

การตรวจจับน้ำมันเบนซินในซากเพลิงไหม้โดย SPME-GC-MS: การประเมินช่วงเวลาการเก็บตัวอย่าง Gasoline Detection in Fire Debris Using SPME-GC-MS: Evaluating the Sampling Time Window

ธัญญา ศูนย์คุ้ม¹ และ ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง^{2*}

Thananya Soonkum¹ and Sirirat Choosakoonkriang^{2*}

¹สาขานิติวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ประเทศไทย

²ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร ประเทศไทย

¹Forensic Science Program, Faculty of Science, Silpakorn University, Thailand

²Department of Chemistry, Faculty of Science, Silpakorn University, Thailand

*E-mail: sirath157@gmail.com Tel. (+66)876677041

(Received 22/09/2025, Revised 06/05/2026, Accepted 22/05/2026)

บทคัดย่อ

การลอบวางเพลิงเป็นอาชญากรรมร้ายแรงที่ร้ายแรง การเก็บหลักฐานทางกายภาพจากซากเพลิงไหม้เป็นเรื่องยาก น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงที่มักถูกใช้ในคดีลอบวางเพลิง งานวิจัยนี้ศึกษาการตรวจยืนยันน้ำมันเบนซินในซากเพลิงไหม้และระยะเวลาที่สามารถเก็บตัวอย่างได้ การทดลองนำตัวอย่างกองผ้าขนาด 20 × 20 × 15 ซม. มาราดด้วยน้ำมันเบนซิน 1 ลิตร จุดไฟปล่อยให้ไหม้อย่างอิสระประมาณ 30 นาที แล้วดับด้วยน้ำ ทำการเก็บตัวอย่างซากเพลิงไหม้ขนาด 1 × 1 ซม. เก็บในขวด Headspace ขนาด 20 มล. นำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโซลิคเฟสไมโครเอ็กซ์แทรกชัน-แก๊สโครมาโตกราฟีควบคู่แมสสเปกโตรเมตรี (SPME-GC-MS) ผลการตรวจสอบ จากโครมาโทแกรมของการวิเคราะห์ไอออน (Ion Chromatogram) พบว่าสามารถระบุว่าเป็นน้ำมันเบนซินได้จากพีคของ Heptane, Toluene, Octane, Ethylbenzene, Xylenes, Benzene derivatives และ Naphthalene และพบว่าปริมาณไอของน้ำมันเบนซินที่ตรวจพบได้ชัดเจนในช่วง 1-3 ชั่วโมงแรก (ร้อยละสารตกค้างสัมพัทธ์ 100-30.17) ภายหลังไฟดับ และยังสามารถตรวจพบได้ถึง 72 ชั่วโมง (ร้อยละสารตกค้างสัมพัทธ์ 16.82) การพัฒนานี้สามารถประยุกต์ใช้ในการตรวจหาสารตกค้างของน้ำมันเบนซินบนซากเผาไหม้ในคดีลอบวางเพลิงได้อย่างมีประสิทธิภาพได้

คำสำคัญ: เทคนิคโซลิคเฟสไมโครเอ็กซ์แทรกชัน-แก๊สโครมาโตกราฟีควบคู่แมสสเปกโตรเมตรี น้ำมันเบนซิน ซากเพลิงไหม้ นิติวิทยาศาสตร์

Abstract

Arson is a severe criminal act that often results in significant property damage and poses challenges for forensic investigation, particularly in the recovery of physical evidence from fire debris. Gasoline is commonly used as an ignitable liquid in arson cases. This study aimed to investigate the detection of gasoline residues in burned materials and the temporal window for sample collection. Fabric piles (20 × 20 × 15 cm) were soaked with 1 liter of gasoline and ignited, allowing uncontrolled burning for approximately 30 minutes before extinguishment with water. Post-fire debris samples (1 × 1 cm) were collected in 20 mL headspace vials and analyzed using solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry (SPME-GC-MS). Ion chromatogram analysis revealed that gasoline could be identified based on the presence of characteristic peaks, including heptane, toluene, octane, ethylbenzene, xylenes, benzene derivatives, and naphthalene. Gasoline vapors were most abundant within the first 1-3 hours after extinguishment (100-30.17 % Relative Residues) but remained detectable up to 72 hours post-fire (16.82 % Relative Residues).

This method demonstrates effective applicability for detecting residual gasoline in fire debris, providing a reliable approach for forensic arson investigations.

Keywords: SPME–GC–MS, Gasoline, Fire debris, Accelerants, Forensic science

1. บทนำ

การวางเพลิง (Arson) ถือเป็นอาชญากรรมร้ายแรงที่สร้างความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน และสิ่งแวดล้อม อีกทั้งยังอาจนำไปสู่การบาดเจ็บรุนแรงหรือการเสียชีวิตได้ (Lentini, 2012) วิธีการที่ผู้ก่อเหตุใช้กันอย่างแพร่หลายคือการเติมสารเร่งไฟ (ignitable liquid accelerants) ลงในเชื้อเพลิงหลักเพื่อเพิ่มอัตราการลุกไหม้และความรุนแรงของเพลิง สารเร่งไฟที่พบได้บ่อยได้แก่ น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซล น้ำมันก๊าด น้ำมันเตา น้ำมันไฟแช็ก และเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์ในรูปแข็ง เป็นต้น โดยเฉพาะน้ำมันเบนซินซึ่งนิยมใช้มากที่สุดเนื่องจากมีราคาถูก เข้าถึงได้ง่าย และมีคุณสมบัติในการลุกไหม้สูง (Stauffer et al., 2008)

