การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของดินที่ติดจากรองเท้าด้วยเทคนิค ICP-MS เพื่อประยุกต์ใช้ทางนิติวิทยาศาสตร์

Elemental Profiling of Soil Adhered to Footwear Using ICP-MS for Forensic Applications

พรทิพย์ นวมสุคนธ์[1], ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง[2]

[1]สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์[1] คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร[1] e-mail: mildphonthip@gmail.com[*1]*

[2]ภาควิชาเคมี2 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร2 e-mail: Sirath157@gmail.com2

บทคัดย่อ

ดินเป็นพยานหลักฐานเชิงร่องรอยที่มีความสำคัญในงานนิติวิทยาศาสตร์ เนื่องจากองค์ประกอบทางธรณีเคมีสะท้อนลักษณะเฉพาะของพื้นที่และสามารถใช้เชื่อมโยงบุคคลกับสถานที่เกิดเหตุได้ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุของดินที่ติดจากพื้นรองเท้า และประเมินศักยภาพของเทคนิค Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) ในการจำแนกประเภทดิน ตัวอย่างดิน 5 ประเภท ได้แก่ ดินลูกรัง ดินทราย ดินเค็ม ดินโคลน และดินร่วน ทั้งหมด 20 ตัวอย่าง เก็บจากจังหวัดสมุทรสงคราม โดยจำลองการเดินย่ำบนพื้นที่ขนาด 1×1 เมตร และเก็บดินที่ติดพื้นรองเท้ามาวิเคราะห์ ตรวจวัดธาตุรวม 27 ธาตุ ภายหลังการย่อยตัวอย่างด้วยระบบไมโครเวฟ วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนา การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) ผลการศึกษาพบว่าธาตุบางชนิดมีความแตกต่างระหว่างประเภทดินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และ PCA สามารถจำแนกกลุ่มตัวอย่างได้ชัดเจน โดยตัวอย่างในกลุ่มเดียวกันมีแนวโน้มจัดกลุ่มไปในทิศทางเดียวกันของแกนองค์ประกอบหลัก ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าองค์ประกอบเชิงธาตุของดินที่ติดจากพื้นรองเท้ายังคงความจำเพาะของแหล่งกำเนิดได้เพียงพอสำหรับการเปรียบเทียบเชิงนิติวิทยาศาสตร์ และมีศักยภาพในการสนับสนุนการตีความพยานหลักฐานอย่างเป็นระบบ

คำหลัก: ดิน, ICP-MS, การวิเคราะห์ธาตุ, PCA, นิติวิทยาศาสตร์

Abstract

Soil is an important type of trace evidence in forensic science because its geochemical composition reflects specific locations and can help link individuals to crime scenes. This

study examined the elemental composition of soil adhered to footwear and evaluated the potential of Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) for soil discrimination. Five soil types-lateritic, sandy, saline, muddy, and loamy soils were collected from Samut Songkhram Province. A controlled walking simulation was performed on a 1 × 1 m area, and soil attached to shoe soles was collected for analysis. Twenty-seven elements were determined after microwave-assisted digestion. Data were analyzed using descriptive statistics, one-way analysis of variance (ANOVA) at a significance level of 0.05, and principal component analysis (PCA). The results showed significant differences in some elements among soil types ($p < 0.05$). PCA also clearly separated the sample groups, with samples from the same soil type clustering in similar directions along the principal component axes. These findings indicate that soil recovered from footwear retains source-specific elemental characteristics and can be used for forensic soil comparison.

