



พัฒนาวิธีการอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน
ในผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง
**Simple Method Development for Aromatic Hydrocarbon Residue
in Cloth Contaminated with Fuel**

วศินี คีรีลักษณ์

Wasinee Kheereelak

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Forensic Science
Prince of Songkla University**

2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ พัฒนวิธีการอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนใน
ผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง
ผู้เขียน นางสาวศินี ศิริลักษณ์
สาขาวิชา นิติวิทยาศาสตร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....
(ดร.ฐิติมา รุจิราลัย)

.....ประธานกรรมการ
(พล.ต.ต.สุเมธ พงษ์ลิมานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ
(ดร.ฐิติมา รุจิราลัย)

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพริศพิชญ์ คณาธารณา)

.....กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.เพริศพิชญ์ คณาธารณา)

.....กรรมการ
(ดร.จงดี ธรรมเขต)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงใจ นาคะปรีชา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
นิติวิทยาศาสตร์

.....
(ศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พงศ์ดารา)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ชื่อวิทยานิพนธ์	พัฒนาวิธีการอย่างง่ายสำหรับวิเคราะห์อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนใน ผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง
ผู้เขียน	นางสาววศินี ศิริลักษณ์
สาขาวิชา	นิติวิทยาศาสตร์
ปีการศึกษา	2553

บทคัดย่อ

ได้ทำการพัฒนาวิธีวิเคราะห์สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนกลุ่มเบนซีน โทลูอีน เอซิลเบนซีน และไซลีน หรือบีทีอีเอ็กซ์ ด้วยเทคนิคทางคัลเลอร์ิเมทรีโดยอาศัยปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างบีทีอีเอ็กซ์ในคาร์บอนเตตระคลอไรด์กับอะลูมิเนียมคลอไรด์เข้มข้น 8.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 นาที ได้ผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนสีส้ม โดยเมื่อความเข้มข้นของบีทีอีเอ็กซ์เพิ่มขึ้น ความเข้มของสีตะกอนจะมีค่าเพิ่มขึ้นแต่ความเข้มของสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale จะมีค่าลดลง ปริมาณต่ำสุดของบีทีอีเอ็กซ์ที่ตรวจวัดได้เท่ากับ 0.25 พีพีเอ็ม โดยตะกอนมีสีคงที่ภายใน 30 นาที ทำการศึกษาผลของตัวรบกวนชนิดต่างๆ ต่อการวิเคราะห์ตะกอนของบีทีอีเอ็กซ์ ได้แก่ ไอโซ-ออกเทน เพนเทน ไฮโคลเฮกเซน ไตรเมทิลเพนเทน และแนฟทาลีน พบว่า แนฟทาลีนที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 5.00 พีพีเอ็ม เป็นตัวรบกวนการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์โดยเกิดเป็นตะกอนสีม่วง ซึ่งบดบังตะกอนสีส้มของบีทีอีเอ็กซ์

ทำการศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมัน 3 วิธี คือ วิธีที่ 1 เป็นวิธีการดูดซับไอบีทีอีเอ็กซ์ด้วยกระดาษกรอง ซึ่งมีเฮกซะเดเคนเป็นตัวจับไอบีทีอีเอ็กซ์ พบว่าวิธีนี้ให้ประสิทธิภาพในการสกัดต่ำประมาณร้อยละ 46.6 – 65.6 สำหรับวิธีที่ 2 เป็นวิธีการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้าด้วยเฮพเทน ซึ่งทำการเปรียบเทียบการสกัดแบบใช้คลื่นความถี่สูงและแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า ทั้งสองวิธีให้ประสิทธิภาพของการสกัดและค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยการสกัดแบบใช้คลื่นความถี่สูงและตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องให้ค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 104.0 – 112.1 และ 106.0 – 114.8 ตามลำดับ ดังนั้นวิธีการสกัดแบบตั้งทิ้งไว้จึงเป็นวิธีที่เหมาะสมเนื่องจากทำได้ง่าย ไม่ใช้เครื่องมือที่ยุ่งยากในการสกัด เมื่อทำการศึกษาเวลาที่ใช้ในการสกัดด้วยเฮพเทนแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในช่วงเวลา 5 – 30 นาที พบว่า ที่เวลา 15 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการสกัดโดยให้ค่าร้อยละการคืนกลับไม่เกิน 114.8 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกิน 1.0 ข้อจำกัดวิธีสกัดแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง คือ แนฟทาลีนเป็น

ตัวรบกวนที่สำคัญในการวิเคราะห์พีทีอีเอ็กซ์ อย่างไรก็ตาม วิธีนี้นำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบ คัดเบื้องต้นได้ว่า ตัวอย่างผ้ามีการปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดใด

ส่วนวิธีที่ 3 เป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนในระบบปิด ซึ่งเป็น ระบบอย่างง่ายที่ให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่อุณหภูมิ 150.0 องศาเซลเซียส และมีแก๊ส ไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 10 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นตัวพาไอพีทีอีเอ็กซ์ที่ระเหยไปตามท่อ นำ แก๊สที่มีอุณหภูมิ 80.0 องศาเซลเซียสเพื่อทำให้พีทีอีเอ็กซ์เกิดปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมคลอไรด์ได้ เร็วขึ้น พบว่า วิธีนี้วิเคราะห์ความเข้มข้นของพีทีอีเอ็กซ์ต่ำสุดในตัวอย่างผ้าได้เท่ากับ 0.50 พีพีเอ็ม ใช้เวลาในการวิเคราะห์ภายใน 20 นาที ซึ่งเป็นการลดการรบกวนจากแนฟทาซีนได้ ทำ การเปรียบเทียบวิธีนี้กับวิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน โดยใช้ตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมัน ดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ และน้ำมันเบนซิน พบว่า ทั้งสองวิธีให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยตรวจวัด ปริมาณของพีทีอีเอ็กซ์มากที่สุดในผ้าที่เติมน้ำมันเบนซิน รองลงมาคือน้ำมันแก๊สโซฮอล์ และ น้ำมันดีเซลตามลำดับ ได้ประยุกต์วิธีการให้ความร้อนนี้กับการวิเคราะห์พีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้า 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์ ผ้าลินิน และกระสอบป่านที่ ปนเปื้อนน้ำมันแก๊สโซฮอล์ น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล ซึ่งสามารถตรวจวัดพีทีอีเอ็กซ์ได้ใน 20 ตัวอย่าง และความเข้มข้นของพีทีอีเอ็กซ์จากการสังเกตสีตะกอนด้วยตาเปล่าตั้งแต่ 1 – มากกว่า 100 พีพีเอ็ม และจากระบบสี RGB และ Grayscale อยู่ในช่วง 0 – 1,035.1 พีพีเอ็ม และ 0 – 540.7 พีพีเอ็ม ตามลำดับ

วิธีการวิเคราะห์พีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าโดยการให้ความร้อนร่วมกับการ ตรวจวัดสีตะกอนเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว ขั้นตอนไม่ยุ่งยาก และลดผลรบกวนจากสารโพลี- โซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมัน เช่น แนฟทาซีน ได้ดีกว่า วิธีการดูดซับไอพีทีอีเอ็กซ์ด้วยกระดาษกรองและการสกัดด้วยเฮกเซน ซึ่งสามารถนำไป ประยุกต์ใช้ในการทดสอบคัดเบื้องต้นในการตรวจวิเคราะห์สารไฮโดรคาร์บอนกลุ่มบีทีอีเอ็กซ์ใน ตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยอาศัยจากการสังเกตสีตะกอนและใช้ในการหาปริมาณ ที่ตรวจวัดได้โดยใช้ระบบสี RGB และ/หรือ Grayscale

Thesis Title Simple Method Development for Aromatic Hydrocarbon Residue
in Cloth Contaminated with Fuel
Author Miss Wasinee Kheereelak
Major Program Forensic Science
Academic Year 2010

Abstract

Determination of aromatic hydrocarbons, namely, benzene, toluene, ethylbenzene and xylene or BTEX, in cloth contaminated with fuel was developed by means of the colorimetric detection through the Friedel-Crafts alkylation. The method is based on the reaction of BTEX in carbon tetrachloride with 8.0 % w/v aluminum chloride (AlCl_3) at room temperature for 10 min to produce an orange precipitation. The increase in the intensity of colored precipitation and the decrease in values of RGB and Grayscale are obtained with the increasing concentration of BTEX. The detection limit of BTEX was 0.25 ppm, with color stability being for 30 min. The effect of interferences, present in fuel, isooctane, pentane, cyclohexane, trimethylpentane and naphthalene, was studied. Only naphthalene ranged over 5.00 ppm interfered the BTEX detection in which the purple precipitation was formed.

Three methods for the sample preparation were studied herein. Method A is the adsorption of BTEX vapor onto a filter paper using *n*-hexadecane as the adsorbed solution. The low percentage recoveries of BTEX extraction were obtained in the range of 46.6 – 65.6. Method B is the solvent extraction using *n*-heptane with ultrasonication and without ultrasonication. The percentage recoveries of BTEX extraction and values of RGB and Grayscale for both methods were not different significantly at 95% confidence. The recoveries of the solvent extraction with ultrasonication and without ultrasonication were 104.0 – 112.1% and 106.0 – 114.8%, respectively. The extraction without ultrasonication was chosen due to the simple extraction method and no instrumentation used. Extraction times of the extraction without ultrasonication in the range of 5 – 30 min were also studied. The result showed that time of 15 min was optimum, with the recovery of extraction being less than

114.8% and the relative standard deviation less than 1.0%. The limitation of the extraction without ultrasonication is that naphthalene is the main interference for BTEX detection. However, this method can be applied for the screening of fuel contaminated in cloth.

Method C is the sample heating in the closed system at 150.0°C. Nitrogen gas is used as a BTEX carrier at a flow rate of 10 mL/min through a gas line controlled at 80.0°C in order to increase the reaction rate between BTEX and AlCl_3 . The detection limit of BTEX in contaminated cloth was 0.50 ppm. The analysis time within 20 min eliminated interference from naphthalene. This method was applied for cloth contaminated with diesel, gasohol and gasoline, and compared with solid phase microextraction. The similar results from two methods were obtained, with the respective reduction of concentrations of BTEX from clothes contaminated with gasoline, gasohol and diesel. The application of method C has been demonstrated through the analysis of BTEX in various types of cloth, including cotton, polyester, cotton (50%) and polyester (50%), linen and gunnysack, which contaminated with gasohol, gasoline and diesel. The concentrations of BTEX were detected in 20 samples, ranging from one to more than 100 ppm for colorimetric detection and nondetectable to 1035.1 ppm and nondetectable to 540.7 ppm for RGB and Grayscale values, respectively.

Overall, it has been demonstrated that the sample heating in the closed system applied with colorimetry provides simple and fast detection. Polycyclic aromatic hydrocarbons, such as naphthalene do not interfere the detection compared to other methods studied. This developed method can be applied for either the screening of BTEX in cloth contaminated with fuel using the colorimetric detection or the quantitative analysis using values of RGB and/or Grayscale.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพราะได้รับความกรุณาจากบุคคลหลายท่าน และจากหลายหน่วยงาน ข้าพเจ้าจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้ ดังนี้

ขอบพระคุณ ดร.จิตติมา รุจิราลัย อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และรองศาสตราจารย์ ดร.เพริศพิชญ์ คณาธารณา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้ความรู้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอบพระคุณ ดร.จงดี ธรรมเขต ดร.นราวัณ หลีสกุล ดร.ชิตนนท์ บุรณชัย และ ดร.วรากร ลิมบุตร ที่ได้กรุณาให้ความรู้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางอันเป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์

ขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สำหรับทุนผู้ช่วยนักวิจัย

ขอบพระคุณ สถานวิจัยการวิเคราะห์สารปริมาณน้อยและไบโอเซนเซอร์ (Trace Analysis and Biosensor Research Center; TAB-RC) และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ด้านสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมถึงวัสดุอุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการทำวิจัย

ขอขอบคุณ คณาจารย์และเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและประกอบเครื่องมือที่ใช้การทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ พี่ๆ เพื่อนๆ น้องๆ หลักสูตรนิติวิทยาศาสตร์และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ทุกท่าน ที่คอยเป็นกำลังใจและให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่และครอบครัว สำหรับกำลังใจที่ดีและให้การสนับสนุนการศึกษา รวมทั้งให้คำปรึกษาในทุกๆ เรื่องด้วยดีเสมอมาจนกระทั่งสำเร็จการศึกษา และขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้วิชาความรู้มาจนถึงปัจจุบัน

วดีณี ศิริลักษณ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	(3)
Abstract	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(7)
สารบัญ	(8)
รายการตาราง	(10)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 การตรวจเอกสาร	2
1.3 วัตถุประสงค์	40
บทที่ 2 วิธีการวิจัย	41
2.1 สารเคมี	41
2.2 วัสดุและอุปกรณ์	42
2.3 เครื่องมือวิเคราะห์	43
2.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน	43
2.5 การเตรียมท่อนำแก๊สและซิลิกาเจล	46
2.6 สภาวะของเครื่องมือ	48
2.7 วิธีดำเนินการ	51
2.8 สถิติที่ใช้	64
บทที่ 3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	65
3.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาฟรีเทล-กราฟ แอลคิลเลชัน	65
3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างผ้า	75
3.3 ข้อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีต่าง ๆ	102
บทที่ 4 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	104
4.1 บทสรุป	104
4.2 ข้อเสนอแนะ	107
บรรณานุกรม	109

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	116
ก ขั้นตอนการประมวลผลภาพสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ด้วยโปรแกรม Photoshop CS2	117
ข ปฏิบัติภาพรีเทล-กราฟ แอลคิลเลชั่น	121
ค การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิบัติการรีเทล-กราฟ แอลคิลเลชั่น	124
ง ข้อมูลจากวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีการสกัดด้วยเฮฟเทน	126
จ ข้อมูลจากวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีการให้ความร้อน	127
ประวัติผู้เขียน	130

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	สถิติคดียางเพลิงทั่วราชอาณาจักร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 - พ.ศ. 2553	3
1.2	คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ	8
1.3	องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเบนซิน	9
1.4	องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันดีเซล	11
1.5	สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเบนซิน	13
1.6	ชนิดและปริมาณของสารอะโรมาติกที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในน้ำมันเบนซินและดีเซล	14
1.7	คุณสมบัติของบีทีอีเอ็กซ์	16
1.8	วิธีการเตรียมตัวอย่าง	21
1.9	องค์ประกอบที่แน่นอนในน้ำมันเบนซิน	34
2.1	พารามิเตอร์ของกล้องถ่ายภาพ	48
2.2	สภาวะของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์	50
2.3	สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดชนิดเฟลม-ไอออไนเซชัน	50
2.4	การควบคุมอุณหภูมิที่ทำการทดลอง	59
3.1	ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สีในระบบสี RGB และ Grayscale (n = 30)	69
3.2	ค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานของสาร 1 ชนิดและสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิดที่ความเข้มข้น 5.00 พีพีเอ็ม (n = 5)	71
3.3	ผลการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยวิธีการสกัดด้วยเฮพเทนแบบตั้งทิ้งไว้	82
3.4	แผนภาพมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากการให้ความร้อนกับผ้าที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 0.50 – 100.00 พีพีเอ็ม (n = 5)	88

รายการตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
3.5	ความเข้มของสีตะกอนซึ่งได้จากวิธีการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (n = 3)	92
3.6	ผลการวิเคราะห์บีบีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยวิธีการให้ความร้อน	95
3.7	ข้อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีต่างๆ	103

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่		หน้า
1.1	องค์ประกอบของไฟตามทฤษฎีสามเหลี่ยมไฟ	3
1.2	องค์ประกอบของไฟตามทฤษฎี Fire Tetrahedron	4
1.3	ตัวอย่างภาชนะที่ใช้ในการบรรจุวัตถุพยาน	7
1.4	สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญในน้ำมัน	12
1.5	ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเบนซิน (% weight)	15
1.6	ปฏิกิริยาฟรีแรดล-กราฟ แอลคิลเลชันของการวิเคราะห์เบนซิน	20
1.7	กลไกของปฏิกิริยาฟรีแรดล-กราฟ แอลคิลเลชันของเบนซิน	20
1.8	ส่วนประกอบของโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (SPME)	24
1.9	การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีของแสง	26
1.10	ส่วนประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์	26
1.11	ลักษณะการดูดกลืนแสงของบีทีอีเอ็กซ์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ในน้ำ	28
1.12	ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี	30
1.13	ส่วนประกอบของตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน	32
1.14	โครมาโทแกรมของ (ก) น้ำมันเบนซินซึ่งได้จากการเทียบ กับโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานไฮโดรคาร์บอน และ (ข) สารสกัดที่ได้จากตัวอย่างพรมรถยนต์ที่มีการเติมน้ำมันเบนซินลงไปแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนการวิเคราะห์ ด้วย GC-MS	33
1.15	ระบบสี RGB	35
1.16	ระบบสี Grayscale	36
2.1	ขนาดและความยาวของท่อนำแก๊สที่ใช้ในการทดลอง	47
2.2	แผนภาพการติดตั้งกล้องถ่ายภาพสำหรับการทดลองจาก มุมมอง (ก) ด้านบน และ (ข) ด้านข้าง	49
2.3	การวางกระดาษกรองที่ใช้ในการดูดซับไอบีทีอีเอ็กซ์จาก ตัวอย่างผ้า	54
2.4	การสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าด้วยเฮกเซน	56

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
2.5	การเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าในระบบปิด	58
2.6	บริเวณท่อนำแก๊สที่มีการควบคุมอุณหภูมิ	59
2.7	การสกัดโดยใช้เทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน	62
3.1	สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม ก่อนเกิดปฏิกิริยาและหลังเกิดปฏิกิริยา	66
3.2	ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังจากเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ในช่วง 2.0 – 20.0 %w/v (n = 5)	67
3.3	แผนภาพมาตรฐานสีตะกอนของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้นในช่วง 0.25 – 1000.00 พีพีเอ็ม (n = 30)	68
3.4	กราฟมาตรฐานของสีตะกอนที่ได้จากการวิเคราะห์ในระบบสี (ก) RGB และ (ข) Grayscale	70
3.5	แผนภาพมาตรฐานสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานของสาร 1 ชนิดและสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิดที่ความเข้มข้น 5.00 พีพีเอ็ม (n = 5)	72
3.6	แผนภาพมาตรฐานสีตะกอนของสารละลายมาตรฐานแนฟทาลีนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (n = 5)	74
3.7	ผลของอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่ทำการเติมบีทีอีเอ็กซ์ความเข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม (n = 3)	76
3.8	ผลของเวลาที่ให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่เติมบีทีอีเอ็กซ์เข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม (n = 3)	77
3.9	ร้อยละการคืนกลับของการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้าด้วยเฮพเทนโดยใช้คลื่นความถี่สูงและแบบตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที (n = 3)	78

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
3.10	สีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ที่เกิดจากการสกัดบีทีอีเอ็กซ์ด้วยเฮพเทนแบบใช้คลื่นความถี่สูงและแบบตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที (n = 3)	79
3.11	ผลของเวลาในการสกัดด้วยเฮพเทนแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (n = 3)	80
3.12	กราฟมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากการให้ความร้อนกับผ้าที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 0.50 – 100.00 พีพีเอ็ม ซึ่งวิเคราะห์สีตะกอนในระบบ (ก) RGB และ (ข) Grayscale (n = 5)	89
3.13	โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์ไฟด์ความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม เมื่อเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน	91
3.14	โครมาโทแกรมของสารสกัดจากผ้าตัวอย่างและผ้าตัวอย่างที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งสกัดด้วยเทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (ก) สารสกัดจากผ้าตัวอย่าง (แบบลค์) (ข) สารสกัดจากผ้าตัวอย่างที่เติมน้ำมันดีเซล (ค) สารสกัดจากผ้าตัวอย่างที่เติมน้ำมันแก๊สโซฮอล์ และ (ง) สารสกัดจากผ้าตัวอย่างที่เติมน้ำมันเบนซิน	93

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำต้นเรื่อง

จากเหตุการณ์ลอบวางเพลิงที่เกิดขึ้นบ่อยครั้ง มักพบว่า ผู้กระทำความผิดนิยมนำน้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันแก๊สโซฮอล์ (Gasohol) น้ำมันเบนซิน (Gasoline) น้ำมันดีเซล (Diesel) น้ำมันก๊าด (Kerosene) และทินเนอร์ (Thinner) เป็นต้น (ลากสุวัจนานนท์, 2006) มาใช้เป็นตัวเร่งให้วัสดุต้นเพลิงเกิดการลุกไหม้ขึ้น ต้นเพลิงที่มักนำมาใช้ร่วมกับน้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ ไม้ กล้องกระดาดและผ้าชุบน้ำมัน (สุวัจน์, 2549) โดยในการพิสูจน์และตรวจสอบน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้การลอบวางเพลิง จะนิยมตรวจวิเคราะห์หาสารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น เบนซีน (Benzene) โทลูอีน (Toluene) เอธิลเบนซีน (Ethylbenzene) และไซลีน (Xylene) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในน้ำมันเบนซินร้อยละ 10 – 59 (โดยน้ำหนัก) (Vieira *et al.*, 2007) วิธีวิเคราะห์ที่แพร่หลายในปัจจุบัน ได้แก่ เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography, GC) ที่มีตัวตรวจวัดชนิดต่างๆ เช่น เพลมไอออไนเซชัน (Flame ionization detector, FID) แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Mass spectrometer, MS) และอินฟราเรดไมโครสเปกโตรมิเตอร์ (Infrared microspectrometer) เป็นต้น (Sandercock, 2008) นอกจากนี้ยังมีเทคนิคอื่นๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์สารกลุ่มไฮโดรคาร์บอนอีก เช่น ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรสโกปี (Fluorescence spectroscopy) (Saitoh and Takeuchi, 2006) อย่างไรก็ตามเทคนิคที่กล่าวมาจำเป็นต้องอาศัยความชำนาญของผู้ทำการวิเคราะห์และเครื่องมือที่ใช้มีราคาแพง รวมทั้งมีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างที่ค่อนข้างยุ่งยากเพื่อให้มีความเหมาะสมกับเครื่องมือที่ใช้วิเคราะห์

ดังนั้น โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาวิธีการอย่างง่ายในการวิเคราะห์สารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งจะใช้ในการทดสอบคัดเบื้องต้น (Screening test) ว่ามีการนำน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมาใช้เป็นต้นเพลิงในการลอบวางเพลิง ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งที่ใช้ในการประยุกต์กับการตรวจวิเคราะห์น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้เป็นต้นเพลิงได้รวดเร็วและช่วยลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ตัวอย่างลงได้

1.2 การตรวจเอกสาร

1.2.1 เหตุจูงใจในการลอบวางเพลิง (สุขวิชญ์, 2549)

การลอบวางเพลิงถือว่าการก่ออาชญากรรมที่ทำการสืบหาผู้ตัวกระทำ ความผิดได้ยาก เนื่องจากวัตถุพยานที่ผู้กระทำความผิดนำมาใช้ในการก่อเหตุมักถูกทำลายใน สถานที่เกิดเหตุ ขณะเดียวกันบุคคลที่ลอบวางเพลิงก็ไม่สามารถพิสูจน์ทราบได้โดยง่าย เหตุจูงใจในการลอบวางเพลิงมีหลายปัจจัย เช่น

- 1.2.1.1 การกระทำที่หวังผลประโยชน์ทางการเงินที่ไม่สุจริต ซึ่งแบ่งออกเป็น
 - การกระทำเพื่อหวังผลประโยชน์โดยตรง เช่น การวางเพลิงเพื่อเอาเงิน ประกัน เป็นต้น
 - การกระทำเพื่อหวังผลประโยชน์ทางอ้อม เช่น การเผาไล่ที่ในชุมชน แออัดเพื่อต้องการขายที่ดินในบริเวณดังกล่าว เป็นต้น
- 1.2.1.2 บุคคลเป็นโรคจิต ชอบเห็นความวุ่นวาย ชอบเห็นความเดือดร้อน จึงทำการ จุดไฟเผา
- 1.2.1.3 การวางเพลิงเพื่อก่ออาชญากรรม เช่น การเข้าไปลักทรัพย์ในบ้านแล้วจุดไฟ เผาหรือทำการฆาตกรรมแล้วจุดไฟเผาบ้าน เพื่อให้เข้าใจว่าตายเพราะ สาเหตุเพลิงไหม้
- 1.2.1.4 การวางเพลิงเพื่อหวังผลประโยชน์ในทางชื่อเสียงเกียรติยศ ซึ่งการวางเพลิง มักจะกระทำในบริเวณที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายมากนัก
- 1.2.1.5 การวางเพลิงเพื่อกลั่นแกล้งหรือล้างแค้น
- 1.2.1.6 การลอบวางเพลิงเพื่อก่อการก่อวินาศกรรม ดังเช่น การลอบวางเพลิง สถานที่ราชการ ได้แก่ โรงเรียน โรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล องค์การบริหารส่วนตำบล (อบต.) เพื่อทำลายโครงสร้างพื้นฐานของประชาชนในสาม จังหวัดภาคใต้ เป็นต้น

1.2.2 สถานการณ์การลอบวางเพลิงในประเทศไทย

สำนักงานตำรวจแห่งชาติได้จัดประเภทคดีการวางเพลิงให้เป็นคดีประเภท อุกฉกรรจ์และสะเทือนขวัญ ซึ่งสถิติการลอบวางเพลิงที่เกิดขึ้นทั่วประเทศในแต่ละปีมีค่อนข้าง สูง ดังแสดงในตารางที่ 1.1 แต่การจับกุมตัวผู้กระทำความผิดมาลงโทษนั้นทำได้ยาก เนื่องจาก วัตถุพยานที่เชื่อมโยงไปถึงตัวผู้กระทำผิดนั้นมักจะไม่หลงเหลืออยู่ในสถานที่เกิดเหตุ

ตารางที่ 1.1 สถิติคดีวางเพลิงทั่วราชอาณาจักร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 - พ.ศ. 2553
(ข้อมูลจากสำนักงานตำรวจแห่งชาติ)

สถิติปี	จำนวนคดีที่รับแจ้ง (คดี)	จำนวนคดีที่จับได้ (คดี)
2548	615	162
2549	477	126
2550	574	178
2551	204	118
2552	226	122
2553	231	132

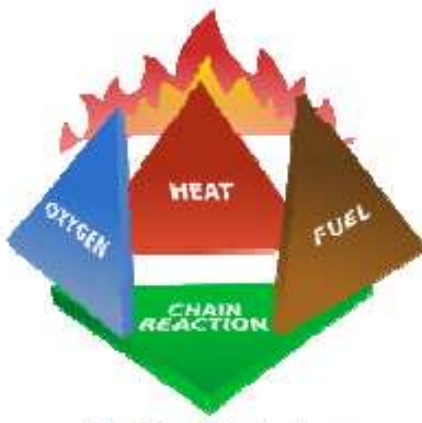
1.2.3 ทฤษฎีของไฟ

ไฟ (Fire) เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการออกซิเดชันของสารตั้งต้น (เชื้อเพลิง) ทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงสว่างและความร้อน เพลิงจะลุกไหม้ขึ้นได้จะต้องมีองค์ประกอบ 3 อย่าง คือ วัตถุเชื้อเพลิง (Fuel) ซึ่งอยู่ในสภาพของแข็ง ของเหลว หรือแก๊ส ออกซิเจน (Oxygen) และความร้อน (Heat) ที่ทำให้เชื้อเพลิงมีอุณหภูมิสูงถึงจุดวาบไฟ มารวมกันในปริมาณและสัดส่วนที่พอเหมาะเพื่อให้เกิดขบวนการสันดาป องค์ประกอบทั้งสามนี้อาจเรียกว่า สามเหลี่ยมไฟ (Fire Triangle) ดังภาพประกอบที่ 1.1 หากขาดองค์ประกอบอย่างใดอย่างหนึ่งไปหรือมีอยู่ในสัดส่วนที่ไม่พอเหมาะ ไฟก็จะไม่เกิดหรือไฟที่กำลังไหม้อยู่ก็จะดับลง (สุขวัจน, 2549)



ภาพประกอบที่ 1.1 องค์ประกอบของไฟตามทฤษฎีสามเหลี่ยมไฟ
(ที่มา : <http://www.cablesystems.co.uk/fire-triangle.php>
(วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2554))

นอกจากนี้ยังมีทฤษฎีของไฟขึ้นใหม่ เช่น Fire Tetrahedron ดังภาพประกอบที่ 1.2 ซึ่งเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบสามเหลี่ยมไฟและมืองค์ประกอบที่เหลือ เช่น การผสมสัดส่วนและการจุดตัวอย่างต่อเนื่อง เมื่อรวมเข้าด้วยกันจะเป็นปฏิกิริยาต่อเนื่องหรือลูกโซ่หมุนเวียนของไฟ (Chain reaction) และเป็นเพลิงไหม้ที่รุนแรงมากขึ้น (สุขวัจน, 2549)



ภาพประกอบที่ 1.2 องค์ประกอบของไฟตามทฤษฎี Fire Tetrahedron
(ที่มา : <http://www.cablesystems.co.uk/fire-triangle.php>
(วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2554))

1.2.3 วัตถุประสงค์ในการเกิดเหตุเพลิงไหม้และการเก็บรวบรวมวัตถุพยาน

การเก็บรวบรวมวัตถุพยานจากสถานที่เกิดเหตุเป็นสิ่งสำคัญที่สุดทั้งในชั้นสอบสวนและชั้นศาล ซึ่งต้องกระทำอย่างถูกต้องตามกฎหมาย กฎหมายจะต้องให้อำนาจในการเก็บวัตถุพยานกับผู้ที่ทำการเก็บวัตถุพยานนั้น เช่น พนักงานสอบสวน เจ้าหน้าที่กองพิสูจน์หลักฐาน และวิธีการเก็บพยานวัตถุจะต้องเป็นวิธีการที่เหมาะสม ซึ่งหากเก็บวัตถุพยานไม่ถูกวิธีหรือเลือกใช้หีบห่อบรรจุวัตถุพยานที่ไม่เหมาะสม จะทำให้วัตถุพยานเสียหายหรือเกิดการปนเปื้อน ทำให้ไม่สามารถตรวจพิสูจน์ได้หรืออาจตรวจพิสูจน์ได้แต่ไม่สามารถนำไปใช้ยืนยันผลได้อย่างถูกต้อง

เพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นหลายๆ ครั้ง จะประสบปัญหาในการตรวจสอบว่า เกิดจากอุบัติเหตุหรือการลอบวางเพลิง บางครั้งอาจตรวจพบอุปกรณ์ในการจุดไฟ เช่น ไม้ขีดไฟและกระดาด เป็นต้น บ่อยครั้งก็ยังพบว่า มีการใช้สารเชื้อเพลิง เช่น น้ำมันเบนซิน น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ เป็นต้น เป็นตัวเร่งให้เกิดการลุกไหม้ การสืบสวนเกี่ยวกับเหตุเพลิงไหม้นั้นถ้าหากพิจารณาจากแหล่งกำเนิดของไฟก็เป็นไปได้ที่จะตรวจวิเคราะห์และแยกชนิดของสารเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ได้ หรือการตรวจวิเคราะห์อาจทำไม่ได้ถ้าหากไฟเกิดการลุกไหม้ขึ้นอย่างสมบูรณ์หรือ

ตัวอย่างที่เก็บมาเป็นตัวอย่างที่ไม่ได้มาจากจุดต้นเพลิง ดังนั้น จึงต้องมีความระมัดระวังในการเก็บตัวอย่างจากเพลิงไหม้ เพราะสารเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการวางเพลิงสามารถระเหยได้อย่างรวดเร็ว ภาชนะที่ใช้บรรจุจึงจะต้องปิดให้มิดชิด เพื่อป้องกันการสูญหายของไอระเหยและป้องกันการปนเปื้อนที่อาจเกิดขึ้นได้

ประเภทของวัตถุพยานที่พบในสถานที่เกิดเหตุเพลิงไหม้

วัตถุพยานที่พบในสถานที่เกิดเหตุเพลิงไหม้ แบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. วัตถุพยานไม่ถาวร (Transient Evidence)

เป็นวัตถุพยานที่มีลักษณะไม่คงทนถาวร คงอยู่ได้ชั่วคราว ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงและสูญหาย ตัวอย่างเช่น

- 1.1 กลิ่น เช่น กลิ่นน้ำมันเบนซิน กลิ่นไหม้ เป็นต้น
- 1.2 อุณหภูมิ เช่น อุณหภูมิของชิ้นส่วนที่ถูกเพลิงไหม้ เป็นต้น
- 1.3 รอยพิมพ์และรอยประทับ เช่น รอยเท้าเปื้อนน้ำมันบนพื้นห้องหรือพื้นถนน

ดังนั้น ผู้ที่ตรวจสถานที่เกิดเหตุจะต้องบันทึกสภาพของวัตถุพยานที่พบโดยเร็วที่สุด ซึ่งอาจทำได้โดยการจดบันทึกหรือใช้วิธีการถ่ายภาพหรือวิธีการอื่นๆ ที่สามารถเก็บรักษาวัตถุพยานประเภทนี้ก่อนที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงหรือสูญหายไป

2. วัตถุพยานที่เป็นรูปแบบ (Pattern Evidence)

เป็นวัตถุพยานที่เกิดจากการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างคนกับวัตถุ หรือวัตถุกับวัตถุ วัตถุพยานประเภทนี้ที่ค่อนข้างพบได้บ่อย ได้แก่ รูปแบบการไหม้ของไฟ ตัวอย่างลักษณะการไหม้ผิดปกติที่ชี้ว่ามีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและสามารถสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน คือ รอยไหม้เป็นรูปตัววีมุมแคบ ซึ่งปกติแล้วรอยไหม้ธรรมดาหรือรอยไหม้ที่เกิดจากการลุกไหม้อย่างช้าๆ นั้นจะเป็นรูปตัววีมุมกว้าง หากการลุกไหม้เกิดซ้ำเท่าไร มุมของตัววีก็ยิ่งกว้างเท่านั้น

3. วัตถุพยานตามสภาพ (Condition Evidence)

วัตถุพยานประเภทนี้เกิดขึ้นจากเหตุการณ์หรือการกระทำ จะมีบทบาทสำคัญในการสร้างลำดับเหตุการณ์ย้อนหลังที่เกิดขึ้น รวมถึงบอกสถานการณ์ของการเกิดเหตุ เช่น

- 3.1 สีของควันไฟ บอกถึงชนิดของเชื้อเพลิงที่ถูกเพลิงไหม้
- 3.2 สีของเปลวไฟ บอกถึงชนิดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ เนื่องจากสีของเปลวไฟจะแตกต่างกันตามช่วงของอุณหภูมิต่างๆ

ดังนั้นสีของเปลวไฟและสีของควันจึงเป็นประโยชน์มากในการพิจารณาว่าเชื้อเพลิงใดที่ถูกเพลิงไหม้ขึ้นก่อน

วัตถุพยานที่เก็บรวบรวมจากสถานที่เกิดเหตุ

วัตถุพยานที่ทำการรวบรวมจากสถานที่เกิดเหตุ ได้แก่

1. ซากปรักหักพังที่เหลือจากการถูกเผาไหม้
2. วัสดุที่มีความเชื่อมโยงกับจุดต้นเพลิงซึ่งมีสารตัวเร่งปฏิกิริยาปนเปื้อนอยู่
3. อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดการลุกไหม้ (ฟิวส์ เศษผ้า เทียนและอื่น ๆ) รวมถึงเครื่องจักรกล และอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ
4. ตัวอย่างของเครื่องหนัง ไม้หรือวัตถุอื่นๆ ที่อาจมีการปนเปื้อนของสารไวไฟต่างๆ
5. ตัวอย่างดิน ซึ่งที่อาจมีการปนเปื้อนของสารไวไฟต่างๆ
6. หลักฐานที่อาจเป็นไปได้จากผู้ลอบวางเพลิง เช่น เส้นผม เส้นใยเส้นผ่า ไม้ขีดไฟ เป็นต้น
7. เสื้อผ้าที่ผู้ต้องสงสัยสวมใส่ในขณะเกิดเหตุ รวมทั้งรองเท้า
8. ภาชนะที่ใช้บรรจุสารตัวเร่ง
9. ตัวอย่างพรม เบาะรอง และไม้ เป็นต้น ที่ไม่ถูกปนเปื้อนจะต้องเก็บรวบรวมและบรรจุแยกกัน
10. วัสดุที่ใช้เป็นต้นเพลิง (เสื้อเชิ้ต ถุงเท้า ผ้าขนหนู เป็นต้น) ที่นำมาใช้ในการวางเพลิง อาจนำไปวิเคราะห์หาดีเอ็นเอ (DNA) ได้

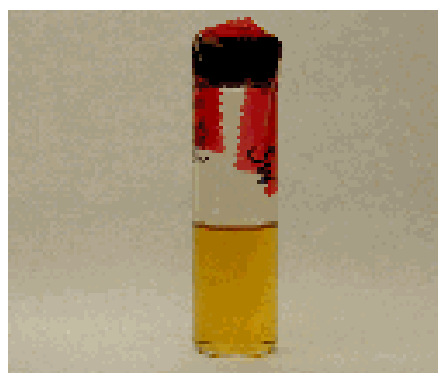
การเก็บรวบรวมและเก็บรักษาวัตถุพยานจากเพลิงไหม้

การวิเคราะห์วัตถุพยานจากเพลิงไหม้ เป็นการวิเคราะห์หาว่า มีของเหลวเชื้อเพลิงในตัวอย่างหรือไม่ ซึ่งการบรรจุหีบห่อของวัตถุพยาน (Evidence packaging) เป็นสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญเป็นอันดับแรก

ผู้ที่ทำการสืบสวนควรที่จะเก็บรวบรวมสารเชื้อเพลิงที่ต้องสงสัยหรือซากปรักหักพังที่เหลือจากการถูกเพลิงไหม้ทันทีที่เข้าไปในสถานที่เกิดเหตุ เนื่องจากสารเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะระเหยได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้น การบรรจุหีบห่อของวัตถุพยานที่ต้องสงสัยเหล่านี้จึงต้องเก็บไว้ในภาชนะที่ปิดสนิทในทันทีที่เก็บได้ (Lee and Harris, 2006) และหากวัตถุพยานที่พบเป็นของเหลวที่อาจใช้เป็นตัวเร่ง เช่น น้ำมันเชื้อเพลิง ควรเก็บในขวดแก้วและปิดด้วยฝาเกลียวที่ทำจากเทฟลอนและเก็บในปริมาณไม่เกินครึ่งหนึ่งของขวดแก้ว การเลือกภาชนะที่ใช้ในการบรรจุวัตถุพยาน ได้แก่ กระจก โลหะ ถุงพลาสติกในลอน และขวดแก้วบรรจุตัวอย่าง เป็นต้น ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.3 ตามลำดับ ควรที่จะมีขนาดใหญ่กว่าวัตถุพยานประมาณ 2 – 3 เท่า เพื่อให้มีบริเวณที่เป็นเฮดสเปซ (Headspace) เพียงพอที่จะให้ออกของสารเชื้อเพลิงระเหยจากวัตถุพยานได้



กระป๋องโลหะ (Lined metal evidence cans)



ขวดแก้วบรรจุตัวอย่าง (Vial)



ถุงไนลอน (Nylon arson evidence collection bags)

ภาพประกอบที่ 1.3 ตัวอย่างภาชนะที่ใช้ในการบรรจุวัตถุพยาน
 (ที่มา : <http://www.evidentcrimescene.com/cata/evid2/evid2.html>
 (วันที่สืบค้น 21 กุมภาพันธ์ 2553);
<http://www.adfs.state.al.us/Arson.aspx> (วันที่สืบค้น 21 กุมภาพันธ์
 2553))

1.2.4 น้ำมันเชื้อเพลิง

น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดิบ โดยมีไฮโดรคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่มากที่สุด ไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในน้ำมันแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ พาราฟิน (Paraffins หรือ Alkanes) แนฟทีน (Naphthenes หรือ Cycloalkanes) และอะโรมาติก (Aromatic) (ไชยเวชและกฤษดานุรักษ์, 2543) น้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละประเภทจะมีองค์ประกอบและคุณสมบัติแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1.2

ตารางที่ 1.2 คุณสมบัติของน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (Cole, 1994)

ผลิตภัณฑ์	โมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบ	จุดเดือด (°C)	จุดวาบไฟ (°C)	จุดลุกติดไฟตัวเอง (°C)	ช่วงการติดไฟ (% by volume)
น้ำมันเบนซิน	C ₄ ถึง C ₁₄	35 – 200	-30 – -43	250 – 400	1.4 – 7.6
น้ำมันก๊าด และน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน	C ₆ ถึง C ₁₈	150 – 275	40 – 75	227	1.4 – 6.0
น้ำมันดีเซล	C ₆ ถึง C ₂₅	80 – 177	40 – 65	257	1.3 – 6.0

ข้อมูลเบื้องต้นด้านคุณภาพของน้ำมันเชื้อเพลิง (ไทยเวชและกฤษดาอนุรักษ์, 2543; สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง กรมธุรกิจพลังงาน)

น้ำมันเบนซิน (Gasoline) เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงประเภทระเหยได้ง่ายสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์เบนซิน ได้มาจากการผสมน้ำมันเบาที่มีช่วงจุดเดือดประมาณ 35 – 200 องศาเซลเซียส น้ำมันที่นำมาผสมได้แก่ ท็อปส์ (Tops) แนฟธา (Naphtha) รีฟอร์มเมท (Reformate) และสารเติมแต่ง (Additives) มาผสมเข้าด้วยกัน ดังแสดงในตารางที่ 1.3 เพื่อให้ได้คุณภาพตามข้อกำหนด น้ำมันเบนซินที่จำหน่ายในปัจจุบันแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ เบนซินออกเทน 91 และ เบนซินออกเทน 95

น้ำมันก๊าด (Kerosene) เป็นส่วนผสมของไฮโดรคาร์บอนที่มีจุดเดือดอยู่ในช่วง 150 – 300 องศาเซลเซียส ประกอบไปด้วยพาราฟิน แนฟธีน และอะโรมาติก ผสมอยู่ในอัตราส่วนต่างๆ น้ำมันก๊าดที่ดีมีคุณภาพคือ สะอาด ไม่มีตะกอนหรือสิ่งไม่บริสุทธิ์ที่จะทำให้เกิดการอุดตันแกวาล์วและหัวฉีดน้ำมัน ประเทศไทยใช้น้ำมันก๊าดตั้งแต่สมัยรัชกาลที่ 5 แต่เดิมใช้เพื่อจุดตะเกียง แต่ปัจจุบันใช้ประโยชน์หลายประการ เช่น เป็นส่วนผสมสำหรับยาฆ่าแมลง สีทา น้ำมันชักเงา ฯลฯ

น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบินไอพ่น (Jet Fuel) ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องบินไอพ่นของสายการบินพาณิชย์ต่างๆ มีช่วงจุดเดือดเช่นเดียวกับน้ำมันก๊าดแต่คุณสมบัติต่างๆ ของน้ำมันประเภทนี้จะดีกว่า คือ ผลิตด้วยความบริสุทธิ์สะอาดเป็นพิเศษ มีจุดเยือกแข็งที่ต่ำ เพราะเครื่องบินต้องบินในระดับสูงอากาศเย็นจัด น้ำมันจะต้องไหลได้สะดวกตลอดเวลา มีประสิทธิภาพในการต้านการน็อค (Antiknock) หรือค่าออกเทนนัมเบอร์สูง เพื่อให้เหมาะสมกับ

ตารางที่ 1.3 องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเบนซิน (ASTDR, 1995)

Component		Composition (%by weight)	Other possible components
<i>n</i>-alkanes	C ₅	3.0	Octane enhancers methyl t-butyl ether (MTBE) t-butyl alcohol (TBA) ethanol methanol Antioxidants N,N'-dialkylphenylenediamines 2,6-dialkyl and 2,4,6-trialkylphenols butylated methyl, ethyl and dimethyl phenols triethylene tetramine di(monononylphenolate) Metal deactivators N,N'-disalicylidene-1,2-ethanediamine N,N'-disalicylidene-propanediamine N,N'-disalicylidene-cyclohexanediamine Disalicylidene-N-methyl-dipropylene-triamine Ignition controllers tri-o-cresylphosphate (TOCP) Icing inhibitors isopropyl alcohol Detergents/dispersants alkylamine phosphates poly-isobutene amines long chain alkyl phenols long chain alcohols long chain carboxylic acids long chain amines Corrosion inhibitors carboxylic acids phosphoric acids sulfonic acids
	C ₆	11.6	
	C ₇	1.2	
	C ₉	0.7	
	C ₁₀ – C ₁₃	0.8	
total of <i>n</i> -alkanes		17.3	
Branched alkanes	C ₄	2.2	
	C ₅	15.1	
	C ₆	8.0	
	C ₇	1.9	
	C ₈	1.8	
	C ₉	2.1	
	C ₁₀ – C ₁₃	1.0	
total of branched		32.0	
Cycloalkanes	C ₆	3.0	
	C ₇	1.4	
	C ₈	0.6	
total of cycloalkanes		5.0	
Olefins	C ₆	1.8	
total of olefins		1.8	
Aromatics	Benzene	3.2	
	Toluene	4.8	
	Xylenes	6.6	
	Ethylbenzene	1.4	
	C ₃ -benzenes	4.2	
	C ₄ -benzenes	7.6	
	others	2.7	
total aromatics		30.5	

การใช้ในสภาวะที่อุณหภูมิและความดันเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างมาก น้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องบิน ไอพ่นที่ใช้มีอยู่สองกลุ่มใหญ่ๆ คือกลุ่มแรกเป็นพวกน้ำมันก๊าดที่มีคุณสมบัติเหมาะสม นิยมใช้ในสายการบินพาณิชย์ และกลุ่มที่สองเป็นน้ำมันผสมระหว่างน้ำมันก๊าดและแอฟธา และเติมแอลพีจี (LPG) ลงไป เพื่อให้มีกำลังมากและให้ความเร็วสูง นิยมใช้ในการทหารและในการบินเหนือเสียง

น้ำมันดีเซล (Diesel Fuel) เป็นเชื้อเพลิงที่มีราคาถูก ผลิตได้จากน้ำมันกึ่งสำเร็จรูปหลายอย่างนำมาผสมเข้าด้วยกัน จัดเป็นน้ำมันที่มีองค์ประกอบมากที่สุดและมีช่วงจุดเดือดกว้าง 180 – 370 องศาเซลเซียส น้ำมันดีเซลได้จากการผสมน้ำมันต่อไปนี้ คือ น้ำมันก๊าด น้ำมันแก๊สออยล์ทั้งส่วนเบา (Light gas oil) และส่วนหนัก (Heavy gas oil) น้ำมันเบาจากหอกลั่นสุญญากาศ (Light vacuum gas oil) น้ำมันแก๊สออยล์จากกระบวนการปรับปรุงคุณภาพต่างๆ ได้แก่ เทอร์มอลแคร็กเกอร์ (Thermally cracked gas oil) แคทแคร็กเกอร์ (Cat. Cracked light cycle oil) และไฮโดรแคร็กเกอร์ (Hydrocracked gas oil) เป็นต้น องค์ประกอบของน้ำมันดีเซล แสดงในตารางที่ 1.4 น้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้สำหรับเครื่องยนต์ดีเซลจำเป็นต้องใช้น้ำมันที่มีค่าซีเทนสูง เพราะเครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์ที่มีแรงอัดสูง (High compression) และจุดระเบิดเองได้ (Self ignition engine) น้ำมันดีเซลแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ น้ำมันดีเซลหมุนเร็วและน้ำมันดีเซลหมุนช้า

