

## การเปรียบเทียบวิธีหาหลุมยุบและการวิเคราะห์การกระจายตัวบนภูมิประเทศแบบคาสต์

### Comparison of different automated sinkhole extraction methods and its distribution on Karst topography

พิมพ์ประภา สมฤทธิ์<sup>1</sup> และนิตี เอี่ยมชื่น<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> สำนักงานพัฒนาชุมชนจังหวัดพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

<sup>2</sup> หน่วยวิจัยเพื่อการพัฒนานวัตกรรมเชิงพื้นที่ สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์  
คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา อำเภอเมือง จังหวัดพะเยา 56000

<sup>1</sup> Community Development Department, Phayao Province

<sup>2</sup> Research Unit of Spatial Innovation Development, Department of Geographic Information Science,  
School of Information and Communication Technology, University of Phayao

\* Corresponding author: niti018@hotmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาเปรียบเทียบวิธีการหาหลุมยุบ (Sinkhole) แบบอัตโนมัติจากแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) จาก 3 วิธีการ ประกอบด้วย 1) วิธีการสร้างแบบจำลองหลุมยุบอัตโนมัติ (Automated Identification Model for Sinkhole: AIM SINK) 2) วิธีการถมหลุม (FILL) และ 3) วิธีการทางดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศ (Automated generation of depressions by Topographic Position Index: TPI) จากนั้นทำการวิเคราะห์ค่าการกระจายตัวของหลุมยุบบนภูมิประเทศแบบคาสต์ จากดัชนีของจุดอื่นข้างเคียงใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Index) 2 พื้นที่ ได้แก่ ในพื้นที่ศึกษาที่ 1 วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน (KNNN) จังหวัดเชียงราย และพื้นที่ศึกษาที่ 2 สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง (AK) จังหวัดเชียงใหม่ ผลการศึกษาพบว่าในพื้นที่ศึกษา AK วิธี AIMSINK FILL และTPI มีความถูกต้องเชิงตำแหน่ง คิดเป็น 87 เปอร์เซ็นต์ 71 เปอร์เซ็นต์ และ 64 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งค่าการกระจายตัวของหลุมยุบในวิธี FILL (0.73) มีค่าตรงกับค่าหลุมยุบจริงในพื้นที่ศึกษา AK (0.73) และวิธี TPI (0.61) ใกล้เคียงค่าหลุมยุบจริงในพื้นที่ศึกษา KNNN (0.63) จากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า วิธี TPI หลุมยุบจะมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ร่องเขารวม อยู่ด้วย ส่วนวิธี AIM SINK เหมาะสำหรับการหาหลุมยุบ แต่มีข้อจำกัดหากในพื้นที่จริงเป็นพื้นที่ลักษณะ ภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะ ดังนั้นวิธี FILL เหมาะสมมากที่สุดสำหรับการหาพื้นที่หลุมยุบขนาดใหญ่บนพื้นที่ภูมิประเทศแบบคาสต์

**คำสำคัญ:** หลุมยุบ การศึกษาเปรียบเทียบ / การหาหลุมยุบแบบอัตโนมัติ / รูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่

#### Abstract

The purpose of this study is to explore and apply the comparison automated sinkhole extraction from Digital Elevation Model. The method is divided into 3 include Automated Identification Model for Sinkhole (AIMSINK), Fill sink method (FILL) and Automated generation of depressions by Topographic Position Index (TPI). Then analyze the distribution of sinkhole from Nearest Neighbor Index on Karst Topology include study area 1 is Tham Luang Forest Park at Chiang Rai province and study area 2 is Royal Agricultural Station Angkhang at Chiang Mai province. These results showed on study area 1 AIMSINK FILL and TPI have positional accuracy 87

percent, 71 percent, and 64 percent respectively. Analyze the distribution of sinkhole FILL (0.73) matched real sinkhole in study area 1 (0.73) and TPI (0.61) has a value close to real sinkhole in study area 2 (0.63). These results indicate that TPI sinkhole small and the groove area is included, AIMSINK suitable for automatic sinkhole extraction but there are limits if the actual area is the syncline therefore FILL most suitable for extraction large area sinkholes on Karst Topology.

**Keywords:** Sinkhole / Comparison / Automated Sinkhole Extraction / Spatial Distribution

## 1. บทนำ

หลุมยุบ (Sinkhole) เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งที่ดินยุบตัวลงเป็นหลุมลึก มีรูปร่างและขนาดต่างๆกัน เช่น รูปเกือบกลมหรือเป็นวงรี (ราชบัณฑิตยสถาน, 2544) และมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1–200 เมตร ลึกตั้งแต่ 1 ถึงมากกว่า 20 เมตร เมื่อแรกเกิดปากหลุมมีลักษณะเกือบกลมและมีน้ำขังอยู่ก้นหลุม ภายหลังจากที่น้ำจะกัดเซาะดินก้นหลุมกว้างขึ้น ลักษณะคล้ายลูกน้ำเต่า ทำให้ปากหลุมพังลงมาจนเหมือนกับว่าขนาดของหลุมยุบกว้างขึ้น โดยปกติหลุมยุบจะเกิดในบริเวณที่ราบใกล้กับภูเขาที่เป็นหินปูน เนื่องจากหินปูนมีคุณสมบัติละลายน้ำที่มีรูปร่างเป็นกรดอ่อนได้ประกอบกับภูเขาหินปูนมีรอยเลื่อนและรอยแตกมากมาย และภูเขาหินปูนที่มีหน้าผาชัน หน้าผาเป็นรอยเลื่อนและรอยแตกในหินปูนบริเวณใดที่รอยแตกของหินปูนตัดกันจะเป็นบริเวณที่ทำให้เกิดโพรงได้ง่าย โพรงหินปูนถ้าอยู่พื้นผิวดินเรียกว่า ถ้ำ แต่ถ้าไม่โผล่พื้นผิวดินเรียกว่า โพรงหินปูนใต้ดิน สามารถจำแนกเป็น 2 ระดับ คือ โพรงหินปูนใต้ดินระดับลึก (ลึกจากผิวดินมากกว่า 50 เมตร) และโพรงหินปูนใต้ดินระดับตื้น (ลึกจากผิวดินไม่เกิน 50 เมตร) ส่วนใหญ่หลุมยุบจะเกิดในบริเวณที่มีโพรงหินปูนใต้ดินระดับตื้น จากสถิติจังหวัดเชียงรายเป็นพื้นที่เสี่ยงภัยหลุมยุบเป็นอันดับสองของประเทศไทย และหนึ่งในพื้นที่จังหวัดเชียงรายที่เป็นพื้นที่เสี่ยงคือ วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ตำบลโป่งผา อำเภอแม่สาย จังหวัดเชียงราย ตั้งอยู่ในเขตป่าสงวนแห่งชาติป่าดอยนางนอน ลักษณะภูมิประเทศเป็นภูเขาหินปูน (ภูมิประเทศแบบคาสต์) ขนาดใหญ่หลายลูกติดต่อกันสลับซับซ้อน และมีโพรงถ้ำหรือโพรงหินปูนอยู่ใต้ผิวดินมีชื่อเรียกว่าถ้ำนางนอน ถ้ำนางนอนเป็นถ้ำที่กว้างใหญ่ ภายในถ้ำมีน้ำตลอดทั้งปีและจะมีน้ำไหลในช่วงฤดูฝน

