที่ป่าไม้มากที่สุด

5. นับจำนวนความถี่ของจุดภาพที่มีการใช้ที่ดินประเภทป่าไม้ในระหว่างปี พ.ศ.2544-2557 เพื่อเลือกจำนวนความถี่ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้พื้นที่การใช้ที่ดินประเภทป่าไม้มีความถูกต้องใกล้เคียงกับข้อมูลที่ตรวจวัดโดยกรมพัฒนาที่ดินมากที่สุด โดยหาเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนกันของพื้นที่ป่าไม้ ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI กับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดิน กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินกับพื้นที่ป่าไม้ที่ทับซ้อนกันเทียบกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดิน

6. ผลการศึกษา

6.1 ผลการปรับแก้ความผิดพลาดของอนุกรมเวลาโดยใช้ HANTS

เนื่องจากภาพของดัชนี NDVI ที่นำมาใช้ในการศึกษาอาจมีความผิดพลาดเนื่องจากผลกระทบของเมฆปกคลุมและปัจจัยต่าง ๆ ด้านสภาพภูมิอากาศ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ได้นำภาพดัชนี NDVI มาปรับแก้ด้วยกระบวนการ HANTS ดั้งเดิมของวิธีการประยุกต์ใช้ที่ได้กล่าวถึงในหัวข้อที่ (4.2) ทั้งนี้ ได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของทั้งพื้นที่ลุ่มน้ำซึ่งเป็นพารามิเตอร์ชุดเดียวกัน โดยได้ดำเนินการทดสอบความไวของการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง จนได้พารามิเตอร์ที่นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษานี้ดังแสดงในตารางที่ 2 ทั้งนี้ ค่าพารามิเตอร์ที่ได้มีความใกล้เคียงกับการศึกษาอื่น ๆ ที่ดำเนินการโดยการใช้ข้อมูลผลิตภัณฑ์ MOD13Q1

ตัวอย่างของผลการปรับแก้ความผิดพลาดสำหรับข้อมูลในอนุกรมเวลาของดัชนี NDVI โดยกระบวนการ HANTS สำหรับพื้นที่ป่าผลัดใบในลุ่มน้ำชีจำนวน 1 จุดภาพ แสดงดังในรูปที่ 5 และพิกัดของจุดภาพดังกล่าวแสดงดังในรูปที่ 6 ซึ่งรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่า ดัชนี NDVI ก่อนปรับแก้ซึ่งแสดงด้วยจุดที่มีสูงหรือต่ำกว่าปกติ ในขณะที่ NDVI หลังการปรับแก้โดยกระบวนการ HANTS จะมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นและลงอย่างเป็นวงรอบตามคาบการเจริญเติบโตของพืช ทั้งนี้ ข้อมูลในจุดภาพอื่น ๆ ของลุ่มน้ำชีก็มีลักษณะในทำนองเดียวกันกับจุดภาพที่แสดงเป็นตัวอย่างดังกล่าว

นอกจากนั้นแล้ว ในรูปที่ 6 ได้แสดงเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงค่าของดัชนี NDVI เฉลี่ยรายปี หลังผ่านกระบวนการ HANTS สำหรับลุ่มน้ำชี ในระหว่างปี พ.ศ. 2544-2557 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ค่าของดัชนี NDVI มีการเปลี่ยนแปลงในระหว่าง 0.01% ถึง 4.03% โดยมีค่าเฉลี่ย 14 ปี เท่ากับ 0.29% ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ไม่มากแต่ข้อมูลของดัชนี NDVI ที่ผ่านการปรับแก้แล้วจะมีความสมเหตุสมผลมากกว่าข้อมูล NDVI ก่อนการปรับแก้ จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

