



การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระจายในการวัดระยะทางของปริมาณไนเตรทและไนโตรเจน
ในเขม่าดินปืน

โดย

นางสาวรัชชนก อินทรสุขศรี



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

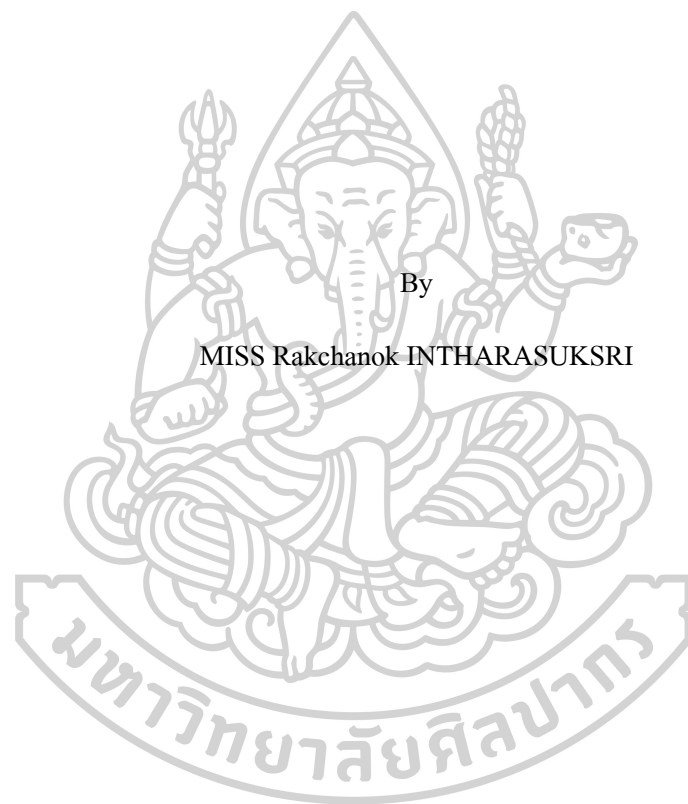
การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษในการวัดระยะทางของปริมาณไนเตรทและไน
ไตรท์ในเขม่าดินปืน



โดย
นางสาวรัชชนก อินทรสุขศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2564
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยศิลปากร

DEVELOPMENT OF ANALYTICAL DEVICE FOR DETERMINATION OF
NITRATE AND NITRITE IN GUNSHOT RESIDUE ON DISTANCE-BASED
MICROFLUIDIC PAPER



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Science (FORENSIC SCIENCE)
Graduate School, Silpakorn University
Academic Year 2021
Copyright of Silpakorn University

หัวข้อ	การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระจายในการวัดระยะทางของ
	ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในเขม่าดินปืน
โดย	นางสาวรัชชนก อินทรสุขศรี
สาขาวิชา	นิติวิทยาศาสตร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร. ורתัย เขียวพุ่ม

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

.....ประธานกรรมการ
(อาจารย์ ดร. สุภชัย สุภักษ์กษณาริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(อาจารย์ ดร. ורתัย เขียวพุ่ม)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(อาจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง)

.....ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(รองศาสตราจารย์ ดร. ุภาพร สมิน้อย)

630720045 : นิติวิทยาศาสตร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

คำสำคัญ : อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศ, เขม่าดินปืน, ไนเตรท, ไนไตรท์

นางสาว รักษ์ชนก อินทรสุขศรี: การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศในการวัด
ระยะทางของปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในเขม่าดินปืน อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก :
อาจารย์ ดร. อรทัย เขียวพุ่ม

อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาศ (μ PADs) ในการวัดระยะทางที่ประดิษฐ์ขึ้นเพื่อตรวจหา
ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืน (Gunshot residues; GSR) ที่สร้างด้วยวิธีการ
พิมพ์ผ่านบล็อกสกรีนด้วยสีผง และปริมาณของไนไตรท์และไนเตรทจะขึ้นอยู่กับระยะทางของสีที่
เกิดจากปฏิกิริยาโดยใช้ Griess reagent และสำหรับไนเตรทต้องใช้ Zn ซึ่งเปลี่ยนไอออนของไนเตร
ทให้เป็นไนไตรท์ก่อนใช้รีเอเจนต์ Griess เป็นมาตรฐานของการตรวจวัด กราฟมาตรฐานสร้างขึ้น
จากค่าระยะทางของสีที่เกิดและปริมาณของสารมาตรฐาน ไนเตรทและไนเตรทที่อยู่ในช่วง 20.0-
100.0 nmol และ 4.0-20.0 nmol ตามลำดับ จากนั้นใช้อุปกรณ์ตรวจวัดนี้ในการตรวจวิเคราะห์
ไอออนของไนไตรท์และไนเตรทในเขม่าดินปืนจากมือของผู้ยิงและจากปลอกกระสุนปืน ปริมาณ
ของไนไตรท์และไนเตรทใน GSR ที่ถูกตรวจวัดโดย μ PAD จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณที่
ตรวจวัดโดยเทคนิค ion chromatography (IC) ในหน่วย nmol ในวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ T – Test
พบว่าวิเคราะห์หาปริมาณทั้งสองวิธีไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และเมื่อพิจารณาจากค่า
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าเท่ากับ 0.995 และ 0.934 สำหรับไอออนไนเตรทและไนไตรท์
ตามลำดับ μ PADs ที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพที่จะนำมาใช้ในการตรวจสอบที่เกิดเหตุ
ในการตรวจคัดกรองเบื้องต้นสำหรับการตรวจวัดเขม่าดินปืนผ่านการตรวจวัดไนไตรท์

630720045 : Major (FORENSIC SCIENCE)

Keyword : Microfluidic paper-based measuring devices, Gunshot residues, Nitrate, Nitrite

MISS RAKCHANOK INTHARASUKSRI : DEVELOPMENT OF ANALYTICAL DEVICE FOR DETERMINATION OF NITRATE AND NITRITE IN GUNSHOT RESIDUE ON DISTANCE-BASED MICROFLUIDIC PAPER THESIS ADVISOR : ORATHAI KHEAWPUM, Ph.D.

Microfluidic paper-based measuring devices (μ PADs) on Distance-base have been fabricated to determine nitrate and nitrite ion in the gunshot residues (GSR). The μ PADs were formed by block-screen printing with beeswax and the amount of nitrile and nitrate ions were based on the distance of color development using a Griess reagent as a detection motif. For nitrate analysis, the nitrate ions were converted into nitrite ions by using Zn as a reducing agent. Calibration graphs were created for the distance values and the amounts of standard nitrate and nitrite ions in the range of 20.0 – 100.0 nmol and 4.0-20.0 nmol respectively. The device was then used to examine the nitrite and nitrate ions in GSR collected from the hands of a shooter and from the cartridge cases. The amount of nitrite and nitrate in GSR determined by the μ PADs were compared to those measured by the ion chromatography (IC) technique, In statistical analysis using T-Test, quantification of the difference efficiency did not differ statistically significance at the 0.05 level. The good correlations between the two data sets were observed for both nitrite and nitrate contents with the correlation coefficients of 0.995 and 0.934 for the nitrate and nitrite ions respectively. The μ PADs developed in this study has the potential to be used in crime scene investigations as a rapid screening test for gunshot residue detection via nitrite detection.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ เรื่อง การพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษในการวัดระยะทางของปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในเขม่าดินปืน ฉบับสมบูรณ์ได้ด้วยดี โดยได้รับการความช่วยเหลือจากอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร.อรรถ เขียวพุ่ม และอาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง ที่ให้คำปรึกษาและสนับสนุนในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนการแก้ไขปัญหาต่างๆ ในการทดลอง และขอขอบคุณอาจารย์ ดร.ศุภชัย สุภลักษณ์นารี ที่ได้กรุณาเป็นประธานกรรมการ และรศ. ดร.ยุภาพร สมิน้อย ที่กรุณาเป็นกรรมการสอบงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณ พ.ต.อ. อติชัย กัณหา ที่ให้คำปรึกษาในการเก็บตัวอย่างเขม่าดินปืนและติดต่อประสานงานให้เก็บตัวอย่าง ณ ศูนย์ราชการ จังหวัดนครปฐม และขอขอบคุณอาสาสมัครทุกท่านที่อาสาและช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่างเขม่าดินปืนและจัดเตรียมอุปกรณ์ต่าง

นอกจากนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนในการเรียนที่สาขานิติวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมีและขอขอบพระคุณอาจารย์ประจำคณะนิติวิทยาศาสตร์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้อันเป็นประโยชน์ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ และเจ้าหน้าที่ทุกท่านในสาขานิติวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี สำหรับความช่วยเหลือและเอื้อเฟื้อจนกระทั่งวิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

นางสาว รัชชนก อินทรสุขศรี



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1. ที่มาและความสำคัญ	1
2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
3. สมมติฐานและคำถามงานวิจัย	3
4. ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
5. นิยามคำศัพท์เฉพาะ	3
6. ข้อจำกัดของงานวิจัย.....	4
7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
1. อวูธป็น	5
2. เขม่าดินปืน	7
3. ไนเตรทและไนไตรท์.....	8
4. Griess reagent.....	9
5. อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (Paper-base analytic device)	10
6. เทคนิค Ion chromatography	15

7. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	19
บทที่ 3	21
วิธีการดำเนินการ	21
1. เครื่องมือและอุปกรณ์	21
2. สารเคมี	21
3. การเตรียมสารละลาย	22
4. การเก็บตัวอย่างเขม่าป็นและวิธีการเตรียมตัวอย่างเขม่าป็น	22
5. การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษด้วยเทคนิค screen printing	23
6. ศึกษากระดาษกรองที่เหมาะสมที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD).....	25
7. ศึกษาปริมาตรสารตัวอย่าง, สารมาตรฐาน และรีเอเจนท์	25
8. ศึกษาระยะเวลาการตรวจวัดระยะทางบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD).....	25
9. ศึกษาผลการรบกวนของสารรบกวน	26
10. การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μPAD).....	26
11. วิเคราะห์ตัวอย่างเขม่าดินปืนด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD) และเครื่อง Ion chromatography (IC).....	26
12. ทดสอบความใช้ได้ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ion chromatography (IC)	27
13. การวิเคราะห์หาปริมาณทั้ง 2 วิธีมาเปรียบเทียบกัน.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลอง	28
4.1 ผลการประดิษฐ์อุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD)	28
4.2 ผลการศึกษากระดาษกรองในรูปแบบที่เหมาะสมที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD)	28
4.3 ผลการศึกษาปริมาตรสารตัวอย่าง, สารมาตรฐาน และรีเอเจนท์.....	31
4.4 ผลการศึกษาระยะเวลาการตรวจวัดระยะทางหลังจากการเกิดปฏิกิริยา.....	31
4.5 ผลการศึกษาตัวรบกวนบนอุปกรณ์ตรวจวัด	32

4.6 ผลการทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μ PAD)	33
4.7 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเขม่าดินปืนด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PAD) และเครื่อง Ion chromatography (IC).....	38
4.8 ผลการทดสอบความใช้ได้ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ion chromatography (IC)	43
4.9 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์หาปริมาณทั้ง 2 วิธี	49
บทที่ 5 สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ	55
5.1 สรุป	55
5.2 อภิปรายผล.....	56
5.3 ข้อเสนอแนะ	56
รายการอ้างอิง	58
ภาคผนวก	60
ภาคผนวก ก ตารางข้อมูลการวิเคราะห์.....	61
ภาคผนวก ข ประมวลผลการทดลอง.....	81
ภาคผนวก ค โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์.....	89
ภาคผนวก ง โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนบริเวณมือและปลอกกระสุน	94
ประวัติผู้เขียน	111

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 การตั้งค่าสภาวะของเครื่อง Ion chromatography (IC)	26
ตารางที่ 2 การศึกษากระดาศทั้ง 6 ชนิดในการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัด	30
ตารางที่ 3 ลักษณะการไหลในการใช้ปริมาตรที่ต่างกัน	31
ตารางที่ 4 ภาพถ่ายระยะทางในการตรวจวัดที่เวลาต่างๆ	32
ตารางที่ 5 ค่าการวัดระยะทางของสปีบนอุปกรณ์ตรวจวัดในเตรทที่ความเข้มข้นช่วง 10-50 mM (20-100 nmol)	33
ตารางที่ 6 ค่าการวัดระยะทางของสปีบนอุปกรณ์ตรวจวัดในเตรทที่ความเข้มข้นช่วง 2-10 mM (4-20 nmol)	35
ตารางที่ 7 ผลการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบวัดระยะทางของสารละลายมาตรฐานในเตรท	37
ตารางที่ 8 ผลการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบวัดระยะทางของสารละลายมาตรฐานในเตรท	37
ตารางที่ 9 ปริมาณในเตรทและในเตรทของตัวอย่างเขม่าดินปืนโดยการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาศ (μPAD)	38
ตารางที่ 10 ปริมาณในเตรทและในเตรทของตัวอย่างเขม่าดินปืนโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC	40
ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานในเตรทช่วงความเข้มข้น 10-400 μM	43
ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานในเตรทช่วงความเข้มข้น 10-400 μM	44
ตารางที่ 13 ผลการศึกษาความแม่นยำของการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานในเตรทด้วยเครื่อง IC	47
ตารางที่ 14 ผลการศึกษาความแม่นยำของการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานในเตรทด้วยเครื่อง IC	47
ตารางที่ 15 พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานในเตรทและในเตรทที่ความเข้มข้น 0.005 μM และ 0.01 μM	48

ตารางที่ 16 ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ (μPAD) และเทคนิคไอออนโครมาโตกราฟี (IC)	49
ตารางที่ 17 Paired Samples Statistics	52
ตารางที่ 18 Paired Samples Correlations	52
ตารางที่ 19 Paired Differences (T-Test)	53
ตารางที่ 20 พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรทช่วงความเข้มข้น 0.005-400 μM	62
ตารางที่ 21 พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ช่วงความเข้มข้น 0.01-200 μM	62
ตารางที่ 22 พื้นที่ใต้พีคไนเตรทของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือและปลอกกระสุนปืน	63
ตารางที่ 23 คำนวนปริมาณไนเตรทของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือและปลอกกระสุนปืน	65
ตารางที่ 24 พื้นที่ใต้พีคไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือและปลอกกระสุนปืน	67
ตารางที่ 25 คำนวนปริมาณไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือและปลอกกระสุนปืน	69
ตารางที่ 26 ภาพอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางไนเตรทและไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนบริเวณหลังมือทั้งสองข้าง	71
ตารางที่ 27 ภาพอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางไนเตรทและไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืน	74
ตารางที่ 28 ค่าระยะทางปริมาณไนเตรทของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนบนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ	76
ตารางที่ 29 ค่าระยะทางปริมาณไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนบนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ	77
ตารางที่ 30 คำนวนปริมาณไนเตรทของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนบนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ	78

ตารางที่ 31 จำนวนปริมาณไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนบน	
อุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ	79



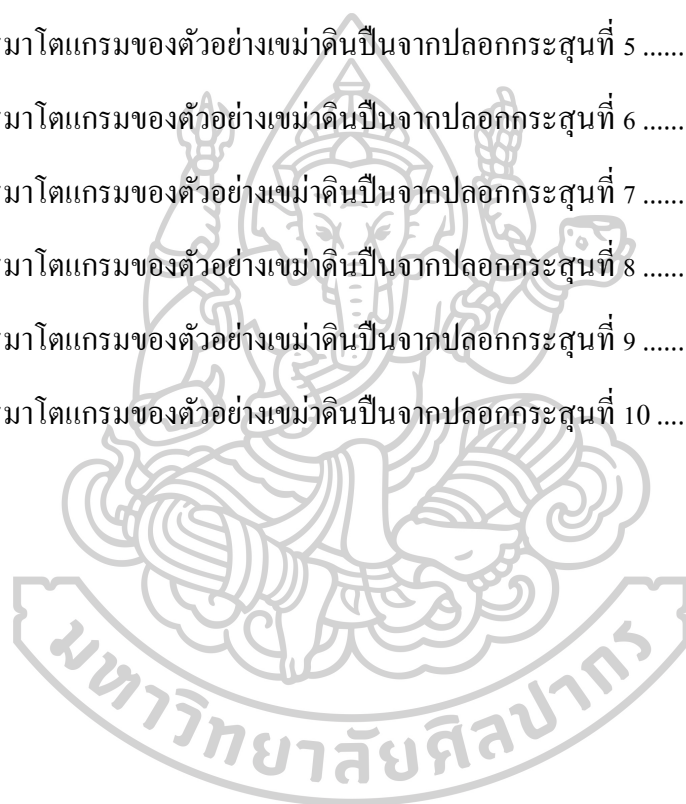
สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โครงสร้างของไนไตรท์ (NO_2^-).....	8
ภาพที่ 2 โครงสร้างของไนเตรท (NO_3^-).....	9
ภาพที่ 3 ปฏิกิริยา Griess	10
ภาพที่ 4 การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ.....	11
ภาพที่ 5 การออกแบบอุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดระยะทาง	12
ภาพที่ 6 อุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า.....	13
ภาพที่ 7 อุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดสี	14
ภาพที่ 8 เทคนิค Ion chromatography	16
ภาพที่ 9 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแถวที่ 1 (1A-1D).....	23
ภาพที่ 10 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแถวที่ 2 (2A-2D).....	24
ภาพที่ 11 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแถวที่ 3 (3A-3D).....	24
ภาพที่ 12 แม่แบบบล็อกสกรีน 12 รูปแบบ.....	25
ภาพที่ 13 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษทั้ง 12 รูปแบบ	28
ภาพที่ 14 การทดสอบตัวรับกวนบนอุปกรณ์ตรวจวัด.....	32
ภาพที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนเตรท (nmol) กับค่าระยะทางของสี.....	34
ภาพที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนไตรท์ (nmol) กับค่าระยะทางของสี.....	36
ภาพที่ 17 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบวัดระยะทางของสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์.....	36
ภาพที่ 18 โครมาโตแกรมของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือ.....	42
ภาพที่ 19 โครมาโตแกรมของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืน	42
ภาพที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรท ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$) และปริมาณของไนเตรท (nmol).....	43

ภาพที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ฟิคของสารละลายมาตรฐานไนเตรท ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$) และปริมาณของไนเตรท (nmol).....	44
ภาพที่ 22 โคโรมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทที่ความเข้มข้น 200 μM และไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 100 μM	45
ภาพที่ 23 โคโรมาโตแกรมสารรบกวนผสมกับสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์.....	46
ภาพที่ 24 สารละลายมาตรฐานผสมไนไตรท์และไนไตรท์ผสมกับสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืน	46
ภาพที่ 25 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณไนเตรท (nmol) ในตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษและเครื่อง IC.....	51
ภาพที่ 26 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณไนไตรท์ (nmol) ในตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษและเครื่อง IC.....	51
ภาพที่ 29 ตัวอย่างที่ 1 ปืนพกอัตโนมัติ Sigsaver รุ่น P938 ขนาด 9mm Luger.....	82
ภาพที่ 30 ตัวอย่างที่2 ปืนพกรีโวลเวอร์ Smith & Wesson รุ่น 15-3 ขนาด .38 (Special).....	82
ภาพที่ 31 ตัวอย่างที่3 ปืนพกอัตโนมัติ Sigsaver รุ่น P320SP ขนาด 9mm Luger.....	83
ภาพที่ 32 ตัวอย่างที่4 ปืนพกอัตโนมัติ Glock รุ่น 19 ขนาด 9mm Luger	83
ภาพที่ 33 ตัวอย่างที่ 5 ปืนพกอัตโนมัติ CZ รุ่น 75 COMPACT ขนาด 9mm Luger.....	84
ภาพที่ 34 ตัวอย่างที่6 ปืนพกอัตโนมัติ Smith & Wesson รุ่น 5906TSW ขนาด 9mm Luger	84
ภาพที่ 35 ตัวอย่างที่7 ปืนพกรีโวลเวอร์ COLT รุ่น Detective special ขนาด .38 (Special).....	85
ภาพที่ 36 ตัวอย่างที่8 ปืนพกอัตโนมัติ Sigsaver รุ่น SP2022 ขนาด 9mm Luger.....	85
ภาพที่ 37 ตัวอย่างที่9 ปืนพกรีโวลเวอร์ Smith & Wesson รุ่น 51 ขนาด .22 Magnum	86
ภาพที่ 38 ตัวอย่างที่10 ปืนพกอัตโนมัติ Glock รุ่น 21 ขนาด .45 ACP	86
ภาพที่ 39 การยิงปืนเพื่อเก็บตัวอย่างเขม่าดินปืนบริเวณมือและปลอกกระสุน.....	87
ภาพที่ 40 เก็บตัวอย่างเขม่าดินปืนจากมือและปลอกกระสุน.....	87
ภาพที่ 41 เตรียมตัวอย่างเขม่าดินปืนเพื่อนำไปสกัด.....	88
ภาพที่ 42 โคโรมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ 0.01 μM และไนเตรท 0.005 μM	90
ภาพที่ 43 โคโรมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ 1 μM และไนเตรท 10 μM	90

[illegible]

ภาพที่ 68 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 10 บริเวณมือขวา	104
ภาพที่ 69 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 10 บริเวณมือซ้าย	104
ภาพที่ 70 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 1	105
ภาพที่ 71 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 2	105
ภาพที่ 72 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 3	106
ภาพที่ 73 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 4	106
ภาพที่ 74 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 5	107
ภาพที่ 75 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 6	107
ภาพที่ 76 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 7	108
ภาพที่ 77 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 8	108
ภาพที่ 78 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 9	109
ภาพที่ 79 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 10	109



บทที่ 1

บทนำ

1. ที่มาและความสำคัญ

สังคมไทยในปัจจุบันเกิดปัญหาทางอาชญากรรมเพิ่มทุกวันซึ่งจะเห็นได้จากรายงานไม่ว่าจะเป็นทางสื่อวิทยุ โทรทัศน์ หนังสือพิมพ์ และสื่อออนไลน์ต่างๆ จากการสำรวจ (Poll, 2560) เมื่อถามถึงความคิดเห็นของประชาชนเกี่ยวกับระดับความรุนแรงของปัญหาอาชญากรรมของสังคมไทยในปัจจุบันที่ปรากฏเป็นข่าวตามสื่อต่าง ๆ เช่น การฆาตกรรม การทะเลาะวิวาท การข่มขืน หรือกระทำความผิดทางเพศ การปล้นชิงทรัพย์ หรือก่อความไม่สงบในสามจังหวัดชายแดน พบว่าประชาชนส่วนใหญ่ ร้อยละ 52.32 ระบุว่า มีความรุนแรงมาก ช่วงโควิดระบาดแต่คดีอาญาไม่ได้ลดน้อยลง (ปฐนิมา, 2564) จากข้อมูลภาวะสังคมไทยของสภาพพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ อ้างอิงข้อมูลสำนักงานตำรวจแห่งชาติ สะท้อนให้เห็นคดีอาญาโดยรวม ในไตรมาส 3 ปี 2564 เพิ่มขึ้น 10.3% จากไตรมาสเดียวกันของปี 2563 คดียาเสพติดเพิ่มขึ้น 10.5% คิดเป็น 83.3% ของคดีอาญารวม โดยเฉพาะการเสพยาเสพติดมากที่สุด 52.3% และคดีประทุษร้ายต่อทรัพย์เพิ่มขึ้น 17.3% โดยคดีลักทรัพย์มากที่สุด 45.4% ไม่ว่าจะเป็นการกระทำต่อชีวิตและทรัพย์สินของผู้อื่นปัญหาความขัดแย้งของผลประโยชน์ ปัญหาทะเลาะวิวาท ปัญหายาเสพติด ซึ่งปัญหาเหล่านี้มันมีอาชญากรรมมาเกี่ยวข้อง ทำให้การตรวจวิเคราะห์เขม่าดินปืนจากมือผู้ต้องสงสัยและปลอกกระสุนปืนเพื่อมาใช้อยืนยันผู้กระทำผิดโดยใช้หลักการทางด้านนิติวิทยาศาสตร์มาช่วยในกระบวนการสืบสวนสอบสวนเนื่องจากพยานหลักฐานทางวิทยาศาสตร์เป็นสิ่งที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในกระบวนการยุติธรรมและสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาตัดสินในชั้นศาลได้

โดยปกติการยิงปืนมักจะพบเขม่าดินปืนที่ฟุ้งกระจายติดอยู่บริเวณมือและเสื้อผ้าของผู้ยิงซึ่งจะประกอบไปด้วยไอออนของธาตุไนโตรเจนและไนไตรท์เป็นหลักที่เป็นส่วนประกอบสำคัญในดินปืนซึ่งจะตรวจพบได้เมื่อเกิดจากการยิงปืนเท่านั้น ไอออนของไนโตรเจนและไนไตรท์เกิดจากการเผาไหม้ของเขม่าดินปืนทำให้สามารถใช้อยืนยันว่าบุคคลที่ตรวจพบปริมาณไนโตรเจนและไนไตรท์เป็นคนที่ยิงปืน ถึงแม้ว่าธาตุไนโตรเจนสามารถพบได้จากในปุ๋ยทำให้บุคคลที่ประกอบอาชีพเกษตรกรซึ่งต้องใช้ปุ๋ยในการทำไร่และสวนอาจมีปริมาณไนโตรเจนปะปนอยู่ด้วย ดังนั้นจึงต้องใช้การตรวจหาปริมาณไนไตรท์ควบคู่กับการตรวจสอบหาปริมาณไนโตรเจน เพราะไนไตรท์พบได้น้อยมากในธรรมชาติจึงสามารถนำมาใช้อยืนยันว่าหากตรวจพบปริมาณไนโตรเจนและไนไตรท์ในตัวบุคคลใด ผู้นั้นจึงมีความเกี่ยวข้องกับอาชญากรรม

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและไนไตรท์มีวิธีการหลายอย่างมากมาย สำหรับการตรวจวัดที่มีความไวและความแม่นยำสูง เช่น การตรวจวิเคราะห์ทางสเปกโตรโฟโตเมตรี

(Spectrophotometry) (García-Robledo et al., 2014; ภิญญดา อันสนั่น และคณะ 2556), สเปกโตรเมตรี (Spectrometry) , โครมาโทกราฟี (Chromatography) (Michalski & Kurzyca, 2006) และทางเคมีไฟฟ้า (Electrochemistry) (Tan et al., 2021) แต่วิธีเหล่านี้ต้องใช้ผู้ปฏิบัติการที่มีทักษะความชำนาญและใช้รีเอเจนต์ เวลา และตัวอย่างในการวิเคราะห์จำนวนมาก จึงมีการพัฒนาเทคนิคในการตรวจวัดที่ง่ายและราคาถูกเพื่อเอาชนะข้อเสียเหล่านี้ โดยในปีค.ศ. 2007 (Martinez et al., 2007) ได้มีแนวคิดไมโครฟลูอิดิกอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์ที่ใช้กระดาษ (Microfluidic paper-based analytical device, μ PAD) เป็นแพลตฟอร์มสำหรับการวิเคราะห์ทางชีวภาพแบบพกพา ราคาไม่แพง และใช้ปริมาณน้อยในการวิเคราะห์ อุปกรณ์ประเภทนี้ขึ้นอยู่กับเครื่องมือของพื้นที่สองส่วนที่แตกต่างกันคือพื้นที่ที่ขบบน้ำที่จัดเตรียมโดยกระดาษซึ่งเกิดปฏิกิริยา (Colorimetric) และพื้นที่ที่ไม่ขบบน้ำที่กำหนดเขตปฏิกิริยานี้ แนวทางการออกแบบที่พบบ่อยที่สุดคือการพิมพ์สีเนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและค่อนข้างรวดเร็วซึ่งเข้ากันได้กับแอปพลิเคชัน μ PAD ส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามวิธีการพิมพ์ประเภทนี้ต้องใช้สีที่มีราคาแพงและต้องเพิ่มขั้นตอนในการให้ความร้อน ความน่าสนใจของการใช้กระดาษเป็นเครื่องมือในการทำปฏิกิริยานั้นไม่เพียง แต่มีต้นทุนต่ำและความพร้อมใช้งานสูงของกระดาษเท่านั้น แต่ยังมีน้ำหนักเบาให้เลือกหลายความหนาและความพรุนง่ายต่อการจัดเก็บและขนส่งและความนิยมของ μ PADs เกิดจากข้อดีที่หลากหลายนั้นคือ พกพาสะดวก ราคาไม่แพง มีความรวดเร็ว ใช้แล้วทิ้งและหลังจากประกอบเสร็จแล้วไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนหรือบุคลากรเฉพาะทางในการวัดซึ่งทำให้เป็นเครื่องมือที่น่าสนใจที่จะใช้ในการวิเคราะห์ในสถานที่ในสถานที่ที่เข้าถึงยากหรือ มีทรัพยากรน้อยมาก ในปีค.ศ. 2014 (Bhakta et al., 2014) ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดของไหลจุลภาคแบบกระดาษหาปริมาณไนโตรเจนในน้ำลายโดยวิธี Griess assay ตรวจวัดโดยใช้เครื่องสแกนเนอร์และนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Adobe photoshop CS6 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณไนโตรเจนจากการอ่านค่าความเข้มสีจากสีม่วงแดงในโปรแกรม Adobe photoshop CS6 ซึ่งอ่านเป็นค่ารูปแบบ CMYK ในปีพ.ศ. 2560 (TIAWTRAGUL & Choosakoonkriang, 2562) ทำการสร้างอุปกรณ์ ตรวจวัดบนกระดาษและอาศัยปฏิกิริยา Griess ในการตรวจวัดปริมาณไนโตรเจนและไนเตรทในตัวอย่างเขม่าดินปืนและใช้โปรแกรม Image J เปลี่ยนเป็นค่าความเข้มสีปริมาณไนโตรเจนและไนเตรทในตัวอย่างเขม่าดินปืนที่เก็บตัวอย่างจากมือผู้ยิงและจากด้านในของปลอกกระสุนปืนที่ยิงแล้ว ในปีค.ศ. 2020 (Ferreira et al., 2020) ได้พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ที่ใช้กระดาษไมโครฟลูอิดิก 2 ชนิด (μ PAD) สำหรับการหาปริมาณของไนโตรเจนและไนเตรทของตัวอย่างน้ำลายของมนุษย์เพื่อช่วยในการวินิจฉัยโรคและสภาวะสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับไอออนเหล่านี้ การวัดไนโตรเจนได้ถูกเปรียบเทียบกับวิธีที่ได้จากวิธีการวัดสีและวิธีมาตรฐาน พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสองวิธีนี้