จากข่าวเมื่อวันที่ 23 มิถุนายน พ.ศ. 2561 มีนักฟุตบอลเยาวชน และผู้ฝึกสอนรวม 13 คน เข้าไปท่องเที่ยวในถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน จังหวัดเชียงราย กระทั่งเวลาค่ำเจ้าหน้าที่ของ วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน พบรถจักรยานยนต์ 1 คัน พร้อมรถจักรยานอีก 11 คัน จอดทิ้งไว้หน้าปากถ้ำ โดยตรวจสอบพบในตะกร้าหน้ารถมีเบียร์และอุปกรณ์กีฬาของนักฟุตบอล จึงประสานหัวหน้าทีมฟุตบอลของตำบลโป่งผา และยืนยันว่าเป็นชุดกีฬาของทีมโป่งผาจริง จึงออกติดตามหาในถ้ำลึกเข้าไปประมาณ 3 กิโลเมตร แต่ระหว่างนั้นมีฝนตกหนักและน้ำเอ่อสูงภายในถ้ำ จึงรีบกลับออกมาพร้อมประสานขอความช่วยเหลือหน่วยกู้ภัย วันที่ 24 มิถุนายน พ.ศ.2561 สำนักข่าวต่างๆ เผยแพร่ข่าวการสูญหายของ 13 ชีวิตทีมหมูป่าที่เข้าไปเที่ยวในถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน รวมทั้งการระดมกำลังกู้ภัยเข้าช่วยเหลือเป็นเวลา 9 วัน และเมื่อวันที่ 2 กรกฎาคม พ.ศ.2561 นายณรงค์ศักดิ์ โอสถธนากร (อดีตผู้ว่าราชการจังหวัดเชียงราย) แถลงว่า ขณะนี้เจอนักฟุตบอลและโค้ชทีมหมูป่าทั้ง 13 คนแล้ว ต่อมาจึงระดมหาทางช่วยเหลือพาทีมหมูป่าออกจากถ้ำ โดยวันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 นายณรงค์ศักดิ์ เปิดเผยว่า "สิ่งที่ผมยืนยันมาโดยตลอด คือ น้องเข้าไปข้างหน้าต้องออกข้างหน้า ในขณะที่เดียวกันก็ต้องมีการเจาะ ขณะนี้เจาะไปแล้ว 100 กว่าหลุม ส่วนหลุมที่มีศักยภาพที่จะลงไปได้มีจำนวน 18 หลุม หลุมที่เจาะลึกที่สุด 800 เมตร แต่เป็นมุมเจาะที่ไม่อาจจะเข้าไปถึงจุดที่น้องๆ พักอยู่ ผ่านการคำนวณโดยนักธรณีฟิสิกส์ว่า ถ้าเจาะตรงๆ ในจุดที่น้องๆ อยู่ เจาะในช่องที่เป็นไปได้ในแนวตั้ง จะใช้ระยะทางประมาณ 600 เมตร" (บีบีซีออนไลน์, 2561) จากปัญหานักฟุตบอลทีมหมูป่าและโค้ชติดถ้ำดังกล่าวสังเกตได้ว่ามีการขุดเจาะหลุมขนาดเล็กไปแล้ว 100 กว่าหลุม และกระบวนการค้นหาหลุมนั้น ใช้วิธีการเดินเท้าสำรวจและวิเคราะห์

เบื้องต้นจากรูปถ่ายดาวเทียม อาจจะใช้ทั้งแรงงานทั้งเวลาและงบประมาณเป็นจำนวนมาก ดังนั้นผู้ศึกษาจึงเลือกพื้นที่วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอนเป็นพื้นที่ศึกษาที่ 1 และพื้นที่นี้ยังเป็นพื้นที่ที่อยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัย มีโอกาสเกิดหลุมยุบของจังหวัด อีกหนึ่งพื้นที่ศึกษา คือ สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง ตั้งอยู่ที่อุทยานแห่งชาติดอยผ้าห่มปก ตำบลแม่งอน อำเภอฝาง จังหวัดเชียงใหม่ เป็นเทือกเขาสูงและมีการทรุดตัวของแอ่งที่ราบ ฝั่งทางทิศตะวันออก รวมทั้งพบชั้นหินคดโค้งรอยเลื่อน รอยแตกและรอยแยกตามชั้นหิน จำนวนมาก ต่อมาได้มีการสึกกร่อนทำลายโดยสรูปภูมิอากาศทำให้เทือกเขาหินปูนกลายเป็นเขาขดแหลม หน้าผาสูงชัน ในขณะที่เทือกเขาหินทรายกลายเป็นเขาสูงชัน ร่องน้ำลึก และ เมื่อเวลาผ่านไปหินปูนที่อยู่ตามแนวรอยเลื่อนขนาดใหญ่จะถูกกัดกร่อนอย่างต่อเนื่อง จนในที่สุดเกิดการถล่มของเทือกเขาหินปูนบางส่วนตามแนวรอยเลื่อนนี้ และขยายตัวเกิดเป็นหลุมยุบขนาดใหญ่ก่อให้เกิดภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะระหว่างหุบเขาและหน้าผาแนวยาวของผาหินปูนและหินทรายรอบๆ ดังนั้นผู้ศึกษาจึงเลือกพื้นที่ศึกษาดอยอ่างขางที่มีหลุมยุบขนาดใหญ่บนภูเขาหินปูนเป็น พื้นที่ศึกษาที่ 2 และพื้นที่นี้ยังเป็นพื้นที่ที่อยู่ในเขตพื้นที่เสี่ยงภัยหลุมยุบจังหวัดเชียงใหม่

จากข้อมูลข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้มีความสนใจที่จะศึกษาหาพื้นที่ที่เกิดหลุมยุบบนภูมิประเทศแบบหินปูนในพื้นที่วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน กรณีศึกษาหลุมยุบขนาดเล็ก (พื้นที่ศึกษาที่ 1) และศึกษาพื้นที่ดอยอ่างขางกรณีศึกษาหลุมยุบขนาดใหญ่ (พื้นที่ศึกษาที่ 2) โดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information Science: GIS) ร่วมกับเทคนิคการหาหลุมยุบแบบอัตโนมัติโดยเปรียบเทียบวิธีที่ดีที่สุดที่มีความละเอียด ความเหมาะสมของข้อมูลมีความต่อเนื่อง และความถูกต้องสูง เพื่อเป็นแนวทางให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องและนำไปใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาที่ประสบในพื้นที่จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### แนวคิด ทฤษฎี

ภูมิประเทศแบบคาสต์ (Karst topography) เป็นลักษณะภูมิประเทศที่แสดงให้เห็นรูปแบบของการกัดกร่อนในพื้นที่หินปูนและหินโดโลไมต์ คล้ายกับภูมิประเทศในมณฑลคาสต์ของประเทศ ยูโกสลาเวีย ลักษณะภูมิประเทศนี้มิได้เกิดจากการกระทำจากน้ำผิวดินเท่านั้น แต่ยัง เกิดจากการกระทำของน้ำในเนื้อหินและทางน้ำใต้พื้นผิวอีกด้วย กระบวนการเกิด ภูมิประเทศนั้นมีจุดเริ่มต้นจากการยกตัวขึ้นของชั้นหินปูนจนถึงระดับความสูงกว่ระดับน้ำทะเล ทำให้เกิดกระบวนการน้ำไหลกัดกร่อนลงไปในชั้นหินปูน และรวมไปถึงภูมิประเทศหินปูนสูงๆ ต่ำๆ มีหน้าผาสูงชัน ยอดแหลม ตะปุ่มตะป่ำ มักพบรอยแตกกว้าง ซึ่งจะพัฒนาเป็นถ้ำ ลักษณะภูมิประเทศดังกล่าวเกิดจากการละลายตัวชั้นหินปูน ภูมิประเทศแบบคาสต์มีหลายลักษณะ เช่น หลุมยุบ (Sinkhole) แอ่งคาสต์ (Doline) ลำธารจมน้ำ (Sinking Creek) แอ่งน้ำมุด (Swallow Hole) เป็นต้น ดัน (กรมทรัพยากรน้ำบาดาล, 2555) ผิวดินที่ปกคลุมอยู่บนหินที่ละลายน้ำได้ อาจเกิดลักษณะเป็นหลุมๆเนื่องจากน้ำละลายเอาเนื้อหินออกไป หลุมเหล่านี้เรียกว่า หลุมยุบ (Sinkhole or Sinks) การเกิดของหลุมเหล่านี้เป็นไปได้อย่างรวดเร็ว หินปูนที่อยู่ข้างใต้ผิวดินถูกละลายโดยตรงโดยการซึมลงไของน้ำ การละลายน้ำจะเกิดเป็นแห่งๆ ขึ้นอยู่กับปัจจัยในแต่ละบริเวณ อาทิเช่น บริเวณนั้นมีน้ำมาก หรือหินปูนมีคุณสมบัติของการละลายสูง ในที่สุดจะเกิดเป็นหลุม ที่เรียกว่า หลุมยุบ อีกวิธีหนึ่ง โดยทั่วไปแล้วหลุมยุบส่วนมากจะเกิดแบบนี้คือ เกิดจาก การยุบตัวลงไปเป็นโพรง ทำให้น้ำไหลซึมลงไปตามหลุมนี้ ทำให้น้ำบาดาลเพิ่มขึ้น หรือ อีกกรณีหนึ่ง ถ้าพื้นล่างของหลุมอุดตันน้ำซึมผ่านลงไปไม่ได้ เมื่อมีน้ำไหลลงไปใหลุมปริมาณมากอาจจะเกิดลักษณะของทะเลสาบ ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ที่มีหลุมยุบปรากฏ อยู่จำนวนมาก เรียกว่า ลักษณะภูมิประเทศแบบคาสต์ (Karst topography) (ชาญ ต้นดีสุกฤต, 2529)

หลุมยุบ (Sinkhole) เป็นหลุม ที่เกิดในพื้นที่หินปูน ปากหลุมมีลักษณะ ค่อนข้างกลม เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติอย่างหนึ่งที่หินยุบตัวลงเป็นหลุมลึก และมีเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 1-200 เมตร ลึกตั้งแต่ 1 ถึงมากกว่า 20