น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ (Gasohol) น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ได้รับการพัฒนาขึ้นเป็นพลังงานทางเลือกเพื่อใช้ทดแทนน้ำมันเบนซิน แก๊สโซฮอลล์ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมากที่จำหน่ายอยู่ในปัจจุบัน ได้แก่ แก๊สโซฮอลล์ E10 ออกเทน 95 แก๊สโซฮอลล์ E10 ออกเทน 91 แก๊สโซฮอลล์ E20 และแก๊สโซฮอลล์ E85 เป็นต้น แก๊สโซฮอลล์เป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีส่วนผสมของน้ำมันเบนซินพื้นฐานกับเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ 99.5% ในอัตราส่วนต่างๆ คือ น้ำมันแก๊สโซฮอลล์ E10 ออกเทน 91 หรือน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ E10 ออกเทน 95 จะประกอบด้วยน้ำมันเบนซินพื้นฐาน 90 ส่วนกับเอทานอล 10 ส่วน ถ้าเป็นน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ E20 จะประกอบด้วยน้ำมันเบนซินพื้นฐาน 80 ส่วนกับเอทานอล 20 ส่วน การผสมแอลกอฮอล์ในน้ำมันเบนซินนั้น เพื่อเป็นการปรับปรุงค่าออกซิเจนเนต (Oxygenates) และออกเทน (Octane) ของน้ำมันเบนซินให้สูงขึ้น ซึ่งสามารถใช้ทดแทนสารเติมแต่งชนิดอื่นได้ เช่น เอ็มทีบีอี (MTBE) เป็นต้น ข้อดีของแก๊สโซฮอลล์ คือ ช่วยให้การเผาไหม้ภายในห้องเครื่องสมบูรณ์ขึ้น และลดปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ที่จะปล่อยออกมาจากท่อไอเสีย และในขณะเดียวกันราคาของน้ำมันแก๊สโซฮอลล์ยังมีราคาต่ำกว่าน้ำมันเบนซิน

ตารางที่ 1.4 องค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันดีเซล (ASTDR, 1995)

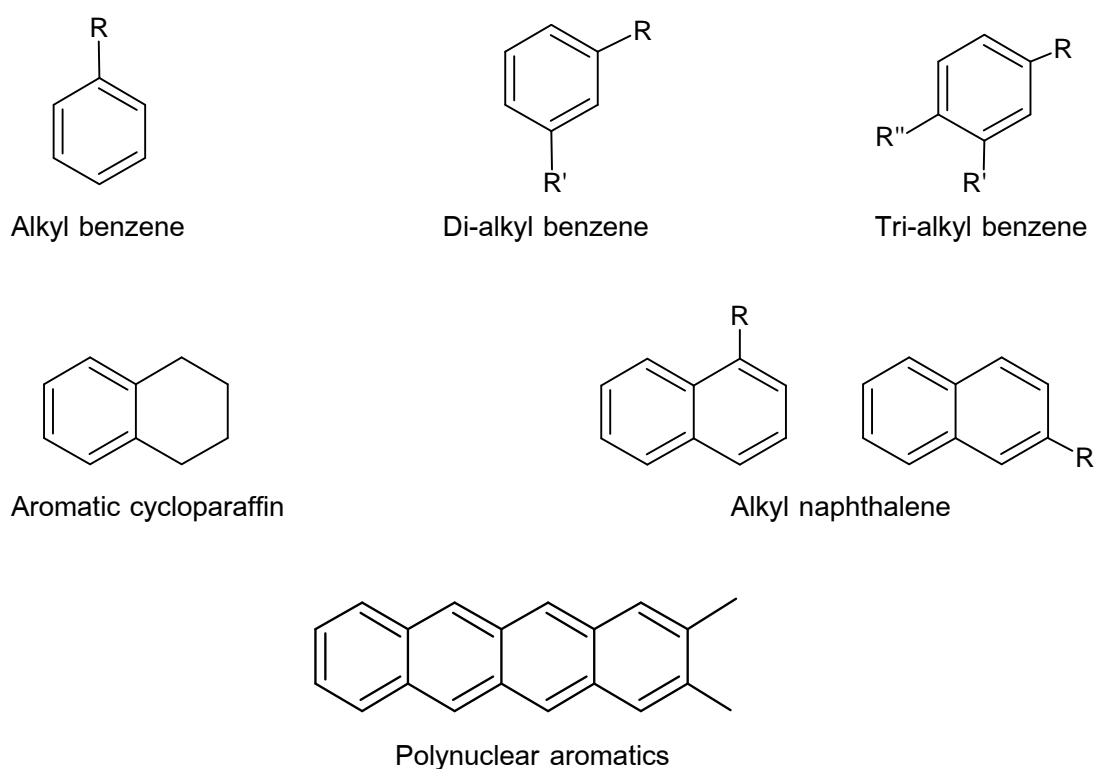
Hydrocarbon type	Volume %	
	Fuel oil no. 1 (Straight-run kerosene)	Fuel oil no. 2
Paraffins (<i>n</i> - and iso-)	52.4	41.3
Monocycloparaffins	21.3	22.1
Bicycloparaffins	5.1	9.6
Tricycloparaffins	0.8	2.3
Total saturated hydrocarbons	79.7	75.3
Olefins	No data	No data
Alkylbenzenes	13.5	5.9
Indans / tetralins	3.3	4.1
Dinaphthenobenzenes / indenenes	0.9	1.8
Naphthalenes	2.8	8.2
Biphenyls / acenaphthenes	0.4	2.6
Fluorenes / acenaphthylenes	No data	1.4
Phenanthrenes	No data	0.7
Total aromatic hydrocarbons	23.6	24.7

การตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในตัวอย่างต่างๆ นั้น นิยมตรวจวิเคราะห์สารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งเป็นไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด เช่น อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มีวงเดี่ยวมักพบในส่วนที่เป็นน้ำมันเบนซินของรถยนต์ ส่วนอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่มี 2 วงแหวนได้แก่ แนฟทาลีน มักจะอยู่ในส่วนที่เป็นน้ำมันก๊าดและน้ำมันดีเซล เป็นต้น

การระบุชนิดของสารเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ในการวางเพลิงจะใช้คุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของสารเชื้อเพลิงแต่ละชนิด ได้แก่ ดัชนีหักเห (Refractive index) ความหนาแน่น (Density) จุดเดือด (Boiling point) และจุดวาบไฟ (Flash point) เป็นต้น โดยการวัดค่าเหล่านี้ของสารเชื้อเพลิงตัวอย่างเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ทราบค่า แล้วนำมาระบุชนิดของสารเชื้อเพลิงตัวอย่าง แต่การเปรียบเทียบโดยวิธีการนี้ก็มีข้อจำกัด คือ สารเชื้อเพลิงมีปริมาณไม่เพียงพอที่จะนำไปทำการวิเคราะห์ได้และการปนเปื้อนของตัวอย่างทำให้การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพทำได้ยาก (DeForest *et al.*, 1983)

1.2.5 สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Aromatic hydrocarbon)

อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างหลักเป็นวงแหวนเบนซีน (Benzene ring) ซึ่งประกอบด้วยคาร์บอน 6 อะตอมต่อกันเป็นวง โดยภายในวงโครงสร้างคาร์บอนจะประกอบด้วยพันธะคู่และพันธะเดี่ยวสลับกันไป อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจัดเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated hydrocarbon) อาจมีเพียงหนึ่งวงแหวนเบนซีนหรือมากกว่า โดยทั่วไปมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำและเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ แต่จะละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆ ได้ 2 ประเภท คือ โมโนไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Monocyclic aromatic hydrocarbons) และโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน (Polycyclic aromatic hydrocarbons) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.4



ภาพประกอบที่ 1.4 สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่สำคัญในน้ำมัน

โมโนไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนเพียงวงเดียว หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งได้ว่าเป็นอนุพันธ์ของเบนซีน (Benzene derivative) ตัวอย่างเช่น โทลูอีน เอซิลเบนซีน และไซลีน เป็นต้น โดยพบมากในส่วนที่เป็นน้ำมันเบนซินรถยนต์ (ไชยเวชและกฤษดาบุรุษ, 2543)

โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ประกอบด้วยวงแหวนเบนซีนตั้งแต่ 2 วงขึ้นไป โดยอาจจัดเรียงตัวเป็นเส้นตรง เป็นมุม หรือเป็นกลุ่ม เช่น แนฟทาลีน (Naphthalene) แอนทราซีน (Anthracene) เตตราซีน (Tetracene) ฟีนแอนทรีน (Phenanthrene) และไตรฟีนีลีน (Triphenylene) เป็นต้น โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเป็นกลุ่มสารเคมีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติหรือเกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ก็ได้ เช่น โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นในระหว่างการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของถ่านหิน น้ำมัน และแก๊ส ชยะ หรือสารอินทรีย์อื่นๆ โพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะพบมากในส่วนน้ำมันก๊าดและดีเซล (ไชยเวชและกฤษดาบุรุษ, 2543)

ชนิดของสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเบนซินแสดงดังตารางที่ 1.5 และน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดจะมีอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในปริมาณที่แตกต่างกัน ดังตัวอย่างแสดงในตารางที่ 1.6

ตารางที่ 1.5 สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเบนซิน (Ito, 2003)

ชนิดของสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเบนซิน	
Benzene	1-Methyl-3- <i>n</i> -propylbenzene
Toluene	1,3-Diethylbenzene
Ethylbenzene	<i>n</i> -Butylbenzene
<i>m</i> -Xylene	1,3-Dimethyl-5-ethylbenzene
<i>o</i> -Xylene	<i>alpha</i> -Methylstyrene
<i>p</i> -Xylene	1-Methyl-2- <i>n</i> -propylbenzene
<i>iso</i> -Propylbenzene	1,2,3-Trimethylbenzene
1-Methyl-3-ethylbenzene	1,4-Dimethyl-2-ethylbenzene
1-Methyl-4-ethylbenzene	1,3-Dimethyl-4-ethylbenzene
<i>iso</i> -Butylbenzene	1,2-Dimethyl-4-ethylbenzene
Styrene	Indane
1-Methyl-2-ethylbenzene	1,3-Dimethyl-2-ethylbenzene
1-Methyl-4- <i>iso</i> -ethylbenzene	Diethylmethylbenzene
1,2,4-Trimethylbenzene	1-Methyl-4- <i>iso</i> -butylbenzene
1,4-Diethylbenzene	1,2,3,4-Tetramethylbenzene
1-Methyl-4- <i>n</i> -propylbenzene	1,2,3,5-Tetramethylbenzene

ตารางที่ 1.5 (ต่อ)

ชนิดของสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเบนซิน	
2,4-Diethyl-1-methylbenzene	4-Methylindane
1-Methyl-4-tert-butylbenzene	Pentamethylbenzene
5-Methylindane	Naphthalene
C11-Aromatic	2-Methylnaphthalene
1,2,4,5-Tetramethylbenzene	1-Methylnaphthalene

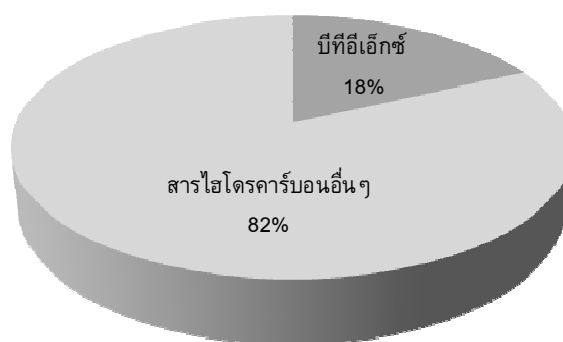
ตารางที่ 1.6 ชนิดและปริมาณของสารอะโรมาติกที่เป็นองค์ประกอบสำคัญในน้ำมันเบนซินและดีเซล

ชนิดของอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน	ปริมาณที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ (% โดยน้ำหนัก)			
	น้ำมันเบนซิน ¹	น้ำมันเบนซิน ²	น้ำมันดีเซล ³	น้ำมันดีเซล ²
Benzene	0.1 – 4.9	1	-	-
Toluene	1 – 25	0 – 35	-	-
Ethylbenzene	< 3	0 – 5	0 – 0.4	-
Xylene (Mixed isomers)	1 – 15	0 – 25	1.2	0 – 1.1
1,2,4-Trimethylbenzene	< 6	0 – 7	29.1	0 – 1.2
Naphthalene	-	0 – 1.1	0.9	0 – 1.0

¹ Material data sheet จากบริษัท Hess Corporation² Material data sheet จากบริษัท Tesoro Petroleum Companies, Inc.³ Material data sheet จากบริษัท AMSOIL

1.2.6 เบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีน (BTEX)

เบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีน หรือเรียกกันทั่วไปว่า บีทีอีเอ็กซ์ (BTEX) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย (Volatile organic compounds; VOCs) ที่อุณหภูมิและความดันปกติ บีทีอีเอ็กซ์สามารถพบได้ทั่วไปในผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมต่างๆ ทั้งในน้ำมันดิบ น้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซล ตัวอย่างเช่น น้ำมันเบนซินประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก โดยมีบีทีอีเอ็กซ์เป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณร้อยละ 18 โดยน้ำหนัก ดังภาพประกอบที่ 1.5 (Christensen and Elton, 1996) คุณสมบัติทางกายภาพของบีทีอีเอ็กซ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1.7



ภาพประกอบที่ 1.5 ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเบนซิน (%weight)

(ที่มา :

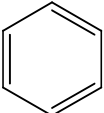
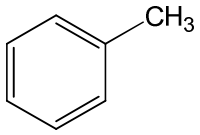
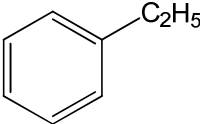
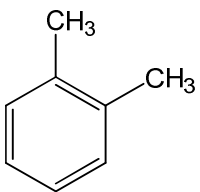
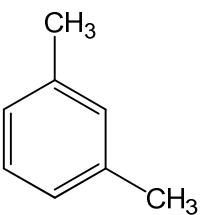
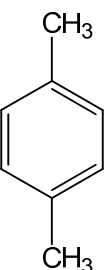
<http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/gwprimer/btex/btex.html> (วันที่สืบค้น 17 มกราคม 2554))

1.2.6.1 เบนซีน (Benzene)

เบนซีน มีสูตรโมเลกุลคือ C_6H_6 เป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างทรงระนาบที่สูงสุดในกลุ่มสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน นิยมใช้เป็นตัวทำละลาย เบนซีนมีจุดเดือด 80.1 องศาเซลเซียส แต่ถ้ามีหมู่แทนที่จะทำให้จุดเดือดเพิ่มสูงขึ้น เบนซีนไม่ทำปฏิกิริยาการเติมแต่จะทำปฏิกิริยาการแทนที่ เพราะโครงสร้างของวงแหวนเบนซีนมีความเสถียรสูง (พงษ์ลิมานนท์, 2547)

เบนซีน ใช้ในการผลิตสารสไตรีนโมโนเมอร์ (Styrene monomer) และสารไซโคลเฮกเซน (Cyclohexane) ซึ่งเป็นวัตถุดิบเพื่อนำไปผลิตชิ้นส่วนอุปกรณ์เครื่องไฟฟ้า ชิ้นส่วนอุปกรณ์รถยนต์ ของเด็กเล่น เฟอร์นิเจอร์ หมึกพิมพ์ กาว กระเป๋าเดินทาง ยางรถยนต์ เส้นใยสังเคราะห์ ยาฆ่าแมลง เม็ดพลาสติกขึ้นรูปและสี เป็นต้น

ตารางที่ 1.7 คุณสมบัติของบีทีอีเอ็กซ์ (Rafson, 1998)

สารประกอบ	โครงสร้างทางเคมี	น้ำหนักโมเลกุล (g/mol)	ความหนาแน่น (g/cm ³)	จุดเดือด (°C)	ความดันไอที่ 25°C (mmHg)	Diffusion coefficient in air (cm ² /s)
เบนซีน (Benzene)		78.1	0.87	80.1	95.2	0.088
โทลูอีน (Toluene)		92.4	0.87	110.7	30.0	0.087
เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene)		106.2	0.87	136.2	10.0	0.075
ออโร-ไซลีน (o-Xylene)		106.2	0.86	139.0	8.0	0.070
เมทา-ไซลีน (m-Xylene)		106.2	0.88	144.4	7.0	0.087
พารา-ไซลีน (p-Xylene)		106.2	0.86	138.4	9.5	0.077

1.2.6.2 โทลูอีน (Toluene)

โทลูอีน มีสูตรโมเลกุลคือ $C_6H_5CH_3$ และมีชื่อเรียกอีกหลายชื่อ เช่น เมทิลเบนซีน (Methylbenzene) หรือเมทิลเบนซอล (Methylbenzol) เป็นต้น เป็นของเหลวที่มีกลิ่นเหมือนเบนซีน ไวไฟ และความเป็นพิษคล้ายกันแต่ฤทธิ์น้อยกว่าเบนซีน จึงมักถูกนำมาใช้แทนเบนซีน

โทลูอีน ใช้เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมยา เคมี ยางและพลาสติก ใช้เป็นวัตถุติดตั้งต้น และเป็นสารตัวกลางในอุตสาหกรรมอินทรีย์เคมีและอุตสาหกรรมการสังเคราะห์เคมี ใช้ในอุตสาหกรรมหนังเทียม เส้นใย การเคลือบกระดาษและหมึกพิมพ์ ใช้เป็นองค์ประกอบในสูตรผสมน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์ ทำสีย้อม สีทาบ้าน เรซิน ทินเนอร์ แลคเกอร์ และใช้เป็นสารขจัดหรือล้างสี (Paint remover) เป็นต้น สารตัวนี้สามารถถูกปลดปล่อยได้ในกระบวนการเผาไหม้เช่น ในควันไอเสียรถยนต์ ควันบุหรี่

1.2.6.3 เอทิลเบนซีน (Ethylbenzene)

เอทิลเบนซีน มีสูตรโมเลกุล คือ C_8H_{10} เป็นของเหลวใสไม่มีสี เอทิลเบนซีนใช้ในอุตสาหกรรมปิโตรเคมี โดยใช้เป็นสารตัวกลาง เช่น ในกระบวนการผลิตสไตรีน (Styrene) จะมีการทำปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีน (Ethylene) และเบนซีน ซึ่งจะได้เอทิลเบนซีน จากนั้นเอทิลเบนซีนจะทำปฏิกิริยา Dehydrogenation บนตัวเร่งปฏิกิริยาและเกิดเป็นสไตรีนโมโนเมอร์ (Styrene monomer) ขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ในการผลิตยางสังเคราะห์และใช้เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันเชื้อเพลิงรถยนต์และเครื่องบิน เอทิลเบนซีนมีปริมาณน้อยในน้ำมันดิบแต่ในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำมันจะทำให้มีปริมาณของเอทิลเบนซีนเพิ่มขึ้นได้

1.2.6.4 ไซลีน (Xylene)

ไซลีน เป็นของเหลวไม่มีสี มีกลิ่นเฉพาะ จัดเป็นของเหลวไวไฟและมีความเป็นพิษ แบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดคือ ออร์โธ-ไซลีน (o-Xylene) เมทา-ไซลีน (m-Xylene) และพารา-ไซลีน (p-Xylene) ไซลีนที่มีจำหน่ายในท้องตลาดเป็นของผสมของไซลีนทั้ง 3 ชนิด เรียกว่า มิกซ์ไซลีนส์ (Mixed xylenes)

ไซลีน ใช้ในอุตสาหกรรมพลาสติก อุตสาหกรรมเส้นใยสังเคราะห์ ใช้เป็นส่วนผสมทินเนอร์หรือตัวทำละลายในหมึก ยาง กาว เรซิน และแลคเกอร์ ใช้เป็นสารขจัดสีในอุตสาหกรรมเคลือบกระดาษ และใช้ในการผสมสารเคมีที่ใช้ทางการเกษตร ใช้เป็นสารล้างคราบน้ำมันในอุตสาหกรรมพลาสติกและอิเล็กทรอนิกส์ ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตกรดเบนโซอิก (Benzoic acid) พทาสิกแอนไฮไดรด์ (Phthalic anhydride) ไอโซพทาสิก (Isophthalic) และกรดเทเรพทาสิก (Terephthalic acid) และใช้ผสมในน้ำมันเชื้อเพลิงของเครื่องยนต์

1.2.6.5 ความเป็นพิษของสารในกลุ่มบีทีอีเอ็กซ์

เบนซีน (Benzene) (คณะกรรมการวิชาการศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ นครราชสีมา, 2550)

เมื่อเข้าสู่ร่างกายจะกระจายตัวในเลือดอย่างรวดเร็วและถูกเมตาโบไลต์ (Metabolized) ที่ตับไปเป็นสารตัวกลาง (Metabolites) เช่น เบนซีนออกไซด์ (Benzene oxide) ฟีนอล (Phenol) กรดมิวโคนิก (Muconic acid) และกรดเฟนิลเมอร์แคปตริก (Phenylmercapturic acid) ซึ่งสารตัวกลางบางตัวจะกลายสภาพไปเป็นสารก่อมะเร็งที่มีความไวต่อความผิดปกติทางพันธุกรรม (Mutation) ในกรณีที่เบนซีนเข้าสู่ร่างกายทางปากจะทำให้เกิดอาการระคายเคืองที่บริเวณสัมผัส และมีอาการเฉียบพลันบางประการเช่น ระคายเคืองผิวหนัง ระคายเคืองทางเดินหายใจ วิงเวียน ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน ส่วนอาการเรื้อรังที่เกิดจากพิษของเบนซีนคือ ง่วง มึนงง ปวดศีรษะ อ่อนเพลีย หมดสติ และอาจตายได้เนื่องจากระบบทางเดินหายใจและการไหลเวียนของโลหิตล้มเหลว และส่งผลต่อระบบเลือดทำลายไขกระดูก ทำให้จำนวนเม็ดเลือดขาวและเกล็ดเลือดต่ำ ก่อให้เกิดภาวะโลหิตจางแบบ Aplastic anemia นอกจากนี้สารเบนซีนยังถูกจัดให้เป็นสารสงสัยว่าก่อมะเร็ง ประเภท I (Suspected carcinogen class I : IARC) โดยก่อให้เกิด Myelogenous leukemia และ Acute myeloblastic leukemia (AML) ซึ่งเป็นมะเร็งเม็ดเลือดขาว และรองลงมา คือ Chronic lymphocytic leukemia และพบว่าเบนซีนยังก่อให้เกิดความผิดปกติของโครโมโซม ทำลายอวัยวะบางอย่างของร่างกาย เช่น ทำลายไต หรือเกิดอาการทางประสาทเป็นต้น

โทลูอีน (Toluene) (ธนเจริญชนภาส)

ความเป็นพิษของโทลูอีนคล้ายกับเบนซีน โดยเข้าสู่ร่างกายทางลมหายใจ เช่นเดียวกัน ความเป็นพิษในลักษณะเฉียบพลันเมื่อร่างกายได้รับโทลูอีนในปริมาณ 200 – 300 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 8 ชั่วโมงจะมีอาการอ่อนเพลีย ระคายเคืองตา ผิวหนังและทางเดินหายใจ ถ้าได้รับโทลูอีนในปริมาณ 600 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 8 ชั่วโมงจะมีอาการอ่อนเพลีย วิงเวียนและปวดศีรษะ คลื่นเหียนอาเจียน กล้ามเนื้อทำงานไม่ประสานกัน ม่านตาขยาย ส่วนความเป็นพิษเรื้อรังจะมีอาการอ่อนเพลีย อาจพบอาการโลหิตจาง ทำลายระบบประสาทส่วนกลาง ทำลายตับ ทำให้มีอาการมึนงง

เอธิลเบนซีน (Ethylbenzene) (ธนเจริญชนภาส)

เมื่อได้รับเอธิลเบนซีนจะก่อให้เกิดอาการระคายเคืองตา น้ำตาไหล มีอาการง่วงเพลียและมีอาการเสพติด อาจก่อให้เกิดระคายเคืองผิวหนัง แดง อักเสบ ระคายเคืองทางเดินหายใจ จมูก คอ มีอาการบีบรัดตัวของปอด

ไซลีน (Xylene) (ชนเจริณฆณภาส)

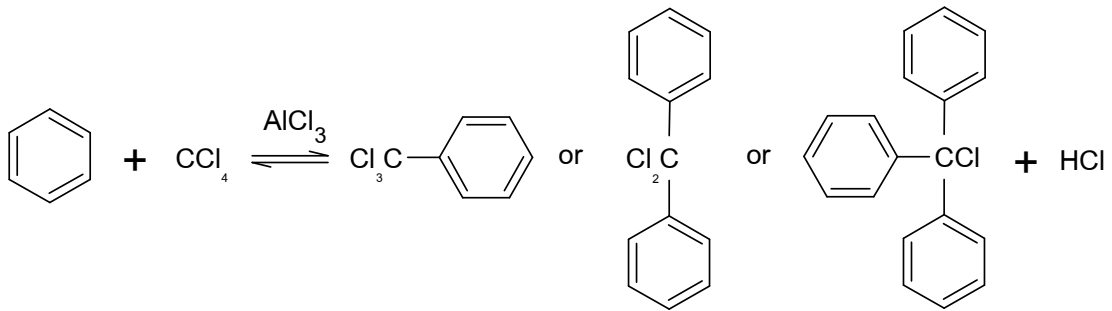
ไซลีนทำให้เกิดการระคายเคืองตาและระบบทางเดินหายใจ จนอาจเกิดอาการปวดบวม คลื่นไส้ อาเจียน ผื่นคันระคายเคืองจนอาจเกิดอาการผื่นคันอักเสบ มีความผิดปกติของระบบประสาทส่วนกลาง ถ้ามีอาการรุนแรงอาจส่งผลทำให้ร่างกายเป็นอัมพาตได้

ปีที่ไอเอ็กซ์เป็นสารที่มีความเป็นพิษ ทำให้ผิวหนังเกิดการระคายเคือง มีผลต่อระบบประสาทส่วนกลาง ระบบหายใจ สามารถรับสัมผัสได้หลายทาง ได้แก่ทางการหายใจ ทางปากโดยการกินและทางผิวหนัง แต่ส่วนใหญ่จะได้รับทางการหายใจมากที่สุด เมื่อสารเหล่านี้เข้าสู่ร่างกายจะกระจายเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิตอย่างรวดเร็ว จากการศึกษาของ Ashley และคณะในปี ค.ศ. 1996 พบว่าสารอินทรีย์ระเหยง่ายมีค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ในเลือด 3 ระดับ คือ 1.6 นาที (Initial half-life) 10 – 60 นาที (Intermediate half-life) และ 2 – 4 ชั่วโมง (Longer half-life) หลังจากนั้นสารจะกระจายไปสู่อวัยวะต่างๆ ได้แก่ สมอง ตับ ไต ไชกระดูก และกล้ามเนื้อ เป็นต้น ถ้าได้รับเป็นเวลานานสารเหล่านี้จะถูกสะสมในเซลล์ไขมัน ร้อยละ 25 – 50 จะถูกขับออกทางลมหายใจ ที่เหลือจะถูกขับออกทางไตปนมากับปัสสาวะประมาณร้อยละ 1 (ต้นศฤงฆารและคณะ, 2548)

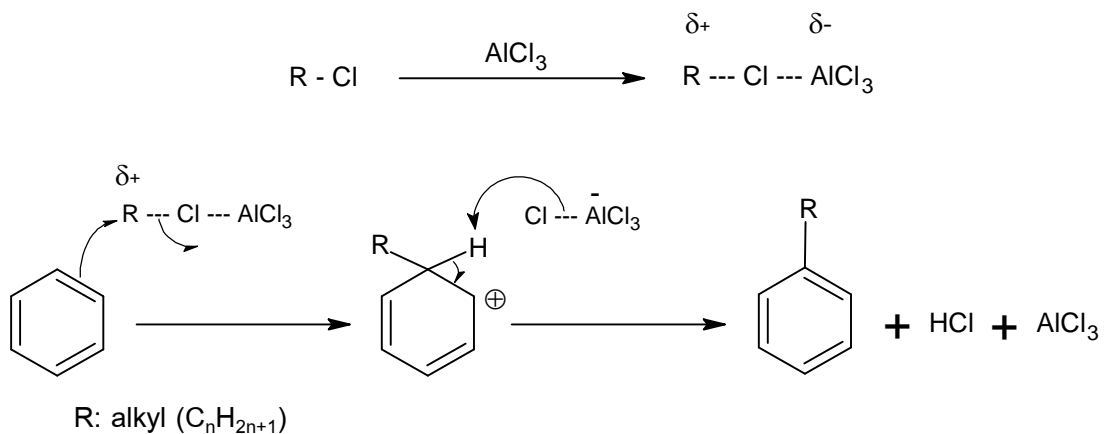
1.2.7 ปฏิกริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชัน (Friedel-Crafts Alkylation)

ปฏิกริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชันถูกค้นพบในปี ค.ศ. 1877 โดยนักวิทยาศาสตร์ Charles Friedel และ James Mason Crafts ซึ่งพบว่า ฮาโลอัลเคน (Haloalkane) จะเกิดปฏิกริยากับเบนซีนโดยมีตัวเร่งปฏิกริยา คือ อะลูมิเนียมเฮไลด์หรือกรดลิวอิสอื่นๆ ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์อัลคิลเบนซีนและไฮโดรเจนเฮไลด์

ปฏิกริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชัน เป็นปฏิกริยาการแทนที่แบบอิเล็กโตรฟิลิก (Electrophilic substitution) แบบหนึ่งดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.6 เป็นปฏิกริยาแทนที่ด้วยหมู่อัลคิล (Alkylation หรือ Friedel-Crafts alkylation) ซึ่งไฮโดรเจนของเบนซีนจะถูกแทนที่ด้วยหมู่ของอัลคิลเฮไลด์ ในการทำปฏิกริยาจะต้องมีกรดลิวอิส เช่น $AlCl_3$, $FeBr_3$, $TiCl_4$, $ZrCl_4$, $ZnCl_2$, $FeCl_3$ และ BF_3 เป็นต้น ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกริยา (Catalyst) ซึ่งจะทำปฏิกริยากับอัลคิลเฮไลด์ให้คาร์โบเนียมไอออน ตัวอย่างกลไกของปฏิกริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชันของเบนซีน แสดงในภาพประกอบที่ 1.7 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชันของเบนซีนเป็นตะกอนที่มีสี ซึ่งสีของตะกอนจะมีความเข้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเบนซีน



ภาพประกอบที่ 1.6 ปฏิกริยาฟรีเทล-คราฟ แอลคิลเลชันของการวิเคราะห์เบนซีน
 (ที่มา : <http://www.epa.gov/swrust1/pubs/esa-ch6.pdf>
 (วันที่สืบค้น 10 ตุลาคม 2551))



ภาพประกอบที่ 1.7 กลไกของปฏิกริยาฟรีเทล-คราฟ แอลคิลเลชันของเบนซีน
 (ที่มา: <http://www.chemhelper.com> (วันที่สืบค้น 10 ตุลาคม 2551))

U.S. EPA (1997) ได้ใช้ปฏิกริยาฟรีเทล-คราฟ แอลคิลเลชันในการวิเคราะห์อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมที่ปนเปื้อนในดินและน้ำ โดยสามารถวิเคราะห์หาอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในดินได้ถึงระดับ 1 – 10 พีพีเอ็ม ส่วนในน้ำสามารถวิเคราะห์ได้ถึง 1 พีพีเอ็ม การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้มีข้อดี คือ การวิเคราะห์ไม่ขึ้นอยู่กับสมบัติการระเหยของสารที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีการปนเปื้อนของน้ำมันมาเป็นเวลานาน อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อจำกัด คือ การวิเคราะห์สีตะกอนโดยการเปรียบเทียบจากแผนภาพมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่ำๆ อาจผิดพลาดได้ และถ้าหากมีการปนเปื้อนของสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนหลายชนิด สีตะกอนที่เกิดจาก

การทำปฏิกิริยาของโมนโอไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีสีเจดส้มอาจถูกบดบังด้วยสีตะกอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนซึ่งมีสีเจดม่วงได้

1.2.8 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างจัดเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญที่สุดในการวิเคราะห์หาสารเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ จากวัตถุพยาน วิธีการเตรียมตัวอย่างที่นิยมใช้กันทั่วไปมี 4 วิธี คือ เฮดสเปซ (Headspace) การกลั่น (Distillation) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction) และ การดูดซับ (Adsorption) (Stauffer *et al.*, 2008) ดังแสดงในตารางที่ 1.8 แต่ละวิธีการมีทั้งข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นการเลือกวิธีการสกัดตัวอย่างจึงต้องทำอย่างรอบคอบ

ตารางที่ 1.8 วิธีการเตรียมตัวอย่าง (Stauffer *et al.*, 2008)

การเตรียมตัวอย่าง	วิธีการ
เฮดสเปซ (Head space)	<ul style="list-style-type: none"> • ไม่ใช้ความร้อน • ใช้ความร้อน
การกลั่น (Distillation)	<ul style="list-style-type: none"> • กลั่นด้วยไอน้ำ • กลั่นแบบลดความดัน • อื่นๆ
การสกัด ด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction)	<ul style="list-style-type: none"> • คาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon disulfide; CS₂) • เพนเทน (Pentane) • ไดเอทิลอีเธอร์ (Diethyl ether) • ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane) • ตัวทำละลายอื่นๆ
การดูดซับ (Adsorption)	<ul style="list-style-type: none"> • แบบไดนามิก (Dynamic mode) <ul style="list-style-type: none"> - ทีแน็กซ์ (Tenax) - ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal) • แบบพาสซีฟ (Passive mode) <ul style="list-style-type: none"> - ถ่านกัมมันต์ - โซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (Solid phase microextraction)

เฮดสเปซ (Head space) เป็นวิธีการเก็บตัวอย่างไอระเหยจากอากาศที่อยู่เหนือตัวอย่างซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะที่ปิดสนิท เป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างที่นิยมนำมาใช้ เนื่องจากมีข้อดีคือ ไม่ทำลายตัวอย่างและสามารถทำได้ง่าย ซึ่ง McCurdy และคณะ (2001) ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างบรรจุลงในกระป๋องที่สะอาดและปิดสนิท จากนั้นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และใช้เข็ม (Syringe) แทงผ่านรูเข้าไปในกระป๋อง ดูดเอาอากาศเข้ามาปริมาตร 1 มิลลิลิตรและฉีดเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatograph) เพื่อทำการวิเคราะห์ เฮดสเปซนี้มีข้อจำกัด คือ ความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์จะถูกเจือจางด้วยอากาศที่อยู่ในภาชนะและการแยกสารในกลุ่มน้ำมันหนัก (Heavy petroleum distillates) จะทำได้ยาก

การกลั่น (Distillation) เป็นวิธีการเก็บตัวอย่างให้อยู่ในรูปของเหลวโดยใช้วิธีการกลั่นแบบธรรมดา ต่อมา มีการปรับปรุงวิธีการนี้ใหม่โดยเปลี่ยนทั้งตัวทำละลายที่ใช้เป็นตัวพา สารไฮโดรคาร์บอนและวิธีการกลั่นในรูปแบบต่างๆ จนในปัจจุบันการเก็บตัวอย่างด้วยวิธีการนี้จึงมีหลายวิธี เช่น การกลั่นด้วยเอทิลีนไกลคอล (Ethylene glycol distillation) การกลั่นด้วยเอทานอล (Ethanol distillation) การกลั่นด้วยเฮกเซน (Hexane distillation) การกลั่นแบบลดความดัน (Vacuum distillation) เป็นต้น

วิธีการกลั่นโดยใช้เฮกเซนเป็นตัวทำละลาย (Picabea *et al.*, 1995) ทำได้โดยทำการรีฟลักซ์เป็นเวลา 4 – 6 ชั่วโมง และวิเคราะห์โดย GC-MS ซึ่งวิธีการนี้สามารถให้ประสิทธิภาพของการสกัดที่สูง ตัวอย่างที่กลั่นได้จะกลับมาอยู่ในรูปของของเหลวซึ่งสามารถนำไปทำการวิเคราะห์ได้โดยการฉีดเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีได้ทันที หรืออาจนำไปทำการวัดความหนาแน่นของของเหลว ดัชนีหักเห (Refractive index) หรืออาจนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรโฟโตเมตริกก็ได้

การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent extraction method) วิธีการนี้สารไฮโดรคาร์บอนจะถูกสกัดออกมาจากตัวอย่างและละลายอยู่ในตัวทำละลาย ซึ่งตัวทำละลายที่ใช้ทั่วไป ได้แก่ คาร์บอนไดซัลไฟด์ เมทิลีนคลอไรด์ เพนเทน และเฮกเซน เป็นต้น จากนั้นสารที่สกัดได้จะถูกนำไประเหยเพื่อให้เหลือปริมาณเพียงเล็กน้อยแล้วจึงฉีดเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อทำการวิเคราะห์

ได้มีการประยุกต์การสกัดด้วยตัวทำละลายกับคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic) ซึ่งคลื่นความถี่สูงอัลตราโซนิก เป็นคลื่นเสียงที่มีความถี่อยู่ในช่วงที่หูของมนุษย์ไม่สามารถได้ยิน ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วง 20 – 400 kHz เมื่อคลื่นเหล่านี้ผ่านน้ำจะทำให้เกิดคลื่นน้ำและฟองอากาศที่เรียกว่า cavitation ซึ่งเป็นการเกิดคลื่นน้ำและฟองอากาศซ้ำแล้วซ้ำอีกในขนาดที่เล็กมากประมาณหนึ่งในหนึ่งล้านเมตร (ขนาดไมครอน) ทำให้ได้พลังงานจำนวนมาก ซึ่งในปัจจุบันก็จึง

มีการนำพลังงานที่เกิดขึ้นนี้ไปประยุกต์ใช้ในการสกัดสารที่ต้องการวิเคราะห์ (สร้อยกล่อมและคณะ, 2550)

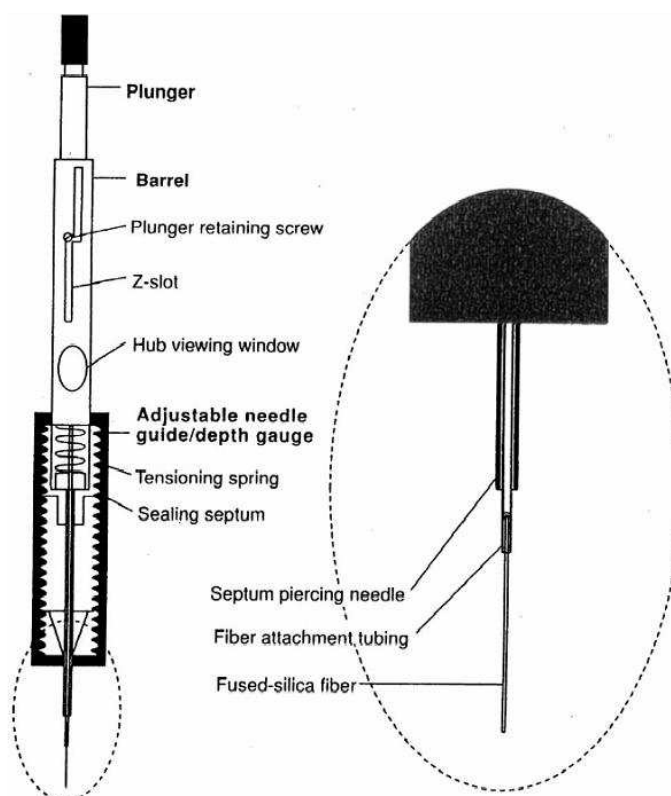
วิธีการสกัดด้วยคลื่นความถี่สูงนี้เป็นวิธีการที่ทำได้ง่ายและทำให้การสกัดมีประสิทธิภาพดีขึ้น เพราะคลื่นอัลตราโซนิกจะช่วยให้ตัวทำละลายแทรกซึมเข้าไปในวัสดุที่นำมาสกัดได้ดียิ่งขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer) เพิ่มสูงขึ้น และยังทำลายพื้นผิวที่บริเวณผนังเซลล์และภายในเซลล์ ทำให้สารที่ต้องการสกัดสามารถออกมาได้ง่ายขึ้น นอกจากนี้ยังมีการนำคลื่นอัลตราซาวนด์มาใช้ร่วมกับสารทำความสะอาด (cleaning solution) เพื่อทำความสะอาดอุปกรณ์ที่ทำความสะอาดได้ยาก หรืออุปกรณ์ที่มีความละเอียดอ่อนมากๆ ให้สะอาดทั่วทุกพื้นผิวของชิ้นงาน อุปกรณ์ที่นิยมนำมาใช้กับเครื่องอัลตราโซนิก ได้แก่ เครื่องมือและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เครื่องมือและเครื่องใช้ในห้องปฏิบัติการ ชิ้นส่วนไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

การดูดซับ (Adsorption) วิธีการนี้สารไฮโดรคาร์บอนจะถูกดูดซับบนตัวดูดซับหรือวัสดุที่เป็นตัวจับไอระเหย ตัวดูดซับที่นำมาใช้กันทั่วไป ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ (Activated charcoal; AC) (Keto and Wineman, 1991; Picabea *et al.*, 1995; Coulson *et al.*, 2000; McCurdy *et al.*, 2001; Almirall and Furton, 2004; Williams *et al.*, 2005; Warnke *et al.*, 2005; Coulson *et al.*, 2008; จิตสัมพันธเวชและคณะ, 2550) ทีแน็กซ์ (Tenax TA®) (Borusiewicz and Zieba-Palus, 2007) คาร์โบแทรพ (Carbotrap 300®) (Borusiewicz and Zieba-Palus, 2007) DFLEX® (Cavanagh *et al.*, 2002; Massey *et al.*, 2002; Cavanagh-Steer *et al.*, 2005; Darrer *et al.*, 2008) เป็นต้น หลังจากนั้นตัวดูดซับจะถูกนำไปคายการดูดซับด้วยวิธีต่างๆ เช่น ความร้อนหรืออาจสกัดด้วยตัวทำละลาย เช่น คาร์บอนไดซัลไฟด์ (Keto and Wineman, 1991; McCurdy *et al.*, 2001; Cavanagh *et al.*, 2002; Massey *et al.*, 2002; Almirall and Furton, 2004; Cavanagh-Steer *et al.*, 2005; Darrer *et al.*, 2008; จิตสัมพันธเวชและคณะ, 2550) ไคโคลโรมีเทน (Coulson *et al.*, 2000; Coulson *et al.*, 2008) แล้วจึงฉีดเข้าสู่เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีเพื่อทำการวิเคราะห์

โซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (Solid phase microextraction; SPME) ได้ถูกเผยแพร่โดย Janus Pawliszyn ในปี 1990 เป็นเทคนิคที่ใช้ในการสกัดและเก็บสารตัวอย่างที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากทั้งในงานทางด้านนิติวิทยาศาสตร์และด้านอื่นๆ เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีความว่องไวในการวิเคราะห์สูง ใช้งานได้ง่ายและรวดเร็ว และไม่จำเป็นต้องใช้ตัวทำละลาย เป็นอุปกรณ์ที่รวมขั้นตอนการเก็บตัวอย่าง (Sampling) การสกัด (Extraction) การเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ (Concentration) และการนำสารเข้าสู่เครื่องมือวิเคราะห์ (Sample introduction) เอาไว้ในขั้นตอนเดียว (Almirall and Furton, 1996) นอกจากนี้ยังสามารถนำไฟเบอร์กลับมาใช้ซ้ำได้อีกหลายครั้ง แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคนี้มีข้อจำกัด คือ

สกัดสารที่ต้องการวิเคราะห์หรือออกมาได้น้อย จึงไม่เหมาะในการนำมาวิเคราะห์ในเชิงปริมาณ มีความแม่นยำปานกลาง เป็นเครื่องมือที่เปราะบางและมีราคาค่อนข้างแพง

การทำงานของโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน คือ สารพอลิเมอร์ที่เคลือบอยู่บนไฟเบอร์จะทำหน้าที่ดูดซับสารตัวอย่าง จากนั้นจึงทำการคายการดูดซับของไฟเบอร์ที่บริเวณส่วนฉีดสาร (Injector port) ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟและทำการวิเคราะห์ได้ทันที ส่วนประกอบของโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.8



ภาพประกอบที่ 1.8 ส่วนประกอบของโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (SPME)

(ที่มา : <http://www.fh-jena.de/~feller/gc-themen.htm>

วันที่สืบค้น 20 เมษายน 2554))

ส่วนที่สำคัญที่สุดของโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน นั่นคือ ไฟเบอร์ที่ใช้ในการดูดซับสารตัวอย่างจะมีสารพอลิเมอร์เคลือบอยู่ซึ่งมีอยู่หลายชนิด ได้แก่ พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (polydimethylsiloxane; PDMS) คาร์บอน/พอลิไดเมทิลไซลอกเซน (carbon/polydimethylsiloxane; CAR/PDMS) พอลิไดเมทิลไซลอกเซน/ไดไวนิลเบนซีน (polydimethylsiloxane/divinylbenzene; PDMS/DVB) และพอลิเอคริลเลท (polyacrylate; PA) เป็นต้น การเลือกใช้งานไฟเบอร์แต่ละชนิดนั้นจะขึ้นอยู่กับสารตัวอย่างที่เราต้องการวิเคราะห์

ตัวอย่างเช่น ไฟเบอร์ชนิดพอลิไดเมทิลซิลอกเซนเหมาะสมกับการใช้วิเคราะห์สารที่ไม่มีขั้ว เช่น สารพวกไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น