6.2 ผลการจำแนกการใช้ที่ดินด้วยกระบวนการจำแนกแบบไม่มีการกำกับ

ในการศึกษาได้นำภาพดัชนี NDVI ที่ผ่านกระบวนการ HANTS จำนวน 23 ภาพ ในแต่ละปี ทั้ง 14 ปี มาจำแนกประเภทการใช้ที่ดินด้วยกระบวนการจำแนกแบบไม่มีการกำกับโดยวิธี ISODATA โดยการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในแต่ละปีตั้งแต่ 25 ถึง 100 ประเภท จากนั้นนำมาวิเคราะห์จำนวนประเภทการใช้ที่ดินที่เหมาะสมในแต่ละปี ที่ให้ค่าสูงสุดของค่าความสามารถในการแบ่งแยกต่ำสุด (Minimum separability) โดยผลการศึกษาพบว่า จำนวนของประเภทการใช้ที่ดินที่เหมาะสมในระหว่างปี พ.ศ. 2544-2557 มีค่าเท่ากับ 88, 92, 89, 61, 85, 85, 82, 88, 97, 62, 64, 88, 79 และ 86 ประเภท ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82 ประเภท ทั้งนี้ ได้แสดงตัวอย่างของผลการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินซึ่งแสดงโดยค่าความสามารถในการแบ่งแยกเฉลี่ยและค่าความสามารถในการแบ่งแยกต่ำสุดของดัชนี NDVI ในปี พ.ศ. 2544 ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งจากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ค่าความสามารถในการแบ่งแยกเฉลี่ยมีค่ามากขึ้นเมื่อประเภทการใช้ที่ดินเพิ่มขึ้น ดังนั้น จึงไม่สามารถใช้ความสามารถในการแบ่งแยกเฉลี่ยมาช่วยตัดสินใจได้ ดังนั้น จึงใช้ค่าสูงสุดของค่าความสามารถในการแบ่งแยกต่ำสุดเป็นตัวตัดสินใจที่เหมาะสมกว่า โดยจากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า จำนวนของประเภทการใช้ที่ดินเท่ากับ 88 ให้ค่าสูงสุดของค่าความสามารถในการแบ่งแยกต่ำสุด ดังนั้น จึงทำการแยกประเภทของการใช้ที่ดินเท่ากับ 88 สำหรับในปี พ.ศ. 2544 เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป

6.3 ผลการประยุกต์ใช้วิธีการ Hierarchical classification ในการแยกพื้นที่ป่าไม้ออกจากประเภทการใช้ที่ดินอื่น ๆ

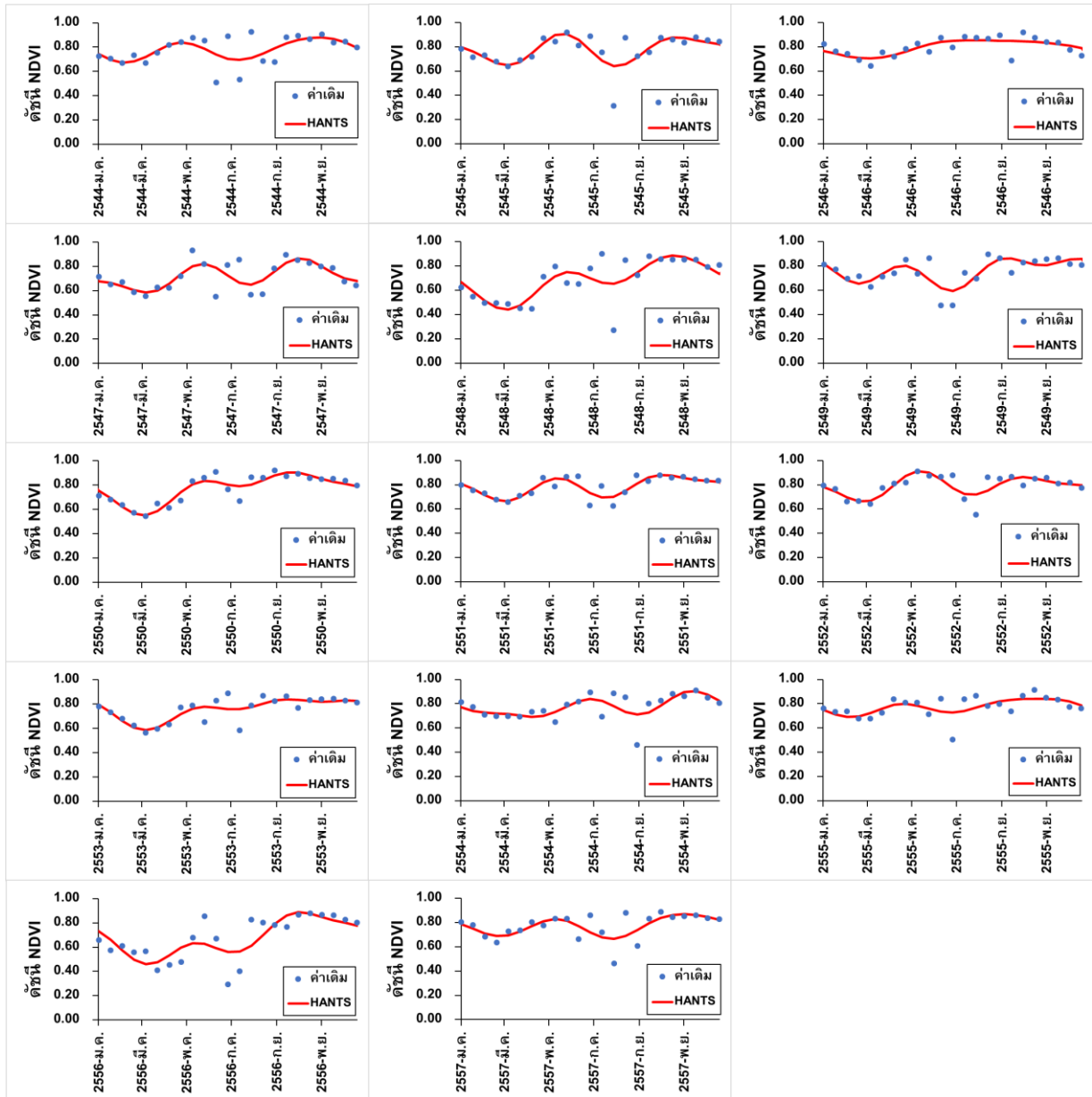
สำหรับขั้นตอนนี้เป็น การประยุกต์ใช้วิธีการ Hierarchical classification เพื่อการแยกพื้นที่ป่าไม้ออกจากประเภทการใช้ที่ดินอื่น ๆ ซึ่งดำเนินการกับจำนวนของประเภทการใช้ที่ดินที่เหมาะสมในระหว่างปี พ.ศ. 2544-2557 ที่ถูกดำเนินการในขั้นตอนการจำแนกการใช้ที่ดินด้วยกระบวนการจำแนกแบบไม่มีการกำกับ ทั้งนี้ การแยกประเภทการใช้ที่ดินที่เป็นป่าไม้จากการใช้ที่ดินประเภทอื่น ๆ ทำได้โดยการประเมินผลการจำแนกตาม Hierarchical classification เปรียบเทียบกับข้อมูลการใช้ที่ดินของกรมพัฒนาที่ดินในปีที่มีการเผยแพร่ข้อมูล ผลการวิเคราะห์แสดงดังในตารางที่ 3 โดยในตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ประเภทการใช้ที่ดินที่จำแนกโดยดัชนี NDVI ไปตรงกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินด้วยเปอร์เซ็นต์ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 30% จะเป็นผลให้พื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI มีความใกล้เคียงกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินมากที่สุด โดยจะทำให้พื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI มีความแตกต่างจากพื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยกรมพัฒนาที่ดิน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 5.19%