เมตร (สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี, 2554) พื้นผิวชนิดของหลุมยุบนั้นแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ หลุมยุบที่เกิดจากการไหลของน้ำท่า ไปตามรอยแยกในชั้นหินทำให้เกิดโพรงลึกในแนวตั้ง เรียกว่า “หลุมยุบจากการละลาย (Solution sinkhole)” ส่วนหลุมยุบที่มีน้ำท่าไหลลงปากร่อง เรียกว่า “โพรงนกแอ่น” เนื่องจากหลุมยุบจะมีขนาดใหญ่กว่าโพรงนกแอ่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1- 50 เมตร ความลึก 15-20 เมตร และยังสามารถจำแนกหลุมยุบ ตาม(สำนักธรณีวิทยาสิ่งแวดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี, 2554) ที่เกิดในประเทศไทยได้ 3 ลักษณะดังนี้ 1.โพรงหินปูนใต้ดิน เมื่อฝนตกลงมาจะได้รับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขณะผ่านชั้นบรรยากาศและซึมลงใต้ผิวดิน ทำให้น้ำฝนมีความเป็นกรดอย่างอ่อน (กรดคาร์บอนิก) เมื่อไหลผ่านและสัมผัสกับหินปูนจะละลายเนื้อหินปูนออกไป เกิดเป็นโพรงหรือถ้ำใต้ดินขึ้น เมื่อโพรงใต้ดินเหล่านี้มีการขยายขนาดใหญ่ขึ้นและอยู่ใกล้ผิวดิน เพดานจึง ไม่สามารถต้านทานน้ำหนักของดินและสิ่งก่อสร้างที่กดทับได้ พื้นผิวดินจึงถล่มพังลงและกลายเป็นหลุมยุบ บนโพรงหินปูนใต้ดินระดับตื้น (ลึกจากผิวดินไม่เกิน 50 เมตร) 2.ชั้นเกลือหินใต้ดิน พื้นที่ส่วนใหญ่ของภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีชั้นเกลือหินรองรับ อยู่ใต้ผิวดิน เกลือหินมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ง่ายเมื่อมีการทำเหมืองใต้ดิน โดยการสูบน้ำเกลือขึ้นมาเป็นสาเหตุทำให้เกิดโพรงใต้ดิน ต่อมาเพดานโพรงพังทลายลงจึงเกิดเป็นหลุมยุบขึ้น ซึ่งขนาดของหลุมยุบอาจมีขนาดใหญ่สร้างความเสียหายให้กับทรัพย์สินของประชาชนได้ และ 3.ชั้นทรายถูกน้ำใต้ดินพัดพา มักเกิดขึ้นในพื้นที่ที่มีชั้นทรายรองรับอยู่ใต้ดินและอยู่ใกล้แม่น้ำลำคลองเกิดขึ้นทั่วทุกภาคของประเทศ เมื่อมีฝนตกหนักหรือตกต่อเนื่อง ทำให้ปริมาณและแรงพัดพาของน้ำใต้ดินเพิ่มขึ้นจึงพัดพาเอาตะกอนทรายใต้ดินสูงสู่มแม่น้ำลำคลองทำให้เกิดโพรงใต้ดิน แต่โพรงใต้ดินที่เกิดจากสาเหตุนี้จะมีขนาดไม่ใหญ่มาก จึงเกิดหลุมยุบขนาดไม่ใหญ่มากเช่นกัน

แบบจำลองการสกัดหลุมยุบแบบอัตโนมัติ (Automated Identification Model for Sinkhole: AIMSINK) เป็นแบบจำลองที่ทำการสกัดหรือหาหลุมยุบแบบอัตโนมัติโดยปราศจากการสัมผัสโดยตรง ยกตัวอย่างเช่น การใช้เครื่องมือตรวจวัดขนาดของหลุมยุบในภาคสนาม (Launspach & Jonathon, 2013) แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นจะประกอบด้วย 6 แบบจำลองย่อย (Submodels) ได้แก่ 1) Slope Extraction 2) Filling Closed Depressions 3) Combining Fill and Slope to Identify Sinkhole Boundaries 4) Calculating Sinkholes Area and Axes 5) Eliminating Non-Sinkhole Features และ 6) Extracting DEM Data for Identified Sinkholes

การหาหลุมยุบแบบอัตโนมัติโดยวิธีการถมหลุม (FILL) Doctor & Young (2013) ได้กล่าวว่า ทุกตารางกริดของ DEM มีความลาดชันอย่างต่อเนื่อง ถ้าตารางกริด (หรือพื้นที่ของตารางกริด) อยู่ที่ระดับต่ำกว่า ตารางกริดที่ล้อมรอบทั้งหมดจะนับว่าเป็น "Sink" (หลุม) และการไหลของพื้นผิวจะหยุดลงที่ จุดนั้น

การหาหลุมยุบแบบอัตโนมัติโดยใช้ดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศ (Automated generation of depressions by Topographic Position Index: TPI) เป็นดัชนีตัววัดตำแหน่งที่อยู่ในภูมิทัศน์บนภูมิประเทศของยอดเขา หุบเขาด้านลาดเนินเขา ล้นเขาที่เปิดโล่ง ที่ราบเรียบหรือคุณลักษณะอื่น ๆ ซึ่ง TPI สามารถคำนวณได้ในแต่ละเซลล์โดยการเปรียบเทียบความสูงของเซลล์กับความสูงเฉลี่ยของเซลล์รอบข้างในวงแหวนหรือวงแหวนรอบ ๆ เซลล์ที่สูงกว่าบริเวณโดยรอบ (ที่ขนาดที่ระบุ) จะมีค่า TPI เป็นบวกในขณะที่ค่า TPI ที่มีค่าต่ำสุดจะมีค่าเป็นลบ และพื้นที่ราบค่า TPI เป็นศูนย์หรือใกล้ศูนย์ ซึ่งค่าของ TPI ขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่วงแหวนทั้งหมดโดยการปรับรัศมีด้านในและด้านนอก lampietro & Kvitik (2005) มีวิธีการคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$TPI = \text{int}((DEM - \text{focalmean}(\text{dem}, \text{annulus}, \text{irad}, \text{orad})) + 0.5) \quad \text{สมการ (1)}$$

เมื่อ TPI คือ ดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศ

DEM คือ แบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข

annulus	คือ วงแหวน
irad	คือ รัศมีด้านในของ annulus
orad	คือ รัศมีด้านนอกของ annulus

## 2. วัตถุประสงค์

1. เพื่อเปรียบเทียบวิธีการหาหลุมยุบ (Sinkhole) แบบอัตโนมัติระหว่างวิธีสร้างแบบจำลองหลุมยุบอัตโนมัติ (Automated Identification Model for Sinkhole: AIMSINK) วิธีการถมหลุม (FILL) และวิธีการทางดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศ (Automated generation of depressions by Topographic Position Index: TPI) โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองระดับสูงเชิงเลขที่แตกต่างกัน (Digital Elevation Model: DEM)
2. วิเคราะห์รูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ของหลุมยุบ โดยใช้พิกัดของหลุมยุบแต่ละหลุมมาวัดการกระจายตัวโดยดัชนีชี้วัดรูปแบบเทียบเคียงจุดอื่นข้างเคียงใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Index: NNI)

## 3. วิธีการศึกษา

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ใช้ข้อมูลแบบทุติยภูมิ เป็นข้อมูลที่เก็บรวบรวมจากเอกสารหรืองานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง เพื่อพัฒนาเป็นวิธีการในการหาหลุมยุบแบบอัตโนมัติและนำไปวิเคราะห์การกระจายตัวของหลุมยุบในระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ มีรายละเอียดดังนี้

- ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข 30 เมตร จากดาวเทียม โครงการสำรวจภูมิประเทศด้วยเรดาร์จากกระสวยอวกาศ (SRTM)
- ข้อมูลที่ได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ข้อมูลขอบเขตการปกครอง ข้อมูลขอบเขตพื้นที่อุทยาน ข้อมูลขอบเขตพื้นที่โครงการหลวง ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข และข้อมูลหลุมยุบ มีรายละเอียดดังตาราง 1

ตาราง 1 ข้อมูลที่ได้จากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูล	หน่วยงาน
ข้อมูลขอบเขตการปกครอง	กระทรวงการปกครอง
ข้อมูลขอบเขตพื้นที่อุทยาน	กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช
ข้อมูลขอบเขตพื้นที่โครงการหลวง	มูลนิธิโครงการหลวง
ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข (พื้นที่ศึกษาที่ 1)	ภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข 5 เมตร (พื้นที่ศึกษาที่ 2)	กระทรวงเกษตรและสหกรณ์
ข้อมูลหลุมยุบ (พื้นที่ศึกษาที่ 1)	ภาควิชาภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
แผนที่ภูมิประเทศ (พื้นที่ศึกษาที่ 2)	กรมแผนที่ทหาร