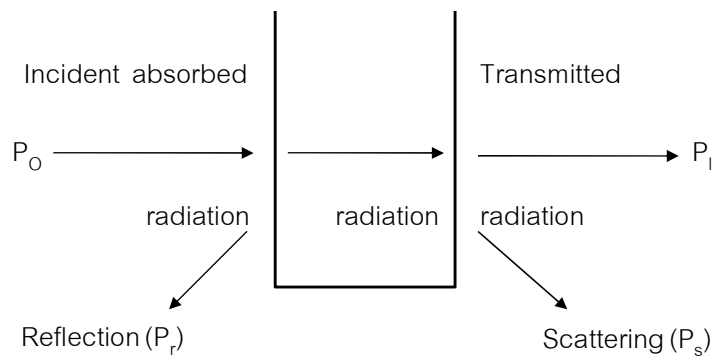
โซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันสามารถมาใช้ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่มีคุณสมบัติระเหยได้ (volatile compounds) ซึ่งอาจอยู่ในรูปของแก๊ส ของแข็งหรือของเหลวก็ได้ ปัจจุบันมีการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้านต่างๆ เช่น การวิเคราะห์หาปริมาณเมทอลในยาสูบ การตรวจหาสารเสพติดชนิดต่างๆ เช่น โคเคน นิโคติน แอมเฟตามีน และเมทแอมเฟตามีนในตัวอย่าง เช่น เลือด เส้นผม หรือปัสสาวะ เป็นต้น การวิเคราะห์สารอินทรีย์ระเหยง่ายในอากาศ รวมทั้งการวิเคราะห์สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในน้ำมันเชื้อเพลิง ตัวอย่างเช่น Ahmad และ Voon (2001) ทำการตรวจวัดสารตัวเร่งที่ใช้ในการวางเพลิงได้แก่ น้ำมันเบนซินและดีเซล โดยใช้วิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันแคปิลารีร่วมกับวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี (SPME-GC) ไฟเบอร์ที่ใช้ในการทดลอง คือ โพลีไดเมทิลซิลอกเซน และได้ทำการออกแบบเครื่องมือสำหรับใช้ในการทดลองเพื่อใช้ในการบรรจุตัวอย่างและใช้ในการหาสภาวะที่เหมาะสมของการวางตำแหน่งของเข็ม SPME ในการดูดซับสารที่ต้องการวิเคราะห์ในสภาวะเฮดสเปซ นอกจากนี้ Menéndez และคณะ (2000) ได้ทำการวิเคราะห์บีบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างน้ำโดยใช้เทคนิค GC-FID และทำการเก็บตัวอย่าง 3 วิธี คือ Static headspace (HS), Solid-phase microextraction (SPME) และวิธี Headspace solid phase microextraction (HS-SPME) โดยใช้ไฟเบอร์ชนิดโพลีไดเมทิลซิลอกเซน ซึ่งวิธีการเก็บตัวอย่างทั้ง 3 วิธีนี้ไม่จำเป็นจะต้องใช้ตัวทำละลายในการสกัด และเป็นวิธีที่รวมขั้นตอนการสกัดและเพิ่มความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์เอาไว้ในขั้นตอนเดียว แม้ว่าวิธี HS และ SPME จะมีหลักการที่แตกต่างกันแต่ผลการวิเคราะห์บีบีทีอีเอ็กซ์และความแม่นยำในการวิเคราะห์ของทั้งสามวิธีก็มีค่าใกล้เคียงกัน ขีดจำกัดของการตรวจวิเคราะห์ (Detection limit) สารด้วยวิธี SPME จะมีค่าอยู่ในช่วง ppb และ ppt ดังนั้นการวิเคราะห์บีบีทีอีเอ็กซ์ด้วยวิธี HS-SPME มีข้อดีคือ มีขีดจำกัดในการตรวจวิเคราะห์ต่ำและใช้เวลาในการวิเคราะห์สั้น ทำให้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างที่มีจำนวนมากๆ ได้อย่างรวดเร็ว

1.2.9 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์

1.2.9.1 อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet-Visible spectroscopy)

อัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี เป็นการศึกษาการดูดกลืนแสงหรือรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลของธาตุหรือโมเลกุล ซึ่งจะอยู่ในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 190 – 800 นาโนเมตร สารที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงดังกล่าว ได้แก่ สารอินทรีย์หรือสารประกอบเชิงซ้อน หรือสารอนินทรีย์ที่มีสีและไม่มีสี สมบัติของสารดังกล่าวนี้มีการนำสมบัติของสารดังกล่าวมาใช้ในการวิเคราะห์ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณอย่างกว้างขวาง เพราะวิธีนี้ให้ความเที่ยง ความแม่นยำ และมีสภาพไว (Sensitivity) สูง เทคนิคการวิเคราะห์นี้บางครั้งนิยมเรียกว่า ยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมตรี

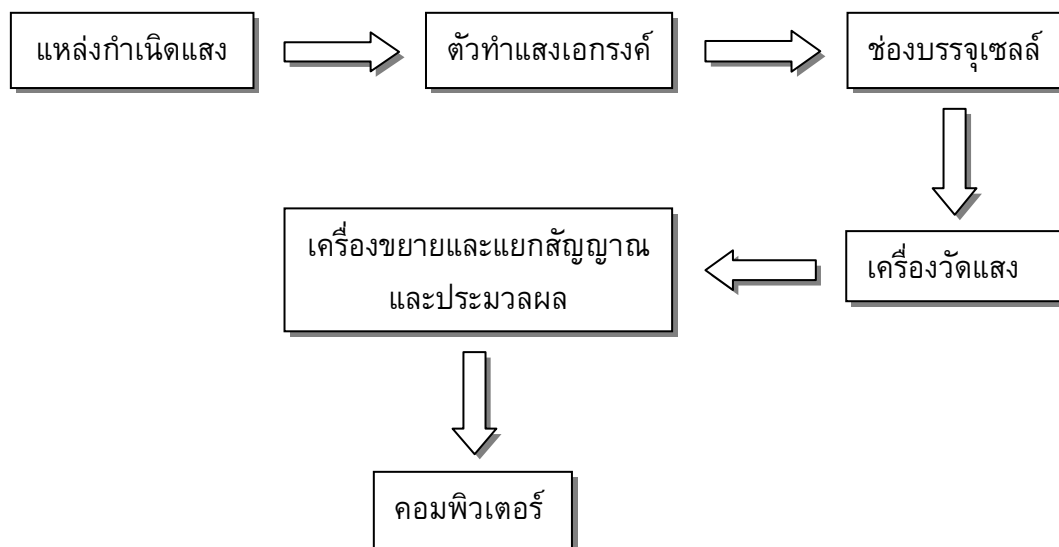
เมื่อลำแสงเคลื่อนที่ผ่านวัตถุใสจะพบว่าแสงบางส่วนถูกดูดกลืน บางส่วนเกิดการสะท้อน บางส่วนเกิดการกระเจิง และบางส่วนเกิดผ่านทะลุออกมา ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.9 ถ้าให้แสงที่ผ่านออกมาผ่านเข้าเครื่องกระจายแสงจะพบว่า สเปกตรัมหายไปส่วนหนึ่ง ส่วนที่ถูกดูดกลืนหรือหายไปนี้ เรียกว่า แอ็บซอร์ปชันสเปกตรัม (Absorption spectrum) ซึ่งพลังงานที่ถูกดูดกลืนไปนั้นจะทำให้โมเลกุลหรืออะตอมเปลี่ยนระดับพลังงานจากสถานะพื้น (Ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (Excited state) (อมรสิทธิ์และเพชรสม, 2535)



ภาพประกอบที่ 1.9 การเกิดอันตรกิริยาของสารเคมีกับการแผ่รังสีของแสง

ส่วนประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ แสดงดังภาพประกอบที่ 1.10 ดังนี้



ภาพประกอบที่ 1.10 ส่วนประกอบของเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

1. **แหล่งกำเนิดแสง (Light source)** จะต้องให้แสงในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา และจะต้องมีความเข้มแสงที่มากเพียงพอด้วย ภายในเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ประกอบด้วย หลอดทิวเทอเรียม (Deuterium lamp) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 185 – 375 นาโนเมตร และหลอดทังสเตน (Tungsten filament lamp) ซึ่งจะให้ความยาวคลื่นอยู่ในช่วงแสงที่มองเห็นได้ ตั้งแต่ 320 – 2500 นาโนเมตร

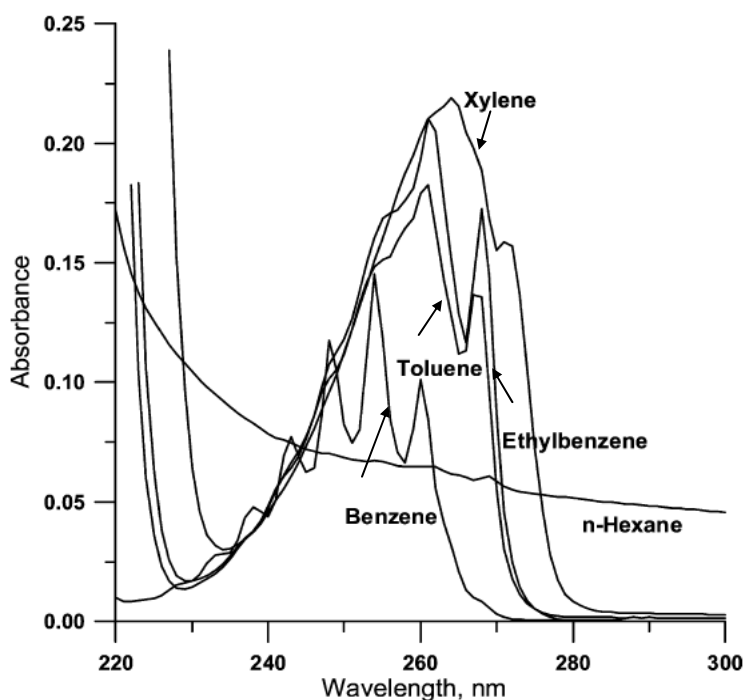
2. **ตัวทำแสงเอกรงค์ (Monochromator)** ทำหน้าที่ควบคุมแสงที่ออกจากแหล่งกำเนิดแสงซึ่งเป็นแสงที่มีหลายๆ ความยาวคลื่น (Polychromatic wavelength) ให้มีเพียงความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic wavelength) ปัจจุบันเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ส่วนใหญ่นิยมใช้เกรตติง (grating)

3. **ช่องบรรจุเซลล์ (Cell compartment)** เป็นที่สำหรับวางเซลล์บรรจุสารตัวอย่างหรือบางครั้งอาจเรียกว่าคิวเวทท์ (Cuvette) ซึ่งมีหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับการใช้งาน รูปแบบที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ เซลล์ที่ทำด้วยแก้วธรรมดา ซึ่งใช้ได้เฉพาะช่วงวิสิเบิลเท่านั้น ส่วนเซลล์ที่ทำด้วยควออตซ์ (Quartz) ใช้ได้ทั้งช่วงยูวีและวิสิเบิล

4. **เครื่องวัดแสง (Radiation detector)** เป็นเครื่องที่ใช้ตรวจและวัดแสง จะต้องมีสภาพไวสูงและมีเสถียรภาพดี มีสัญญาณรบกวนน้อย และราคาถูก ปัจจุบันเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ส่วนใหญ่นิยมใช้ตัวตรวจจับสัญญาณ 2 ชนิด คือ หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube; PMT) และโฟโตไดโอดอาร์เรย์ (Photodiode arrays; PDA)

5. **เครื่องขยายและแยกสัญญาณ และประมวลผล (Signal processor)** สัญญาณที่ได้จากเครื่องวัดแสงจะถูกนำไปเข้ากระบวนการของระบบอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ขยายสัญญาณที่อ่อนให้มีความถี่สูงขึ้น หรืออาจเปลี่ยนสัญญาณ D.C. เป็น A.C. จากนั้นสัญญาณที่ได้ซึ่งเป็นผลของการวิเคราะห์จะถูกแปรผลออกมาโดยอาจต่อเข้ากับดิจิทัลมิเตอร์ เครื่องพิมพ์ หรือคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

เทคนิคนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพโดยนิยมใช้ในการพิสูจน์เอกลักษณ์และการตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของสารได้ เช่น บีทีอีเอ็กซ์สามารถดูดกลืนแสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ตได้ โดยลักษณะการดูดกลืนแสงของบีทีอีเอ็กซ์จะมี λ_{\max} และ ϵ_{\max} เฉพาะตัว ซึ่งค่า λ_{\max} ของสารแต่ละชนิดจะอยู่ในช่วง 240 – 300 นาโนเมตร และค่า ϵ_{\max} จะมีค่าในช่วง 100 – 200 L mol⁻¹ cm⁻¹ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.11



ภาพประกอบที่ 1.11 ลักษณะการดูดกลืนแสงของบีทีเอไอเอ็กซ์ความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ในน้ำ (Larsson and Dasgupta, 2003)

นอกจากนั้นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ สามารถทำได้โดยอาศัยหลักการ คือ สารแต่ละชนิดสามารถดูดกลืนแสงหรือรังสีได้ในช่วงความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและปริมาณการดูดกลืนแสงของสารจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารนั้น ตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert law) ดังสมการ 1.1

สมการ 1.1 :

$$A = \epsilon bC$$

เมื่อ

- A = ค่าการดูดกลืนแสงของสาร (absorbance)
- ϵ = เป็นสมบัติจำเพาะของสารที่ดูดกลืนและวัดที่ความยาวค่าหนึ่ง เรียกว่า molar absorptivity ($L \text{ mol}^{-1} \text{ cm}^{-1}$)
- b = ระยะทางที่แสงผ่านตัวอย่างหรือความกว้างของเซลล์ (cm)
- C = ความเข้มข้นเป็น โมล/ลิตร หรือโมลาร์ (M)

1.2.9.2 คัลเลอร์ิเมตรี (Colorimetry)

หลักการของเทคนิคคัลเลอร์ิเมตรี คือ การวัดการดูดกลืนของสารละลายที่มีสี ซึ่งเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารเคมีที่เติมลงไปกับสารประกอบที่สนใจ ได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสี ซึ่งความเข้มของสีจะเป็นสัดส่วนกับปริมาณของสารประกอบที่มีอยู่ในสารละลายนั้น คัลเลอร์ิเมตรีจัดเป็นเทคนิคทางวิสิเบิลสเปกโทรสโกปี ดังนั้นการดูดกลืนแสงของสารจึงเป็นไปตามกฎของเบียร์-แลมเบิร์ต

U.S. EPA (1997) ใช้เทคนิคนี้ในการหาปริมาณสารไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในตัวอย่างน้ำและดินโดยใช้ปฏิกิริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชัน ซึ่งได้ตะกอนที่มีสี โดยความเข้มของสีตะกอนจะแปรผันตามปริมาณของสารไฮโดรคาร์บอนที่มีอยู่ในสารละลาย วิธีการนี้สามารถวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพโดยการใช้สีของตะกอนเป็นตัวชี้ว่ามีการปนเปื้อนของไฮโดรคาร์บอนและเชิงปริมาณโดยการเปรียบเทียบกับสีตะกอนที่ได้จากตัวอย่างจากแผนภาพสีตะกอนมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ

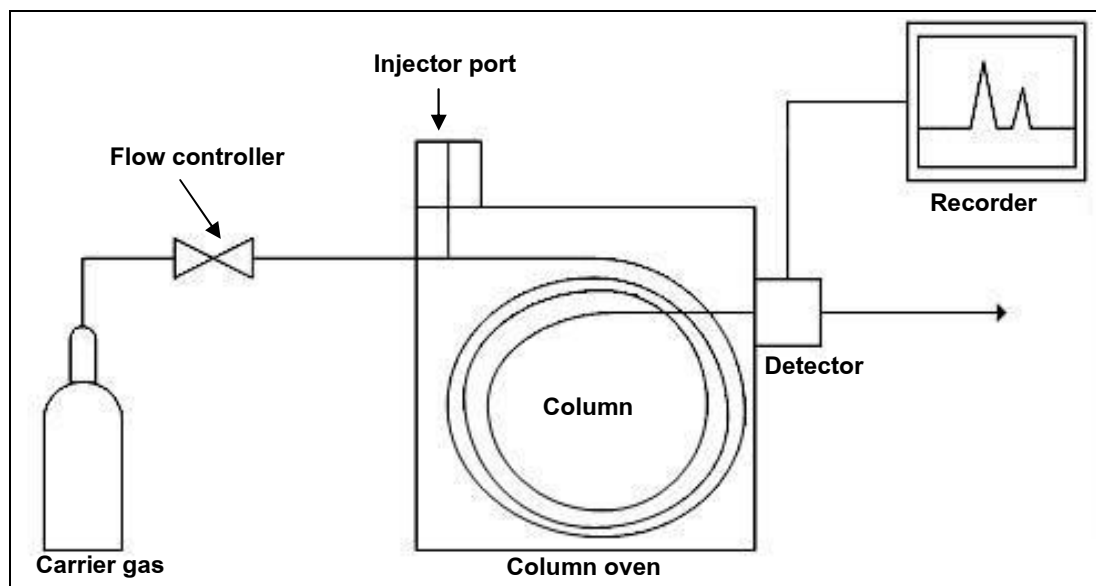
1.2.9.3 แก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดชนิดเปลวไอออไนเซชัน

(Gas Chromatography- flame ionization detector; GC-FID)

แก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatography; GC) เป็นเทคนิคหนึ่งของการแยกทางโครมาโทกราฟี ที่ใช้เฟสเคลื่อนที่เป็นแก๊ส นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางทั้งในวงการอุตสาหกรรม การศึกษาและการวิจัย รวมทั้งยังเป็นเทคนิคที่นิยมนำมาใช้ในห้องปฏิบัติการทางนิติวิทยาศาสตร์เพื่อตรวจวัดและระบุชนิดของสารเชื้อเพลิง ใช้สำหรับการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่เป็นสารผสม ซึ่งเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่มีความไวและจำเพาะเจาะจงกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ และมีความแม่นยำสูงสามารถตรวจวัดสารปริมาณน้อยๆ ได้โดยวัดได้ต่ำถึง 10 พีพีบี (DeForest *et al.*, 1983)

แก๊สโครมาโทกราฟี มีหลักการ คือ การเปลี่ยนสารตัวอย่างผสมให้เป็นไอที่อุณหภูมิหนึ่ง แล้วให้ไอของสารเหล่านั้นผ่านเข้าสู่คอลัมน์ซึ่งบรรจุด้วยเฟสอยู่กับที่ (Stationary phase) โดยอาศัยการพาของเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ซึ่งเป็นแก๊สตัวพา (Carrier gas) จากนั้นองค์ประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างจะแยกออกจากกันโดยอาศัยหลักการ “likes dissolve likes” ระหว่างสารตัวอย่างกับเฟสอยู่กับที่ และถูกตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัด สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจวัดจะถูกบันทึกและแสดงออกมาในรูปของโครมาโทแกรม

ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (ศรีวิบูลย์, 2546) แสดงดัง
ภาพประกอบที่ 1.12



ภาพประกอบที่ 1.12 ส่วนประกอบของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ

(ที่มา :

<http://teaching.shu.ac.uk/hwb/chemistry/tutorials/chrom/gaschrom.htm> (วันที่สืบค้น 10 ตุลาคม 2553))

1. **แก๊สตัวพา (Carrier gas)** แก๊สตัวพาทำหน้าที่เป็นเฟสเคลื่อนที่ ในการพาโมเลกุลของสารตัวอย่างให้เคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่คอลัมน์และตัวตรวจวัด แก๊สตัวพาที่ใช้จะต้องเป็นแก๊สเฉื่อย (เช่น ฮีเลียม ไฮโดรเจน หรือไนโตรเจน) ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยาหรือเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของสารตัวอย่าง

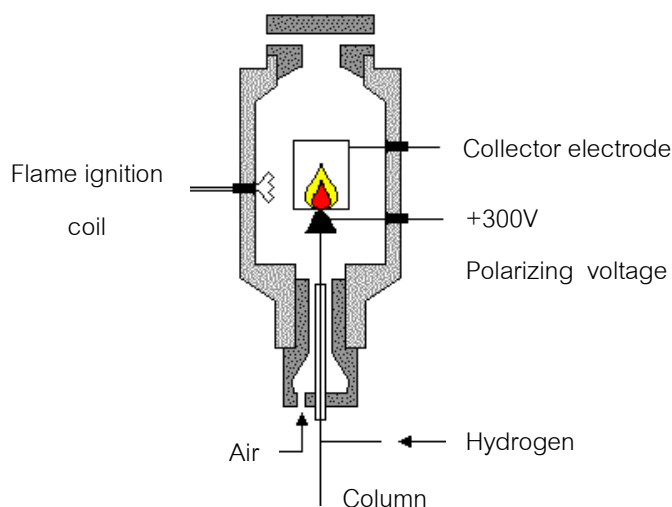
2. **ส่วนฉีดสารตัวอย่าง (Sample introduction/injection system)** เป็นส่วนที่สารตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าสู่บริเวณ injection port ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ซึ่งจะต้องมีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้สารตัวอย่างกลายเป็นไอได้แล้วถูกพาเข้าสู่คอลัมน์ด้วยแก๊สตัวพา การพาตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์มี 5 แบบ คือ Split, Splitless, Purged packed, Cool on-column และ Programmed temperature vaporisation เป็นต้น การเลือกระบบของการพาสารตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณสารตัวอย่างที่ต้องการฉีด ความเข้มข้นของสารตัวอย่าง matrix ในตัวอย่าง ขนาดและชนิดของคอลัมน์ เป็นต้น

3. คอลัมน์ (Column) คอลัมน์เป็นหัวใจของการทำงานด้วยระบบโครมาโทกราฟี เพราะการแยกองค์ประกอบในตัวอย่างให้มีประสิทธิภาพดีได้นั้นจะขึ้นอยู่กับคอลัมน์ คอลัมน์ที่ใช้ในการแยกสารมี 2 ชนิด คือ Packed column และ Capillary column เมื่อทั้งแก๊สตัวพาและสารตัวอย่างผสมเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ เฟสอยู่กับที่ในคอลัมน์จะดึงดูดด้วยแรงดึงดูดไฟฟ้าสถิตย์ตามความเป็นขั้วของสารกับโมเลกุลในสารผสมทำให้องค์ประกอบในสารผสมถูกพาไปด้วยอัตราเร็วที่แตกต่างกัน สารผสมก็จะแยกออกจากกันได้

4. เตาให้ความร้อน (Oven) เป็นส่วนที่ใช้สำหรับบรรจุคอลัมน์และควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ให้มีสภาวะที่เหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ โดยการควบคุมอุณหภูมิของเตามี 2 แบบ คือ Isocratic temperature และ Gradient temperature

5. ตัวตรวจวัด (Detector) ทำหน้าที่ในการตรวจวัดสารที่ถูกชะออกมาจากคอลัมน์แล้วส่งสัญญาณไฟฟ้าไปยังระบบประมวลผล สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ทั้งชนิดและปริมาณขององค์ประกอบต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง ตัวตรวจวัดของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ใช้กันทั่วไป ได้แก่ Thermal conductivity detector (TCD), Flame ionization detector (FID), Electron capture detector (ECD) และ Mass selective detector (MSD) เป็นต้น ตัวตรวจวัดที่เลือกใช้จะต้องมีสภาพไวสูง มีความจำเพาะเจาะจงกับสารที่สนใจ มีความเสถียรและความเที่ยงที่ดี

สำหรับตัวตรวจวัดชนิดฟิล์มไอออไนเซชัน หรือ FID แสดงดังภาพประกอบที่ 1.13 เป็นตัวตรวจวัดที่ถูกนำมาใช้งานอย่างกว้างขวาง ใช้สำหรับการตรวจวัดสารประกอบอินทรีย์ เนื่องจากสารประกอบอินทรีย์ทุกชนิดสามารถเกิดการแตกตัวเป็นไอออนหรือไอออไนซ์ (ionization) ได้ในเปลวไฟซึ่งเป็นแก๊สไฮโดรเจน โดยจะทำให้เกิดกระแสของไอออนระหว่างขั้วอิเล็กโตรด ปริมาณหรือจำนวนอะตอมของคาร์บอนที่เกิดการไอออไนซ์หรือถูกออกซิไดซ์จะแปรผันโดยตรงกับปริมาณกระแสของไอออนที่เกิดขึ้น ซึ่งสัมพันธ์โดยตรงกับปริมาณของสารตัวอย่าง

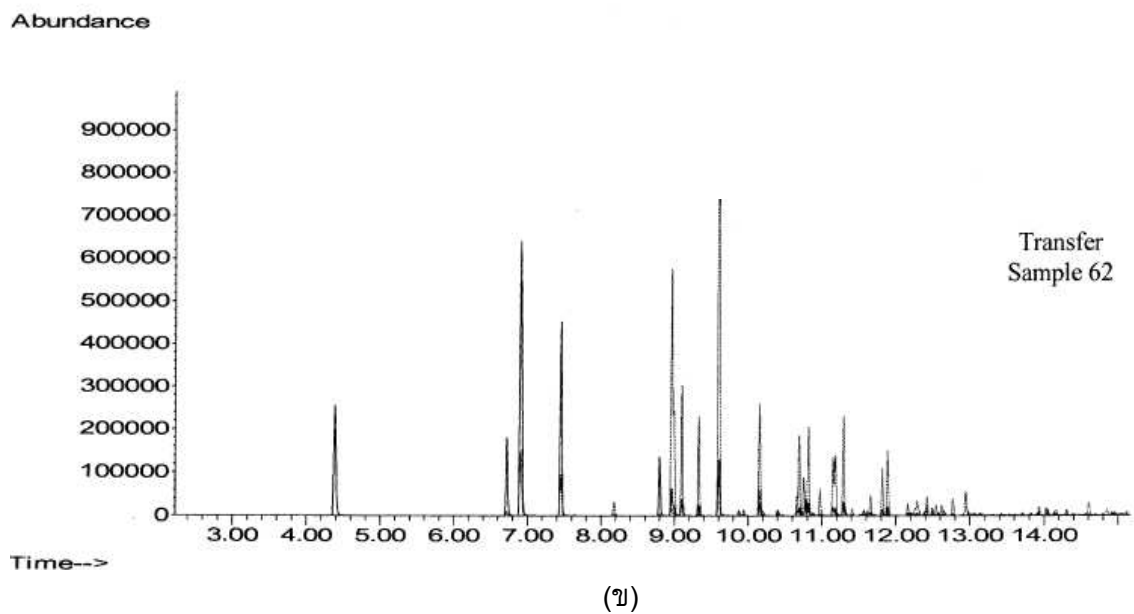
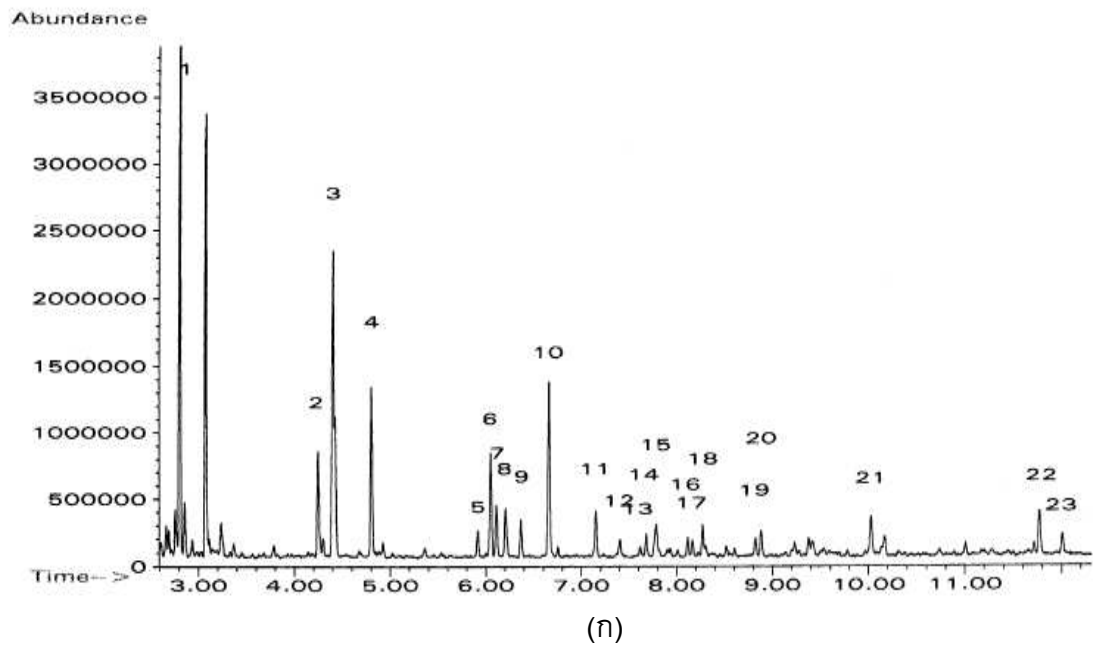


ภาพประกอบที่ 1.13 ส่วนประกอบของตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน

(ที่มา : <http://www.nanotec.or.th/lab/viewTool.php?toolId=21>

(วันที่สืบค้น 8 พฤษภาคม 2554))

การวิเคราะห์ในเชิงคุณภาพด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ทำได้โดยการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการแยกสาร (Retention time) ระหว่างองค์ประกอบที่มีอยู่ในตัวอย่างกับสารมาตรฐาน เวลาที่ใช้ในการแยกสาร คือ เวลาที่สารแต่ละชนิดใช้ในการเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์นับจากเวลาเริ่มต้นของการวิเคราะห์ถึงตำแหน่งเวลาที่ตัวตรวจวัดอ่านค่าสัญญาณสูงสุด โดยเวลาที่ใช้ในการแยกสารจะเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิดในสภาวะการวิเคราะห์เดียวกันทั้งชนิดของคอลัมน์และอุณหภูมิที่ใช้ ตัวอย่างเช่น การวิเคราะห์ชนิดสารเชื้อเพลิงสามารถระบุชนิดได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบโครมาโทแกรม และเวลาที่ใช้ในการแยกสารขององค์ประกอบไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดกับสารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอนที่ทราบชนิด ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.14 โครมาโทแกรมที่แสดงนี้บอกให้ทราบว่าตัวอย่างที่วิเคราะห์เป็นพวกน้ำมันเบนซิน เนื่องจากมีองค์ประกอบไฮโดรคาร์บอน แสดงดังตารางที่ 1.9 ซึ่งเหมือนกับไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเบนซิน



ภาพประกอบที่ 1.14 โครมาโทแกรมของ (ก) น้ำมันเบนซินซึ่งได้จากการเทียบกับโครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานไฮโดรคาร์บอน และ (ข) สารสกัดที่ได้จากตัวอย่างพรมรถยนต์ที่มีการเติมน้ำมันเบนซินลงไปแล้วทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงก่อนการวิเคราะห์ด้วย GC-MS (Cavanagh-Steer *et al.*, 2005)

ตารางที่ 1.9 องค์ประกอบที่แน่นอนในน้ำมันเบนซิน

หมายเลข	องค์ประกอบ	หมายเลข	องค์ประกอบ
1	Toluene	13	1,3-Diethylbenzene
2	Ethylbenzene	14	1-Methyl-3-Propylbenzene
3	<i>m</i> -Xylene, <i>p</i> -Xylene	15	1,4-Diethylbenzene
4	<i>o</i> -Xylene	16	4-Ethyl-1,3-dimethylbenzene
5	Propylbenzene	17	4-Ethyl-1,2-dimethylbenzene
6	1-Ethyl-3-Methylbenzene	18	2-Ethyl-1,3-dimethylbenzene
7	1-Ethyl-4-Methylbenzene	19	1,2,4,5-Tetramethylbenzene
8	1,3,5-Trimethylbenzene	20	1,2,3,5-Tetramethylbenzene
9	1-Ethyl-2-Methylbenzene	21	Naphthalene
10	1,2,4-Trimethylbenzene	22	2-Methylnaphthalene
11	1,2,3-Trimethylbenzene	23	1-Methylnaphthalene
12	Indane		

สำหรับการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี มีหลายวิธีด้วยกันซึ่งสามารถเลือกใช้ได้ให้เหมาะสมกับตัวอย่างได้ เช่น

Normalization method การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สารตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์จะต้องถูกชะออกจากคอลัมน์ทั้งหมด แล้วทำการคำนวณหาปริมาณของสารจากพื้นที่ของแต่ละพีคหรือจากกราฟมาตรฐาน โดย area normalization จะเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับปริมาณของสารเหล่านั้น วิธีการนี้สามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว

External standardization method วิธีการนี้ทำการวิเคราะห์ปริมาณของสารตัวอย่างได้โดยการทำการกราฟมาตรฐาน (Calibration curve) จากสารมาตรฐานที่มีความเข้มข้นต่างกัน และทำการวิเคราะห์สารตัวอย่างที่สภาวะเดียวกันกับสารมาตรฐาน จากนั้นจึงนำค่าที่วิเคราะห์ได้จากสารตัวอย่างมาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

Internal standardization method เป็นเทคนิคที่ใช้หาปริมาณของสารได้ถูกต้องที่สุด โดยการเติมสารมาตรฐานที่เป็นสารต่างชนิดกับสารตัวอย่างที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนลงไปในการวิเคราะห์สารตัวอย่างเพื่อใช้เปรียบเทียบ เทคนิคนี้มีข้อดี คือ สารที่เป็นองค์ประกอบในตัวอย่างทุก ๆ ตัวไม่จำเป็นจะต้องถูกชะออกมาจากคอลัมน์ทั้งหมด เพียงแค่สารที่สนใจและ internal standard ที่เติมลงไปก็สามารถทำการวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้อง และวิธีการนี้ยังช่วยลดความผิดพลาดที่อาจเกิดจากตัวตรวจวัดได้อีกด้วย

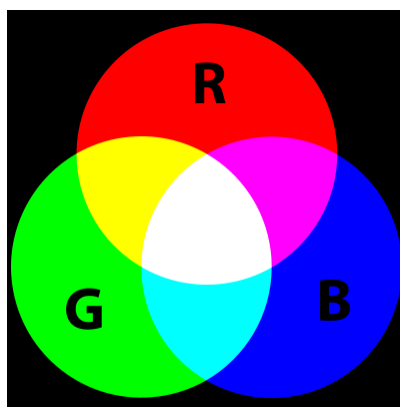
1.2.9.4 การประมวลผลภาพ (Digital Image Analysis) (กาญจนะเดชะ, 2545)

ในกระบวนการประมวลผลภาพดิจิทัล เมื่อระบบได้รับข้อมูลภาพเข้าไปแล้วจะทำการคำนวณและแปลงข้อมูลภาพให้เป็นข้อมูลดิจิทัล (Digital format) ซึ่งการเก็บข้อมูลภาพลงหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์สามารถทำได้โดยการจองหน่วยความจำของเครื่องไว้ในรูปของตัวแปรอะเรย์ โดยค่าในแต่ละช่องของอะเรย์แสดงถึงคุณสมบัติของจุดภาพ (Pixel) และตำแหน่งของช่องอะเรย์เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของจุดภาพ

มาตรฐานของสีที่ใช้ในการประมวลผลภาพมีอยู่หลายระบบขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ แต่โดยทั่วไปแล้วทุกมาตรฐานจะมีแนวคิดเดียวกันคือ การแทนจุดสีด้วยจุดที่อยู่ภายในสเปซ (Space) 3 มิติ โดยจะมีแกนอ้างอิงสำหรับจุดสีนั้นในสเปซ ซึ่งแต่ละแกนจะมีความเป็นอิสระต่อกัน สำหรับระบบสีที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือระบบสี RGB และระบบ Grayscale

ระบบ RGB

ระบบสี RGB เป็นโมเดลที่นิยมใช้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ทั่วไป รวมทั้งอุปกรณ์ต่างๆ สีในระบบสี RGB เป็นระบบสีที่เกิดจากการรวมกันของแม่สีทางวิทยาศาสตร์ 3 สี ได้แก่ สีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.15 โดยสีทั้งสามจะรวมกันในแบบ Additive คือ ถ้าไม่มีสีใดเลยจะมองเห็นเป็นสีดำ และในทางกลับกัน หากมีครบทุกสีจะมองเห็นสีขาว จึงทำให้เกิดสีใหม่ขึ้นซึ่งมีจำนวนมากถึง 16.7 ล้านสี ทำให้ภาพที่ได้มีสีใกล้เคียงกับสีที่สายตามนุษย์มองเห็นปกติ การประมวลผลภาพด้วยระบบสีนี้ค่าสีที่ได้จะมี 4 ค่าสี คือ R (สีแดง) G (สีเขียว) B (น้ำเงิน) และ RGB โดยแต่ละสีจะมีค่าตั้งแต่ 0 – 255



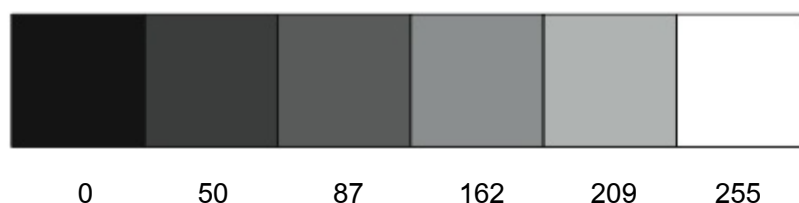
ภาพประกอบที่ 1.15 ระบบสี RGB

(ที่มา : <http://printmail.oregonstate.edu/vocab-p-t>

(วันที่สืบค้น 9 ธันวาคม 2553))

ระบบ Grayscale

ระบบ Grayscale คือ ระบบที่มีค่าของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินเท่ากัน ภาพที่ได้จึงออกมาในโทนสีขาวดำ โดยสามารถแบ่งความละเอียดของสีได้ถึง 256 ระดับ ซึ่งความเข้มของสี (Intensity) จะมีค่าตั้งแต่ 0 – 255 โดยที่สีดำจะเป็นส่วนที่มีความเข้มของสีน้อย และสีขาวจะมีความเข้มของสีมาก ดังแสดงในภาพประกอบที่ 1.16



ภาพประกอบที่ 1.16 ระบบสี Grayscale

(ที่มา : <http://printmail.oregonstate.edu/vocab-p-t>

(วันที่สืบค้น 9 ธันวาคม 2553))

การแปลงระบบสี RGB เป็นระบบสี Grayscale นั้นจะทำการคิดคำนวณค่าในแต่ละจุดสีโดยแทนค่า RGB ทั้งสามค่าใหม่ตามสมการ 1.2 (ขยันกิจ, 2552)

สมการ 1.2 :

$$Y = 0.3 * R + 0.59 * G + 0.11 * B$$

- เมื่อ
- Y คือ ค่าสีของระดับสีเทาในระบบสี Grayscale หรือค่าความเข้มของสี
 - R คือ ค่าของสีแดง
 - G คือ ค่าของสีเขียว
 - B คือ ค่าของสีน้ำเงิน

ปัจจุบันเทคโนโลยีการประมวลผลภาพสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ ได้ดี อาทิเช่น การแพทย์ สารสนเทศภูมิศาสตร์ สังคมศาสตร์ อุตสาหกรรม ฯลฯ ซึ่งทำให้การวิเคราะห์ภาพมีความแม่นยำและรวดเร็วถูกต้องกว่าการวิเคราะห์ภาพจากการใช้สายตาเพียงอย่างเดียว ตัวอย่างการนำเอาการประมวลผลภาพด้วยคอมพิวเตอร์มาใช้ในการงานวิจัย เช่น การทำระบบตรวจสอบไบโอฟิล์มของเชื้อ *Listeria monocytogenes* ที่ปรากฏอยู่บนพื้นผิวสายพานที่ใช้ในการลำเลียงผลิตภัณฑ์อาหารในโรงงานอุตสาหกรรมไก่ในประเทศไทย โดยการถ่ายภาพเชื้อ *Listeria monocytogenes* ที่ผ่านการย้อมสีเชื้อด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบเรืองแสง

(Fluorescence microscope) จากนั้นนำภาพถ่ายเข้าสู่และระบบจะทำการปรับแต่งภาพให้มีความคมชัดด้วยเทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image processing) และคำนวณหาปริมาณเชื้อแบคทีเรียออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของเชื้อต่อพื้นที่ภาพ (จินตนา ยากานนท์และบุญศิริ, 2552) และการนำเทคโนโลยีการประมวลผลภาพมาใช้ในงานวิจัยทางการแพทย์ เช่น ในการวินิจฉัยโรคมะเร็งเม็ดเลือดขาว ซึ่งการวิเคราะห์ในปัจจุบันนิยมใช้เครื่องวิเคราะห์และแยกเซลล์แบบอัตโนมัติ (Flow metry) ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์โรคได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ แต่มีข้อจำกัด คือ มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ซึ่งโรงพยาบาลบางแห่งไม่สามารถทำการตรวจด้วยวิธีนี้ได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการพัฒนาโปรแกรมในการแยกชนิดของมะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิดเฉียบพลันบนภาพถ่ายสเมียร์เลือดโดยอาศัยเทคนิคการประมวลผลภาพ ซึ่งสามารถแยกประเภทเซลล์เม็ดเลือดขาวได้ 2 ประเภท คือ ลิมโฟบลาสต์ (Lymphoid) และไมยลอยด์ (Myeloid) ออกจากกันได้ และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์หลังได้ (เหล่าวานิชย์, 2552)

1.2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การสืบสวนเกี่ยวกับสาเหตุเพลิงไหม้มักกระทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากวัตถุพยานที่สามารถเชื่อมโยงไปถึงตัวของผู้กระทำผิดได้นั้นมักจะไม่หลงเหลืออยู่ในสถานที่เกิดเหตุในการตรวจสอบสถานที่เกิดเหตุเจ้าหน้าที่จะตรวจหาวัตถุพยานที่มีลักษณะเป็นรูป รูน และสามารถดูดซับสารได้ซึ่งอยู่ใกล้กับจุดต้นเพลิง เช่น กระดาษ พรหม เศษผ้า หนังสือ เป็นต้น (DeForest *et al.*, 1983) เพื่อนำมาวิเคราะห์สาเหตุเพลิงไหม้ เมื่อเจ้าหน้าที่ได้ตั้งสมมุติฐานขึ้นมาว่าเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้นนั้นมาจากการนำสารเชื้อเพลิงมาใช้ วิธีการตรวจสอบสมมุติฐานที่สำคัญที่สุดวิธีหนึ่ง คือ การตรวจวิเคราะห์วัตถุพยานทางห้องปฏิบัติการ โดยทั่วไปมักจะตรวจหาสารตัวเร่ง (Ignitable liquid residues; ILR) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารเชื้อเพลิง

สารเชื้อเพลิงหลายๆ ชนิดมักถูกนำมาใช้ในการวางเพลิง ส่วนมากเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการกลั่นปิโตรเลียมดิบ ที่พบมากที่สุด คือ น้ำมันเบนซินประมาณร้อยละ 80 นอกจากนี้ยังพบว่าการนำน้ำมันก๊าด ทินเนอร์ และแลคเกอร์มาใช้วางเพลิงอีกด้วย (Bennett and Hess, 2006) การตรวจหาสารเชื้อเพลิงที่เหลืออยู่ในสถานที่เกิดเหตุ สามารถตรวจสอบเบื้องต้นได้โดย

- Olfactory detection เป็นการวิเคราะห์กลิ่นของสารเชื้อเพลิงโดยการสูดดมกลิ่นของสารเชื้อเพลิงระเหยได้ง่ายที่อาจเหลืออยู่ เช่น น้ำมันเบนซิน การวิเคราะห์ด้วยวิธีการนี้อาจถูกบดบังจากกลิ่นของวัสดุอื่นๆที่ถูกเผาไหม้ในสถานที่เกิดเหตุ
- Catalytic combustion detectors หรือที่เรียกกันทั่วไปว่า Sniffer เป็นวิธีการที่นิยมนำมาใช้ตรวจหาสารเชื้อเพลิง ตัวตรวจวัดชนิดนี้สามารถพกพาได้ มีราคาไม่สูง และไวต่อสารที่ระเหยได้ง่ายพอสมควร

ประมาณ 20 ปีที่ผ่านมา การตรวจวิเคราะห์หาสารเชื้อเพลิงจากเพลิงไหม้นั้นทำได้โดยการตรวจวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกันของสารเชื้อเพลิงแต่ละชนิด เช่น ค่าดัชนีหักเห (Reflective index) ความหนาแน่น (Density) จุดเดือด (Boiling point) และจุดวาบไฟ (Flash point) ของสารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในเชื้อเพลิงหรือของเหลวที่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ และนำค่าเหล่านี้มาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเพื่อระบุชนิดของเชื้อเพลิงที่นำมาใช้ แต่วิธีการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพนี้อาจมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นได้ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการสูญเสียตัวอย่างเนื่องจากเกิดการระเหย ปริมาณตัวอย่างมีไม่เพียงพอสำหรับตรวจวิเคราะห์ และเกิดการปนเปื้อนของตัวอย่างที่เหลืออยู่ในเพลิงไหม้ (DeForest *et al.*, 1983)

มีการประยุกต์เทคนิคการเก็บตัวอย่างแบบพาสซีฟ (Passive sampling) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงหรือสารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ได้แก่ การใช้เทคนิคการดูดซับแบบพาสซีฟ (Passive adsorption) ด้วยถ่านกัมมันต์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์น้ำมันเบนซินที่ปนเปื้อนอยู่บนพรหมของยานพาหนะ และทำการคายสารที่ถูกดูดซับด้วยตัวทำละลายผสมของคาร์บอนไดซัลไฟด์ และ 1%(v/v) เฮกซะโนน (2-hexanone) (Cavanagh-Steer *et al.*, 2005) การตรวจวัดบีทีอีเอ็กซ์จากอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ โดยอาศัยการดูดซับด้วยเม็ดคาร์บอน (จิตสัมพันธเวชและคณะ, 2550) และการตรวจพิสูจน์คราบน้ำมันเชื้อเพลิงโดยเปรียบเทียบตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) และ Charcoal strip (DFLEX) เพื่อใช้ในการดูดซับไอระเหยของน้ำมันเบนซิน จากนั้นจึงทำการสกัดตัวดูดซับด้วยไดคลอโรมีเทน (ระรื่นรัมย์, 2551)

ในงานวิจัยของ Cavanagh-Steer และคณะ (2005) ได้ทำการศึกษาสาเหตุที่น้ำมันเบนซินจากภายนอกจะเกิดการปนเปื้อนมาสู่พรมภายในยานพาหนะและช่วงเวลาที่ยังคงตรวจพบน้ำมันที่ปนเปื้อนเหล่านั้น โดยใช้การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) และคายการดูดซับด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์ แล้วจึงนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS จากการศึกษาพบว่า การปนเปื้อนของน้ำมันอาจผ่านมาทางรองเท้าของผู้ขับขี่หรือผู้โดยสาร ซึ่งการตรวจหาน้ำมันที่ปนเปื้อนอยู่บนพรมนี้จะต้องตรวจวัดภายใน 24 ชั่วโมง – 1 สัปดาห์ หากสามารถตรวจพบน้ำมันเบนซินที่ปนเปื้อนอยู่บนพรมหลังจากผ่านไป 24 ชั่วโมง แสดงว่าน้ำมันเบนซินที่ปนเปื้อนในตอนเริ่มต้นมีปริมาณไม่น้อยกว่า 500 ไมโครลิตร ส่วนช่วงเวลาที่สามารถตรวจพบน้ำมันเบนซินได้นั้น พบว่า หากมีน้ำมันเบนซินปนเปื้อนอยู่ในปริมาณน้อย (น้อยกว่า 100 ไมโครลิตร) จะไม่สามารถตรวจพบได้เมื่อเวลาผ่านไป 24 ชั่วโมง แต่ถ้ามีปริมาณมาก (แต่ไม่เกิน 1,000 ไมโครลิตร) จะสามารถตรวจพบได้ในช่วงเวลาตั้งแต่ 24 ชั่วโมง ถึง 4 สัปดาห์ โดยการวิเคราะห์จะทำการเปรียบเทียบโครมาโทแกรมของสารสกัดที่ได้จากตัวอย่างพรมที่มีการเติมน้ำมันเบนซินลงไปแล้วตั้งทิ้งไว้ที่เวลาต่างๆ กับโครมาโทแกรมของสารมาตรฐานไฮโดรคาร์บอน