6.4 ผลการแยกพื้นที่ป่าไม้โดยการนับจำนวนความถี่ของพื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI ในแต่ละจุดภาพของแต่ละปี

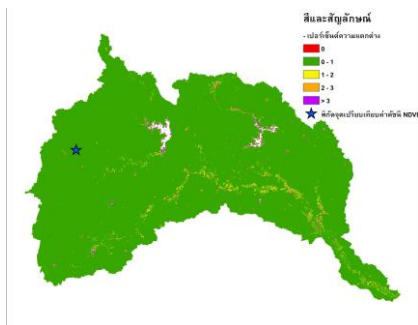
จากผลการประยุกต์ใช้วิธีการ Hierarchical classification ในการแยกพื้นที่ป่าไม้ออกจากประเภทการใช้ที่ดินอื่น ๆ ดังแสดงในหัวข้อ (6.3) เป็นผลให้พิจารณาเลือกประเภทการใช้ที่ดินที่จำแนกโดยดัชนี NDVI ที่มีเปอร์เซ็นต์ของพื้นที่มากกว่าหรือเท่ากับ 30% ที่สอดคล้องกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดิน อย่างไรก็ตาม พื้นที่ที่ถูกเลือกอาจไม่ใช่พื้นที่ป่าไม้ทั้งหมด ดังนั้น ในขั้นตอนนี้จึงเป็นการตรวจสอบว่า

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการ HANTS ที่ใช้ในการศึกษานี้

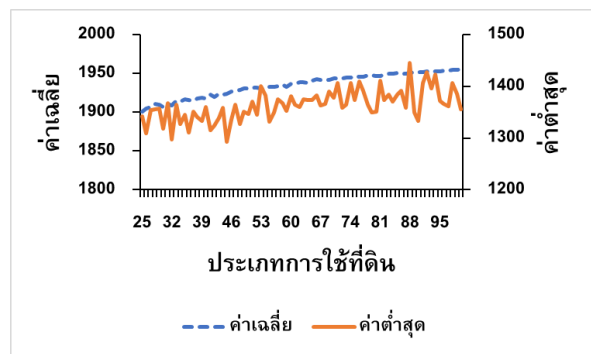
| พารามิเตอร์ | High | Low | High/Low | dod | nf* | nb* | fet* | delta |
|---------------------|------|-----|----------|-----|-----|-----|------|-------|
| ค่าที่ใช้ในการศึกษา | 1 | 0 | Low | 8 | 3 | 365 | 0.05 | 0.1 |



รูปที่ 5 ตัวอย่างผลการปรับแก้ดัชนี NDVI ของ 1 จุดภาพ ซึ่งเป็นพื้นที่ป่าผลัดใบ โดยใช้ HANTS ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544-2557



รูปที่ 6 เปรอ์เซ็นต์การเปลี่ยนแปลงเฉลี่ยและพิคจุดเปรียบเทียบของค่าดัชนี NDVI กับค่าดัชนีหลังผ่านกระบวนการ HANTS สำหรับลุ่มน้ำชี ในระหว่างปี พ.ศ. 2544-2557