อย่างไรก็ตาม การตรวจพิสูจน์ร่องรอยของสารเร่งไฟในซากวัตถุพยานหลังเพลิงไหม้มีความซับซ้อนสูง สารเร่งไฟเหล่านี้มีแนวโน้มที่จะสลายตัวหรือระเหยอย่างรวดเร็วภายใต้อุณหภูมิสูง รวมถึงอาจสูญหายบางส่วนหรือเจือจางลงจากกระบวนการดับเพลิง เช่น การใช้น้ำหรือสารเคมีดับเพลิง การตรวจพบสารตกค้าง (trace level) จึงถือเป็นความท้าทายสำคัญสำหรับนักนิติวิทยาศาสตร์ เนื่องจากสารประกอบที่เหลือมักมีปริมาณน้อย ผสมปะปนอยู่ในวัสดุหลากหลายชนิด และอยู่ในสถานะที่ซับซ้อนจากการเผาไหม้ (Martín-Alberca et al., 2016; Sandercock, 2008)

เพื่อรองรับการพิสูจน์ทางนิติวิทยาศาสตร์ มาตรฐานสากล เช่น ASTM E1412 และ ASTM E1618 ได้รับการกำหนดให้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ร่องรอยสารไวไฟตกค้าง โดยเน้นการใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีควบคู่แมสสเปกโตรเมตรี (Gas Chromatography–Mass Spectrometry: GC–MS) ซึ่งสามารถแยกสารประกอบเชิงซ้อนและยืนยันเอกลักษณ์ทางโครงสร้างได้อย่างแม่นยำ (ASTM International, 2018; ASTM International, 2019) งานวิจัยจำนวนมากยืนยันว่า GC–MS เป็นเครื่องมือหลักที่เชื่อถือได้ในการตรวจวิเคราะห์สารเร่งไฟในซากวัตถุพยานจากที่เกิดเหตุ (Lentini, 2012; Stauffer et al., 2008)

นอกจาก GC–MS แล้ว เทคนิคการเตรียมตัวอย่างยังมีบทบาท เทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอ็กซ์แทรกชัน (Solid-Phase Microextraction: SPME) และไดนามิกเฮดสเปซ (Dynamic headspace) ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถสกัดสารระเหยที่มีอยู่เพียงเล็กน้อยออกจากวัสดุพยานได้ (Dolan, 2008; Martín-Alberca et al., 2016) โดย SPME ได้รับการบรรจุไว้ในมาตรฐาน ASTM เพื่อใช้ในการตรวจสอบซากเพลิงไหม้ (ASTM International, 2018) จุดเด่นของ SPME คือการใช้เส้นใยดูดซับ (Fiber) ที่สามารถเก็บสารระเหยได้โดยไม่ทำลายตัวอย่างมากนัก ทำให้ยังสามารถนำวัตถุพยานไปตรวจยืนยันในขั้นตอนถัดไปได้ (Dolan, 2008)

งานวิจัยระดับนานาชาติได้พัฒนาวิธีการและวัสดุใหม่ ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจพิสูจน์ เช่น Ferreiro-González et al. (2015) ได้เสนอการใช้เทคนิค headspace mass spectrometry (HS–MS) ในการตรวจหาสารเร่งไฟจากซากเพลิงไหม้ ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับตัวอย่างที่มีสารระเหยของเชื้อเพลิง เช่น gasoline และ petroleum products ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีข้อดีคือใช้เวลาเตรียมตัวอย่างสั้น ลดการใช้สารเคมี และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อีกทั้ง Fettig et al. (2014) ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการใช้เส้นใย SPME ชนิด DVB/CAR/PDMS สำหรับการเก็บไอระเหยของน้ำมันเบนซินและดีเซล โดยพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมในการตรวจวัดน้ำมันเบนซินคืออุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที ขณะที่น้ำมันดีเซลต้องใช้เงื่อนไขอุณหภูมิสูงกว่าเพื่อเพิ่มความไวในการตรวจวัด นอกจากนี้ Dhabbah et al. (2014) ได้แสดงให้เห็นว่าน้ำมันเบนซินสามารถตรวจพบได้บนพรมที่มีความหนา 5 มม. นานถึง 5 ชั่วโมงหลังเพลิงไหม้ แม้จะมีปริมาณน้อยกว่า 200 ไมโครลิตร และตรวจพบได้ในวัสดุหลายชนิด เช่น ไม้ ผ้าไหม ผ้าฝ้าย และโพลีเอสเตอร์ อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปเกิน 6 ชั่วโมง สารตกค้างจะระเหยจนไม่สามารถตรวจพบได้ (Dhabbah et al., 2014) ในกรณีของวัสดุสะสมเชื้อเพลิง การวิเคราะห์ร่องรอยสารเร่งไฟมักเกี่ยวข้องกับกระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) และการสลายตัวของวัสดุอินทรีย์ เช่น ไม้ ผ้าฝ้าย และพรม ซึ่งภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนจะเกิดการแตกตัวให้ผลิตภัณฑ์ทั้งในรูปก๊าซ ของเหลว และของแข็งตกค้าง องค์ประกอบที่เกิดขึ้นสามารถนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค

แก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรเมตรี (GC-MS) ตามมาตรฐาน ASTM E1618 (ASTM International, 2019) และการจำแนกชนิดของสารเร่งไฟอาศัยการเปรียบเทียบรูปแบบโครมาโทแกรมและสเปกตรัมกับฐานข้อมูล Ignitable Liquids Reference Collection (ILRC) ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการระบุชนิดของเชื้อเพลิงในตัวอย่างซากเพลิงไหม้ (Abel et al., 2018; Martin-Alberca et al., 2016)

สำหรับประเทศไทย งานวิจัยด้านการตรวจพิสูจน์เชื้อเพลิงตกค้างเริ่มมีความก้าวหน้า เช่น Aungsittipoonporn et al. (2021) ศึกษาการใช้เทคนิค SPME-GC-MS เพื่อตรวจหาน้ำมันเบนซินบนวัสดุที่ผ่านการเผาไหม้ พบว่าสามารถยืนยันองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ Soonkum and Choosakoonkriang (2025) ยังได้รายงานผลการศึกษาการตรวจหาสารตกค้างของเชื้อเพลิงแข็งชนิดแอลกอฮอล์ โดยใช้เทคนิค SPME-GC-MS ซึ่งยืนยันว่าร่องรอยสารประกอบ เช่น Ethanol และ Isopropanol ยังคงตรวจพบได้หลังการดับไฟด้วยน้ำเป็นเวลาหลายชั่วโมง