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้พัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษในการใช้วิเคราะห์หาปริมาณไนไตรท์และไนเตรทในตัวอย่าง GRS โดยอาศัยการตรวจวัดระยะทางการไหลของสีชมพูแดงที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา Griess (Giustarini et al., 2008) ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงตามความเข้มข้นของปริมาณไนเตรทหรือไนไตรท์

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาการทำอุปกรณ์แบบกระดาษพกพาเพื่อใช้ในการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์เชิงปริมาณและคุณภาพได้

เพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์แบบกระดาษพกพาไปในงานจริงได้

3. สมมติฐานและคำถามงานวิจัย

อุปกรณ์แบบกระดาษพกพาสามารถใช้งานในการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ได้มีประสิทธิภาพเทียบเท่าเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ผล

4. ขอบเขตของงานวิจัย

4.1 สร้างอุปกรณ์แบบกระดาษพกพาโดยการวัดระยะทางในการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์โดยการพิมพ์กระดาษด้วยสีผงรูปแบบต่างๆ

4.2 ศึกษาเพื่อหาปริมาณของรีเอเจนต์ Griess และสารมาตรฐานที่เหมาะสมที่ใช้กับอุปกรณ์แบบกระดาษพกพาในการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ที่มีประสิทธิภาพที่สุด

4.3 ศึกษาระยะทางของการทำปฏิกิริยาของการหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์เพื่อวัดระยะทาง

4.4 ศึกษาตัวรบกวนของปฏิกิริยาในการตรวจวัดปริมาณไนไตรท์และไนไตรท์

4.5 การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PAD) และวิธีวิเคราะห์แบบมาตรฐานด้วยเครื่อง Ion chromatography (IC)

4.6 การตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์จากมือและปัสสาวะสุ่นทั้ง 2 วิธีวิเคราะห์ (μ PAD & IC) และนำมาเปรียบเทียบกับผลการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของทั้ง 2 วิธี

5. นิยามคำศัพท์เฉพาะ

5.1 ปฏิกิริยา Griess assay เป็นการทดสอบทางเคมีเชิงวิเคราะห์ซึ่งตรวจจับการมีอยู่ของไฮดรอกซิลไนไตรท์ในสารละลาย ไนไตรท์ถูกตรวจพบและวิเคราะห์โดยการก่อตัวของสีชมพูแดงจากการบำบัดตัวอย่างที่มีไนไตรต์ด้วยรีเอเจนต์ Griess ซึ่งประกอบด้วยสององค์ประกอบในสารละลายที่เป็นกรด ได้แก่ อนุพันธ์ของอะนิลีนและสารเชื่อมต่อการเตรียมการโดยทั่วไปใช้ sulfanilamide และ N- (1-naphthyl) ethylenediamine Griess reagen ทางการค้าทั่วไปประกอบด้วย 0.2% N- (1-naphthyl) ethylenediamine dihydrochloride และ 2% sulfanilamide ใน 5% phosphoric acid โดย

diamine นี้ใช้แทน 1-naphthylamine ที่ง่ายกว่าและราคาถูกกว่าเนื่องจากสารชนิดนี้เป็นสารก่อมะเร็งที่มีศักยภาพและยิ่งไปกว่านั้น diamine ยังก่อตัวเป็นขี้วมมากกว่าและด้วยเหตุนี้สีข้อมที่ละลายน้ำได้มากกว่าในน้ำที่เป็นกรดอนุพันธ์ของอนิลีนอื่น ๆ ที่ถูกนำมาใช้ ได้แก่ sulfanilic acid, nitroaniline, and p-aminoacetophenone

ปฏิกิริยาโดยใช้น้ำยา Griess ทัวไป การทดสอบ Griess เกี่ยวข้องกับสองปฏิกิริยาที่ตามมาเมื่อเติมซัลฟานิลลาไมด์ในไตรต์ไอออนจะทำปฏิกิริยากับมันในปฏิกิริยา Griess diazotization เพื่อสร้างเกลือไดโซเนียมซึ่งจะทำปฏิกิริยากับ N-(1-naphthyl)ethylenediamine ในปฏิกิริยาการจับคู่ของ azo ทำให้เกิดสีข้อม pink-red azo

5.2 อุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์แบบกระดาษพกพา เป็นการสร้างช่องทางการไหลของของไหลบนกระดาษ โดยแบ่งเป็นส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) และชอบน้ำ (Hydrophilic)

6. ข้อจำกัดของงานวิจัย

6.1 ปริมาณขี้ผึ้งที่ใช้ในการแวกส์กรีนบนกระดาษกรองต้องมีปริมาณไม่เกิน 0.2000 g ไม่อย่างนั้นจะทำให้ไม่สามารถกั้นพื้นที่ชอบน้ำได้

6.2 กระดาษกรองที่ใช้ในงานวิจัยนี้ต้องใช้กระดาษกรอง กรอง Schleicher&Schüll Rundfilter 5893 Blue ribbon filter paper เนื่องจากกระดาษกรองชนิดนี้มีความเหมาะสมที่สุดในเรื่องของการดูดซับและระยะเวลาในการไหล

6.3 ระยะเวลาในการวัดระยะต้องวัดในช่วงเวลา 10-15 นาที ไม่อย่างนั้นระยะทางจิกความคลาดเคลื่อนสูง

6.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษในงานวิจัยนี้ไม่สามารถบรรจุรีเอเจนท์ไว้ก่อนในการตรวจวัดในวันอื่น เพราะรีเอเจนท์จะทำปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้เสื่อมสภาพ

7. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

อุปกรณ์แบบกระดาษพกพาสามารถใช้ในการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ได้จริงและสามารถไปใช้ในงานภาคสนามได้

บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การศึกษาในการพัฒนาอุปกรณ์แบบกระดาษพกพาชนิดวัดระยะทางในการตรวจวัดปริมาณไนไตรท์และไนไตรต์ ผู้วิจัยได้ศึกษาแนวคิด ทฤษฎี และวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1. อาวุธปืน (Firearms)
2. เขม่าดินปืน (Gunshot residue , GSR)
3. ไนเตรทและไนไตรท์ (Nitrate and Nitrites)
4. รีเอเจนท์ Griess (Griess reagent)
5. อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (Paper-base analytic device)
6. เทคนิค Ion chromatography (IC)
7. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1. อาวุธปืน

อาวุธปืนคือปืนประเภทใดก็ตามที่ออกแบบให้จ่ายต่อการพกพาและใช้งานโดยบุคคล คำนี้กำหนดไว้ตามกฎหมายเพิ่มเติมในประเทศต่างๆ อาวุธปืนชุดแรกมีต้นกำเนิดในจีนในคริสต์ศตวรรษที่ 10 เมื่อท่อไม้ไผ่ที่บรรจุดินปืนและกระสุนถูกปลายถูกติดตั้งบนหอกเพื่อทำหอกดับเพลิงแบบพกพา ที่ควบคุมได้โดยบุคคลเพียงคนเดียว ซึ่งต่อมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพเป็นอาวุธกระแทกในการล้อมโจมตี ของ De'an ในปี ค.ศ. 1132 ในศตวรรษที่ 13 ถึงดับเพลิงถูกแทนที่ด้วยท่อโลหะและเปลี่ยนเป็นปืนใหญ่แบบลำกล้องทำด้วยโลหะ เทคโนโลยีค่อยๆ แพร่กระจายไปทั่วยุโรปในช่วงศตวรรษที่ 14 อาวุธปืนรุ่นเก่ามักใช้ผงสีดำเป็นตัวขับเคลื่อน แต่ปืนสมัยใหม่ใช้ผงไร้ควันหรือสารขับเคลื่อนอื่นๆ อาวุธปืนสมัยใหม่ส่วนใหญ่ ยกเว้นปืนลูกซองสมูทบอร์ มีลำกล้องปืนยาวเพื่อให้หมุนไปยังโพรงเจ็ตไฟเพื่อเพิ่มเสถียรภาพในการบินอาวุธปืนสมัยใหม่สามารถอธิบายได้ด้วยขนาดลำกล้อง สำหรับปืนพกและปืนไรเฟิล จะมีหน่วยเป็นมิลลิเมตรหรือนิ้ว หรือในกรณีของปืนลูกซองตามขนาด นอกจากนี้ยังอธิบายตามประเภทของการกระทำที่ใช้ การจำแนกประเภทเพิ่มเติมอาจอ้างอิงถึงประเภทของลำกล้องปืนที่ใช้และความยาวลำกล้องปืน จนถึงกลไกการยิง, จนถึงจุดประสงค์หลักของการออกแบบหรือชื่อที่เป็นที่ยอมรับโดยทั่วไปสำหรับรูปแบบเฉพาะ และได้มีการแบ่งจำแนกประเภทของอาวุธปืน (Mizokami, 2022)

1.1 ประเภทของปืน (Type of Guns)

ปัจจุบันมีปืนหลายประเภทหมุนเวียนอยู่ แต่สามารถแบ่งออกเป็นสองประเภท ได้แก่ ปืนยาว ได้แก่ ปืนไรเฟิลและปืนลูกซอง และปืนพก รวมถึงปืนพกและปืนพก ตามกฎทั่วไป ปืนยาวจะ

ยิงกระสุนขนาดใหญ่จากลำกล้องปืนยาวและมีจุดมุ่งหมายเพื่อยิงจากไกล ปืนพกเป็นอาวุธลำกล้องเล็กกว่าที่มีลำกล้องปืนสั้นกว่า และมีไว้สำหรับการยิงด้วยมือเดียวหรือทั้งสองข้าง

1.1.1 Bolt-action rifles (ไรเฟิลลูกเลื่อน)

รูปแบบอาวุธปืนที่ง่ายที่สุดในปัจจุบัน คือ ไรเฟิลลูกเลื่อน ยังโดยการกดโบลต์ไปข้างหน้า เหนี่ยวไก ดึงโบลต์กลับเพื่อปลดคาร์ทริดจ์ (Cartridge) เปล่า และดันโบลต์ไปข้างหน้าอีกครั้งเพื่อบรรจุคาร์ทริดจ์ใหม่ เนื่องจากลักษณะการใช้งานของมันเอง ปืนโบลต์แอคชั่นจึงแม่นยำแต่ยิงได้ช้า ปืนไรเฟิลแอคชั่นโบลต์บรรจุกระสุนได้ถึงสิบนัดในนิตยสารภายในหรือแบบถอดได้ ตัวอย่างของปืนไรเฟิลลูกเลื่อนได้แก่ Remington 700 และ Howa 1500

1.1.2 Lever-action rifles (ไรเฟิลคานเหวี่ยง)

ปืนไรเฟิลเหล่านี้มีอายุย้อนไปถึงศตวรรษที่ 19 และมักพบเห็นในภาพยนตร์ตะวันตก การดึงคันโยกที่ติดอยู่กับปืนไรเฟิลบรรจุกระสุนใหม่ ผู้ใช้ดึงไกปืน และคันโยกอีกอันดึงคาร์ทริดจ์ (Cartridge) เปล่าออกมาแล้วบรรจุกระสุนใหม่ ตำแหน่งของคันโยกทำให้ยิงได้เร็วกว่าปืนไรเฟิลลูกเลื่อนมาก ตัวอย่างสมัยใหม่ ได้แก่ Winchester 94 และ Marlin 336

1.1.3 Semi-automatic rifles (ไรเฟิลกึ่งอัตโนมัติ)

อาวุธเหล่านี้อาจแตกต่างกันมาก แต่ลักษณะทั่วไปคือทุกการเหนี่ยวไกปืนจะปล่อยกระสุนหนึ่งนัด และการโหลดกระสุนใหม่เป็นไปโดยอัตโนมัติ ปืนเหล่านี้บางครั้งเรียกว่าอาวุธ "อัตโนมัติ" แต่ในกรณีนี้ คำนี้หมายถึงการโหลด ไม่ใช่การยิง กระบวนการบรรจุอัตโนมัติมักจะเกี่ยวข้องกับการรีไซเคิลก๊าซหรือโมเมนตัมของปืนดันบางส่วนแล้วใช้เพื่อขับเคลื่อนคาร์ทริดจ์ (Cartridge) เปล่าและบรรจุกระสุนใหม่ ปืนไรเฟิลกึ่งอัตโนมัติจำนวนมากมีนิตยสารภายนอกที่บรรจุกระสุนได้ 5 ถึง 30 นัด ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วเพื่อบรรจุอาวุธใหม่ ตัวอย่างของกึ่งอัตโนมัติ ได้แก่ ปืนไรเฟิล AR-15 และ Browning BAR

1.1.4 Shotguns (ปืนลูกซอง)

ปืนลูกซองเป็นปืนยาวลำกล้องใหญ่ที่ยิงเหล็กขนาดเล็กจำนวนมากหรือเม็ดตะกั่ว ("ช็อต") จำนวนมากด้วยการเหนี่ยวไกแต่ละครั้งแทนที่จะเป็นกระสุนนัดเดียว กระสุนพุ่งออกจากลำกล้องปืนในรูปแบบกรวยแคบๆ การแพร่กระจายนี้ช่วยผู้ยิงในการตีสัตว์เล็ก ๆ ในเกมโดยเฉพาะผู้ที่บิน เช่นเป็ด ขนาดของช็อตแตกต่างกันไป โดยช็อตนกที่มีขนาดเล็กกว่ามีโอกาสน้อยที่จะฆ่าหรือทำให้มนุษย์ไร้ความสามารถ ในขณะที่ช็อตที่ใหญ่กว่าจะมีประโยชน์มากกว่าสำหรับการป้องกันบ้าน ปืนลูกซองสามารถเป็นอาวุธแบบนัดเดียวได้ อาวุธสูบน้ำซึ่งห้องสูบน้ำหนึ่งห้องเป็นทรงกลม หรือกึ่งอัตโนมัติ ตัวอย่างของปืนลูกซอง ได้แก่ Mossberg 500 และ Remington 870

1.1.5 Revolvers (ปืนลูกโม่)

ปืนลูกโม่มักพบเห็นได้ในมือของทนายในโรงภาพยนตร์ โดยเป็นปืนพกหลายนัดชุดแรก โดยเก็บกระสุนได้มากถึงเจ็ดนัดในกระบอกหมุนที่จับคู่กับกระบอกปืนและกลไกการยิง (รวมถึงฟันการยิง) ในปืนพกลูกโม่สมัยใหม่ การดึงไกปืนเพียงครั้งเดียวจะทำให้กระบอกสูบเคลื่อนที่ไปยังคาร์ทริดจ์ใหม่ ดึงย้อนกลับ และปล่อยย้อนเพื่อโหลดไฟรเมอร์ด้วยหมุดยิง เพื่อยิงปืนพก ปืนพกสมัยใหม่ถือเป็นอาวุธกึ่งอัตโนมัติ ตัวอย่าง ได้แก่ Smith & Wesson Model 686 และ Ruger GP100

1.1.6 Pistols (ปืนพกกึ่งอัตโนมัติ)

ปืนพกคือปืนพกที่ไม่ใช้กระบอกหมุน แม้ว่าจะมีปืนพกแบบนัดเดียวอยู่บ้าง แต่ปืนพกส่วนใหญ่ในทุกวันนี้เป็นปืนพกแบบกึ่งอัตโนมัติที่บรรจุคาร์ทริดจ์จากนิตยสารที่ถอดออกได้ซึ่งอยู่ที่ด้ามจับ ซึ่งแตกต่างจากปืนพกลูกโม่ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะจำกัดไว้ไม่เกินหกหรือเจ็ดรอบ ปืนพกสมัยใหม่สามารถบรรจุกระสุนได้มากถึง 17 รอบในนิตยสารหนึ่งฉบับ ตัวอย่าง ได้แก่ Glock 17 และระบบปืนพกแบบโมดูลาร์ M17 ของกองทัพบก หรือที่เรียกว่า Sig P320

2. เชม่าดินปืน

เชม่าดินปืน (Gunshot Residue, GSR) ประกอบด้วยอนุภาคทั้งหมดที่ถูกขับออกจากปากกระบอกปืนหลังจากการปล่อยกระสุนปืนออกมา ประกอบด้วยอนุภาคที่ถูกเผาไหม้และไม่เผาไหม้จากตัวจุดชนวนท้ายกระสุนปืน (Explosive primer) ดินส่งกระสุนปืน (Propellant) และตะกั่วที่ระเหยกลายเป็นไอ (Vaporized lead) การยิงกระสุนทำให้เกิดปฏิกิริยาระเบิดที่รุนแรงมากซึ่งอยู่ภายในกระบอกปืน GSR จากกระสุนปืนมีความหมายครอบคลุมและอาจรวมถึงเศษโลหะจากปลอกกระสุนปืน ปลอกกระสุน ตลอดจนสิ่งสกปรกหรือสารตกค้างอื่น ๆ ที่อยู่ภายในลำกล้องปืนที่อาจหลุดออกมาได้ (Selin, 2013)

2.1 องค์ประกอบในเชม่าดินปืน

ธาตุหลักที่ใช้ระบุว่าเป็นองค์ประกอบของเชม่าดินปืน คือ ตะกั่ว (Pb), พลวง (Sb) และแบเรียม (Ba)

2.2 การตรวจเชม่าดินปืน

2.2.1 การตรวจเชม่าดินปืนที่มีมือ เพื่อระบุว่า บุคคลนั้นได้ยิงปืนมาหรือไม่ โดยการตรวจหาธาตุที่เป็นองค์ประกอบของเชม่าดินปืน คือ ตะกั่ว พลวง และแบเรียม เชม่าดินปืนจะติดอยู่บริเวณผิวหนังได้นานถึง 2 อาทิตย์แม้จะทำความสะอาดผิวหนังแล้วก็ตามแต่การตรวจหาเชม่าดินปืนบนผิวหนังศพ จะต้องเก็บตัวอย่างเชม่าบนผิวหนังศพภายใน 24 ชั่วโมง หลังการยิง

2.2.2 การตรวจหาสารไนเตรทและไนไตรท์เพื่อระบุว่า บริเวณที่ตรวจเชม่าดินปืน อยู่ห่างจากปากกระบอกปืนเป็นระยะเท่าใด ใช้ในการประเมินระยะยิง

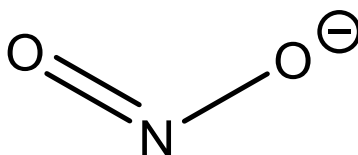
2.3 แหล่งกำเนิดเขม่าป็น

เขม่าดินปืน เป็นผลมาจากการทำงานของอาวุธปืนและเครื่องกระสุนปืนที่เกิดหลังจากได้เหนียวโกป็น โดยเข็มจุดชนวนจะเคลื่อนที่ไปเข้าไปชนกับชนวนที่อยู่บริเวณท้ายกระสุนปืนตรงบริเวณที่รังเพลิง ทำให้ชนวนท้ายกระสุนปืนเกิดการระเบิดเป็นเปลวไฟเพื่อใช้ในการจุดดินส่งกระสุนปืนให้เกิดการลุกไหม้ การระเบิดของชนวนท้ายกระสุนปืนและการเผาไหม้ของดินส่งกระสุนปืนเกิดขึ้นในช่วงอย่างรวดเร็วและมีพื้นที่ที่จำกัด ส่งผลให้อุณหภูมิและความดันเกิดเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน และเกิดความร้อนและให้ปริมาณแก๊สจำนวนมาก โดยแก๊สที่ได้จะขยายตัวกลายเป็นแรงระเบิดความดันสูงดันออก จึงทำให้ปลอกกระสุนปืนเกิดการขยายออกไปชนเข้ากับภายในผนังของรังเพลิง ส่งผลให้บริเวณปลายปลอกกระสุนปืนที่ยึดลูกกระสุนเกิดการคลายตัว แรงดันระเบิดทั้งหมดจึงมีทิศทางกระทำให้ทางด้านหน้าหรือบริเวณปลายของปลอกกระสุนปืน ขับให้ลูกกระสุนปืนวิ่งออกจากปลายปลอกกระสุนปืนผ่านทางปากลำกล้องปืน นอกจากนี้ แรงระเบิดยังขับเอากลุ่มแก๊สและไอ ที่เกิดจากการเผาไหม้ให้ผ่านออกมาทางปากลำกล้องปืน โดยพาเอาเขม่าป็นหรือส่วนที่ หลงเหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ออกมาพร้อมกันด้วย

3. ไนเตรทและไนไตรท์

3.1 ไนไตรท์ (NO_2^-)

ไนไตรท์เป็นสถานะออกซิเดชันระดับกลางระหว่างแอมโมเนียและไนเตรทและสามารถเกิดขึ้นได้จากการลดลงของไนเตรทภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจนไม่เพียงพอ ไนไตรท์ยังเป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) นิยมใช้ในรูปแบบของโซเดียมไนไตรท์ (sodium nitrite) และโพแทสเซียมไนไตรท์ (potassium nitrite) ไนไตรท์เกิดจากการที่เกลือของไนเตรทถูกรีดิวซ์ เช่น เกลือโซเดียมไนเตรทและโพแทสเซียมไนเตรท (ดินประสิว) E-number ของสารในกลุ่มไนเตรท (nitrates) ที่อนุญาตให้ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (food additive) ในกลุ่มสารกันเสีย (preservative)



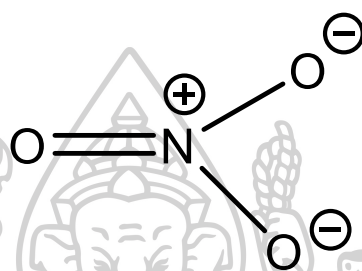
ภาพที่ 1 โครงสร้างของไนไตรท์ (NO_2^-)

3.2 ไนเตรท (NO_3^-)

ไนเตรท เป็นกลุ่มไอออนที่มีหลายอะตอม (Polyatomic ion) มีมวลโมเลกุลเท่ากับ 62.01 คอลตัน ไนเตรทเป็นสารที่สามารถพบได้โดยทั่วไปตามธรรมชาติเช่นในปุ๋ยหรือฝุ่นละอองใน

อากาศ นอกจากนั้นยังเป็นออกซิไดซ์เชิงเอเจนต์ (Oxidizing agent, สารเคมีที่รับอิเล็กตรอนที่อยู่ในรูปอิเล็กตรอนอิสระ) ที่ดีเมื่อผสมเข้ากับ ไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) หรือคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ไนเตรทสามารถทำให้ส่วนผสมเกิดเปลวไฟหรือระเบิดได้ตัวอย่างเช่น โปแทสเซียมไนเตรทเป็น Oxidizing agent ในดินปืน

ไนเตรตเป็นไนโตรเจนออกไซด์ (nitrogen oxoanion) ที่เกิดจากการสูญเสียโปรตอนจากกรดไนตริก ค่าความเป็นกรดเบสปกติอยู่ที่ pH 7.3



ภาพที่ 2 โครงสร้างของไนเตรท (NO_3^-)

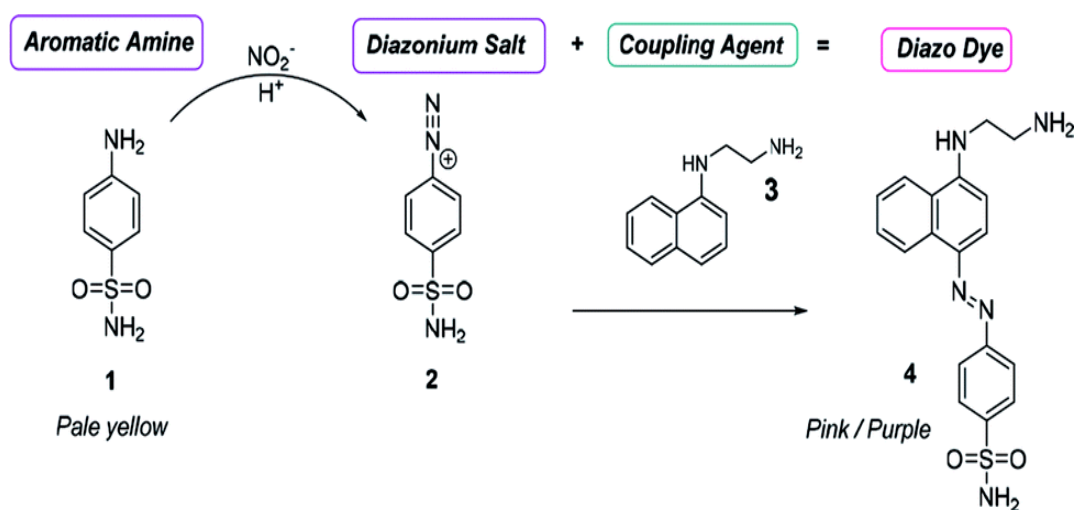
4. Griess reagent

วิธีการตรวจวิเคราะห์ไนเตรทและไนไตรท์ที่เป็นที่นิยมที่สุดและใช้บ่อยมากที่สุดจะอาศัยปฏิกิริยา Griess ที่ใช้ชื่อตามบุคคลที่ได้คิดค้นนั่นก็คือ Johann Peter Griess เป็นนักเคมีชาวเยอรมัน (Yates & Yates, 2016) ได้อธิบายเกี่ยวกับรายละเอียดการสังเคราะห์ azo dye “Diazobenzolamidonaphthol” โดยมีสารตั้งต้นเป็น diazobenzene และ naphthylamine และเพื่อเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของ azo dye จึงแทนที่ diazobenzene ด้วย diazobenzene sulfonic acidเตรียมได้จาก sulfanilic acid และต่อมาได้มีการนำไปใช้ตรวจพิสูจน์ร่องรอยของ nitrous acid โดยปฏิกิริยา Griess แบบดั้งเดิมนั้น เกิดจาก nitrite ทำปฏิกิริยากับ sulfanilic acid ภายใต้สภาวะกรด เพื่อสร้าง diazonium ion เพื่อไปจับคู่กับ α -naphthylamine กลายเป็น azo dye สีม่วงแดงที่สามารถละลายน้ำได้ โดยมีสูตรโมเลกุลของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเป็น $\text{C}_{16}\text{H}_{13}\text{N}_3\text{SO}_3$ และมีการนำปฏิกิริยา Griess ไปปรับเปลี่ยนเพื่อใช้กับการหาไนเตรทในปัสสาวะ

ปฏิกิริยา Griess แบบดั้งเดิม เป็นปฏิกิริยา diazotization ที่ใช้รีเอเจนต์เป็น sulfanilic acid และ α -naphthylamine เรียกว่า Griess รีเอเจนต์และอาจนำสารอนุพันธ์มาใช้โดยตัวที่โดดเด่นคือ sulfanilamide และ N-(1-naphthyl) ethylenediamine (NED หรือ NEDA) โดย sulfanilamide ทำ

ปฏิกิริยากับไนไตรท์ไอออนในสภาวะ กรด เกิดเป็น diazonium salt จากนั้นทำปฏิกิริยากับ NED เกิดเป็น azo compound ให้สีม่วงแดง

สำหรับไนไตรท์ไอออนต้องทำการรีดิวซ์ให้เป็นไนไตรท์ไอออนก่อน แล้วจึงตามด้วยปฏิกิริยา Griess วิธีการรีดิวซ์ไนไตรท์มีหลากหลายวิธีเช่น การใช้เอมไซม์ไนไตรรีดักเทส, NADPH, reducing metals (Zn, Cd, Cd/Cu column) และ VCl3 ซึ่งการใช้ reducing metals ถือว่าเป็นที่นิยมใช้กันมากกว่า