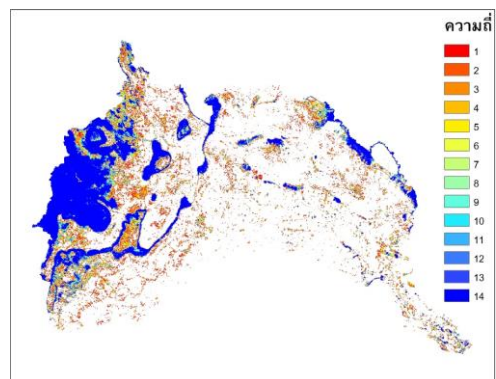


รูปที่ 7 ค่าความสามารถในการแบ่งแยกเฉลี่ยและค่าความสามารถในการแบ่งแยกต่ำสุดของแต่ละจำนวนของประเภทการใช้ที่ดินสำหรับปี พ.ศ. 2544

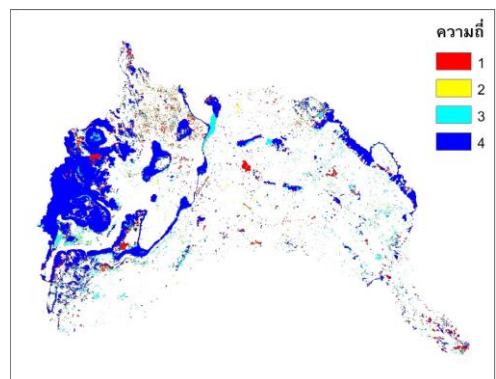
ตารางที่ 3 พื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของพื้นที่ป่าไม้เมื่อเปรียบเทียบกับกรมพัฒนาที่ดินในแต่ละกรณีศึกษา

| | ปี พ.ศ. | | | | | | | | | | | | | | เฉลี่ย |
|-------------------------------|---------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| | 2544 | 2545 | 2546 | 2547 | 2548 | 2549 | 2550 | 2551 | 2552 | 2553 | 2554 | 2555 | 2556 | 2557 | |
| พื้นที่ป่าไม้ (ตร.กม.) | | | | | | | | | | | | | | | |
| กรมพัฒนาที่ดิน | 9,482 | 9,482 | - | - | - | 10,154 | 10,154 | 10,082 | 10,082 | 10,057 | 10,057 | 10,057 | 10,057 | - | 9,966 |
| ≥ 50% | 6,698 | 7,892 | 7,730 | 7,843 | 8,218 | 7,938 | 8,113 | 7,802 | 7,911 | 7,688 | 7,408 | 7,285 | 7,934 | 7,998 | 7,747 |
| ≥ 40% | 8,578 | 8,391 | 9,088 | 8,589 | 9,223 | 8,918 | 8,714 | 9,009 | 9,452 | 7,688 | 8,646 | 8,790 | 7,934 | 8,214 | 8,660 |
| ≥ 30% | 9,979 | 10,627 | 9,518 | 10,159 | 10,446 | 9,920 | 9,847 | 11,031 | 10,714 | 9,966 | 10,134 | 9,413 | 9,508 | 9,277 | 10,039 |
| เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง | | | | | | | | | | | | | | | |
| ≥ 50% | 29.36 | 16.77 | - | - | - | 21.82 | 20.10 | 22.61 | 21.53 | 23.56 | 26.34 | 27.56 | 21.11 | - | 23.08 |
| ≥ 40% | 9.53 | 11.50 | - | - | - | 12.17 | 14.18 | 10.64 | 6.24 | 23.56 | 14.04 | 12.60 | 21.11 | - | 13.56 |
| ≥ 30% | 5.24 | 12.08 | - | - | - | 2.30 | 3.02 | 9.42 | 6.27 | 0.91 | 0.76 | 6.41 | 5.46 | - | 5.19 |