จากรายงานการวิจัยทั้งในและต่างประเทศ สะท้อนให้เห็นว่า แม้กระบวนการดับเพลิงด้วยน้ำหรือสารเคมีอาจลดทอนปริมาณสารตกค้าง แต่ไม่สามารถทำลายร่องรอยของสารเร่งไฟได้ทั้งหมด การศึกษาเกี่ยวกับอัตราการลดลงของสารเหล่านี้ภายหลังการดับเพลิงจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการพัฒนาวิธีการตรวจวิเคราะห์ เพื่อเพิ่มความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของหลักฐานในคดีวางเพลิง และสนับสนุนกระบวนการยุติธรรมในภาพรวม ดังนั้น งานวิจัยนี้มีการศึกษาผลของการดับเพลิงด้วยน้ำต่อความสามารถในการตรวจพบร่องรอยน้ำมันเบนซินในซากวัตถุพยาน จึงมีความสำคัญทั้งในเชิงทฤษฎีและการประยุกต์ใช้ทางนิติวิทยาศาสตร์ โดยมีวัตถุประสงค์ของการทำวิจัยในครั้งนี้คือ ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์น้ำมันเบนซินที่ตกค้างบนวัสดุที่ผ่านการเผาไหม้ โดยใช้เทคนิค Solid-Phase Microextraction – Gas Chromatography–Mass Spectrometry (SPME-GC-MS) และ ศึกษาระยะเวลาการคงอยู่ของน้ำมันเบนซินที่ตกค้างบนวัสดุที่ผ่านการเผาไหม้ด้วยเทคนิค SPME-GC-MS

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมและวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำมันเบนซิน

ใช้ไมโครปิเปตตุน้ำมันเบนซินปริมาตร 50 ไมโครลิตร ใส่ลงในขวดตัวอย่างแก้วชนิด Headspace (HS vial) ขนาด 20 มิลลิลิตร จากนั้นนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Solid-Phase Microextraction Gas Chromatography–Mass Spectrometry (SPME-GC-MS) โดยใช้อุปกรณ์และเงื่อนไขการทดลองดังนี้ การศึกษาทดลองครั้งนี้ใช้เครื่อง Gas Chromatography ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 7890A เชื่อมต่อกับเครื่องตรวจวัดมวลสาร (Mass Spectrometer) ยี่ห้อ Agilent Technologies รุ่น 5977B คอลัมน์ที่ใช้คือ HP-5MS; Methyl Siloxane Capillary Column ขนาด 30.0 m x 500 μ m x 0.32 mm ใช้ก๊าซฮีเลียมเป็นก๊าซตัวพาที่อัตราการไหล 1 มิลลิลิตร/นาที กำหนดอัตราการแบ่งตัวอย่าง (Split ratio) ที่ 100:1

สภาวะที่ใช้ในการทดลองโดยการฉีดตัวอย่าง (Injector) ถูกควบคุมที่อุณหภูมิ 220 °C และตัวตรวจวัดมวลสารที่อุณหภูมิ 230 °C โดยใช้ช่วงการสแกนมวลระหว่าง 45–300 amu โปรแกรมอุณหภูมิเตาเผาของเครื่อง Gas Chromatograph กำหนดดังนี้: เริ่มต้นที่ 40 °C คงที่ 0.8 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 50 °C ด้วยอัตรา 10 °C/นาที และคงที่ 0.4 นาที ต่อมาปรับเพิ่มเป็น 100 °C ด้วยอัตรา 30 °C/นาที และคงที่ 0.1 นาที แล้วเพิ่มเป็น 180 °C ที่อัตรา 90 °C/นาที และต่อเนื่องจนถึง 220 °C ด้วยอัตรา 120 °C/นาที ก่อนจะคงที่ที่ 220 °C เป็นเวลา 5 นาที สำหรับสภาวะของการสกัดด้วย SPME มีการ incubation ที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 20 นาที จากนั้นสกัดตัวอย่างด้วยไฟเบอร์นาน 20 นาที และปลดปล่อยสารเข้าสู่ระบบ GC-MS ด้วยเวลา 3 นาที

โครมาโทแกรมที่ได้จะถูกประมวลผลเพื่อตรวจหาและระบุสารประกอบต่าง ๆ ที่มีอยู่ในน้ำมันเบนซิน การระบุสารประกอบอาศัยการเปรียบเทียบค่ามวลและรูปแบบการแตกตัวของไอออนกับฐานข้อมูลมาตรฐาน NIST17 Mass Spectral Library และอ้างอิงกับ (ASTM International, 2019) การวิเคราะห์เน้นไปที่การตรวจหาสารประกอบไฮโดรคาร์บอนหลัก เช่น เบนซิน โทลูอีน เอทิลเบนซิน และไซโคลเฮกเซน เพื่อให้สามารถประเมินลักษณะทางเคมีของน้ำมันเบนซินตัวอย่างได้อย่างแม่นยำ สำหรับการแปลผลโครมาโทแกรม ใช้หลักการเปรียบเทียบ ลำดับการเกิดพีค (Retention time) และ โครงสร้างโมเลกุลของสารประกอบ กับข้อมูลของสารมาตรฐาน การตรวจสอบซ้ำหลายครั้ง (Replicate analysis) ถูกนำมาใช้เพื่อยืนยันความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์

2.2 การเตรียมน้ำมันเบนซินสำหรับสร้าง Calibration Curve

เตรียมสารละลายมาตรฐานของน้ำมันเบนซินในความเข้มข้นต่าง ๆ ปิเปตลงใน HS Vial ขนาด 20 mL แต่ละความเข้มข้นถูกกำหนดเพื่อให้ครอบคลุมช่วงที่คาดว่าจะพบในตัวอย่างซากสัตว์ที่ผ่านการเผาไหม้ ตามปริมาณน้ำมันเบนซินที่ใช้ดังนี้: 0, 1, 2.5, 7.5 และ 20 μL ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้น 0, 8, 20, 61, 161 และ 404 mmol ตามลำดับ จากนั้นนำสารละลายมาตรฐานที่เตรียมไว้มาวิเคราะห์โดยใช้ SPME-GC-MS โดยใช้สภาวะการทดลองเดียวกับกับข้างต้น เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบและสร้าง Calibration Curve ได้