Keywords: Soil, ICP-MS, Elemental Analysis, Principal Component Analysis (PCA), Forensic Science

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ดินเป็นพยานหลักฐานเชิงร่องรอยที่มีความสำคัญในงานนิติวิทยาศาสตร์ เนื่องจากสามารถพบได้บ่อยในคดีอาชญากรรมที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนย้ายบุคคล วัตถุ หรือยานพาหนะระหว่างสถานที่ อนุภาคดินสามารถถ่ายโอนไปติดบนรองเท้า เสื้อผ้า ยานพาหนะ หรืออุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการกระทำความผิด และอาจคงอยู่บนพื้นผิวดังกล่าวได้แม้เวลาจะผ่านไปช่วงหนึ่ง จึงทำให้ดินมีคุณค่าในฐานะพยานหลักฐานที่สามารถใช้เชื่อมโยงบุคคลหรือวัตถุกับสถานที่เกิดเหตุได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในทางปฏิบัติ พยานดินสามารถปรากฏได้ในหลากหลายสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับคดีจริง เช่น กรณีผู้ต้องสงสัยเดินผ่านบริเวณสถานที่เกิดเหตุแล้วมีดินติดบนพื้นรองเท้า หรือกรณียานพาหนะเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ดินเปียกจนเกิดคราบดินติดบริเวณซุ้มล้อหรือใต้ท้องรถ การตรวจเปรียบเทียบดินที่พบจากวัตถุเหล่านี้กับดินจากสถานที่เกิดเหตุจึงเป็นแนวทางสำคัญที่ช่วยสนับสนุนการตีความพยานหลักฐานในกระบวนการสืบสวนและการพิสูจน์ข้อเท็จจริงทางคดี

ในเชิงวิทยาศาสตร์ ดินเป็นวัสดุธรรมชาติที่มีองค์ประกอบซับซ้อน ประกอบด้วยแร่ธาตุ สารอินทรีย์ และธาตุองค์ประกอบหลายชนิด ซึ่งสะท้อนลักษณะทางธรณีวิทยาและสภาพแวดล้อมของแต่ละพื้นที่ ความแตกต่างเชิงองค์ประกอบดังกล่าวทำให้ดินจากแหล่งต่าง ๆ มีลักษณะเฉพาะที่สามารถนำมาใช้

เปรียบเทียบและจำแนกแหล่งที่มาได้ จึงทำให้การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องในสาขา forensic geoscience (Fitzpatrick, 2021)

เทคนิค Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS) เป็นเทคนิควิเคราะห์ที่มีความไวสูง สามารถตรวจวัดธาตุหลายชนิดได้พร้อมกันในระดับร่องรอย และมีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในตัวอย่างที่ซับซ้อน เช่น ดิน ดังนั้น ICP-MS จึงถูกนำมาใช้ในงานวิเคราะห์ทางนิติวิทยาศาสตร์อย่างแพร่หลาย แม้งานวิจัยด้านการวิเคราะห์ดินเพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์จะมีความก้าวหน้าอย่างต่อเนื่องในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทย งานวิจัยที่มุ่งศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุของดินเพื่อใช้ในการจำแนกตัวอย่างทางนิติวิทยาศาสตร์ยังมีจำนวนจำกัด โดยเฉพาะการศึกษาที่เชื่อมโยงกับสถานการณ์จำลองที่ใกล้เคียงกับเหตุการณ์จริง อย่างไรก็ตาม มีรายงานการศึกษาในประเทศไทยที่แสดงให้เห็นว่าข้อมูลธาตุของดินสามารถนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการจำแนกตัวอย่างดินเพื่อประโยชน์ทางนิติวิทยาศาสตร์ได้ (ณัฏฐ์ภัทร และคณะ, 2024)