มีการเปรียบเทียบวิธีการดูดซับสารบีทีอีเอ็กซ์ด้วยเม็ดคาร์บอนแล้วทำการชะล้างด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ กับวิธีที่ใช้กลไกการแบ่งละลาย (Partition) โดยใช้เฮกซะเดคเคนหยดลงบนกระดาษกรองเพื่อใช้จับไอระเหยบีทีอีเอ็กซ์ และนำสารสกัดที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-FID จะพบว่า วิธีการดูดซับด้วยสารเม็ดคาร์บอนตรวจวัดบีทีอีเอ็กซ์ได้ที่มีความเข้มข้นต่ำสุดเท่ากับ 2 ไมโครกรัม ซึ่งมีค่าความไวในการตรวจวัดที่น้อยกว่าวิธีที่ใช้กลไกการแบ่งละลายซึ่งสามารถตรวจวัดบีทีอีเอ็กซ์ได้ในระดับต่ำถึง 2 นาโนกรัม (จิตสัมพันธเวชและคณะ, 2550)

นอกจากนั้นยังมีการเปรียบเทียบตัวดูดซับ 2 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ และ Charcoal strip (DFLEX) เพื่อใช้ในการดูดซับไอระเหยของน้ำมันเบนซิน จากนั้นจึงทำการสกัดด้วยไดคลอโรมีเทนและนำไปตรวจพิสูจน์ด้วยเทคนิค GC-FID ซึ่งจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการสกัดด้วยถ่านกัมมันต์เท่ากับร้อยละ 67.76 และ Charcoal strip เท่ากับร้อยละ 69.74 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นถ่านกัมมันต์สามารถนำมาใช้เป็นตัวดูดซับน้ำมันเชื้อเพลิงแทน Charcoal strip ได้ เพื่อเป็นการลดต้นทุนในการตรวจพิสูจน์น้ำมันเชื้อเพลิง (ระรื่นรัมย์, 2551)

ปัจจุบันเทคนิคที่ใช้ในการตรวจวิเคราะห์และระบุชนิดของสารเชื้อเพลิงในด้านนิติวิทยาศาสตร์ มีหลายเทคนิค ซึ่งเทคนิคโครมาโทกราฟีเป็นเทคนิคที่นิยมใช้ เช่น การวิเคราะห์หาสารเชื้อเพลิงจากวัตถุพยานที่เหลือจากเพลิงไหม้โดยใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่ต่อเรียงกัน 2 ตัว (Two-dimensional gas chromatograph; GC×GC) ซึ่งสารตัวอย่างจะถูกแยกด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีทั้งสองเครื่องอย่างเป็นอิสระต่อกัน และสามารถแยกองค์ประกอบที่ผสมกันอยู่ได้มากกว่า 100 ชนิด (Frysjer and Gaines, 2002) การวิเคราะห์น้ำมันเบนซินที่ปนเปื้อนอยู่บนพรมของยานพาหนะด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (Cavanagh-Steer *et al.*, 2005) การตรวจวัดสารบีทีอีเอ็กซ์จากอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟแล้วทำการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-FID (จิตสัมพันธเวชและคณะ, 2550)

นอกจากการวิเคราะห์ตัวอย่างทางนิติวิทยาศาสตร์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีแล้ว ยังมีเทคนิคอื่นๆ ที่สามารถนำมาใช้ในวิเคราะห์ตัวอย่าง เช่น

เทคนิคฟูริเออร์ทรานสฟอร์มไอออนไซโคลตรอนเรโซแนนซ์แมสสเปกโตรเมตรี (Fourier-transform ion cyclotron resonance mass spectrometry; FT-ICR MS) ใช้ในการแยกผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมชนิดต่างๆ โดยใช้การวิเคราะห์แมสสเปกตรัมที่มีความละเอียดสูง (High resolution) ในลักษณะที่เป็นลายพิมพ์ (Fingerprint) ของผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมแต่ละชนิด (Rodgers *et al.*, 2001)

เทคนิคไอโซโทปเรโซแนนซ์แมสสเปกโตรเมตรี (Isotope ratio mass spectrometry; IRMS) ใช้ในการเปรียบเทียบตัวอย่างเชื้อเพลิงได้อย่างชัดเจนและนำไปประยุกต์ใช้ในการแสดงลักษณะพิเศษของตัวอย่างน้ำมันเบนซิน (Smallwood *et al.*, 2001; Smallwood *et al.*, 2002; Jasper *et al.*, 2006; Benson *et al.*, 2006)

เทคนิคอัลตราไวโอเลต-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (Ultraviolet-Visible spectroscopy) ใช้วิเคราะห์ไอระเหยจากตัวอย่างที่ถูกเผาไหม้ ซึ่งเป็นวิธีที่รวดเร็ว ราคาถูก ใช้งานได้ง่ายและมีความไวในการวิเคราะห์สูง (McCurdy *et al.*, 2001) และเทคนิคทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (Thin-layer chromatography; TLC) ใช้แยก ระบุชนิดและเปรียบเทียบสีที่ถูกนำมาผสมเพื่อใช้เติมในน้ำมันเบนซิน (DeForest *et al.*, 1983)

เทคนิคทินเลเยอร์โครมาโทกราฟีและไฮเปอร์ฟอร์แมนส์ทินเลเยอร์โครมาโทกราฟี (Thin-layer chromatography / High performance thin-layer chromatography; TLC/HPTLC) ใช้ในการตรวจวัดสารปิโตรเลียมที่มีอยู่ในน้ำมันก๊าด น้ำมันดีเซล และน้ำมันเบนซินซึ่งยังคงเหลืออยู่ในตัวอย่างที่ถูกเผาไหม้ไปเพียงบางส่วน (Dhole *et al.*, 1995)

1.3 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันในการวิเคราะห์สารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน
2. ศึกษาตัวรบกวนและผลที่เกิดขึ้นจากตัวรบกวนเมื่อทำการทดลองด้วยปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันในสภาวะที่เหมาะสม
3. ศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างผ้าเพื่อให้มีความเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์สารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน
4. ประยุกต์ใช้วิธีอย่างง่ายในการวิเคราะห์สารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนในรูปแบบบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 สารเคมี

สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศ
1. คาร์บอนเตตระคลอไรด์ (Carbon tetrachloride)	AR grade	Merck	เยอรมัน
2. คาร์บอนไดซัลไฟด์ (Carbon disulfide)	AR grade	Schwefelkohlenstoff	เยอรมัน
2. เอทานอล (Ethanol)	AR grade	Merck	เยอรมัน
3. อะลูมิเนียมคลอไรด์ (Anhydrous aluminum chloride)	AR grade	JHD	จีน
4. สารมาตรฐานเบนซีน (Benzene)	AR grade	JHD	จีน
5. สารมาตรฐานโทลูอีน (Toluene)	AR grade	PA	สเปน
6. สารมาตรฐานเอทิลเบนซีน (Ethylbenzene)	AR grade	Fluka	สวีตเซอร์แลนด์
7. สารมาตรฐานไซลีน (Mixture of isomers)	AR grade	PA	สเปน
8. เฮพเทน 95% (<i>n</i> -heptane)	AR grade	Lab Scan Analytical Sciences	ไทย
9. เฮกซะเดคเคน (<i>n</i> -hexadecane)	AR grade	Fluka	สวีตเซอร์แลนด์
10. แนฟทาลีน (Naphthalene)	AR grade	BDH	จีน
11. ไอโซออกเทน 99.5% (Isooctane)	AR grade AR grade	Fluka	สวีตเซอร์แลนด์
12. เพนเทน 99% (<i>n</i> -pentane)	AR grade	CARLO ERBA	อิตาลี
13. ไซโคลเฮกเซน 99.5% (Cyclohexane)	AR grade	CARLO ERBA	อิตาลี
14. ไตรเมทิลเพนเทน 99.5% (2,2,4-trimethylpentane)	AR grade	Lab Scan Analytical Sciences	ไทย

สารเคมี	เกรด	บริษัทผู้ผลิต	ประเทศ
15. ซิลิกาเจล			
16. แก๊สไนโตรเจน 99.9999% (บริสุทธิ์สูง)			
17. น้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ			
1) น้ำมันแก๊สโซฮอล์ (Gasohol) ออกเทน 91 และน้ำมันดีเซล (Diesel)		บางจากปิโตรเลียม	ไทย
2) น้ำมันเบนซิน (Gasoline) ออกเทน 91		ปตท.	ไทย
3) น้ำมันแก๊สโซฮอล์ (Gasohol)		ร้านค้า	ไทย

2.2 วัสดุและอุปกรณ์

- 2.2.1 กระดาษกรอง (Whatman เบอร์ 1 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร)
- 2.2.2 ผ้าชนิดต่าง ๆ ได้แก่
- 1) ผ้าฝ้าย (Cotton 100%) ขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร
 - 2) ผ้าโพลีเอสเตอร์ (Polyester 100%) ขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร
 - 3) ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์ (Cotton 50% และ Polyester 50%) ขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร
 - 4) ผ้าลินิน (Linen 100%) ขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร
 - 5) กระสอบป่านขนาด 12.0 × 12.0 เซนติเมตร
- 2.2.3 กระจังอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.0 เซนติเมตร สูง 12.5 เซนติเมตร
- 2.2.4 ขวดก้นกลมขนาด 50.00 และ 1,000.00 มิลลิลิตร พร้อมจุกปิด
- 2.2.5 ขวดบรรจุตัวอย่างขนาด 8.0, 20.0 และ 30.0 มิลลิลิตร พร้อมฝาเกลียว
- 2.2.6 ท่อนำแก๊สซึ่งบรรจุซิลิกาเจลไว้ภายใน
- 2.2.7 ลวดนำไฟฟ้า ขนาด 700 วัตต์
- 2.2.8 สายไฟปากฉลาม
- 2.2.9 เทปกั้นความร้อน (Heating tape)
- 2.2.10 แท่งกวนสาร (Magnetic bar) และเครื่องกวนสารโดยใช้แม่เหล็ก (Magnetic stirrer)

- 2.2.11 นาฬิกาจับเวลา
- 2.2.12 เทอร์โมมิเตอร์ (Thermometer) อุณหภูมิ 0 – 200 องศาเซลเซียส
- 2.2.13 Heating mantle
- 2.2.14 หลอดฮาโลเจน แอลอีดี 220 วัตต์ (บริษัท Zhongshan Guzhen City Light Outdoor lightings, ประเทศจีน)

2.3 เครื่องมือวิเคราะห์

- 2.3.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (UV-Vis Spectrophotometer) รุ่น SPECCORD S100 (บริษัท Analytikjena, ประเทศเยอรมัน)
- 2.3.2 กล้องถ่ายภาพแคนนอน รุ่น EOS 400D
- 2.3.3 เครื่องหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) รุ่น EBA 20 (ยี่ห้อ Hettich, ประเทศเยอรมัน)
- 2.3.4 เครื่อง Ultrasonic Bench รุ่น AS7240AT Ultrasonic Cleaner (บริษัท Automatic Science (Tianjin) Instrument co., TLD, ประเทศจีน)
- 2.3.5 เครื่องให้ความร้อน TECHNE DRI-BLOCK® รุ่น FDB03DD (บริษัท TECHNE (CAMBRIDGE) LTD. DUXFORD CAMBRIDGE U.K.)
- 2.3.6 เครื่องจ่ายไฟ (Power supply) เพื่อให้ความร้อน
- 2.3.7 เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศ (Digital thermometer)
- 2.3.8 เครื่องวัดอัตราการไหลของแก๊ส (Digital flow meter, บริษัท J&W Scientific)
- 2.3.9 โซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (Solid phase microextraction; SPME) ชนิดของไฟเบอร์ คือ โพลีไดเมทิลซิลอกเซน (Polydimethylsiloxane; PDMS) ขนาด 100 ไมโครเมตร ของบริษัท SUPELCO ประเทศสหรัฐอเมริกา
- 2.3.10 เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas chromatograph; GC) ซึ่งมีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน (Flame ionization detector; FID) ของบริษัทอีวเลตต์-แพคการ์ด (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น HP 6890
- 2.3.11 เครื่องวัดอุณหภูมิ รุ่น 50S (Thermocouple thermometer, ยี่ห้อ FLUKE, ประเทศสหรัฐอเมริกา)

2.4 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

2.4.1 การเตรียม stock solution ของสารละลายมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีนและไซลีน

เตรียม stock solution ของสารละลายมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีนและไซลีนแต่ละชนิดให้มีความเข้มข้น 1,000.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 25.00 มิลลิลิตร ทำได้โดยบีเปิด

สารมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีนและไซลีนปริมาตร 28.50, 29.00, 29.40 และ 29.10 ไมโครลิตรตามลำดับ แล้วทำการเจือจางสารมาตรฐานแต่ละชนิดด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้มีปริมาตรละ 25.00 มิลลิลิตร

2.4.2 การเตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีนและไซลีนหรือสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์

2.4.2.1 การเตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร

ทำได้โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานของเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีนจาก stock solution ที่ความเข้มข้น 1,000.00 พีพีเอ็ม ปริมาตรละ 0.20 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้มีปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร

2.4.2.2 การเตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 0.25, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 25.00, 50.00, 100.00, 250.00, 500.00 และ 1000.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร

การเตรียม working solution ที่ความเข้มข้น 0.25, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 25.00, 50.00, 100.00 และ 250.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีนจาก stock solution มาปริมาตร 1.25, 2.50, 5.00, 25.00, 50.00, 125.00, 250.00, 500.00 และ 1,250.00 ไมโครลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 5.00 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้มีปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร

การเตรียม working solution ที่ความเข้มข้น 500.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยปิเปตสารมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีน ปริมาตร 2.85, 2.90, 2.94 และ 2.91 ไมโครลิตร ตามลำดับ แล้วทำการเจือจางด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้มีปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร

การเตรียม working solution ที่ความเข้มข้น 1,000.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยปิเปตสารมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีน ปริมาตร 5.70, 5.80, 5.88 และ 5.82 ไมโครลิตร ตามลำดับ แล้วทำการเจือจางด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้มีปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร

2.4.2.3 การเตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิด

เตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิด สามารถเตรียมได้ ดังตัวอย่าง เช่น การเตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของเบนซีน โทลูอีนและไซลีนที่ความเข้มข้น 5.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ทำได้โดยการปิเปต stock solution ของสารละลายมาตรฐานเบนซีน โทลูอีนและไซลีนปริมาตรละ 25.00 ไมโครลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 5.00 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้มีปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร

2.4.3 การเตรียม stock solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีนและไซลีนสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

เตรียม stock solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีนแต่ละชนิดให้มีความเข้มข้น 1,000.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ทำได้โดยปิเปตสารมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีนและไซลีนปริมาตร 5.70, 5.80, 5.88 และ 5.82 ไมโครลิตรตามลำดับ แล้วทำการเจือจางสารมาตรฐานแต่ละชนิดด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์ให้มีปริมาตรละ 5.00 มิลลิลิตร

2.4.4 การเตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 25.00, 50.00, 100.00, 250.00 และ 500.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร สำหรับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

การเตรียม working solution ที่ความเข้มข้น 25.00, 50.00, 100.00 และ 250.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยปิเปตสารละลายมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีนจาก stock solution มาปริมาตร 125.00, 250.00, 500.00 และ 1,250.00 ไมโครลิตร ตามลำดับ ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 5.00 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์ให้มีปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร

การเตรียม working solution ที่ความเข้มข้น 500.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยปิเปตสารมาตรฐานเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีน ปริมาตร 2.85, 2.90, 2.94 และ 2.91 ไมโครลิตร ตามลำดับ แล้วทำการเจือจางด้วยคาร์บอนไดซัลไฟด์ให้มีปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร

2.4.5 การเตรียม stock solution ของสารละลายมาตรฐานแอฟทาลีน

เตรียม stock solution ของสารละลายมาตรฐานแอฟทาลีนให้มีความเข้มข้น 1,000.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยชั่งแอฟทาลีน 0.05 กรัม แล้วละลายด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้มีปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร

2.4.6 การเตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานแอฟทาลีน

เตรียม working solution ของสารละลายมาตรฐานแอฟทาลีนที่ความเข้มข้น 0.25, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 25.00, 50.00, 100.00, 250.00 และ 500.00 พีพีเอ็ม โดยเปิด stock solution ของสารละลายมาตรฐานแอฟทาลีนปริมาตร 1.25, 2.50, 5.00, 25.00, 50.00, 125.00, 250.00, 500.00, 1,250.00 และ 2,500.00 ไมโครลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 5.00 มิลลิลิตร แล้วทำการเจือจางด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ให้มีปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร

2.5 การเตรียมท่อนำแก๊สและซิลิกาเจล

2.5.1 การเตรียมท่อนำแก๊ส

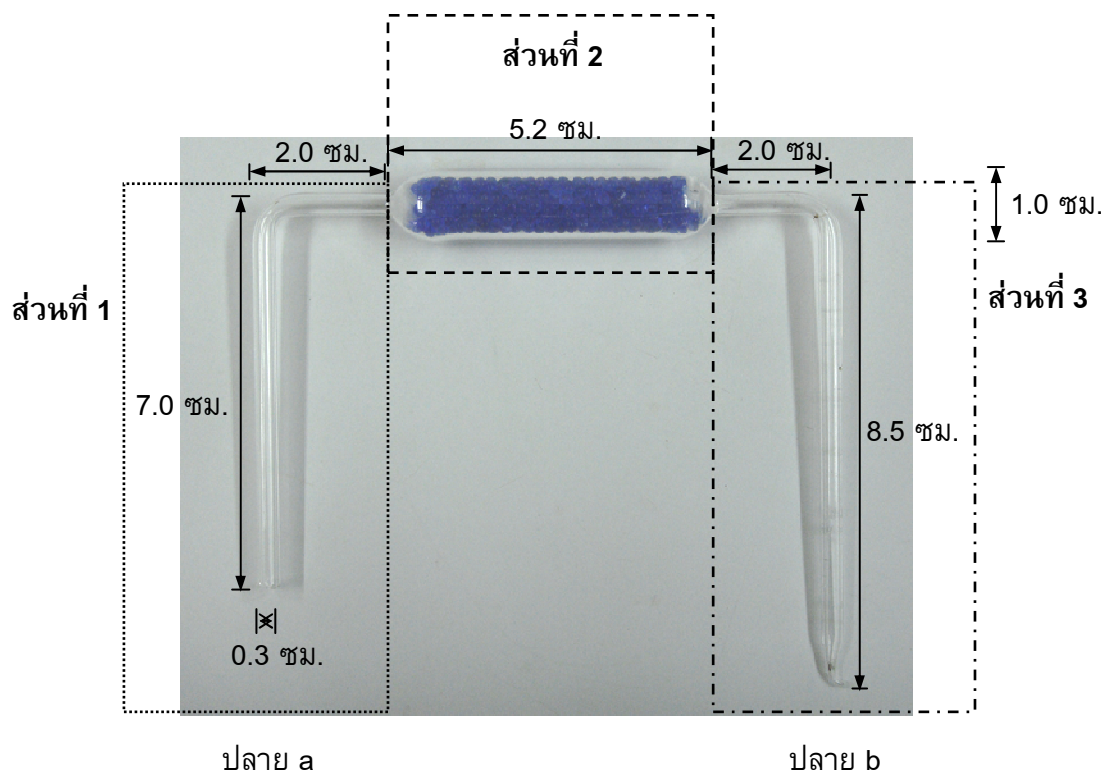
ประยุกต์ใช้ท่อนำแก๊สในการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าโดยการให้ความร้อนในระบบปิด (หัวข้อ 2.8.3.3) โดยลักษณะท่อนำแก๊สที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพประกอบที่ 2.1 ซึ่งท่อนำแก๊สมีขนาดและความยาวดังนี้

ท่อนำแก๊สส่วนที่ 1 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ยาว 9.0 เซนติเมตร

ท่อนำแก๊สส่วนที่ 2 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ยาว 5.2 เซนติเมตร

ท่อนำแก๊สส่วนที่ 3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ยาว 10.5 เซนติเมตร

การเตรียมท่อนำแก๊สทำได้โดยนำท่อนำแก๊สทั้ง 3 ส่วนมาเชื่อมต่อกันเป็นแนวยาว จากนั้นบรรจุซิลิกาเจลลงในท่อนำแก๊สส่วนที่ 2 จนเต็ม และใช้ glass wool อุดปลายท่อนำแก๊สส่วนที่ 2 ทั้งสองข้างเพื่อป้องกันไม่ให้ซิลิกาเจลหลุดออกมา เมื่อบรรจุเสร็จแล้วจึงนำท่อนำแก๊สไปงอและเป่าให้ปลาย b มีลักษณะโค้งงอ



ภาพประกอบที่ 2.1 ขนาดและความยาวของท่อนำเข้าแก๊สที่ใช้ในการทดลอง

2.5.2 การเตรียมซิลิกาเจล

การเตรียมซิลิกาเจลสำหรับบรรจุในท่อนำเข้าแก๊ส ทำได้โดยตัดแยกขนาดของซิลิกาเจลชนิดสีน้ำเงินที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 0.2 เซนติเมตร น้ำหนัก 3.1 ± 0.1 กรัม จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์ จากนั้นนำซิลิกาเจลมาบรรจุลงในท่อนำเข้าแก๊สส่วนที่ 2 จนเต็ม และก่อนทำการทดลองให้นำท่อนำเข้าแก๊สที่บรรจุซิลิกาเจลเรียบร้อยแล้วมาทำการอบซ้ำอีกครั้งที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในเดซิเคเตอร์

2.5.3 การเตรียมลวดให้ความร้อน

การเตรียมลวดไฟฟ้าสำหรับให้ความร้อนบริเวณท่อนำเข้าแก๊ส ทำได้โดยนำลวดนำไฟฟ้าขนาด 700 วัตต์ มาขดเป็นเกลียวพันรอบท่อนำเข้าแก๊ส เนื่องจากท่อนำเข้าแก๊สมีขนาดและความยาวของท่อแตกต่างกัน จึงทำการแบ่งบริเวณที่ใช้ขดลวดพันรอบออกเป็น 3 ส่วน แต่แต่ละส่วนใช้ขนาดและความยาวของลวดไฟฟ้าเป็นดังนี้

ส่วนที่ 1 สำหรับพันรอบท่อ นำแก๊สส่วนที่ 1 (ภาพประกอบที่ 2.1) ขดลวดนำไฟฟ้าที่ใช้พันเป็นเกลียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ยาว 9.0 เซนติเมตร

ส่วนที่ 2 สำหรับพันรอบท่อ นำแก๊สส่วนที่ 2 (ภาพประกอบที่ 2.1) ขดลวดนำไฟฟ้าที่ใช้พันเป็นเกลียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 เซนติเมตร ยาว 5.2 เซนติเมตร

ส่วนที่ 3 สำหรับพันรอบท่อ นำแก๊สส่วนที่ 3 (ภาพประกอบที่ 2.1) ขดลวดนำไฟฟ้าที่ใช้พันเป็นเกลียว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 เซนติเมตร ยาว 4.0 เซนติเมตร

การให้ความร้อนแก่ท่อ นำแก๊สโดยผ่านลวดไฟฟ้า ทำได้โดยนำลวดไฟฟ้าพันรอบท่อที่บริเวณต่างๆ และนำเทปกั้นความร้อนมาพันทับรอบลวดไฟฟ้าอีกครั้งหนึ่ง จากนั้นต่อลวดไฟฟ้าเข้ากับแหล่งจ่ายไฟและวัดอุณหภูมิภายในท่อ นำแก๊สเพื่อทำการทดลอง

2.6 สภาวะของเครื่องมือ

2.6.1 สภาวะของกล้องถ่ายภาพ

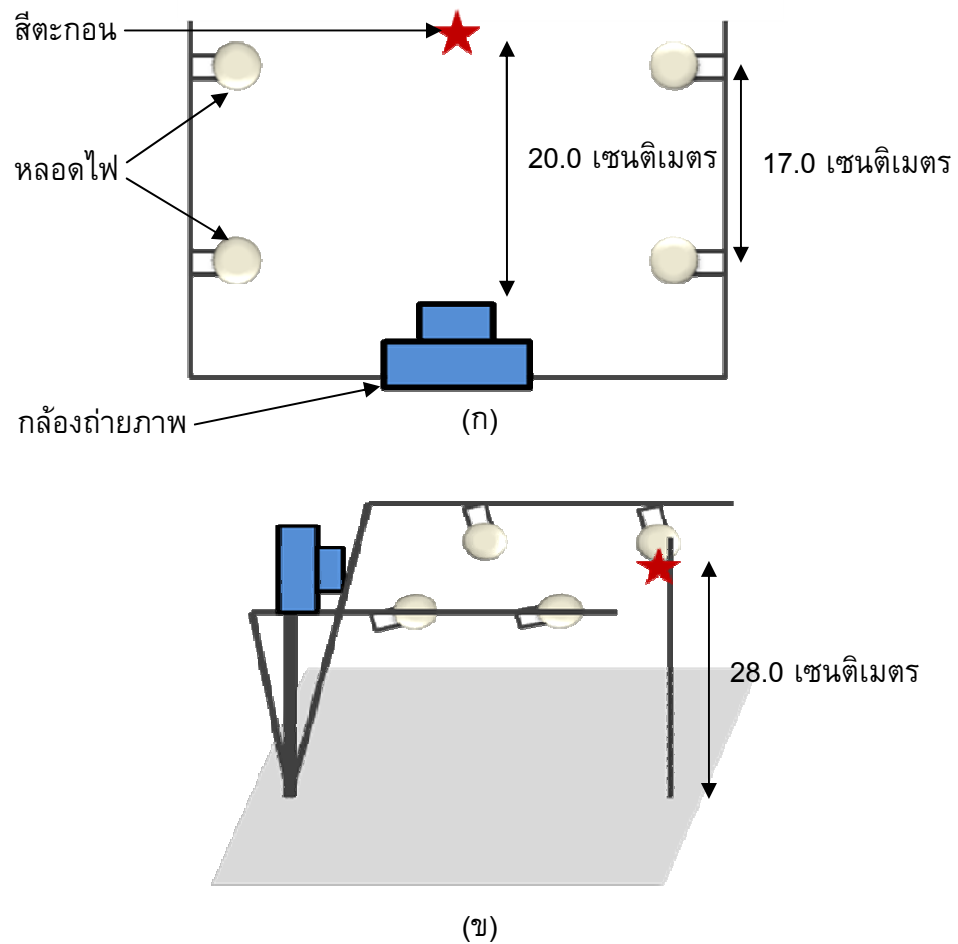
สภาวะของกล้องถ่ายภาพ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 พารามิเตอร์ของกล้องถ่ายภาพ

พารามิเตอร์	สภาวะที่ใช้
ขนาดรูรับแสง (Aperture Av)	f/5.6
ความเร็วชัตเตอร์ (Exposure Tv)	1/30 s
ความไวต่อแสง (ISO velocity)	100
Flash	Off
Quality	Raw
Operation mode	Manual

การติดตั้งกล้องถ่ายภาพ

การติดตั้งกล้องถ่ายภาพสำหรับการทดลอง แสดงดังภาพประกอบที่ 2.2



ภาพประกอบที่ 2.2 แผนภาพการติดตั้งกล้องถ่ายภาพสำหรับการทดลองจากมุมมอง
(ก) ด้านบน และ (ข) ด้านข้าง

2.6.2 สภาวะของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

สภาวะของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ แสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สภาวะของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์

พารามิเตอร์	สภาวะที่ใช้
Integration	40.0 ms
Path length	1 cm
Accumulation	10
Range	190 - 800 nm
Scan mode	Single scan

2.6.3 สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน

สภาวะที่ทำการทดลองนี้ได้ปรับเปลี่ยนจากสภาวะการทดลองของ Assadi และคณะ (2010)

ตารางที่ 2.3 สภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน

เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ (Gas chromatograph; GC) ซึ่งมีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน (Flame ionization detector; FID) ของบริษัทอีวเลตต์-แพคการ์ด (ประเทศไทย) จำกัด รุ่น HP 6890

พารามิเตอร์	สภาวะที่ใช้
Column	HP Ultra2 (Crosslinked 5%PH ME Siloxane) 25m × 0.32mm × 0.52µm (HP Part No. 19091 B-112)
Injector temperature	200 °C
Detector temperature	300 °C
Make up gas	N ₂ (HP, >99.99%)
Fuel gas	H ₂ (HP, >99.99%)
Oxidant gas	Air (zero)
Carrier gas	He (HP, >99.99%)
Flow rate	1.7 mL/min
Pressure	7.0 psi
Average velocity	30 cm/sec

ตารางที่ 2.3 (ต่อ)

พารามิเตอร์	สภาวะที่ใช้
Temperature program	
Initial temperature	40 °C
Initial hold	3 min
Ramp rate	10 °C/min
Final temperature	100 °C
Final hold	1 min
Injection volume	1 µL, splitless mode

2.6.4 สภาวะการเตรียมไฟเบอร์ของโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (เอกสารการใช้โซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันจากบริษัท Supelco)

การเตรียมไฟเบอร์ของโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันก่อนและหลังทำการทดลองทำได้โดยการเสียบ SPME เข้าไปยังบริเวณ injection port ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ ซึ่งมีอุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที ถึง 1 ชั่วโมง

2.7 วิธีดำเนินการ

2.7.1 การศึกษาสภาวะของปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน

2.7.1.1 การศึกษาความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ในปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน

ทำการศึกษาโดยชั่งอะลูมิเนียมคลอไรด์ปริมาณ 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 และ 1.0 กรัม และเติมสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ลงไปในขวดปฏิกิริยาซึ่งบรรจุอะลูมิเนียมคลอไรด์อยู่ ปริมาณอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้คิดเป็นความเข้มข้นได้เท่ากับ 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0, 12.0, 14.0, 16.0, 18.0 และ 20.0 % w/v ตามลำดับ จากนั้นทำการคนสารละลายที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นตะกอนสีส้ม แล้วจึงนำตะกอนที่ได้ไปหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกเอาตะกอนออกจากสารละลาย นำส่วนสารละลายสีที่ได้จากปฏิกิริยาไปวัดค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 262 และ 269 นาโนเมตร แล้วทำ

การเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ก่อนและหลังทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน สำหรับการทดลองในแต่ละความเข้มข้นของอะลูมิเนียม-คลอไรด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาจะทำซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

2.7.1.2 การศึกษาปริมาณต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้โดยใช้ปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน

ปริมาณต่ำที่สุดของสารมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์สามารถวิเคราะห์ได้โดยอาศัยปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน ทำการศึกษาโดยการเตรียมสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 0.01, 0.10, 0.25 และ 0.50 พีพีเอ็ม และอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 8.0 % w/v แล้วทำการคนสารละลายที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นตะกอนสีส้มบนที่ก้นของตะกอนที่เกิดขึ้นโดยการถ่ายภาพ สภาวะสำหรับการถ่ายภาพที่ใช้ตลอดการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 2.2 สำหรับการทดลองในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์จะทำซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

2.7.1.3 การศึกษาชนิดของตัวรบกวน

ในการทดลองได้ทำการศึกษาตัวรบกวนกลุ่มไฮโดรคาร์บอน 5 ชนิด คือ ไอโซออกเทน เพนเทน ไตรเมทิลเพนเทน ซาโคลเฮกเซน และแนฟทาลีน ซึ่งทำได้โดยนำสารมาตรฐานของไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร มาทำปฏิกิริยากับคาร์บอน-เตตระคลอไรด์ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตรและอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 8.0 % w/v จากนั้นทำการคนสารละลายที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที สังเกตผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นและทำซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

2.7.2 การทำแผนภาพมาตรฐานสีตะกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน

2.7.2.1 การทำแผนภาพมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

การทำแผนภาพมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.25 ถึง 1000.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยทำการเติมอะลูมิเนียม-คลอไรด์ที่ความเข้มข้น 8.0 % w/v ลงไปในสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จากนั้นทำการคนสารละลายที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ

30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นตะกอนสีส้ม บนที่กสิของตะกอนที่เกิดขึ้นโดยการถ่ายภาพและทำการประมวลผลภาพโดยการหาค่า RGB และ Grayscale ของสีตะกอนด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 version 9.0 ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์จะทำซ้ำเป็นจำนวน 30 ครั้ง

2.7.2.2 การทำกราฟมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์

กราฟมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.25 ถึง 100.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยนำค่า RGB และ Grayscale ของสีตะกอนที่ความเข้มข้นดังกล่าวซึ่งได้มาจากผลการทดลองในข้อ 2.8.2.1 มาพล็อตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง log ของความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์กับค่า RGB

2.7.2.3 การทำแผนภาพมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานของสาร 1 ชนิดหรือสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิด

การทำแผนภาพมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานของสาร 1 ชนิดหรือสารละลายมาตรฐานผสมของสารเพียง 2 หรือ 3 ชนิดที่ความเข้มข้น 5.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยการเติมอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 8.0 % w/v ลงไปในสารละลายมาตรฐานผสม จากนั้นทำการคนสารละลายที่ความเร็ว 500 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นตะกอนสีส้ม บนที่กสิของตะกอนที่เกิดขึ้นโดยการถ่ายภาพและทำการประมวลผลภาพโดยการหาค่า RGB และ Grayscale ของสีตะกอนด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 ในแต่ละความเข้มข้นของสารมาตรฐานของสาร 1 ชนิดหรือสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิดจะทำซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

2.7.2.4 การทำแผนภาพมาตรฐานสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานแอฟทาลีน

การทำแผนภาพมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานแอฟทาลีนที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.25 ถึง 1,000.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดยทำการเตรียมสารละลายมาตรฐานแอฟทาลีนที่ความเข้มข้นดังต่อไปนี้ 0.25, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 25.00, 50.00, 100.00, 250.00, 500.00 และ 1,000.00 พีพีเอ็ม และเติมอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น

8.0 % w/v ลงไปในสารละลายมาตรฐานจากนั้นทำการคนสารละลายที่ความเร็ว 500 รอบต่อ นาทีที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที จะเกิดผลิตภัณฑ์ที่เป็นตะกอนสีม่วง บันทึกสีของตะกอนที่เกิดขึ้นโดยการถ่ายภาพและทำการประมวลผลภาพโดยการหาค่า RGB และ Grayscale ของสีตะกอนด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแนฟทาลีนจะทำซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

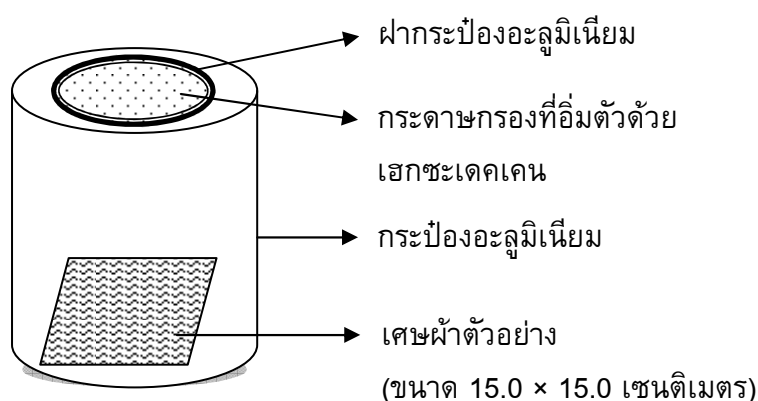
2.7.3 การศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างผ้าขาวที่ปนเปื้อนน้ำมัน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างผ้าขาวขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร ที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในห้องปฏิบัติการ โดยทำการศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่าง 3 วิธี คือ

- 2.7.3.1 ศึกษาวิธีการดูดซับไอปีที่อีเอ็กซ์จากผ้าด้วยกระดาษกรอง
- 2.7.3.2 ศึกษาวิธีการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าด้วยเฮฟเทน
- 2.7.3.3 ศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนในระบบปิด

2.7.3.1 การศึกษาวิธีการดูดซับไอปีที่อีเอ็กซ์จากผ้าด้วยกระดาษกรอง

ในการทดลองนี้มีการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าและใช้กระดาษกรองที่อิมมัตด้วยเฮกซะเดคเคนเป็นตัวดูดซับไอของบีทีอีเอ็กซ์จากผ้า การจัดวางกระดาษกรองให้อยู่ในกระป๋องอะลูมิเนียม แสดงดังในภาพประกอบที่ 2.3 โดยมีการศึกษาปัจจัยที่สำคัญ คือ อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้า



ภาพประกอบที่ 2.3 การวางกระดาษกรองที่ใช้ในการดูดซับไอปีที่อีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้า

2.7.3.1.1 การศึกษาอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับตัวอย่าง มีขั้นตอนดังนี้

1. บรรจุตัวอย่างผ้าขาวชนิดผ้าฝ้าย ขนาด 15.0×15.0 เซนติเมตร ลงในกระป๋องอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11.0 เซนติเมตรและสูง 12.5 เซนติเมตร
2. เติมสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตรลงบนผ้า
3. วางกระดาษกรองที่อิมมัวด้วยเฮกซะเดคเคนให้แนบติดกับฝากระป๋องด้านในและรีบปิดฝากระป๋องให้สนิท
4. ให้ความร้อนแก่กระป๋องอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิต่างๆ โดยอุณหภูมิที่ทำการทดลองคือ 90.0, 100.0, 110.0 และ 120.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
5. จากนั้นนำกระดาษกรองไปตัดให้มีขนาดประมาณ 1.0×1.0 เซนติเมตร แล้วนำไปสกัดด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ โดยบรรจุกระดาษกรองที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ลงในขวดสกัดขนาด 30.00 มิลลิลิตร และเติมคาร์บอนเตตระคลอไรด์ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิทและสกัดกระดาษกรองแบบตั้งทิ้งไว้ เป็นเวลา 10 นาที
6. นำกระดาษกรองออกจากสารละลาย แล้วนำสารละลายที่สกัดได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 262 และ 269 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันในสภาวะที่เหมาะสมต่อไป

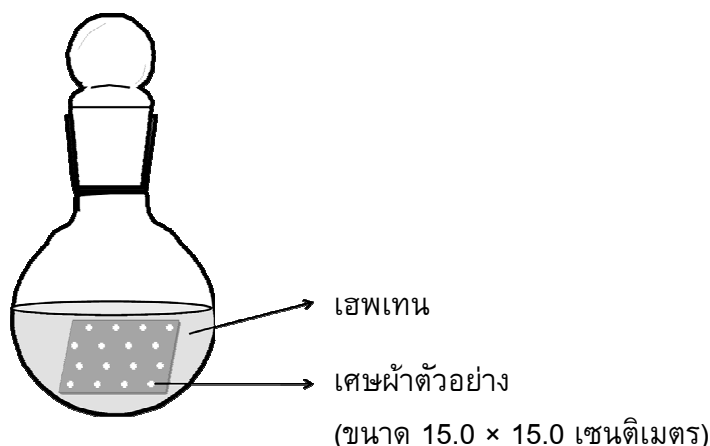
2.7.3.1.2 การศึกษาเวลาที่ให้ความร้อนกับตัวอย่าง มีขั้นตอนดังนี้

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.7.3.1.1 แต่มีการให้ความร้อนแก่กระป๋องอะลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 100.0 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10, 20 และ 30 นาที

2.7.3.2 การศึกษาวิธีการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าด้วยเฮฟเทน

2.7.3.2.1 ศึกษาวิธีการสกัดแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและการสกัดโดยใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonication)

การสกัดสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้าด้วยเฮฟเทน แสดงในภาพประกอบที่ 2.4 ซึ่งทำการศึกษารูปแบบการสกัด 2 วิธีคือ การสกัดโดยการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและการสกัดโดยใช้คลื่นความถี่สูง (Ultrasonication) ซึ่งทั้งสองวิธีมีขั้นตอนที่เหมือนกัน คือ



ภาพประกอบที่ 2.4 การสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าด้วยเฮฟเทน

1. บรรจุตัวอย่างผ้าขาวชนิดผ้าฝ้าย ขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตรลงในขวดก้นกลมขนาด 50.00 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ลงบนตัวอย่างผ้า
3. เติมเฮฟเทนปริมาตร 20.00 มิลลิลิตรลงบนตัวอย่างผ้าเพื่อทำการสกัดบีทีอีเอ็กซ์ โดยการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องและการสกัดโดยใช้คลื่นความถี่สูง ซึ่งทั้งสองวิธีการดังกล่าวจะทำการสกัดเป็นเวลา 15 นาที และในแต่ละวิธีการสกัดจะทำซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง
4. นำส่วนสารละลายที่สกัดได้ในแต่ละวิธีไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 262 และ 269 นาโนเมตรด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันในสภาวะที่เหมาะสมต่อไป
5. บันทึกสีของตะกอนโดยการถ่ายภาพ

2.7.3.2.2 ศึกษาวิธีการสกัดแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องที่เวลาต่าง ๆ

ทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.7.3.2.1 โดยทำการสกัดเป็นเวลา 5, 10, 15 และ 30 นาที และในแต่ละเวลาการสกัดจะทำซ้ำเป็นจำนวน 3 ครั้ง

2.7.3.2.3 การสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าชนิดต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง โดยการสกัดด้วยเฮฟเทนแบบตั้งทิ้งไว้

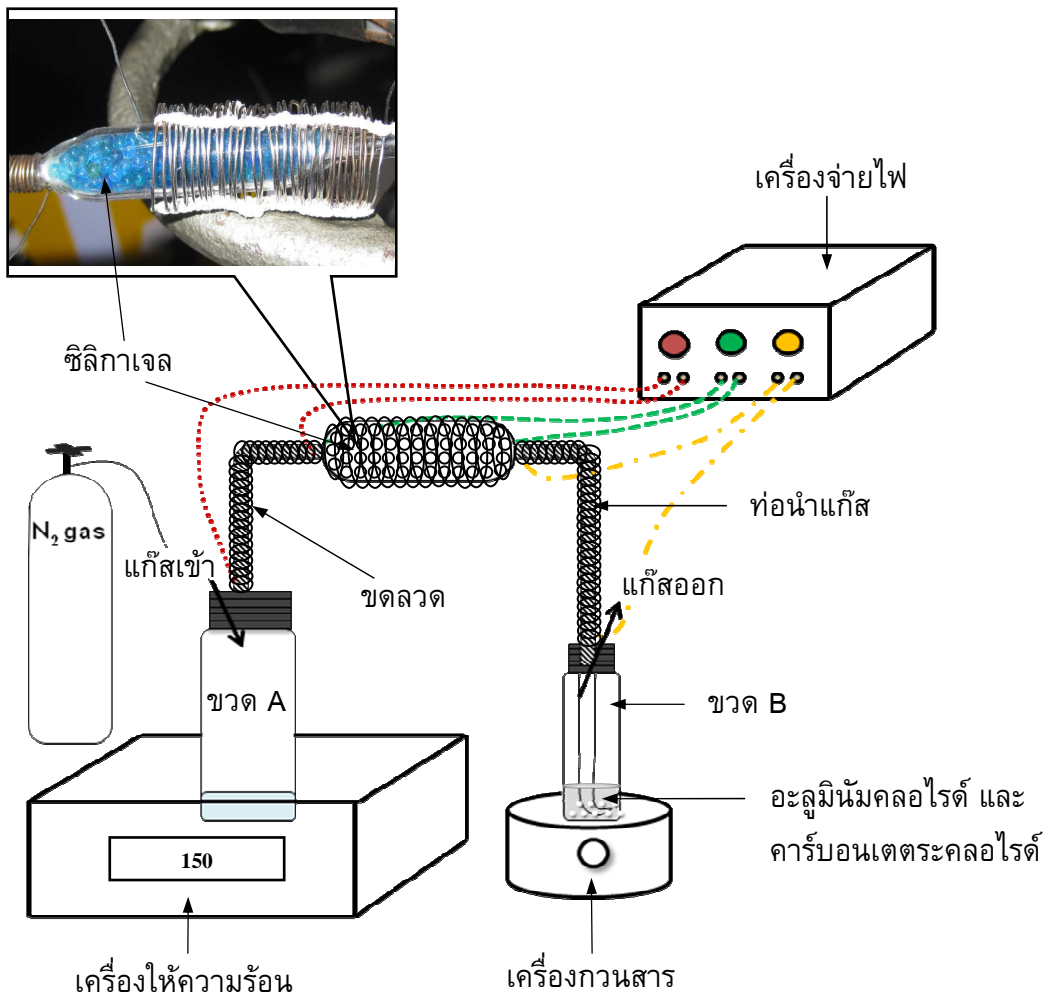
การทดลองนี้เป็นการจำลองการใช้ตัวอย่างจากการปนเปื้อนด้วยน้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันเบนซิน น้ำมันแก๊สโซฮอล์ และน้ำมันดีเซลจากสถานีบริการน้ำมัน และน้ำมันแก๊สโซฮอล์จากร้านค้า ซึ่งทำการทดลองในผ้าจำนวน 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้าย (Cotton

100%) ผ้าโพลีเอสเตอร์ (Polyester 100%) ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์ (Cotton 50% และ Polyester 50%) ผ้าลินิน (Linen 100%) และกระสอบป่าน โดยทำการทดลองดังนี้

1. เก็บตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงจากสถานีบริการน้ำมันด้วยผ้าชนิดต่างๆ และบรรจุตัวอย่างลงในขวดบรรจุตัวอย่างขนาด 20.0 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิทและนำกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ
2. ตัดตัวอย่างผ้าเป็นชิ้นเล็กๆ และบรรจุลงในขวดก้นกลมขนาด 50.00 มิลลิลิตร
3. เติมเฮพเทนปริมาตร 20.00 มิลลิลิตรลงบนผ้าเพื่อทำการสกัดบีทีอีเอ็กซ์ และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 15 นาที
4. นำส่วนสารละลายที่สกัดได้ไปทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันในสภาวะที่เหมาะสม และบันทึกสีของตะกอนที่เกิดขึ้นโดยการถ่ายภาพ

2.7.3.3 การศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนในระบบปิด

การจัดอุปกรณ์ในการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนในระบบปิด และมีการใช้แก๊สไนโตรเจนเพื่อใช้ในการพาไอของบีทีอีเอ็กซ์ไปทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน แสดงในภาพประกอบที่ 2.5 ซึ่งมีสภาวะที่ศึกษา คือ อุณหภูมิที่ใช้ควบคุมบริเวณท่อนำแก๊สและอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน หลังจากได้สภาวะที่เหมาะสมแล้วจึงทำการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้า ทำกราฟมาตรฐานของวิธีการสกัดและทำการศึกษาผลของตัวรบกวน