2.3 การศึกษาการหาค่า Linear Retention Index (LRI) ขององค์ประกอบ (component X)

เพื่อระบุองค์ประกอบเชิงโครมาโทกราฟีและเปรียบเทียบกับสารอ้างอิง ได้ทำการเตรียมสารละลายมาตรฐาน alkanes ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนจำนวน 5–21 อะตอม ($\text{C}_5\text{--C}_{21}$) โดยปริมาณ 1 หยดถูกปิเปตใส่ใน HS Vial ขนาด 20 mL จากนั้นนำมาวิเคราะห์ด้วย SPME-GC-MS ภายใต้เงื่อนไขการทดลองข้างต้น ผลการวิเคราะห์ใช้ในการคำนวณ Linear Retention Index (LRI) ของสารประกอบที่ตรวจพบในตัวอย่างน้ำมันเบนซิน

2.4 การศึกษาเรื่องการคงอยู่ของน้ำมันเบนซินที่หลงเหลือบนซากเก่าหลังเผาไหม้

ตัวอย่างผ้าฝ้ายขนาด $20 \times 20 \times 15$ ซม. ถูกเตรียมและเติมน้ำมันเบนซินปริมาตร 1 L จากนั้นจุดไฟและปล่อยให้ไฟลุกเป็นเวลา 30 นาที หลังจากนั้นดับไฟด้วยน้ำจนแน่ใจว่าไฟดับสนิท ไม่มีประกายไฟหลงเหลือ (Figure 1)

ตัวอย่างผ้าฝ้ายขนาด 1×1 ซม. ถูกตักใส่ใน HS Vial ขนาด 20 mL นับเป็นเวลา 0 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างตามเวลาหลังดับไฟที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 18, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เพื่อศึกษาร่องรอยการคงอยู่ของน้ำมันเบนซินด้วย SPME-HS-GC-MS ต่อไปภายใต้สภาวะการทดลองข้างต้น

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

3.1 ผลการศึกษาการตรวจยืนยันหาน้ำมันเบนซินโดยเทคนิค SPME-GC-MS

เมื่อนำน้ำมันเบนซินปริมาตร 50 μL มาวิเคราะห์โดย SPME-GC-MS ผลการวิเคราะห์พบว่า โครมาโทแกรมของไอออน (Ion Chromatogram) แสดงพีคที่สอดคล้องกับองค์ประกอบสำคัญของน้ำมันเชื้อเพลิง (Figure 2) การระบุชนิดสารประกอบดำเนินการโดยเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลของ NIST17 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความเหมือนระหว่างแมสสเปกตรัมของสารตัวอย่างกับฐานข้อมูล (Quality) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 80 ซึ่งบ่งชี้ถึงความถูกต้องในการระบุสารประกอบที่ตรวจพบ (Stauffer et al., 2008) โดยสารประกอบหลักที่พบ ได้แก่ Heptane (m/z 100), Toluene (m/z 92), Octane (m/z 114), Ethylbenzene (m/z 106), p-Xylene (m/z 106), o-Xylene (m/z 106), Propylbenzene (m/z 91), 1,2,3-trimethylbenzene (m/z 120), 1,2,4-trimethylbenzene (m/z 120), 1,3-diethyl-5-methylbenzene (m/z 134), Naphthalene (m/z 128) และ 1-methylnaphthalene (m/z 142) โดยมีค่า Retention Time สม่ำเสมอและค่า Resolution ≥ 1.5 แสดงถึงประสิทธิภาพการแยกสารที่ดี (ตารางที่ 1) ซึ่งสอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM E1618-19 (ASTM, 2019) และรายงานก่อนหน้า (Abel et al., 2018)