การศึกษารเปรียบเทียบวิธีหาหลุมยุบและวิเคราะห์การกระจายตัวบนภูมิประเทศแบบคาสต์จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแนวทางให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการแก้ปัญหาที่ประสบในพื้นที่จริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ผู้ศึกษาได้ดำเนินการศึกษา ดังนี้

3.1) การศึกษาวิธีการหาหลุมยุบแบบอัตโนมัติ เป็นการเปรียบเทียบวิธีการหาหลุมยุบ (Sinkhole) แบบอัตโนมัติระหว่างวิธีการสร้างแบบจำลองหลุมยุบอัตโนมัติ (AIMSINK) วิธีการถมหลุม (FILL) และวิธีการทางดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศ (TPI) โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) ในพื้นที่ศึกษาที่ 1 และพื้นที่ศึกษาที่ 2 โดยการใช้อัตราความสูงจากภาคภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ แบบจำลองความสูง 5 เมตร จากกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ และแบบจำลองความสูง 30 เมตร จากดาวเทียม (The Shuttle Radar Topography Mission: SRTM) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1) AIMSINK ทำการศึกษาวิธีการหาหลุมยุบ วิธีแรกสร้างแบบจำลองหลุมยุบอัตโนมัติ (AIMSINK) โดยจะเริ่มจากแบบจำลองย่อย 1 (Submodel 1) ทำการหาความลาดชันของหลุมยุบจากแบบจำลองภูมิประเทศเชิงเลข หากมากกว่าหรือเท่ากับ 15 องศาจะนับว่าเป็นหลุมยุบ คือ มีค่าเท่ากับ 2 นอกจากนี้มีค่าเท่ากับ 0

แบบจำลองย่อย 2 (Submodel 2) จากแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข ถ้าตารางกริด (หรือพื้นที่ของตารางกริด) อยู่ที่ระดับต่ำกว่า ตารางกริดที่ล้อมรอบทั้งหมดจะนับว่าเป็น "Sink" (หลุม) ดังนั้นจะให้พื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือตารางกริดที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 นับว่าเป็นหลุมยุบ นอกจากนี้มีค่าเท่ากับ 0

แบบจำลองย่อยที่ 3 (Submodel 3) นำผลที่ได้จากแบบจำลองย่อยที่ 1 และ 2 รวมกัน หากค่าประจำตารางกริดมีค่าเท่ากับ 3 คือ หลุมยุบ

แบบจำลองย่อยที่ 4 (Submodel 4) แปลงข้อมูลจากข้อมูลแรสเตอร์ เป็นข้อมูลเวกเตอร์ (โพลีกอน) เนื่องจากปากหลุมยุบมีลักษณะค่อนข้างกลม จึงต้องทำการเปลี่ยนแปลงรูปร่างให้อยู่ในรูปแบบของหลุมยุบ (ทรงรี) ในชุดคำสั่ง Smoothing tools หลังจากนั้นทำการสร้างแกนของหลุมที่ยาวที่สุด (Major) และแกนของหลุมที่สั้นที่สุด (Minor) ในชุดคำสั่ง Minimum Boundary Triangulation tool เพื่อหาขนาดสัดส่วนของแกนหลุมยุบ ในแบบจำลองย่อยต่อไป

แบบจำลองย่อยที่ 5 (Submodel 5) ทำการลบข้อมูลที่ไม่ใช่หลุมยุบ โดยการนำสัดส่วนของแกนที่ยาวที่สุดและสั้นที่สุด หากพื้นที่ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 นับว่าเป็นหลุมยุบ ในพื้นที่ศึกษาที่ 1 และหากพื้นที่ที่มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 3.2 (ค่าสัดส่วนของแกนหลุมยุบที่มากที่สุดในพื้นที่ภูมิประเทศสถานีเกษตรหลวงอ่างขาง) นับว่าเป็นหลุมยุบในพื้นที่ศึกษาที่ 2

แบบจำลองย่อยที่ 6 (Submodel 6) ทำการสกัดพื้นที่หลุมยุบในแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข โดยแบบจำลองย่อย (Submodel) ดำเนินการทั้งพื้นที่ศึกษาที่ 1 และพื้นที่ศึกษาที่ 2

3.1.2) FILL วิธีถมหลุม หากตารางกริด (หรือพื้นที่ของตารางกริด) อยู่ที่ระดับต่ำกว่า ตารางกริดที่ล้อมรอบทั้งหมดจะนับว่าเป็น "Sink" (หลุม) โดยเริ่มจากนำแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขมาทำการถมหลุมในเครื่องมือ Fill tools นำมาเปรียบเทียบความแตกต่าง กำหนดให้พื้นที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงหรือตารางกริด ที่มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 1 นับว่าเป็นหลุมยุบ โดยดำเนินการทั้งพื้นที่ศึกษาที่ 1 และพื้นที่ศึกษาที่ 2

3.1.3) TPI วิธีการทางดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศ เริ่มจากนำแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขมาหาค่าดัชนีภูมิประเทศเชิงเลขจากส่วนเสริมของโปรแกรมทางภูมิสารสนเทศศาสตร์ (Land Facet Corridor Designer) โดยใช้เครื่องมือ Topographic Position Index Tools ซึ่งจะแบ่งค่าดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศออกเป็น 6 ชั้น

และเลือกหลุมยุบจากชั้น หุบเขา (Valley) ทำการแปลงข้อมูลจากข้อมูลแรสเตอร์ เป็นข้อมูลเวกเตอร์ และสกัดพื้นที่หลุมยุบในแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข โดยดำเนินการทั้งพื้นที่ศึกษาที่ 1 และพื้นที่ศึกษาที่ 2

3.2) ตรวจสอบความถูกต้องของหลุมยุบ นำข้อมูลหลุมยุบจริงจากภาคภูมิศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 1 และข้อมูลแผนที่ภูมิประเทศจากหน่วยงานกรมแผนที่ทหารสำหรับพื้นที่ศึกษาที่ 2 เป็นข้อมูลอ้างอิงมาทำการเปรียบเทียบกับหลุมยุบที่ได้จาก 3 วิธีการ โดยการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง จากหลุมยุบที่ได้หากมีตำแหน่งตรงกับหลุมยุบจริงถือว่ามีความถูกต้อง (คิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์)

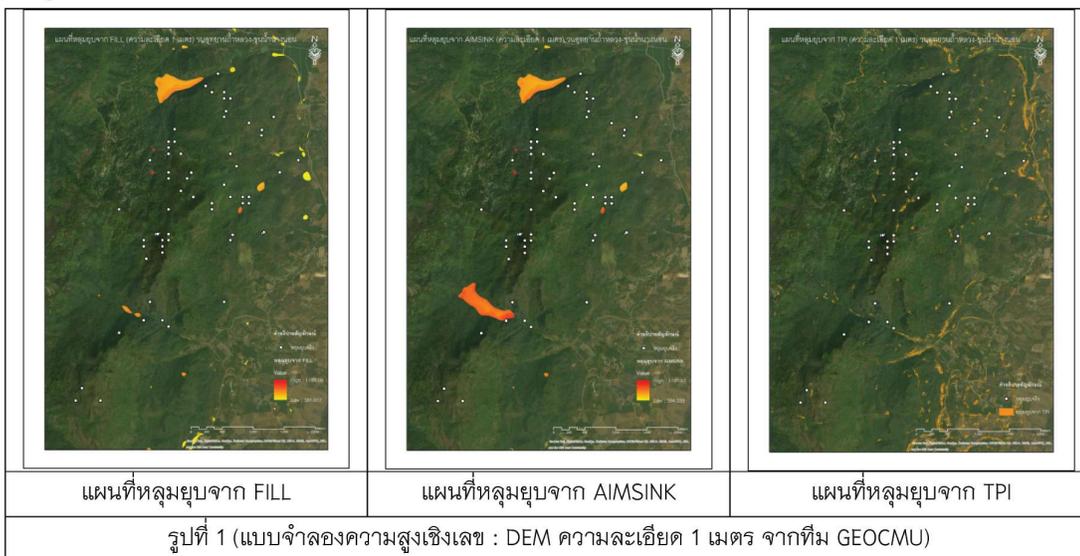
3.3) วิเคราะห์รูปแบบการกระจายเชิงพื้นที่ของหลุมยุบ ใช้ดัชนีของจุดอื่นข้างเคียงใกล้ที่สุด (Nearest Neighbor Index) โดยค่าดัชนีจะเริ่มตั้งแต่ 0-2.15 ซึ่ง 0 บอถึงลักษณะการกระจายเป็นกลุ่มก้อน (Clustered distribution) เข้าใกล้ 1 บอถึงการกระจายตัวแบบสุ่ม (Random distribution) และเข้าใกล้ 2.15 บอถึงการกระจายแบบเป็นระบบและระเบียบ (Uniform distribution)