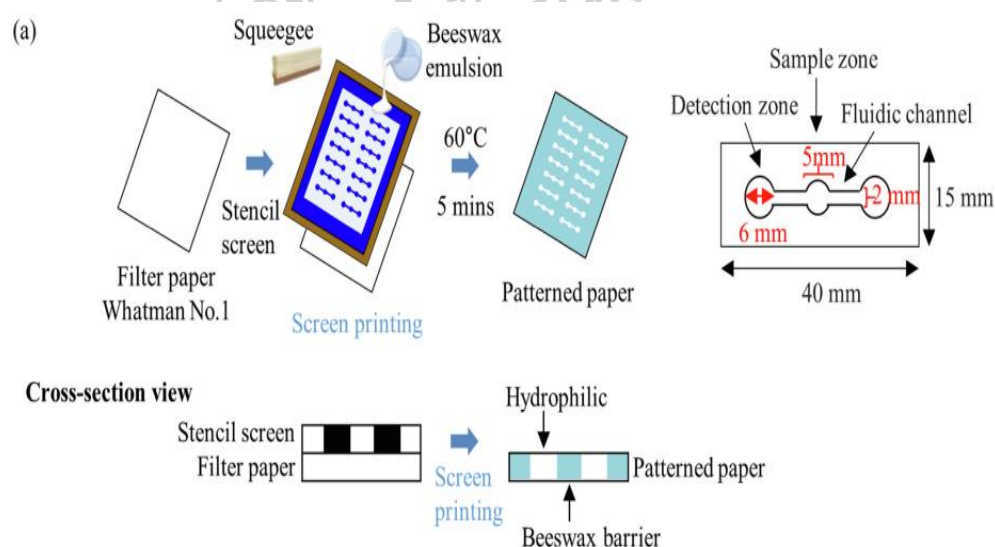
ภาพที่ 3 ปฏิกิริยา Griess

ที่มา: Evaluation of novel Griess-reagent candidates for nitrite sensing in aqueous media identified via molecular fingerprint searching. 2019; Available from: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2019/ra/c8ra07656a>

5. อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (Paper-base analytic device)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดรูปแบบใหม่ที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากซึ่งสามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์ทางด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพหรือทางการแพทย์ประกอบกับการวินิจฉัยโรคในตัวอย่างเซรัม เลือด ปัสสาวะ เป็นต้น รวมถึงการควบคุมคุณภาพอาหารการตรวจวัดทางด้านสิ่งแวดล้อมเช่น การปนเปื้อนของโลหะที่มีอยู่ในน้ำดื่ม ซึ่งอุปกรณ์ที่มีข้อดีหลายคือ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถพกพาได้ง่าย ราคาถูก วัสดุที่ใช้ที่การสร้างมีราคาต่ำและสามารถซื้อได้ง่ายตามร้านค้าทั่วไป สามารถใช้แล้วทิ้งได้ทันทีหลังจากการตรวจวัดโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการทำลายที่ต้องส่งไปในโรงงานทำลายขยะทางชีวภาพ

อุปกรณ์ประเภทนี้ขึ้นอยู่กับการทำงานของพื้นที่สองส่วนที่แตกต่างกัน คือพื้นที่ที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) ที่จัดเตรียมโดยกระดาษซึ่งเกิดปฏิกิริยา (Colorimetric) และพื้นที่ที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ที่กำหนดเขตปฏิกิริยานี้ แนวทางการออกแบบที่พบบ่อยที่สุดคือการพิมพ์ขี้ผึ้ง เนื่องจากเป็นวิธีที่ง่ายและค่อนข้างรวดเร็วซึ่งเข้ากันได้กับแอปพลิเคชัน μ PAD ส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตามวิธีการพิมพ์ประเภทนี้ต้องใช้ขี้ผึ้งที่มีราคาแพงและต้องเพิ่มขั้นตอนในการให้ความร้อน ความน่าสนใจของการใช้กระดาษเป็นเครื่องมือในการทำปฏิกิริยานั้นไม่เพียง แต่มีต้นทุนต่ำและความพร้อมใช้งานสูงของกระดาษเท่านั้น แต่ยังมีน้ำหนักเบาให้เลือกหลายความหนาและความพรุนง่ายต่อการจัดเก็บและขนส่งและความนิยมของ μ PADs เกิดจากข้อดีที่หลากหลายนั้นคือ พกพาสะดวก ราคาไม่แพง มีความรวดเร็ว ใช้แล้วทิ้งและหลังจากประกอบเสร็จแล้วไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนหรือบุคลากรเฉพาะทางในการวัดซึ่งทำให้เป็นเครื่องมือที่น่าสนใจที่จะใช้ในการวิเคราะห์ในสถานที่ในสถานที่ที่เข้าถึงยากหรือ มีทรัพยากรน้อยมาก

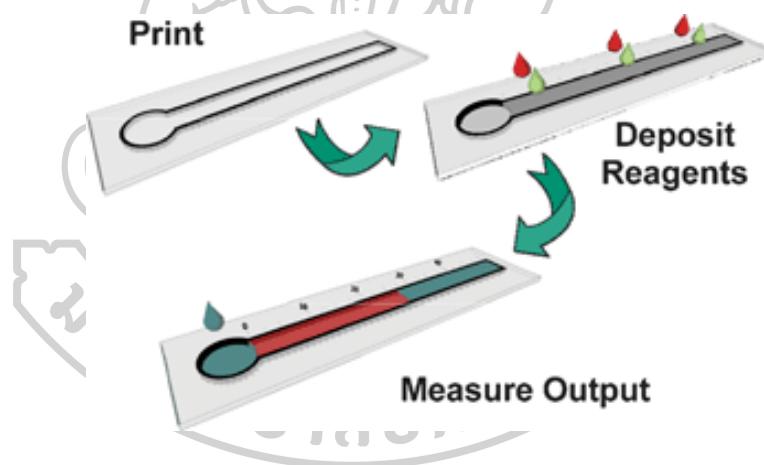


ภาพที่ 4 การสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ

ที่มา: An environmentally friendly microfluidic paper-based analytical device for simultaneous colorimetric detection of nitrite and nitrate in food products.2020;Available form: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2020.105412>

5.1 อุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดระยะทาง

อุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดระยะทางเป็นอุปกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยเครื่องสแกนในการถ่ายภาพ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในการบันทึกภาพ หรือขั้นตอนการประมวลผลรูปภาพเพื่อหาความเข้มสีในการคำนวณหาค่าความเข้มข้นของปริมาณสาร แต่เป็นการวัดระยะทางของสีที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นตามความเข้มข้นของสารที่ต้องการวิเคราะห์ อุปกรณ์นี้จึงถูกเรียกว่า อุปกรณ์การตรวจวัดกระดาษแบบการวัดระยะทาง (Cate et al., 2013) อุปกรณ์นี้สามารถสร้างจากการมีต้นแบบเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษทั่วไปได้ การพิมพ์สีผงหรือไขลงบนส่วนที่ไม่ชอบน้ำเพื่อสร้างเป็นช่องทางการไหลของสารละลาย จากนั้นทำการหยดรีเอเจนต์ที่สามารถทำปฏิกิริยากับตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ลงบนช่องทางการไหล จากนั้นหยดสารตัวอย่างลงบนช่องสำหรับตัวอย่าง (Sample zone) และสารตัวอย่างจะเคลื่อนที่ไหลไปทำปฏิกิริยากับรีเอเจนต์ช่องทางการไหล และไหลไปเรื่อยๆจนกว่าปฏิกิริยาจะสิ้นสุด ทำให้เกิดระยะทางสีของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นซึ่งจะแปรผันตามปริมาณของสารตัวอย่างที่วิเคราะห์ทำให้ง่ายต่อการตรวจวัด

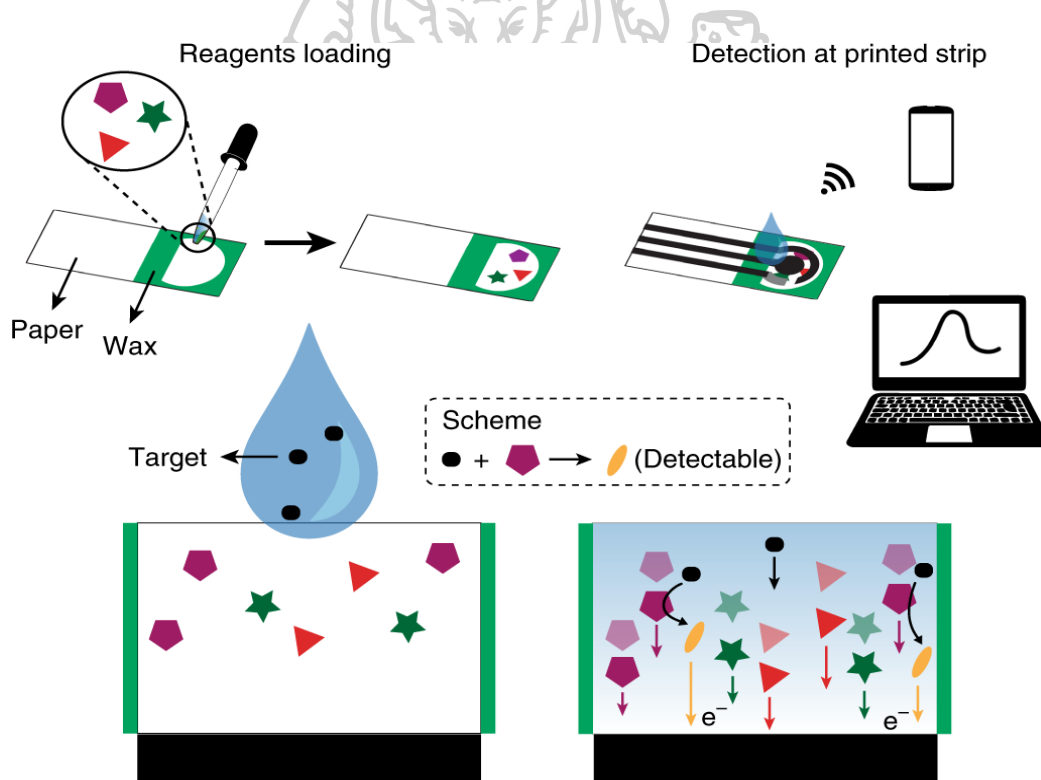


ภาพที่ 5 การออกแบบอุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดระยะทาง

ที่มา: Simple, distance-based measurement for paper analytical devices.2013. Available form;
[Simple, distance-based measurement for paper analytical devices - Lab on a Chip \(RSC Publishing\)](#)

5.2 อุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

ทศวรรษที่ผ่านมาได้มีการพัฒนา Electrochemical paper-based analytical devices (ePADs) ePAD (Ataide et al., 2020) จะแสดงขีดจำกัดในการตรวจวัดและความจำเพาะเจาะจง ซึ่งหลีกเลี่ยงอคติของการสังเกตด้วยตามนุษย์โดยไม่เพิ่มต้นทุนอุปกรณ์ และรักษาความสามารถในการย่อขนาดและใช้งานภาคสนาม ในช่วงเวลานี้ มีการใช้วิธีการที่ชาญฉลาดต่างๆ เพื่อสร้าง ePAD สำหรับปัญหาด้านการวิเคราะห์มากมาย เช่น ในการใช้งานทางคลินิกและทางนิติเวช ดังนั้นเราจึงตรวจสอบขั้นตอนการผลิตของ ePAD เหล่านี้ ตั้งแต่รายงานเบื้องต้นไปจนถึงขั้นตอนที่ใช้ในการกำหนดรูปแบบขอบเขตทางกายภาพ/เคมี (Physics/Chemical, non-conductive patterns) และรอยทางสื่อกระแสไฟฟ้า (electrodes) บนพื้นผิวกระดาษโดยการวัดค่าการเปลี่ยนแปลงทางไฟฟ้าโดยอาศัยเทคนิคทาง Electrochemical



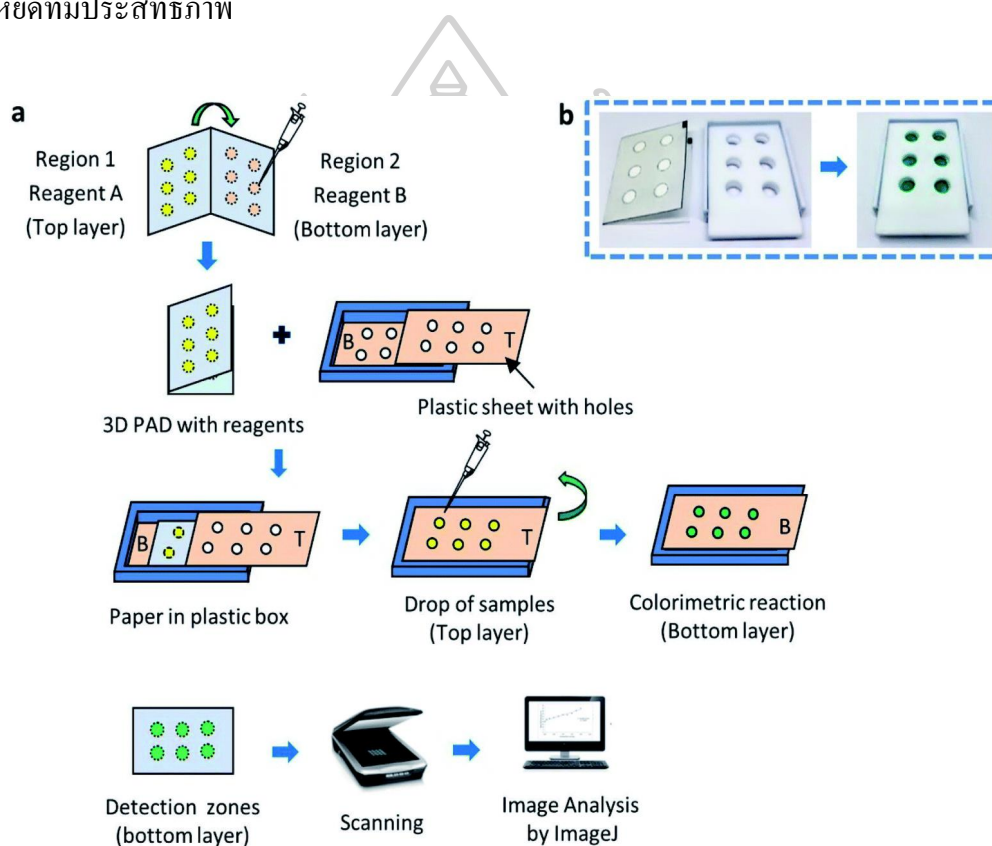
ภาพที่ 6 อุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า

ที่มา: Preparation of paper-based devices for reagentless electrochemical (bio)sensor strips .

Available form; <https://www.nature.com/articles/s41596-019-0186-y>

5.3 อุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดสี

อุปกรณ์วิเคราะห์แบบใช้กระดาษ (PAD) ที่ใช้การตรวจจับสี (Thongkam et al., 2020) และ ภาพบนสมาร์ทโฟนได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางในแอปพลิเคชันการวัดที่หลากหลาย PADs มี ขึ้นเพื่อใช้ในการตั้งค่าภาคสนามเป็นหลัก โดยที่สภาพการทดสอบและการสร้างภาพจะแตกต่างกัน อย่างมาก ส่งผลให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำน้อยลง สำหรับความสามารถในการทำนายความเข้มข้นของ การวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ การผสมผสานแบบจำลองและสเปซสีที่เหมาะสมจะเป็นประโยชน์ใน การวิเคราะห์ตัวอย่างจำนวนมากบน PAD ในฐานะเครื่องมือทดสอบภาคสนามอย่างรวดเร็วราคา ประหยัดที่มีประสิทธิภาพ



ภาพที่ 7 อุปกรณ์การตรวจกระดาษพกพาโดยอาศัยการวัดสี

ที่มา: A simple paper-based analytical device using UV resin screen-printing for the determination of ammonium in soil. Available form;

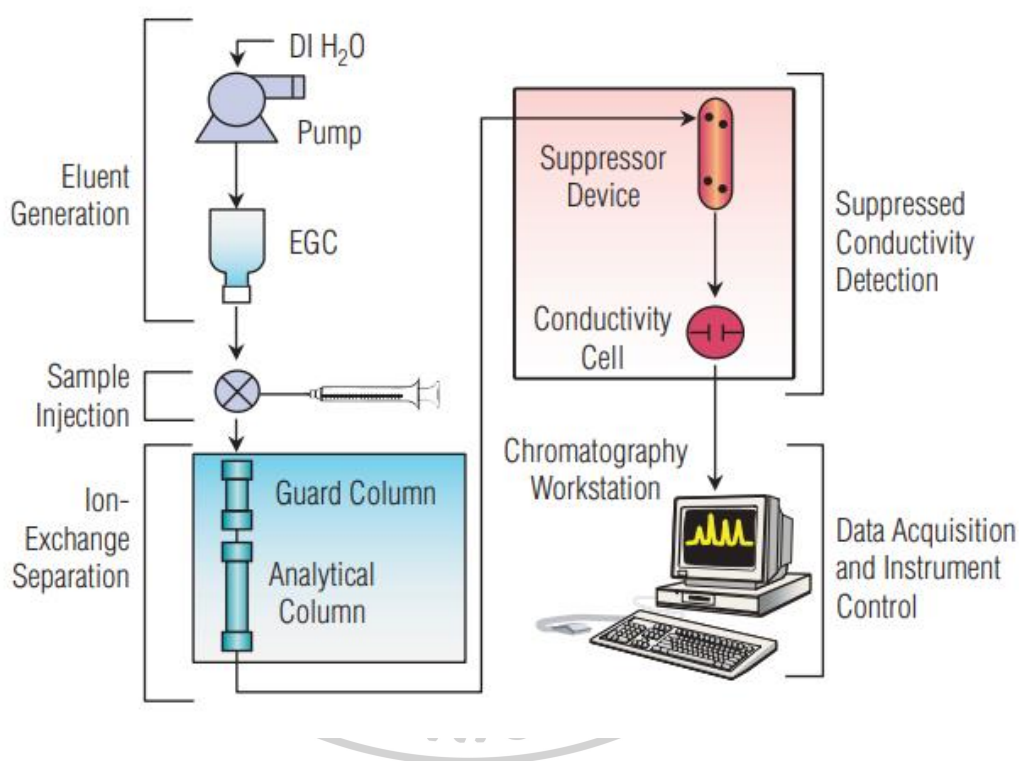
<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ay/d0ay01180k/unauth>

6. เทคนิค Ion chromatography

Ion Chromatography (IC) เป็นเครื่องมือที่ใช้แยกและการวิเคราะห์เชิงปริมาณของไอออนลบ (Anion) อาทิ F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^{2-} และ SO_4^{2-} และ ไอออนบวก (Cation) อาทิ Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ ในสารละลายไอออนิกโดยใช้วิธีแลกเปลี่ยนไอออนของ liquid chromatography (LC) กระบวนการโครมาโตกราฟีแยกไอออนต่างๆ ภายในตัวอย่าง เทคนิคการทำงานของเครื่อง IC อาศัยการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange) โดยสารละลายตัวอย่างจะถูกฉีดเข้าเครื่องและถูกส่งผ่านโดยสารละลายไอออนิกหรือตัวชะสารละลาย (mobile phase) และสมบัติของสารที่อยู่ภายในคอลัมน์ (Stationary phase) สามารถจับกับไอออนของสารที่มีประจุตรงกันข้ามด้วยอาศัยการทำปฏิกิริยาคิดเหนี่ยวระหว่างประจุที่แตกต่างกัน (Ionic interaction) สารที่ไม่มีประจุหรือมีประจุเหมือนกับสารที่เป็นตัวแลกเปลี่ยนประจุที่อยู่ภายในคอลัมน์ (Ion-exchanger) จะเคลื่อนที่ออกมาก่อน ส่วนสารที่ถูกยึดเหนี่ยวอยู่ภายในคอลัมน์ จะถูกชะออกมาเมื่อมีการเปลี่ยนสภาวะของค่า pH หรือ ถูกแทนที่ด้วยไอออนที่มีความแรงมากกว่า (Ionic strength) การวิเคราะห์หาปริมาณของไอออนทั้งประจุบวก หรือ ประจุลบ โดยใช้ เครื่อง IC นั้น ต้องพิจารณาถึงการเลือกสารที่ชะละลาย (Eluent) ประเภทของคอลัมน์ (Column) อุปกรณ์สำหรับแยกชนิดประจุ (Suppressor) และ อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (Detector) ให้เหมาะสม ดังนั้น (Morsi, 2013) ไอออนของสารเคมีบางชนิดในสารละลายจะออกจากคอลัมน์หรือชะออกจากคอลัมน์ภายในช่วงระยะเวลาแคบๆ ที่เฉพาะเจาะจงสำหรับไอออนนั้น เครื่องตรวจจับที่ส่วนท้ายของคอลัมน์จะวัดค่าการนำไฟฟ้าของตัวชะอย่างต่อเนื่องเพื่อกำหนดปริมาณของไอออนที่ชะตามฟังก์ชันของเวลา ข้อมูลจากเครื่องตรวจจับถูกรวบรวมเป็นพล็อตของปริมาณไอออนเทียบกับเวลา ซึ่งเรียกว่าโครมาโตแกรม ตำแหน่งของพีคในโครมาโตแกรมเป็นลักษณะของไอออนจำเพาะ ขนาดพีคเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของไอออนที่แสดงโดยพีคนั้นหลักเกณฑ์พื้นฐานของ IC เป็นเทคนิคทางเคมีวิเคราะห์ที่มีความก้าวหน้าในการวิเคราะห์ ไอออนและเป็นเทคนิคที่มีการนำไปประยุกต์ใช้มากที่สุดวิธีหนึ่งสำหรับการแยก (separation) และการหาปริมาณ ของไอออนที่ถูกละลายเป็นเทคนิคที่มีความสามารถที่ดีในการแก้ปัญหาการหาปริมาณของสารใน สารละลายโดยพิจารณาจากปัจจัยต่อไปนี้

1. ต้องการ sensitivity สูง
2. ต้องการหาปริมาณของไอออนหลายๆอย่างในสารละลายชนิดเดียวกัน
3. สารละลายตัวอย่างมีตัวแทรกสอดจากเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์
4. เป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะ (specificity) ในการวิเคราะห์

เทคนิคนี้จัดอยู่ในประเภท liquid-solid chromatography นั่นคือมีคอลัมน์เป็นวัสดุของแข็งสำหรับ แยกเป็นเฟสอยู่กับที่ (stationary phase) และของเหลวเคลื่อนที่สำหรับชะสาร (eluent) ที่อยู่ในคอลัมน์เป็น เฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) เมื่อสารตัวอย่างถูกฉีดเข้าระบบจะถูกพาไปยังคอลัมน์ โดย eluent และเกิดการ แยกที่คอลัมน์หลังจากนั้นเข้าสู่ตัวตรวจวัดสัญญาณ (detector) และให้สัญญาณออกมาจากกระบวนการแยกเป็น chromatogram ของสารตัวอย่าง โดยแสดงแผนผังส่วนประกอบอย่างง่ายของ IC



ภาพที่ 8 เทคนิค Ion chromatography

ที่มา: Thermo Scientific Dionex eluent suppressors for ion chromatography . Available form;

<https://tools.thermofisher.com/content/sfs/brochures/PS-70690-IC-Eluent-Suppressors-PS70690-EN.pdf>

6.1 ส่วนประกอบของเครื่อง Ion Chromatography (IC)

6.1.1 ปั๊ม (Pump)

ปั๊ม IC ถือเป็นหนึ่งในส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดในระบบ ซึ่งจะต้องให้การไหลคงที่อย่างต่อเนื่องของตัวชะผ่านหัวฉีด คอลัมน์ และตัวตรวจจับของ IC ระบบที่ใช้งานได้จริงที่สุดสำหรับการส่งมอบเฟสเคลื่อนที่คือระบบที่สามารถรวมของเหลวหลายชนิดในสัดส่วนที่แตกต่างกันตามคำสั่งของผู้ปฏิบัติงาน ความสามารถในการผสมนี้ช่วยเร่งกระบวนการเลือกส่วนผสมตัวชะที่เหมาะสมที่สุดที่จำเป็นสำหรับการวิเคราะห์ไอโซเครติก มีชุดของอ่างเก็บสารละลายเฟสเคลื่อนที่ที่สามารถมีช่วงของเฟสเคลื่อนที่ต่างๆ ที่สามารถนำมาใช้เป็นรายบุคคล แบบผสม หรือเพื่อวัตถุประสงค์ในการเขียนโปรแกรมเฟสเคลื่อนที่ "Gradient elution" โดยทั่วไปโครมาโตกราฟีเหลวทั่วไป แหล่งกักเก็บสามารถเป็น stainless steel แต่ในโครมาโตกราฟีแบบไอออน ซึ่งเฟสเคลื่อนที่สามารถมีค่า pH ที่รุนแรง แหล่งกักเก็บต้องทำจากแก้วหรืออย่างพึงประสงค์เป็นพลาสติกที่เหมาะสม เช่น PEEK (polyether-ether-ketone)

6.1.2 หัวฉีดสาร (Injectors)

ในโครมาโตกราฟีของเหลว ตัวอย่างของเหลวอาจถูกฉีดโดยตรงและตัวอย่างที่เป็นของแข็งจำเป็นต้องละลายในตัวทำละลายที่เหมาะสมเท่านั้น ตัวทำละลายไม่จำเป็นต้องเป็นเฟสเคลื่อนที่ แต่บ่อยครั้งจะเลือกอย่างระมัดระวังเพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนของเครื่องตรวจจับ การรบกวนของคอลัมน์/ส่วนประกอบ หรือการสูญเสียประสิทธิภาพ เป็นการดีที่สุดที่จะกำจัดอนุภาคออกจากตัวอย่างโดยการกรองหรือหมุนเหวี่ยง เนื่องจากการฉีดวัสดุที่เป็นอนุภาคอย่างต่อเนื่องจะทำให้อุปกรณ์หรือคอลัมน์ของการฉีดอุดตันในที่สุด หัวฉีดควรให้ความเป็นไปได้ในการฉีดตัวอย่างของเหลวภายในช่วงปริมาตร 0.1 ถึง 100 ml โดยมีความสามารถในการทำซ้ำสูงและอยู่ภายใต้แรงดันสูง ควรสร้างกรวยแยกกว้างขึ้นต่ำ

6.1.3 คอลัมน์ (Columns)

หลักการของโครมาโตกราฟีแบบแลกเปลี่ยนไอออนคือ โมเลกุลที่มีประจุจับกันไฟฟ้าสถิตกับหมู่ที่มีประจุตรงข้ามซึ่งถูกจับอย่างโควาเลนต์บนเมทริกซ์ โครมาโตกราฟีแบบแลกเปลี่ยนไอออนเป็นชนิดของโครมาโตกราฟีแบบดูดซับ ดังนั้นโมเลกุลที่มีประจุจะดูดซับไปยังตัวแลกเปลี่ยนไอออนแบบย้อนกลับได้ ดังนั้นโมเลกุลสามารถถูกผูกไว้หรือถูกชะออกโดยการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมที่เป็นไอออน ตัวแลกเปลี่ยนไอออนสามารถใช้ในโครมาโตกราฟีแบบคอลัมน์เพื่อแยกโมเลกุลตามประจุ

การแยกสารบนตัวแลกเปลี่ยนไอออนมักจะทำได้ในสองขั้นตอน ขั้นแรกสารที่จะแยกออกจะถูกจับกับตัวแลกเปลี่ยนโดยใช้สภาวะที่ทำให้การยึดเกาะที่มั่นคงและแน่นหนา จากนั้นคอลัมน์จะ

ถูกชะด้วยบัฟเฟอร์ที่มีค่า pH ความแรงของไอออนิกหรือองค์ประกอบต่างกัน และส่วนประกอบของบัฟเฟอร์จะแข่งขันกับวัสดุที่ยึดไว้สำหรับตำแหน่งการจับ การเลือกเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนจะเป็นประจุลบหรือประจุบวกขึ้นอยู่กับวัสดุที่จะแยกออก หากวัสดุที่จะผูกติดกับเสามีประจุเพียงครั้งเดียว

6.1.4 อุปกรณ์ช่วยขยายสัญญาณ การตรวจวัดสารตัวอย่างและสัญญาณรบกวน (Suppressor)

ตัวต้านจะลดค่าการนำไฟฟ้าในพื้นที่หลังของสารเคมีที่ใช้ในการชะตัวอย่างจากคอลัมน์แลกเปลี่ยนไอออน ซึ่งช่วยปรับปรุงการวัดค่าการนำไฟฟ้าของไอออนที่กำลังทดสอบ Suppressor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เมมเบรนซึ่งออกแบบมาเพื่อเปลี่ยนตัวชะไอออนิกให้เป็นน้ำเพื่อเพิ่มความไวสามารถใช้กับเครื่องตรวจจับสากลเพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์แยกเกลือออกจากกัน ซึ่งจะช่วยขจัดสัญญาณรบกวนที่เกิดจากเกลือไอออนิกในตัวชะ โดยปกติแล้ว Suppressors จะใช้กับตัวชะที่เป็นน้ำล้วนๆ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำหนดว่าตัวต้านเหล่านี้สามารถใช้กับตัวชะที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบอินทรีย์ (Aqueous/Organic eluents) ที่จำเป็นในการชะสารวิเคราะห์ที่เป็นอินทรีย์ซึ่งถูกคงไว้บนเฟสที่อยู่กับที่ระหว่างการทำงานร่วมกันของพวกมันหรือไม่ สารชะที่ใช้การไล่ระดับไอออนิกและที่มีตัวทำละลายอินทรีย์สามารถระงับได้อย่างน่าพอใจโดยใช้ micromembrane suppressor หรือ electrolytic suppression ซึ่งใช้ self-regenerating suppressor

6.1.5 เครื่องตรวจวัด (Detectors)

เครื่องตรวจวัดปัจจุบันมีช่วงไดนามิกกว้างโดยปกติช่วยให้ทั้งเครื่องซึ่งวิเคราะห์และเครื่องซึ่งเตรียมการทำงานในเครื่องมือเดียวกัน เครื่องตรวจวัดในอุดมคติควรมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ ความเบี่ยงเบนต่ำและระดับเสียงรบกวน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำคัญอย่างยิ่งในการวิเคราะห์ร่องรอย ความไวสูง การตอบสนองที่รวดเร็ว ช่วงไดนามิกเชิงเส้นกว้าง ปริมาตรที่ต่ำ (minimal peak broadening) การออกแบบเซลล์ที่กำจัดการผสมซ้ำของการแยก แลกเปลี่ยนความถี่ ไม่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงประเภทของตัวทำละลาย อัตราการไหลและอุณหภูมิ ความเรียบง่ายในการทำงานและความน่าเชื่อถือ มันควรจะไม่ทำลาย