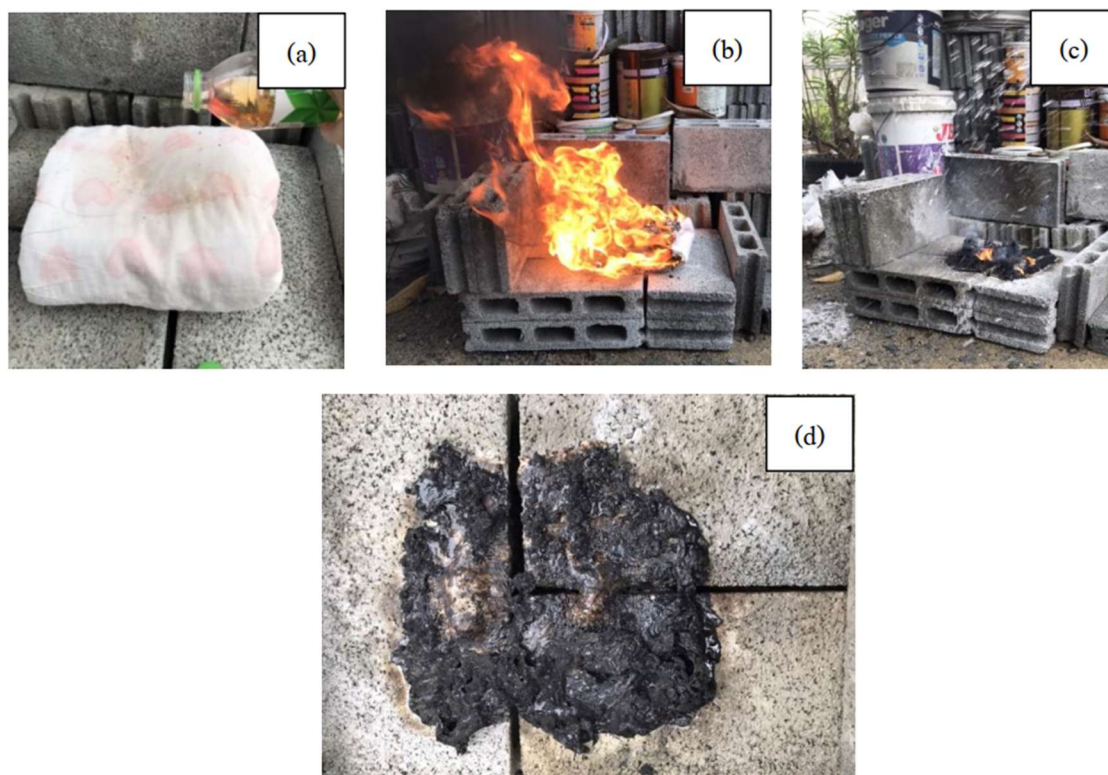


Figure 1 Experimental workflow for verifying the persistence of gasoline residues on fire-exposed materials, shown in four panels: (a) a 20 × 20 × 15 cm pile of fabric soaked with gasoline; (b) ignition of the pile and sustained burning for 30 min; (c) extinguishment with water; (d) sampling locations of the ash pile after extinguishment

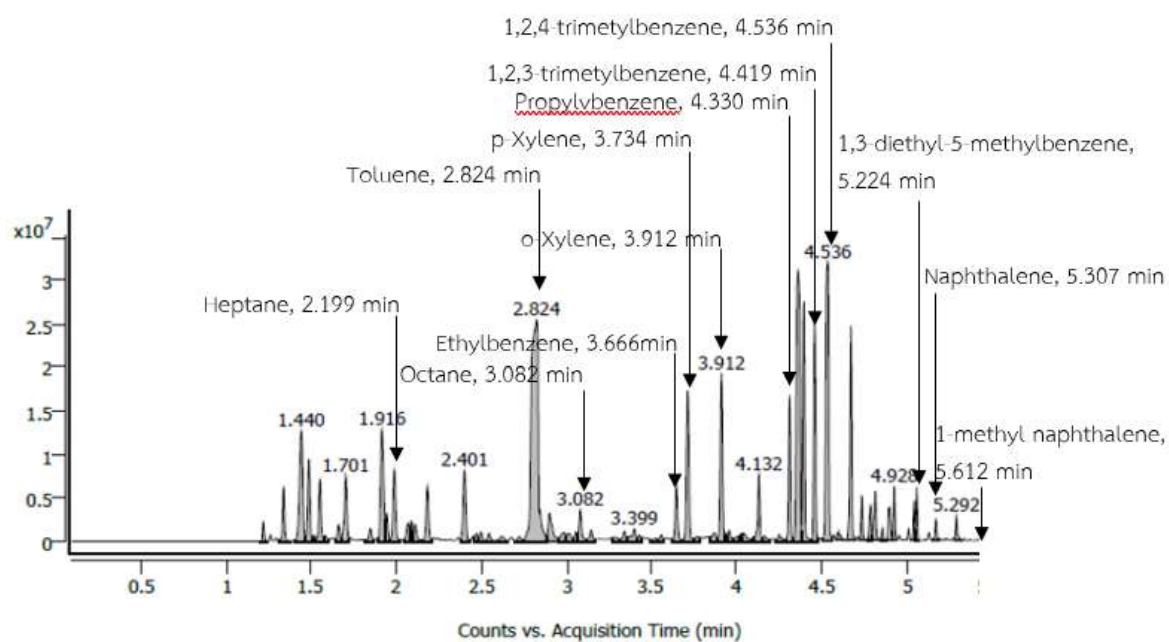
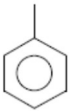
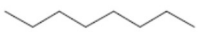
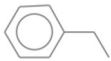
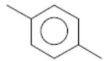
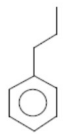
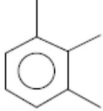
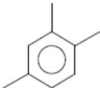
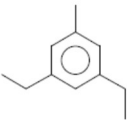
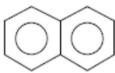
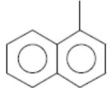


Figure 2 Ion chromatogram showing the characteristic peaks of gasoline components (injection volume: 1 μ L)

Table 1 Retention time profile of the principal components in gasoline.

Compound name	Chemical structure	m/z	Retention time (min) (n = 6, SD = ±0.10)	Qual*	Alkane index**	
					LRI	LRI _{ref}
Heptane		100	2.199	86	636	700
Toluene		92	2.824	91	716	751
Octane		114	3.082	84	783	800
Ethylbenzene		106	3.666	93	1370	852
p-Xylene		106	3.734	97	1551	870
o-Xylene		106	3.932	97	899	897
Propylbenzene		120	4.330	93	1317	947
1,2,3-trimethylbenzene		120	4.419	95	1007	1015
1,2,4-trimethylbenzene		120	4.536	87	1007	986
1,3-diethyl-5-methylbenzene		148	5.224	87	1629	1151
Naphthalene		128	5.307	95	1214	1173
1-methyl naphthalene		142	5.615	96	1378	1296

Note: * Qual indicates the spectral match similarity against the NIST17 database.

** Alkane Retention Index

นอกจากนี้จากการตรวจสอบตัวอย่างวัสดุและสารเคมีที่ใช้ในงานทดลอง เช่น SPME fiber, เสื้อผ้า, และขวดเก็บตัวอย่าง พบว่า ไม่ปรากฏพีคบริเวณใน Ion Chromatogram แสดงว่าไม่มีสารอื่นรบกวนการวิเคราะห์น้ำมันเบนซิน จากการศึกษาปริมาณต่ำสุดของน้ำมันเบนซินที่สามารถตรวจพบด้วย SPME-GC-MS พบว่า LOD = 0.060 mmol และ LOQ = 0.604 mmol ซึ่งแสดงถึงความไวของเทคนิคในการตรวจสอบร่องรอยน้ำมันเบนซินในซากวัสดุ (Fettig et al., 2014; Gambrel et al., 2008)

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำมันเบนซินใช้วิธี Calibration Curve โดยให้แกน y เป็นพื้นที่ใต้พีคของสารเป้าหมาย ได้แก่ Ethylbenzene, p-Xylene, o-Xylene และพื้นที่รวมของ 12 พีค (Summary of peak) ส่วนแกน x เป็นค่าความเข้มข้นระดับ 0, 8, 20, 61, 161 และ 404 mmol ผลได้สมการเส้นตรงและค่าสหสัมพันธ์ความเป็นเส้นตรง (R^2) ดัง Table 2

Table 2 Regression equations and R^2 values obtained from the quantitative analysis of gasoline.