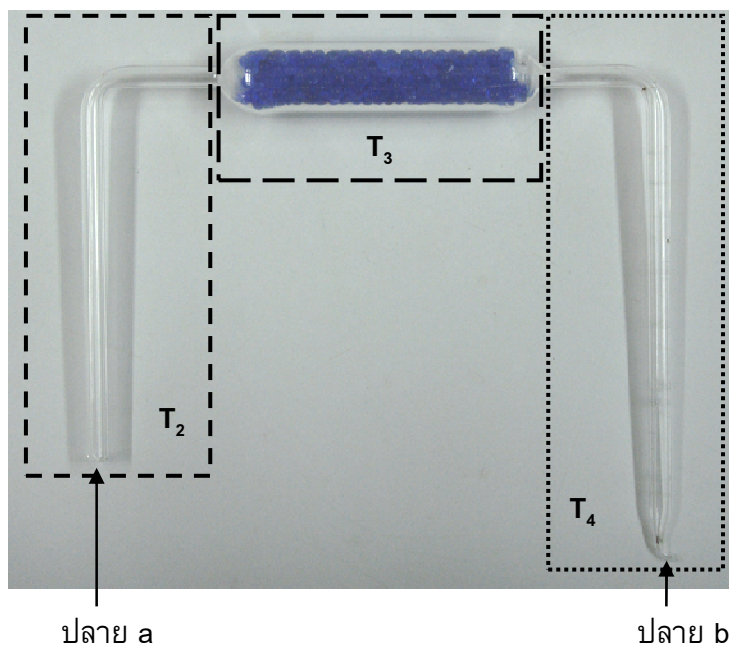
- สายไฟเชื่อมต่อระหว่างเครื่องจ่ายไฟและขดลวดซึ่งพันรอบท่อ นำแก๊สส่วนที่ 1 (T₂)
- - - - - สายไฟเชื่อมต่อระหว่างเครื่องจ่ายไฟและขดลวดซึ่งพันรอบท่อ นำแก๊สส่วนที่ 2 (T₃)
- . - . - . สายไฟเชื่อมต่อระหว่างเครื่องจ่ายไฟและขดลวดซึ่งพันรอบท่อ นำแก๊สส่วนที่ 3 (T₄)

ภาพประกอบที่ 2.5 การเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าในระบบปิด

2.7.3.3.1 การศึกษาอุณหภูมิที่ใช้ควบคุมบริเวณท่อ นำแก๊ส

ในการทดลองนี้มีการกำหนดอุณหภูมิของการให้ความร้อนกับขวด A ที่อุณหภูมิ 150.0 องศาเซลเซียส (T₁) และมีการศึกษาอุณหภูมิบริเวณท่อ นำแก๊สซึ่งแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.6 โดยการให้ความร้อนบริเวณท่อ นำแก๊ส ทำได้โดยการพันลวดนำความร้อนรอบๆ ท่อ นำแก๊สและใช้เทปกั้นความร้อนพันรอบบริเวณลวดนำความ

ร้อนอีกชั้นหนึ่ง แล้วใช้สายไฟเชื่อมต่อลวดนำความร้อนเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ ทำการศึกษา อุณหภูมิบริเวณท่อนำแก๊ส ดังแสดงในตารางที่ 2.4 และทำการทดลองดังต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 2.6 บริเวณท่อนำแก๊สที่มีการควบคุมอุณหภูมิ

ตารางที่ 2.4 การควบคุมอุณหภูมิที่ทำการทดลอง

สภาวะใน การทดลอง	อุณหภูมิที่ทำการทดลองในบริเวณต่าง ๆ (°C)				
	ขวด A (T_1)	ท่อนำแก๊ส ส่วนที่ 1 (T_2)	ท่อนำแก๊ส ส่วนที่ 2 (T_3)	ท่อนำแก๊ส ส่วนที่ 3 (T_4)	ขวด B (T_5)
1	150.0	150.0	70.0	70.0	อุณหภูมิห้อง (30.0 – 32.0)
2	150.0	150.0	80.0	80.0	อุณหภูมิห้อง (30.0 – 32.0)
3	150.0	150.0	90.0	90.0	อุณหภูมิห้อง (30.0 – 32.0)

1. เติมน้ำสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตรลงในขวด A ที่มีฝาเกลียวขนาด 30.0 มิลลิลิตร และ septum รองรับ ปิดฝาเกลียวให้สนิท
2. เติมน้ำอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 4.0 % w/v และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตรลงในขวด B ที่มีฝาเกลียวขนาด 8.0 มิลลิลิตรและ septum รองรับ ปิดฝาเกลียวให้สนิท
3. จัดอุปกรณ์สำหรับการใช้ในการทดลองดังภาพประกอบที่ 2.4 โดยนำขวด A ต่อเข้ากับปลาย a ของท่อนำเข้าแก๊ส และขวด B ต่อเข้ากับปลาย b ของท่อนำเข้าแก๊สซึ่งให้ส่วนปลายที่โค้งของท่อนำเข้าแก๊สจุ่มในสารละลายในขวด B
4. เริ่มทำการทดลองโดยปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 10.0 มิลลิลิตรต่อ นาที ควบคุมอุณหภูมิบริเวณต่างๆ ดังตารางที่ 2.3 เป็นเวลา 30 นาที สังเกตการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
5. นำสารละลายที่มีตะกอนไปหมุนเหวี่ยงและบันทึกสีตะกอนโดยการถ่ายภาพ

2.7.3.3.2 การศึกษาอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 2.7.3.3.1 แต่มีการควบคุมอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 0.5, 1.0 และ 10.0 มิลลิลิตรต่อนาที และใช้อุณหภูมิที่บริเวณท่อนำเข้าแก๊สที่เหมาะสมจากข้อ 2.7.3.3.1 ซึ่งจากผลการทดลองคือ สภาวะที่ 2

2.7.3.3.3 การเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้า

การเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าฝ้ายขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร ทำได้โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 2.7.3.3.1 และ 2.7.3.3.2 และมีการเติมน้ำสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์บนผ้า ซึ่งขั้นตอนการทดลองเป็นดังนี้

1. บรรจุตัวอย่างผ้าฝ้ายที่ตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ลงในขวดบรรจุตัวอย่าง A ที่มีฝาเกลียวขนาด 30.0 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่มีความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตรลงในขวด ปิดด้วย septum และฝาเกลียวให้สนิท
2. เตรียมสารในขวด B โดยเติมน้ำคาร์บอนเตตระคลอไรด์ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ความเข้มข้น 4.0 % w/v ปิดด้วย septum และฝาเกลียวให้สนิท
3. ปรับอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 10.0 มิลลิลิตรต่อนาที และก่อนทำการทดลองให้ทำการอุ่นเครื่องให้ความร้อนไว้เป็นเวลา 20 นาที จัดอุปกรณ์ดังภาพประกอบที่ 2.4 โดยนำขวด A ต่อเข้ากับปลาย a ของท่อนำเข้าแก๊สซึ่งบรรจุ

ซิลิกาเจลไว้ ส่วนปลายท่อ นำแก๊ส b ต่อเข้ากับขวด B และให้ปลายของท่อ นำแก๊สที่อยู่ในขวด B จุ่มลงในคาร์บอนเตตระคลอไรด์

4. เริ่มทำการทดลองโดยควบคุมอุณหภูมิบริเวณต่างๆ ตามสภาวะที่ 2 ในตารางที่ 2.4 เป็นเวลา 30 นาที พร้อมกับปรับอัตราการไหลของแก๊สในโตรเจนที่ 10.0 มิลลิตรต่อนาที
5. สังเกตและบันทึกเวลาที่เริ่มเห็นตะกอนที่มีสีเกิดขึ้นและเวลาที่สีตะกอนคงที่
6. บันทึกสีตะกอนโดยการถ่ายภาพ

2.7.3.3.4 แผนภาพมาตรฐานและกราฟมาตรฐานของสีตะกอนจากการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้า

การทำแผนภาพมาตรฐานและกราฟมาตรฐานของสีตะกอนจากการให้ความร้อนในช่วงความเข้มข้นของบีทีอีเอ็กซ์ตั้งแต่ 0.50 ถึง 100.00 พีพีเอ็ม ทำได้โดย

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 50.00 และ 100.00 พีพีเอ็ม
2. จัดอุปกรณ์และทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.7.3.3.3 ในขั้นตอนที่ 1 – 4
3. บันทึกสีตะกอนโดยการถ่ายภาพและทำการประมวลผลภาพโดยการหาค่า RGB และ Grayscale ของสีตะกอนด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS2 ในแต่ละความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์โดยทำซ้ำเป็นจำนวน 5 ครั้ง

2.7.3.3.5 ศึกษาผลของตัวรบกวนที่มีต่อการให้ความร้อน

การศึกษาชนิดและผลของตัวรบกวนได้ทำการศึกษามาแล้วในหัวข้อ 2.7.1.3 ซึ่งเป็นการศึกษาผลที่เกิดจากตัวรบกวนที่อยู่ในสถานะของเหลว ดังนั้น การทดลองนี้จึงทำการศึกษาผลที่เกิดจากตัวรบกวนเมื่ออยู่ในสถานะแก๊ส ซึ่งทำได้โดย

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานของแนฟทาลีนที่เตรียมในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม ลงบนผ้าฝ้ายขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร
2. จัดอุปกรณ์และทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.7.3.3.3 ในขั้นตอนที่ 1 – 6

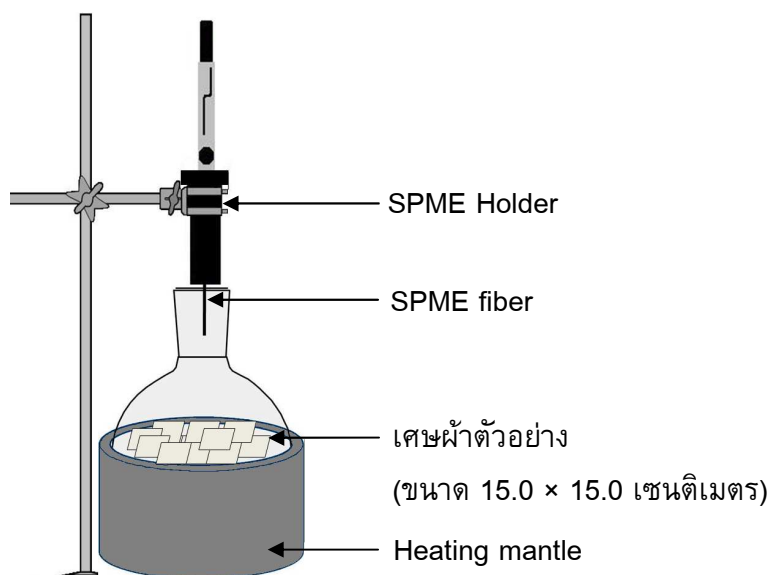
2.7.4 การให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าชนิดต่าง ๆ ที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง

การทดลองนี้เป็นการจำลองการใช้ตัวอย่างจากการปนเปื้อนด้วยน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้จากสถานีบริการน้ำมันและร้านค้า ซึ่งทำการทดลองในผ้าชนิดต่างๆ จำนวน 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้าย (Cotton 100%) ผ้าโพลีเอสเตอร์ (Polyester 100%) ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์ (Cotton 50% และ Polyester 50%) ผ้าลินิน (Linen 100%) และกระสอบป่าน และชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิง ได้แก่ น้ำมันแก๊สโซฮอล์ น้ำมันเบนซิน และน้ำมันดีเซล โดยทำการทดลองดังนี้

1. เก็บตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิงจากสถานีบริการน้ำมันด้วยผ้าชนิดต่างๆ และบรรจุตัวอย่างลงในขวดบรรจุตัวอย่างขนาด 20.0 มิลลิลิตร ปิดฝาให้สนิทและนำกลับมาวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ
2. จัดอุปกรณ์และทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.7.3.3.3 ในขั้นตอนที่ 1 – 6

2.7.5 การสกัดโดยใช้เทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน

เทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันประยุกต์ใช้กับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้



ภาพประกอบที่ 2.7 การสกัดโดยใช้เทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน

1. ตัดผ้าฝ้ายสีขาวขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร เป็นชิ้นเล็กๆ ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 1,000.00 มิลลิลิตร
2. เติมสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 10.00 พีพีเอ็ม ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตรลงบนผ้า ปิดด้วยจุกยาง แล้วทำการควบคุมอุณหภูมิที่ 50.0 องศาเซลเซียสด้วย heating mantle เป็นเวลา 5 นาที
3. จากนั้นทำการดูดซับไอบีทีอีเอ็กซ์โดยให้ไฟเบอร์ของโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันดูดซับไอบีทีอีเอ็กซ์เป็นเวลา 30 นาที (ดัดแปลงมาจาก Ahmad และ Voon (2001))
4. นำไฟเบอร์ไปคายการดูดซับที่ส่วน injection port ของเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟซึ่งมีอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

2.7.6 ศึกษาปริมาณของบีทีอีเอ็กซ์ด้วยวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนและเทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน

การทดลองนี้เป็นการทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมัน ซึ่งทำได้โดยการเติมน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ และน้ำมันเบนซิน ปริมาตร 200.00 ไมโครลิตรลงบนผ้าตัวอย่าง (ผ้าฝ้ายสีขาวขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร) แล้วนำไปทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการเตรียมตัวอย่างทั้งสองวิธีการ คือ วิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนในระบบปิด ซึ่งมีการจัดอุปกรณ์และทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.7.3.3.3 ในขั้นตอนที่ 1 – 6 และเทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน โดยทำการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 2.7.5 ในขั้นตอนที่ 1 – 4 โดยแต่ละวิธีทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

2.7.7 การศึกษาร้อยละการคืนกลับของการสกัด (% Recovery)

การศึกษาร้อยละการคืนกลับของการสกัดสำหรับวิธีการดูดซับไอบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าด้วยกระดาษกรองและการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าด้วยเฮพเทน ทำได้โดยเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ความเข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม ที่อยู่ในสารละลายที่ได้หลังจากการสกัดแต่ละวิธีกับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ความเข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม ก่อนการสกัดที่สองความยาวคลื่น คือ 262 และ 269 นาโนเมตร และคำนวณหาร้อยละการคืนกลับของการสกัดดังสมการที่ 2.1

สมการที่ 2.1 :

ร้อยละการคืนกลับของการสกัด

$$= \frac{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมในสารละลายที่ได้จากการสกัด}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมก่อนการสกัด}} \times 100$$

2.8 สถิติที่ใช้

ตรวจสอบค่าเฉลี่ยของผลที่ได้โดยใช้โปรแกรม Microsoft excel คำนวณความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($P = 0.05$)

บทที่ 3

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

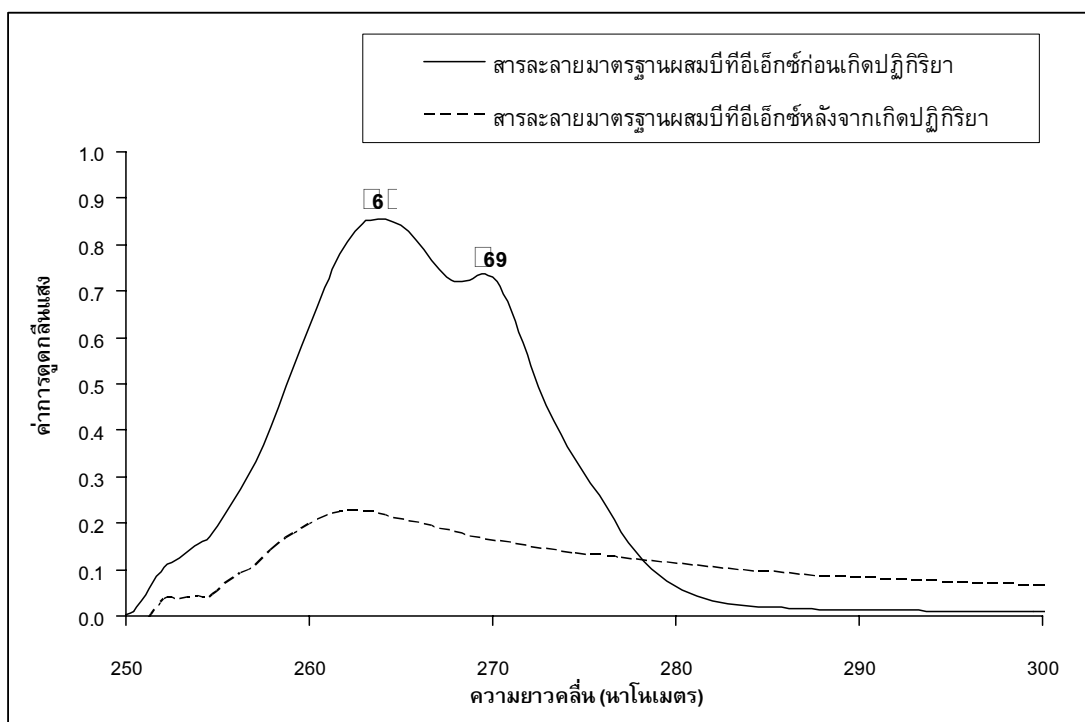
3.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชัน

3.1.1 ผลความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ในปฏิกิริยา

ปฏิกิริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชันเป็นปฏิกิริยาที่ใช้ในการวิเคราะห์สารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนซึ่งเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในน้ำมันเชื้อเพลิงประเภทต่างๆ ทั้งในตัวอย่างน้ำและดิน (U.S. EPA, 1997) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงประยุกต์ใช้ปฏิกิริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชันในการตรวจวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างผ้าที่นำมาใช้ในการวางเพลิง เพราะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นได้ง่ายและสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการทดสอบคัดเบื้องต้น (Screening test) ด้วยเทคนิคคัลเลอร์เมทรีได้

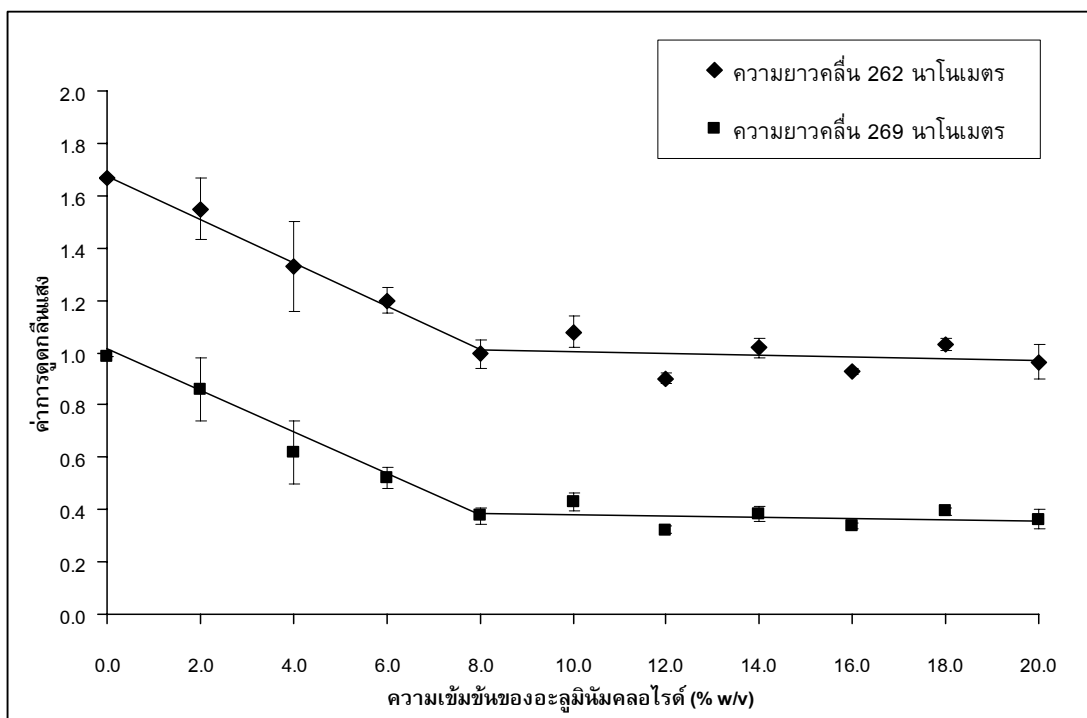
สารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชัน คือ อะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ (CCl_4) โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$) ในงานวิจัยนี้ใช้บีทีอีเอ็กซ์เป็นตัวแทนสารในกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และมีการกำหนดปริมาณของคาร์บอนเตตระคลอไรด์ที่มากเกินไปคือ ไม่เกิน 2.00 มิลลิลิตร เนื่องจากใช้เป็นตัวทำละลายในการเตรียมสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ ดังนั้น ทำการศึกษาความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาในช่วงความเข้มข้น 2.0 – 20.0 % w/v โดยมีการเปรียบเทียบค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ที่เหลือจากการทำปฏิกิริยากับค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ในตอนเริ่มต้นซึ่งสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ที่เตรียมในคาร์บอนเตตระคลอไรด์จะมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่สองความยาวคลื่น คือ 262 และ 269 นาโนเมตร และหลังจากที่เกิดปฏิกิริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชันแล้วสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์จะมีค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นทั้งสองลดลง ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.1 ผลของความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์แสดงในภาพประกอบที่ 3.2 พบว่า เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์มีค่าลดลงเพราะบีทีอีเอ็กซ์ถูกใช้ในการเกิดปฏิกิริยา โดยสังเกตได้จากการเกิดตะกอนสีส้มมากขึ้นเมื่อเทียบกับการไม่เติมอะลูมิเนียมคลอไรด์ซึ่งจะไม่เกิดตะกอนขึ้นเลยและทำให้บีทีอีเอ็กซ์ในสารละลายเหลืออยู่น้อย ค่าการดูดกลืนแสงจึงมีค่าลดลง ซึ่งแสดงว่า ปฏิกิริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชันเกิดได้ดีขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์จะมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงเมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์อยู่ในช่วง 8.0 – 20.0 % w/v โดยสังเกตจากสีตะกอนที่เกิดขึ้นคงที่ตลอด

ช่วง 8.0 – 20.0 % w/v ซึ่งแสดงว่า เมื่อความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์มากกว่า 8.0 % w/v จะเป็นความเข้มข้นที่มากเกินไปในการทำปฏิกิริยาและจะไม่ส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ โดยปริมาณของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ที่เหลืออยู่ในสารละลายยังคงเท่าเดิม ดังนั้น ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ 8.0 % w/v จึงเป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาฟรีเทล-กราฟ แอลคิลเลชัน



ภาพประกอบที่ 3.1 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ ความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม ก่อนเกิดปฏิกิริยาและหลังเกิดปฏิกิริยา

และจากการทดลองพบว่า การทำปฏิกิริยาฟรีเทล-กราฟ แอลคิลเลชันของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 10 นาทีที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น คือ ตะกอนสีส้ม จะยังคงมีสีที่เห็นชัดเจนอยู่ภายในเวลา 30 นาทีหลังจากทำปฏิกิริยา หลังจากนั้นสีตะกอนจะเปลี่ยนแปลงไป คือ ตะกอนมีสีคล้ำมากขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมีความไวต่อแสงอัลตราไวโอเล็ต (U.S. EPA, 1997) ดังนั้น ในการบันทึกภาพสีตะกอนจึงควรทำภายในเวลา 30 นาที และในการศึกษาปริมาณต่ำสุดที่สามารถวิเคราะห์ได้ พบว่า ปฏิกิริยาฟรีเทล-กราฟ แอลคิลเลชันที่สภาวะดังกล่าว โดยใช้อะลูมิเนียมคลอไรด์ 8.0 % w/v สามารถวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ได้ต่ำสุดที่ปริมาณ 0.25 พีพีเอ็ม ซึ่งสังเกตเห็นสีตะกอนอย่างชัดเจนด้วยตาเปล่า



ภาพประกอบที่ 3. □ ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังจากแยกปฏิบัติปฏิกริยา เมื่อใช้ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ในช่วง 2.0 – 20.0 % w/v (n = 5)





3.1. □ แผนภาพมาตรฐานและกราฟมาตรฐานสีตะกอน





แผนภาพมาตรฐานสีตะกอนของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 0.25, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 25.00, 50.00, 100.00, 250.00, 500.00 และ 1,000.00 พีพีเอ็ม ซึ่งเกิดจากการใช้ปฏิกริยาฟรีเทล-คราฟ แอลคิลเลชันที่เหมาะสม แสดงในภาพประกอบที่ 3.3 ซึ่งพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์เพิ่มขึ้น สีตะกอนที่เกิดจะมีความเข้มมากขึ้น นั่นคือ ความเข้มของสีตะกอนจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่มีอยู่ในสารละลาย





ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างด้วยตาเปล่านั้น ทำได้โดยการเปรียบเทียบสีตะกอนที่เกิดขึ้นกับแผนภาพมาตรฐานสีตะกอนของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้นต่างๆ และเพื่อให้การวิเคราะห์ปริมาณของบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างทำได้อย่างรวดเร็วขึ้นสำหรับการทดสอบคัดเบื้องต้นแรก (Screening test)

นอกจากนั้นการสังเกตสีของตะกอนด้วยตาเปล่าอาจเกิดความผิดพลาดสูง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทำการบันทึกภาพสีตะกอนโดยการถ่ายภาพแล้วนำไปทำการประมวลผล

ภาพด้วยโปรแกรม Photoshop CS2 เพื่อหาค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์หาปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ถูกต้องมากขึ้น

ความเข้มข้นของ บีทีอีเอ็กซ์ (พีพีเอ็ม)	แบลงค์	0.5	0.50	1.00
สีตะกอน				

ความเข้มข้นของ บีทีอีเอ็กซ์ (พีพีเอ็ม)	5.00	10.00	50.00	50.00
สีตะกอน				

ความเข้มข้นของ บีทีอีเอ็กซ์ (พีพีเอ็ม)	100.00	500.00	500.00	1,000.00
สีตะกอน				

ภาพประกอบที่ 3.3 แผนภาพมาตรฐานสีตะกอนของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ ที่ความเข้มข้นในช่วง 0.25 – 1,000.00 พีพีเอ็ม (n = 30)

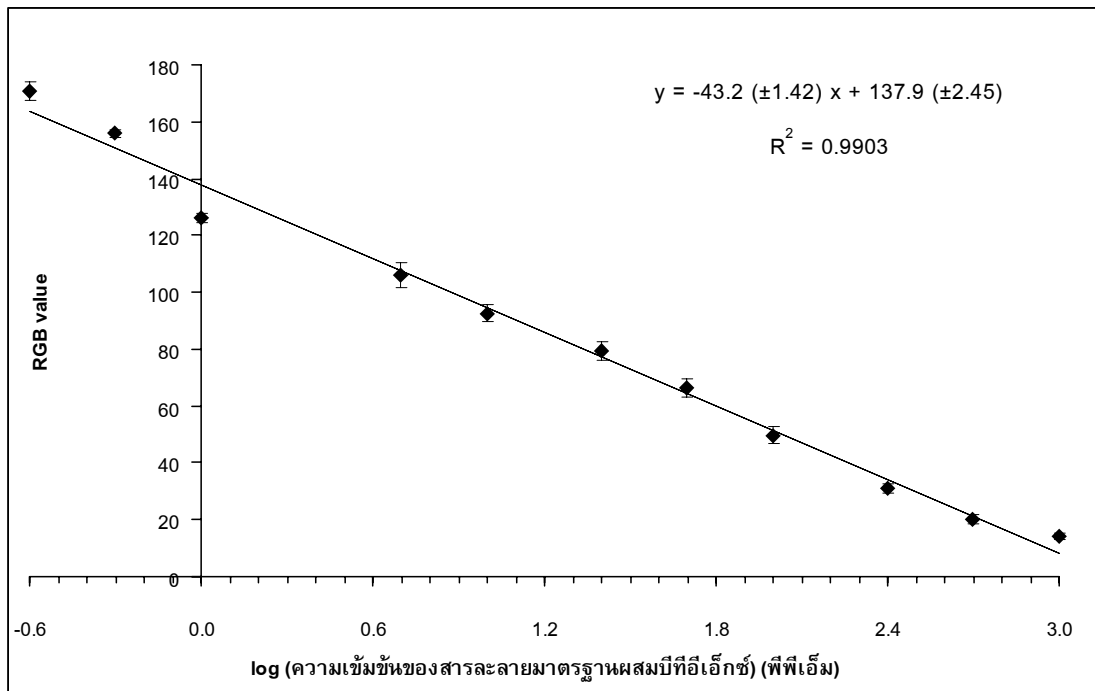
ผลการประมวลภาพสีตะกอนในระบบสี RGB ดังแสดงในตารางที่ 3.1 พบว่าค่าสีที่วิเคราะห์ได้ คือ RGB จะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมของ

ปีที่อีเอ็กซ์เพิ่มมากขึ้น ซึ่งอธิบายได้ว่า ความเข้มข้นของปีที่อีเอ็กซ์มาก ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มของสีตะกอนมาก ค่าต่างๆ ที่ได้จากการประมวลผลภาพในระบบสี RGB จะมีค่าน้อย ในทำนองเดียวกันความเข้มข้นของปีที่อีเอ็กซ์น้อย ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มของสีตะกอนน้อย ค่าต่างๆ ที่ได้จากการประมวลผลภาพในระบบสี RGB จะมีค่ามาก นอกจากนี้ผลการประมวลผลภาพสีตะกอนในระบบสี Grayscale ก็เป็นไปในทำนองเดียวกันกับระบบสี RGB นั่นคือ ความเข้มข้นของปีที่อีเอ็กซ์มาก ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มของสีตะกอนมาก ค่าความเข้มของสีตะกอนที่ได้จากการประมวลผลภาพจะมีค่าน้อย

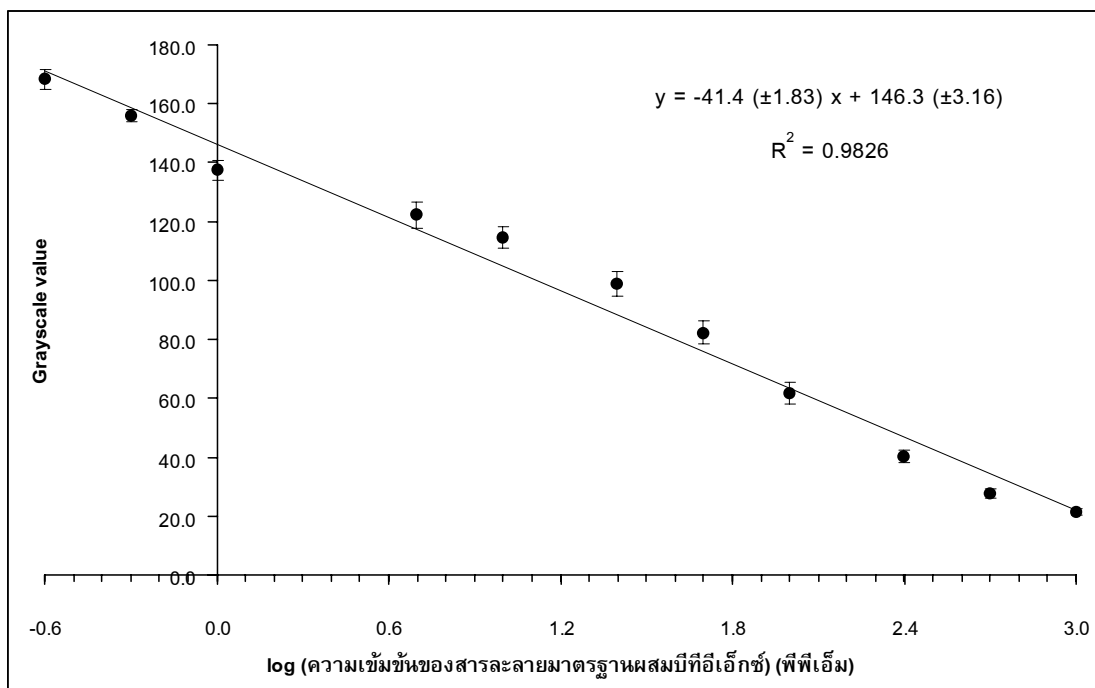
ตารางที่ 3.1 ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์สีในระบบสี RGB และ Grayscale (n = 30)

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมปีที่อีเอ็กซ์ (พีพีเอ็ม)	log (ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมปีที่อีเอ็กซ์)	RGB value (mean \pm S.D.)	Grayscale value (mean \pm S.D.)
0.25	-0.6	170.8 \pm 3.3	168.3 \pm 3.4
0.50	-0.3	155.8 \pm 1.6	155.9 \pm 1.9
1.00	0.0	126.3 \pm 1.7	137.4 \pm 3.2
5.00	0.7	106.0 \pm 4.2	122.2 \pm 4.4
10.00	1.0	92.7 \pm 2.8	114.5 \pm 3.5
25.00	1.4	79.5 \pm 3.2	98.7 \pm 4.2
50.00	1.7	66.4 \pm 3.3	82.3 \pm 3.9
100.00	2.0	49.5 \pm 3.0	61.7 \pm 3.5
250.00	2.4	30.9 \pm 1.8	40.3 \pm 2.2
500.00	2.7	20.1 \pm 1.7	27.7 \pm 1.5
1,000.00	3.0	14.1 \pm 1.0	21.5 \pm 0.9

ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของปีที่อีเอ็กซ์และความเข้มของสีตะกอนที่ได้จาก RGB และ Grayscale แสดงดังกราฟมาตรฐานของสีตะกอนในภาพประกอบที่ 3.4 โดยเป็นการพล็อตระหว่างความเข้มข้นของปีที่อีเอ็กซ์ในเทอม log (แกน x) และความเข้มสีตะกอน (แกน y) ซึ่งนอกจากจะใช้สีของตะกอนที่ได้จากการสังเกตด้วยตาเปล่าเพื่อใช้ในการทดสอบ



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ 3.4 กราฟมาตรฐานของสีตะกอนที่ได้จากการวิเคราะห์ในระบบสี (ก) RGB และ (ข) Grayscale

คัดเบื้องต้นก็สามารถใช้กราฟมาตรฐานของสีตะกอนในการหาความเข้มข้นของบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างได้

นอกจากนี้ได้ทำการศึกษาสีตะกอนที่เกิดขึ้นเมื่อมีสารละลายมาตรฐานของสาร 1 ชนิดหรือสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิดที่ความเข้มข้น 5.00 พีพีเอ็ม ซึ่งพบว่า สีตะกอนที่ได้จะมีสีเหลืองดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.5 และความเข้มของสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale แสดงในตารางที่ 3.2



ตารางที่ 3.□ ค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานของสาร 1 ชนิดและสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิดที่ความเข้มข้น 5.00 พีพีเอ็ม (n = 5)

สารละลายมาตรฐาน	RGB value (mean ± S.D.)	Grayscale value (mean ± S.D.)
เบนซีน	110.6 ± 2.3	115.3 ± 1.6
โทลูอีน	115.0 ± 4.0	121.8 ± 2.1
เอทิลเบนซีน	112.5 ± 1.4	119.6 ± 1.0
ไซลีน	112.3 ± 3.6	117.4 ± 2.7
เบนซีน และ โทลูอีน	116.7 ± 1.0	120.7 ± 0.8
เบนซีน และ เอทิลเบนซีน	115.8 ± 2.1	119.9 ± 1.9
เบนซีน และ ไซลีน	109.7 ± 2.4	113.0 ± 2.6
โทลูอีน และ เอทิลเบนซีน	111.4 ± 1.5	114.7 ± 1.7
โทลูอีน และ ไซลีน	114.4 ± 4.4	119.1 ± 4.1
เอทิลเบนซีน และ ไซลีน	115.5 ± 3.3	118.9 ± 2.8
เบนซีน โทลูอีน และ เอทิลเบนซีน	94.5 ± 1.0	100.3 ± 1.4
เบนซีน โทลูอีน และ ไซลีน	106.8 ± 1.6	113.4 ± 1.6
เบนซีน เอทิลเบนซีน และ ไซลีน	97.5 ± 3.3	103.7 ± 3.7
โทลูอีน เอทิลเบนซีน และ ไซลีน	99.3 ± 3.3	105.7 ± 3.7

เบนซีน	โทลูอีน	เอธิลเบนซีน	ไซลีน
			

เบนซีนและโทลูอีน	เบนซีนและเอธิล-เบนซีน	เบนซีนและไซลีน	โทลูอีนและเอธิล-เบนซีน
			

โทลูอีนและไซลีน	เอธิลเบนซีนและไซลีน	เบนซีน โทลูอีน และเอธิลเบนซีน	เบนซีน โทลูอีนและไซลีน
			

เบนซีน เอธิล-เบนซีนและไซลีน	โทลูอีน เอธิล-เบนซีนและไซลีน
	

ภาพประกอบที่ 3.5 แผนภาพมาตรฐานสีตะกอนที่เกิดจากสารละลายมาตรฐานของสาร 1 ชนิดและสารละลายมาตรฐานผสมของสาร 2 หรือ 3 ชนิดที่ความเข้มข้น 5.00 พีพีเอ็ม (n = 5)

จากตารางที่ 3.2 พบว่า ค่าสีตะกอนที่เกิดจากสารมาตรฐานชนิดเดียวมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระบบสี RGB แต่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระบบสี Grayscale และเมื่อพิจารณาจากแผนภาพมาตรฐานสีตะกอน (ภาพประกอบที่ 3.5) จะให้เจดสีที่ไม่แตกต่างกัน ส่วนค่าสีตะกอนที่เกิดจากการผสมสารละลายมาตรฐานสองหรือสามชนิดมีค่าสีตะกอนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทั้งสองระบบ และเมื่อพิจารณาร่วมกับแผนภาพมาตรฐานสีตะกอนในภาพประกอบที่ 3.5 พบว่า เจดสีตะกอนที่ได้จากการผสมสารละลายมาตรฐานสองหรือสามชนิดมีความแตกต่างในช่วงสีเหลืองอ่อนจนถึงสีเหลืองเข้ม อย่างไรก็ตามขอบเขตในการศึกษาของงานวิจัยนี้เป็นการคัดเบื้องต้น (Screening test) การใช้ภาพสีตะกอนเพียงอย่างเดียวก็สามารถระบุได้ว่า มีการปนเปื้อนสารบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้า





3.1.3 ผลของตัวรบกวนที่มีต่อปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน





น้ำมันเชื้อเพลิงมีสารพวกไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบอยู่มากมาย โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ พาราฟิน แนฟทีน และอะโรมาติก (ไชยเวชและกฤษดาบุรุษ, 2543) ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อสารบีทีอีเอ็กซ์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษานิดของสารไฮโดรคาร์บอนและผลรบกวนที่เกิดขึ้นจากตัวรบกวนชนิดนั้นๆ ในการทดลองได้ทำการศึกษาสารไฮโดรคาร์บอน 5 ชนิด ได้แก่ ไอโซออกเทน เพนเทน ไตรเมทิลเพนเทน ไชโคลเฮกเซน และแนฟทาลีน โดยกำหนดให้





- ไอโซออกเทน เพนเทน และไตรเมทิลเพนเทน เป็นตัวแทนของไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มพาราฟิน
- ไชโคลเฮกเซน เป็นตัวแทนของไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มแนฟทีน
- แนฟทาลีนเป็นตัวแทนของไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มอะโรมาติก

การศึกษานิดของตัวรบกวนและผลรบกวนที่เกิดขึ้น ทำโดยนำสารละลายมาตรฐานของไฮโดรคาร์บอนแต่ละชนิดมาทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันที่สภาวะที่เหมาะสม พบว่า สารไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มพาราฟินและแนฟทีนจะไม่เกิดผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนที่มีสี มีเพียงกลุ่มอะโรมาติกเท่านั้นที่ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนที่มีสีม่วง ดังแสดงในแผนภาพมาตรฐานสีตะกอนของแนฟทาลีนที่ความเข้มข้น 0.25, 0.50, 1.00, 5.00, 10.00, 25.00, 50.00, 100.00, 250.00, 500.00 และ 1,000.00 พีพีเอ็ม (ภาพประกอบที่ 3.6) ซึ่งจากแผนภาพอธิบายได้ว่า เมื่อความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานแนฟทาลีนเพิ่มขึ้น สีตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มมากขึ้น นั่นคือ ความเข้มข้นของสีตะกอนจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของสารละลายมาตรฐานแนฟทาลีนที่มีอยู่ในสารละลาย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า สารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบของน้ำมันเชื้อเพลิงที่อาจจะทำให้เกิดการรบกวนสีของตะกอนที่ได้จากบีทีอี-

เอ็กซ์ คือ แนฟทาลีนที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 5.00 พีพีเอ็ม ซึ่งจัดเป็นไฮโดรคาร์บอนที่อยู่ในกลุ่มอะโรมาติกเช่นเดียวกับบีทีเอ็กซ์

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน แนฟทาลีน (พีพีเอ็ม)	แบลงค์	0.5	0.50	1.00
สีตะกอน				

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน แนฟทาลีน (พีพีเอ็ม)	5.00	10.00	5.00	50.00
สีตะกอน				

ความเข้มข้นของ สารละลายมาตรฐาน แนฟทาลีน (พีพีเอ็ม)	100.00	50.00	500.00	1,000.00
สีตะกอน				

ภาพประกอบที่ 3.6 แผนภาพมาตรฐานสีตะกอนของสารละลายมาตรฐานแนฟทาลีนที่ความเข้มข้นต่างๆ (n = 5)

3. □ วิธีการเตรียมตัวอย่างผ้า

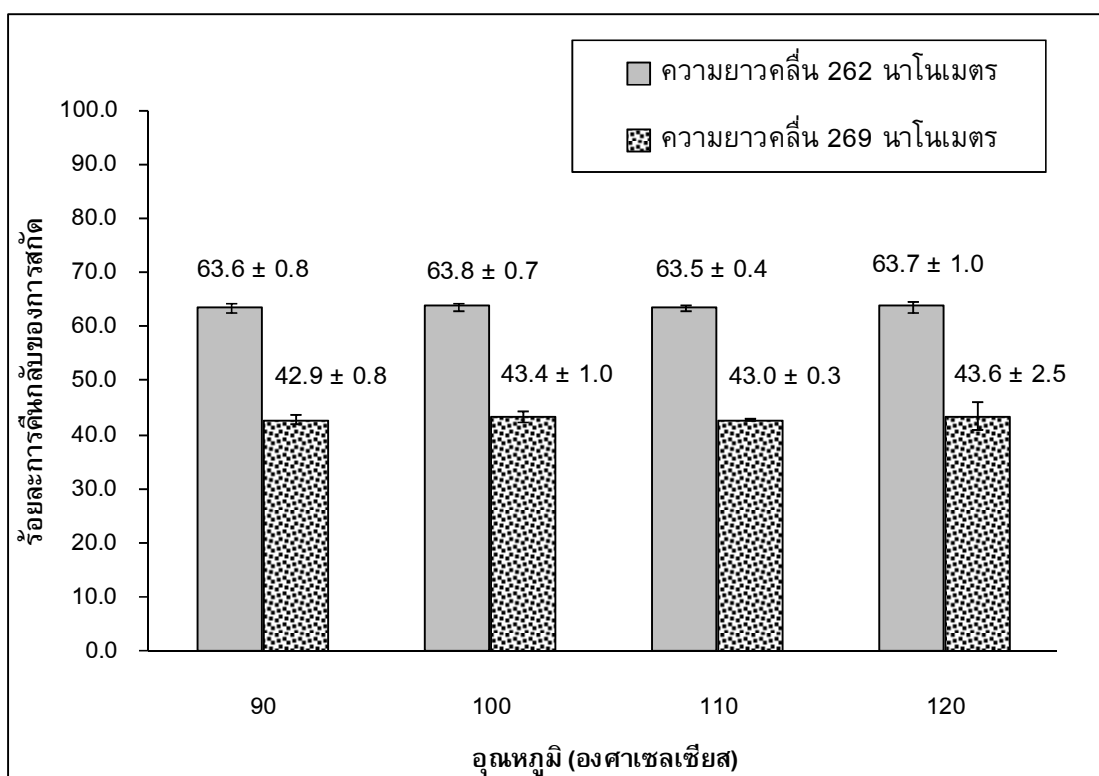
การวิเคราะห์หาสารเชื้อเพลิงในตัวอย่างจากเพลิงไหม้ เป็นขั้นตอนที่สำคัญในการตรวจสอบสาเหตุเพลิงไหม้ที่เกิดขึ้น สารเชื้อเพลิงที่พบได้บ่อย คือ น้ำมันเบนซินและน้ำมันก๊าด (DeForest *et al.*, 1983) ซึ่งประกอบไปด้วยไฮโดรคาร์บอนหลายชนิดผสมกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มบีทีอีเอ็กซ์ การตรวจวิเคราะห์สารไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบเหล่านี้จะทำให้ทราบชนิดของน้ำมันที่นำมาใช้ในการวางเพลิงได้ ขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในการตรวจวิเคราะห์ คือ การเตรียมตัวอย่างหรือการสกัดตัวอย่าง ซึ่งจะต้องมีความเหมาะสมกับสารที่ต้องการวิเคราะห์และวิธีการวิเคราะห์ที่นำมาใช้ หากเตรียมตัวอย่างไม่เหมาะสมอาจทำให้ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ตัวอย่างนั้นๆ ได้หรืออาจวิเคราะห์ได้แต่ให้ประสิทธิภาพไม่ดี ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่าง 3 วิธี ได้แก่ วิธีแรกเป็นวิธีการดูดซับไอของบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าด้วยกระดาษกรอง วิธีที่ 2 เป็นวิธีการสกัดด้วยเฮกเซน และวิธีที่ 3 เป็นวิธีการให้ความร้อน มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการสกัดในวิธีที่ 1 และ 2 โดยใช้ค่าการดูดกลืนแสงของบีทีอีเอ็กซ์ที่สกัดได้ในการหาละการคืนกลับ ส่วนวิธีที่ 3 ไอของบีทีอีเอ็กซ์ที่ระเหยออกมาจากตัวอย่างจะทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันทันทีที่ไอระเหยผ่านลงสู่สารทำปฏิกิริยา จึงมีการศึกษาความน่าเชื่อถือของวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการเปรียบเทียบกับวิธีการสกัดด้วยโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันร่วมกับแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน

3. □1 ผลของวิธีการดูดซับไอบีทีอีเอ็กซ์ด้วยกระดาษกรอง

วิธีการดูดซับไอบีทีอีเอ็กซ์จากเศษผ้าตัวอย่างบนกระดาษกรองที่อิมมัลด้วยเฮกซะเดคเคน จัดเป็นการเก็บตัวอย่างที่มีกลไกแบบแบ่งส่วน (Partition) โดยมีเฮกซะเดคเคนเป็นตัวจับไอระเหยของสารละลายมาตรฐานบีทีอีเอ็กซ์ (จิตสัมพันธเวชและคณะ, 2550) ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับการสกัดกระดาษกรองด้วยคาร์บอนเตตระคลอไรด์ ปัจจัยที่ทำการศึกษาในการสกัดด้วยกระดาษกรองมี 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิและเวลาที่ให้ความร้อนกับตัวอย่าง และประสิทธิภาพของการสกัดในแต่ละปัจจัยนั้นจะพิจารณาจากค่าร้อยละการคืนกลับของการสกัดตามสมการที่ 2.1

ผลของการศึกษาอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับตัวอย่างที่อุณหภูมิ 90.0, 100.0, 110.0 และ 120.0 องศาเซลเซียส แสดงในภาพประกอบที่ 3.7 พบว่า ค่าร้อยละการคืนกลับของการสกัดที่อุณหภูมิต่างๆ ณ ความยาวคลื่น 262 และ 269 นาโนเมตรมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ร้อยละการคืนกลับของการสกัดต่ำอยู่ในช่วง 63.5 – 63.8 และ 42.9 – 43.6 ที่ความยาวคลื่น 262 และ 269 นาโนเมตรตามลำดับ แสดงว่าเมื่อใช้อุณหภูมิต่างๆ ในการให้ความร้อนแก่ตัวอย่าง ประสิทธิภาพของการสกัดบีทีอีเอ็กซ์ก็ไม่แตกต่างกัน ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้อุณหภูมิที่ 100.0 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนกับตัวอย่าง โดย

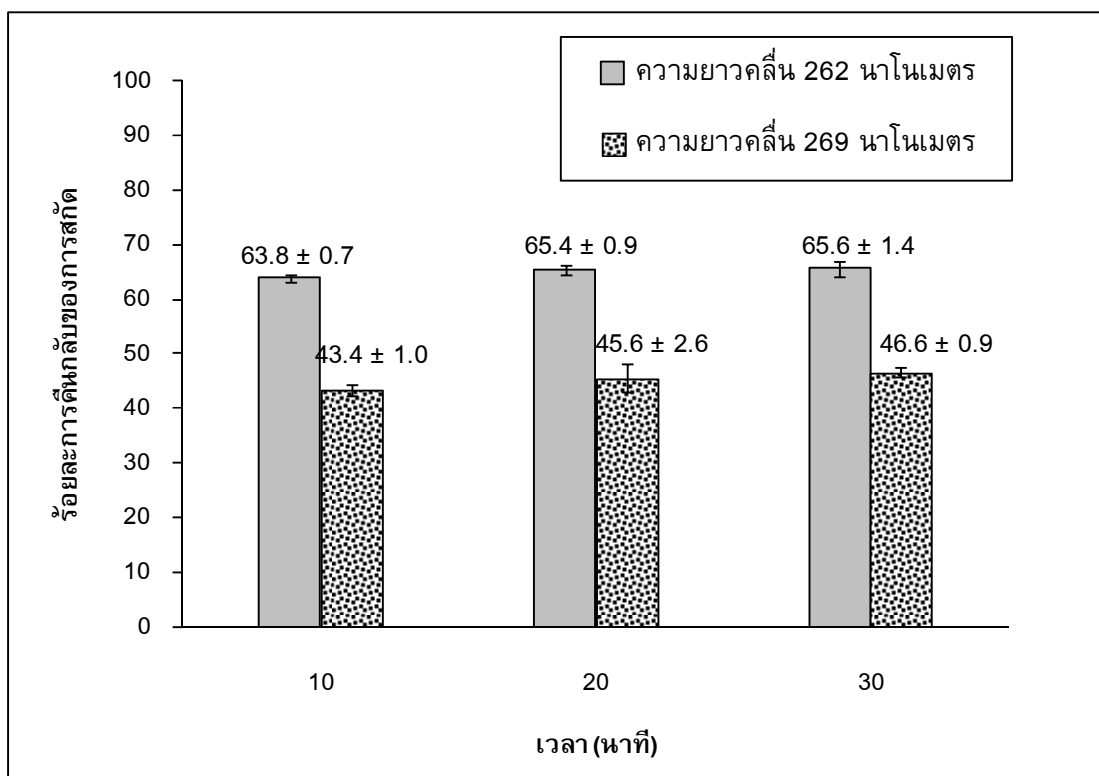
พิจารณาจากจุดเดือดและความดันไอของบีทีอีเอ็กซ์ดังแสดงในตารางที่ 1.7 ซึ่งพบว่า บีทีอีเอ็กซ์มีจุดเดือดในช่วง 80.1 – 144.4 องศาเซลเซียส และเบนซีนและโทลูอีนมีจุดเดือดต่ำและความดันไอสูงสามารถระเหยออกจากตัวอย่างได้เร็วกว่าเอซิลเบนซีนและไซลีน ดังนั้น อุณหภูมิที่ 100.0 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการให้ความร้อนกับตัวอย่างและนำไปใช้ในการศึกษาเวลาที่ให้ความร้อนกับตัวอย่างต่อไป



ภาพประกอบที่ 3.7 ผลของอุณหภูมิที่ให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่ทำการเติมบีทีอีเอ็กซ์ ความเข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม (n = 3)

ได้ทำการศึกษาเวลาในการให้ความร้อนเพื่อทำให้ประสิทธิภาพของการสกัดดีขึ้น ซึ่งผลของการศึกษาเวลาในการให้ความร้อนกับตัวอย่าง ที่เวลา 10, 20 และ 30 นาที แสดงในภาพประกอบที่ 3.8 พบว่า ค่าร้อยละการคืนกลับที่เวลา 10 นาทีมีค่าต่างจากค่าร้อยละการคืนกลับที่เวลา 20 และ 30 นาทีอย่างมีนัยสำคัญ ณ ความยาวคลื่น 262 และ 269 นาโนเมตร และค่าร้อยละการคืนกลับที่เวลา 20 และ 30 นาที ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ณ ความยาวคลื่นทั้งสอง โดยร้อยละการคืนกลับของการสกัดที่เวลา 10 นาที มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับร้อยละ 63.8 และ 43.4 ณ ความยาวคลื่น 262 และ 269 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งแสดงว่า เมื่อ

ระยะเวลาที่ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพของการสกัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากโมเลกุลของบีทีอีเอ็กซ์ระเหยออกมาจากตัวอย่างได้มากขึ้น จึงทำให้เกิดการดูดซับลงบนกระดาษกรองได้มากขึ้นด้วย

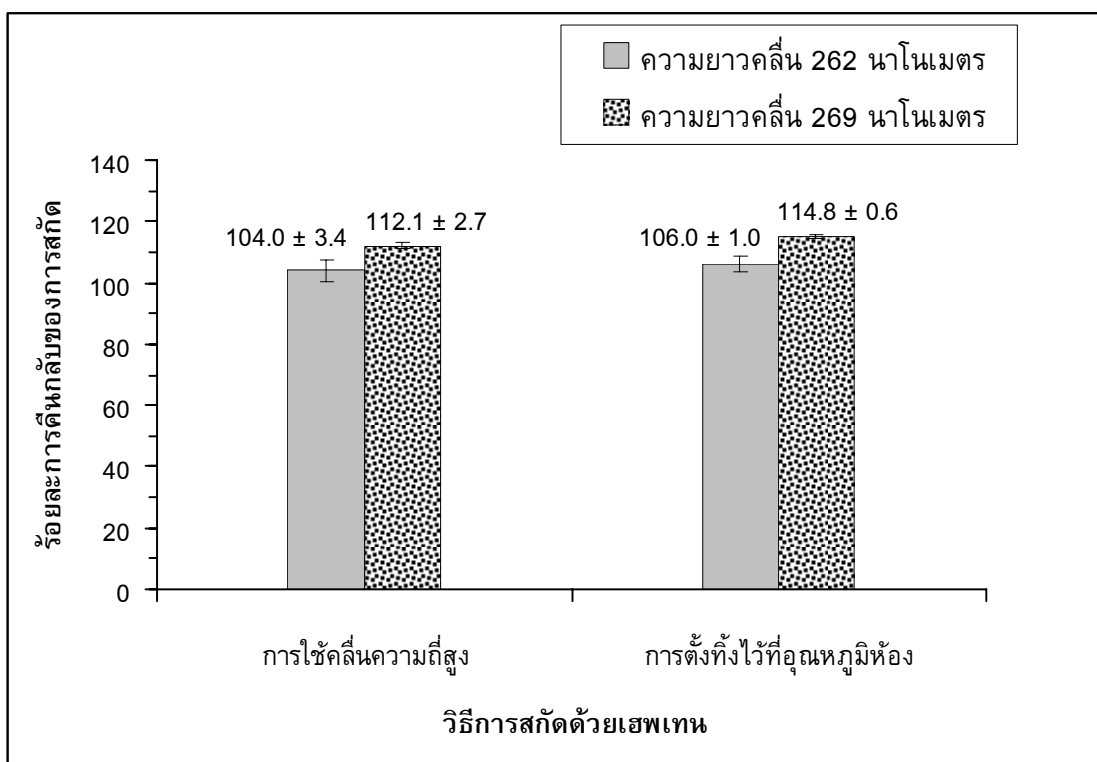


ภาพประกอบที่ 3.8 ผลของเวลาที่ให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่เติมบีทีอีเอ็กซ์เข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม (n = 3)

ถึงแม้ว่าจะมีการเพิ่มเวลาในการให้ความร้อน การเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีนี้ให้ประสิทธิภาพของการสกัดอยู่ในระดับต่ำกว่าร้อยละ 65.6 และ 46.6 ที่ความยาวคลื่น 262 และ 269 นาโนเมตรตามลำดับ ซึ่งอาจมีสาเหตุจากการดูดซับโมเลกุลของบีทีอีเอ็กซ์บนกระดาษกรองเกิดขึ้นน้อย หรืออาจเกิดการสูญหายของโมเลกุลบีทีอีเอ็กซ์จากกระดาษกรองในระหว่างการนำกระดาษกรองออกจากกระป๋องและทำการตัดเป็นชิ้นเล็กๆ ก่อนนำไปสกัดด้วยคาร์บอน-เตตระคลอไรด์ ดังนั้น จึงทำการศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการสกัดด้วยเฮพเทน เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างที่เหมาะสมและได้ประสิทธิภาพของการสกัดอยู่ในเกณฑ์ดี

3.□□ ผลของการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้าด้วยเฮฟเทน

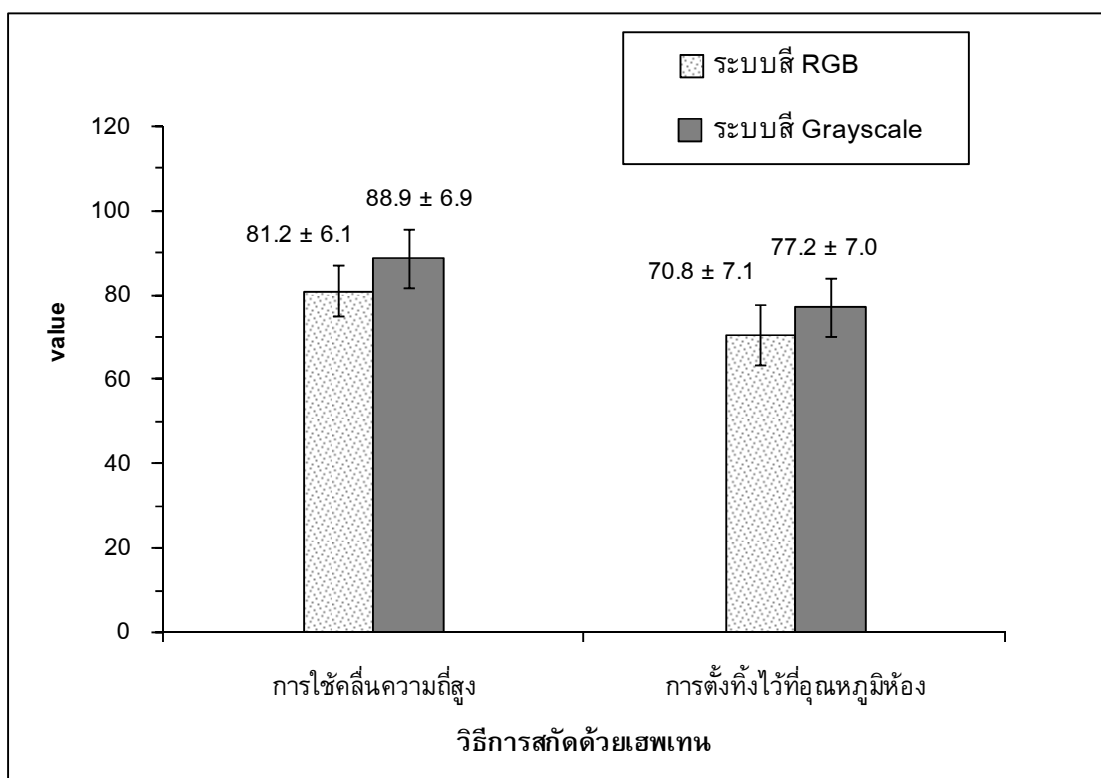
เฮฟเทนนิยมใช้เป็นตัวสกัดในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำและดินที่มีไฮโดรคาร์บอนปนเปื้อนน้อยกว่า 1,000.00 พีพีเอ็ม (U.S. EPA, 1997) จึงนำมาประยุกต์ใช้กับการสกัดสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้า ซึ่งจัดเป็นการสกัดด้วยตัวทำละลายโดยตรง ได้ทำการศึกษาวิธีการสกัด 2 วิธี คือ การสกัดโดยใช้คลื่นความถี่สูงและการสกัดโดยการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ประสิทธิภาพของการสกัดทำได้โดยการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารมาตรฐานบีทีอีเอ็กซ์ในสารละลายที่สกัดได้และนำมาคำนวณค่าร้อยละการคืนกลับของการสกัดที่สองความยาวคลื่น คือ 262 และ 269 นาโนเมตร ค่าร้อยละการคืนกลับของการสกัดด้วยเฮฟเทนโดยใช้คลื่นความถี่สูงและการตั้งทิ้งไว้แสดงในภาพประกอบที่ 3.9 และสี่ตะกอนที่เกิดจากการสกัดบีทีอีเอ็กซ์ด้วยเฮฟเทนโดยใช้คลื่นความถี่สูงและการตั้งทิ้งไว้ในระบบ RGB และ Grayscale แสดงในภาพประกอบที่ 3.10



ภาพประกอบที่ 3.9 ร้อยละการคืนกลับของการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้าด้วยเฮฟเทนโดยใช้คลื่นความถี่สูงและแบบตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที (n = 3)

ได้ทำการเปรียบเทียบวิธีการสกัดบีทีอีเอ็กซ์ด้วยเฮฟเทน 2 วิธี คือ การใช้คลื่นความถี่สูงและการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องที่เวลาเดียวกัน คือ 15 นาที ดังภาพประกอบที่ 3.9

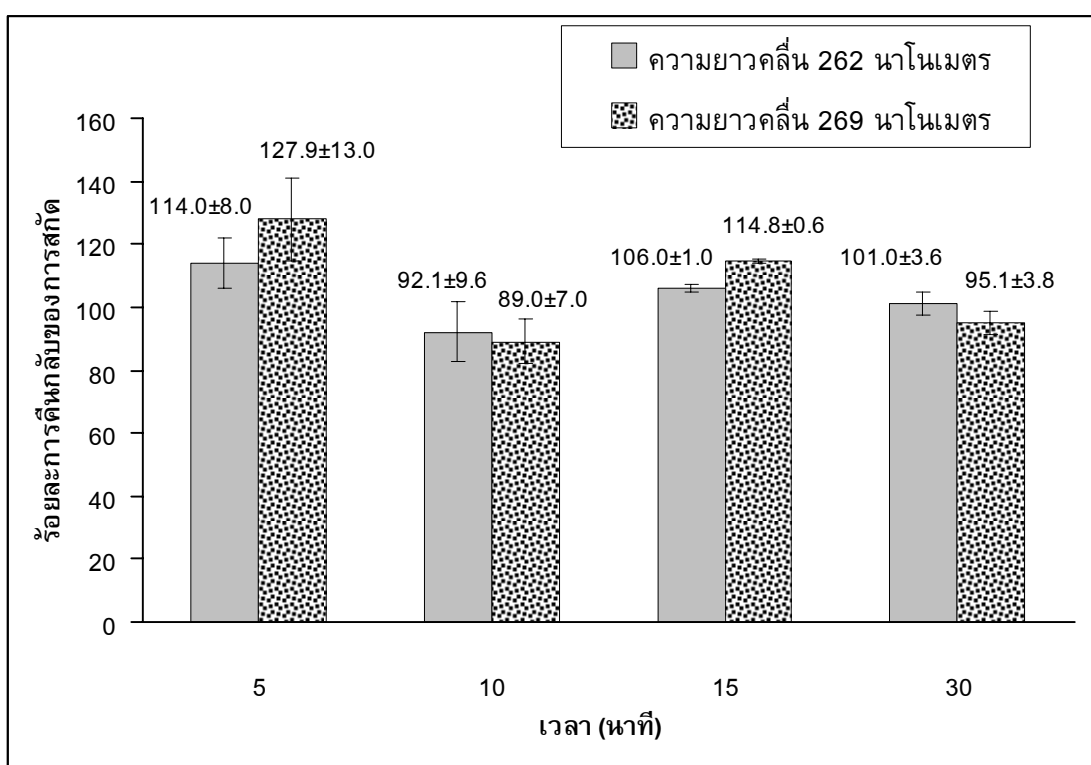
พบว่า ประสิทธิภาพของการสกัดทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% กล่าวคือ ที่ความยาวคลื่น 262 นาโนเมตร การสกัดโดยใช้คลื่นความถี่สูงและการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ให้ค่าร้อยละการคืนกลับเท่ากับ 104.0 และ 106.0 ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่น 269 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 112.1 และ 114.8 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ในทำนองเดียวกันสีตะกอนที่เกิดจากการนำสารละลายที่ได้จากการสกัดด้วยเฮฟเทนไปทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน ดังภาพประกอบที่ 3.10 พบว่า ค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ที่ได้จากการสกัดทั้งสองวิธีก็ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงได้เลือกใช้วิธีการสกัดแบบตั้งทิ้งไว้ เนื่องจากทำได้ง่าย ไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ยุ่งยากและอาจจะประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบต้นเพลิงจำพวกเศษผ้าได้



ภาพประกอบที่ 3.10 สีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ที่เกิดจากการสกัดบีทีอีเอ็กซ์ด้วยเฮฟเทนแบบใช้คลื่นความถี่สูงและแบบตั้งทิ้งไว้เป็นเวลา 15 นาที (n = 3)

การศึกษาเวลาที่เหมาะสมในการสกัดบีทีอีเอ็กซ์ด้วยเฮฟเทนโดยการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง มีวัตถุประสงค์เพื่อหาเวลาในการสกัดที่ให้ประสิทธิภาพของการสกัดที่ดี และใช้

เวลาในการสกัดน้อยที่สุด ซึ่งทำการศึกษาที่เวลา 5, 10, 15 และ 30 นาที ดังภาพประกอบที่ 3.11 พบว่า ค่าร้อยละการคืนกลับของสกัดที่เวลาต่างกันอยู่ในเกณฑ์ดี และอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ตามเกณฑ์ของ U.S. Environmental Protection Agency (EPA) คือ มีความแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งพิจารณาจากค่าร้อยละการคืนกลับของการสกัดอยู่ในช่วงร้อยละ 80 – 120 และความเที่ยง (Precision) ซึ่งพิจารณาจากค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (% RSD) จะต้องไม่เกินร้อยละ 20 ดังนั้น จากผลการทดลองจึงเลือกทำการสกัดบีบีทีเอ็กซ์ที่เวลา 15 นาที เนื่องจากที่เวลาดังกล่าวให้ค่าการเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ดีที่สุด คือ ไม่เกินร้อยละ 1



ภาพประกอบที่ 3.11 ผลของเวลาในการสกัดด้วยเฮฟเทนแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง (n = 3)





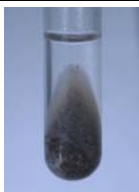


ผลการวิเคราะห์บีบีทีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด คือ น้ำมันดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์และน้ำมันเบนซิน โดยวิธีการสกัดด้วยเฮฟเทนแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 15 นาที แสดงในตารางที่ 3.3 พบว่า ตะกอนที่เกิดขึ้นมีสีม่วงดำในตัวอย่างผ้าฝ้ายและกระสอบป่านที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันเบนซิน และในตัวอย่างผ้าทั้ง 5 ชนิดที่ปนเปื้อนน้ำมันแก๊สโซฮอล์ และดีเซล ซึ่งอาจมีสาเหตุจากวิธีการสกัดผ้าด้วยเฮฟเทนทำให้สารที่

ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างผ้า รวมทั้งสารไฮโดรคาร์บอนชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารในกลุ่มอะโรมาติกซึ่งมีสมบัติการละลายได้ดีในเฮฟเทนซึ่งเป็นตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว (เหล่าสุขสถิตย์, 2552) ถูกสกัดออกมาพร้อมกับบีทีอีเอ็กซ์ และเมื่อนำสารสกัดนั้นมาทำปฏิกิริยาฟรีเทล-คราฟ แอลคิลเลชัน จึงทำให้เกิดตะกอนที่มีสีดั่งสีตะกอนที่เกิดจากบีทีอีเอ็กซ์ได้

สำหรับตัวอย่างผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์ และผ้าลินินที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันเบนซิน เมื่อนำมาวิเคราะห์พบว่า ได้ตะกอนสีส้มทั้ง 3 ตัวอย่าง ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณน้ำมันเบนซินที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างผ้าเหล่านั้นมีปริมาณมากพอสมควร จึงสามารถตรวจพบบีทีอีเอ็กซ์ที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างได้

จะเห็นได้ว่าวิธีการสกัดด้วยเฮฟเทนแบบตั้งทิ้งไว้ร่วมกับการวิเคราะห์โดยอาศัยปฏิกิริยาฟรีเทล-คราฟ แอลคิลเลชัน สามารถวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าได้ แต่จะมีข้อจำกัดในกรณีที่ผ้ามีการปนเปื้อนด้วยน้ำมันเชื้อเพลิงในปริมาณน้อย ชนิดของผ้าที่ทำการวิเคราะห์ และผ้ามีการปนเปื้อนน้ำมันชนิดอื่นๆ นอกจากน้ำมันเบนซิน อย่างไรก็ตามวิธีนี้ก็สามารุใช้ในการทดสอบคัดเบื้องต้น (Screening test) ได้ว่า ถ้าหากเกิดตะกอนสีส้มหรืออาจมีตะกอนสีม่วงปะปนอยู่ก็อาจกล่าวในเบื้องต้นได้ว่า ตัวอย่างผ้าอาจมีการปนเปื้อนน้ำมันเบนซิน ซึ่งอาจจะใช้น้ำมันเบนซินเป็นเชื้อเพลิงในการลอบวางเพลิง เนื่องจากน้ำมันเบนซินมีองค์ประกอบของสารบีทีอีเอ็กซ์และอาจมีแนฟทาซีนและอนุพันธ์ของแนฟทาซีนผสมอยู่บ้างเล็กน้อย (Sandercock and Du Pasquier, 2003) แต่ถ้าหากเกิดตะกอนสีม่วงทั้งหมดก็อาจกล่าวในเบื้องต้นได้ว่า น้ำมันเชื้อเพลิงที่ตรวจพบในตัวอย่างอาจเป็นน้ำมันดีเซล หรือน้ำมันก๊าด

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์พีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยวิธีการสกัดด้วยเฮกเซนแบบตั้งทิ้งไว้

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน
SH01	ผ้าฝ้าย	เบนซิน (ปกติ)	
SH02	ผ้าโพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ปกติ)	
SH03	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ปกติ)	
SH04	ผ้าลินิน	เบนซิน (ปกติ)	
SH05	กระสอบป่าน	เบนซิน (ปกติ)	
SH06	ผ้าฝ้าย	เบนซิน (ร้านค้า)	
SH07	ผ้าโพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ร้านค้า)	

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน
SH08	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ร้านค้า)	
SH09	ผ้าลินิน	เบนซิน (ร้านค้า)	
SH10	กระสอบป่าน	เบนซิน (ร้านค้า)	
SH11	ผ้าฝ้าย	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	
SH12	ผ้าโพลีเอสเตอร์	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	
SH13	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	
SH14	ผ้าลินิน	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	

ตารางที่ 3.3 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน
SH15	กระสอบป่าน	แก๊สโซฮอลล์ (บางจาก)	
SH16	ผ้าฝ้าย	ดีเซล (บางจาก)	
SH17	ผ้าโพลีเอสเตอร์	ดีเซล (บางจาก)	
SH18	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	ดีเซล (บางจาก)	
SH19	ผ้าลินิน	ดีเซล (บางจาก)	
SH20	กระสอบป่าน	ดีเซล (บางจาก)	

3.3 ผลการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้า

ได้ทำการพัฒนาวิธีการสกัดบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าโดยการให้ความร้อน เพื่อที่จะแยก บีทีอีเอ็กซ์ออกจากไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิง โดยอาศัย สมบัติของจุดเดือดที่แตกต่างกัน และลดผลรบกวนที่เกิดขึ้นในการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์จาก ตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง

3.3.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองได้ทำการออกแบบท่อนำแก๊สเพื่อให้ไอของสารละลาย มาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ระเหยออกจากตัวอย่างผ้าเคลื่อนที่ผ่านไปยังสารละลายที่ใช้ใน การทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันแบบระบบปิด โดยภายในท่อนำแก๊สมีการบรรจุ ซิลิกาเจล ซึ่งจัดเป็นสารดูดความชื้นที่มีประสิทธิภาพ สามารถดูดความชื้นได้ถึงประมาณร้อยละ 35 – 40 ของน้ำหนัก (บริษัท GeeJay Chemicals Ltd.) และเมื่อนำมาใช้งานแล้วสามารถนำ กลับมาใช้ซ้ำได้อีก และเนื่องจากอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันมีความไวต่อไอน้ำมาก หากมีไอน้ำอยู่ในปริมาณมากอะลูมิเนียมคลอไรด์จะเกิดการ จับตัวกันเป็นก้อน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการเร่งปฏิกิริยาของอะลูมิเนียมคลอไรด์ลดลง ดังนั้น ซิลิกาเจลจึงเป็นตัวหลักสำคัญที่ใช้ดูดซับไอน้ำที่ระเหยออกจากตัวอย่างผ้า ช่วยให้อะลูมิเนียม- คลอไรด์ไม่เกิดการจับตัวกันในขณะที่ทำการทดลอง

การควบคุมอุณหภูมิแบ่งออกเป็น 5 บริเวณ (ภาพประกอบที่ 2.4 และ 2.5) ได้แก่

- ขวดบรรจุตัวอย่าง (T_1) ซึ่งใช้บรรจุตัวอย่างผ้าที่มีการปนเปื้อนบีทีอีเอ็กซ์ ซึ่ง บีทีอีเอ็กซ์มีจุดเดือดอยู่ในช่วง 80.1 – 144.4 องศาเซลเซียส ดังนั้น ในการทดลองจึงได้กำหนด อุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดไว้ที่อุณหภูมิ 150.0 องศาเซลเซียส เพื่อต้องการให้สารละลายมาตรฐาน ผสมของบีทีอีเอ็กซ์ระเหยออกจากตัวอย่าง

- ท่อนำแก๊สส่วนแรก (T_2) ท่อนำแก๊สในส่วนนี้ต่อเข้ากับขวดบรรจุตัวอย่าง (ขวด A) ทำการควบคุมอุณหภูมิในขณะที่ทำการสกัดไว้ที่ 150.0 องศาเซลเซียส เพื่อให้ไอของ สารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ระเหยออกจากตัวอย่างเกิดการระเหยได้อย่างต่อเนื่อง และป้องกันการเกิดการควบแน่นของไอกลับลงมาเป็นของเหลว

- ท่อนำแก๊สส่วนที่สอง (T_3) ท่อนำแก๊สในส่วนนี้มีการบรรจุซิลิกาเจลไว้ภายใน ซึ่งมีการศึกษาอุณหภูมิในบริเวณนี้ที่อุณหภูมิ 70.0, 80.0 และ 90.0 องศาเซลเซียส เพื่อศึกษา อุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อป้องกันการควบแน่นของไอระเหยกลับลงมาเป็นของเหลวและเพื่อให้ ซิลิกาเจลสามารถดูดซับไอน้ำที่ระเหยขึ้นมาพร้อมกับไอของสารละลายมาตรฐานบีทีอีเอ็กซ์ เอาไว้ได้

- ท่อนำแก๊สส่วนที่สาม (T_4) ท่อนำแก๊สในส่วนนี้ต่อเข้ากับขวดทำปฏิกิริยา (ขวด B) ซึ่งมีการศึกษาอุณหภูมิในบริเวณนี้ที่อุณหภูมิ 70.0, 80.0 และ 90.0 องศาเซลเซียส เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอกลับลงมาเป็นของเหลว

- ขวดทำปฏิกิริยา (T_5) ซึ่งบรรจุอะลูมิเนียมคลอไรด์และคาร์บอนเตตระคลอไรด์ไว้เพื่อทำปฏิกิริยากับไอของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ผ่านมาจากท่อนำแก๊สและเกิดเป็นตะกอนที่มีสีขึ้น ทำการควบคุมอุณหภูมิในส่วนนี้ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส) เนื่องจากปฏิกิริยาฟรีเทล-กราฟ แอลคิลเลชันสามารถเกิดได้ที่อุณหภูมิห้อง

ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองในสภาวะที่ 1 (ตารางที่ 2.4) คือ 150.0 – 150.0 – 70.0 – 70.0 – 30.0 องศาเซลเซียส พบว่า เกิดการควบแน่นจากไอบีทีอีเอ็กซ์เป็นของเหลวตรงบริเวณส่วนต้นของท่อที่บรรจุซิลิกาเจลซึ่งจะกั้นไม่ให้ไอบีทีอีเอ็กซ์ผ่านไปยังขวด B ได้และยังทำให้บีทีอีเอ็กซ์เกิดปฏิกิริยาฟรีเทล-กราฟ แอลคิลเลชันได้น้อย สีของตะกอนจึงเกิดได้น้อย

ส่วนในสภาวะที่ 2 คือ 150.0 – 150.0 – 80.0 – 80.0 – 30.0 และสภาวะที่ 3 คือ 150.0 – 150.0 – 90.0 – 90.0 – 30.0 (ตารางที่ 2.4) ให้ผลการทดลองที่เหมือนกัน คือไม่เกิดการควบแน่นเป็นของเหลวและได้ตะกอนที่มีสีชัดเจนและเมื่อพิจารณาในสภาวะที่ 3 มีการควบคุมอุณหภูมิบริเวณที่บรรจุซิลิกาเจลไว้ที่ 90.0 องศาเซลเซียส (T_3) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการคายการดูดซับไอน้ำของซิลิกาเจล ซึ่งมีค่าไม่เกิน 120.0 องศาเซลเซียส (Weintraub, 2002) หากเลือกทำการทดลองที่อุณหภูมินี้ซิลิกาเจลอาจจะดูดซับไอน้ำได้ไม่ดีเมื่อเทียบกับการทดลองในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ดังนั้น สภาวะที่ 2 จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมอุณหภูมิบริเวณท่อนำแก๊ส

3.3.3. ผลของอัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจน

จากการทดลองเบื้องต้นโดยเปรียบเทียบการไม่ใช้แก๊สไนโตรเจนกับใช้แก๊สไนโตรเจนในการพาไอของบีทีอีเอ็กซ์และควบคุมเวลาในการทดลองเท่ากัน พบว่า เมื่อใช้แก๊สไนโตรเจนสีตะกอนที่ได้มีความเข้มมากกว่าและเวลาในการเกิดตะกอนที่มีสีเร็วกว่า เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนช่วยในการพาโมเลกุลของสารที่ต้องการวิเคราะห์ให้ไปทำปฏิกิริยาได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ใช้แก๊สไนโตรเจนในการทดลองซึ่งช่วยให้เวลาในการวิเคราะห์เร็วขึ้นจากการทดลองที่อัตราการไหลต่างกัน พบว่า เมื่อใช้อัตราการไหลที่ 0.5 และ 1.0 มิลลิลิตรต่อนาที สีตะกอนเริ่มเกิดขึ้นในเวลาประมาณ 2.25 ± 0.09 นาทีและใช้เวลาในการวิเคราะห์ประมาณ 10 – 15 นาที ในขณะที่อัตราการไหล 10.0 มิลลิลิตรต่อนาที สามารถเห็นสีตะกอนได้เร็วกว่า คือ ประมาณ 1.40 ± 0.05 นาทีและใช้เวลาในการวิเคราะห์ทั้งหมดประมาณ 7 – 8 นาที ดังนั้นอัตราการไหลที่ 10.0 มิลลิลิตรต่อนาที จึงเป็นอัตราการไหลที่เหมาะสมกว่าอัตราการไหลอื่นๆ อย่างไรก็ตามการใช้แก๊สไนโตรเจนส่งผลให้ความเข้มของสีตะกอนที่วิเคราะห์ได้ด้วย







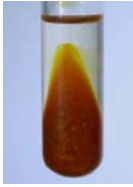
วิธีการให้ความร้อนมีความเข้มข้นน้อยกว่าสีตะกอนที่ได้จากสารละลายมาตรฐานผสมในภาพประกอบที่ 3.3 เนื่องจากแก๊สไนโตรเจนนอกจากจะทำหน้าที่ในการพาโมเลกุลของสารแล้วยังทำหน้าที่เป็นตัวเจือจางโมเลกุลของสารในเวลาเดียวกันด้วย จึงทำให้โมเลกุลสารที่ผ่านไปทำปฏิกิริยามีปริมาณน้อยลง (Shenoy, 2005)

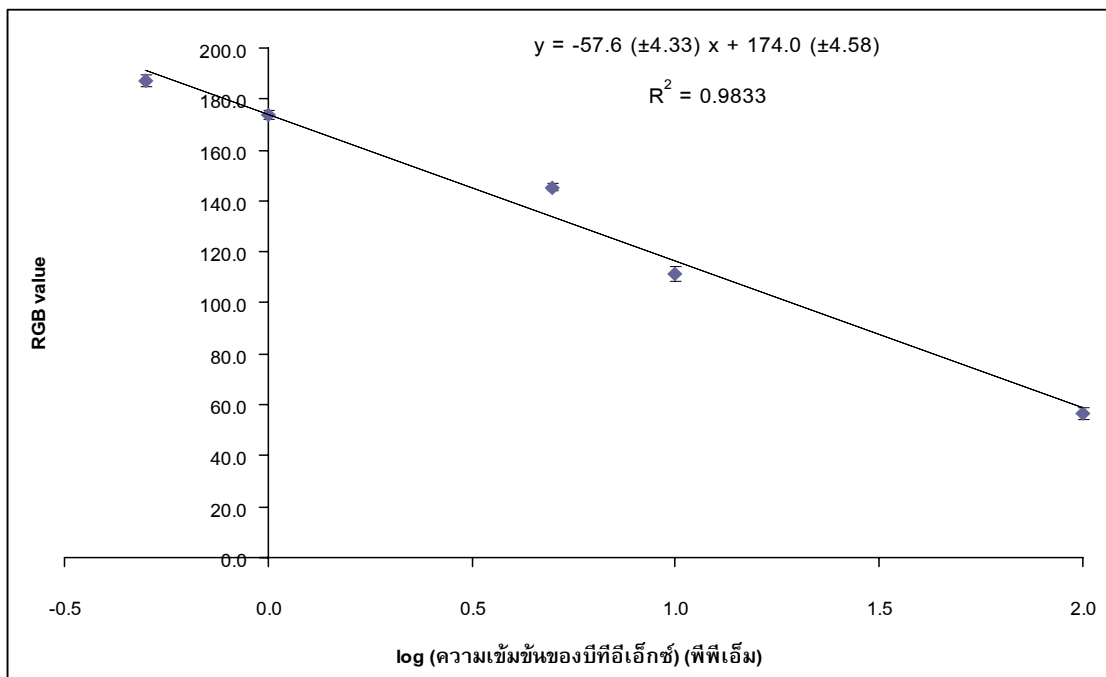
3.3.3 แผนภาพมาตรฐานและกราฟมาตรฐานของสีตะกอนจากการให้ความร้อน

จากการประยุกต์ใช้อุณหภูมิที่ควบคุมบริเวณก่อนนำแก๊สในสภาวะที่ 2 และใช้อัตราการไหลของแก๊สไนโตรเจนที่ 10.0 มิลลิลิตรต่อนาที ในการทำให้บีทีอีเอ็กซ์ระเหยออกจากตัวอย่างผ้า โดยใช้ผ้าฝ้ายสีขาว ขนาด 15.0 × 15.0 เซนติเมตร ซึ่งพบว่า เริ่มสังเกตเห็นสีตะกอนที่เวลาประมาณ 3 – 4 นาที และความเข้มของสีตะกอนคงที่ที่เวลาประมาณ 15 – 17 นาที หลังจากนั้นสีตะกอนจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นสีคล้ำมากขึ้น ซึ่งเริ่มเกิดขึ้นที่เวลาประมาณ 20 นาทีเป็นต้นไป ดังนั้นจึงกำหนดเวลาที่ใช้ในการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์จากผ้าที่เวลา 20 นาที เพื่อให้ไอของบีทีอีเอ็กซ์ระเหยออกมาจากตัวอย่างได้มากที่สุดและสามารถสังเกตเห็นสีตะกอนได้อย่างชัดเจน

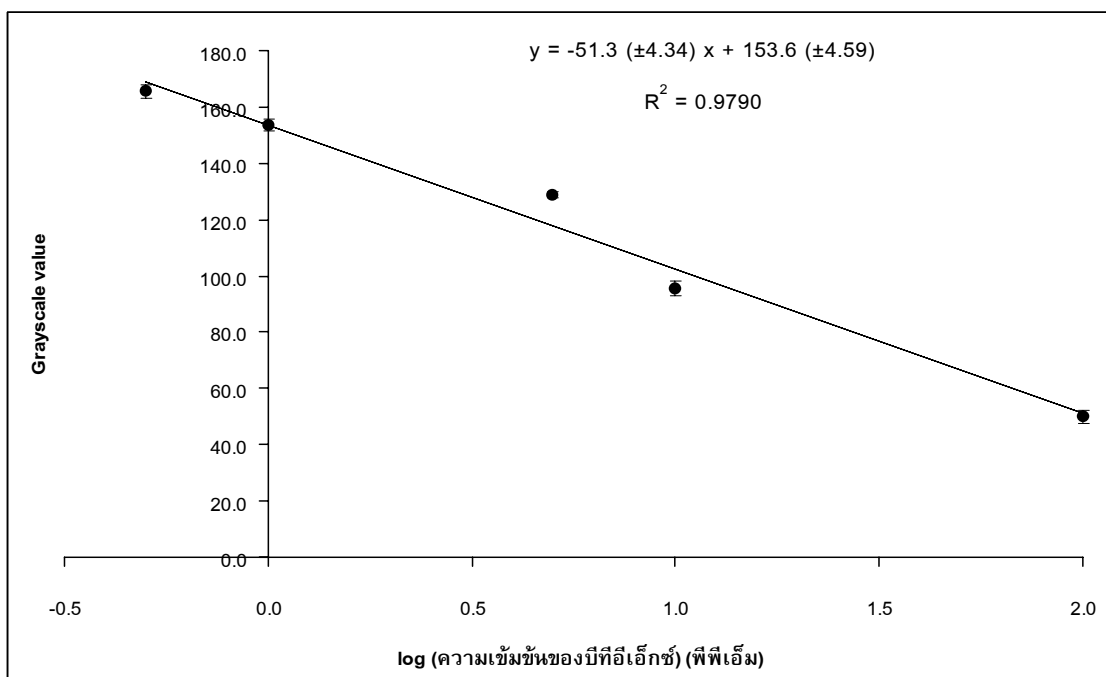
แผนภาพมาตรฐานและกราฟมาตรฐานสีตะกอนของการให้ความร้อน ทำได้โดยใช้สารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.50 ถึง 100.00 พีพีเอ็ม เติมน้ำลงในผ้าแล้วสังเกตเห็นสีตะกอนเพื่อใช้ในการทำแผนภาพมาตรฐานและบันทึกค่าความเข้ม สีของตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale เพื่อใช้ในการทำกราฟมาตรฐาน ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และภาพประกอบที่ 3.12 ตามลำดับ ซึ่งจากการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนสามารถตรวจวัดความเข้มข้นต่ำสุดของบีทีอีเอ็กซ์ได้เท่ากับ 0.50 พีพีเอ็ม

ตารางที่ 3.4 แผนภาพมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากการให้ความร้อนกับผ้าที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 0.50 – 100.00 พีพีเอ็ม (n = 5)

ความเข้มข้นของ บีทีอีเอ็กซ์ (พีพีเอ็ม)	log (ความเข้มข้นของบีทีอีเอ็กซ์) (พีพีเอ็ม)	สีตะกอน	RGB value (mean \pm S.D.)	Grayscale value (mean \pm S.D.)
แปลงค์			202.6 \pm 0.2	183.23 \pm 0.1
0.50	-0.3		187.1 \pm 2.2	165.6 \pm 2.5
1.00	0.0		173.8 \pm 1.8	153.7 \pm 2.0
5.00	0.7		145.4 \pm 1.4	128.9 \pm 1.1
10.00	1.0		111.4 \pm 2.8	95.4 \pm 2.7
50.00	1.7		69.0 \pm 1.6	66.8 \pm 2.7
100.00	2.0		56.6 \pm 2.3	50.0 \pm 2.4



(ก)



(ข)

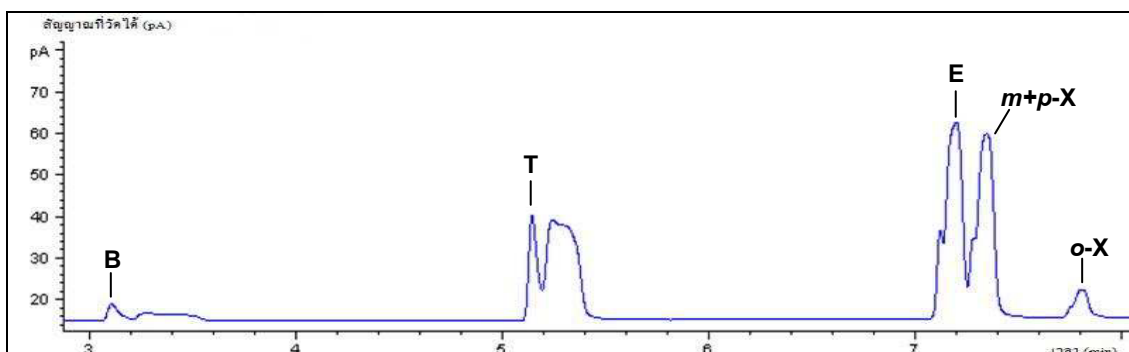
ภาพประกอบที่ 3.1 □ กราฟมาตรฐานของสีตะกอนที่เกิดจากการให้ความร้อนกับผ้าที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ที่ความเข้มข้น 0.50 – 100.00 พีพีเอ็ม ซึ่งวิเคราะห์สีตะกอนในระบบ (ก) RGB และ (ข) Grayscale (n = 5)

ในน้ำมันเชื้อเพลิงประกอบด้วยสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมาก ซึ่งจากการทดลองในงานวิจัยนี้พบว่า มีเพียงสารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเท่านั้นที่สามารถทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันได้และเกิดเป็นตะกอนที่มีสี โดยสีของตะกอนที่เกิดจากโมโนไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน และโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งโมโนไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะให้ตะกอนเจดสีส้ม ส่วนโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะได้ตะกอนเจดสีม่วง ซึ่งตะกอนที่เกิดจากโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะรบกวนการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ได้ ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลรบกวนของโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เกิดขึ้นที่มีต่อการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์จากผ้าโดยการให้ความร้อน โดยใช้แนฟทาลีนเป็นตัวแทนของสารไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มนี้ ซึ่งพบว่า เริ่มสังเกตเห็นตะกอนสีม่วงเกิดขึ้นในขวดที่ใช้ทำปฏิกิริยาที่เวลาประมาณ 20 – 25 นาที ซึ่งเกิดขึ้นหลังจากบีทีอีเอ็กซ์เกิดปฏิกิริยาและเกิดตะกอนที่มีสีภายใน 15 – 17 นาที และความเข้มข้นของสีตะกอนของแนฟทาลีนที่เกิดขึ้นมีความเข้มข้นน้อย เนื่องจากกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะมีจุดเดือดสูงกว่าโมโนไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมาก (Howard, 1943; Rafson, 1998) และสูงกว่าอุณหภูมิที่ทำการทดลอง (150.0 องศาเซลเซียส) ดังนั้น การระเหยของแนฟทาลีนจึงเกิดได้น้อยส่งผลให้ความเข้มข้นของสีตะกอนน้อย การวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์โดยการให้ความร้อนจะช่วยลดผลรบกวนที่เกิดจากโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ ทำให้การวิเคราะห์ที่สภาวะดังกล่าวสามารถแยกสารทั้งสองกลุ่มออกจากกันได้

3.3.4 การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการให้ความร้อน

การทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการให้ความร้อนทำได้โดยเปรียบเทียบกับวิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน ซึ่งมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะใช้ทดสอบวิธีการให้ความร้อนว่ามีความเหมาะสมในการตรวจวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้าได้ในเชิงคุณภาพ

จากการประยุกต์วิธีการวิเคราะห์สารบีทีอีเอ็กซ์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีที่มีตัวตรวจวัดชนิดเฟลมไอออไนเซชัน โดยใช้เทคนิคโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (Assadi *et al.*, 2010) สามารถแยกเบนซีน โทลูอีน เอธิลเบนซีน และไซลีนออกจากกันได้อย่างชัดเจน แสดงในภาพประกอบที่ 3.13







ภาพประกอบที่ 3.13 โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ในคาร์บอนไดออกไซด์ความเข้มข้น 100.00 พีพีเอ็ม เมื่อเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน
 สัญลักษณ์ที่ใช้ B คือ เบนซีน T คือ โทลูอีน E คือ เอธิลเบนซีน
 m+p-X คือ เมทาและพารา-ไซลีน o-X คือ ออร์โธ-ไซลีน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเปรียบเทียบการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ในผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงด้วยวิธีการให้ความร้อนและวิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชัน โดยมีการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ และน้ำมันเบนซิน ซึ่งทำการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดปริมาณ 200.00 ไมโครลิตรลงบนผ้า แล้วทำการวิเคราะห์ ซึ่งพบว่า วิธีการให้ความร้อนและวิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันสามารถตรวจพบสารกลุ่มบีทีอีเอ็กซ์ในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด ดังแสดงในตารางที่ 3.5 และภาพประกอบที่ 3.14 ตามลำดับ

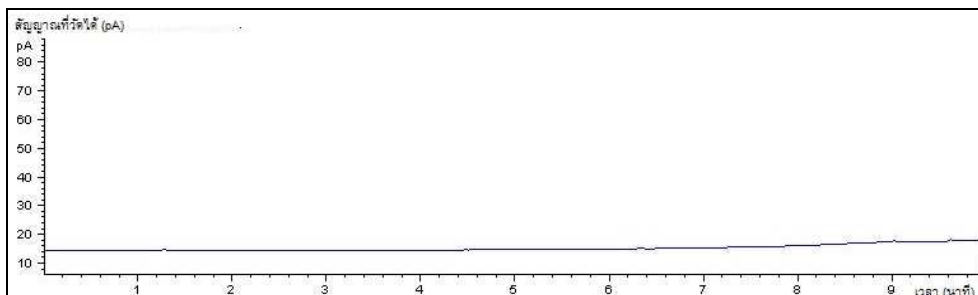
ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ที่ตรวจวัดด้วยวิธีการให้ความร้อนมีปริมาณที่แตกต่างกันในตัวอย่างผ้าที่มีการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงสามชนิด (ตารางที่ 3.5) จากการสังเกตสีตะกอนด้วยตาเปล่าและค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale พบว่า ความเข้มสีตะกอนในตัวอย่างผ้าที่เติมน้ำมันเบนซินมีมากที่สุดและให้ค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale น้อยที่สุด แสดงให้เห็นว่า มีปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ในผ้าที่เติมน้ำมันเบนซินมากที่สุด เมื่อทำการหาปริมาณจากแผนภาพมาตรฐานของสีตะกอน (ตารางที่ 3.4) จะได้ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ในผ้าที่เติมน้ำมันเบนซินอยู่ในช่วง 50.00 – 100.00 พีพีเอ็ม