**4. ผลการศึกษา**

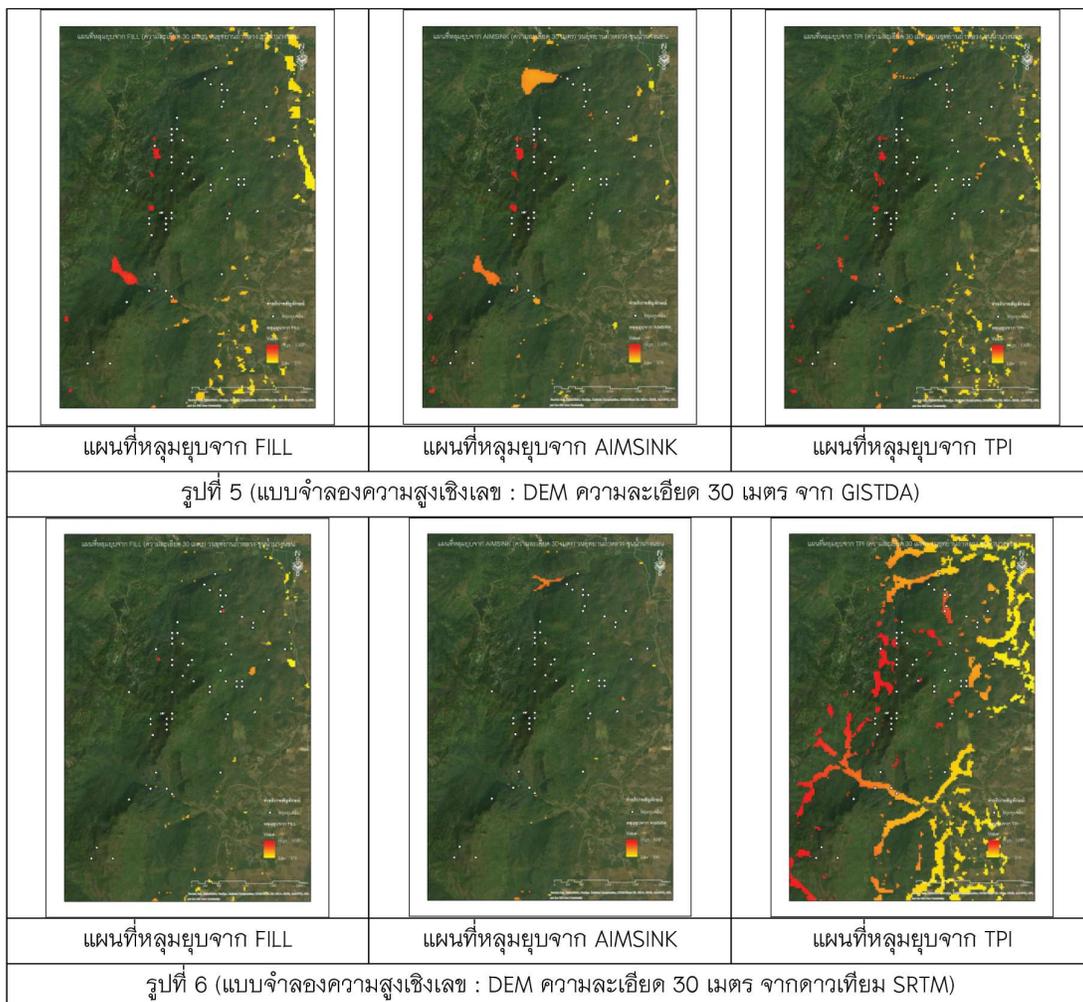
การศึกษาค้นคว้านี้เป็นการเปรียบเทียบวิธีหาหลุมยุบจาก 3 วิธีการ ได้แก่ วิธี FILL วิธี AIMSINK และวิธี TPI และวิเคราะห์การกระจายตัวของภูมิประเทศแบบคาสต์ ทำการศึกษาใน 2 พื้นที่ ได้แก่ พื้นที่ศึกษาที่ 1 วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน และพื้นที่ศึกษาที่ 2 สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง โดยใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียด 1, 4.89, 5, 12.5 และ 30 เมตร มีผลการดำเนินงานดังนี้

**4.1) ผลการศึกษาเปรียบเทียบ 3 วิธีการ**

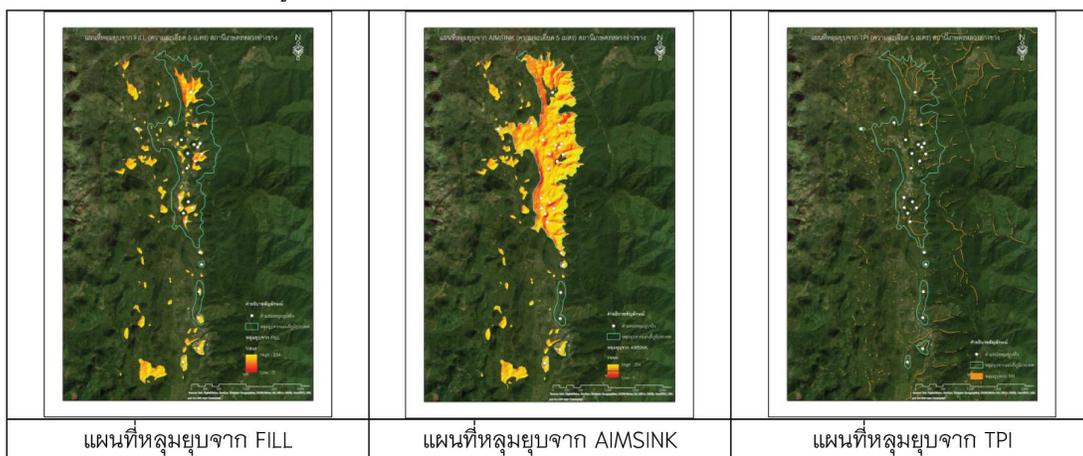
4.1.1) พื้นที่ศึกษาที่ 1 วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียด 1, 4.89, 5, 12.5 และ 30 เมตร (2 แบบจำลอง) และมีจำนวนหลุมยุบจริงทั้งหมด 72 หลุมยุบ ดังรูป 1 – 6