Compound	Linear Equation	R^2
Heptane	$y = 217313x + 7E+06$	0.9195
Toluene	$y = 53009x + 3E+07$	0.9149
Octane	$y = 14516x + 8E+06$	0.9295
Ethylbenzene	$y = 201519x + 2E+06$	0.9974
C2-Alkylbenzene (p-Xylene)	$y = 577701x - 2E+06$	0.9993
C2-Alkylbenzene (o-Xylene)	$y = 646779x + 938887$	0.9991
Propylbenzene	$y = 47180x + 5E+07$	0.9068
1,2,3-trimethylbenzene	$y = 229854x + 4E+08$	0.9408
1,2,4-trimethylbenzene	$y = 2E+06x + 7E+06$	0.9398
1,3-diethyl-5-methylbenzene	$y = 2E+06x + 7E+06$	0.9756
Naphthalene	$y = 2E+06x - 3E+06$	0.9945
1-methyl naphthalene	$y = 1E+06x + 4E+06$	0.9658
Summary of peak	$y = 604938 - 3E+06$	0.9995

ค่า R^2 ที่สูงใกล้ 1 แสดงถึงความถูกต้องของสมการเส้นตรงสำหรับการคำนวณปริมาณน้ำมันเบนซินที่เหลืออยู่ในตัวอย่างจริง (Furton et al., 2000; ASTM International, 2018) ดังนั้นจึงเลือกใช้สมการเส้นตรง ผลรวมของพื้นที่ใต้พีคทั้งหมดเพื่อใช้ในการคำนวณเชิงปริมาณที่หลงเหลือของน้ำมันเบนซินในซากเก้าอี้หลังเพลิงไหม้

การศึกษานี้ได้เก็บตัวอย่างเก้าอี้หลังเพลิงไหม้ขนาด 1×1 เซนติเมตร โดยเก็บตัวอย่างซากเพลิงไหม้ที่ และตามช่วงเวลา 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 18, 24, 48 และ 72 ชั่วโมงหลังดับไฟ ผลจากการวิเคราะห์ Total Ion Chromatograms (TIC) โดยใช้สารสกัดด้วย SPME พบว่า แม้ว่าพีคที่บ่งชี้ว่าเป็นเบนซินจะมีปริมาณสัมพันธ์ลดลงตามเวลา ดังแสดงใน Figure 3 แต่สาร Heptane และ Ethylbenzene ยังคงสามารถตรวจพบได้ชัดเจนถึง 72 ชั่วโมง หลังดับไฟ โดยร้อยละ สารตกค้างสัมพันธ์อยู่ที่

ประมาณ 16.83% หลัง 72 ชั่วโมง ดังแสดงใน Table 3 ซึ่งอธิบายได้ด้วยคุณสมบัติการระเหยสูง (high volatility) ของน้ำมันเบนซิน และความสามารถในการดูดซับ (sorption ability) ของเนื้อผ้า โดยลักษณะการลดลงของสารตกค้างเป็นไปอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรกหลังดับไฟ ซึ่งผลการทดลองที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เคยรายงานที่ระบุว่า สารระเหยง่าย เช่น alkane สายสั้น และสาร aromatic บางชนิด ในน้ำมันเบนซิน จะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงหรือถูกดูดซับในวัสดุได้มาก จะคงอยู่ได้นานกว่า (Sandercock, 2008; Stauffer et al., 2008; Turner et al., 2018)

ผลการวิเคราะห์ทางเคมีที่สามารถตรวจพบสารสำคัญจากน้ำมันเบนซินได้ถึง 72 ชั่วโมงหลังจากการดับไฟด้วยน้ำนั้น ยังแสดงให้เห็นถึงความไวและความเสถียรของเทคนิค SPME-GC-MS ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Kilic et al. (2024) ที่ยืนยันว่าสามารถตรวจพบสารตกค้างของน้ำมันเบนซินบนวัสดุพรมและผ้าเฟอร์นิเจอร์ได้ยาวนานถึง 30–60 วัน แม้จะมีการดับไฟด้วยน้ำหรือสารเคมีก็ตาม การค้นพบนี้สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของวิธีการดังกล่าวในการนำมาใช้ในการตรวจพิสูจน์ร่องรอยเชื้อเพลิงในงานนิติวิทยาศาสตร์ไฟไหม้จริง

นอกจากนี้ พฤติกรรมการลดลงของสารเร่งไฟอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรกหลังการดับไฟที่พบในการศึกษาครั้งนี้ ยังสอดคล้องกับแนวโน้มที่รายงานในวรรณกรรมด้าน fire debris analysis ซึ่งทดสอบบนวัสดุในครัวเรือน เช่น ผ้าผ้าย กระดาษแข็ง และพรม พบว่าสารเร่งไฟที่มีความระเหยสูงมักจะลดลงในช่วงต้นอย่างรวดเร็ว ก่อนที่จะคงเหลือสารในระดับต่ำที่ยังสามารถตรวจพบได้อย่างต่อเนื่อง การสอดคล้องนี้จึงยืนยันความถูกต้องเชิงทฤษฎีของผลที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ (Sandercock, 2008; Stauffer et al., 2008; Turner et al., 2018)

อีกประเด็นหนึ่งที่ควรกล่าวถึงคือบทบาทของวัสดุรองรับต่อการคงอยู่ของสารเร่งไฟ งานวิจัยที่ผ่านมา เช่น Dhabbah et al. (2014) และ Kilic et al. (2024) พบว่าวัสดุที่มีโครงสร้างหนาหรือเป็นวัสดุสังเคราะห์ เช่น พรมและเบาะ มักจะสามารถเก็บสารเร่งไฟไว้ได้ในระยะเวลาที่ยาวนานกว่าวัสดุธรรมชาติหรือผ้าบาง ๆ ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้ก็มีแนวโน้มสอดคล้องกัน โดยตัวอย่างผ้าที่ใช้แม้จะมีโครงสร้างไม่หนามาก แต่ก็ยังคงมีสารตกค้างตรวจพบได้ในระยะเวลานานหลังการเผาไหม้และการดับไฟด้วยน้ำ