ความเข้มของสีตะกอนที่สังเกตด้วยตาเปล่ามีค่าลดลงในตัวอย่างผ้าที่เติมน้ำมันแก๊สโซฮอล์และดีเซลตามลำดับและค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ก็มีค่าเพิ่มขึ้นตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า มีปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ลดลงตามลำดับในตัวอย่างผ้าที่เติมน้ำมันแก๊สโซฮอล์และดีเซล เมื่อทำการหาปริมาณจากแผนภาพมาตรฐานของสีตะกอน (ตารางที่ 3.4) จะได้ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ในผ้าที่เติมน้ำมันแก๊สโซฮอล์อยู่ในช่วง 10.00 – 50.00 พีพีเอ็ม และในผ้าที่เติมดีเซลอยู่ในช่วง 5.00 – 10.00 พีพีเอ็ม

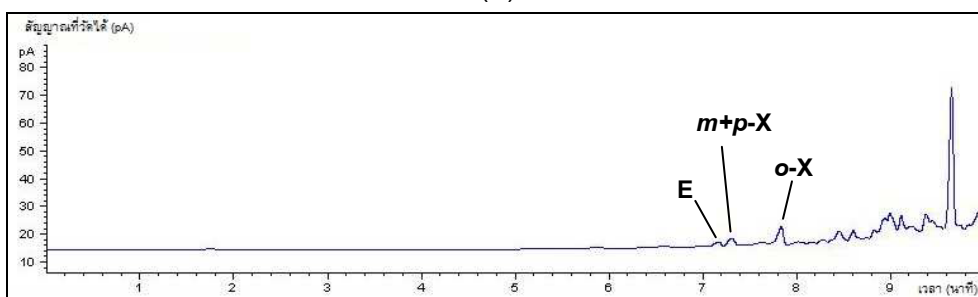
ตารางที่ 3.5 ความเข้มของสีตะกอนซึ่งได้จากวิธีการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (n = 3)

ชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิง	สีตะกอน	RGB value (mean \pm S.D.)	Grayscale value (mean \pm S.D.)
แบลงค์		202.6 \pm 0.2	183.23 \pm 0.1
ดีเซล		129.1 \pm 0.2	115.6 \pm 0.6
แก๊สโซฮอล์		109.9 \pm 6.4	100.74 \pm 6.7
เบนซิน		72.2 \pm 7.4	54.3 \pm 3.3

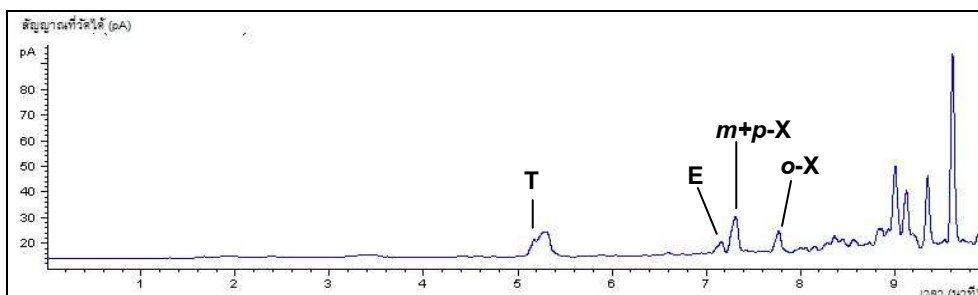
วิธีการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าตรวจพบบีทีอีเอ็กซ์ได้ในปริมาณต่างกัน ซึ่งให้ผลสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีโซลิตเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (ภาพประกอบที่ 3.14) คือ ตรวจพบปริมาณบีทีอีเอ็กซ์มากที่สุดในผ้าที่เติมน้ำมันเบนซิน ซึ่งได้สัญญาณการตรวจวัดมากที่สุด และปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ลดลงในผ้าที่เติมน้ำมันแก๊สโซฮอล์และน้ำมันดีเซล ตามลำดับ ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า วิธีการให้ความร้อนสามารถใช้ในการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันในเชิงคุณภาพได้ซึ่งได้จากการสังเกตสีตะกอนด้วยตาเปล่า และใช้ในการคัดเบื้องต้นเร็วกว่า ต้นเพลิงมีการใช้น้ำมันชนิดใดได้และหากนำไปใช้ในการวิเคราะห์เชิงปริมาณก็สามารถทำได้โดยใช้ค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale



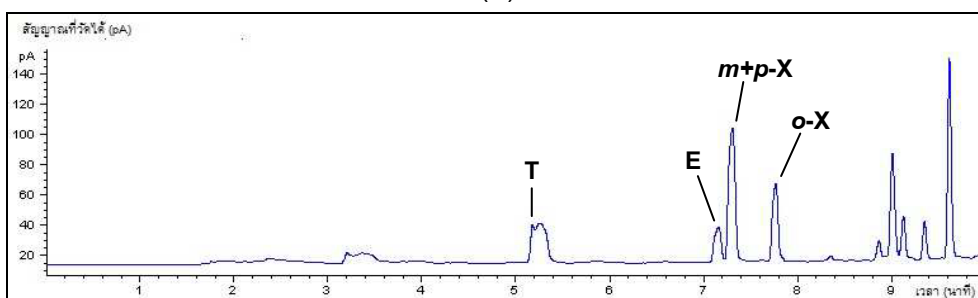
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)


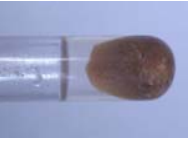

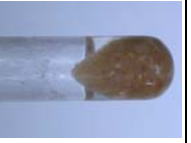
ภาพประกอบที่ 3.14 โครมาโทแกรมของสารสกัดจากผ้าตัวอย่างและผ้าตัวอย่างที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งสกัดด้วยเทคนิคโซลิตเฟสไมโครเอกซแทรกชัน (ก) สารสกัดจากผ้าตัวอย่าง (แบลงค์) (ข) สารสกัดจากผ้าตัวอย่างที่เติมน้ำมันดีเซล (ค) สารสกัดจากผ้าตัวอย่างที่เติมน้ำมันแก๊สโซฮอล์ และ (ง) สารสกัดจากผ้าตัวอย่างที่เติมน้ำมันเบนซิน
 สัญลักษณ์ที่ใช้ B คือ เบนซิน T คือ โทลูอิน E คือ เอซิลเบนซิน $m+p-X$ คือ เมทาและพารา-ไซลีน o-X คือ ออร์โธ-ไซลีน

3.3.5 การประยุกต์วิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อน

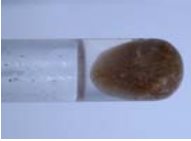

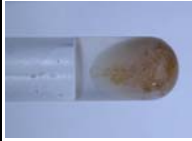
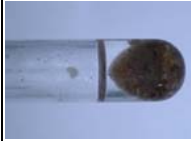
ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์วิธีการเตรียมตัวอย่างบีทีอีเอ็กซ์โดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง ซึ่งได้ทำการทดลองในตัวอย่างผ้า 5 ชนิด ได้แก่ ผ้าฝ้าย ผ้าโพลีเอสเตอร์ ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์ ผ้าลินิน และกระสอบป่าน และได้เติมตัวอย่างน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิดลงบนผ้า ได้แก่ น้ำมันเบนซิน 2 ตัวอย่าง น้ำมันแก๊สโซฮอล์และน้ำมันดีเซล ชนิดละ 1 ตัวอย่าง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.6 ซึ่งการวิเคราะห์ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์จากสีตะกอนที่เกิดขึ้นตารางที่ 3.6 ทำได้ 2 วิธีคือ การสังเกตสีตะกอนด้วยตาเปล่า โดยการเปรียบเทียบ สีตะกอนที่เกิดขึ้นกับสีตะกอนที่ได้จากการทำปฏิกิริยาของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์ดังแสดงในตารางที่ 3.4 และการคำนวณจากกราฟมาตรฐานในระบบสี RGB และ Grayscale ในภาพประกอบที่ 3.11

ผลการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์จากตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ พบว่า สามารถตรวจวัดบีทีอีเอ็กซ์ได้ในตัวอย่างจำนวน 20 ตัวอย่าง จากตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 22 ตัวอย่าง โดยสีตะกอนที่เกิดขึ้นเป็นตะกอนในเจดสีเหลืองส้มจนถึงสีแดงเข้มซึ่งสามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของบีทีอีเอ็กซ์ได้จากการสังเกตสีตะกอนด้วยตาเปล่าอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึงมากกว่า 100 พีพีเอ็ม และการคำนวณจากกราฟมาตรฐานของสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ได้ในช่วงตั้งแต่ไม่สามารถตรวจพบได้ถึง 1,035.1 พีพีเอ็ม และตั้งแต่ไม่สามารถตรวจพบได้ถึง 540.7 พีพีเอ็มตามลำดับ แสดงว่า ในตัวอย่างมีการปนเปื้อนของบีทีอีเอ็กซ์ในปริมาณที่แตกต่างกันไป นอกจากนั้นพบว่า ผลการวิเคราะห์ในเชิงปริมาณจากทั้งสองวิธีให้ค่าความเข้มข้นของบีทีอีเอ็กซ์ที่มีอยู่ในตัวอย่างในปริมาณสอดคล้องกันเป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างเช่น ในตัวอย่างหมายเลข S01 เป็นตัวอย่างผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันแก๊สโซฮอล์ให้ผลการวิเคราะห์ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ด้วยตาเปล่าประมาณ 1 – 5 พีพีเอ็ม ส่วนการวิเคราะห์ด้วยระบบสี RGB และ Grayscale ให้ค่าในช่วง 5.0 – 6.4 พีพีเอ็ม และตัวอย่างหมายเลข S07 เป็นตัวอย่างผ้าลินินที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันเบนซินให้ผลการวิเคราะห์ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ด้วยตาเปล่ามากกว่า 100 พีพีเอ็ม ส่วนการวิเคราะห์ด้วยระบบสี RGB และ Grayscale ให้ค่าในช่วง 111.2 – 160.0 พีพีเอ็ม ซึ่งจะเห็นว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ในทั้งสองวิธีให้ค่าใกล้เคียงกัน สำหรับตัวอย่างหมายเลข S16 เป็นตัวอย่างผ้าโพลีเอสเตอร์ที่ปนเปื้อนด้วยน้ำมันดีเซลซึ่งให้ผลการวิเคราะห์ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ด้วยตาเปล่าประมาณ 5 – 10 พีพีเอ็ม ส่วนการวิเคราะห์ด้วยระบบสี RGB และ Grayscale ให้ค่าในช่วง 15.4 – 17.5 พีพีเอ็ม จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกัน ซึ่งอาจเนื่องมาจากองค์ประกอบของบีทีอีเอ็กซ์ที่มีอยู่ในน้ำมันดีเซล มีปริมาณน้อยกว่าสารไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น ๆ (ตารางที่ 1.6) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนซึ่งสามารถทำให้เกิดผลรวมการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ได้ เมื่อทำการบันทึกภาพสีตะกอนจึงทำให้สีตะกอนเหล่านั้นมา





ตารางที่ 3.6 ผลการวิเคราะห์พีทีอีเอ็กซ์ที่เนตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยวิธีการให้ความร้อน

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน	ปริมาณของพีทีอีเอ็กซ์ที่ตรวจพบ (พีพีเอ็ม)		
				ตาเปล่า	RGB	Grayscale
S01	ผ้าโพลีเอสเตอร์	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)		1 – 5	5.0	6.4
S02	ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)		> 100	262.4	215.8
S03	ผ้าลินิน	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)		10 – 50	37.1	43.5
S04	ผ้าฝ้าย	เบนซิน (ปตท)		> 100	429.5	272.7


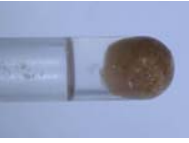

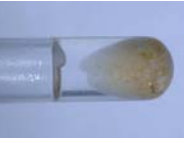
ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน	ปริมาณของปิโตรเลียมที่ตรวจพบ (พีพีเอ็ม)		
				ตาเปล่า	RGB	Grayscale
S05	ผ้าโพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ปรอท)		> 100	407.4	266.5
S06	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ปรอท)		> 100	553.4	357.3
S07	ผ้าลินิน	เบนซิน (ปรอท)		> 100	160.0	111.2
S08	ผ้ากระสอบปาน	เบนซิน (ปรอท)		> 100	1,035.1	540.7


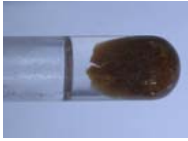


ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน	ปริมาณของบีทีเอ็กซ์ที่ตรวจพบ (พีพีเอ็ม)		
				ตาเปล่า	RGB	Grayscale
S09	ผ้าฝ้าย	เบนซิน (ร้านค้า)		> 100	134.6	95.7
S10	ผ้าโพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ร้านค้า)		> 100	201.4	150.3
S11	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ร้านค้า)		-	0	0
S12	ผ้าลินิน	เบนซิน (ร้านค้า)		50 – 100	71.8	61.4



ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน	ปริมาณของบีทีเอ็กซ์ที่ตรวจพบ (พีพีเอ็ม)		
				ตาเปล่า	RGB	Grayscale
S13	กระสอบป่าน	เบนซิน (ร้านค้า)		> 100	440.6	291.7
S14	ผ้าฝ้าย	ดีเซล (บางจาก)		> 100	243.2	180.7
S15	ผ้าโพลีเอสเตอร์	ดีเซล (บางจาก)		-	0	0
S16	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	ดีเซล (บางจาก)		5 – 10	17.5	15.4

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน	ปริมาณของบีทีเอ็กซ์ที่ตรวจพบ (พีพีเอ็ม)		
				ตาเปล่า	RGB	Grayscale
S17	ผ้าลินิน	ดีเซล (บางจาก)		> 100	369.0	255.3
S18	กระสอบป่าน	ดีเซล (บางจาก)		> 100	909.9	488.6
S19	ผ้าฝ้าย	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)		1 – 5	4.0	5.0
S20	กระสอบป่าน	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)		> 100	160.0	134.5

ตารางที่ 3.6 (ต่อ)

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของเชื้อเพลิง	สีตะกอน	ปริมาณของบีทีเอ็กซ์ที่ตรวจพบ (พีพีเอ็ม)		
				ตาเปล่า	RGB	Grayscale
S21	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	แก๊สโซฮอล์ (ร้านค้า)		> 100	163.7	149.5
S22	ผ้าโพลีเอสเตอร์	ดีเซล (บางจาก)		> 100	178.6	137.7

บดบังสีตะกอนที่เกิดจากบีทีอีเอ็กซ์ นอกจากนี้สีตะกอนคล้ำขึ้นอย่างรวดเร็วภายในเวลา 5 นาที หลังจากการทำปฏิกิริยา ซึ่งอาจมีสาเหตุจากตะกอนเกิดการสลายตัวหรือเปลี่ยนไปเป็นสารอื่น ด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต (U.S. EPA, 1997) จึงอาจทำให้ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ที่ได้จากการสังเกต สีตะกอนไม่สอดคล้องกันกับปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ที่ได้จากการคำนวณ

จะเห็นได้ว่าการวิเคราะห์ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์จากสีตะกอนที่เกิดขึ้นด้วยตาเปล่า จะให้ค่าโดยประมาณเท่านั้น และผลการวิเคราะห์จะขึ้นอยู่กับผู้ทำการวิเคราะห์แต่ละคนซึ่งมีการมองเห็นสีที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อให้การวิเคราะห์ในเชิงปริมาณมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้นจึงควรทำการวิเคราะห์ร่วมกันทั้งวิธีการสังเกตสีตะกอนด้วยตาเปล่าและวิธีการวิเคราะห์สีตะกอนจากระบบสี RGB และ Grayscale

ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างมีปริมาณแตกต่างกันไปและไม่สามารถตรวจวัดได้ในตัวอย่างจำนวน 2 ตัวอย่าง อาจมีสาเหตุมาจากหลายประการ ได้แก่

1) ปริมาณสารบีทีอีเอ็กซ์ที่ตรวจวัดได้ในตัวอย่างขึ้นอยู่กับปริมาณของบีทีอีเอ็กซ์ที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างผ้าในตอนเริ่มต้น หากตรวจวัดปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างได้น้อยก็อาจกล่าวได้ว่า ตัวอย่างผ้านั้นมีการปนเปื้อนของน้ำมันเชื้อเพลิงในตอนเริ่มต้นอยู่ในปริมาณน้อย และหากปริมาณสารบีทีอีเอ็กซ์ที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณต่ำสุดที่ตรวจวัดด้วยวิธีการให้ความร้อน คือ 0.5 พีพีเอ็ม ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างเหล่านั้นได้ เช่น ตัวอย่างหมายเลข S11 และ S15

2) คุณสมบัติของผ้าตัวอย่างแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน เช่น สมบัติในการดูดซับและคายการดูดซับของเส้นใยผ้าแต่ละชนิด หรือความหนาของผ้าแต่ละชนิด เป็นต้น ซึ่งจะมีผลต่อปริมาณของบีทีอีเอ็กซ์ที่ตรวจวัดได้ เช่น ตัวอย่างผ้าสองชนิดที่มีคุณสมบัติในการดูดซับแตกต่างกัน คือ ผ้าโพลีเอสเตอร์ 100 % และผ้าฝ้าย 100 % สำหรับผ้าโพลีเอสเตอร์เป็นผ้าใยสังเคราะห์ซึ่งมีสมบัติในการดูดซับได้ไม่ดี (पालิวนिख, 2542) เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการปนเปื้อนลงบนตัวอย่างผ้า ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับบนผ้าจึงมีน้อย ทำให้บีทีอีเอ็กซ์ที่วิเคราะห์ได้มีปริมาณน้อย ส่วนผ้าฝ้ายมีคุณสมบัติในการดูดซับและคายการดูดซับได้ดี (पालिวนिख, 2542) เมื่อน้ำมันเชื้อเพลิงเกิดการปนเปื้อนลงบนตัวอย่าง ปริมาณน้ำมันที่ถูกดูดซับไว้บนผ้าจึงมีปริมาณมากแต่ในขณะเดียวกันน้ำมันบางส่วนก็เกิดการระเหยไปได้ ปริมาณบีทีอีเอ็กซ์ที่วิเคราะห์ได้จึงมีปริมาณมาก เช่น ในตัวอย่างหมายเลข S05 และ S04 เป็นการปนเปื้อนของน้ำมันเบนซินในตัวอย่างผ้าโพลีเอสเตอร์และผ้าฝ้ายตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ปริมาณของบีทีอีเอ็กซ์ที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างผ้าโพลีเอสเตอร์จากการวิเคราะห์ด้วยตาเปล่ามากกว่า 100 พีพีเอ็ม และการคำนวณจากระบบสี RGB และ Grayscale อยู่ในช่วง 266.5 – 407.4 พีพีเอ็ม ซึ่งมีค่าน้อยกว่าผ้าฝ้ายที่สามารถวิเคราะห์ด้วยตาเปล่ามากกว่า 100 พีพีเอ็มเช่นเดียวกัน แต่จากการคำนวณในระบบสี RGB และ Grayscale มีค่าอยู่ในช่วง 272.7 – 429.5 พีพีเอ็ม เป็นต้น

3) ปัจจัยภายนอกในขณะทำการเก็บตัวอย่างอาจส่งผลกระทบต่อการระเหยของบีทีอี-เอ็กซ์จากตัวอย่างได้ เช่น อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศ เป็นต้น

4) ปริมาณของสารบีทีอีเอ็กซ์ที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิงแต่ละชนิดมีปริมาณแตกต่างกัน เช่น น้ำมันเบนซินมีสารบีทีอีเอ็กซ์เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณมากกว่าไฮโดรคาร์บอนตัวอื่นๆ ดังนั้นสีตะกอนของบีทีอีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจึงมีความเข้มของสีตะกอนมากกว่าตะกอนที่เกิดจากน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดอื่น ตัวอย่างเช่น ในตัวอย่างหมายเลข S04 – S08 เป็นตัวอย่างของน้ำมันเบนซินที่ปนเปื้อนอยู่ในผ้าชนิดต่างๆ พบว่า สีตะกอนที่เกิดขึ้นมีความเข้มของสีตะกอนค่อนข้างมาก ปริมาณของบีทีอีเอ็กซ์ที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 111.2 – 1,035.1 พีพีเอ็ม ส่วนในน้ำมันดีเซลซึ่งมีสารบีทีอีเอ็กซ์เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณน้อยกว่าไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ โดยเฉพาะสารโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่สามารถทำให้เกิดตะกอนที่มีสีบดบังสีตะกอนที่เกิดจากสารบีทีอีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะส่งผลให้การตรวจวิเคราะห์ปริมาณของบีทีอีเอ็กซ์เกิดความผิดพลาดหรืออาจไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ ตัวอย่างเช่น ตัวอย่างหมายเลข S14 – S18 เป็นตัวอย่างของน้ำมันดีเซลที่ปนเปื้อนอยู่ในผ้าชนิดต่างๆ พบว่า สีตะกอนที่เกิดขึ้นมีความเข้มของสีตะกอนค่อนข้างน้อย ปริมาณของบีทีอีเอ็กซ์ที่คำนวณได้อยู่ในช่วง 15.4 – 909.9 พีพีเอ็ม และในกรณีตัวอย่างที่มีการบดบังสีตะกอนของบีทีอีเอ็กซ์จากตะกอนที่เกิดจากสารไฮโดรคาร์บอนอื่นๆ จะทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ได้และอาจเกิดความผิดพลาดขึ้น ปรากฏให้เห็นในตัวอย่างหมายเลข S15 และ S16

3.3 ข้อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีต่าง ๆ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่าง 3 วิธี ได้แก่ วิธีการดูดซับไอของบีทีอีเอ็กซ์จากผ้าด้วยกระดาษกรอง วิธีการสกัดด้วยเฮกเซน และวิธีการให้ความร้อน ซึ่งทั้งสามวิธีมีข้อเด่นและข้อจำกัดแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 ข้อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเตรียมตัวอย่างด้วยวิธีต่างๆ

วิธีการเตรียมตัวอย่าง	ข้อเด่นและข้อจำกัด
การดูดซับบีทีอีเอ็กซ์ด้วย กระดาษกรอง	<p><u>ข้อเด่น</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย ขั้นตอนไม่ยุ่งยาก และราคาไม่แพง <p><u>ข้อจำกัด</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● เป็นวิธีการที่ต้องปรับปรุงประสิทธิภาพการสกัด เนื่องจากผลร้อยละการคืนกลับของการสกัดอยู่ในระดับต่ำประมาณร้อยละ 66
การสกัดบีทีอีเอ็กซ์ด้วย เฮพแทนแบบตั้งทิ้งไว้	<p><u>ข้อเด่น</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว ขั้นตอนไม่ยุ่งยากและราคาไม่แพง ● เป็นวิธีการที่ให้ประสิทธิภาพการสกัดที่ดี ● สามารถใช้วิเคราะห์ในเชิงคุณภาพได้ โดยการสังเกตสีตะกอนที่เกิดขึ้น <p><u>ข้อจำกัด</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● มีการรบกวนการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์จากสารไฮโดรคาร์บอนอื่นที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมัน
การให้ความร้อน	<p><u>ข้อเด่น</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● เป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย รวดเร็ว ขั้นตอนไม่ยุ่งยาก ● สามารถใช้วิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ ● สามารถลดผลที่เกิดจากตัวรบกวนในการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ได้ ● ไม่มีการใช้ตัวทำละลาย <p><u>ข้อจำกัด</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ● ในการค่าสีตะกอนที่ไม่สม่ำเสมอ (สังเกตจากสีตะกอนปนกับอะลูมิเนียมคลอไรด์) ในระบบสี RGB และ Grayscale ควรเลือกเฉพาะบริเวณที่มีสี เพื่อลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์เชิงปริมาณ

บทที่ 4

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

4.1 บทสรุป

การวิเคราะห์สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนด้วยเทคนิคทางคัลเลอริเมทรี โดยอาศัยปฏิกิริยาฟรีเดล-คราฟ แอลคิลเลชัน และมีสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยา คือ สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้สารบีทีอีเอ็กซ์ ได้แก่ เบนซีน โทลูอิน เอซิลเบนซีน และไซลีน เป็นตัวแทนของสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่เป็นองค์ประกอบในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด โดยเตรียมในคาร์บอนเตตระคลอไรด์ และใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา คือ อะลูมิเนียมคลอไรด์ จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา พบว่า ปริมาณอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา คือ ความเข้มข้น 8.0 % w/v และทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30.0 – 32.0 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 นาที จะเกิดผลิตภัณฑ์ คือ ตะกอนที่มีสีในเจดสีส้ม ซึ่งจะมี ความเข้มข้นของสีตะกอนเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณบีทีอีเอ็กซ์เพิ่มขึ้น กราฟเส้นตรงของสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R^2) เท่ากับ 0.9903 และ 0.9826 ตามลำดับ การวิเคราะห์สีตะกอนด้วยปฏิกิริยานี้มีข้อดีคือ สามารถทำได้ง่าย รวดเร็ว และยังช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ตัวอย่างลงได้ เนื่องจากไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือวิเคราะห์และสารเคมีที่มีราคาแพง สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้อย่างแม่นยำทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ และยังไม่จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ด้วย ส่วนข้อจำกัดของปฏิกิริยา คือ สารเคมีที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาเป็นอันตรายต่อผู้ที่ทำการวิเคราะห์และมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ในการวิเคราะห์จึงต้องจำกัดปริมาณที่ใช้สวมถุงมือและหน้ากากเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจเกิดขึ้นกับผู้ทำการวิเคราะห์ และมีวิธีการเก็บรักษาที่ถูกต้องเพื่อลดความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม

วิธีการวิเคราะห์ความเข้มของสีตะกอนทำได้โดยการสังเกตด้วยตาเปล่าและการใช้เทคนิคการประมวลผลภาพในระบบสี RGB และ Grayscale ร่วมกัน โดยการถ่ายภาพสีตะกอนแล้วนำภาพเข้าสู่โปรแกรมการวิเคราะห์ ผลการวิเคราะห์ภาพสีตะกอนในทั้งสองระบบสีเป็นไปในทำนองเดียวกัน คือ เมื่อความเข้มข้นของบีทีอีเอ็กซ์มาก ตะกอนที่เกิดขึ้นจะมีความเข้มของสีตะกอนมาก ค่าความเข้มของสีตะกอนที่ได้จากการประมวลผลภาพจะมีค่าน้อย การวิเคราะห์สีตะกอนด้วยวิธีการประมวลผลภาพนี้มีข้อดี คือ ช่วยให้การวิเคราะห์สีตะกอนทำได้

ง่ายและรวดเร็วมากขึ้น และยังช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดจากการมองเห็นสีตะกอนของผู้ทำการวิเคราะห์แต่ละคน ทำให้ผลการวิเคราะห์มีความถูกต้องมากยิ่งขึ้น

น้ำมันเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบของสารไฮโดรคาร์บอนจำนวนมากมายโดยแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ คือ พาราฟิน แนฟทีน และอะโรมาติก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการศึกษานิตและผลของตัวรบกวนที่อาจรบกวนการวิเคราะห์สารบีทีอีเอ็กซ์เมื่อทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันที่สภาวะเดียวกัน จากผลการทดลองพบว่า มีเพียงสารกลุ่มอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนเท่านั้นที่สามารถทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันได้และทำให้เกิดผลิตภัณฑ์เป็นตะกอนที่มีสีเกิดขึ้น โดยสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่ม และผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดตะกอนที่มีสีแตกต่างกัน คือ โมโนไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะทำให้เกิดตะกอนในเจดสีส้ม และโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน เช่น แนฟทาลีน จะทำให้เกิดตะกอนในเจดสีม่วง ซึ่งหากสีตะกอนที่เกิดจากโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนมีความเข้มข้นมากพอก็อาจจะทำให้เกิดการรบกวนการวิเคราะห์สารบีทีอีเอ็กซ์ได้ และทำให้เกิดความผิดพลาดในการวิเคราะห์เชิงปริมาณหรืออาจบดบังการวิเคราะห์จนไม่สามารถทำการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ได้

การศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่าง 3 วิธีการ คือ วิธีที่ 1 เป็นการเตรียมตัวอย่างโดยการดูดซับไอบีทีอีเอ็กซ์ด้วยกระดาษกรอง ซึ่งใช้กลไกแบบแบ่งส่วน (Partition) โดยมีเฮกซะเดเคนที่อยู่บนกระดาษกรองเป็นตัวจับไอบีทีอีเอ็กซ์ที่ระเหยจากตัวอย่างผ้า จากการศึกษาพบว่า วิธีการนี้ให้ประสิทธิภาพของการสกัดประมาณร้อยละ 46.6 – 65.6 (% RSD < 1.4) ซึ่งต่ำกว่าที่ยอมรับได้ตาม U.S. EPA จึงทำการศึกษาวิธีที่ 2 ซึ่งเป็นการเตรียมตัวอย่างโดยการสกัดด้วยเฮพเทนแบบการใช้คลื่นความถี่สูงและแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อทำการศึกษาวิธีการสกัดด้วยเฮพเทนทั้งสองวิธีใช้เวลาเดียวกัน คือ 15 นาที พบว่า ประสิทธิภาพของการสกัดทั้ง 2 วิธีไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยที่ความยาวคลื่น 262 นาโนเมตร การสกัดแบบใช้คลื่นความถี่สูงและการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง ให้ค่าร้อยละการคืนกลับเท่ากับ 104.0 และ 106.0 ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่น 269 นาโนเมตร ให้ค่าร้อยละการคืนกลับเท่ากับ 112.1 และ 114.8 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในทำนองเดียวกันสีตะกอนที่เกิดจากการนำสารละลายที่ได้จากการสกัดด้วยเฮพเทนทั้งสองวิธีไปทำปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน พบว่า ค่าสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ที่ได้จากการสกัดทั้งสองวิธีก็ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และเมื่อทำการศึกษาวิธีการสกัดด้วยเฮพเทนแบบตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องในช่วงเวลา 5 – 30 นาที พบว่าที่เวลา 15 นาทีเป็นเวลาที่เหมาะสมในการสกัดโดยให้ค่าร้อยละในการคืนกลับไม่เกิน 114.8 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ไม่เกินร้อยละ 1 ดังนั้น จึงได้เลือกใช้วิธีการสกัดแบบตั้งทิ้งไว้ เนื่องจากเป็นวิธีการเตรียมตัวอย่างที่ทำได้ง่าย โดยไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ยุ่งยากในการสกัด และยังให้ประสิทธิภาพของการสกัดที่ดีและยอมรับได้ตาม U.S. EPA อย่างไรก็ตามวิธีการนี้มีข้อจำกัด

จากผลรวมของสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอน ซึ่งให้ตะกอนสีม่วงบดบังสีตะกอนของบีทีอีเอ็กซ์ ทำให้การวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์เกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงทำการศึกษาวิธีการเตรียมตัวอย่างวิธีการที่ 3 คือ วิธีการเตรียมตัวอย่างโดยการให้ความร้อนในระบบปิด ซึ่งทำได้โดยการให้ความร้อนในการระเหยบีทีอีเอ็กซ์ออกจากตัวอย่างผ้าและใช้แก๊สไนโตรเจนช่วยพาไอของบีทีอีเอ็กซ์ไปทำปฏิกิริยาฟรีเทล-คราฟ แอลคิลเลชัน จากการทดลองพบว่า วิธีการนี้สามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้อย่างรวดเร็วภายในเวลา 20 นาที สามารถตรวจวัดความเข้มข้นต่ำสุดของบีทีอีเอ็กซ์ที่ทำให้เกิดตะกอนที่มีสีซึ่งมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เท่ากับ 0.50 พีพีเอ็ม กราฟเส้นตรงของสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เท่ากับ 0.9833 และ 0.9790 ตามลำดับ และสามารถลดผลรวมการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์จากสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนได้ ข้อจำกัดของวิธีการนี้คือ ขั้นตอนการเตรียมก่อนนำแก๊สก่อนข้างยุ่งยาก

นอกจากนี้ได้ทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของวิธีการให้ความร้อนในระบบปิด โดยเปรียบเทียบกับวิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันซึ่งทำการทดสอบในน้ำมันเชื้อเพลิง 3 ชนิด ได้แก่ น้ำมันดีเซล น้ำมันแก๊สโซฮอล์ และน้ำมันเบนซิน พบว่า วิธีการให้ความร้อนและวิธีโซลิดเฟสไมโครเอกซแทรกชันสามารถตรวจพบบีทีอีเอ็กซ์ได้ในน้ำมันเชื้อเพลิงทุกชนิด และให้ผลการทดลองที่สอดคล้องกัน คือ ตรวจพบปริมาณบีทีอีเอ็กซ์มากที่สุดในผ้าที่เติมน้ำมันเบนซิน รองลงมาคือน้ำมันแก๊สโซฮอล์และน้ำมันดีเซลตามลำดับ ดังนั้น วิธีการให้ความร้อนนี้จึงสามารถนำไปใช้กับการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันได้ทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ โดยสามารถตรวจวัดบีทีอีเอ็กซ์ได้ในตัวอย่างจำนวน 20 ตัวอย่าง จากตัวอย่างที่ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 22 ตัวอย่าง และสามารถวิเคราะห์ความเข้มข้นของบีทีอีเอ็กซ์ได้จากการสังเกตสีตะกอนด้วยตาเปล่าอยู่ในช่วงประมาณ 1 ถึงมากกว่า 100 พีพีเอ็ม และการคำนวณจากกราฟมาตรฐานของสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ได้ในช่วงตั้งแต่ไม่สามารถตรวจพบได้ถึง 1,035.1 พีพีเอ็ม และตั้งแต่ไม่สามารถตรวจพบได้ถึง 540.7 พีพีเอ็มตามลำดับ อย่างไรก็ตามในกรณีที่สีของตะกอนกระจายไม่สม่ำเสมอหรือตะกอนมีสีคล้ำอย่างรวดเร็วจะทำให้การวิเคราะห์เชิงปริมาณจากภาพสีตะกอนมีความผิดพลาดได้

การตรวจวิเคราะห์สารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนที่ปนเปื้อนในตัวอย่างทางนิติวิทยาศาสตร์สำหรับในห้องปฏิบัติการโดยทั่วไปนิยมใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟที่มีตัวตรวจวัดชนิดต่าง ๆ เช่น เพลมไอออไนเซชัน แมสสเปกโตรมิเตอร์ และอินฟราเรดไมโครสเปกโตรมิเตอร์ เป็นต้น (Sandercock, 2008) ซึ่งเป็นเครื่องมือที่สามารถตรวจวัดการปนเปื้อนในระดับต่ำได้ ดังเช่นงานวิจัยของ Cavanagh-Steer และคณะ (2005) ที่ใช้เทคนิค GC-MS ในการหาปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิงที่ปนเปื้อนบนพรมภายในรถยนต์ในช่วงปริมาตร 100 – 1,000 ไมโครลิตร หรืองานวิจัยของระรื่นรัมย์ (2551) ได้หาชนิดและปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่ในตัวอย่างผ้าที่ถูกเผาไหม้ ซึ่งมีลักษณะเป็นเศษผ้าสีดำ แข็ง กรอบ และถูกเผาไหม้บางส่วน โดย

ดูดซับตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมงแล้ววิเคราะห์ด้วย GC-FID พบว่า น้ำมันเบนซินเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้ซึ่งระบุได้จากโครมาโทแกรมที่ได้และวิเคราะห์น้ำมันที่เหลือในผ้าได้ในปริมาณ 1.47 พีพีเอ็ม อย่างไรก็ตามการใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟนั้นจำเป็นต้องใช้ความชำนาญในการใช้ อีกทั้งเป็นเครื่องมือที่มีราคาค่อนข้างแพง ทำให้ราคาในการตรวจวิเคราะห์ต่อตัวอย่างค่อนข้างสูง และยังไม่มียุทธวิธีอย่างง่ายที่จะใช้ทดสอบบีทีอีเอ็กซ์ในตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมัน

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยดังกล่าวข้างต้นที่ใช้ตัวอย่างใกล้เคียงกันกับวิธีการเตรียมตัวอย่างในงานวิจัยนี้โดยการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่มีการเติมน้ำมันเชื้อเพลิงชนิดต่างๆ ลงไปปริมาตร 200.00 ไมโครลิตร และวิเคราะห์ด้วยเทคนิคคัลเลอร์เมตรี พบว่า งานวิจัยนี้ก็สามารถตรวจวัดน้ำมันเชื้อเพลิงที่ปนเปื้อนบนผ้าได้ในเชิงคุณภาพโดยอาศัยการสังเกตสีที่เกิดขึ้น ซึ่งความเข้มข้นต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ คือ 0.50 พีพีเอ็ม เพราะสามารถวิเคราะห์สารบีทีอีเอ็กซ์ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในน้ำมันเบนซินในปริมาณต่ำสุดที่ตรวจวัดได้คือ 0.50 พีพีเอ็ม และวิธีการให้ความร้อนมีข้อดีกว่าการใช้เครื่องมือดังกล่าว คือ มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก ราคาถูกกว่าและใช้เวลาในการวิเคราะห์ตัวอย่างน้อยกว่า 20 นาที

โดยสรุปแล้ววิธีการให้ความร้อนในระบบปิดสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการทดสอบคัดเบื้องต้นเพื่อวิเคราะห์สารไฮโดรคาร์บอนในผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงได้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย ไม่ใช้ตัวทำละลายในการเตรียมตัวอย่างและทำการวิเคราะห์ได้รวดเร็ว รวมทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์มีราคาถูก หาซื้อและทำได้ง่าย จึงช่วยลดค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ตัวอย่างได้ และสิ่งสำคัญที่สุดในการใช้วิธีการให้ความร้อนในระบบปิด คือ ลดผลรบกวนการวิเคราะห์บีทีอีเอ็กซ์อันเกิดจากสารกลุ่มโพลีไซคลิกอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการวิเคราะห์ชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างผ้าได้ โดยหากทำการวิเคราะห์ตัวอย่างผ้าที่สงสัยว่ามีการปนเปื้อนของน้ำมันแล้วพบว่าเกิดตะกอนที่มีเจดสีส้มแดงภายในเวลา 20 นาที แสดงว่า มีการปนเปื้อนจากน้ำมันเชื้อเพลิงในกลุ่มเบนซิน ซึ่งได้แก่ น้ำมันเบนซิน หรือแก๊สโซฮอลล์ ในตัวอย่างผ้า แต่หากทำการวิเคราะห์ตัวอย่างแล้วได้ตะกอนมีเจดสีเหลือง แสดงว่า อาจมีการปนเปื้อนของน้ำมันดีเซลในตัวอย่างผ้า ถ้าหากต้องการระบุชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ปนเปื้อนอยู่ในตัวอย่างผ้าให้ชัดเจนขึ้นก็สามารถทำการวิเคราะห์ร่วมกับวิธีอื่นได้ เช่น แก๊สโครมาโทกราฟี เป็นต้น

4.2 ข้อเสนอแนะ

1. สภาพแวดล้อมที่ใช้ในการถ่ายภาพมีแสงไม่สม่ำเสมอ มีจุดอับแสงหรือเงา การเปลี่ยนตำแหน่งของหลอดไฟที่ให้แสงสว่าง และระยะการถ่ายภาพที่เปลี่ยนแปลงไป อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในถ่ายภาพและการวิเคราะห์สีตะกอนได้ ดังนั้น จึงควรติดตั้งหลอดไฟเพิ่มขึ้นเพื่อลดบริเวณที่เป็นจุดอับแสงและเกิดเงา โดยหลอดไฟที่ใช้ควรเป็นหลอดไฟที่ให้แสงสีขาวจำนวน 2 ดวงหรือมากกว่า เพื่อช่วยลดบริเวณที่มีแสงไม่เพียงพอ และติดตั้งบริเวณ

ด้านข้าง (ซ้ายและขวา) ของวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพ เพื่อลดการเกิดเงาบริเวณด้านหลังภาพ และควรกำหนดตำแหน่งของหลอดไฟ ระยะการถ่ายภาพ รวมทั้งพารามิเตอร์ต่างๆ ของกล้อง ถ่ายรูปให้คงที่ตลอดการทดลอง

2. ในการวิเคราะห์ตัวอย่างหลังจากทำปฏิกิริยาเสร็จสิ้นลง สีตะกอนที่เกิดขึ้นจะเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว คือ ตะกอนมีสีคล้ำขึ้น ทำให้การวิเคราะห์ปริมาณจากภาพถ่ายเกิดความผิดพลาด ดังนั้นการวิเคราะห์สีตะกอนจึงควรใช้การวิเคราะห์ด้วยตาเปล่าร่วมกับการวิเคราะห์ในระบบสี RGB และ/หรือ Grayscale เพื่อช่วยลดความผิดพลาดในการวิเคราะห์

3. อะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ไม่ได้ทำปฏิกิริยาหรืออะลูมิเนียมคลอไรด์ที่สูญเสียสภาพไปจะอยู่ปะปนกับตะกอนที่ต้องการวิเคราะห์ ทำให้การวิเคราะห์ปริมาณจากภาพถ่ายเกิดความผิดพลาดได้ ดังนั้นการประมวลผลภาพสีตะกอนจึงควรหลีกเลี่ยงบริเวณที่สีตะกอนไม่สม่ำเสมอ โดยในภาพถ่ายสีตะกอนภาพหนึ่งอาจเลือกเฉพาะบริเวณที่เกิดตะกอนที่มีสีหลายๆ จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยของสีตะกอน ซึ่งจะช่วยลดค่าสีบางค่าที่อาจทำให้เกิดความผิดพลาดในการถ่ายภาพได้ ส่งผลให้ได้ค่าสีตะกอนที่ใกล้เคียงกับสีตะกอนที่เกิดขึ้นจริง

4. สีตะกอนที่เกิดจากปฏิกิริยาฟริเดิล-คราฟ แอลคิลเลชันเปลี่ยนไปได้ด้วยแสงอุลตราไวโอเล็ต ดังนั้นในขณะที่ทำปฏิกิริยาจึงควรป้องกันแสงด้วยแผ่นอะลูมิเนียม (Aluminium foil)

5. ในการทำปฏิกิริยาฟริเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์ (HCl) ขึ้นซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลอง ดังนั้นจึงควรกำจัดแก๊สไฮโดรเจนคลอไรด์โดยการผ่านแก๊สลงในน้ำกลั่น (Distilled water) หรือน้ำปราศจากไอออน (Deionized water) (Manion, 1998)

บรรณานุกรม

- กณิตา ธนเจริญชนภาส. มลสารและสภาวะแวดล้อมในอาคารและผลกระทบต่อสุขภาพ. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.agi.nu.ac.th/webvj/download/indoor%20air%20pollution%20-VOC.doc>. (วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2553)
- คณะกรรมการวิชาการศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์นครราชสีมา. 2550. สารเบนซินภัยอันตรายใกล้ตัว. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://www.konayuthaya.com/jpo/files/disease/benzene.pdf>. (วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2553)
- จันทนา ธีรธรรมย์. 2551. การประยุกต์ใช้ Activated carbon ในการตรวจพิสูจน์น้ำมันเชื้อเพลิง. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิติวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- ชนิดา พงษ์ลิมาพันธ์. 2547. เคมีอินทรีย์เบื้องต้น. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชุตติมา ศรีวิบูลย์. 2546. การวิเคราะห์โดยเครื่องมือโครมาโทกราฟี (Analysis by Chromatographic Instruments). ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง.
- ทรงพล เหล่าวานิชย์. 2552. การแยกชนิดของมะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิดเฉียบพลันบนภาพถ่ายสเมียร์เลือดด้วยเทคนิคการประมวลผลภาพ. โครงการระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://161.200.126.55/~achatcha/SeniorProject2552/Comp/Acute%20leukemia%20identification%20in%20peripheral%20blood%20smears%20using%20image%20processing.pdf>. (วันที่สืบค้น 12 กันยายน 2553)
- ธนสร ตันศลงฆาร, ภัณฑิรา เกตุแก้ว, วรธนาภ คุ่มจินดาและบุญเทียม เทพพิทักษ์ศักดิ์. 2548. การวิเคราะห์ปริมาณ BTEX และ MTBE ในปัสสาวะด้วยเทคนิคเฮดสเปซ-โซลิดเฟส ไมโครเอกซ์แทรกชัน. วารสารวิจัยวิทยาศาสตร์การแพทย์ 19(1). [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://www.cph.chula.ac.th/J%20Health%20Res/files/FullText/19/1/Tanasorn_19.pdf. (วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2553)
- นวลแข ปาลวนิช. 2542. ความรู้เรื่องผ้าและเส้นใย (ฉบับปรับปรุงใหม่): กรุงเทพฯ.