ดังนั้น การศึกษานี้จึงมุ่งประเมินศักยภาพของเทคนิค ICP-MS ในการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุของดินที่ติดจากรองเท้า และทดสอบความสามารถในการจำแนกประเภทดินด้วยวิธีการทางสถิติ โดยใช้ตัวอย่างดินจากพื้นที่ศึกษาในประเทศไทยภายใต้การจำลองสถานการณ์การเดินที่มีการควบคุมตัวแปรอย่างเหมาะสม ผลการศึกษาที่ได้คาดว่าจะช่วยสนับสนุนการตีความพยานหลักฐานเชิงร่องรอยอย่างเป็นระบบ และเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาองค์ความรู้ด้าน forensic geochemistry ในประเทศไทยต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์และหาปริมาณองค์ประกอบเชิงธาตุของดินที่ติดจากพื้นรองเท้า โดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (ICP-MS)
2. เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างเชิงปริมาณขององค์ประกอบธาตุระหว่างประเภทดินต่าง ๆ และประเมินประสิทธิภาพของการวิเคราะห์ข้อมูลแบบพหุตัวแปร โดยเฉพาะการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis; PCA) ในการจำแนกประเภทดินและสนับสนุนการตีความพยานหลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ข้อมูลเชิงปริมาณขององค์ประกอบธาตุในดินที่ติดจากพื้นรองเท้า เพื่อใช้เป็นแนวทางในการเปรียบเทียบตัวอย่างทางนิติวิทยาศาสตร์
2. ประเมินศักยภาพของเทคนิค ICP-MS และการวิเคราะห์แบบพหุตัวแปรในการจำแนกประเภทดิน และสนับสนุนการตีความพยานหลักฐานอย่างเป็นระบบ

3. เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาฐานข้อมูลธรณีเคมีของดินและสนับสนุนการตรวจพิสูจน์พยานหลักฐานในกระบวนการยุติธรรม

กรอบแนวคิด

ภาพที่ 1 กรอบแนวคิดการศึกษาการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในดินด้วยเทคนิค ICP-MS

วิธีการดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์

อุปกรณ์สำหรับการเก็บและเตรียมตัวอย่าง ได้แก่ รองเท้าผ้าใบ ตลับเมตร กรวยกำหนดตำแหน่ง ช้อนพลาสติก ถุงซิปล็อก ปากกามาร์กเกอร์ เครื่องบด และตะแกรงร่อน การวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงธาตุดำเนินการด้วยเครื่อง Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometer (ICP-MS) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7900

ตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัย

ตัวอย่างดินจำนวน 5 ประเภท ได้แก่ ดินร่วน ดินโคลน ดินร่วนปนทราย ดินลูกรัง และดินเค็ม รวม 20 ตัวอย่าง เก็บจากจังหวัด สมุทรสงคราม โดยกำหนดพื้นที่เก็บตัวอย่างขนาด 1 × 1 เมตร และบันทึกพิกัดตำแหน่งอย่างชัดเจน

จำลองการถ่ายโอนดินโดยให้อาสาสมัครสวมรองเท้าผ้าใบที่สะอาด เดินย่ำในพื้นที่ที่กำหนดเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเก็บดินที่ติดพื้นรองเท้าแยกบรรจุในถุงซิปล็อก ตัวอย่างถูกทำให้แห้งที่อุณหภูมิไม่เกิน 30 °C บดและร่อนให้สม่ำเสมอ ก่อนชั่งน้ำหนัก 0.25 กรัม สำหรับการวิเคราะห์

ขั้นตอนการทดลอง

การย่อยตัวอย่าง

ชั่งดินแห้ง 0.25 กรัม เติมกรดไนตริกเข้มข้น (HNO_3) 9 มล. และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) 1 มล. ย่อยด้วยเครื่องไมโครเวฟรุ่น ETHOS UP ที่อุณหภูมิ 200 °C กำลัง 1800 W เป็นเวลา 15 นาที (2 ขั้นตอน) หลังการย่อย กรองผ่านตัวกรอง 0.45 µm และปรับปริมาตรเป็น 100 มล.

การวิเคราะห์ด้วย ICP-MS

วิเคราะห์ธาตุ 27 ธาตุ ได้แก่ Ag, Al, As, Ba, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Rb, Se, Sr, Tl, U, V และ Zn ภายใต้สภาวะ RF power 1550 W, carrier gas flow 0.85 L/min และ helium cell gas flow 4.0 mL/min วิเคราะห์ซ้ำ 3 ครั้งต่อหนึ่งตัวอย่าง กราฟมาตรฐานเตรียมในสารละลาย 1% (v/v) HNO_3 ช่วงความเข้มข้น 0.1–1000 µg/L และใช้ Sc, Ge, Rh, In, Tb และ Bi เป็นสารมาตรฐานภายใน