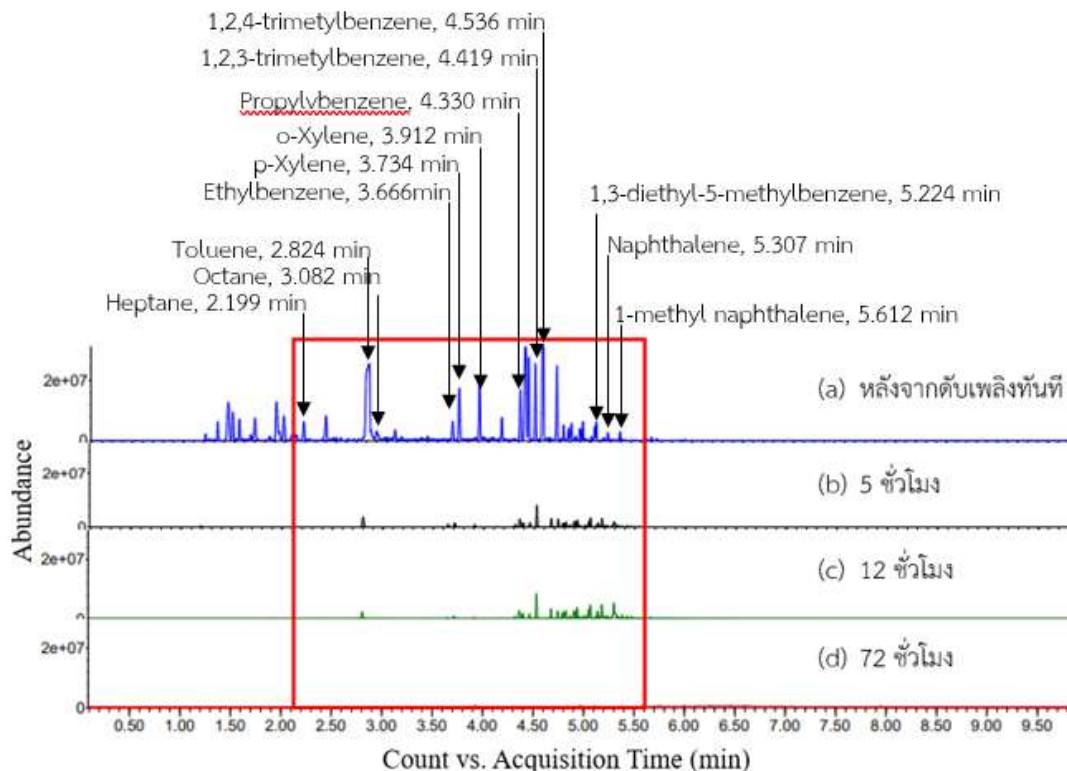


Figure 3. Comparison of ion chromatograms of gasoline residues remaining on fire-exposed materials after extinguishment with water: (a) immediately after fire suppression; (b) after 5 h; (c) after 12 h; (d) after 72 h.

Table 3 Amounts of gasoline residues remaining on fire-exposed materials.

Time after extinguishment	Mean (mmol)	Standard deviation (SD)	% Relative Residues
Immediately	54.22	1.59	100.00
1 h	33.29	0.42	61.39
2 h	16.65	0.09	30.71
3 h	16.36	0.08	30.17
4 h	14.20	0.03	26.19
5 h	14.16	0.06	26.12
6 h	14.03	0.04	25.88
7 h	13.28	0.39	24.50
8 h	12.32	0.29	22.72
9 h	11.96	0.05	22.06
10 h	11.41	0.22	21.04
12 h	10.80	0.13	19.92
18 h	9.63	0.07	17.77
24 h	9.52	0.03	17.56
48 h	9.13	0.02	16.85
72 h	9.12	0.04	16.82

4. สรุป

การศึกษานี้มุ่งประเมินประสิทธิภาพของเทคนิค SPME-GC-MS ในการตรวจวิเคราะห์น้ำมันเบนซินที่ตกค้างบนวัสดุผ้าหลังการเผาไหม้และการดับไฟด้วยน้ำ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า เทคนิคดังกล่าวสามารถตรวจสอบสารประกอบสำคัญของน้ำมันเบนซิน เช่น Heptane, Ethylbenzene, Toluene และ Xylenes ได้อย่างชัดเจน โดยมีค่า Retention Time และ Quality Match (Qual $\geq$ 80) สอดคล้องกับมาตรฐาน ASTM E1618-19 และฐานข้อมูล NIST17 (ASTM International, 2019; Stauffer et al., 2003; Furton et al., 2000) ซึ่งสะท้อนถึงความถูกต้องและความแม่นยำของวิธีการ ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าสารเร่งไฟบนผ้ายังคงตรวจพบได้ยาวนานถึง 72 ชั่วโมงหลังการดับไฟ โดยเฉพาะ Heptane และ Ethylbenzene แม้ว่าจะมีการลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 3 ชั่วโมงแรก ถึงแม้ว่า Heptane (C-7) ซึ่งเป็น Hydrocarbon สายสั้น และระเหยไวกว่า Octane (C-8) หากพิจารณาจาก ไอออน (Ion Chromatogram) พื้นที่ใต้พีคของ Heptane 2.199 นาที สูงเป็นประมาณ 2 เท่าของ Octane 3.099 นาที จึงสามารถหลงเหลือได้ที่ 72 ชม การคงอยู่ของสารตกค้างดังกล่าวสะท้อนถึงความสามารถของเนื้อผ้าในการดูดซับสารและความไวของเทคนิค SPME-GC-MS ในการตรวจสอบร่องรอยสารเร่งไฟบนวัสดุจริง (Sandercock, 2008; Turner et al., 2018; Kilic et al., 2024)