- ปราโมทย์ ไชยเวช และนุรักษ์ กฤษดาบุรุษ. 2543. ปีโตรเลียมเทคโนโลยี (Petroleum Technology). ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ปิยมาส จินตนายากานนท์ และ อรณิข บุญศิริ. 2552. ระบบตรวจสอบไบโอฟิล์มของเชื้อ *Listeria monocytogenes* บนพื้นผิวสายพานลำเลียงในโรงงานอุตสาหกรรมไก่ในประเทศไทย. โครงการระดับปริญญาตรี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: <http://161.200.126.55/~achatcha/SeniorProject2552/Comp/Detection%20system%20for%20listeria%20monocytogenes%20biofilm%20formation%20on%20belt%20conveyers%20used%20in%20Thai%20local%20chicken%20plant.pdf>. (วันที่สืบค้น 12 กันยายน 2553)
- แม่น อมรสิทธิ์ และอมร เพชรสม. 2535. Principles and Techniques of Instrumental Analysis. พิมพ์ครั้งที่ 1. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย: กรุงเทพฯ.
- มนตรี กาญจนเดชะ. “เอกสารประกอบการสอนวิชา Image Processing”. ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2545.
- วรุฒม์ ชัยนกิจ. 2552. การออกแบบร่วมฮาร์ดแวร์/ซอฟต์แวร์สำหรับการประมวลผลหาเส้นตรงบนภาพด้วยเอพพีจีเอ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ สงขลา.
- วิญญู จิตสัมพันธ์เวช, วินัย สมบูรณ์, ภัณฑิรา เกตุแก้ว, ประภา เทพสินทรพสกุล และอภิษฎา มุ่งพัฒนกิจ. 2550. เทคนิคการวิเคราะห์ปริมาณสาร BTEX จากอุปกรณ์เก็บอากาศแบบพาสซีฟ. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. ฉบับพิเศษ. 30(4): 633-640.
- ศิริวัลย์ สร้อยกล่อม, นันทนา ชื่นอ้อม, พัชราภรณ์ ภูไพบูลย์ และ พิณิจ ไพรสนธิ์. 2550. การสกัดแอนโดรกราโฟไลต์ในฟ้าทะลายโจรด้วยคลื่นอัลตราโซนิก. บทความจาก นิตยสารงานวิจัย “บนเส้นทางงานวิจัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี 2550” ในงานเกษตรแฟร์ประจำปี 2550. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 26 มกราคม – 3 กุมภาพันธ์ 2550.
- สุวรรณ ลาภสุวัจนานนท์. 2006. Identification of flammable solvent residue on skin by GC/MS. Master of science thesis (forensic science), Mahidol University, Bangkok, Thailand.
- สันดี สุวัจน์. 2549. นิติวิทยาศาสตร์ 1. วิทยาการตำรวจ กลุ่มงานวิชาสืบสวนและสอบสวน กองบังคับการวิชาการ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ.
- สำนักงานตำรวจแห่งชาติ. 2553. สถิติคดีวางเพลิงที่วราชอาณาจักร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 - พ.ศ. 2553. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://statistic.ftp.police.go.th/dn_main.htm. (วันที่สืบค้น 21 เมษายน 2554)

- สำนักคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง กรมธุรกิจพลังงาน. องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับคุณภาพน้ำมันเชื้อเพลิง. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก:
<http://www.region12.energy.go.th/rokdownloads/know-how/knowledge-oil.doc>.
(วันที่สืบค้น 10 มิถุนายน 2553)
- สุรินทร์ เหล่าสุขสถิตย์. 2552. เอกสารประกอบการสอนวิชาเคมีอินทรีย์. [ออนไลน์] เข้าถึงได้จาก: http://www.ic.kmutnb.ac.th/sls/GeneralChem2/LectNote_OrgChem.pdf
(วันที่สืบค้น 26 ธันวาคม 2553)
- Almirall, J.R., Bruna, J. and Furton, K.G. 1996. The recovery of accelerants in aqueous samples from fire debris using solid-phase microextraction (SPME). *Science & Justice* 36: 283–287.
- Almirall, J.R. and Furton, K.G. 2004. Characterization of background and pyrolysis products that may interfere with the forensic analysis of fire debris. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 71: 51–67.
- Ahmad, U.K. and Voon, C.K. 2001. Detection of Accelerants in Fire Debris using Headspace Solid Phase Microextraction-Capillary Gas Chromatography. *Malaysian Journal of Analytical Sciences* 7(1): 57–63.
- Assadi, Y., Ahmadi, F. and Hossieni, M.R.M. 2010. Determination of BTEX compounds by dispersive liquid-liquid microextraction with GC-FID. *Chromatographia* 71: 1137–1141.
- AMSOIL. 2006. Material safety data sheet: Diesel concentrate fuel additive.
<http://www.syntheticoil distributor.com/files/Download/adf.pdf>. (accessed 04/02/09)
- ASTDR. 1995. <http://www.astdr.cdc.gov/toxprofiles/tp72-c3.pdf> (accessed 04/04/10).
- ASTDR. 1995. <http://www.astdr.cdc.gov/toxprofiles/tp75-c3.pdf> (accessed 01/04/10).
- Bennett, W.W. and Hess, K.M. 2006. *Criminal Investigation*. Eighth edition. Thomson Wadsworth: Canada.
- Benson, S., Lennard, C., Maynard, P. and Roux, C. 2006. Forensic applications of isotope ratio mass spectrometry-A review. *Forensic Science International* 157: 1–22.
- Borusiewicz, R. and Zieba-Palus, J.J. 2007. Comparison of the effectiveness of Tenax TA® and Carbotrap 300® in concentration of flammable liquids compounds. *Forensic Science* 52(1): 70–74.

- Cavanagh, K., Du Pasquier, E., and Lennard, C. 2002. Background interference from car carpets—the evidential value of petrol residues in cases of suspected vehicle arson. *Forensic Science International* 125: 22–36.
- Cavanagh-Steer, K., Du Pasquier, E., Roux, C. and Lennard, C. 2005. The transfer and persistence of petrol on car carpets. *Forensic science international* 147: 71–79.
- Christensen, J.S. and Elton, J. 1996. Soil and groundwater pollution from BTEX. <http://www.cee.vt.edu/ewr/environmental/teach/gwprimer/btex/btex.html>. (accessed 11/24/10)
- Cole, G.M. 1994. *Assessment and Remediation of Petroleum Contaminated Sites*. CRC Press: USA.
- Coulson, S.A., Morgan-Smith, R.K. and Noble, D. 2000. The effect of compressed air foam on the detection of hydrocarbon fuels in fire debris samples. *Science & Justice* 40: 257–260.
- Coulson, S., Morgan-Smith, R., Mitchell, S., and McBriar, T. 2008. An investigation into the presence of petrol on the clothing and shoes of members of the public. *Forensic Science International* 175: 44–54.
- Darrer, M., Jacquemet-Papilloud, J., and Delémont, O. 2008. Gasoline on hands: Preliminary study on collection and persistence. *Forensic Science International* 175: 171–178.
- DeForest, P.R., Gaensslen, R.E. and Lee, H.C. 1983. *Forensic science an introduction to criminalistics*. McGraw-Hill: New York.
- Dhole, V.R., Kurhekar, M.P. and Ambade, K.A.. 1995. Detection of petroleum accelerant residues on partially burnt objects in burning/arson offences. *Science & Justice* 35(3); 217–221.
- Frysiner, G.S. and Gaines, R.B. 2002. Forensic analysis of ignitable liquids in fire debris by comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Forensic sciences* 47: 471–482.
- GeeJay Chemicals Ltd. Silica gel. <http://www.geejaychemicals.co.uk/silicagel.htm>. (accessed 01/23/10)
- Hess Corprarion. 2007. Material safety data sheet: Gasoline, all grades. <http://www.hess.com/ehs/msds/9950AllGradesGasoline.pdf>. (accessed 01/23/09)
- Howard, P.H. 1943. *Handbook of Environmental Fate and Exposure Data for Organic Chemicals*. Florida: DRD Press.

- Ito, S. 2003. Analysis of aromatic hydrocarbons in gasoline and naphtha with the agilent 6820 series gas chromatograph and single polar capillary column application. <http://www.chem.agilent.com/Library/applications/5988-9261EN.pdf>. (accessed 12/28/10)
- Jasper, J.P., Edwards, J.S. and Ford, L.C. 2006. A Novel Method for Arson Accelerant Analysis: Gas Chromatography/Isotope Ratio Mass Spectrometry. <http://www.molecularisotopes.com/asia.html>. (accessed 02/11/10)
- Keto, R.O. and Wineman, P.L. 1991. Detection of petroleum-based accelerants in fire debris by target compound gas chromatography/mass spectrometry. *Analytical Chemistry* 63: 1964–1971.
- Larsson, H. and Dasgupta, P.K. 2003. Liquid core waveguide-based optical spectrometry for field estimation of dissolved BTEX compounds in groundwater A feasibility study. *Analytica Chimica Acta* 48: 155–167.
- Lee, H.C. and Harris, H.A. 2006. *Physical evidence in forensic science*. Second edition. Lawyers & Judges Publishing: USA.
- Massey, D., Du Pasquier, E. and Lennard, C. 2002. Solvent desorption of charcoal strips (DFLEX®) in the analysis of fire debris samples: replacement of carbon disulfide. *Journal of the Canadian Society of Forensic Science* 35(4): 195–208.
- Manion, J. 1998. Friedel-crafts alkylation: Kinetic versus thermodynamic control. University of central arkansas: USA. www.cerlabs.com/experiments/10875407242.pdf (accessed on 08/05/11)
- McCurdy, R.J., Atwell, T. and Cole, M.D. 2001. The use of vapour phase ultra-violet spectroscopy for the analysis of arson accelerants in fire scene debris. *Forensic Science International* 123: 191–201.
- Menéndez, J.C.F., Sánchez, M.L.F., Uría, J.E.S., Martínez, E.F., and Sanz-Medel, A. 2000. Static headspace, solid-phase microextraction and headspace solid-phase microextraction for BTEX determination in aqueous samples by gas chromatography. *Analytica Chimica Acta* 415: 9–20.
- Olah, G.O. and Mayer, M.W. 1995. *Friedel-crafts and related reactions*. Volume 1. Interscience publishers: USA.
- Picabea, L., Frontela, L. and Pazas, J.A. 1995. A comparison of extraction and adsorption methods for the recovery of accelerants from arson debris. *Forensic Science International* 75: 11–23.

- Rafson, H.J. 1998. *Odor and VOC control handbook*. McGraw-Hill: New York.
- Rodgers, R.P., Blumer, E.N., Freitas, M.A. and Marshall, A.G. 2001. Compositional analysis for identification of arson accelerants by electron ionization Fourier transform ion cyclotron resonance high-resolution mass spectrometry. *Forensic Sciences* 46: 268–279.
- Saitoh, N. and Takeuchi, S. 2006. Fluorescence imaging of petroleum accelerants by time-resolved spectroscopy with a pulsed Nd-YAG laser. *Forensic Science International* 163: 38–50.
- Sandercock, P.M.L. and Du Pasquier, E. 2003. Chemical fingerprinting of unevaporated automotive gasoline samples. *Forensic Science International* 134: 1–10.
- Sandercock, P.M.L. 2008. Fire investigation and ignitable liquid residue analysis-A review: 2001-2007. *Forensic Science International* 176: 93–110.
- Shenoy, D.K. 2005. Cavit ands: Molecules with enhanced selectivity for chem/bio detection. <http://www.carsonoil.com/pdfs/ULgasolineMSDS.pdf>. (accessed 02/03/11)
- Smallwood, B.J., Philp, R.P., Burgoyne, T.W. and Allen, J.D. 2001. The use of stable isotopes to differentiate specific source markers for MTBE. *Environmental Forensics* 2: 215–221.
- Smallwood, B.J., Philp, R.P. and Allen, J.D. 2002. Stable carbon isotopic composition of gasolines determined by isotope ratio monitoring gas chromatography mass spectrometry. *Organic Geochemistry* 33: 149–159.
- Stauffer, E., Dolan, J.A. and Newman, R. 2008. *Fire debris analysis*. Academic Press: New York.
- Tesoro Petroleum Companies. 2004. Material safety data sheet: Diesel fuel. <http://www.carsonoil.com/pdfs/dieselMSDS.pdf>. (accessed 01/23/09)
- Tesoro Petroleum Companies. 2003. Material safety data sheet: Gasoline, unleaded. <http://www.carsonoil.com/pdfs/ULgasolineMSDS.pdf>. (accessed 02/26/10)
- U.S. EPA, 1997. *Field Methods For The Analysis Of Petroleum Hydrocarbons*. <http://www.epa.gov/swerust1/pubs/esa-ch6.pdf>. (accessed 10/10/09)
- Vieira, P.A., Vieira, R.B., DeFranca, F.P. and Cardoso, V.L. 2007. Biodegradation of effluent contaminated with diesel fuel and gasoline. *Journal of Hazardous Materials* 140: 52–59.

Weintraub, S. Art Preservation Services. 2002.

http://www.apsnyc.com/pdf/silica_gel_reconditioning.pdf (accessed 11/23/10)

Williams, M.R., Fernandes, D., Bridge, C., Dorrien, D., Elliott, S. and Sigman, M. 2005.

Adsorption saturation and chromatographic distortion effects on passive headspace sampling with activated charcoal in fire debris analysis. *Forensic Science* 50(2); 1–10.

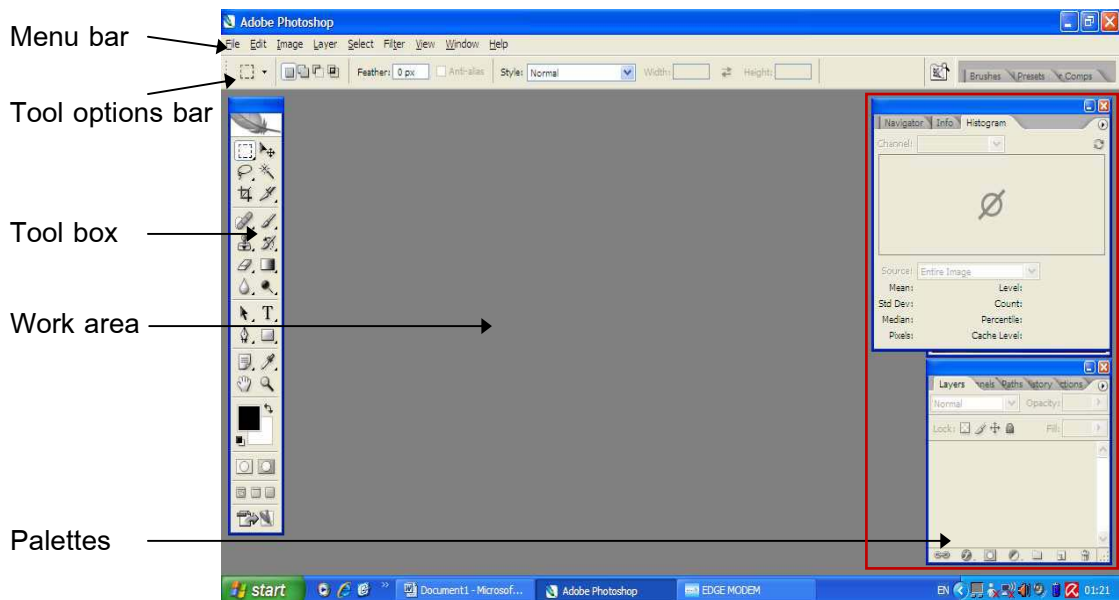
Warnke, M.M., Erickson, A.E. and Smith, E.T. 2005. Simplex optimization of headspace-enrichment conditions of residual petroleum distillates used by arsonists. *Journal of Chemical Education* 82(7): 1082–1085.

ภาคผนวก

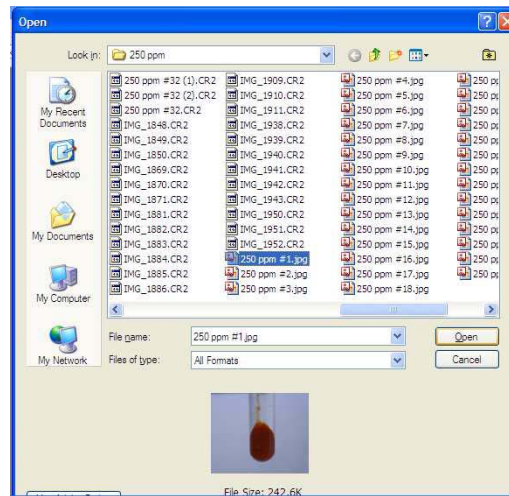
ภาคผนวก ก

ขั้นตอนการประมวลผลภาพสีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ด้วยโปรแกรม Photoshop CS2

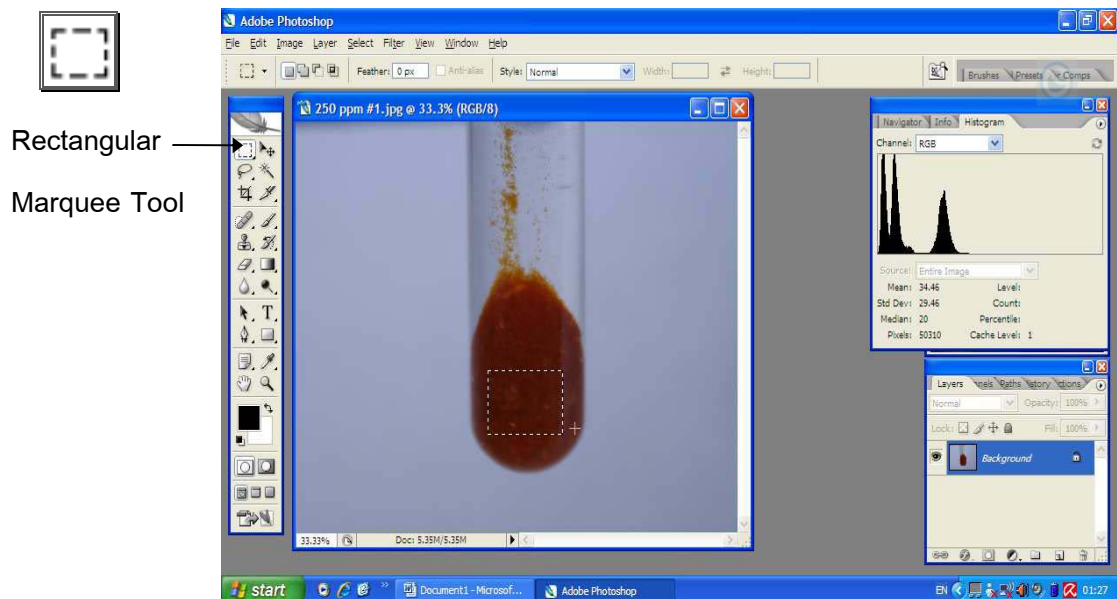
1. เปิดโปรแกรม Start > program > Adobe Photoshop CS2
จะปรากฏพื้นที่การทำงานของโปรแกรมซึ่งประกอบด้วยเครื่องมือต่างๆ ดังนี้
 - 1) Menu bar คือส่วนที่แสดงชื่อเมนูต่างๆ ของโปรแกรม
 - 2) Toolbox คือส่วนของอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชิ้นงานหรือตกแต่งภาพ
 - 3) Tool options bar คือส่วนที่กำหนดคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่เลือกจาก Toolbox
 - 4) Palettes คือส่วนที่ใช้ตรวจสอบและกำหนดคุณสมบัติต่างๆ ให้กับรูปภาพ



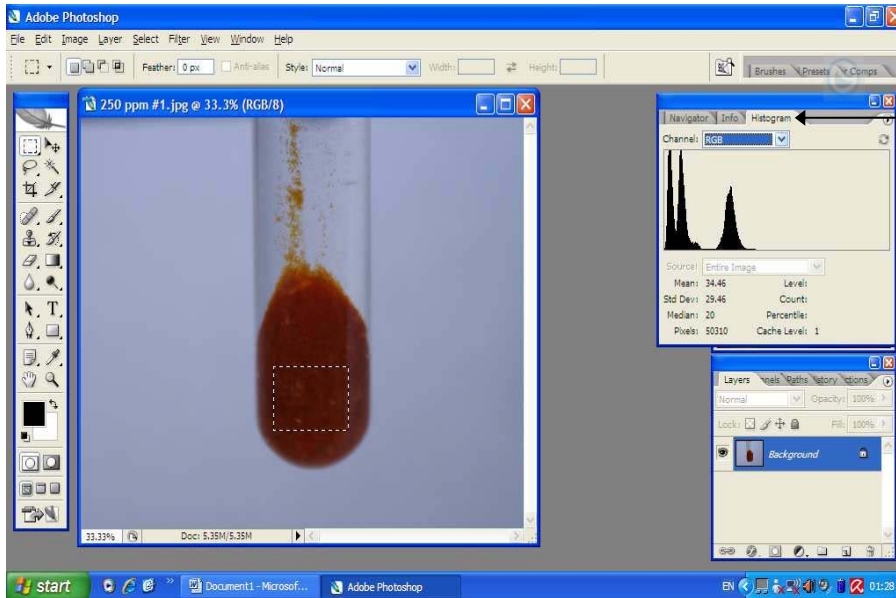
2. เปิดไฟล์รูปภาพจากแถบ Menu bar โดยเลือก File > Open... จะปรากฏหน้าต่าง Open ดังรูป และเลือกรูปภาพที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วกด open



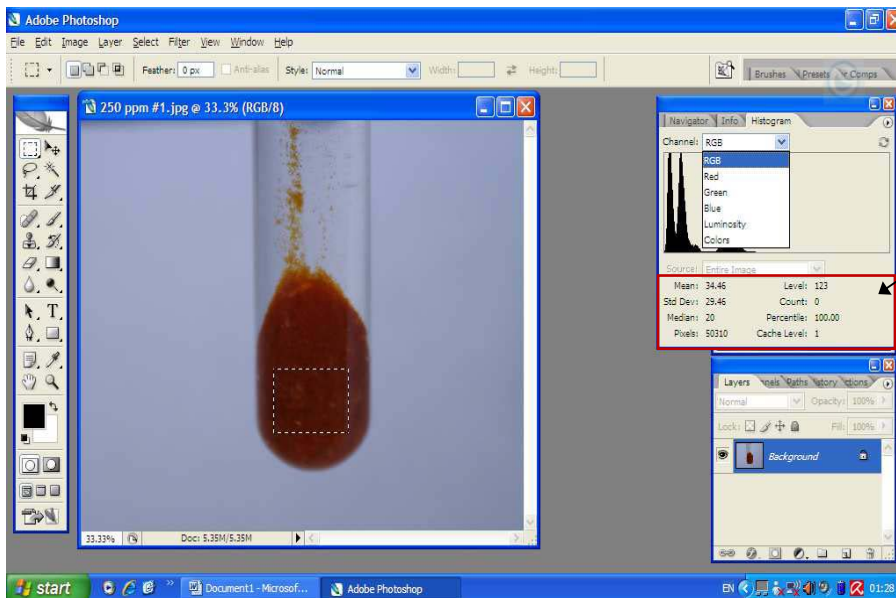
3. เมื่อปรากฏรูปภาพที่ต้องการให้ทำการเลือกบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์สี โดยคลิก Rectangular Marquee Tool แล้วเลื่อนเมาส์ไปยังบริเวณที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นคลิกและลากเมาส์ซึ่งจะปรากฏกรอบสี่เหลี่ยมเส้นประ ให้ลากจนได้ขนาดตามต้องการ แล้วจึงปล่อยเมาส์



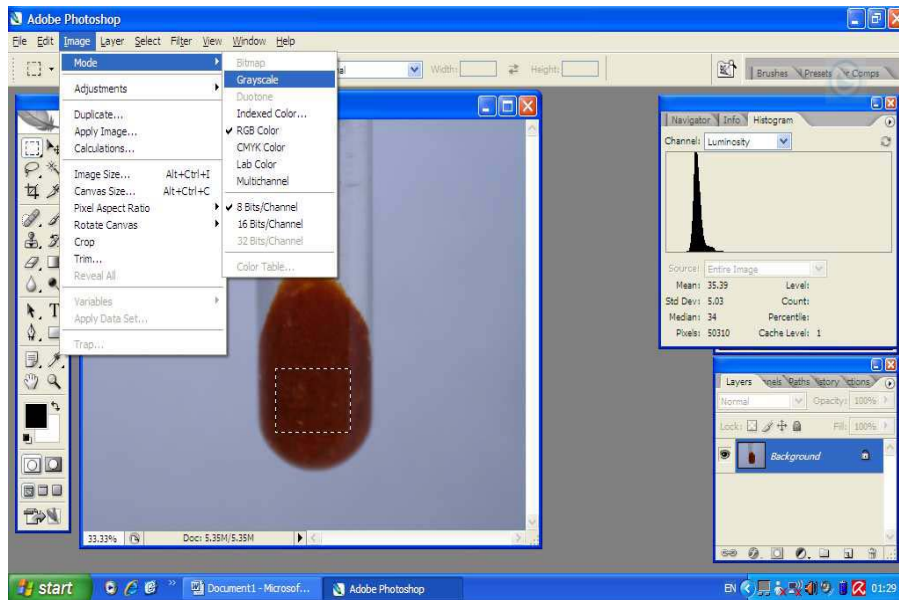
3. คลิกแท็บ Histogram เพื่ออ่านค่าของสีต่างๆที่วิเคราะห์ได้ในระบบสี RGB



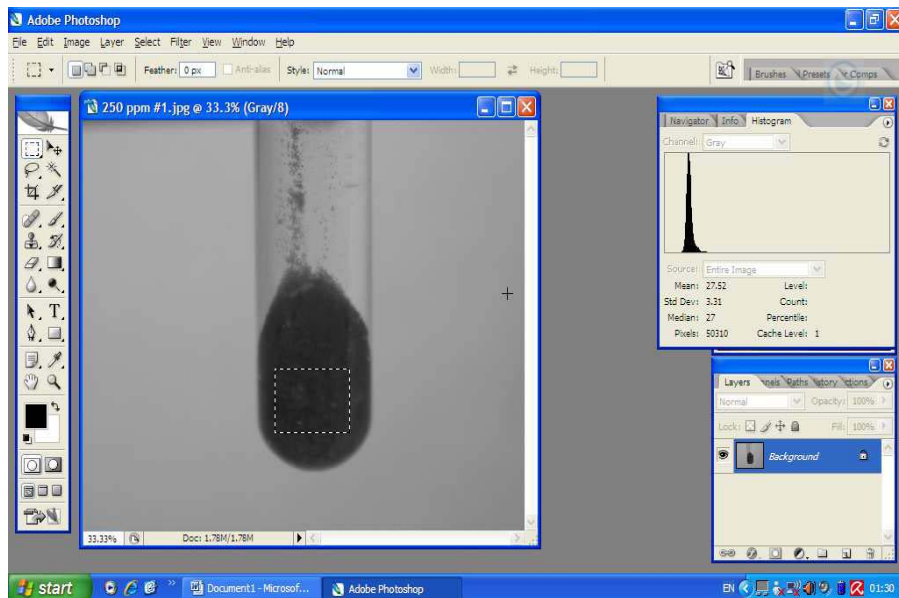
4. เลือกอ่านค่าสี RGB จาก Channel > RGB และอ่านค่าจากบริเวณกรอบสี่เหลี่ยม ส่วนค่าสี Red Green และ Blue ก็ทำได้ในทำนองเดียวกัน



5. เปลี่ยนรูปภาพให้อยู่ในระบบสี Grayscale โดยเลือก Image > Mode > Grayscale



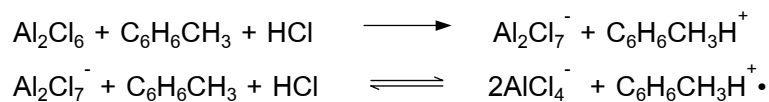
6. อ่านค่าสีในระบบ Grayscale จากบริเวณกรอบสี่เหลี่ยม



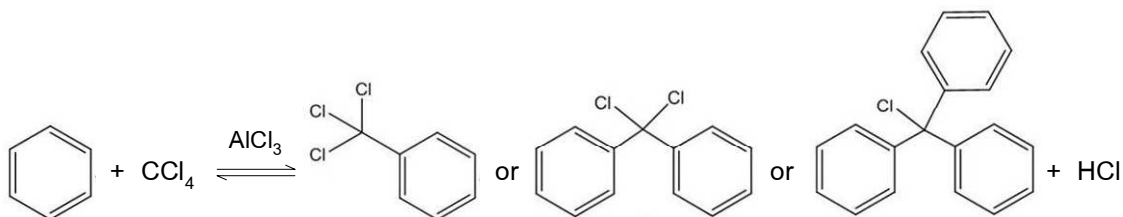
ภาคผนวก ข

ปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟต์ แอลคิลเลชัน (Friedel-Crafts alkylation)

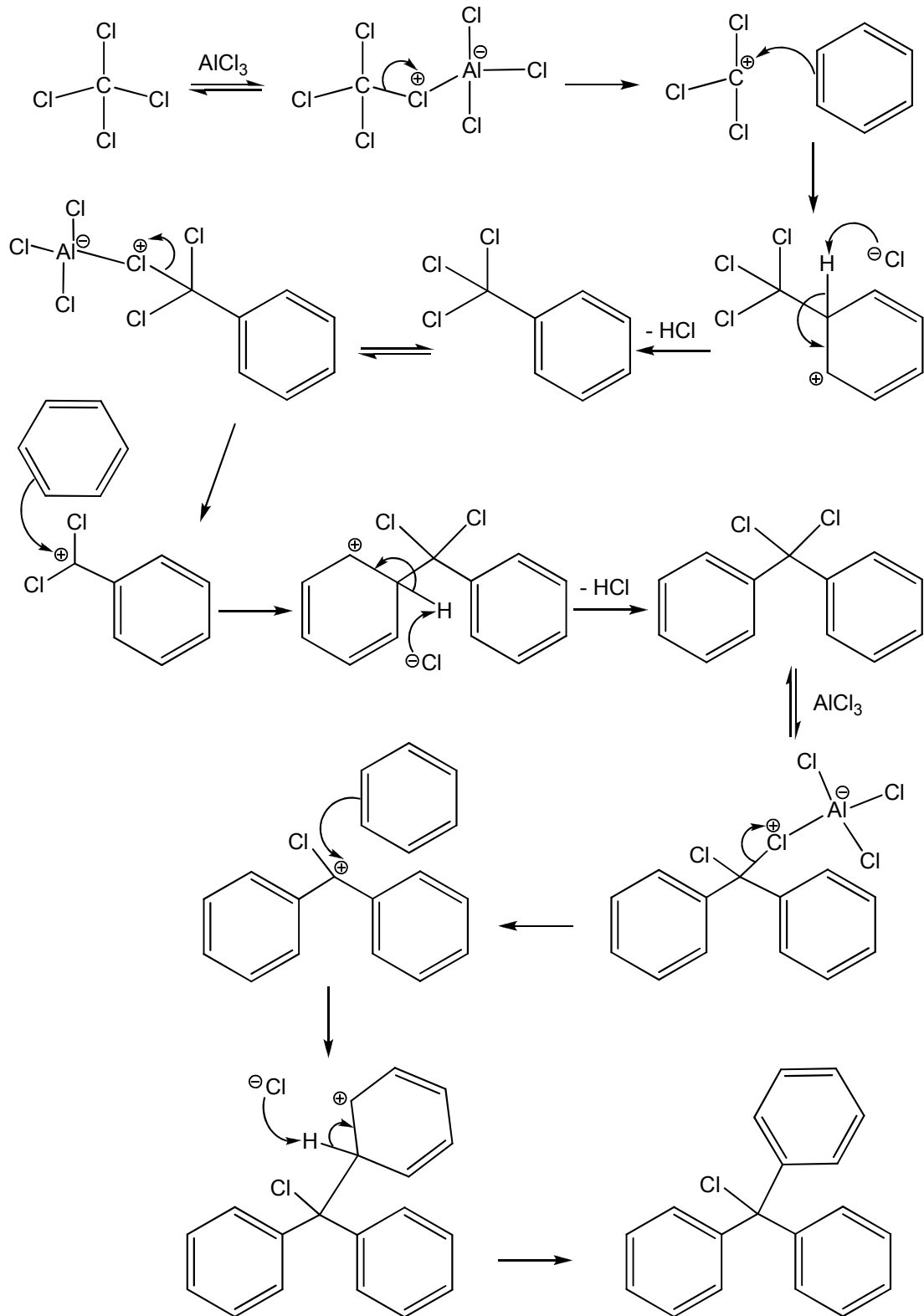
ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟต์ แอลคิลเลชันของสารอะโรมาติกไฮโดรคาร์บอนจะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีลักษณะคล้ายตะกอนเหนียวสีส้ม (Orange, viscous oils) หรือเรียกว่า “red oil” ประกอบด้วยโครงสร้างอย่างง่ายสามส่วน (Ternary system) คือ Aluminum halide – Aromatic hydrocarbon – Hydrogen halide (Olah and Meyer, 1963) เช่น



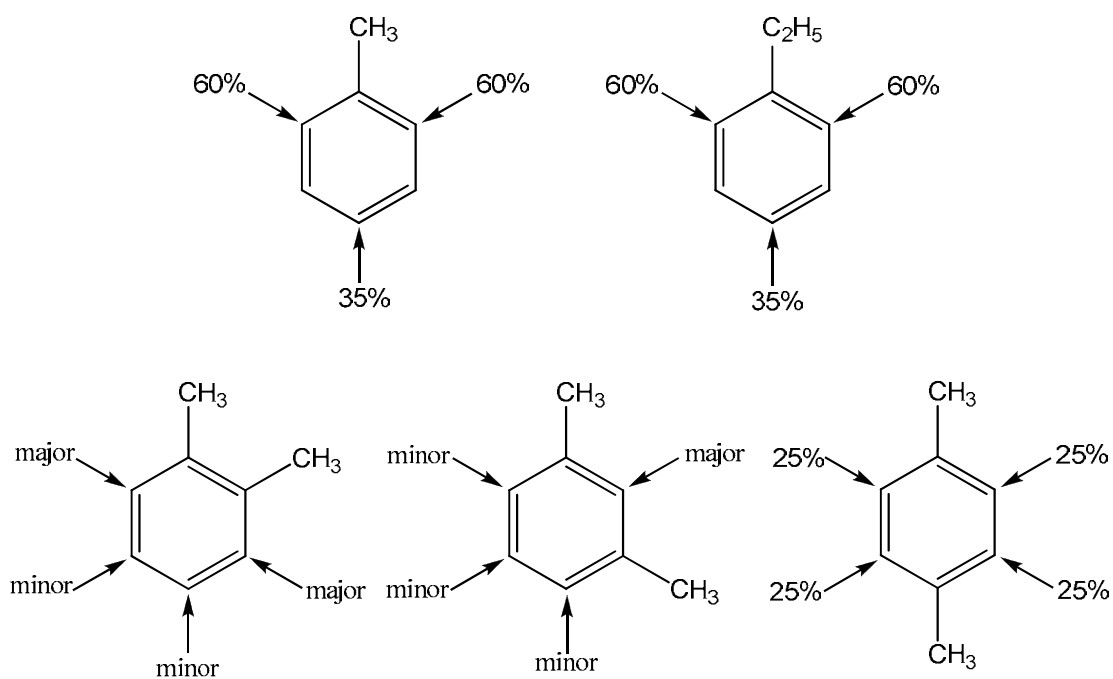
ปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟต์ แอลคิลเลชันของเบนซีน (U.S.EPA, 1997)



กลไกการเกิดปฏิกิริยาฟรีเทล-คราฟ แอลคิลเลชันของเบนซีน



ผลิตภัณฑ์ที่อาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาปียีเอ็กซ์ในคาร์บอนเตตระคลอไรด์กับอะลูมิเนียม-คลอไรด์ ได้แก่



ภาคผนวก ค

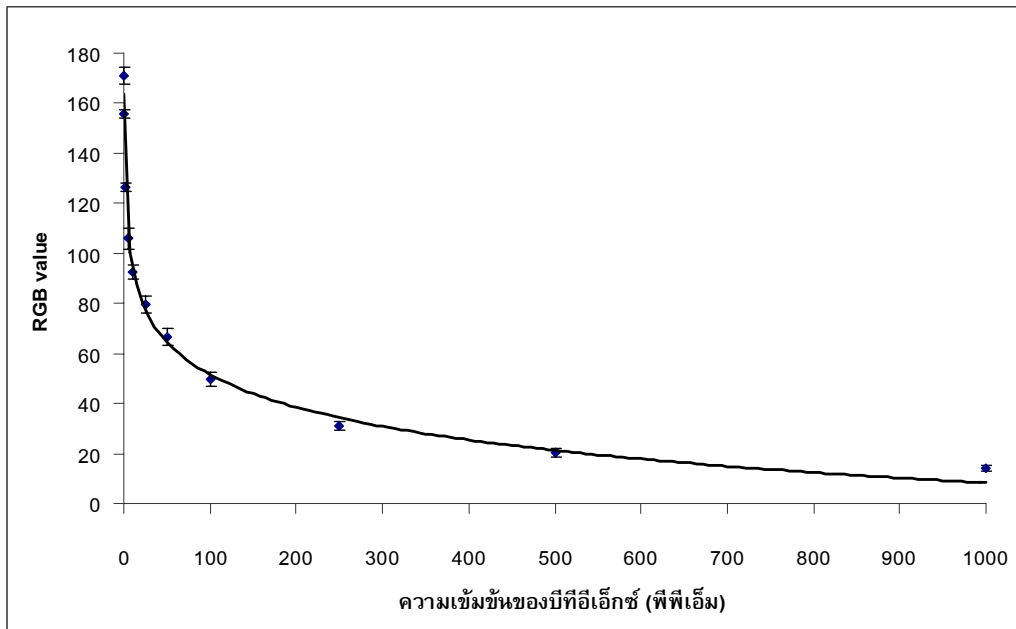
การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของปฏิกิริยาฟรีเดิล-คราฟ แอลคิลเลชัน

1. ผลความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

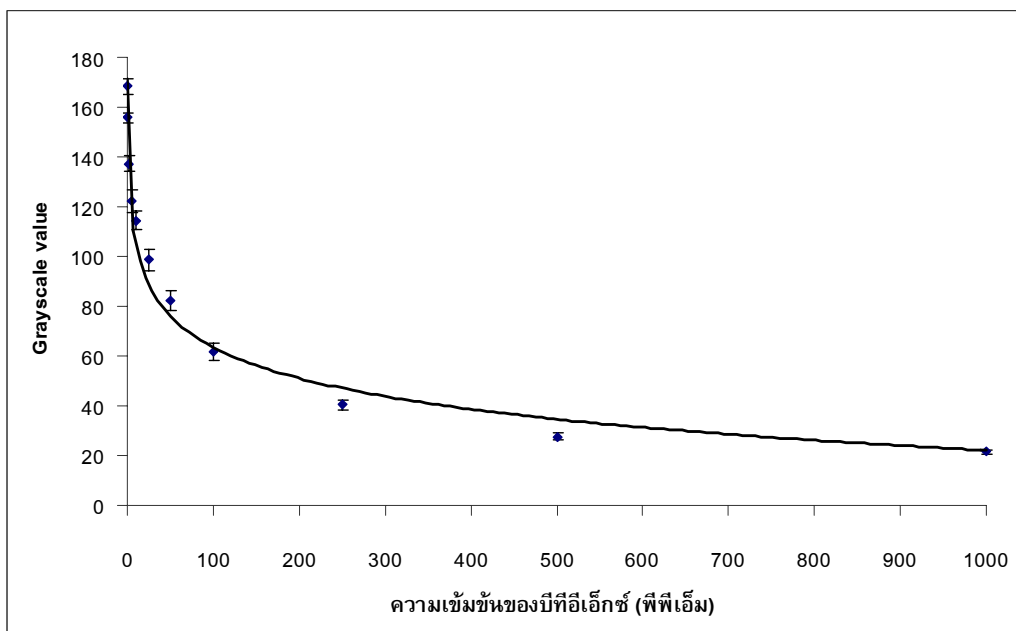
ตารางที่ ค-1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานผสมของบีทีอีเอ็กซ์ที่เหลืออยู่ในสารละลายหลังจากเกิดปฏิกิริยา เมื่อใช้ความเข้มข้นของอะลูมิเนียมคลอไรด์ในช่วง 2.0 – 20.0 % w/v (n = 5)

ความเข้มข้นของ อะลูมิเนียมคลอไรด์ (% w/v)	ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น (mean ± S.D.)	
	262 นาโนเมตร	269 นาโนเมตร
0.0	1.67 ± 0.00	0.99 ± 0.00
2.0	1.55 ± 0.12	0.86 ± 0.12
4.0	1.33 ± 0.17	0.62 ± 0.12
6.0	1.20 ± 0.05	0.52 ± 0.04
8.0	0.99 ± 0.05	0.38 ± 0.03
10.0	1.08 ± 0.06	0.43 ± 0.04
12.0	0.90 ± 0.02	0.32 ± 0.01
14.0	1.02 ± 0.04	0.38 ± 0.03
16.0	0.93 ± 0.01	0.34 ± 0.01
18.0	1.03 ± 0.02	0.39 ± 0.02
20.0	0.97 ± 0.06	0.36 ± 0.04

2. ข้อมูลเพิ่มเติมจากการวิเคราะห์สีตะกอนในระบบสี RGB และ Grayscale ในตารางที่ 3.1



(ก)



(ข)

ภาพประกอบที่ ค-1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานผสมบีทีอีเอ็กซ์กับสีตะกอนที่ได้จากการวิเคราะห์ในระบบสี (ก) RGB และ (ข) Grayscale

ภาคผนวก ง

ข้อมูลจากวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีการสกัดด้วยเฮฟเทน





1. เปรียบเทียบสีตะกอนที่ได้จากวิธีการสกัดด้วยเฮฟเทนแบบการใช้คลื่นความถี่สูง และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ตารางที่ ง-1 ความเข้มของสีตะกอนที่เกิดจากการสกัดสารละลายมาตรฐานผสมของ บีทีอีเอ็กซ์เข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม ในตัวอย่างผ้ำด้วยเฮฟเทนแบบตั้งทิ้งไว้ และแบบการใช้คลื่นความถี่สูงที่เวลา 15 นาที (n = 3)

วิธีการสกัดด้วยเฮฟเทน แบบตั้งทิ้งไว้	วิธีการสกัดด้วยเฮฟเทน แบบใช้คลื่นความถี่สูง
	

2. เปรียบเทียบสีตะกอนที่ได้จากวิธีการสกัดด้วยเฮฟเทนแบบการตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องที่เวลาต่าง ๆ

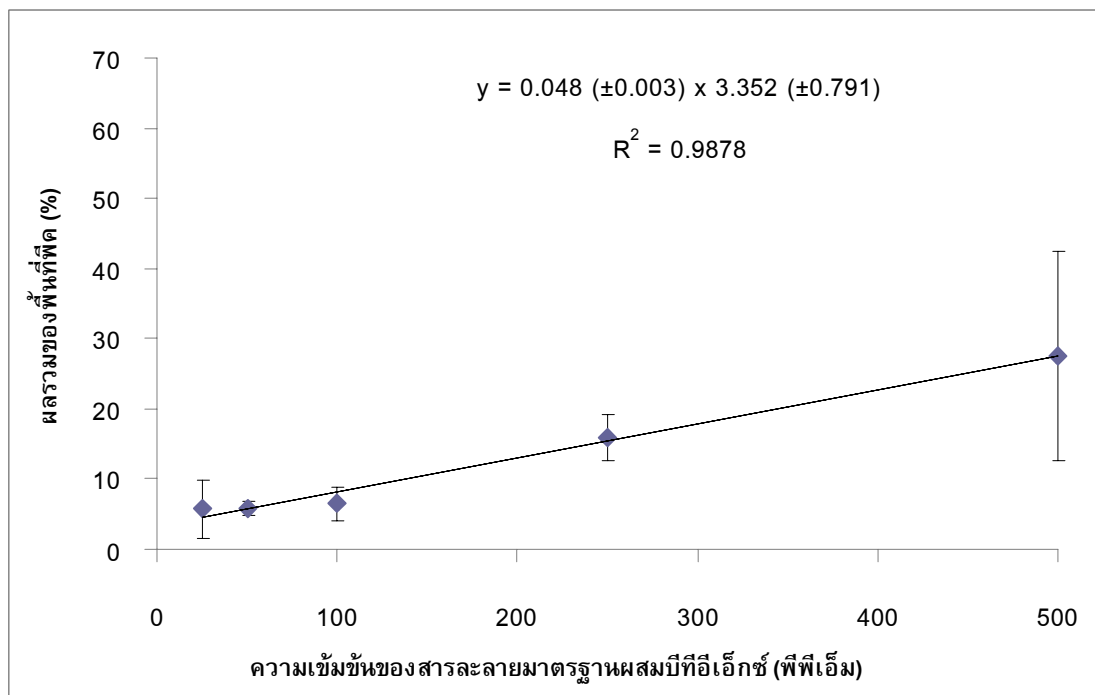
ตารางที่ ง-2 ความเข้มของสีตะกอนที่เกิดจากการสกัดสารละลายมาตรฐานผสมของ บีทีอีเอ็กซ์เข้มข้น 50.00 พีพีเอ็ม ในตัวอย่างผ้ำด้วยเฮฟเทนแบบตั้งทิ้งไว้ ที่เวลา 5, 10, 15 และ 30 นาที (n = 3)

เวลาที่ทำการสกัด (นาที)	5	10	15	30
ความเข้มของสี ตะกอน				

ภาคผนวก จ

ข้อมูลจากวิธีการเตรียมตัวอย่างโดยวิธีการให้ความร้อน

1. กราฟมาตรฐานของวิธีโซลิตเฟสไมโครเอกซแทรกชัน



ภาพประกอบที่ จ-1 กราฟมาตรฐานจากการสกัดโดยใช้วิธีโซลิตเฟสไมโครเอกซแทรกชัน

2. การวิเคราะห์ตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงโดยวิธีการให้ความร้อน

ตาราง จ-1 ความเข้มของสีตะกอนที่เกิดจากการให้ความร้อนกับตัวอย่างผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิงในระบบสี RGB และ Grayscale

หมายเลขตัวอย่าง	ประเภทผ้าตัวอย่าง	ชนิดของน้ำมันเชื้อเพลิง	RGB value	Grayscale value
S01	ผ้าโพลีเอสเตอร์	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	137.97	112.33
S02	ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	49.12	33.86
S03	ผ้าลินิน	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	92.98	69.54
S04	ผ้าฝ้าย	เบนซิน (ปตท)	38.07	28.65
S05	ผ้าโพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ปตท)	39.25	29.16
S06	ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ปตท)	32.38	22.61
S07	ผ้าลินิน	เบนซิน (ปตท)	60.21	48.62
S08	กระสอบป่าน	เบนซิน (ปตท)	18.36	13.38
S09	ผ้าฝ้าย	เบนซิน (ร้านค้า)	64.08	51.98
S10	ผ้าโพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ร้านค้า)	55.03	41.94
S11	ผ้าฝ้ายผสมโพลีเอสเตอร์	เบนซิน (ร้านค้า)	-	-

ตาราง จ-1 (ต่อ)

หมายเลข ตัวอย่าง	ประเภทผ้า ตัวอย่าง	ชนิดของน้ำมัน เชื้อเพลิง	RGB value	Grayscale value
S12	ผ้าลินิน	เบนซิน (ร้านค้า)	78.16	61.88
S13	กระสอบป่าน	เบนซิน (ร้านค้า)	37.52	27.14
S14	ผ้าฝ้าย	ดีเซล (บางจาก)	50.81	37.80
S15	ผ้าโพลีเอสเตอร์	ดีเซล (บางจาก)	-	-
S16	ผ้าฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	ดีเซล (บางจาก)	109.79	92.71
S17	ผ้าลินิน	ดีเซล (บางจาก)	41.45	30.10
S18	กระสอบป่าน	ดีเซล (บางจาก)	21.24	15.64
S19	ผ้าฝ้าย	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	142.83	117.69
S20	กระสอบป่าน	แก๊สโซฮอล์ (บางจาก)	60.19	44.39
S21	ฝ้ายผสม โพลีเอสเตอร์	แก๊สโซฮอล์ (ร้านค้า)	59.68	42.04
S22	โพลีเอสเตอร์	ดีเซล (บางจาก)	57.71	43.85

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นางสาววดีณี ศิริลักษณ์	
รหัสประจำตัวนักศึกษา	5010220114	
วุฒิการศึกษา		
วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (เคมี)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2549

การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

วดีณี ศิริลักษณ์, เปรตพิชญ์ คณาธารณา และจิตติมา รุจิราลัย. 2552. “ ศึกษาความเป็นไปได้ของวิธีการตรวจวัดบีทีอีเอ็กซ์ในเศษผ้าที่ปนเปื้อนน้ำมันเชื้อเพลิง”. การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษาแห่งชาติ ครั้งที่ 14 วันที่ 10 - 11 กันยายน 2552 ณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.