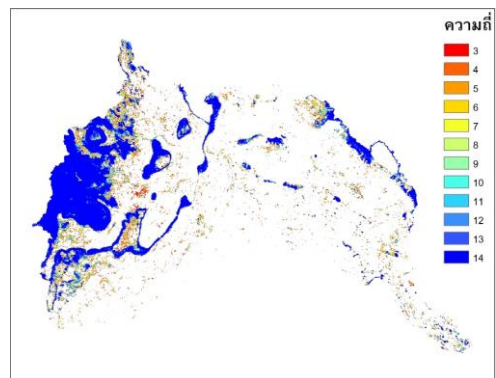
พื้นที่ในแต่ละจุดภาพที่ถูกจำแนกโดยดัชนี NDVI ว่าเป็นป่าไม้นั้น มีความถี่ของการเกิดจำนวนเท่าใดในช่วงเวลา 14 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2544-2557 ผลการวิเคราะห์จำนวนความถี่ในช่วงเวลา 14 ปี ของจุดภาพที่ถูกจำแนกว่าเป็นพื้นที่ป่าไม้แสดงดังในรูปที่ 8 โดยในรูปดังกล่าวได้แสดงเจดสีที่แตกต่างกันสำหรับแต่ละความถี่ที่มีการจำแนกโดยดัชนี NDVI (รูปที่ 8 (ก)) และเปรียบเทียบกับความถี่ใน 4 ช่วงเวลาของจุดภาพที่ถูกจำแนกว่าเป็นป่าไม้โดยกรมพัฒนาที่ดิน (รูปที่ 8 (ข)) จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ป่าไม้ที่ได้จากการเลือกจำนวนความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 14 ของแต่ละจุดภาพที่ถูกจำแนกโดยดัชนี NDVI ดังแสดงในรูปที่ 8 (ก) มีค่าเท่ากับ 16,165 ตารางกิโลเมตร ในขณะที่พื้นที่ป่าไม้ที่ได้จากการเลือกจำนวนความถี่ตั้งแต่ 1 ถึง 4 ช่วงเวลาของกรมพัฒนาที่ดิน ดังแสดงในรูปที่ 8 (ข) มีค่าเท่ากับ 11,245 ตารางกิโลเมตร ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พื้นที่ป่าไม้ที่ถูกจำแนกโดยดัชนี NDVI มีค่าเกินกว่าพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดิน ดังนั้น จำเป็นต้องตรวจสอบพื้นที่ป่าไม้ในแต่ละความถี่ที่ได้จากการจำแนกโดยดัชนี NDVI ในรายละเอียดของแต่ละปีเพื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินในช่วงเวลาที่มีข้อมูลพร้อมกัน อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดินมีการเผยแพร่ในช่วงเวลาที่กำหนด อาทิเช่น ระหว่างปี พ.ศ. 2543-2545 ดังนั้น พื้นที่ป่าไม้จึงกำหนดให้เท่ากันสำหรับช่วงเวลาดังกล่าว ผลของการเปรียบเทียบแสดงดังในรูปที่ 9 นอกจากนั้นแล้ว ได้แสดงเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างพื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI กับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินสำหรับแต่ละความถี่และแต่ละปีดังในตารางที่ 4 จากตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ในกรณีที่ความถี่ของการเกิดเท่ากับ 3 ทำให้เปอร์เซ็นต์ความแตกต่างมีค่าต่ำสุดโดยเฉลี่ยในช่วงเวลา 10 ปี เท่ากับ 2.88% ดังนั้น ในการศึกษาจึงเลือกผลการศึกษาที่ความถี่ของการเกิดมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ปี เป็นข้อมูลที่ใช้กำหนดพื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI และตัดพื้นที่ที่จำแนกว่าเป็นป่าไม้ที่ความถี่เท่ากับ 1 และ 2 ออกไป ผลการตัดข้อมูลดังกล่าวออกไปทำให้ได้จุดภาพที่ถูกพิจารณาว่าเป็นพื้นที่ป่าไม้ไม่แสดงในรูปที่ 8 (ค) ซึ่งเป็นผลให้พื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI สำหรับความถี่ของการเกิดมากกว่าหรือเท่ากับ 3 ปี มีค่าเท่ากับ 12,275 ตารางกิโลเมตร ซึ่งมากกว่าพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินเพียง 9.16% จากผลการตัดดังกล่าวทำให้สามารถจำแนกพื้นที่ป่าไม้โดยดัชนี NDVI ในช่วงเวลา 14 ปี ในระหว่างปี พ.ศ.2544-2557 มีค่าเท่ากับ 9,573, 9,905, 9,388, 9,639, 9,872, 9,664, 9,671, 10,335, 10,349, 9,742, 9,721, 9,232, 9,255 และ 9,003 ตร.กม.



(ก) จำนวนความถี่ของแต่ละจุดภาพที่ถูกจำแนกว่าเป็นพื้นที่ป่าไม้โดยดัชนี NDVI ในช่วงเวลา 14 ปี