นอกจากนี้ การศึกษายังชี้ให้เห็นถึงบทบาทของวัสดุรองรับ (Substrate) ต่อการคงอยู่ของสารเร่งไฟ โดยวัสดุที่มีความหนาหรือเป็นวัสดุสังเคราะห์สามารถเก็บสารตกค้างได้นานกว่าวัสดุบางชนิด ข้อจำกัดที่พบในการตีความผล ได้แก่ การสูญเสียสารระเหยสูงก่อนเก็บตัวอย่าง ผลกระทบจาก matrix effects และสภาพแวดล้อม เช่น อุณหภูมิ ความชื้น และการสัมผัสแสง (Dhabbah et al., 2014; Sandercock, 2008; Furton et al., 2000) โดยสรุป เทคนิค SPME-GC-MS เป็นเครื่องมือที่มีศักยภาพสูงสำหรับการตรวจสอบสารเร่งไฟในซากเพลิงไหม้ ทั้งในด้านความไว ความถูกต้อง และความคงทนของสัญญาณสารตกค้าง ดังนั้น วิธีการนี้จึงเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในงานนิติวิทยาศาสตร์ เพื่อตรวจพิสูจน์ร่องรอยน้ำมันเบนซินในเหตุเพลิงไหม้และสนับสนุนการวิเคราะห์ทางกฎหมายอย่างมีมาตรฐาน

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบพระคุณศูนย์เครื่องมือวิจัยเพื่อความเป็นเลิศ งานเครื่องมือกลาง กองบริหารงานวิจัย สำนักงานอธิการบดี มหาวิทยาลัยมหิดล (Mahidol University Frontier Research Facility : MU-FRF) สำหรับการสนับสนุนอุปกรณ์วิเคราะห์ GC-MS ซึ่งช่วยให้การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณ “ทุนอุดหนุนการวิจัยโครงการหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขานิติวิทยาศาสตร์ จากกองทุนพัฒนามหาวิทยาลัยศิลปากรในส่วนของคณะวิทยาศาสตร์ สาขานิติวิทยาศาสตร์” จากคณะ วิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร สัญญาเลขที่ SC-FS-2568-01

6. เอกสารอ้างอิง

- Abel, R., Zadora, G., Sandercock, P. M. L., & Harynuk, J. J. (2018). Modern instrumental limits of identification of ignitable liquids in forensic fire debris analysis. *Separations*, 5(4), 58.
- Aungsittipoonporn, T., Timachai, E., & Fongsupa, S. (2021). Application of adsorbents in sample preparation for analysis of gasoline by the headspace–gas chromatography–mass spectrometry technique. *Journal of Criminology and Forensic Science*, 7(2), 57–74.
- ASTM International. (2018). *ASTM E1412-16: Standard practice for separation and concentration of ignitable liquid residues from fire debris samples by passive headspace concentration with activated charcoal*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- ASTM International. (2019). *ASTM E1618-19: Standard test method for ignitable liquid residues in extracts from fire debris samples by gas chromatography–mass spectrometry*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Dhabbah, A. M., Al-Jaber, S. S., Al-Ghamdi, A. H., & Aqel, A. (2014). Determination of gasoline residues on carpets by SPME–GC–MS technique. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 6749–6756.
- Dolan, J. A. (2008). Forensic analysis of fire debris. In M. J. Bogusz (Ed.), *Handbook of analytical separations: Vol. 6. Forensic science* (pp. 873–922). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S1567-7192\(06\)06026-8](https://doi.org/10.1016/S1567-7192(06)06026-8)
- Ferreiro-González, M., Ayuso, J., Álvarez, J. A., Palma, M., & Barroso, C. G. (2015). Application of an HS–MS for the detection of ignitable liquids from fire debris. *Talanta*, 142, 150–156.
- Fettig, I., Krüger, S., Deubel, J. H., Werrel, M., Raspe, T., & Piechotta, C. (2014). Evaluation of a headspace solid-phase microextraction method for the analysis of ignitable liquids in fire debris. *Journal of Forensic Sciences*, 59(3), 743–749.
- Furton, K. G., Almirall, J. R., Bi, M., Wang, J., & Wu, L. (2000). Application of solid-phase microextraction to the recovery of explosives and ignitable liquid residues from forensic specimens. *Journal of Chromatography A*, 885, 419–432.
- Gambrel, A. K., & Reardon, M. R. (2008). Extraction, derivatization, and analysis of vegetable oils from fire debris. *Journal of Forensic Sciences*, 53(6), 1372–1380.
- Kilic, M. D., Yayla, M., & Mercan, S. (2024). Detection of gasoline residues on household materials up to 60 days: Comparison of two extinguishing methods. *Forensic Science International*, 364, 112222.
- Lentini, J. J. (2012). *Scientific protocols for fire investigation* (2nd ed.). CRC Press.
- Martín-Alberca, C., Ortega-Ojeda, F. E., & García-Ruiz, C. (2016). Analytical tools for the analysis of fire debris: A review (2008–2015). *Analytica Chimica Acta*, 928, 1–19.

- Sandercock, P. M. L. (2008). Fire investigation and ignitable liquid residue analysis—A review (2001–2007). *Forensic Science International*, 176(2–3), 93–110.
- Soonkum, T., & Choosakoonkriang, S. (2025). Identification trace residue of solid alcohol fuel in arson case. *Srinakharinwirot University Journal of Science and Technology*, 17(1), Article 253006.
- Stauffer, E., Dolan, J. A., & Newman, R. (2008). Fire debris analysis. Academic Press.
- Stauffer, E., & Lentini, J. J. (2003). ASTM standards for fire debris analysis: A review. *Forensic Science International*, 132(1), 63–67.
- Turner, D. A., Williams, M., Sigman, M. A., & Goodpaster, J. V. (2018). A comprehensive study of the alteration of ignitable liquids by weathering and microbial degradation. *Journal of Forensic Sciences*, 63(1), 58–65.