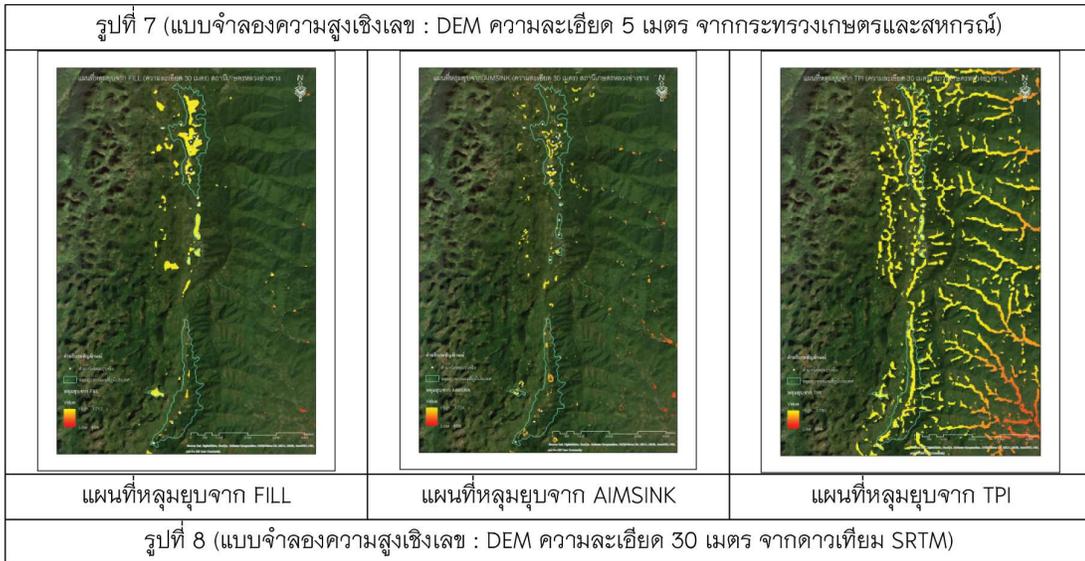






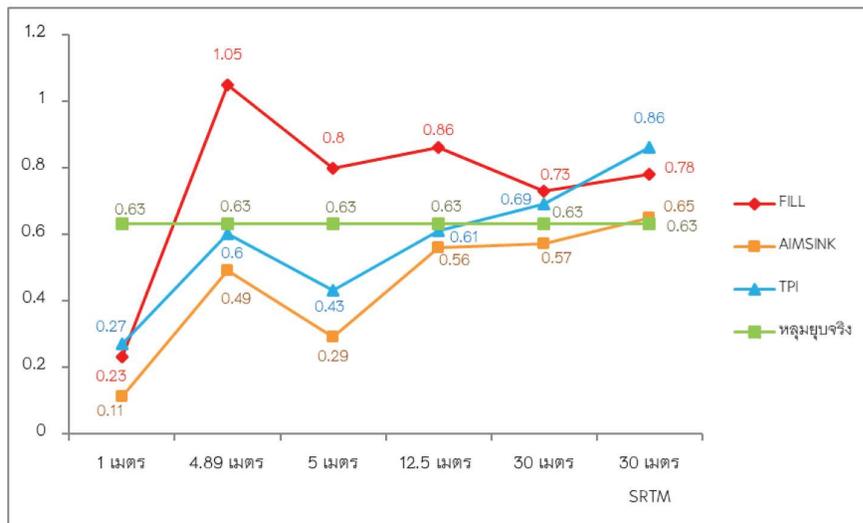
4.1.2) พื้นที่ศึกษาที่ 2 สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง ใช้ข้อมูลแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข ความละเอียด 5 เมตร มีหุลุ่มยุบจริง และ 30 เมตร มีจำนวนหุลุ่มยุบ 28 หุลุ่มยุบ ดังรูป 26 และ 27 ได้ผลการดำเนินงานจาก 3 วิธีการ ดังรูป 7 และ 8





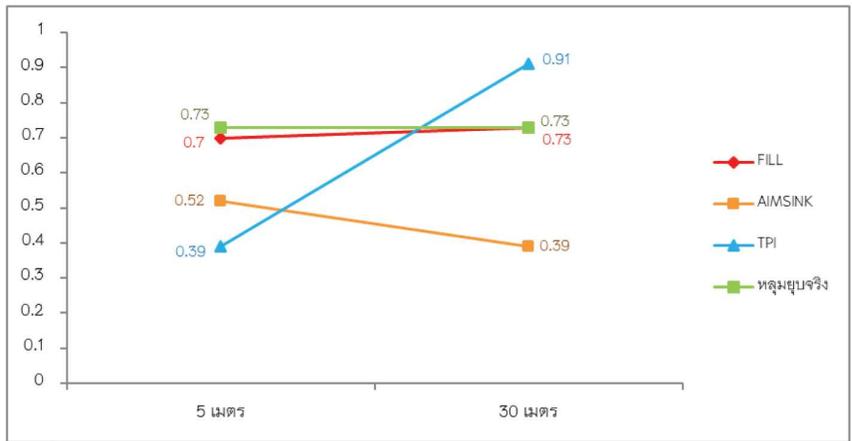
4.2) ผลการศึกษาการกระจายตัวของหุลุ่มยุบของ 3 วิธีการ

4.1.2) การกระจายตัวของหุลุ่มยุบ พื้นที่ศึกษาที่ 1 วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน เมื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายตัวในแต่ละช่วงความละเอียดของแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข 1 เมตร 4.89 เมตร 5 เมตร 12.5 เมตร 30 เมตร (GISTDA) และ 30 เมตร (SRTM) วิธีการที่มีค่าการกระจายตัวของหุลุ่มยุบใกล้เคียงกับค่าการกระจายตัวของหุลุ่มยุบจริงมากที่สุด ได้แก่ TPI, TPI, FILL, TPI, FILL, (FILLและTPI) และAIMSINK ตามลำดับ วิธีการที่มีค่าการกระจายตัวของหุลุ่มยุบใกล้เคียงหุลุ่มยุบจริงมากที่สุดคือ วิธี TPI ที่แบบจำลองความสูง ภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียด 12.5 เมตร มีการกระจายตัวแบบทั่วไป (Random distribution) ค่าการกระจายตัวใกล้เคียง 1 ดังกราฟรูป 9



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่าการกระจายตัวของหุลุ่มยุบจาก 3 วิธีการ วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน

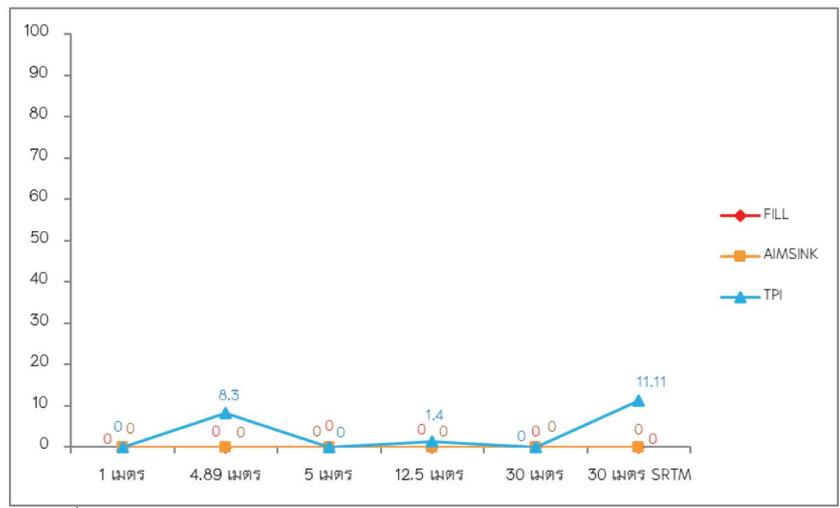
4.1.2) การกระจายตัวของหลุมยุบ พื้นที่ศึกษาที่ 2 สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง เมื่อเปรียบเทียบค่าการกระจายตัวในแต่ละช่วงความละเอียดของแบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข 5 และ 30 เมตร SRTM วิธีการที่มีค่าการกระจายตัวของหลุมยุบใกล้เคียงกับค่าการกระจายตัวของหลุมยุบจริงมากที่สุด ได้แก่ FILL และ FILL ตามลำดับ ดังนั้นวิธีที่มีค่าการกระจายตัวของหลุมยุบใกล้เคียงหลุมยุบจริงมากที่สุดคือ วิธี FILL ที่แบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียด 30 เมตร มีการกระจายตัวแบบทั่วไป (Random distribution) ค่าการกระจายตัวใกล้เคียง 1 ดังกราฟรูป 10



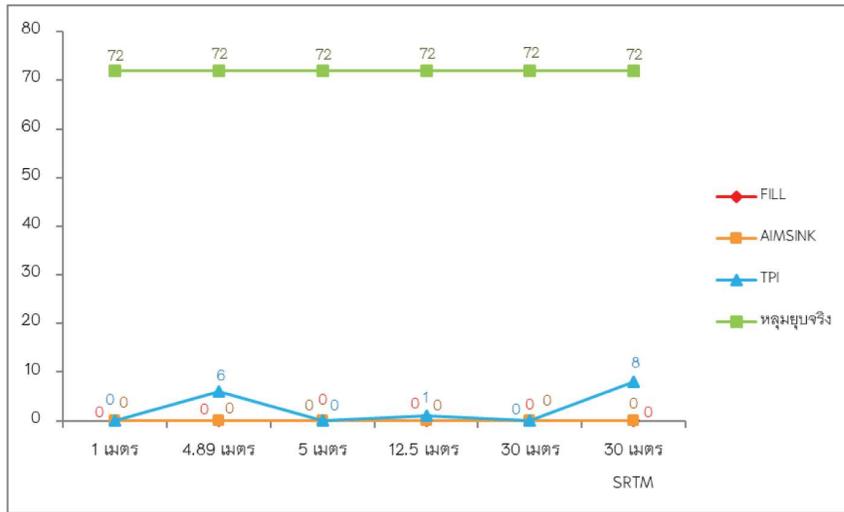
รูปที่ 10 กราฟแสดงค่าการกระจายตัวของหลุมยุบจาก 3 วิธีการ สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง

4.3) ตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง

4.3.1) ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง พื้นที่ศึกษาที่ 1 วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน ค่าเฉลี่ยของความถูกต้องเชิงตำแหน่งความละเอียด 1 เมตร 4.89 เมตร 5 เมตร 12.5 เมตร และ 30 เมตร วิธีการ AIMSINK เท่ากับ 0 เปอร์เซนต์ วิธีการ FILL เท่ากับ 0 เปอร์เซนต์ และวิธีการ TPI เท่ากับ 2.5 เปอร์เซนต์ ดังรูป 11 และกราฟแสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่หลุมยุบจาก 3 วิธีการมีตำแหน่งตรงกับหลุมยุบจริง ดังรูป 12