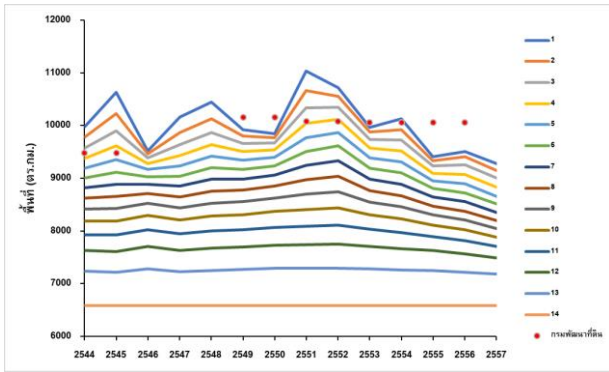


(ข) จำนวนความถี่ของแต่ละจุดภาพของพื้นที่ป่าไม้กรมพัฒนาที่ดินใน 4 ช่วงเวลา

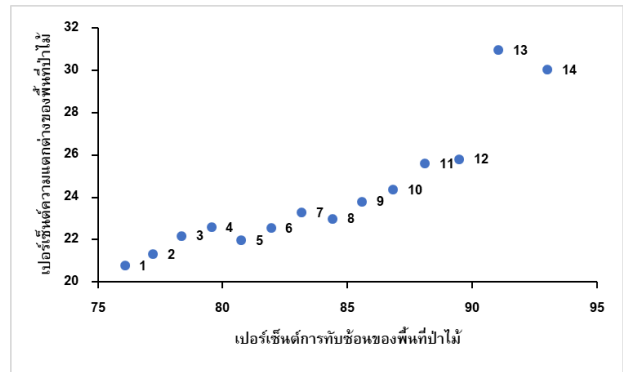


(ค) จำนวนความถี่ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3 ที่เลือกใช้ในการจำแนกพื้นที่ป่าไม้โดยดัชนี NDVI

รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์จำนวนความถี่ของการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินโดยดัชนี NDVI และของกรมพัฒนาที่ดิน ในลุ่มน้ำศรี



รูปที่ 9 พื้นที่ป่าไม้ในลุ่มน้ำซีทีได้จากการจำแนกโดยดัชนี NDVI สำหรับแต่ละความถี่ของการเกิดในช่วงเวลา 14 ปี เปรียบเทียบกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดิน



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนของพื้นที่ป่าไม้และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างของพื้นที่ป่าไม้สำหรับแต่ละความถี่ของพื้นที่ป่าไม้ในช่วงเวลา 14 ปี

ตารางที่ 4 เปอร์เซนต์ความแตกต่างของพื้นที่ป่าไม้สำหรับแต่ละความถี่ของพื้นที่ป่าไม้ในช่วงเวลา 14 ปี

| ปี พ.ศ. | ความถี่ | | | | | | | | | | | | | | เฉลี่ย |
|------------|---------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
| 2544 | 5.24 | 3.10 | 0.96 | 1.08 | 3.05 | 4.97 | 6.97 | 9.01 | 11.19 | 13.60 | 16.35 | 19.51 | 23.61 | 30.59 | 10.66 |
| 2545 | 12.08 | 7.90 | 4.46 | 1.38 | 1.38 | 3.85 | 6.27 | 8.71 | 11.07 | 13.62 | 16.45 | 19.68 | 23.83 | 30.59 | 11.52 |
| 2549 | 2.30 | 3.47 | 4.83 | 6.32 | 7.98 | 9.71 | 11.56 | 13.54 | 15.67 | 18.13 | 20.95 | 24.22 | 28.38 | 35.19 | 14.45 |
| 2550 | 3.02 | 3.77 | 4.76 | 5.98 | 7.39 | 9.02 | 10.80 | 12.81 | 15.01 | 17.55 | 20.50 | 23.87 | 28.19 | 35.19 | 14.13 |
| 2551 | 9.42 | 5.74 | 2.51 | 0.43 | 3.11 | 5.65 | 8.25 | 10.99 | 13.68 | 16.58 | 19.71 | 23.24 | 27.67 | 34.72 | 12.98 |
| 2552 | 6.27 | 4.72 | 2.65 | 0.35 | 2.13 | 4.65 | 7.44 | 10.38 | 13.24 | 16.30 | 19.54 | 23.16 | 27.64 | 34.72 | 12.37 |
| 2553 | 0.91 | 1.80 | 3.13 | 4.83 | 6.68 | 8.60 | 10.68 | 12.83 | 14.96 | 17.35 | 20.09 | 23.32 | 27.57 | 34.57 | 13.38 |
| 2554 | 0.76 | 1.38 | 3.34 | 5.35 | 7.39 | 9.47 | 11.62 | 13.82 | 15.89 | 18.19 | 20.77 | 23.83 | 27.84 | 34.57 | 13.87 |
| 2555 | 6.41 | 7.15 | 8.21 | 9.55 | 10.96 | 12.45 | 14.06 | 15.76 | 17.40 | 19.30 | 21.49 | 24.15 | 27.95 | 34.57 | 16.39 |
| 2556 | 5.46 | 6.45 | 7.98 | 9.77 | 11.53 | 13.21 | 14.93 | 16.71 | 18.37 | 20.21 | 22.24 | 24.74 | 28.19 | 34.57 | 16.74 |
| เฉลี่ย | 3.86 | 3.35 | 2.88 | 3.06 | 4.81 | 6.81 | 8.97 | 11.26 | 13.60 | 16.20 | 19.12 | 22.47 | 26.75 | 33.77 | 12.64 |