6.1.6 ระบบข้อมูล (Data systems)

เป้าหมายหลักในการใช้ระบบข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์คือการเพิ่มความแม่นยำและความแม่นยำในการวิเคราะห์ ในขณะเดียวกันก็ลดความสนใจของผู้ปฏิบัติงาน ในการวิเคราะห์ตามปกติซึ่งไม่จำเป็นต้องใช้ระบบอัตโนมัติ ผู้รวมระบบการคำนวณที่ตั้งโปรแกรมไว้ล่วงหน้าอาจเพียงพอสำหรับระดับการควบคุมที่สูงขึ้น จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ชาญฉลาดมากขึ้น เช่น สถานีข้อมูลหรือมินิคอมพิวเตอร์

7. วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ปวีณา เดือนฉาย (ปวีณา เดือนฉาย, 2557) ผู้วิจัยทำการสร้างอุปกรณ์การวิเคราะห์บนกระดาษโดยเตรียมได้หลากหลายเทคนิคเช่น การพิมพ์ด้วยสีผงเป็นต้น และสร้างช่องไหลจุลภาคบนกระดาษ ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่ไม่ชอบน้ำ และส่วนที่ชอบน้ำซึ่งก็คือกระดาษ และการวิเคราะห์ผลทำได้หลากหลายวิธีเช่น การตรวจโดยการเทียบสีการตรวจหาด้วยวิธีทางเคมีไฟฟ้า เป็นต้น อุปกรณ์การวิเคราะห์ด้วยกระดาษนั้นมีข้อดีคือผลิตง่าย ต้นทุนในการผลิตต่ำ พกพาสะดวก แต่ก็ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการสูญเสียสารตัวอย่าง ได้มากถึง 50% จากการระเหยและค่าผิดพลาดจากการวัดในการตรวจวัดสูงจึงไม่สามารถตรวจวัดสารที่ปริมาณต่ำได้

Samir A. Bhakta และคณะ (Bhakta et al., 2014) ได้ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดของไหลจุลภาคแบบกระดาษหาปริมาณไนไตรท์ในน้ำลายโดยวิธี Griess assay ตรวจวัดโดยใช้เครื่องสแกนเนอร์และนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Adobe photoshop CS6 และนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณไนไตรท์จากการอ่านค่าความเข้มสีจากสีม่วงแดงในโปรแกรม Adobe photoshop CS6 ซึ่งอ่านเป็นค่ารูปแบบ CMYK

Francisca T.S.M. Ferreira และคณะ (Ferreira et al., 2020) ได้พัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ที่ใช้กระดาษไมโครฟลูอิดิกสองชนิด (μ PAD) สำหรับการหาปริมาณของไนไตรท์และไนเตรทของตัวอย่างน้ำลายของมนุษย์เพื่อช่วยในการวินิจฉัยโรคและสภาวะสุขภาพที่เกี่ยวข้องกับไอออนเหล่านี้ การประเมินการรับกวนและการศึกษาความเสถียร μ PAD เหล่านี้อนุญาตให้มีการตรวจวัดไนไตรต์ในช่วง 5–250 μ M โดยมีขีดจำกัดของการตรวจจับและปริมาณ 0.05 μ M และ 0.17 μ M ตามลำดับและการกำหนดไนเตรตในช่วง 0.2–1.2 mM โดยมีขีดจำกัดของการตรวจจับและปริมาณ 0.08 mM และ 0.27 mM ตามลำดับ สำหรับความเสถียร μ PAD ทั้งสองมีความเสถียรเมื่อเก็บไว้ในสุญญากาศที่ 4 °C (ไนไตรท์ μ PAD เป็นเวลาอย่างน้อย 60 วันและ ไนเตรท μ PAD เป็นเวลาอย่างน้อย 14 วัน) และหลังจากการจัดวางตัวอย่างไนไตรท์และไนเตรท μ PAD สามารถสแกนได้ภายใน 4 และ 2 ชั่วโมงแรกตามลำดับ การวัดไนไตรท์ μ PAD ถูกเปรียบเทียบกับการวัดที่ได้จากวิธีการวัดสีมาตรฐานและไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างสองวิธีนี้ เพื่อประเมินความแม่นยำของการวัดไนเตรต μ PAD ใช้ตัวอย่างน้ำที่ผ่านการรับรอง 4 ตัวอย่างและทำการศึกษาโดยใช้ตัวอย่างน้ำลาย

Thinikan Thongkam และคณะ (Thongkam et al., 2020) ได้ทำการศึกษาเพื่อพัฒนาอุปกรณ์วิเคราะห์ที่ใช้กระดาษไมโครฟลูอิดิก (PAD) ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมซึ่งใช้สีผงเป็นวัสดุที่ไม่ชอบน้ำใหม่สำหรับการตรวจวัดไนไตรท์และไนเตรทในผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมกัน การพิมพ์สกรีนใช้เพื่อใช้อิมัลชันสีผงกับกระดาษกรองเพื่อสร้างสิ่งช่องทางที่ไม่ชอบน้ำที่ซึมผ่านส่วนต่างๆของ

กระดาษและการกำหนดพื้นที่ที่ชอบน้ำ μ PAD นี้ประดิษฐ์ได้ง่ายและรวดเร็วอีกทั้งความสามารถในการทำซ้ำและความเสถียรของอุปกรณ์ก็สูงเช่นกัน ฟังก์ชันการทำงานของ μ PAD ใหม่ได้รับการปรับให้เหมาะสมสำหรับการกำหนดค่าของไนไตรท์และไนเตรทในผลิตภัณฑ์อาหารพร้อมกัน อุปกรณ์ที่เสร็จสมบูรณ์สามารถตรวจสอบได้ทั้งไนไตรท์และไนเตรท โดยมีขีดจำกัดการตรวจวัดตามลำดับที่ 0.1 และ 0.4 mg.L⁻¹ ค่า RSD ตามลำดับสำหรับไนไตรท์และไนเตรทคือ 1.8-2.9 % และ 1.2-2.2 % (ความแม่นยำระหว่างวัน) และ 2.1-3.1 และ 1.5-2.2 % (ความแม่นยำภายในวัน) μ PAD ได้รับการทดสอบเพื่อหาค่าไนไตรท์และไนเตรทในผลิตภัณฑ์อาหารต่างๆและเมื่อนำผลมาเปรียบเทียบกับผลสเปกโตรโฟโตเมตริกโดยใช้ T-Test two pair พบว่าทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %

Cromartie และคณะ (Cromartie et al., 2019) ได้สร้างอุปกรณ์ไมโครฟลูอิดิกแบบกระดาษที่สามารถทำการทดสอบเบื้องต้นได้หลายรูปแบบสำหรับการแสดงออกของของเหลวชีวภาพในสถานที่เกิดเหตุ อุปกรณ์เป็นแบบ มัลติเพล็กซ์ทำให้สามารถตรวจหาได้ ทั้งเลือด น้ำลาย น้ำอสุจิ และปัสสาวะได้พร้อมกัน อุปกรณ์พกพาใช้ ชุดช่องทางที่ชอบน้ำ (Hydrophilic channels) ที่สร้างด้วยจีฟังก์บนกระดาษโครมาโตกราฟี โดยที่ปลายทางของแต่ละช่องจะมีรีเอเจนต์ที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสี (Colorimetric reagents) ที่ตรึงไว้บนกระดาษทำให้สามารถอ่านค่าได้ด้วยตาเปล่าหรือตรวจพบได้จากกล้องโทรศัพท์มือถือ อุปกรณ์พกพาช่วยให้ สามารถคัดกรองของเหลวในร่างกาย 4 ชนิด



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการ

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

- 1.1 บล็อกสกรีน
- 1.2 ไมโครปิเปต
- 1.3 กระดาษกรอง Schleicher&Schüll Rundfilter 589³ Blue ribbon filter paper
- 1.4 เครื่องให้ความร้อน (Heater)
- 1.5 ขี้ผึ้ง
- 1.6 เทปใส
- 1.7 Nylon membrane filter ขนาด 0.45 μm
- 1.8 เครื่องแก้ว
- 1.9 ไม้พันสำลี
- 1.10 ถุงพลาสติกซิปล็อก
- 1.11 เครื่อง Ultrasonic water bath ยี่ห้อ CREST
- 1.12 กระบอกฉีดสารละลาย
- 1.13 ขวดใส่สารละลาย (Vial)
- 1.14 เครื่องชั่งสาร
- 1.15 เครื่อง Ion chromatograph (IC) รุ่น DIONEX ICS-1000

2. สารเคมี

- 2.1 Potassium nitrate (KNO_3)
- 2.2 Sodium nitrite (NaNO_2)
- 2.3 ขี้ผึ้ง (Beewaxes)
- 2.4 Sulfanilamide
- 2.5 N-(-Naphthyl)-ethylenediamine.2HCL (NED)
- 2.6 Critic acid
- 2.7 Zn suspension
- 2.8 Interference Sodium chlorine (NaCl)
- 2.9 Interference Potassium sulfate (K_2SO_4)
- 2.10 Interference Potassium dihydrogen phosphate (KH_2PO_4)

3. การเตรียมสารละลาย

3.1 สารละลายไนเตรท 50 mM

ชั่ง KNO_3 มา 0.2525 g ละลายในน้ำปราศจากไอออนปรับปริมาตรเป็น 50 ml และนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 10-400 μM และ 10-50 mM เพื่อนำสร้างกราฟสารมาตรฐานของทั้ง 2 วิธี

3.2 สารละลายไนไตรท์ 10 mM

ชั่ง NaNO_2 มา 0.0690 g ละลายในน้ำปราศจากไอออนปรับปริมาตรเป็น 100 ml และนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 1-200 μM และ 2-10 mM เพื่อนำสร้างกราฟสารมาตรฐานของทั้ง 2 วิธี

3.3 สารละลาย Critic acid 330 mM

ชั่ง Critic acid 3.1680 g ละลายในน้ำปราศจากไอออนปรับปริมาตรเป็น 50 ml เพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลาย Critic acid 330 mM

3.4 สารละลาย Sulfanilamide 50 mM

ชั่ง Sulfanilamide 0.0860 g ละลายในสารละลาย Critic acid 330 mM ปรับปริมาตรเป็น 10 ml และนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นให้ได้ 10 และ 50 mM

3.5 สารละลาย N-(-Naphthyl)-ethylenediamine.2HCL (NED) 50 mM

ชั่ง NED 0.1350 g ละลายในน้ำปราศจากไอออนปรับปริมาตรเป็น 10 ml และนำมาเจือจางให้ได้ความเข้มข้นให้ได้ 10 และ 50 mM

3.6 สารละลาย Zn suspension

ชั่งผง Zn 0.5000 g ละลายในน้ำปราศจากไอออนปรับปริมาตรเป็น 10 ml

3.7 สารละลายรบกวน NaCl , K_2SO_4 และ KH_2PO_4

เตรียมสารละลายรบกวนแต่ละตัวให้ได้ความเข้มข้น 10 mM

4. การเก็บตัวอย่างเขม่าป็นและวิธีการเตรียมตัวอย่างเขม่าป็น

4.1 สถานที่เก็บตัวอย่าง

ทำการเก็บตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนและบริเวณหลังมือ ณ ศูนย์ราชการ จังหวัดนครปฐม มีการยิงปืนทั้งหมด 10 กระบอก กระบอกละ 1 นัด

4.2 การเก็บตัวอย่าง

4.2.1 ใช้ไม้พันสำลีที่หยดด้วยน้ำปราศจากไอออนเช็ดบริเวณหลังมือทั้งสองไปในทิศทางเดียวห้ามเช็ดไปกลับและเก็บใส่ถุงพลาสติกซีปล็อกแยกตัวอย่างเขมาดินปืนบริเวณมือขวาและซ้าย (1 ถุง / 1 ตัวอย่าง) จากนั้นทำการเก็บแบบเดียวกันในทุกตัวอย่าง

4.2.2 หยดน้ำปราศจากไอออนบนไม้พันสำลีเป็น blank และเก็บใส่ถุงพลาสติกซีปล็อก

4.2.3 ปลอกกระสุนปืนทำการเก็บใส่ถุงพลาสติกซีปล็อก 1 ปลอกกระสุนต่อ 1 ถุง

4.3 การเตรียมตัวอย่างก่อนนำมาวิเคราะห์

4.3.1 นำไม้พันสำลีตัวอย่างที่เก็บบริเวณมือใส่น้ำปราศจากไอออน 2 ml ในขวด vial

4.3.2 นำปลอกกระสุนปืน วางแนวตั้งจากกับขวด ปลอกกระสุนขนาดเล็กและใหญ่ใส่น้ำปราศจากไอออน 1 และ 2 ml ตามลำดับ

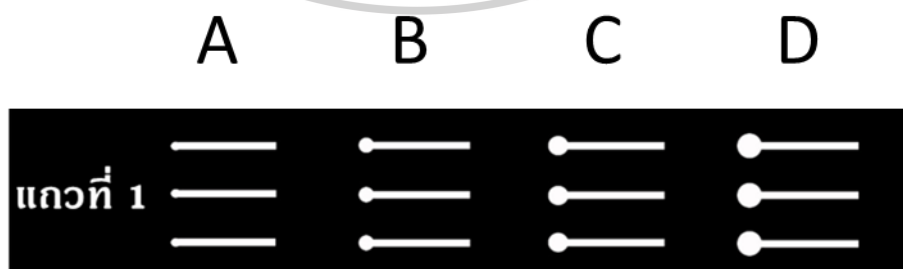
4.3.3 นำขวด vial ไปสกัดในเครื่อง Ultrasonic เป็นเวลา 1 ชั่วโมงและสารละลายตัวอย่างที่สกัดได้ไปกรองผ่าน Nylon membrane filter ขนาดรูพรุน 0.45 μm และนำไปตรวจวัดด้วยเครื่อง IC

4.3.4 นำสารละลายตัวอย่างที่เหลือไปตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่มีการบรรจุรีเอเจนท์ไว้ก่อนแล้ว

5. การประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษด้วยเทคนิค screen printing

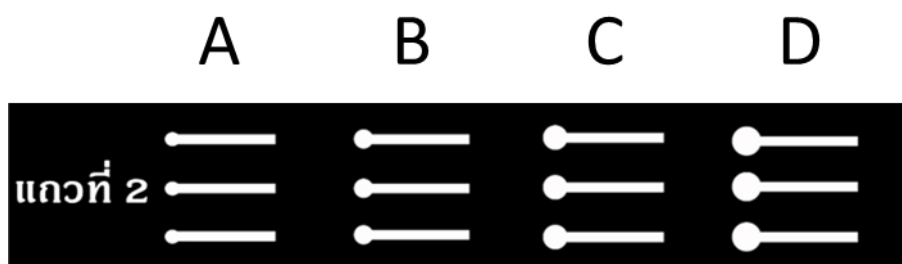
5.1 ออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS6 ดังภาพที่แสดง

5.1.1 รูปแบบที่ 1A-1D จะขนาดช่องทางการไหลยาว 2.0 cm และขนาดของความกว้างของช่องทางการไหล 0.15 cm เท่ากัน จะแตกต่างกันในส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมบริเวณที่หยดสารตัวอย่าง (Sample zone) โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของ 1A-1D เท่ากับ 0.20 , 0.30, 0.40 และ 0.50 cm ตามลำดับ



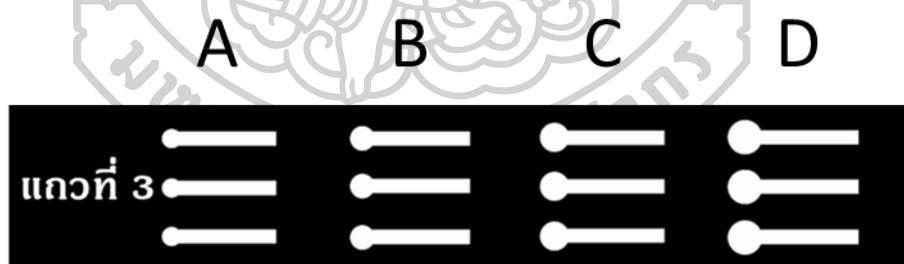
ภาพที่ 9 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษแถวที่ 1 (1A-1D)

5.1.2 รูปแบบที่ 2A-2D จะขนาดช่องทางการไหลยาว 2.0 cm และขนาดของความกว้างของช่องทางการไหล 0.20 cm เท่ากัน จะแตกต่างกันในส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมบริเวณที่หยดสารตัวอย่าง (Sample zone) โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของ 1A-1D เท่ากับ 0.20 , 0.40, 0.50 และ 0.60 cm ตามลำดับ



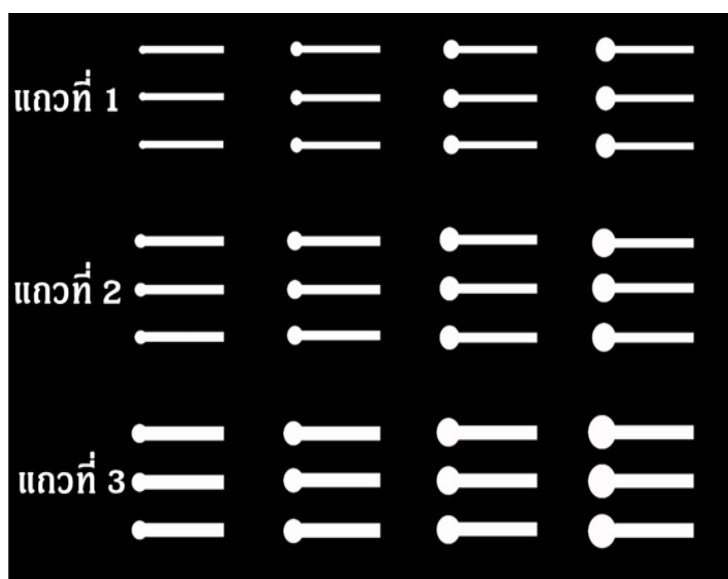
ภาพที่ 10 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาดแถวที่ 2 (2A-2D)

5.1.3 รูปแบบที่ 3A-3D จะขนาดช่องทางการไหลยาว 2.0 cm และขนาดของความกว้างของช่องทางการไหล 0.30 cm เท่ากัน จะแตกต่างกันในส่วนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมบริเวณที่หยดสารตัวอย่าง (Sample zone) โดยที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ของ 3A-3D เท่ากับ 0.40 , 0.50, 0.60 และ 0.70 cm ตามลำดับ



ภาพที่ 11 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาดแถวที่ 3 (3A-3D)

5.1.4 นำไปจัดวางเป็นแบบเพื่อทำบล็อกสกรีนขนาด A4 ดังภาพ



ภาพที่ 12 แม่แบบบล็อกสกรีน 12 รูปแบบ

5.1.5 นำกระดาษกรองไปวางบน hot plate แล้ววางบล็อกสกรีนทับลงบนกระดาษกรอง ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55°C เพื่อสกรีนขี้ผึ้ง 0.2000 g ลงกระดาษกรองที่กำหนดขอบเขต จนขี้ผึ้งละลายหมด นำกระดาษกรองที่ได้มาพักให้ความร้อนคลายตัว

6. ศึกษากระดาษกรองที่เหมาะสมที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD)

นำกระดาษกรองทั้ง 6 ชนิดสกรีนในรูปแบบที่เหมาะสมและนำมาเปรียบเทียบการดูดซับและระยะเวลาการไหลของสารละลายสีผสมอาหาร เพื่อเลือกรูปแบบและกระดาษกรองที่เหมาะสมในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัด

7. ศึกษาปริมาตรสารตัวอย่าง, สารมาตรฐาน และรีเอเจนต์

หยดสารละลายสีผสมอาหารลงบริเวณที่หยดตัวอย่าง (Sample zone) และสังเกตการไหลบนช่องทางการไหลว่าสารละลายสีผสมอาหารสามารถไหลได้เต็มช่องทางการไหลด้วยปริมาตร 1-3 μl

8. ศึกษาระยะเวลาการตรวจวัดระยะทางบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD)

หยด Griesss reagent บริเวณที่หยดตัวอย่างจากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานไนเตรทและสังเกตการเปลี่ยนแปลงการไหลของสารละลายสีที่เกิดขึ้น

9. ศึกษาผลการรบกวนของสารรบกวน

นำสารละลายรบกวน Cl^- , PO_4^{3-} และ SO_4^{2-} ความเข้มข้น 10 mM มาหยดลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่มีการเตรียมรีเอเจนท์ไว้ก่อนแล้ว

10. การทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μPAD)

10.1 ทดสอบช่วงความเป็นเส้นตรง (Linearity)

หยดสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ความเข้มข้น 10-50 และ 2-10 mM ตามลำดับ บนอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีการเตรียมรีเอเจนท์ Griess และตัวรีดิวซ์ Zn ไว้เรียบร้อยแล้ว จากนั้นวัดระยะทางการไหลของสีที่เกิดขึ้นที่เวลา 10 นาที เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของปฏิกิริยาสีและของปริมาณไนเตรทและไนไตรท์

10.2 ทดสอบความแม่นยำ (Precision)

หยดสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ความเข้มข้น 10, 30, 50 และ 2, 6, 10 mM ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 6 ครั้ง ลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีการเตรียมรีเอเจนท์ Griess และตัวรีดิวซ์ Zn ไว้เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำมาคำนวณหาความสามารถในการทำซ้ำ (ค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนสัมพัทธ์, %RSD)

11. วิเคราะห์ตัวอย่างเขม่าดินปืนด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD) และเครื่อง Ion chromatography (IC)

นำสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนมาตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่มีการเตรียมรีเอเจนท์ Griess และตัวรีดิวซ์ Zn ไว้ก่อนแล้ว ทิ้งไว้ 10 นาที แล้ววัดระยะของสี เพื่อหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ จากนั้นนำเขม่าดินปืนส่วนที่เหลือมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC โดยตั้งค่าเครื่อง IC ที่มีสภาวะดังตารางที่ 1

Ion chromatography (IC) Dionex ICS-1000	
Program	Dionex CM Dongle Chromeleon 680 SPI build 2238
Detector	Conductivity
Eluent	Potassium hydroxide
Gradient eluent	ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 mM ความเข้มข้นสุดท้าย 25 mM
Runtime	10.0 min
Flow rate	1.00 ml / min
Guard column	DionexIonPac AG17 Guard column
Analytical column	DionexIonPac AS17-C Analytical column

12. ทดสอบความใช้ได้ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ion chromatography (IC)

12.1 ทดสอบช่วงความเป็นเส้นตรง (Linearity)

ฉีดสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทและไนไตรท์ที่ช่วงความเข้มข้น 10-400 μM และ 1-200 μM ตามลำดับ ฉีดสารละลายเข้าเครื่อง IC เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารละลายผสมไนเตรทและไนไตรท์ จากนั้นนำค่าพื้นที่ใต้พีคที่ได้มาสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพื้นที่ใต้พีคและความเข้มข้นของสารละลายไนเตรทและไนไตรท์

12.2 ทดสอบความจำเพาะ (Specificity)

ฉีดสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทและไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 200 μM และ 100 μM ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง เข้าเครื่อง IC เพื่อทำการวิเคราะห์

ฉีดสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทไนไตรท์ผสมกับสารรบกวน Cl^- , PO_4^{3-} และ SO_4^{2-} และสารละลายละลายผสมไนเตรทไนไตรท์กับสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืน เพื่อพิจารณาที่พีคที่อาจรบกวนการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์

12.3 ทดสอบความแม่นยำ (Precision)

ฉีดสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทและไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200 μM และ 30,100,200 μM ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง ลงในสารละลายตัวอย่างที่ไม่มีเขม่าดินปืนบน และฉีดสารละลายเข้าเครื่อง IC

12.4 ศึกษาหาค่า LOD และ LOQ

ฉีดสารละลายผสมไนเตรทและไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 0.005 μM และ 0.01 μM ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 10 ครั้ง เข้าเครื่อง IC เพื่อนำมาคำนวณหาค่า LOD และ LOQ

13. การวิเคราะห์หาปริมาณทั้ง 2 วิธีมาเปรียบเทียบกัน

นำค่าวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ทั้ง 2 การวิเคราะห์มาเปรียบเทียบกันด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlative analysis) โดยพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) จากสมการเส้นตรงของการหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ที่ตรวจวิเคราะห์ทั้ง 2 วิธี

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการประดิษฐ์อุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PAD)

จากประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษโดยอาศัยเทคนิคการ screen printing โดยการสกรีนสีฟุ้งลงบนกระดาษกรองทั้ง 12 รูปแบบ ด้วยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 55°C จนสีฟุ้งละลาย ผลปรากฏว่ารูปแบบที่ 1A-1D ช่องทางการไหลในมีขนาด 0.15 cm ทำให้สีฟุ้งละลายซึมลงบนกระดาษโดยไม่แบ่งแยกส่วนที่ไม่ชอบน้ำและส่วนที่ชอบน้ำ รูปแบบ 2A-2D บริเวณที่หยดตัวอย่างมีความชัดเจนกว่าแถวที่ 1 แต่ช่องทางการไหลสีฟุ้งละลายซึมลงบริเวณส่วนที่ชอบน้ำเช่นเดียวกัน ในส่วนรูปแบบ 3A-3D จะให้ได้อย่างชัดเจนว่าการสกรีนสีฟุ้งบนแม่แบบมีความละเอียดต่างจากรูปแบบอื่นๆ โดยเฉพาะรูปแบบที่ 3D ดังนั้นจึงเลือกรูปแบบที่ 3D ในการประดิษฐ์อุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษ ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษทั้ง 12 รูปแบบ

4.2 ผลการศึกษากระดาษกรองในรูปแบบที่เหมาะสมที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PAD)

การศึกษาการทำอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษโดยใช้กระดาษกรองทั้ง 6 ชนิด พบว่า

ตัวอย่างลำดับที่ 1 Ederol Rundfilter 4,3 cm ปริมาณสีฟุ้งที่ใช้ $0.1500-0.2000\text{ g}$ ลักษณะการไหลของสารละลายสีผสมอาหารปริมาตรสาร $2\text{ }\mu\text{l}$ ใช้เวลาในการไหลผ่านช่องนานเกิน 10 นาที และในการทำซ้ำ ในปริมาณเดียวกัน สารสีไม่สามารถไหลไปเต็มช่องทางได้ระยะเวลาในการดูดซึมที่ $2\text{ }\mu\text{l}$ เวลาในการดูดซึมมากกว่า 20 นาที

ตัวอย่างลำดับที่ 2 Whatman™ Schleicher & Schuell™ 595 ปริมาณจีฟิ่งที่ใช้ 0.1700-0.2200 g ลักษณะการไหลของสารละลายสีผสมอาหารปริมาตรสาร 2 μ l ใช้ในเวลาไหลเต็มช่องทางประมาณ 2 นาทีระยะเวลาในการดูดซึมที่ 2 μ l เวลาในการดูดซึมประมาณ 20 นาที

ตัวอย่างลำดับที่ 3 Schleicher & Schüll Rundfilter 1507 ปริมาณจีฟิ่งที่ใช้ 0.2100-0.2500 g ลักษณะการไหลของสารละลายสีผสมอาหารปริมาตรสาร 2 μ l สารละลายใช้ ในเวลาไหลเต็มช่องทางประมาณ 2 นาที แต่สารสีไม่สามารถไหลได้เต็มช่องทาง ระยะเวลาในการดูดซึมที่ 2 μ l เวลาในการดูดซึมประมาณ 20 นาที

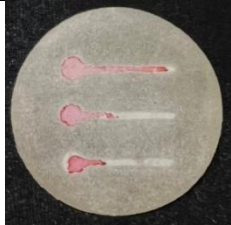
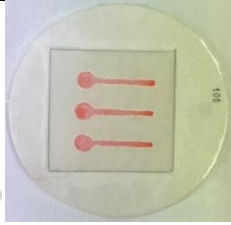
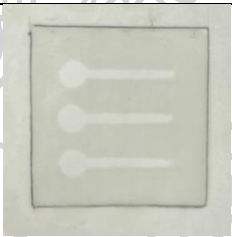
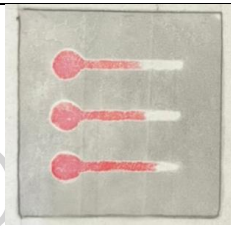
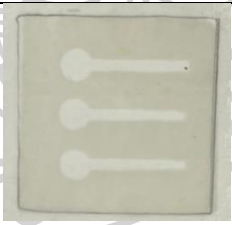
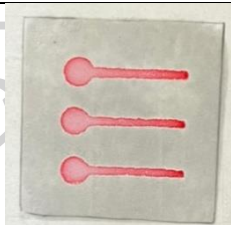
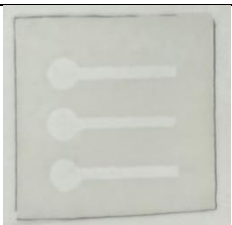
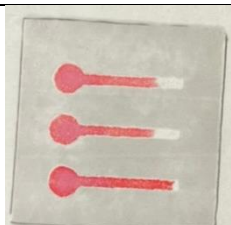
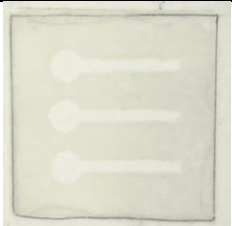
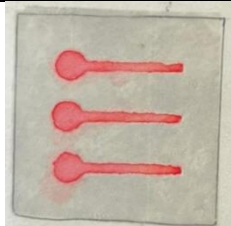
ตัวอย่างลำดับที่ 4 Schleicher & Schüll Rundfilter 589³ Blue ribbon ปริมาณจีฟิ่งที่ใช้ 0.2100-0.2200 g ลักษณะการไหลของสารละลายสีผสมอาหารปริมาตรสาร 2 μ l และ 3 μ l ปรากฏว่าสารสีใช้เวลาในการไหล เต็มช่องทางในการไหลประมาณ 5 นาที และใช้เวลาในการดูดซึมประมาณ 20 นาที