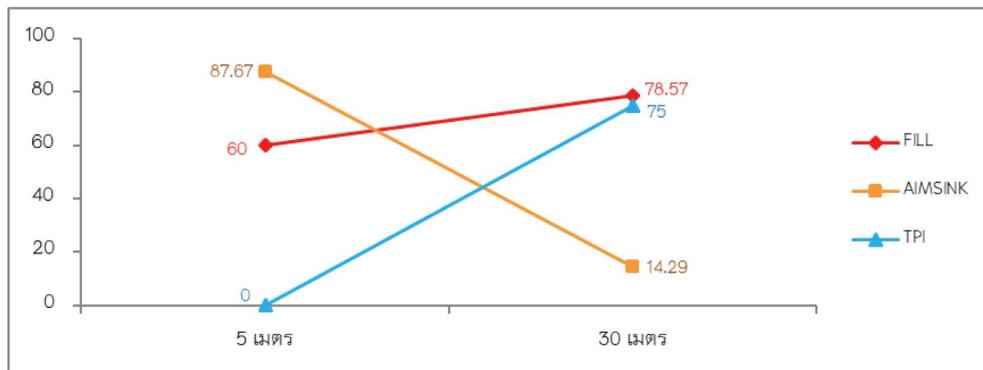


รูปที่ 11 กราฟแสดงการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง (เปอร์เซนต์) ของหลุมยุบจาก 3 วิธีการวนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน

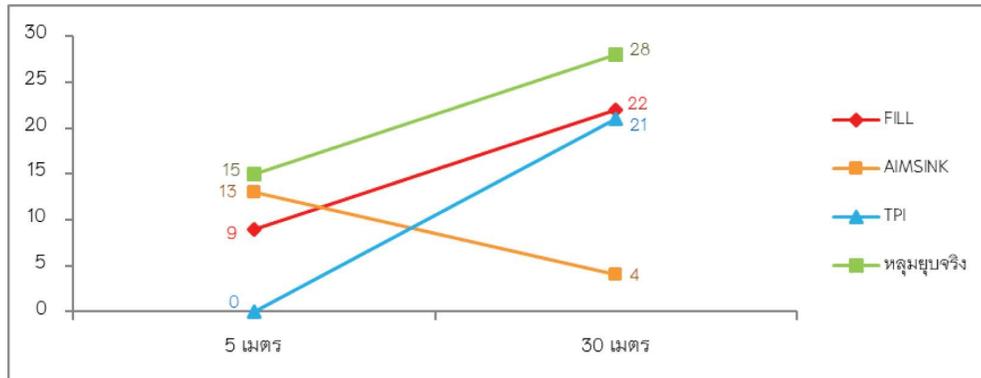


รูปที่ 12 กราฟแสดงการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของหลุมยุบ จาก 3 วิธีการ วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน

4.3.2) ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง พื้นที่ศึกษาที่ 2 สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง ค่าเฉลี่ยของความถูกต้องเชิงตำแหน่งของความละเอียด 5 เมตร และ 30 เมตร วิธีการ AIMSINK เท่ากับ 51 เปอร์เซ็นต์ วิธีการ FILL เท่ากับ 70 เปอร์เซ็นต์ และวิธีการ TPI เท่ากับ 37.5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวิธีที่มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งมากที่สุดคือ วิธี AIMSINK ที่แบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียด 5 เมตร แต่วิธีที่มีความถูกต้องที่ยอมรับได้ที่แบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียดทั้ง 5 เมตร และ 30 เมตร คือ วิธี FILL ดังรูป 13 และกราฟแสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่หลุมยุบจาก 3 วิธีการมีตำแหน่งตรงกับหลุมยุบจริง ดังรูป 14



รูปที่ 13 กราฟแสดงการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่ง (เปอร์เซ็นต์) ของหลุมยุบ จาก 3 วิธีการ วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน

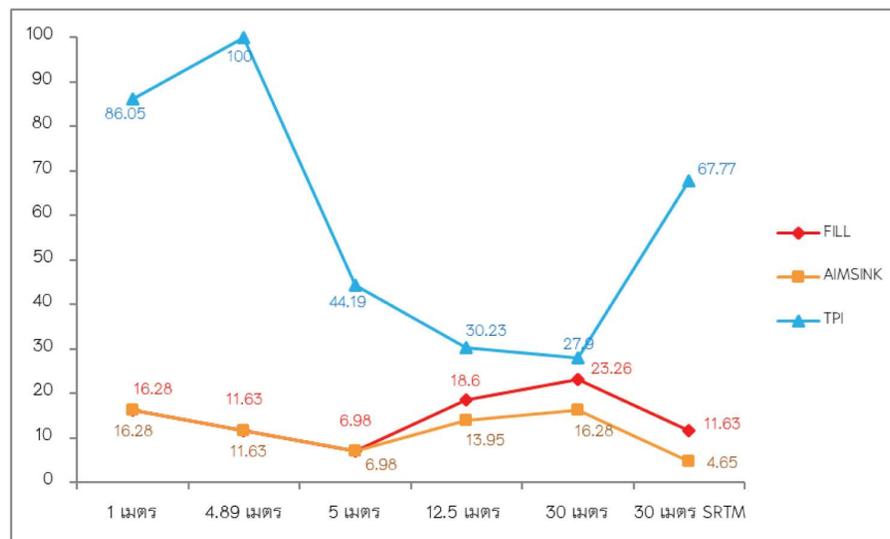


รูปที่ 14 กราฟแสดงการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งของหลุมยุบ  
จาก 3 วิธีการ สถานีเกษตรหลวงอ่างขาง

#### 4.4) ตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งโดยตารางกริด 300×300 เมตร

เนื่องจากตำแหน่งของหลุมยุบจริงจากการสำรวจของทีมช่วยเหลือ ในพื้นที่ศึกษาที่ 1 วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน เป็นระบบพิกัดทหาร ( Military Grid Reference System ) ซึ่งการอ้างอิงระบบพิกัดในรูปแบบนี้ จะแบ่งโลกออกเป็นพื้นที่เป็น “กริดโซน” แต่ละกริดโซน จะมีเครื่องหมายแสดงความแตกต่างไว้ภายในกริดโซนต่างๆ และแบ่งออกเป็นจัตุรัส 100,000 เมตร ยกตัวอย่างเช่น 47 NC 889541 ซึ่งกำหนดพื้นที่ภายในจัตุรัส 100×100 เมตร และขนาดของหลุมยุบจริงในพื้นที่ศึกษาที่ 1 นั้นมีพื้นที่โดยประมาณเพียง 0.25 ถึง 25 ตารางเมตร ดังนั้นจึงเกิดความคลาดเคลื่อนในการหาหลุมยุบจากวิธีการทั้ง 3 วิธี

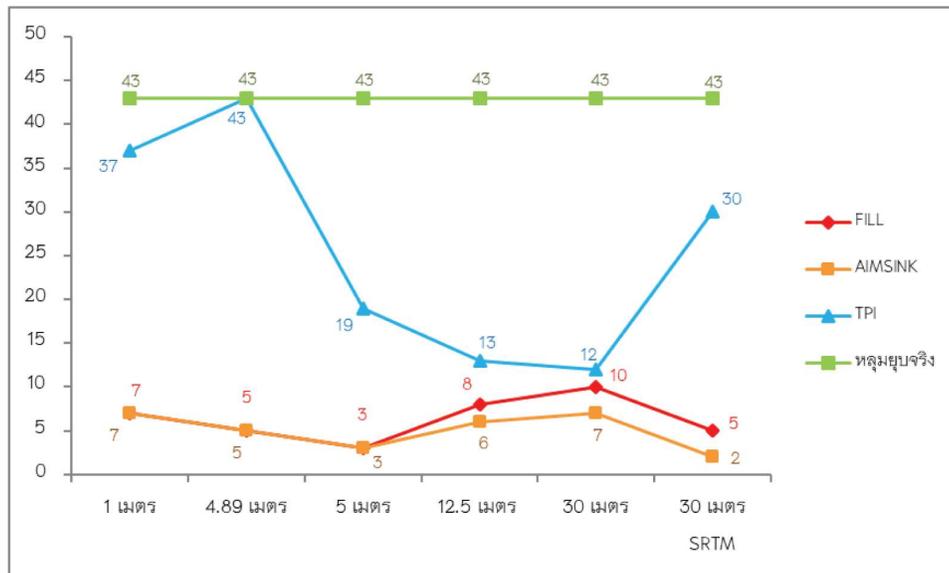
ดังนั้นเพื่อการประเมินตำแหน่งของหลุมยุบที่เหมาะสม ผู้วิจัยเลือกใช้กริดขนาด 300 x 300 เมตร จะได้กราฟแสดงผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งแบบตารางกริด (เปอร์เซ็นต์) ของหลุมยุบจาก 3 วิธีการ ดังรูป 15



รูปที่ 15 กราฟแสดงการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งแบบตารางกริด 300×300  
(เปอร์เซ็นต์) ของหลุมยุบจาก 3 วิธีการ วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน

จากรูป 15 จะได้ค่าเฉลี่ยของความถูกต้องเชิงตำแหน่งความละเอียด 1 เมตร 4.89 เมตร 5 เมตร 12.5 เมตร และ 30 เมตร วิธีการ AIMSINK เท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ วิธีการ FILL เท่ากับ 6.3 เปอร์เซ็นต์ และวิธีการ TPI เท่ากับ 60 เปอร์เซ็นต์

ผลการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งที่หลุมยุบจาก 3 วิธีการมีตำแหน่งตรงกับหลุมยุบจริง(รูปแบบตารางกริด) และวิธีการ TPI เป็นวิธีที่มีความถูกต้องเชิงตำแหน่งโดยตารางกริด 300×300 เมตร มากที่สุด ดังรูป 16



รูปที่ 16 กราฟแสดงการตรวจสอบความถูกต้องเชิงตำแหน่งแบบตารางกริด 300×300 ของหลุมยุบจาก 3 วิธีการ วนอุทยานถ้ำหลวง-ขุนน้ำนางนอน

## 5. สรุป อภิปรายผลการศึกษา

จากการดำเนินการศึกษาเรื่องการเปรียบเทียบวิธีหาหลุมยุบและการวิเคราะห์การกระจายตัวบนภูมิประเทศแบบคาสต์ สรุปได้ว่า วิธีของแบบจำลอง AIMSINK ถึงแม้ว่าค่าความถูกต้องเชิงตำแหน่งมีความถูกต้องสูงที่สุดในพื้นที่ศึกษาสถานีเกษตรหลวงอ่างขาง (87.67%) แต่ค่าการกระจายตัวของหลุมยุบอยู่ที่ 0.52, 0.39 (แบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลข ความละเอียด 5 เมตรและ 30 เมตร) ซึ่งต่างจากค่าของหลุมยุบจริงมาก (0.73) ส่วนวิธีการ ถมหลุม FILL จากความถูกต้องเชิงตำแหน่งมีค่าความถูกต้องเป็นอันดับสอง (78.57%) แต่มีค่าการกระจายตัวของหลุมยุบอยู่ที่ 0.70, 0.73 (แบบจำลองความสูงภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียด 5 เมตรและ 30 เมตร) ซึ่งเป็นวิธีที่มีค่าใกล้เคียงหลุมยุบจริงมากที่สุด (0.73) ดังนั้นวิธีการถมหลุม FILL เหมาะสมมากที่สุดสำหรับพื้นที่ศึกษาสถานีเกษตรหลวงอ่างขาง และวิธีการทางดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศ TPI จากความถูกต้องเชิงตำแหน่งแบบตารางกริด มีความถูกต้องสูงสุด (100%) และค่าการกระจายของหลุมยุบอยู่ที่ 0.61 (แบบจำลอง ความสูงภูมิประเทศเชิงเลขความละเอียด 12.5 เมตร) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงหลุมยุบจริง (0.63) ดังนั้นวิธีการทางดัชนีตำแหน่งภูมิประเทศ TPI เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการหาหลุมยุบบน ภูมิประเทศแบบภูเขา แต่รูปร่างของหลุมยุบจะมีขนาดเล็กและมีพื้นที่ร่องเขารวมอยู่ด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Chen H et.al (2015) และ Daniel H. Doctor & John A. Young. (2013) ส่วนวิธี AIMSINK เหมาะสำหรับการหาหลุมยุบบนภูมิประเทศแบบที่ราบลุ่ม เพราะมีข้อจำกัดเนื่องจากหากลักษณะภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะ

ผลลัพธ์ของกลุ่มยุบที่ได้ จะมีขนาดใหญ่เกินจริง และวิธี FILL เหมาะสมสำหรับการหาหลุมยุบบนภูมิประเทศแบบแอ่งกระทะ และการถูกกัดกร่อนของหินปูนจากน้ำใต้ดินบนภูมิประเทศแบบคาสต์

ข้อเสนอเพิ่มเติมในการศึกษาครั้งต่อไป ในประเทศไทยยังไม่ได้มีการรวบรวมข้อมูลหลุมยุบไว้อย่างเป็นระบบ และที่ระดับมาตราส่วนเดียวกัน ทำให้ในการศึกษาเชิงเปรียบเทียบ ทราบได้เฉพาะหลุมที่มีการสำรวจจากทีมสำรวจหมูป่า แผนที่ ภูมิประเทศและจากการลงพื้นที่สำรวจของผู้วิจัยซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อข้อจำกัดในการวิเคราะห์และแปลตีความข้อมูลเป็นสำคัญ แต่นับว่าเป็นการช่วยสร้างแนวคิดและเทคนิควิธีการที่อาจนำไปใช้ต่อยอดในเรื่องราวต่างๆได้ในอนาคต

## 6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยเพื่อการพัฒนาบัณฑิตกรรมเชิงพื้นที่ สาขาวิชาภูมิสารสนเทศศาสตร์ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา ที่อนุเคราะห์ข้อมูลและอุปกรณ์ในการทำวิจัยในครั้งนี้

## 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] กรมทรัพยากรน้ำบาดาล. (2555). โครงการประเมินศักยภาพ และบริหารจัดการทรัพยากรน้ำบาดาล ในกลุ่มหินสระบุรีและพื้นที่ที่มีลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาที่ซับซ้อน. กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม
- [2] ชาญ ต้นตูลูกฤต, “ถ้ำและลักษณะอย่างอื่นที่เกี่ยวข้อง (Cave and related features)”. ธรณีวิทยา เล่ม 2, พิมพ์ครั้งที่ 1 . ปี 2529. บริษัทโรงพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช จำกัด: ไทยวัฒนาพานิช จำกัด.
- [3] บีบีซีออนไลน์. (2561). “ถ้ำหลวง: ฟนกำลังมา ทีมช่วยเหลือแข่งกับเวลา หาทางนำ 13 หมูป่าออกจากถ้ำ”. BBC (blog). <https://www.bbc.com/thai/44720715>.
- [4] ราชบัณฑิตยสถาน (2544) พจนานุกรมศัพท์ธรณีวิทยา ฉบับราชบัณฑิตยสถาน. กรุงเทพฯ: ราชบัณฑิตยสถาน. 384 หน้า
- [5] สำนักธรณีวิทยาลิ่งแควดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี. (2554). “กระบวนการเกิดหลุมยุบ ปัจจัยที่ทำให้เกิดหลุมยุบ ข้อสังเกตก่อนเกิดหลุมยุบ”. กรมทรัพยากรธรณี Department of Mineral Resources (blog). [http://www.dmr.go.th/download/Landslide/Sinkhole/process\\_sinkhole.htm](http://www.dmr.go.th/download/Landslide/Sinkhole/process_sinkhole.htm)
- [6] สำนักธรณีวิทยาลิ่งแควดล้อมและธรณีพิบัติภัย กรมทรัพยากรธรณี. (2554). “ความรู้เกี่ยวกับหลุมยุบ”. กรมทรัพยากรธรณี Department of Mineral Resources (blog). [http://www.dmr.go.th/download/Landslide/Sinkhole/what\\_sinkhole.htm](http://www.dmr.go.th/download/Landslide/Sinkhole/what_sinkhole.htm)
- [7] Chen H., Oguchi T., & Wu P. (2015). A semi-automatic model for sinkhole identification in a karst area of Zhijin County, China. Proceedings of the SPIE.
- [8] Daniel H. Doctor & John A. Young. (2013). “An Evaluation of Automated GIS Tools for Delineating Karst Sinkholes and Closed Depressions from 1-Meter LiDAR-Derived Digital Elevation Data”. U.S. Geological Survey. [https://www.researchgate.net/publication/250998030\\_An\\_Evaluation\\_of\\_Automated\\_GIS\\_Tools\\_for\\_Delineating\\_Karst\\_Sinkholes\\_and\\_Closed\\_Depressions\\_from\\_1-Meter\\_LiDAR-Derived\\_Digital\\_Elevation\\_Data](https://www.researchgate.net/publication/250998030_An_Evaluation_of_Automated_GIS_Tools_for_Delineating_Karst_Sinkholes_and_Closed_Depressions_from_1-Meter_LiDAR-Derived_Digital_Elevation_Data).

- [9] Launspach & Jonathon. (2013). "Automated Sinkhole Extraction and Morphological Analysis in Northeast Iowa Using High-Resolution LiDAR Data". University of Northern Iowa.  
<https://scholarworks.uni.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1033&context=etd>.
- [10] Pat J. lampietro, Rikk G. Kvitek, & Erica Morris. (2005). "Recent Advances in Automated Genus-Specific Marine Habitat Mapping Enabled by High-Resolution Multibeam Bathymetry". California State University. [http://seafloor.otterlabs.org/publications/lampietro\\_MTS.pdf](http://seafloor.otterlabs.org/publications/lampietro_MTS.pdf).