การคำนวณและประมวลผลข้อมูล

ความเข้มข้นของธาตุคำนวณในหน่วย mg/kg ตามสมการ

$$\text{conncentration (mg/kg)} = \frac{C \times V}{W}$$

โดยที่

C = ความเข้มข้นที่วัดได้จาก ICP-MS (mg/L)

V = ปริมาตรสุดท้ายของสารละลาย (L)

W = น้ำหนักตัวอย่างดินแห้ง (kg)

ข้อมูลถูกวิเคราะห์ด้วยสถิติเชิงพรรณนา การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) โดยใช้โปรแกรม MetaboAnalyst เวอร์ชัน 6.0 เพื่อประเมินความแตกต่างและศักยภาพในการจำแนกประเภทดินในบริบททางนิติวิทยาศาสตร์

ผลการวิจัย

การศึกษานี้มุ่งวิเคราะห์องค์ประกอบและปริมาณธาตุในตัวอย่างดินที่ติดจากพื้นรองเท้า โดยใช้เทคนิค ICP-MS เพื่อประเมินความแตกต่างเชิงธรณีเคมีระหว่างประเภทดิน

การวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วย ICP-MS

ผลการวิเคราะห์ธาตุ 27 ธาตุในตัวอย่างดิน 5 ประเภท พบว่า ธาตุหลัก ได้แก่ Al, Ca และ Fe มีค่าความเข้มข้นสูงในทุกกลุ่มตัวอย่าง และตัวอย่างภายในกลุ่มเดียวกันมีแนวโน้มค่าความเข้มข้นใกล้เคียงกัน แสดงถึงความสม่ำเสมอขององค์ประกอบภายในแหล่งเดียวกัน ค่า %RSD ของธาตุส่วนใหญ่

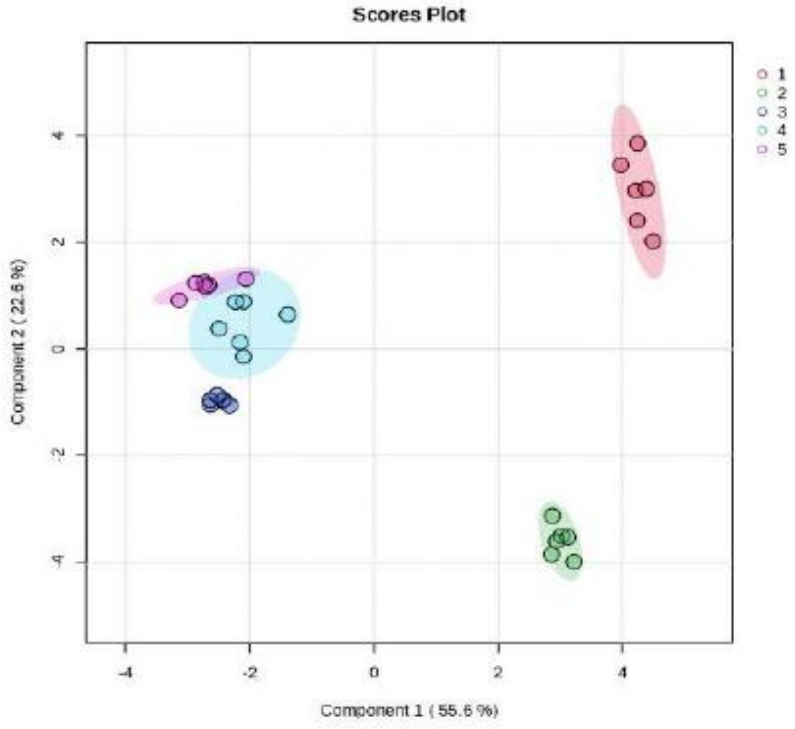
อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ (<20%) สะท้อนถึงความแม่นยำและความเสถียรของวิธีวิเคราะห์ ค่า %RSD ที่สูงในบางธาตุสัมพันธ์กับระดับความเข้มข้นที่ต่ำมากและความแปรผันตามธรรมชาติของดิน มากกว่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ โดยรวม ICP-MS สามารถสร้างโปรไฟล์องค์ประกอบธาตุที่เหมาะสมสำหรับการเปรียบเทียบตัวอย่างในบริบททางนิติวิทยาศาสตร์

การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA)

ผลการวิเคราะห์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่าธาตุส่วนใหญ่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างประเภทดิน โดยเฉพาะ Na, Mg, Ca, Fe, Zn, Ba และ Pb ($p < 0.05$) ผลดังกล่าวสะท้อนถึงความแตกต่างของลักษณะธรณีเคมีในแต่ละแหล่งกำเนิด และแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบธาตุสามารถใช้เป็นตัวแปรสำคัญในการจำแนกประเภทดินได้

การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA)

ผลการวิเคราะห์ PCA พบว่า องค์ประกอบหลักที่ 1 (PC1) อธิบายความแปรปรวนได้ร้อยละ 55.6 และองค์ประกอบหลักที่ 2 (PC2) อธิบายได้ร้อยละ 22.6 รวมเป็นร้อยละ 78.2 ของความแปรปรวนทั้งหมด ซึ่งเพียงพอในการอธิบายโครงสร้างข้อมูล



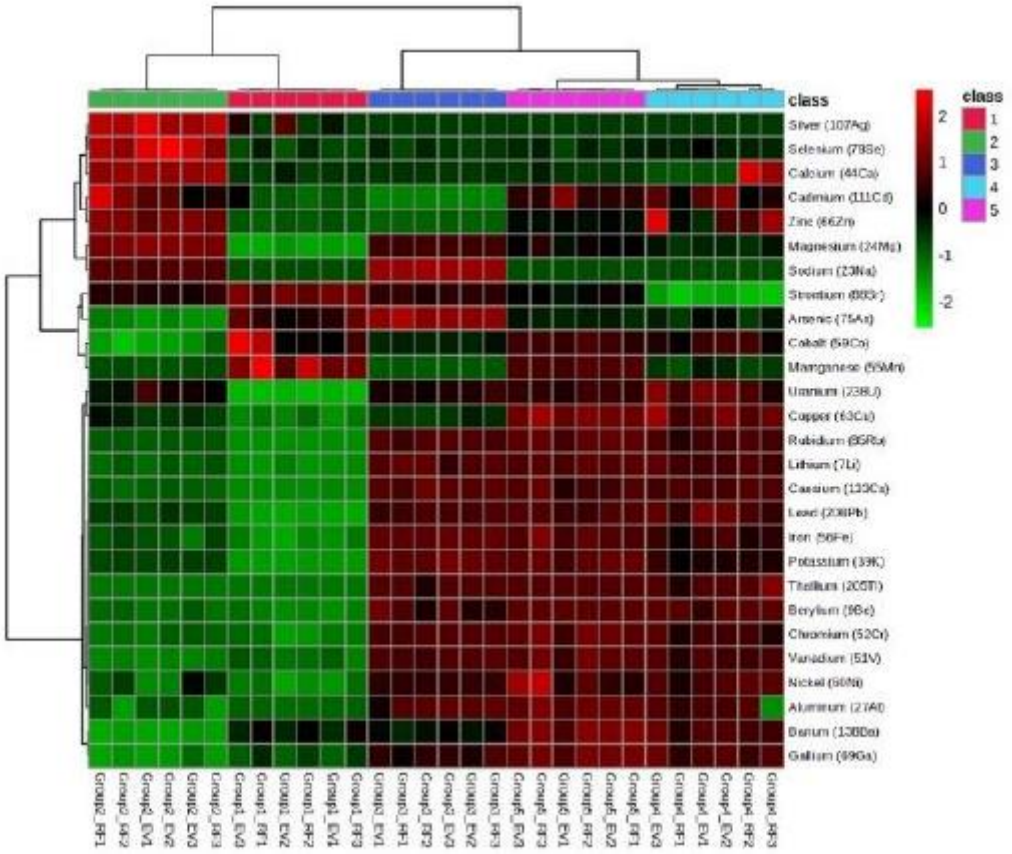
ภาพที่ 2 การกระจายตัวของตัวอย่างดินทั้ง 5 กลุ่มจากการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA)