ตัวอย่างลำดับที่ 5 Filtres Fioroni Filter Circles 601 ปริมาณจีฟิ่งที่ใช้ 0.2100-0.2500 g ลักษณะการไหลของสารละลายสีผสมอาหารปริมาตรสาร 2 μ l และ 3 μ l ปรากฏว่าสารละลายใช้เวลาในการไหลเต็มช่องทางในการไหลประมาณ 7 นาที แต่สารสี 2 μ l ไม่สามารถไหลไปเต็มช่องทางในการไหลได้และสารสี 3 μ l เกือบ ไหลไปเต็มช่องทางในการไหลได้ ระยะเวลาในการดูดซึมที่ 2 μ l ใช้เวลาในการดูดซึมประมาณ 15 นาทีและ 3 μ l ใช้เวลาในการดูดซึมประมาณ 30 นาที

ตัวอย่างลำดับที่ 6 Whatman™ Quantitative Filter Papers: Grade 542 ปริมาณจีฟิ่งที่ใช้ 0.2100-0.2500 g ลักษณะการไหลของสารละลายสีผสมอาหารปริมาตรสาร 2 μ l สารสีใช้เวลาในการไหลเต็ม ช่องทางประมาณ 2 นาที และปริมาตรสาร 3 μ l สารสีใช้เวลาในการไหลเต็มช่องทางประมาณ 5 นาที แต่ในการหยดสารสีในกระดาษ 542 ปริมาตร 2 และ 3 μ l สารละลายซึมทำตุเก้นพื้นที่ที่กำหนด ไม่สามารถใช้ได้ทั้ง 3 การทำซ้ำ

ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวอย่างที่ 4 กระดาษกรอง Schleicher&Schüll Rundfilter 589³ Blue ribbon ซึ่งให้ผลที่ดีที่สุดในการทำอุปกรณ์ตรวจวัดดังตารางที่ 2

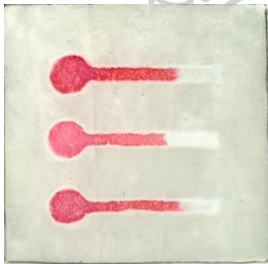
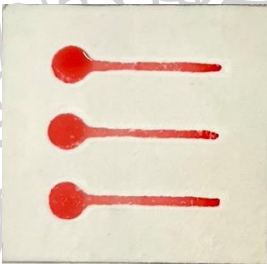
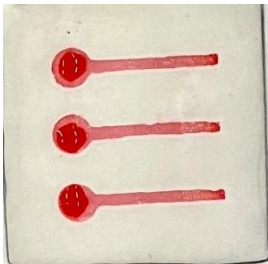
ตารางที่ 2 การศึกษากระดาษทั้ง 6 ชนิดในการประดิษฐ์อุปกรณ์ตรวจวัด

ลำดับ	กระดาษกรอง	ปริมาณขี้ผึ้ง (g)	μ PAD	หยดสีผสมอาหาร
1		0.1752		
2		0.2240		
3		0.2305		
4		0.2211		
5		0.2205		
6		0.2304		

4.3 ผลการศึกษาปริมาณสารตัวอย่าง, สารมาตรฐาน และรีเอเจนต์

ทำการหยดสารละลายสีผสมอาหารปริมาตร 1-3 μl ซึ่งเป็นตัวแทนของสารตัวอย่าง, สารมาตรฐาน และรีเอเจนต์ลงบริเวณที่หยดตัวอย่าง (Sample zone) และสังเกตการไหลบนช่องทางการไหลบนกระดาษกรอง Schleicher&Schüll Rundfilter 589³ Blue ribbon ที่มีสกรีนซึ่งในรูปแบบ 3D ว่ามีการไหลของสารละลายสีสามารถไหลได้เต็มช่องทางการไหล ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3 พบว่าที่ปริมาตร 1 μl ไม่สามารถไหลได้เต็มช่องทางการไหล ที่ปริมาตร 2 μl และ 3 μl สามารถไหลได้เต็มช่องทางการไหล ดังนั้นจึงเลือกปริมาตร 2 μl ในการใช้เป็นปริมาตรของสารละลายทั้งหมดในการทำอุปกรณ์ตรวจวัด

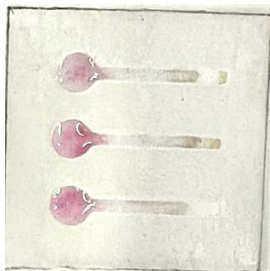
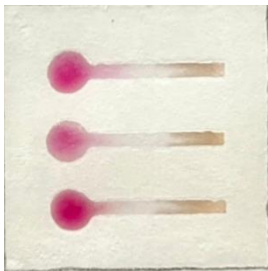
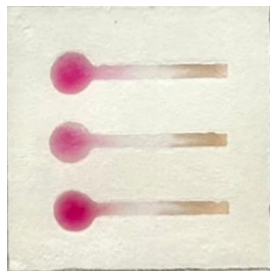
ตารางที่ 3 ลักษณะการไหลในการใช้ปริมาตรที่ต่างกัน

	ปริมาตรสาร 1 μl	ปริมาตรสาร 2 μl	ปริมาตรสาร 3 μl
ลักษณะการไหลบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบที่ 3D			

4.4 ผลการศึกษาระยะเวลาการตรวจวัดระยะทางหลังจากการเกิดปฏิกิริยา

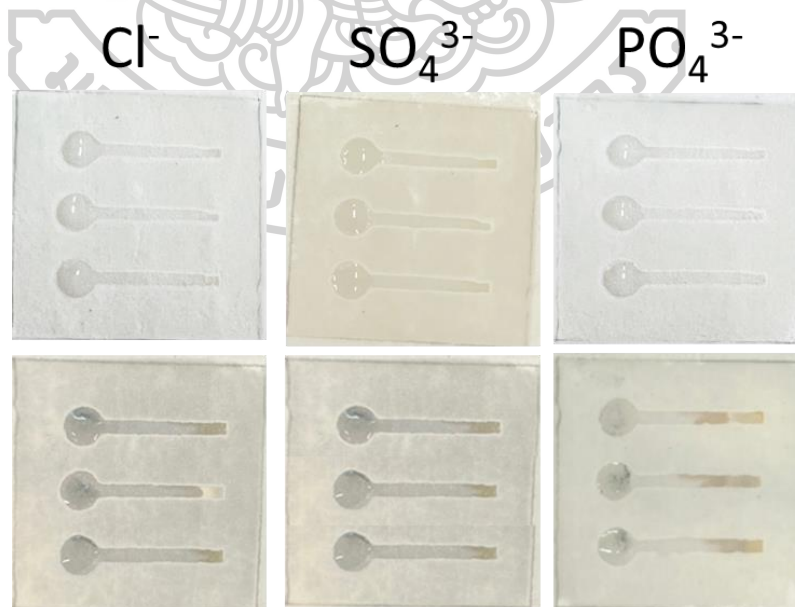
เมื่อทำการหยด Griesss reagent บริเวณที่หยดตัวอย่างจากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานในเตรทความเข้มข้น 10 mM ปริมาตร 2 μl และสังเกตการเปลี่ยนแปลงการไหลของสารละลายสีให้ไหลเต็มช่องทางการไหลเป็นเวลา 3 นาที หลังจากนั้นทำการวัดระยะทางที่ 5, 10, และ 15 นาที การทดลองพบว่าที่เวลา 5 นาที สารละลายบางช่องยังไม่เต็มช่องทางจึงยังไม่สามารถวัดระยะทางที่เกิดของปฏิกิริยาได้ ที่เวลา 10 นาที สารละลายไหลเต็มช่องทางและสามารถวัดค่าระยะทางได้ และที่เวลา 15 นาที ระยะทางของสีที่ปรากฏมีการเคลื่อนที่จาก 10 นาที เป็นระยะทาง 0.0-0.2 cm แต่ระยะทางของสีที่วัดนั้นเป็นสีจางๆที่เกิดจากสารละลายแพร่ไปตามช่องทาง ดังนั้นจึงเลือกระยะเวลาในการวัดระยะทางที่เวลา 10 นาที ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ภาพถ่ายระยะทางในการตรวจวัดที่เวลาต่างๆ

อุปกรณ์ตรวจวัดที่เวลา 5 นาที	อุปกรณ์ตรวจวัดที่เวลา 10 นาที	อุปกรณ์ตรวจวัดที่เวลา 15 นาที
		

4.5 ผลการศึกษาตัวรบกวนบนอุปกรณ์ตรวจวัด

เมื่อนำสารละลายรบกวนทั้ง 3 ตัว Cl^- , PO_4^{3-} และ SO_4^{2-} ที่ความเข้มข้น 10 mM ปริมาตร 2 μl มาหยดลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษไนเตรทและไนไตรท์ที่มีการเตรียมรีเอเจนท์ไว้ก่อนแล้ว เป็นระยะเวลา 10 นาที พบว่าไม่มีการเกิดสีชมพูแดงของปฏิกิริยา Griess แสดงดังภาพที่ ดังนั้น อุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษที่วัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์โดยอาศัยปฏิกิริยา Griess จึงไม่ถูกรบกวนด้วยสารรบกวนดังกล่าว



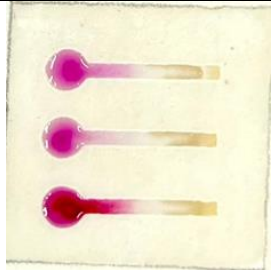
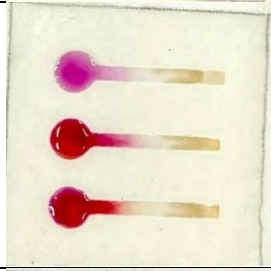
ภาพที่ 14 การทดสอบตัวรบกวนบนอุปกรณ์ตรวจวัด

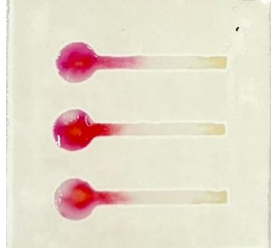
4.6 ผลการทดสอบความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดบนกระดาษ (μPAD)

4.6.1 ผลการทดสอบความเป็นเส้นตรง

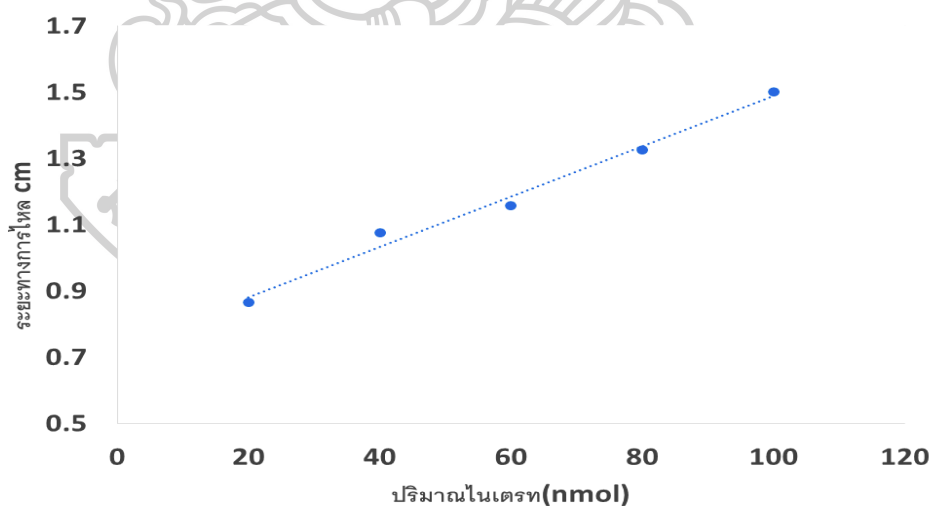
เมื่อหยดสารละลายมาตรฐานไนเตรทความเข้มข้น 10-50 mM (20-100 nmol) บนอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีการเตรียมรีเอเจนต์ Griess และตัวรีดิวซ์ Zn ไว้เรียบร้อยแล้ว จากนั้นวัดระยะทางการไหลของสีที่เกิดขึ้นที่เวลา 10 นาที เพื่อสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของปฏิกิริยาสีและของปริมาณไนเตรท (nmol) เพื่อศึกษาความเป็นเส้นตรงผลที่ได้ดังข้อมูลในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ค่าการวัดระยะทางของสีบนอุปกรณ์ตรวจวัดไนเตรทที่ความเข้มข้นช่วง 10-50 mM (20-100 nmol)

อุปกรณ์ตรวจวัดที่เวลา 10 นาที	ความเข้มข้น ของไนเตรท (mM)	ปริมาณของ ไนเตรท (nmol)	ค่าระยะทางเฉลี่ย (n = 3)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	50	100	1.9	0.1
	40	80	1.7	0.1
	30	60	1.6	0.1

	20	40	1.4	0.1
	10	20	1.2	0.2

จากข้อมูลในตารางที่ 5 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไนเตรทสูงขึ้น ค่าระยะทางที่วัดได้ที่เวลา 10 นาที ของสีชมพูแดงที่เกิดปฏิกิริยาของ Griess มีค่าของระยะทางเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดลองไปสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนเตรท (nmol) และค่าระยะทางของสีที่ปรากฏ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 15 โดยมีสมการเส้นตรงเท่ากับ $y = 0.0076x + 0.73$ และ $R^2 = 0.9874$

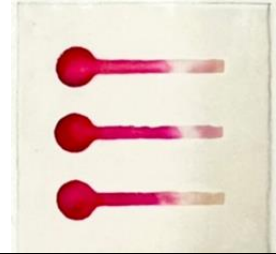
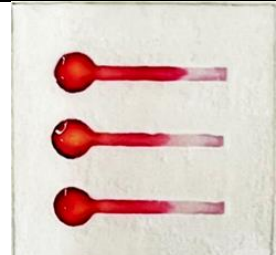
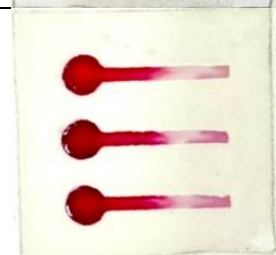
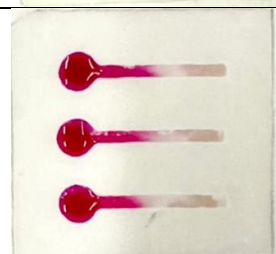
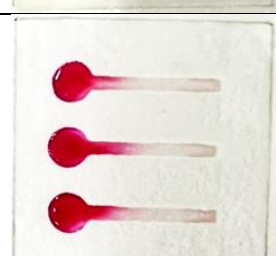


ภาพที่ 15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนเตรท (nmol) กับค่าระยะทางของสี

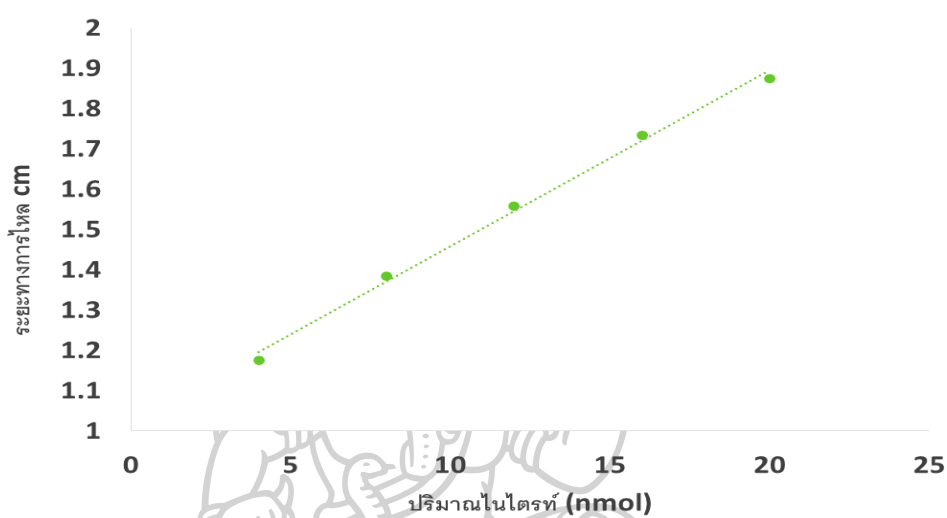
สำหรับการศึกษาความเป็นเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ เมื่อหยดสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ความเข้มข้น 2-10 mM (4-20 nmol) บนอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีการเตรียมรีเอเจนต์ Griess ไว้เรียบร้อยแล้ว จากนั้นวัดระยะทางการไหลของสีที่เกิดขึ้นที่เวลา 10 นาที เพื่อสร้างกราฟ

มาตรฐานระหว่างระยะทางการเคลื่อนที่ของปฏิกิริยาสีและของปริมาณไนไตรท์ (nmol) เพื่อศึกษาความเป็นเส้นตรงผลที่ได้ดังข้อมูลในตารางที่ 6

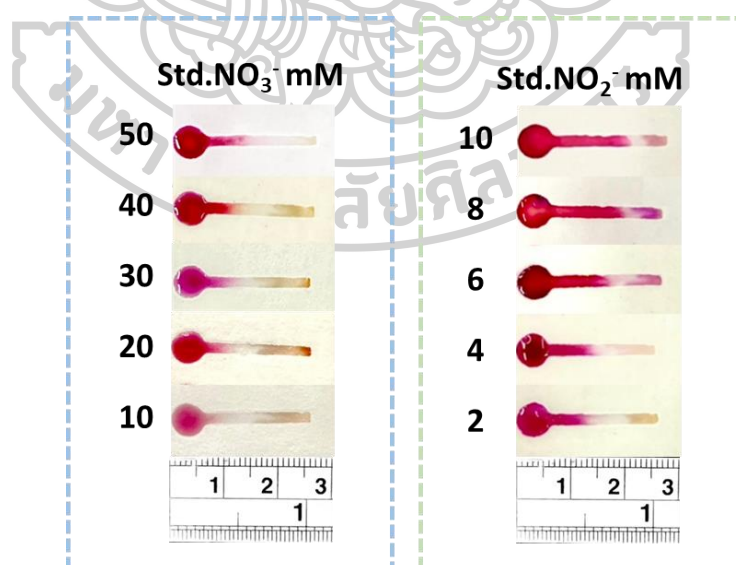
ตารางที่ 6 ค่าการวัดระยะทางของสียบนอุปกรณ์ตรวจวัดไนไตรท์ที่ความเข้มข้นช่วง 2-10 mM (4-20 nmol)

อุปกรณ์ตรวจวัดที่เวลา 10 นาที	ความเข้มข้น ของไนไตรท์ (mM)	ปริมาณของ ไนไตรท์ (nmol)	ค่าระยะทางเฉลี่ย (n = 3)	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
	10	20	1.5	0.1
	8	16	1.3	0.1
	6	12	1.2	0.1
	4	8	1.0	0.1
	2	4	0.9	0.1

จากข้อมูลในตารางที่ 6 พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไนไตรท์สูงขึ้น ค่าระยะทางที่วัดได้ที่เวลา 10 นาที ของสีชมพูแดงที่เกิดปฏิกิริยาของ Griess มีค่าของระยะทางเพิ่มขึ้นเช่นกัน จากนั้นนำข้อมูลที่ได้อ่านจากทดลองไปสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนไตรท์ (nmol) และค่าระยะทางของสีที่ปรากฏ ผลที่ได้แสดงดังภาพที่ 16 โดยมีสมการเส้นตรงเท่ากับ $y = 0.0438x + 1.02$ และ $R^2 = 0.9957$



ภาพที่ 16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนไตรท์ (nmol) กับค่าระยะทางของสี



ภาพที่ 17 อุปกรณ์ตรวจวัดแบบวัดระยะทางของสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์

4.6.2 ผลทดสอบความแม่นยำ (Precision)

เมื่อทำการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษของการวัดระยะ โดยทำการหาค่าสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ความเข้มข้น 10, 30, 50 mM (20, 60, 100 nmol) และ 2,6,10 mM (4, 12, 20 nmol) ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 6 ครั้ง โดยหาค่าสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ลงบนอุปกรณ์ตรวจวัด 2 ที่มีการเตรียมรีเอเจนต์ Griess และตัวรีดิวซ์ Zn ไว้เรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำมาคำนวณหาความสามารถในการทำซ้ำในรูปแบบการวิเคราะห์ค่าร้อยละเฉลี่ยเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) ดังข้อมูลในตารางที่ 7 และ 8

ตารางที่ 7 ผลการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบวัดระยะทางของสารละลายมาตรฐานไนเตรท

ปริมาณไนเตรท (nmol)	ค่าเฉลี่ยระยะทาง (n=6)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ค่าร้อยละเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD)
20	0.90	0.0480	4.54
60	1.20	0.0516	4.30
100	1.50	0.0418	2.72

ตารางที่ 8 ผลการทดสอบความแม่นยำของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบวัดระยะทางของสารละลายมาตรฐานไนไตรท์

ปริมาณไนไตรท์ (nmol)	ค่าเฉลี่ยระยะทาง (n=6)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ค่าร้อยละเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD)
4	1.20	0.0408	3.40
12	1.60	0.0632	3.95
20	1.90	0.0408	2.15

จากตารางที่ 7 การวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทบนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษที่ปริมาณไนเตรท 20, 60 และ 100 nmol พบว่าการวิเคราะห์ %RSD อยู่ในช่วง 2.72-4.54 และจากตารางที่ 8 การวิเคราะห์ปริมาณไนไตรท์บนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษที่ปริมาณไนไตรท์ 4, 12 และ 20 nmol พบว่าการวิเคราะห์ %RSD อยู่ในช่วง 2.15-3.95 แสดงให้เห็นถึงประ

ประสิทธิภาพการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์โดยอาศัยปฏิกิริยา Griess บนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษว่ามีความแม่นยำสูง

4.7 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างเขม่าดินปืนด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษ (μ PAD) และเครื่อง Ion chromatography (IC)

จากการนำสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนมาตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษโดยการนำสารตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือ 10 ตัวอย่างและจากปลอกกระสุนปืน 10 ตัวมาหาคะการละลายตัวอย่างปริมาตร 2 μ l ลงบนอุปกรณ์ตรวจวัดที่มีการเตรียมรีเอเจนต์ Griess และตัวรีดิซ Zn ไว้ก่อนแล้วทิ้งไว้ 10 นาทีแล้ววัดระยะของสีชมพูแดงเพื่อหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในหน่วย nmol จากสมการเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ ดังตารางที่ 9 จากนั้นนำเขม่าดินปืนส่วนที่เหลือของทุกอย่างอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC และนำค่าพื้นที่ใต้พีคของตัวอย่างไปคำนวณหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์จากสมการเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 9 ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของตัวอย่างเขม่าดินปืนโดยการวิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ (μ PAD)

ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ปริมาณไนเตรท (nmol)	ปริมาณไนไตรท์ (nmol)
		μ PAD	μ PAD
1	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
2	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
3	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
4	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
5	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
6	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-

7	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
8	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
9	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
10	หลังมือขวา	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-
11	ปลอกกระสุนปลอกที่1 ขนาด 9mm	13.60	6.39
12	ปลอกกระสุนปลอกที่2 ขนาด .38	13.60	3.35
13	ปลอกกระสุนปลอกที่3 ขนาด 9mm	13.60	4.87
14	ปลอกกระสุนปลอกที่4 ขนาด 9mm	9.21	7.15
15	ปลอกกระสุนปลอกที่5 ขนาด 9mm	13.60	1.07
16	ปลอกกระสุนปลอกที่6 ขนาด 9mm	13.60	6.39
17	ปลอกกระสุนปลอกที่7 ขนาด .38	4.82	6.39
18	ปลอกกระสุนปลอกที่8 ขนาด 9mm	17.98	10.96
19	ปลอกกระสุนปลอกที่9 ขนาด .22	123.25	17.81
20	ปลอกกระสุนปลอกที่10 ขนาด .45	4.82	5.63

หมายเหตุ – ไม่สามารถวัดปริมาณในตรทหรือไนโตรที่ไ้

จากตารางที่ 9 พบว่าที่บริเวณตัวอย่างเขม่าดินปืนจากหลังทั้งสองข้างไม่สามารถวัดระยะทางและคำนวณปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ได้ เนื่องจากบริเวณหลังมือทั้งสองข้างเก็บตัวอย่างอย่างจากการยิงปืน 1 นัด ทำให้มีปริมาณเขม่าดินปืนน้อยไม่เพียงพอต่อการตรวจวัดปริมาณหรือมีปริมาณน้อยกว่าขีดจำกัดการตรวจวัดของอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ (μ PAD) ในส่วนของปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของตัวอย่างปลอกกระสุนปืนสามารถตรวจวัดปริมาณได้ เนื่องจากปลอกกระสุนปืนมีองค์ประกอบหลักของไอออนไนเตรทและไนไตรท์อยู่จำนวนมากที่เกิดจากการเผาไหม้เมื่อมีการยิงกระสุนปืนออกไปและเกิดจากเขม่าดินปืนที่เหลือจากตกค้างหลังจากการยิง และจากตัวอย่างปลอกกระสุนปืนทั้งเกือบทั้ง 10 ตัวอย่างมีปริมาณไนเตรทมากกว่าปริมาณไนไตรท์

ตารางที่ 10 ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของตัวอย่างเขม่าดินปืนโดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC

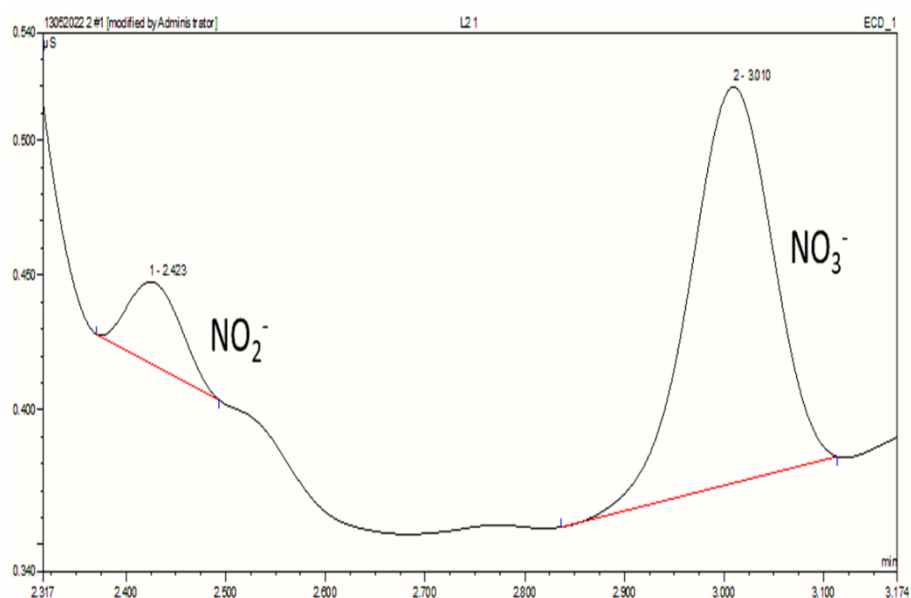
ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ปริมาณไนเตรท (nmol)	ปริมาณไนไตรท์ (nmol)
		IC	IC
1	หลังมือขวา	0.14	-
	หลังมือซ้าย	0.23	-
2	หลังมือขวา	0.11	0.0060
	หลังมือซ้าย	0.26	0.0390
3	หลังมือขวา	0.74	-
	หลังมือซ้าย	0.20	-
4	หลังมือขวา	0.49	-
	หลังมือซ้าย	0.18	-
5	หลังมือขวา	0.20	-
	หลังมือซ้าย	0.34	-
6	หลังมือขวา	0.11	-
	หลังมือซ้าย	0.18	-
7	หลังมือขวา	0.12	-
	หลังมือซ้าย	0.15	-
8	หลังมือขวา	0.19	-

	หลังมือซ้าย	0.14	-
9	หลังมือขวา	0.12	-
	หลังมือซ้าย	0.09	-
10	หลังมือขวา	0.10	-
	หลังมือซ้าย	0.11	-
11	ปลอกกระสุนปลอกที่1 ขนาด 9mm	10.66	7.38
12	ปลอกกระสุนปลอกที่2 ขนาด .38	16.25	7.39
13	ปลอกกระสุนปลอกที่3 ขนาด 9mm	14.61	5.59
14	ปลอกกระสุนปลอกที่4 ขนาด 9mm	12.97	6.97
15	ปลอกกระสุนปลอกที่5 ขนาด 9mm	11.93	4.30
16	ปลอกกระสุนปลอกที่6 ขนาด 9mm	16.94	7.83
17	ปลอกกระสุนปลอกที่7 ขนาด .38	4.56	8.36
18	ปลอกกระสุนปลอกที่8 ขนาด 9mm	22.56	18.41
19	ปลอกกระสุนปลอกที่9 ขนาด .22	130.07	43.59
20	ปลอกกระสุนปลอกที่10 ขนาด .45	14.22	5.50