ตามลำดับ ซึ่งคิดเป็น 19.49%, 20.16%, 19.10%, 19.62%, 20.09%, 19.66%, 19.68%, 21.03%, 21.06%, 19.82%, 19.78%, 18.79%, 18.83% และ 18.32% ของพื้นที่ลุ่มน้ำซี โดยมียค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,668 ตารางกิโลเมตร คิดเป็น 19.68% ของพื้นที่ลุ่มน้ำซี

เพื่อแสดงความเข้าใจแนวทางการวิเคราะห์ความถี่ให้ชัดเจนขึ้น ดังนั้น จึงได้แสดงกราฟการเปรียบเทียบระหว่างเปอร์เซ็นต์การทับซ้อนกันของพื้นที่ป่าไม้ (Intersected forest area, IFA) ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI กับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดิน (Land Reform forest area, LRFA) กับเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างพื้นที่ป่าไม้ (Different forest area) ของกรมพัฒนาที่ดินกับพื้นที่ป่าไม้ที่ทับซ้อนกันเทียบกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดิน (DFA = (LRFA-IFA)/LRFA) ดังแสดงในรูปที่ 10 จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เปอร์เซนต์การทับซ้อนกันของพื้นที่ป่าไม้และเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างระหว่างพื้นที่ป่าไม้ ต่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนความถี่เพิ่มขึ้นจาก 1 ไปถึง 14 ซึ่งในการศึกษานี้ได้พิจารณาความถี่เท่ากับ 3 ดังกล่าวข้างต้น ซึ่งผลที่ได้คือ เปอร์เซนต์การทับซ้อนกันของพื้นที่ป่าไม้เท่ากับ 78.36% และ เปอร์เซนต์ความแตกต่างระหว่างพื้นที่ป่าไม้ 22.18% ซึ่งนับว่ามีความสมเหตุสมผลเป็นที่ยอมรับได้

7. สรุปผลการศึกษา

ในการศึกษานี้ได้ประยุกต์ใช้ดัชนีพืชพรรณ (NDVI) เพื่อตรวจสอบการใช้ที่ดินประเภทป่าไม้สำหรับลุ่มน้ำซี ในช่วงเวลา 14 ปี ระหว่างปี พ.ศ. 2544-2557 เนื่องจากดัชนี NDVI มีคุณสมบัติในการแยกพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยพืชพรรณที่อุดมสมบูรณ์ออกจากพื้นที่ที่ปกคลุมด้วยพืชพรรณที่ไม่สมบูรณ์หรือไม่มีพืชพรรณได้ อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องของดัชนี NDVI จะลดน้อยลงเมื่อได้รับผลกระทบจากเมฆและสภาพภูมิอากาศ ดังนั้น ในการศึกษานี้จึงได้นำกระบวนการ HANTS มาใช้เพื่อปรับอนุกรมเวลาของดัชนี NDVI ให้มีความถูกต้องมากขึ้น ก่อนจะนำอนุกรมเวลาของดัชนี NDVI ราย 8 วัน ซึ่งมีทั้งสิ้น 23 ภาพ ในแต่ละปี มาจำแนกประเภทการใช้ที่ดินโดยกระบวนการจำแนกแบบไม่มีการกำกับโดยวิธี ISODATA ซึ่งให้ผลการจำแนกประเภทการใช้ที่ดินในแต่ละปีแตกต่างกันไปในระหว่าง 61 ถึง 97 ประเภท โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 82 ประเภท ต่อจากนั้นได้นำวิธีการ Hierarchical classification มาใช้เพื่อการแยกพื้นที่ป่าไม้ออกจากประเภทการใช้ที่ดินอื่น ๆ โดยเปรียบเทียบกับข้อมูลการใช้ที่ดินประเภทป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินที่มีการเผยแพร่ข้อมูลใน 4 ช่วงเวลา (2543-2545, 2549-2550, 2551-