จาก score plot พบว่าตัวอย่างภายในกลุ่มเดียวกันมีการกระจุกตัวใกล้เคียงกัน และแยกออกจากกลุ่มอื่นอย่างชัดเจนตามแกน PC1 และ PC2 แสดงถึงความแตกต่างเชิงระบบขององค์ประกอบธาตุระหว่างกลุ่ม

การวิเคราะห์ Heatmap

ผลการวิเคราะห์ Heatmap แสดงให้เห็นรูปแบบความเข้มข้นของธาตุที่แตกต่างกันระหว่างกลุ่มตัวอย่างอย่างชัดเจน โดยตัวอย่างภายในกลุ่มเดียวกันมีแนวโน้มจัดกลุ่มร่วมกันตามลักษณะองค์ประกอบธาตุที่คล้ายคลึงกัน ขณะที่ตัวอย่างต่างกลุ่มแสดงรูปแบบสีที่แตกต่างกันอย่างเด่นชัด สะท้อนถึงความแตกต่างขององค์ประกอบทางเคมีในแต่ละพื้นที่

สีแดงแสดงถึงความเข้มข้นสูง และสีเขียวแสดงถึงความเข้มข้นต่ำ ซึ่งช่วยให้สามารถมองเห็นแนวโน้มและรูปแบบการกระจายตัวของธาตุได้อย่างเป็นระบบ



ภาพที่ 3 แผนภาพแสดงรูปแบบความแตกต่างขององค์ประกอบธาตุในตัวอย่างดิน (Heatmap)

อภิปรายผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของตัวอย่างดินจากจังหวัดสมุทรสงครามด้วยเทคนิค ICP-MS พบว่าหลายธาตุมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งสะท้อนถึงความหลากหลายทางธรณีเคมีของพื้นที่ศึกษา ได้แก่ พื้นที่เกษตรกรรม พื้นที่ตะกอนริมแม่น้ำ และพื้นที่ชายฝั่งทะเล การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (PCA) สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้ร้อยละ 78.2 จากสององค์ประกอบหลักแรก โดยตัวอย่างแต่ละกลุ่มแยกออกจากกันได้อย่างชัดเจน แสดงให้เห็นว่ารูปแบบ

องค์ประกอบธาตุของดินมีลักษณะจำเพาะตามประเภทดินและสภาพแวดล้อม ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดการใช้ elemental fingerprint ในการจำแนกแหล่งกำเนิดดินในงานนิติวิทยาศาสตร์ (Dawson & Hillier, 2010) ตัวอย่างเช่น ดินเค็มมีแนวโน้มสัมพันธ์กับธาตุที่ได้รับอิทธิพลจากน้ำทะเล เช่น Na และ Mg ขณะที่ดินลูกรังสัมพันธ์กับธาตุจากวัสดุต้นกำเนิดหิน เช่น Fe และ Mn ผลการวิเคราะห์ Heatmap และ HCA ยังแสดงรูปแบบการจัดกลุ่มของตัวอย่างที่สอดคล้องกัน โดยตัวอย่างที่มีองค์ประกอบธาตุคล้ายคลึงกันถูกจัดอยู่ในคลัสเตอร์เดียวกัน สะท้อนถึงความแตกต่างขององค์ประกอบธาตุระหว่างพื้นที่ศึกษา และสนับสนุนผลการศึกษาก่อนหน้าที่ระบุว่าการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุร่วมกับสถิติพหุตัวแปรสามารถใช้ในการจำแนกและเชื่อมโยงแหล่งกำเนิดดินในงานนิติวิทยาศาสตร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Saferstein, 2018; Ruffell & Dawson, 2011)