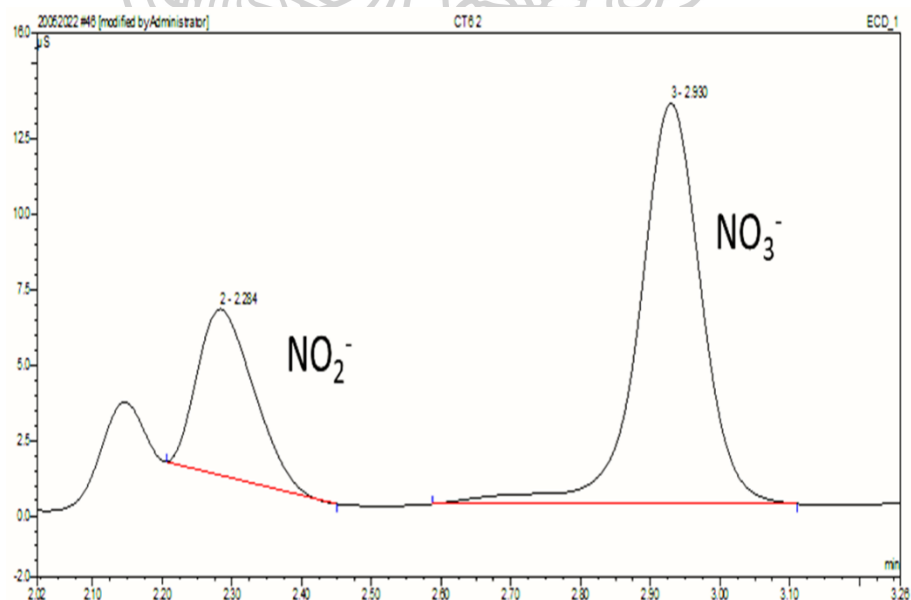
หมายเหตุ – ไม่สามารถวัดปริมาณไนเตรทหรือไนไตรท์ได้

จากตารางที่ 10 พบว่าจากการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์จากเครื่อง IC สามารถวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ได้ซึ่งต่างจากอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ (μ PAD) เนื่องจากอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษไม่สามารถตรวจวัดปริมาณค่าได้เมื่อเทียบกับเครื่อง IC และ

จากตัวอย่างบริเวณมือทั้งสองข้างและปลอกกระสุนปืนทั้งหมด 20 ตัวอย่างมีปริมาณไนเตรทมากกว่าปริมาณไนไตรท์ และโครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากหลังมือและปลอกกระสุนปืนดังภาพที่ 18 และ 19



ภาพที่ 18 โครมาโตแกรมของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือ



ภาพที่ 19 โครมาโตแกรมของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืน

4.8 ผลการทดสอบความใช้ได้ของการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Ion chromatography (IC)

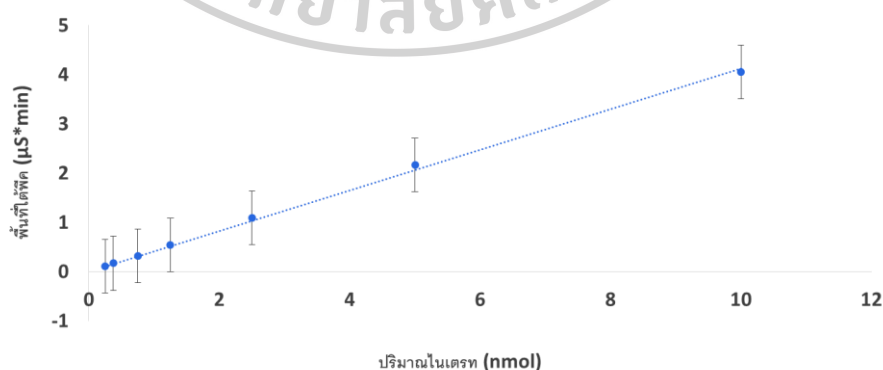
4.8.1 ผลการทดสอบช่วงความเป็นเส้นตรง (Linearity)

นำสารละลายละลายผสมไนเตรทในช่วงความเข้มข้น 10-400 μM นิดสารละลายมาตรฐานไนเตรทปริมาตร 25 μl เข้าเครื่อง IC ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้พีคของปริมาณสารละลายไนเตรท ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรทช่วงความเข้มข้น 10-400 μM

ความเข้มข้นสารละลายมาตรฐานไนเตรท (μM)	ปริมาณไนเตรท (nmol)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีค ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
10	0.25	0.1084	0.0271
15	0.375	0.1698	0.0188
30	0.75	0.3184	0.0174
50	1.25	0.5384	0.0217
100	2.5	1.0951	0.0069
200	5	2.1642	0.0197
400	10	4.0504	0.0110

นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 11 ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรท ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$) และปริมาณของไนเตรท (nmol) ดังภาพที่ 20 ซึ่งมีสมการเส้นตรงเท่ากับ $y = 0.4122x$ และ $R^2 = 0.9983$



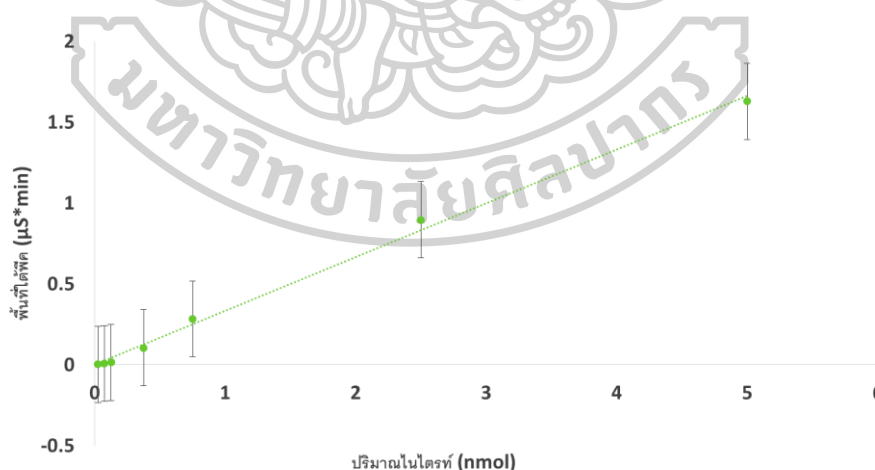
ภาพที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรท ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$) และปริมาณของไนเตรท (nmol)

นำสารละลายละลายผสมในไตรท์ที่ช่วงความเข้มข้น 1-200 μM จี๊ดสารละลายมาตรฐาน ไนเตรทปริมาตร 25 μl เข้าเครื่อง IC ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์หาพื้นที่ใต้พีคของปริมาณ สารละลายในไตรท์ ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรทช่วงความเข้มข้น 10-400 μM

ความเข้มข้นสารละลาย มาตรฐานไนไตรท์ (μM)	ปริมาณไนไตรท์ (nmol)	ค่าเฉลี่ยพื้นที่ใต้พีค ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)
1	0.025	0.0027	0.0002
3	0.075	0.0084	0.0007
5	0.125	0.0143	0.0011
15	0.375	0.1054	0.0037
30	0.75	0.2830	0.0041
100	2.5	0.8960	0.0047
200	5	1.6285	0.0014

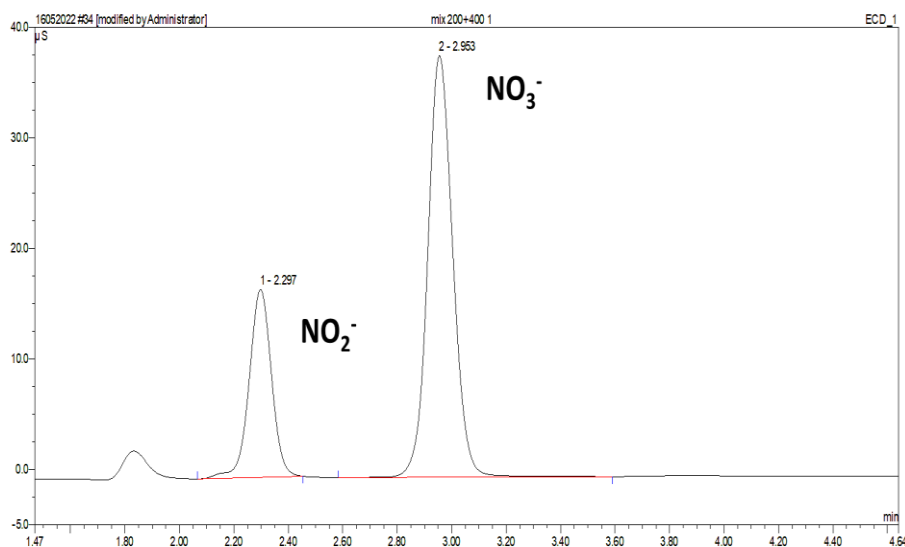
นำข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 12 ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคของสารละลาย มาตรฐานไนไนไตรท์ ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$) และปริมาณของไนไตรท์ (nmol) ดังภาพที่ 21 ซึ่งมีสมการเส้นตรง เท่ากับ $y = 0.3327x$ และ $R^2 = 0.9966$



ภาพที่ 21 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรท ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$) และ ปริมาณของไนเตรท (nmol)

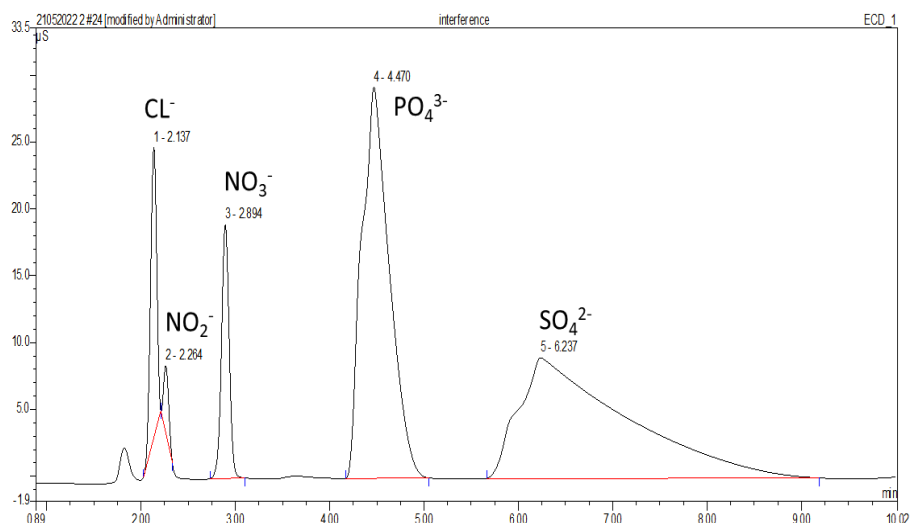
4.8.2 ผลการทดสอบความจำเพาะ (Specificity)

นํีสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทและไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 200 μM และ 100 μM ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง เข้าเครื่อง IC เพื่อทำการวิเคราะห์ พบว่าโครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทที่ความเข้มข้น 200 μM และไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 100 μM แสดงดังโครมาโตแกรมภาพที่ 22



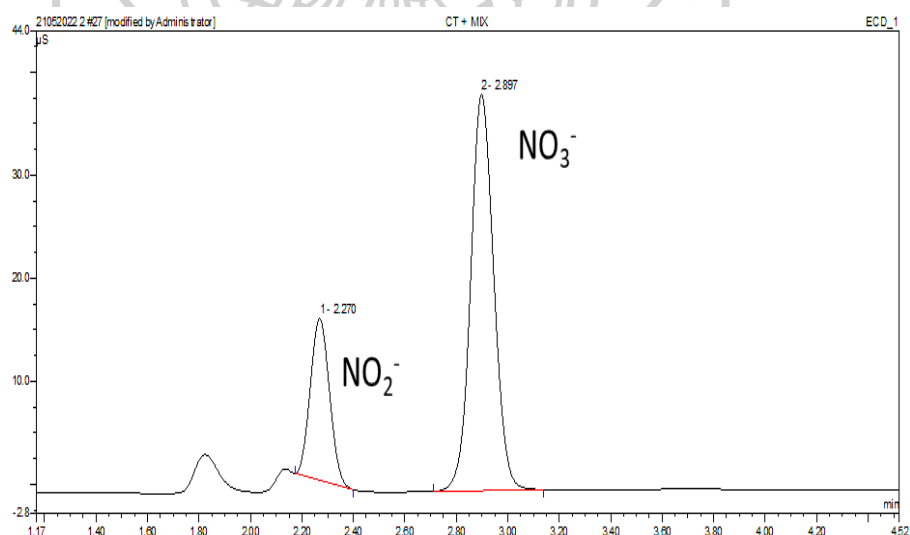
ภาพที่ 22 โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทที่ความเข้มข้น 200 μM และไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 100 μM

จากโครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทที่ความเข้มข้น 200 μM และไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 100 μM แสดงให้เห็นว่าพีคของไนเตรทและไนไตรท์อยู่แยกกันชัดเจน โดยที่พีคของไนไตรท์มี Retention time อยู่ที่ 2.294 นาที และพีคของไนเตรทมี Retention time อยู่ที่ 2.957 นาที และสารรบกวน Cl^- , PO_4^{3-} และ SO_4^{2-} ผสมกับสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ เพื่อพิจารณาพีคที่อาจรบกวนการตรวจวัดปริมาณไนเตรทไนไตรท์ ดังโครมาโตแกรมภาพที่ 23



ภาพที่ 23 โครมาโตแกรมสารรบกวนผสมกับสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์

จากโครมาโตแกรมสารรบกวนทั้งสามตัวได้แก่ Cl^- , PO_4^{3-} และ SO_4^{2-} ผสมกับสารละลายละลายผสมไนเตรทและไนไตรท์ พบว่าพีคของสารรบกวน Cl^- , PO_4^{3-} และ SO_4^{2-} มี Retention time อยู่ที่ 2.137, 4.470 และ 6.237 นาทีตามลำดับ และลักษณะพีครบกวนทั้งสามตัวแยกออกจากพีคของไนเตรทและไนไตรท์ชัดเจน และเมื่อนำสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทและไนไตรท์ผสมกับสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนเพื่อศึกษาผลรบกวนอื่นๆ แสดงผลโครมาโตแกรมดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 สารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทและไนไตรท์ผสมกับสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืน

จากโครมาโตแกรมภาพที่ 24 แสดงให้เห็นว่าไม่มีการซ้อนทับกันของพีคของสารที่ต้องการวิเคราะห์ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเครื่อง IC จึงไม่ถูกรบกวนด้วยพีคอื่นๆของสารที่อยู่ในตัวอย่างเขมาดินปืน

4.8.3 ผลการทดสอบความแม่นยำ (Precision)

เมื่อนิโคตติลสารละลายมาตรฐานผสมไนเตรทและไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 50, 100, 200 μM และ 30,100,200 μM ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 3 ครั้ง เข้าเครื่อง IC เพื่อศึกษาความแม่นยำของวิธีวิเคราะห์โดยเครื่อง IC ด้วยการวิเคราะห์ในรูปแบบค่าร้อยละเบี่ยงเบนสัมพัทธ์ (%RSD) แสดงผลดังตารางที่ 13 และ 14

ตารางที่ 13 ผลการศึกษาความแม่นยำของการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานไนเตรทด้วยเครื่อง IC

ปริมาณไนเตรท (nmol)	พื้นที่ใต้พีคเฉลี่ย (n=3)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ค่าร้อยละเบี่ยงเบน สัมพัทธ์ (%RSD)
1.25	0.5384	0.0217	4.03
2.5	1.0951	0.0069	0.63
5	2.1642	0.0197	0.91

ตารางที่ 14 ผลการศึกษาความแม่นยำของการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานไนไตรท์ด้วยเครื่อง IC

ปริมาณไนไตรท์ (nmol)	พื้นที่ใต้พีคเฉลี่ย (n=3)	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD)	ค่าร้อยละเบี่ยงเบน สัมพัทธ์ (%RSD)
0.75	0.2830	0.0041	1.46
2.5	0.8960	0.0047	0.52
5	1.6285	0.0014	0.08

จากตารางที่ 13 พบว่าการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานไนเตรทด้วยเครื่อง IC ให้ค่า %RSD ในช่วง 0.63-4.03 และจากตารางที่ 14 พบว่าการวิเคราะห์สารละลายมาตรฐานไนไตรท์ด้วยเครื่อง IC ให้ค่า %RSD ในช่วง 0.08-1.46 แสดงให้เห็นว่าผลการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วยเครื่อง IC มีความแม่นยำสูง

4.8.4 ผลการศึกษาหาค่า LOD และ LOQ

เมื่อนิโคตติรละลายผสมไนเตรทและไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 0.005 μM และ 0.01 μM ตามลำดับ ความเข้มข้นละ 10 ครั้ง เข้าเครื่อง IC และนำพื้นที่พีคของไนเตรทและไนไตรท์มา คำนวณหาค่าเฉลี่ย ($n=10$), ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD), ค่า LOD และค่า LOQ ดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์ที่ความเข้มข้น 0.005 μM และ 0.01 μM

ครั้งที่	พื้นที่ใต้พีคไนเตรท ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)	พื้นที่ใต้พีคไนไตรท์ ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)
1	0.0016	0.0008
2	0.0006	0.0004
3	0.0006	0.0007
4	0.0006	0.0005
5	0.0010	0.0005
6	0.0010	0.0006
7	0.0014	0.0003
8	0.0008	0.0002
9	0.0007	0.0003
10	0.0005	0.0005
ค่าเฉลี่ย	0.0009	0.0005
ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.0004	0.0002
LOD	0.0027	0.0017
LOQ	0.0091	0.0058

จากตารางที่ 15 ผลการคำนวณค่า LOD ของไนเตรทและไนไตรท์มีค่าเท่ากับ 0.0027 และ 0.0017 ตามลำดับ ค่า LOQ ของไนเตรทและไนไตรท์มีค่าเท่ากับ 0.0091 และ 0.0058 ตามลำดับ

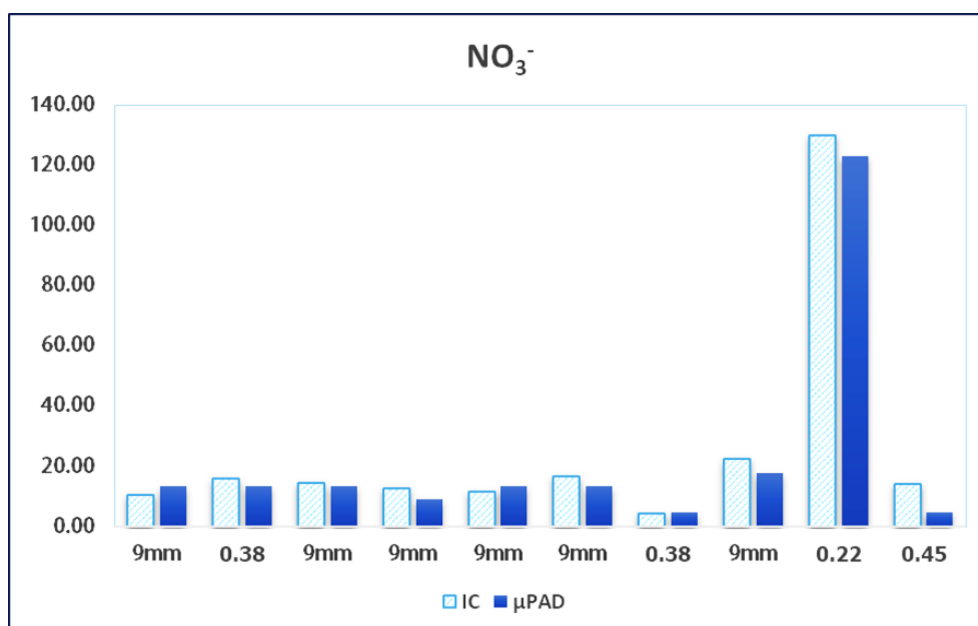
4.9 ผลการเปรียบเทียบการวิเคราะห์หาปริมาณทั้ง 2 วิธี

จากการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืนทั้ง 20 ตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ (μ PAD) ที่ได้ทำการพัฒนามาเปรียบเทียบกับตารางที่ 9 และ 10 พบว่าการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ด้วย μ PAD มีค่าการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์น้อยกว่าการตรวจวัดด้วยเครื่อง IC ดังตารางที่ 16 และนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างแผนภูมิรูปภาพเพื่อเปรียบเทียบการหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของทั้งสองวิธี ดังภาพที่ 25 และ 26 ตารางที่ 16 ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ที่วิเคราะห์ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ (μ PAD) และเทคนิคไอออนโครมาโตกราฟี (IC)

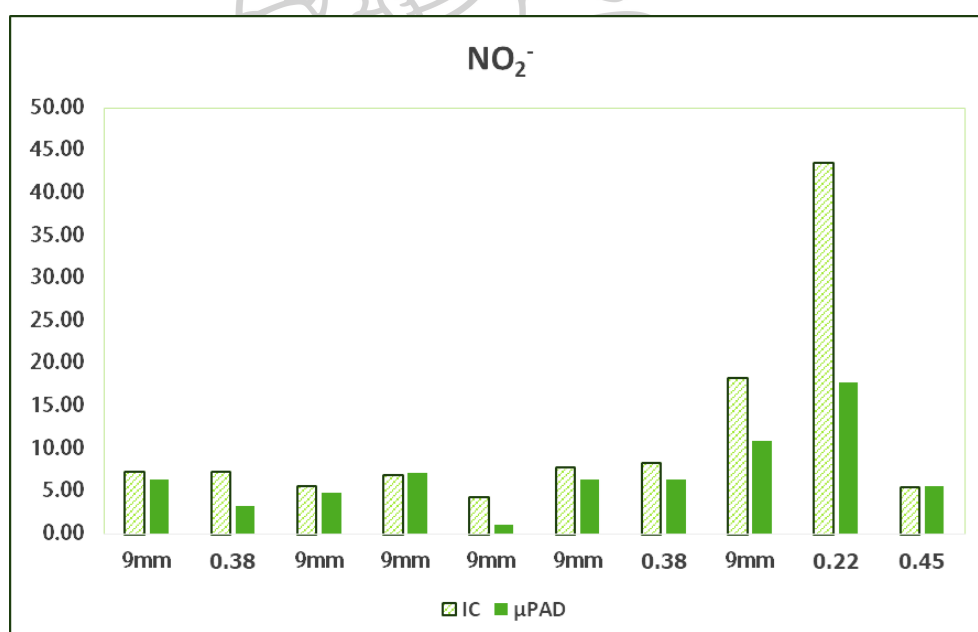
ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ปริมาณไนไตรท์ (nmol)		ปริมาณไนเตรท (nmol)	
		IC	μ PAD	IC	μ PAD
1	หลังมือขวา	-	-	0.14	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.23	-
2	หลังมือขวา	0.0060	-	0.11	-
	หลังมือซ้าย	0.0390	-	0.26	-
3	หลังมือขวา	-	-	0.74	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.20	-
4	หลังมือขวา	-	-	0.49	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.18	-
5	หลังมือขวา	-	-	0.20	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.34	-
6	หลังมือขวา	-	-	0.11	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.18	-
7	หลังมือขวา	-	-	0.12	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.15	-
8	หลังมือขวา	-	-	0.19	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.14	-
9	หลังมือขวา	-	-	0.12	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.09	-
10	หลังมือขวา	-	-	0.10	-
	หลังมือซ้าย	-	-	0.11	-

11	ปลอกกระสุนพลอกที่1 ขนาด 9mm	7.38	6.39	10.66	13.60
12	ปลอกกระสุนพลอกที่2 ขนาด .38	7.39	3.35	16.25	13.60
13	ปลอกกระสุนพลอกที่3 ขนาด .38	7.39	3.35	16.25	13.60
14	ปลอกกระสุนพลอกที่4 ขนาด 9mm	6.97	7.15	12.97	9.21
15	ปลอกกระสุนพลอกที่5 ขนาด 9mm	4.30	1.07	11.93	13.60
16	ปลอกกระสุนพลอกที่6 ขนาด 9mm	7.83	6.39	16.94	13.60
17	ปลอกกระสุนพลอกที่7 ขนาด .38	8.36	6.39	4.56	4.82
18	ปลอกกระสุนพลอกที่8 ขนาด 9mm	18.41	10.96	22.56	17.98
19	ปลอกกระสุนพลอกที่9 ขนาด .22	43.59	17.81	130.07	123.25
20	ปลอกกระสุนพลอกที่10 ขนาด .45	5.50	5.63	14.22	4.82

จากตารางที่ 16 พบว่าการวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืนบนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางไม่สามารถตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ที่ปริมาณต่ำได้ในขณะที่สามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิค IC



ภาพที่ 25 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณไนเตรท (nmol) ในตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษและเครื่อง IC



ภาพที่ 26 แผนภูมิแท่งแสดงปริมาณไนไตรท์ (nmol) ในตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนที่ตรวจวัดด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษและเครื่อง IC

จากภาพที่ 25 และ 26 จะเห็นได้ว่ามีค่าปริมาณไนเตรทและไนไตรท์จากตัวอย่างปลอกกระสุนปืนเนื่องจากตัวอย่างจากบริเวณหลังมือทั้งสองข้างนั้นสามารถตรวจวัดปริมาณได้ด้วยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระจายจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันทั้งสองวิธีได้ จึงนำค่าปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของตัวอย่างปลอกกระสุนปืนที่ตรวจวัดได้จากทั้งสองวิธีมาเปรียบเทียบกันพบว่าส่วนใหญ่มีค่าปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ใกล้เคียง จากนั้นนำค่าวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ทั้ง 2 มาแสดงวิเคราะห์การทดสอบสมมติฐานทางสถิติ โดยใช้โปรแกรม SPSS แบบ Paired-Sample T Test ได้ผลดังตารางที่ 17-19

ตารางที่ 17 Paired Samples Statistics

Paired Samples Statistics					
		Mean	N	Std. Deviation	Std. Error Mean
Pair 1	IC NO ₂ ⁻	11.5320	10	11.91633	3.76827
	PAD NO ₂ ⁻	7.0010	10	4.57745	1.44752
Pair 2	PAD NO ₃ ⁻	22.8080	10	35.54009	11.23876
	IC NO ₃ ⁻	25.477	10	37.0406	11.7133

ตารางที่ 18 Paired Samples Correlations

Paired Samples Correlations				
		N	Correlation	Sig.
Pair 1	IC NO ₂ ⁻ & PAD NO ₂ ⁻	10	.934	.000
Pair 2	PAD NO ₃ ⁻ & IC NO ₃ ⁻	10	.995	.000

ตารางที่ 19 Paired Differences (T-Test)

	Paired Differences					t	df	Sig. (2-tailed)
	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	95% Confidence Interval of the Difference				
				Lower	Upper			
Pair 1	4.531	7.810	2.469	-1.056	10.118	1.834	9	.100
Pair 2	-2.669	3.792	1.199	-5.382	.044	-2.225	9	.053

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS คู่ที่ 1
การวิเคราะห์เขม่าดินปืนของปริมาณไนไตรท์จากทั้งสองการวิเคราะห์ (Pair 1 IC NO₂⁻ & PAD NO₂⁻)

กำหนด μ_1 แทน การวิเคราะห์เขม่าดินปืนด้วยอุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษ (μ_{PAD})

μ_2 แทน การวิเคราะห์เขม่าดินปืนด้วยเครื่อง Ion chromatography (IC)

สมมติฐานเชิงสถิติ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ (การวิเคราะห์หาปริมาณไนไตรท์ด้วย μ_{PAD} ไม่แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC)

$H_0 : \mu_1 \neq \mu_2$ (การวิเคราะห์หาปริมาณไนไตรท์ด้วย μ_{PAD} แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC)

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่า t 1.834 และค่า Sig. 0.100 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_0 นั่นคือยอมรับ $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ หรือการวิเคราะห์หาปริมาณไนไตรท์ด้วย μ_{PAD} ไม่แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC ที่ระดับนัยสำคัญอยู่ 0.05 โดยที่การวิเคราะห์เขม่าดินปืนของปริมาณไนไตรท์จากทั้งสองการวิเคราะห์มีค่า Correlation (r) เท่ากับ 0.934

จากผลการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม SPSS คู่ที่ 2

การวิเคราะห์เขม่าดินปืนของปริมาณไนเตรทจากทั้งสองการวิเคราะห์ (Pair 1 IC NO_3^- & PAD NO_3^-)

กำหนด μ_1 แทน การวิเคราะห์เขม่าดินปืนด้วยอุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษ (μPAD)