2552 และ 2553-2556) ซึ่งผลการศึกษาพบว่า ในกรณีนี้ที่จำนวนจุดภาพของแต่ละประเภทการใช้ที่ดินที่จำแนกโดยดัชนี NDVI ไปตรงกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินในปริมาณที่มากกว่าหรือเท่ากับ 30% แล้ว จะทำให้พื้นที่ป่าไม้โดยรวมที่จำแนกโดยดัชนี NDVI มีความใกล้เคียงกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินมากที่สุด อย่างไรก็ตามพื้นที่ป่าไม้ที่ได้มีปริมาณที่มากกว่าพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินนั้น ในการศึกษานี้จึงทำการนับจำนวนความถี่ของทุกจุดภาพที่ถูกจำแนกว่าเป็นป่าไม้ในช่วงเวลา 14 ปี ระหว่างปี พ.ศ.2544-2557 โดยผลการศึกษาพบว่า ความถี่ของการเกิดที่มากกว่าหรือเท่ากับ 3 ปี มีความเหมาะสมที่สุด โดยทำให้พื้นที่ป่าไม้ที่จำแนกโดยดัชนี NDVI มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,668 ตารางกิโลเมตร ซึ่งใกล้เคียงมากที่สุดกับพื้นที่ป่าไม้ของกรมพัฒนาที่ดินซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,862 ตารางกิโลเมตร จากผลการศึกษาที่ได้ทำให้ทราบว่า การใช้ที่ดินประเภทป่าไม้ของลุ่มน้ำชีมีค่าระหว่าง 9,003 และ 10,349 ตารางกิโลเมตร ซึ่งเกิดขึ้นในปี พ.ศ. 2557 และ 2552 ตามลำดับ โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9,668 ตารางกิโลเมตร ซึ่งคิดเป็น 19.68% ของพื้นที่ลุ่มน้ำชี จากกระบวนการที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ป่าไม้สำหรับลุ่มน้ำอื่น ๆ ได้ต่อไป รวมทั้งการต่อยอดเพื่อวิเคราะห์การใช้ที่ดินประเภทอื่น ๆ ซึ่งมีส่วนสัมพันธ์โดยตรงต่อวัฏจักรทางอุทกวิทยาและการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับนิสิตปริญญาโท และทุนวิจัยเพื่อการดำเนินงานของศูนย์วิจัยการรับรู้จากระยะไกลเพื่อการบริหารจัดการทรัพยากรน้ำ (Remote Sensing Research Centre for Water Resources Management; SENSWAT) รวมทั้งกรมพัฒนาที่ดิน ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลต่าง ๆ เพื่อการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- [1] Rouse Jr., J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great plains with ERTS. NASA special publication, Vol. 351, pp.309.
- [2] Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), pp. 127-150.
- [3] Usman, M., Liedl, R., Shahid, M. A. and Abbas, A. (2015). Land Use/Land Cover Classification and Its Change Detection Using Multi-Temporal MODIS NDVI Data. *Journal of Geographical Sciences*, 25(12), pp. 1479-1506.
- [4] Aredehey, G., Mezgebu, A. and Girma, A. (2017). Land-use land-cover classification analysis of Giba catchment using hyper temporal MODIS NDVI satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, Vol.39, pp. 810-821.
- [5] Zhou, J., Jia, L. and Menenti, M. (2015). Reconstruction of Global MODIS NDVI Time Series: Performance of Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS). *Remote Sensing of Environment*. 163, pp. 217-228.
- [6] นุชนารถ ศรีวงศ์ตานนท์ (2556). *อุทกวิทยาขั้นสูง*. วีรารธรรมพันธ์ตั้ง แอนด์ แพ็คเกจจิ้ง, หน้า 288-293.
- [7] Justice, C. O., Holben, B. N. and Gwynne, M. D. (1986). Monitoring East African vegetation using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 7, pp. 1453-1474.
- [8] Viovy, N., Arino, O. and Belward, A.S. (1992). The Best Index Slope Extraction (BISE) - a method for reducing noise in NDVI time-series. *International Journal of Remote Sensing*, 13, pp. 1585-1590.
- [9] Jakubauskas, M.E., Legates, D.R. and Kastens, J.H. (2001). Harmonic Analysis of Time-Series AVHRR NDVI Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67. pp. 461-470.
- [10] Menenti, M., Azzali, S., Verhoef, W. and van Swol, R. (1993). Mapping agroecological zones and time lag in vegetation growth by means of Fourier analysis of time series of NDVI images. *Advances in Space Research*, 13, pp. 233-237.
- [11] Verhoef, W. (1996). Application of harmonic analysis of NDVI time series (HANTS). *Wageningen, The Netherlands: DLO Winand Staring Centre*, pp. 19-24.
- [12] Roerink, G.J., Menenti, M., and Verhoef, W. (2000). Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. *International Journal of Remote Sensing*, 21, pp. 1911-1917.
- [13] Zhou, J., Jia, L. and Menenti, M. (2015). Reconstruction of Global MODIS NDVI Time Series: Performance of Harmonic ANalysis of Time Series (HANTS). *Remote Sensing of Environment*. 163, pp. 217-228.
- [14] Zhou, J., Jia, L., van Hoek, Menenti, M., Lu, J. and Hu, G. (2016). An optimization of parameter settings in HANTS for global NDVI time series reconstruction. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. Beijing, China, 10-15 July 2016, pp. 3422-3425.
- [15] ERDAS (1999). *ERDAS Field Guide*. ERDAS®, Inc., pp. 227-230.
- [16] Richards, J. A. (1986). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer-Verlag. pp. 206-225.
- [17] Gauch, Jr. H.G., Whittaker, R.H. (1981). Hierarchical classification of community data. *Journal of Ecology*, 69, pp. 537-557.