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของดินที่ติดจากพื้นรองเท้าด้วยเทคนิค ICP-MS และประเมินศักยภาพในการจำแนกแหล่งกำเนิดเพื่อประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ ผลการวิเคราะห์พบว่าธาตุหลายชนิดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างประเภทดิน และการวิเคราะห์เชิงพหุตัวแปรโดย PCA สามารถจำแนกกลุ่มตัวอย่างได้อย่างชัดเจน โดยสอดคล้องกับผลจาก Heatmap และ HCA ความแตกต่างของลักษณะเชิงองค์ประกอบของธาตุสะท้อนถึงคุณลักษณะทางธรณีเคมีที่จำเพาะของดินแต่ละแหล่งกำเนิด และแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนการเปรียบเทียบและเชื่อมโยงหลักฐานในบริบททางนิติวิทยาศาสตร์

ข้อจำกัดของงานวิจัย

การศึกษานี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ โดยจำนวนและพื้นที่ของตัวอย่างดินที่ศึกษาอาจยังไม่ครอบคลุมความหลากหลายของลักษณะดินในวงกว้าง นอกจากนี้ ปัจจัยด้านสภาพแวดล้อม เช่น ความชื้น สภาพอากาศ และกิจกรรมของมนุษย์ อาจส่งผลต่อองค์ประกอบธาตุของดินและการยึดติดกับพื้นรองเท้า ซึ่งอาจทำให้เกิดความแปรผันของข้อมูลได้ อีกทั้งการศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค ICP-MS เป็นหลัก จึงอาจยังไม่ครอบคลุมข้อมูลด้านลักษณะทางกายภาพหรือองค์ประกอบแร่ของดินที่อาจมีส่วนช่วยในการจำแนกแหล่งกำเนิดเพิ่มเติม

ข้อเสนอแนะเพื่อการศึกษาในอนาคต

การศึกษาในอนาคตควรเพิ่มจำนวนและความหลากหลายของพื้นที่เก็บตัวอย่าง เพื่อให้ครอบคลุมลักษณะดินที่แตกต่างกันมากขึ้น รวมทั้งพิจารณาปัจจัยด้านสภาพแวดล้อมที่อาจส่งผลต่อการยึดติดของดินกับพื้นรองเท้า นอกจากนี้ การผสมผสานการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุร่วมกับข้อมูลด้านลักษณะทาง

กายภาพหรือแร่ประกอบของดิน อาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจำแนกและเชื่อมโยงแหล่งกำเนิดของตัวอย่างดินในงานนิติวิทยาศาสตร์ได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

Dawson, L. A., & Hillier, S. (2010). Measurement of soil characteristics for forensic applications. *Surface and Interface Analysis,* 42(5), 363-377. https://doi.org/10.1002/sia.3247.

Federal Bureau of Investigation. (2019). *Forensic geology and soil examination in crime investigation.* Federal Bureau of Investigation Laboratory.

Geological Society of London. (2012). *Forensic geoscience: Principles, techniques and applications.* Geological Society Special Publications.

Houck, M. M., & Siegel, J. A. (2015). *Fundamentals of forensic science.* (3rd ed.). Academic Press.

International Union of Pure and Applied Chemistry. (2014). *Compendium of analytical nomenclature (the Orange Book).* IUPAC.

Roux, C., Weyermann, C., & Esseiva, P. (2008). The transfer and persistence of trace evidence: A forensic perspective. *Forensic Science International,* 175(1), 1–7. https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.04.020.

Sugita, R., & Marumo, Y. (2001). Screening of soil evidence by ICP-AES and ICP-MS for forensic comparison. *Forensic Science International,* 119(1), 1–7. https://doi.org/10.1016/S0379-0738(00)00369-5.

Thompson, M., Ellison, S. L. R., & Wood, R. (2002). Harmonized guidelines for single-laboratory validation of methods of analysis. *Pure and Applied Chemistry,* 74(5), 835–855. https://doi.org/10.1351/pac200274050835.