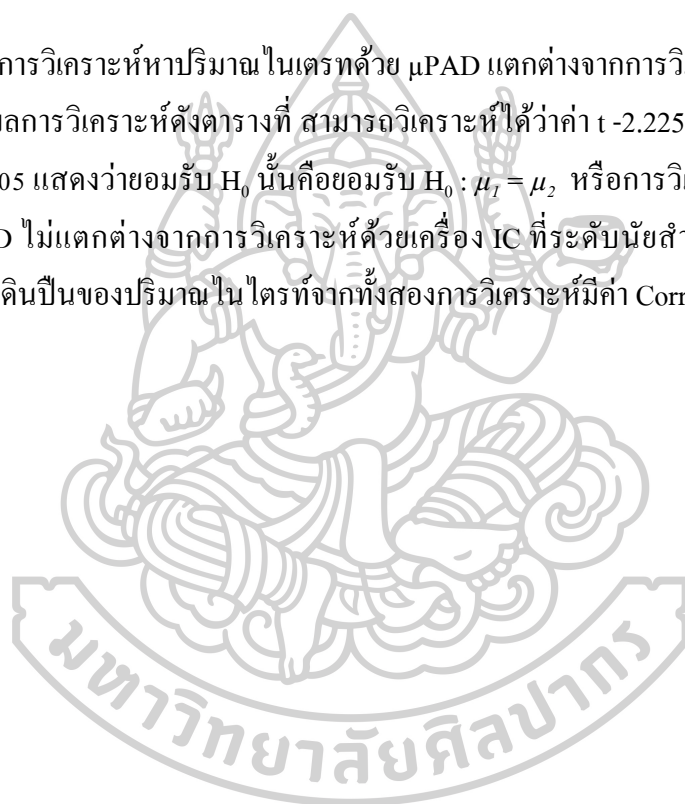
μ_2 แทน การวิเคราะห์เขม่าดินปืนด้วยเครื่อง Ion chromatography (IC)

สมมติฐานเชิงสถิติ

$H_0 : \mu_1 = \mu_2$ (การวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทด้วย μPAD ไม่แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC)

$H_a : \mu_1 \neq \mu_2$ (การวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทด้วย μPAD แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC)

จากผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ สามารถวิเคราะห์ได้ว่าค่า t -2.225 และค่า Sig. 0.053 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่ายอมรับ H_0 นั่นคือยอมรับ $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ หรือการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทด้วย μPAD ไม่แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC ที่ระดับนัยสำคัญอยู่ 0.05 โดยที่การวิเคราะห์เขม่าดินปืนของปริมาณไนเตรทจากทั้งสองการวิเคราะห์มีค่า Correlation (r) เท่ากับ 0.995



บทที่ 5

สรุป อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

งานวิจัยนี้ได้สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษและพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดเพื่อวัดระยะทางของการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในเขม่าดินปืน โดยเลือกเทคนิคการสกรีนจี้ฟิ่งในการสร้างพื้นที่ที่ไม่ชอบน้ำ โดยมีการออกแบบอุปกรณ์ตรวจวัดที่แตกต่างกันทั้งหมด 12 รูปแบบและทำการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดในรูปแบบต่างๆ เพื่อให้ได้รูปแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษนั้นพกพาสะดวก ราคาไม่แพง มีความรวดเร็ว ใช้แล้วทิ้งและหลังจากประกอบเสร็จแล้วไม่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนหรือบุคลากรเฉพาะทางในการวัดซึ่งทำให้เป็นเครื่องมือที่น่าสนใจที่จะใช้ในการวิเคราะห์ในสถานที่ที่เข้าถึงยากและขาดแคลนอุปกรณ์ในการตรวจวัด

จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษที่อาศัยปฏิกิริยา Griess reaction ในการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ได้ทำการคัดเลือกกรอง Schleicher & Schüll Rundfilter 589³ Blue ribbon ใช้จี้ฟิ่งในการสกรีนในช่วง 0.2000-0.2200g และสารละลายที่ใช้ในการตรวจวัดทั้งหมดใช้ที่ปริมาตร 2 μ l เมื่อได้อุปกรณ์ตรวจวัดที่พร้อมใช้งานแล้วสามารถวัดระยะทางเมื่อทำปฏิกิริยาเกิดสีชมพูแดงได้ที่เวลา 10 นาที จากข้อมูลเบื้องต้นสอดคล้องกับผลจากวิจัยของ Thongkam, T. และคณะ ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษโดยใช้เทคนิคการสกรีนจี้ฟิ่ง ในการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์โดยอาศัยปฏิกิริยา Griess reaction สอดคล้องกับผลจากวิจัยของ Francisca T.S.M. Ferreira และคณะ

จากการศึกษาทดสอบความใช้ได้ของอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ สำหรับการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์พบว่ากราฟสมการเส้นตรงของไนเตรทมีความเป็นเส้นตรงในช่วง 10-50 mM (20-100 nmol) มีค่า $R^2 = 0.9983$ และความเข้มข้นของไนเตรทที่ 1.25, 2.5 และ 5 nmol มีความแม่นยำในการตรวจวัดที่รายงานเป็นค่า %RSD เท่ากับ 4.03, 0.63 และ 0.91 ตามลำดับ สำหรับกราฟสมการเส้นตรงของไนไตรท์มีความเป็นเส้นตรงในช่วง 2-10 mM (4-20 nmol) มีค่า $R^2 = 0.9966$ และความเข้มข้นของไนไตรท์ที่ 0.75, 2.5 และ 5 nmol มีความแม่นยำในการตรวจวัดที่รายงานเป็นค่า %RSD เท่ากับ 1.46, 0.52 และ 0.08 ตามลำดับ

เมื่อนำผลการวิเคราะห์การตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในเขม่าดินปืนของปลอกกระสุนปืนมาเปรียบเทียบกันระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับวิธีมาตรฐานด้วยเครื่อง IC และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยการคำนวณทางสถิติโดยใช้โปรแกรม SPSS แบบ Paired –

Sample T Test ซึ่งผลที่ได้จากคำนวณค่า t หรือ คู่การวิเคราะห์หาปริมาณไนไตรท์ระหว่างอุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษและเครื่อง IC มีค่า P -value เท่ากับ 0.100 มากกว่าค่า α 0.05 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์หาปริมาณไนไตรท์ด้วย μ PAD ไม่แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC ที่ระดับนัยสำคัญอยู่ 0.05 ค่าจำนวนค่า t หรือ คู่การวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทระหว่างอุปกรณ์การตรวจวัดแบบกระดาษและเครื่อง IC มีค่า P -value เท่ากับ 0.053 มากกว่าค่า α 0.05 แสดงให้เห็นว่าการวิเคราะห์หาปริมาณไนเตรทด้วย μ PAD ไม่แตกต่างจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง IC ที่ระดับนัยสำคัญอยู่ 0.05 และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของปริมาณไนเตรทและไนไตรท์มีค่าเท่ากับ 0.995 และ 0.934 ตามลำดับ ซึ่งค่า r เข้าใกล้ 1 ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ของทั้งสองวิธีการวิเคราะห์มีความใกล้เคียงกันและมีความสัมพันธ์ที่ดี และการตรวจวัดปริมาณไนเตรทและไนไตรท์บนอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษจะมีค่าน้อยกว่าปริมาณการตรวจวัดด้วยเครื่อง IC เล็กน้อย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของอรอุษา (อรอุษา, 2562) ในการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ของอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษกับเครื่อง IC พบว่ามีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันถึงแม้ว่าจะค่าที่จากการตรวจวัดจะมีความต่างกันแต่มีความใกล้เคียงกันมากทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษที่พัฒนาในงานวิจัยนี้สามารถวิเคราะห์ปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในเขม่าดินปืนได้จริงในงานภาคสนาม

5.2 อภิปรายผล

งานวิจัยนี้เป็นวิจัยที่สร้างอุปกรณ์การวัดตรวจระยะทางแบบกระดาษหาปริมาณไนเตรทและไนไตรท์ในตัวอย่างเขม่าดินปืน ซึ่งทำให้สามารถการตรวจวิเคราะห์เขม่าดินปืนจากมือผู้ต้องสงสัยและปลอกกระสุนปืนเพื่อมาใช้อันยันผู้กระทำผิดโดยใช้หลักการทางด้านนิติวิทยาศาสตร์มาช่วยในกระบวนการสืบสวนสอบสวน เนื่องจากพยานหลักฐานทางวิทยาศาสตร์เป็นสิ่งที่น่าเชื่อถือและเป็นที่ยอมรับในกระบวนการยุติธรรมและสามารถนำไปใช้ในการพิจารณาคดีในชั้นศาลได้ จากการทดลองพบว่า การตรวจวัดปริมาณไนไตรท์และไนไตรท์บนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษเมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณจากสมการเส้นตรงพบว่าปริมาณที่ได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับการตรวจวัดด้วยวิธีมาตรฐานด้วยเครื่อง IC

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาตัวอย่างตัวอย่างเขม่าดินปืนเพิ่มเติมในการยิงปืนมากกว่า 1 นัดแล้วค่อยทำการเก็บตัวอย่าง
2. ศึกษาตัวอย่างเขม่าดินปืนที่เก็บตัวอย่างบนพื้นผิวอื่นๆนอกเหนือจากบริเวณมือ

3. ศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแบบกระดาษในสภาวะแวดล้อมต่างๆ เพื่อดูความเสถียรของอุปกรณ์

4. ศึกษาตัวรีดิวซ์ไอออนไนเตรทเป็นไนไตรท์ตัวอื่นๆ เนื่องจากผง Zn ไปขัดขวางการเดินทางของสีและสารละลาย



รายการอ้างอิง

- Ataide, V. N., Mendes, L. F., Gama, L. I., de Araujo, W. R., & Paixão, T. R. (2020). Electrochemical paper-based analytical devices: ten years of development. *Analytical Methods*, 12(8), 1030-1054.
- Bhakta, S. A., Borba, R., Taba Jr, M., Garcia, C. D., & Carrilho, E. (2014). Determination of nitrite in saliva using microfluidic paper-based analytical devices. *Analytica chimica acta*, 809, 117-122.
- Cate, D. M., Dungchai, W., Cunningham, J. C., Volckens, J., & Henry, C. S. (2013). Simple, distance-based measurement for paper analytical devices. *Lab on a Chip*, 13(12), 2397-2404.
- Cromartie, R. L., Wardlow, A., Duncan, G., & McCord, B. R. (2019). Development of a microfluidic device (μ PADs) for forensic serological analysis. *Analytical Methods*, 11(5), 587-595.
- Ferreira, F. T., Mesquita, R. B., & Rangel, A. O. (2020). Novel microfluidic paper-based analytical devices (μ PADs) for the determination of nitrate and nitrite in human saliva. *Talanta*, 219, 121183.
- García-Robledo, E., Corzo, A., & Papaspyrou, S. (2014). A fast and direct spectrophotometric method for the sequential determination of nitrate and nitrite at low concentrations in small volumes. *Marine Chemistry*, 162, 30-36.
- Giustarini, D., Rossi, R., Milzani, A., & Dalle-Donne, I. (2008). Nitrite and nitrate measurement by Griess reagent in human plasma: evaluation of interferences and standardization. *Methods in enzymology*, 440, 361-380.
- Martinez, A. W., Phillips, S. T., Butte, M. J., & Whitesides, G. M. (2007). Patterned paper as a platform for inexpensive, low-volume, portable bioassays. *Angewandte Chemie*, 119(8), 1340-1342.
- Michalski, R., & Kurzyca, I. (2006). Determination of Nitrogen Species (Nitrate, Nitrite and Ammonia Ions) in Environmental Samples by Ion Chromatography. *Polish Journal of Environmental Studies*, 15(1).
- Mizokami, K. (2022). *A Guide to Every Type of Gun*.
<https://www.popularmechanics.com/military/weapons/a19138318/how-guns-work/>
- Morsi, Y. M. M. a. R. E. (2013). *Ion Exchange Chromatography - An Overview*.

<https://www.intechopen.com/chapters/43603>

Poll, N. (2560). ปัญหาอาชญากรรมของ สังคมไทยในปัจจุบัน. สืบค้นจาก

https://nidapoll.nida.ac.th/survey_detail?survey_id

Selin, H. (2013). *Encyclopaedia of the history of science, technology, and medicine in non-western cultures*. Springer Science & Business Media.

Tan, J. F., Anastasi, A., & Chandra, S. (2021). Electrochemical Detection of Nitrate, Nitrite and Ammonium for on-Site Water Quality Monitoring. *Current Opinion in Electrochemistry*, 100926.

Thongkam, T., & Hemavibool, K. (2020). An environmentally friendly microfluidic paper-based analytical device for simultaneous colorimetric detection of nitrite and nitrate in food products. *Microchemical Journal*, 159, 105412.

Thongkam, T., Rungsirisakun, R., & Hemavibool, K. (2020). A simple paper-based analytical device using UV resin screen-printing for the determination of ammonium in soil. *Analytical Methods*, 12(38), 4649-4656.

TIAWTRAGUL, O., & Choosakoonkriang, S. (2562). *DETERMINATION OF NITRITES AND NITRATES IN GUNSHOT RESIDUES BY A PAPER-BASED DEVICE* Silpakorn University].

Yates, E., & Yates, A. (2016). Johann Peter Griess FRS (1829–88): Victorian brewer and synthetic dye chemist. *Notes and Records: the Royal Society Journal of the History of Science*, 70(1), 65-81.

ปวีณา เตือนฉาย, & วิจิตรา เตือนฉาย. (2557). อุปกรณ์การวิเคราะห์หีบกระดาก. วารสาร วิชาการ ปทุมวัน *Pathumwan Academic Journal*, 4(10), 37-47.

ปฐนิมา. (2564). กะเทาะปัญหาอาชญากรรมปี 64 ฟุ้งไม่หยุดภัยสังคมซ้ำเติมประชาชนหวังโควิด.

<https://www.thairath.co.th/scoop/theissue/2262011>

กัญญดา อันสนั่น, สุธา ภู่อธิศักดิ์, & จิรวรร ธนรัตน์. (2556). การหาปริมาณไนเตรทในเขม่าดินปืนภายในลำกล้องปืนโดยเทคนิคสเปกโตรโฟโตเมตริก (Spectrophotometric Determination of Nitrate in Gunshot Residues Obtained from the Gun Barrel). *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 13(4), 56-57.



ภาคผนวก



ตารางที่ 20 พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนเตรทช่วงความเข้มข้น 0.005-400 μM

ความเข้มข้น (μM)	พื้นที่ใต้พีคไนเตรท ($\mu\text{S}\cdot\text{min}$)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.005	0.0016	0.0006	0.0006	0.0009	0.0006
10	0.1003	0.0863	0.1386	0.1084	0.0271
15	0.1900	0.1527	0.1668	0.1698	0.0188
30	0.2992	0.3333	0.3226	0.3184	0.0174
50	0.5630	0.5301	0.5220	0.5384	0.0217
100	1.0829	1.0925	1.0963	1.0906	0.0069
200	2.1864	2.1486	2.1577	2.1642	0.0197
400	4.0537	4.0381	4.0594	4.0504	0.0110

ตารางที่ 21 พื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ช่วงความเข้มข้น 0.01-200 μM

ความเข้มข้น (μM)	พื้นที่ใต้พีคไนไตรท์ ($\mu\text{S}\cdot\text{min}$)				
	1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
0.01	0.0007	0.0004	0.0005	0.0005	0.0002
1	0.0029	0.0025	0.0028	0.0027	0.0002
3	0.0091	0.0084	0.0078	0.0084	0.0007
5	0.0136	0.0155	0.0136	0.0142	0.0011
15	0.1077	0.1011	0.1073	0.1054	0.0037
30	0.2780	0.2835	0.2869	0.2828	0.0045
100	0.8909	0.8972	0.9000	0.8960	0.0047
200	1.6274	1.6300	1.6280	1.6285	0.0014

ตารางที่ 22 พื้นที่ใต้พีคในโครมาโทแกรมของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือและปลอกกระสุนปืน

ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	พื้นที่ใต้พีคในโครมาโท (μS*min)				
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
1	blank	0.004	0.0034	0.0037	0.0037	0.0003
	หลังมือขวา	0.0107	0.006	0.0122	0.009633	0.003235
	หลังมือซ้าย	0.0125	0.0135	0.0131	0.013033	0.000503
2	blank	0.0038	0.0040	0.0030	0.0036	0.0005
	หลังมือขวา	0.0088	0.0086	0.0073	0.0082	0.0008
	หลังมือซ้าย	0.0142	0.0135	0.0148	0.0142	0.0007
3	blank	0.0041	0.0051	0.0063	0.0052	0.0011
	หลังมือขวา	0.0362	0.0348	0.0361	0.0357	0.0008
	หลังมือซ้าย	0.0145	0.0129	0.0127	0.0134	0.0010
4	blank	0.0077	0.003	0.0032	0.0046	0.0027
	หลังมือขวา	0.0276	0.0234	0.024	0.0250	0.0023
	หลังมือซ้าย	0.0161	0.0128	0.0073	0.0121	0.0044
5	blank	0.0046	0.0034	0.0042	0.0041	0.0006
	หลังมือขวา	0.0131	0.0118	0.0121	0.0123	0.0007
	หลังมือซ้าย	0.0231	0.016	0.0156	0.0182	0.0042
6	blank	0.0079	0.0056	0.0075	0.0070	0.0012
	หลังมือขวา	0.0121	0.0126	0.0102	0.0116	0.0013
	หลังมือซ้าย	0.0158	0.0144	0.0136	0.0146	0.0011
7	blank	0.0064	0.006	0.0068	0.0064	0.0004
	หลังมือขวา	0.0126	0.0111	0.0101	0.0113	0.0013
	หลังมือซ้าย	0.0176	0.0097	0.0099	0.0124	0.0045
8	blank	0.0066	0.0054	0.0054	0.0058	0.0007
	หลังมือขวา	0.0139	0.0131	0.0136	0.0135	0.0004
	หลังมือซ้าย	0.0108	0.01	0.0144	0.0117	0.0023
9	blank	0.0051	0.0047	0.0032	0.0043	0.0010

	หลังมือขวา	0.0145	0.0093	0.0035	0.0091	0.0055
	หลังมือซ้าย	0.0039	0.0084	0.0125	0.0083	0.0043
10	blank	0.0054	0.0061	0.0061	0.0059	0.0004
	หลังมือขวา	0.0105	0.0111	0.009	0.0102	0.0011
	หลังมือซ้าย	0.0184	0.0123	0.00109	0.0106	0.0088
11	ปลอกกระสุนปลอกที่1 ขนาด 9mm	1.5148	0.5752	0.5107	0.8669	0.5620
12	ปลอกกระสุนปลอกที่2 ขนาด .38	1.3072	1.299	1.3583	1.3215	0.0321
13	ปลอกกระสุนปลอกที่3 ขนาด 9mm	1.1911	1.1873	1.1868	1.1884	0.0024
14	ปลอกกระสุนปลอกที่4 ขนาด 9mm	1.0532	1.053	1.0583	1.0548	0.0030
15	ปลอกกระสุนปลอกที่5 ขนาด 9mm	0.9658	0.9669	0.9789	0.9705	0.0073
16	ปลอกกระสุนปลอกที่6 ขนาด 9mm	1.4056	1.3772	1.393	1.3919	0.0142
17	ปลอกกระสุนปลอกที่7 ขนาด .38	0.18	0.1855	0.2169	0.1941	0.0199
18	ปลอกกระสุนปลอกที่8 ขนาด 9mm	1.8347	1.8147	1.8304	1.8266	0.0105

19	ปลอกกระสุนปลอกที่9 ขนาด .22	10.577	10.5376	10.5653	10.5600	0.0202
20	ปลอกกระสุนปลอกที่10 ขนาด .45	1.1564	1.1754	1.1822	1.1713	0.0134

ตารางที่ 23 คำนวณปริมาณไนเตรทของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือและปลอกกระสุนปืน

ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	พื้นที่ใต้พีคไนเตรท ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$) *หักลบblank	ปริมาณไนเตรท (nmol) *คำนวณจาก $y = 0.4122$	ปริมาณไนเตรท (nmol) *non dilution
1	หลังมือขวา	0.0059	0.0143	0.1431
	หลังมือซ้าย	0.0093	0.0226	0.2256
2	หลังมือขวา	0.0046	0.0112	0.1116
	หลังมือซ้าย	0.0106	0.0257	0.2572
3	หลังมือขวา	0.0305	0.0741	0.7407
	หลังมือซ้าย	0.0082	0.0199	0.1989
4	หลังมือขวา	0.0204	0.0495	0.4949
	หลังมือซ้าย	0.0074	0.0180	0.1795
5	หลังมือขวา	0.0083	0.0201	0.2014
	หลังมือซ้าย	0.0142	0.0344	0.3445
6	หลังมือขวา	0.0046	0.0112	0.1116
	หลังมือซ้าย	0.0076	0.0184	0.1844
7	หลังมือขวา	0.0049	0.0119	0.1189
	หลังมือซ้าย	0.006	0.0146	0.1456
8	หลังมือขวา	0.0077	0.0187	0.1868

	หลังมือซ้าย	0.0059	0.0143	0.1431
9	หลังมือขวา	0.0048	0.0116	0.1164
	หลังมือซ้าย	0.0039	0.0095	0.0946
10	หลังมือขวา	0.0043	0.0104	0.1043
	หลังมือซ้าย	0.0047	0.0114	0.1140
11	ปลอกกระสุนปลอกที่ 1 ขนาด 9mm	0.8669	2.1321	10.6604
12	ปลอกกระสุนปลอกที่ 2 ขนาด .38	1.3215	3.2501	16.2506
13	ปลอกกระสุนปลอกที่ 3 ขนาด 9mm	1.1884	2.9228	14.6139
14	ปลอกกระสุนปลอกที่ 4 ขนาด 9mm	1.0548	2.5943	12.9714
15	ปลอกกระสุนปลอกที่ 5 ขนาด 9mm	0.9705	2.3869	11.9347
16	ปลอกกระสุนปลอกที่ 6 ขนาด 9mm	1.3772	3.3871	16.9356
17	ปลอกกระสุนปลอกที่ 7 ขนาด .38	0.1855	0.4562	4.5622
18	ปลอกกระสุนปลอกที่ 8 ขนาด 9mm	1.8347	4.5123	22.5615

19	ปลอกกระสุนปลอกที่ 9 ขนาด .22	10.577	26.0133	130.0664
20	ปลอกกระสุนปลอกที่ 10 ขนาด .45	1.1564	2.8441	14.2204

ตารางที่ 24 พื้นที่ได้ฟิคโนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือและปลอกกระสุนปืน

ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	พื้นที่ได้ฟิคโนไตรท์ ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$)				
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
1	blank	0.0001	0.0001	0.0002	0.0001	0.0001
	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
2	blank	0.0003	0.0003	0.0005	0.0004	0.0001
	หลังมือขวา	0.0010	0.0005	0.0004	0.0006	0.0003
	หลังมือซ้าย	0.0019	0.0018	0.0013	0.0017	0.0003
3	blank	0.0003	-	0.0001	0.0002	0.0001
	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
4	blank	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.0001
	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
5	blank	0.0006	0.0005	0.0003	0.0005	0.0002
	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
6	blank	-	-	-	-	-
	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
7	blank	-	-	-	-	-

	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
8	blank	-	-	-	-	-
	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
9	blank	-	-	-	-	-
	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
10	blank	-	-	-	-	-
	หลังมือขวา	-	-	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-	-	-
11	ปลอกกระสุนปลอกที่1 ขนาด 9mm	0.8705	0.3152	0.2878	0.4912	0.3288
12	ปลอกกระสุนปลอกที่2 ขนาด .38	0.4863	0.4845	0.5053	0.4920	0.0115
13	ปลอกกระสุนปลอกที่3 ขนาด 9mm	0.3698	0.3729	0.3728	0.3718	0.0018
14	ปลอกกระสุนปลอกที่4 ขนาด 9mm	0.461	0.4646	0.4665	0.4640	0.0028
15	ปลอกกระสุนปลอกที่5 ขนาด 9mm	0.2814	0.284	0.2927	0.2860	0.0059
16	ปลอกกระสุนปลอกที่6 ขนาด 9mm	0.526	0.5171	0.5202	0.5211	0.0045

17	ปลอกกระสุนปดกที่7 ขนาด .38	0.4058	0.044	0.3848	0.2782	0.2031
18	ปลอกกระสุนปดกที่8 ขนาด 9mm	1.2732	1.1292	1.273	1.2251	0.0831
19	ปลอกกระสุนปดกที่9 ขนาด .22	2.8647	2.9063	2.9313	2.9008	0.0336
20	ปลอกกระสุนปดกที่10 ขนาด .45	0.3614	0.369	0.3673	0.3659	0.0040

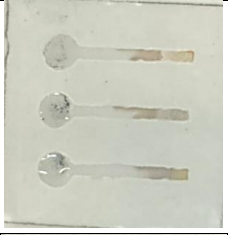
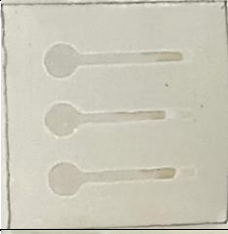
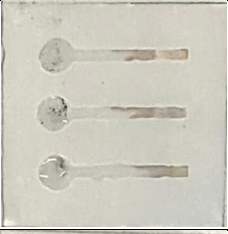
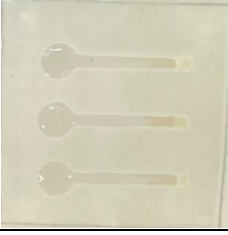
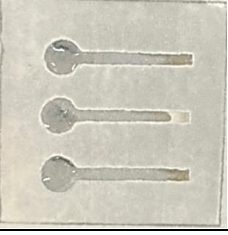
ตารางที่ 25 คำนวนปริมาณไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากบริเวณหลังมือและปลอกกระสุนปืน

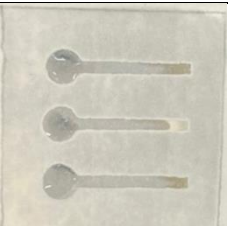
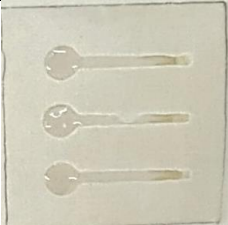
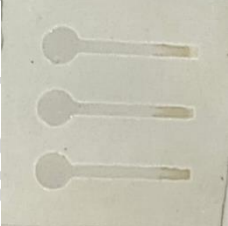
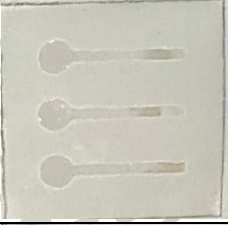
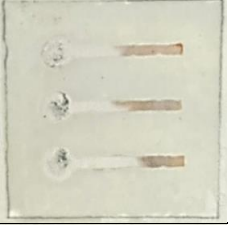
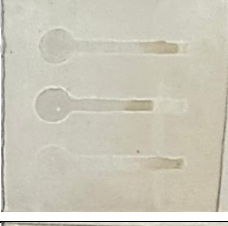
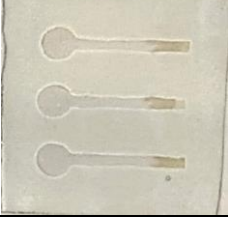
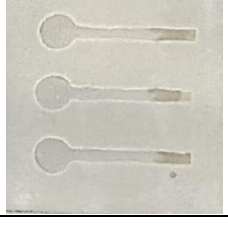
ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	พื้นที่ใต้พีคไนไตรท์ ($\mu\text{S} \cdot \text{min}$) *หักลบblank	ปริมาณไนไตรท์ (nmol) *คำนวณจาก $y = 0.3327X$	ปริมาณไนไตรท์ (nmol) *non dilution
1	หลังมือขวา	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-
2	หลังมือขวา	0.0002	0.0006	0.0060
	หลังมือซ้าย	0.0013	0.0039	0.0390
3	หลังมือขวา	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-
4	หลังมือขวา	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-
5	หลังมือขวา	-	-	-

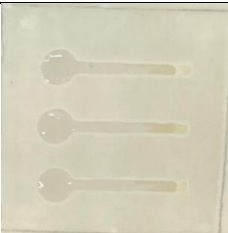
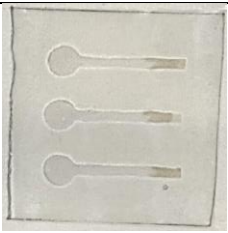
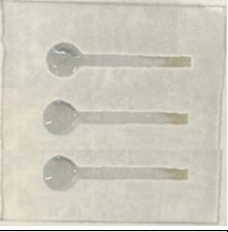
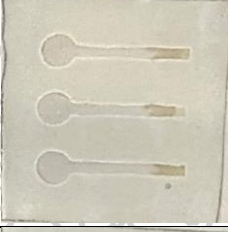
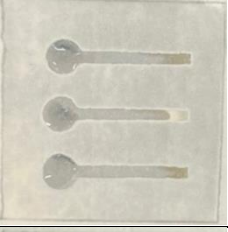
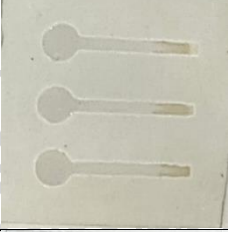
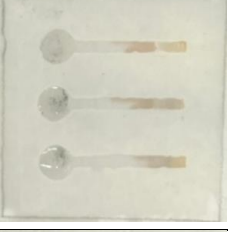
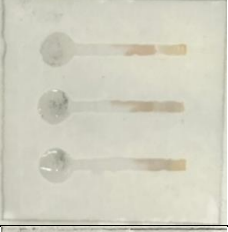
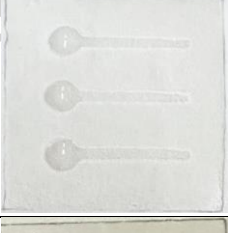
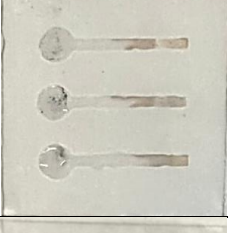
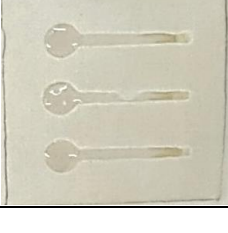
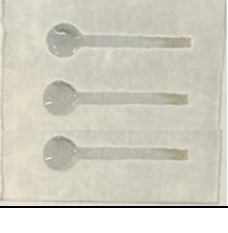
	หลังมือซ้าย	-	-	-
6	หลังมือขวา	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-
7	หลังมือขวา	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-
8	หลังมือขวา	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-
9	หลังมือขวา	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-
10	หลังมือขวา	-	-	-
	หลังมือซ้าย	-	-	-
11	ปลอกกระดูกสันหลังที่ 1 ขนาด 9mm	0.4912	1.4763	7.3815
12	ปลอกกระดูกสันหลังที่ 2 ขนาด .38	0.4920	1.4789	7.3945
13	ปลอกกระดูกสันหลังที่ 3 ขนาด 9mm	0.3718	1.1176	5.5881
14	ปลอกกระดูกสันหลังที่ 4 ขนาด 9mm	0.4640	1.3948	6.9738
15	ปลอกกระดูกสันหลังที่ 5 ขนาด 9mm	0.2860	0.8597	4.2987
16	ปลอกกระดูกสันหลังที่ 6 ขนาด 9mm	0.5211	1.5663	7.8314

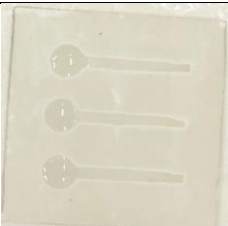
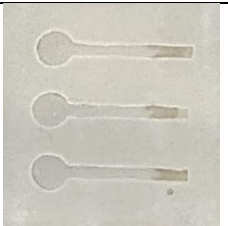
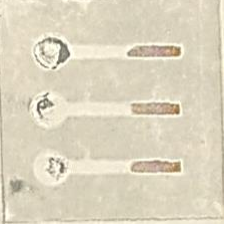
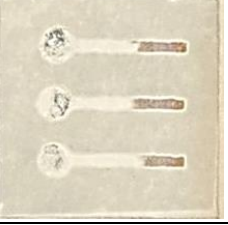
17	ปลอกกระสุนปลอกที่ 7 ขนาด .38	0.2782	0.8362	8.3619
18	ปลอกกระสุนปลอกที่ 8 ขนาด 9mm	1.2251	3.6823	18.4115
19	ปลอกกระสุนปลอกที่ 9 ขนาด .22	2.9008	8.7190	43.5948
20	ปลอกกระสุนปลอกที่ 10 ขนาด .45	0.3659	1.0998	5.4989

ตารางที่ 26 ภาพอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางไนเตรทและไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืน บริเวณหลังมือทั้งสองข้าง

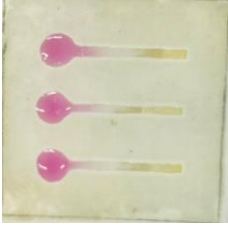
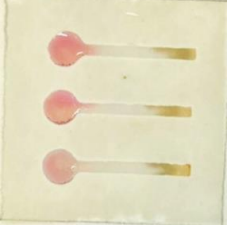
ลำดับที่	บริเวณที่วิเคราะห์	อุปกรณ์ตรวจวัด ระยะทางของไนไตรท์	อุปกรณ์ตรวจวัด ระยะทางของไนเตรท
1	หลังมือขวา		
	หลังมือซ้าย		
2	หลังมือขวา		

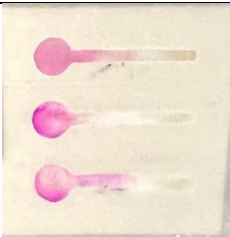
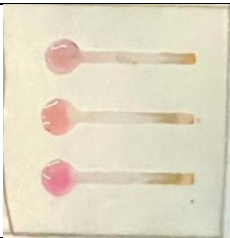
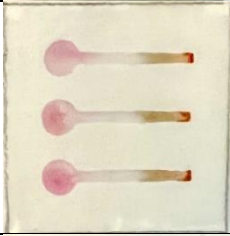
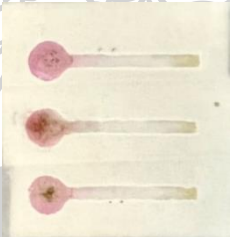
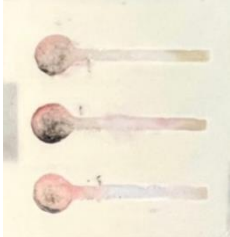
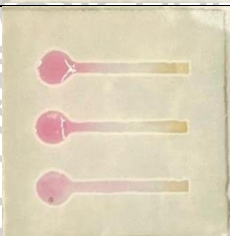
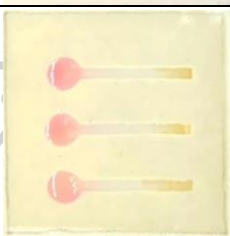
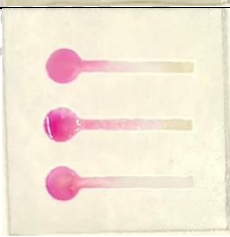
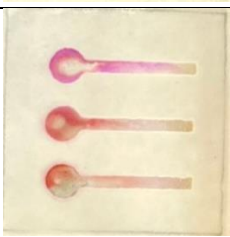
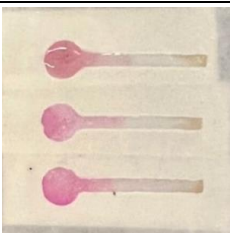
	หลังมือซ้าย		
3	หลังมือขวา		
	หลังมือซ้าย		
4	หลังมือขวา		
	หลังมือซ้าย		
5	หลังมือขวา		
	หลังมือซ้าย		

6	หลังมือขวา		
	หลังมือซ้าย		
7	หลังมือขวา		
	หลังมือซ้าย		
8	หลังมือขวา		
	หลังมือซ้าย		
9	หลังมือขวา		

	หลังมือซ้าย		
10	หลังมือขวา		
	หลังมือซ้าย		

ตารางที่ 27 ภาพอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางในไตรทและในไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืน

ลำดับที่	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	อุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางของไนไตรท์	อุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางของไนเตรท
1	ปลอกกระสุนปลอกที่ 1 ขนาด 9mm		
2	ปลอกกระสุนปลอกที่ 2 ขนาด .38		
3	ปลอกกระสุนปลอกที่ 3 ขนาด 9mm		

4	ปลอกกระสุนปดกที่4 ขนาด 9mm		
5	ปลอกกระสุนปดกที่5 ขนาด 9mm		
6	ปลอกกระสุนปดกที่6 ขนาด 9mm		
7	ปลอกกระสุนปดกที่7 ขนาด .38		
8	ปลอกกระสุนปดกที่8 ขนาด 9mm		
9	ปลอกกระสุนปดกที่9 ขนาด .22		
10	ปลอกกระสุนปดกที่10 ขนาด .45		

ตารางที่ 28 ค่าระยะทางปริมาณไนเตรทของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืน
บนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ

ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์ ไนเตรท	ค่าระยะทางสีชมพูแดง (CM)				
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
1	ปลอกกระสุนปลอกที่1 ขนาด 9mm	0.6	0.9	1.0	0.83	0.21
2	ปลอกกระสุนปลอกที่2 ขนาด .38	0.8	0.9	0.8	0.83	0.06
3	ปลอกกระสุนปลอกที่3 ขนาด 9mm	0.9	0.8	0.8	0.83	0.06
4	ปลอกกระสุนปลอกที่4 ขนาด 9mm	0.9	0.8	0.7	0.80	0.10
5	ปลอกกระสุนปลอกที่5 ขนาด 9mm	1.2	0.6	0.7	0.83	0.32
6	ปลอกกระสุนปลอกที่6 ขนาด 9mm	1.0	0.7	0.8	0.83	0.15
7	ปลอกกระสุนปลอกที่7 ขนาด .38	0.6	0.7	1.0	0.77	0.21
8	ปลอกกระสุนปลอกที่8 ขนาด 9mm	1.0	0.7	0.9	0.87	0.15
9	ปลอกกระสุนปลอกที่9 ขนาด .22	2.2	1.3	1.5	1.67	0.47
10	ปลอกกระสุนปลอกที่10 ขนาด .45	0.6	0.8	0.9	0.77	0.15

ตารางที่ 29 ค่าระยะทางปริมาณไนโตรเจนของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืน
บนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ

ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์ ไนโตรเจน	ค่าระยะทางสีชมพูแดง (CM)				
		1	2	3	ค่าเฉลี่ย	SD
1	ปลอกกระสุนปลอกที่1 ขนาด 9mm	1.4	1.2	1.3	1.30	0.10
2	ปลอกกระสุนปลอกที่2 ขนาด .38	1.2	1.2	1.1	1.17	0.06
3	ปลอกกระสุนปลอกที่3 ขนาด 9mm	1.1	1.4	1.2	1.23	0.15
4	ปลอกกระสุนปลอกที่4 ขนาด 9mm	1.5	1.0	1.5	1.33	0.29
5	ปลอกกระสุนปลอกที่5 ขนาด 9mm	0.9	1.1	1.2	1.07	0.15
6	ปลอกกระสุนปลอกที่6 ขนาด 9mm	1.3	1.2	1.4	1.30	0.10
7	ปลอกกระสุนปลอกที่7 ขนาด .38	1.3	1.2	1.4	1.30	0.10
8	ปลอกกระสุนปลอกที่8 ขนาด 9mm	1.3	1.2	2.0	1.50	0.44
9	ปลอกกระสุนปลอกที่9 ขนาด .22	1.7	2.2	1.5	1.80	0.36
10	ปลอกกระสุนปลอกที่ 10 ขนาด .45	1.3	1.3	1.2	1.27	0.06

ตารางที่ 30 คำนวณปริมาณไนเตรทของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนบนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาษ

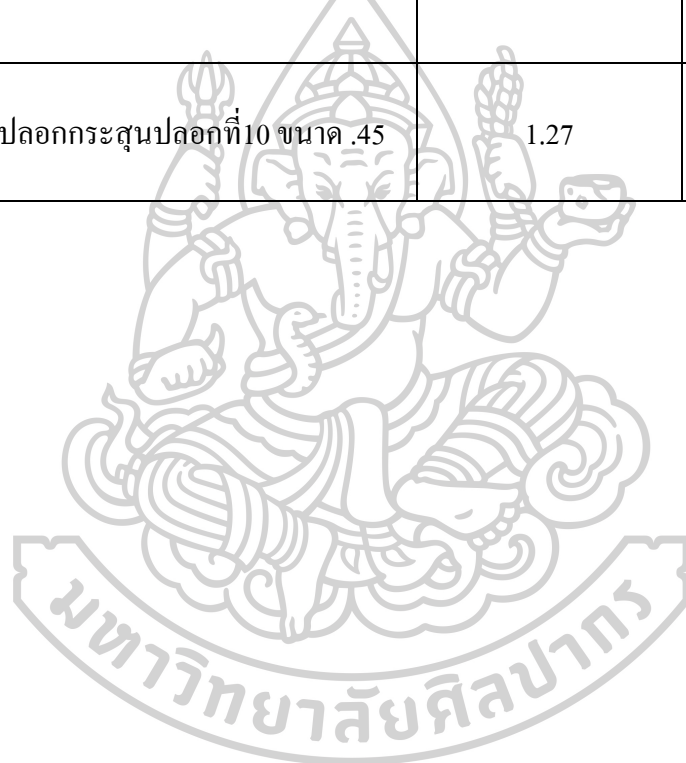
ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ปริมาณสาร (nmol)	
		ระยะทางเฉลี่ย (n=3)	ไนเตรท $y = 0.0076x + 0.73$
1	ปลอกกระสุนปลอกที่1 ขนาด 9mm	0.83	13.60
2	ปลอกกระสุนปลอกที่2 ขนาด .38	0.83	13.60
3	ปลอกกระสุนปลอกที่3 ขนาด 9mm	0.83	13.60
4	ปลอกกระสุนปลอกที่4 ขนาด 9mm	0.80	9.21
5	ปลอกกระสุนปลอกที่5 ขนาด 9mm	0.83	13.60
6	ปลอกกระสุนปลอกที่6 ขนาด 9mm	0.83	13.60
7	ปลอกกระสุนปลอกที่7 ขนาด .38	0.77	4.82
8	ปลอกกระสุนปลอกที่8 ขนาด 9mm	0.87	17.98

9	ปลอกกระสุนปืนที่9 ขนาด .22	1.67	123.25
10	ปลอกกระสุนปืนที่10 ขนาด .45	0.77	4.82

ตารางที่ 31 คำนวณปริมาณไนไตรท์ของสารละลายตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนปืนบนอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบกระดาศ

ลำดับ	ตัวอย่างที่วิเคราะห์	ปริมาณสาร (nmol)	
		ระยะทางเฉลี่ย (n=3)	ไนไตรท์ $y = 0.0438x + 1.02$
1	ปลอกกระสุนปืนที่1 ขนาด 9mm	1.30	6.39
2	ปลอกกระสุนปืนที่2 ขนาด .38	1.17	3.35
3	ปลอกกระสุนปืนที่3 ขนาด 9mm	1.23	4.87
4	ปลอกกระสุนปืนที่4 ขนาด 9mm	1.33	7.15
5	ปลอกกระสุนปืนที่5 ขนาด 9mm	1.07	1.07
6	ปลอกกระสุนปืนที่6 ขนาด 9mm	1.30	6.39

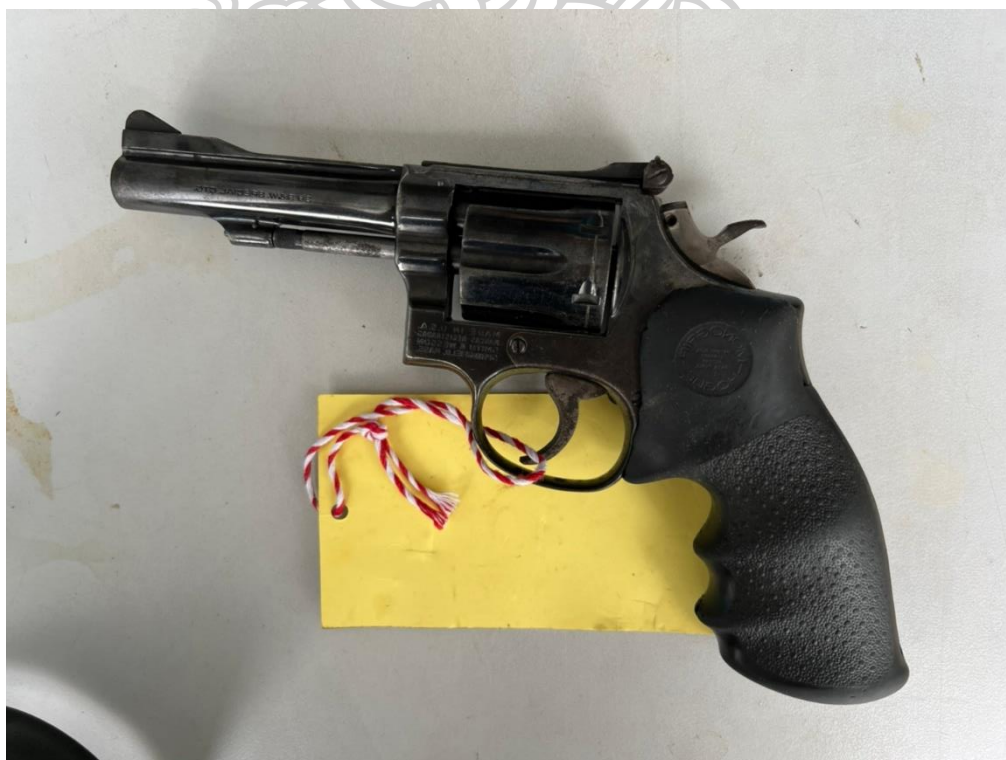
7	ปลอกกระสุนปลอกที่7 ขนาด .38	1.30	6.39
8	ปลอกกระสุนปลอกที่8 ขนาด 9mm	1.50	10.96
9	ปลอกกระสุนปลอกที่9 ขนาด .22	1.80	17.81
10	ปลอกกระสุนปลอกที่10 ขนาด .45	1.27	5.63



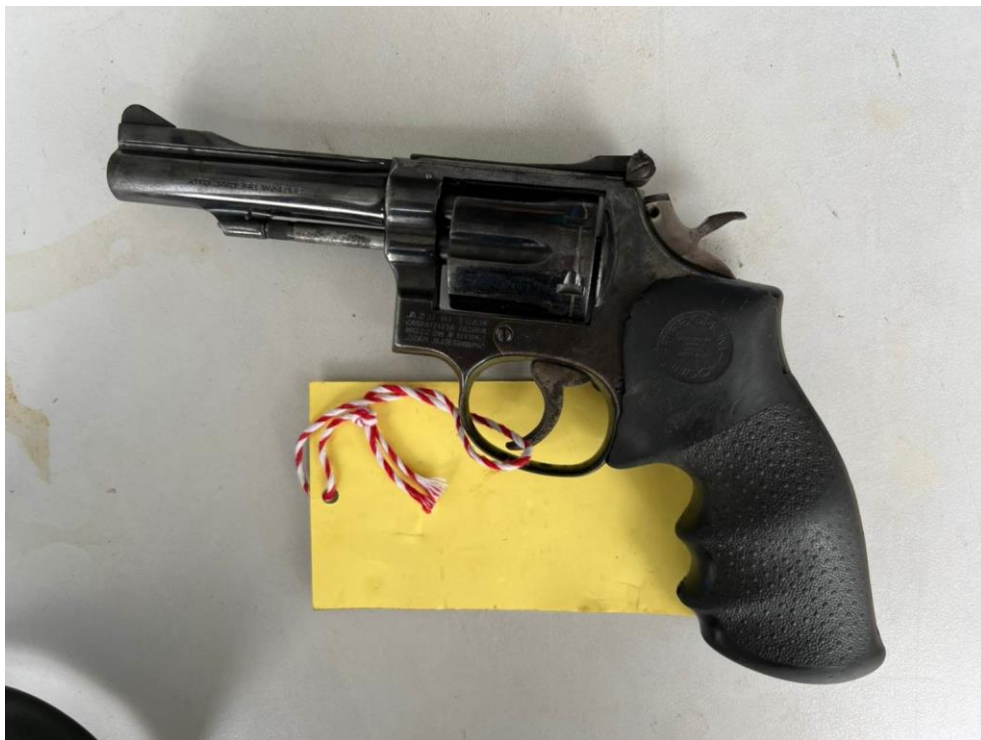




ภาพที่ 27 ตัวอย่างที่ 1.1 เป็นพกอัตโนมัติ Sig Sauer รุ่น P938 ขนาด 9mm Luger



ภาพที่ 28 ตัวอย่างที่ 2 เป็นพกมือ Smith & Wesson รุ่น 15-3 ขนาด .38 (Special)



ภาพที่ 29 ตัวอย่างที่3 ปืนพกอัตโนมัติ Sigsaver รุ่น P320SP ขนาด 9mm Luger



ภาพที่ 30 ตัวอย่างที่4 ปืนพกอัตโนมัติ Glock รุ่น 19 ขนาด 9mm Luger



ภาพที่ 31 ตัวอย่างที่ 5 ปืนพกอัตโนมัติ CZ รุ่น 75 COMPACT ขนาด 9mm Luger



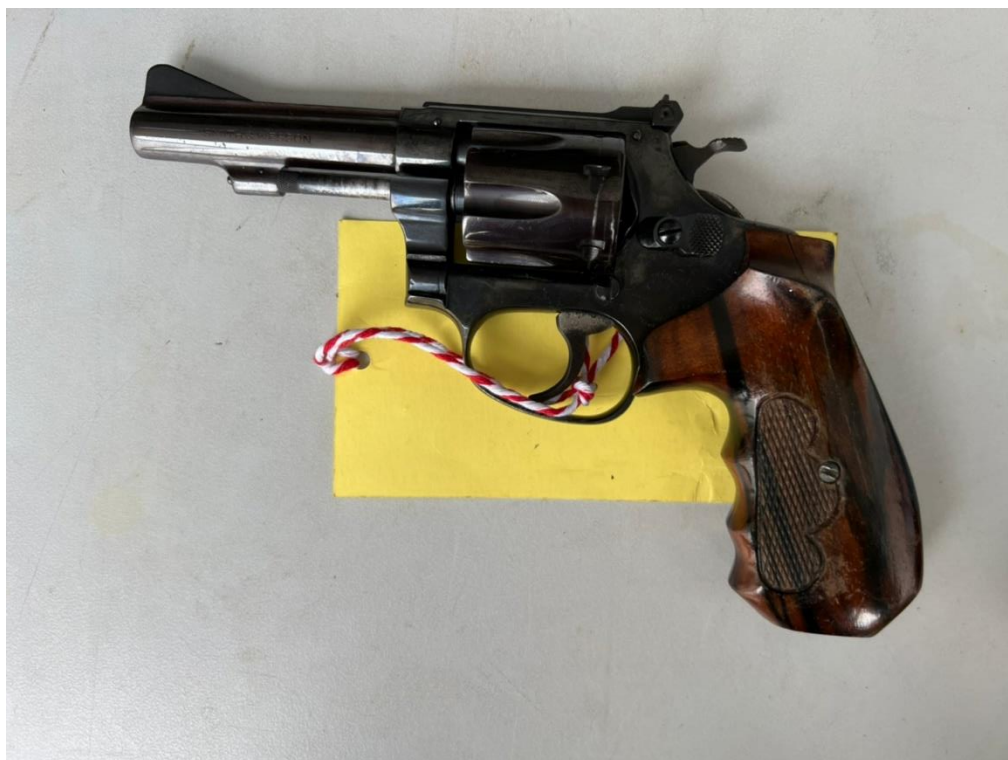
ภาพที่ 32 ตัวอย่างที่ 6 ปืนพกอัตโนมัติ Smith & Wesson รุ่น 5906TSW ขนาด 9mm Luger



ภาพที่ 33 ตัวอย่างที่7 ปืนพกรีวอลเวอร์ COLT รุ่น Detective special ขนาด .38 (Special)



ภาพที่ 34 ตัวอย่างที่8 ปืนพกอัตโนมัติ Sig Sauer รุ่น SP2022 ขนาด 9mm Luger



ภาพที่ 35 ตัวอย่างที่9 ปืนพกรีโวลเวอร์ Smith & Wesson รุ่น 51 ขนาด .22 Magnum



ภาพที่ 36 ตัวอย่างที่10 ปืนพกอัตโนมัติ Glock รุ่น 21 ขนาด .45 ACP

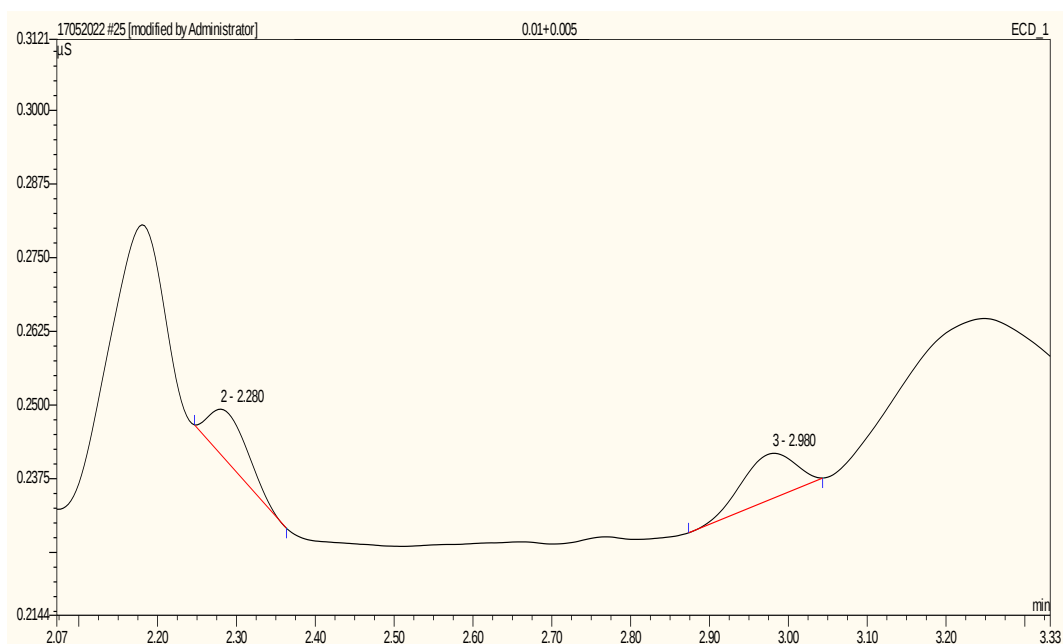


ภาพที่ 39 เตรียมตัวอย่างเขม่าดินปืนเพื่อนำไปสกัด

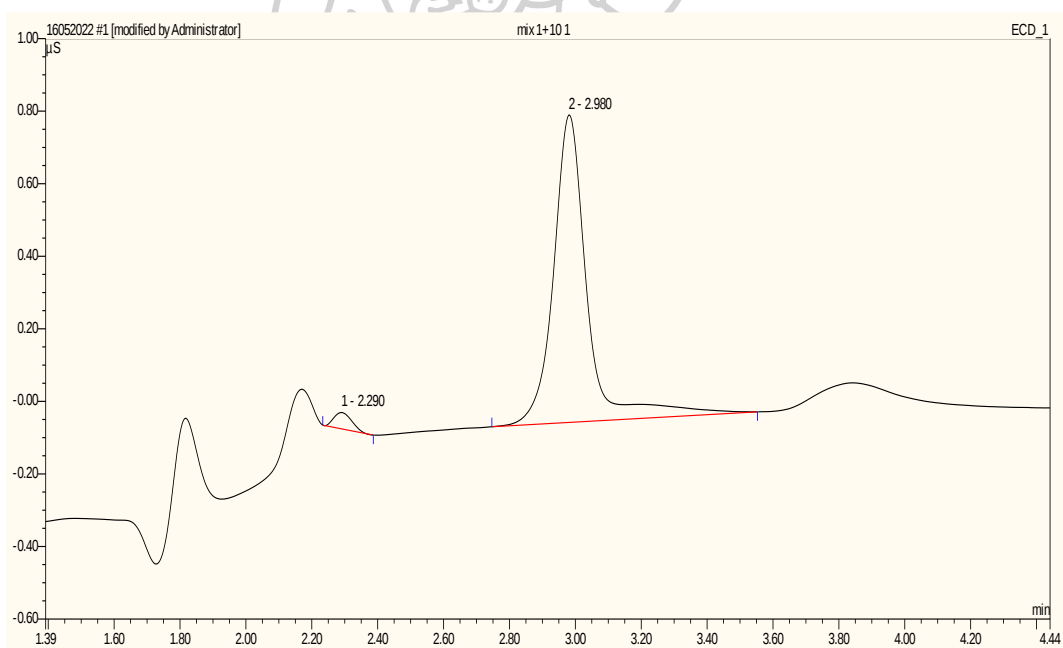


ภาคผนวก ค โครมาโตแกรมของสารละลายมาตรฐานไนเตรทและไนไตรท์

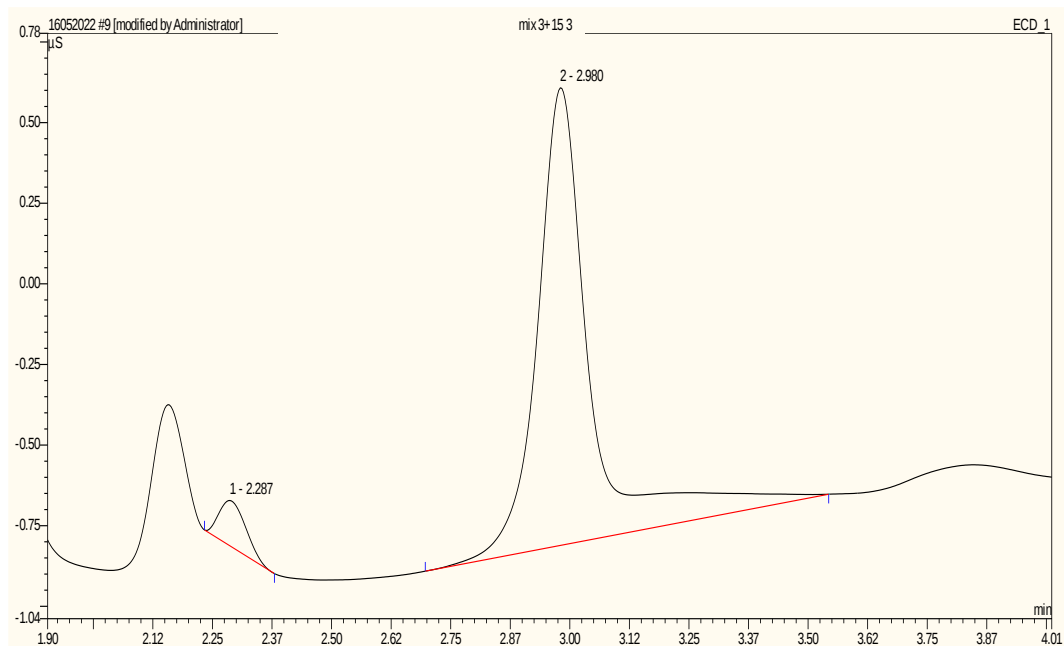




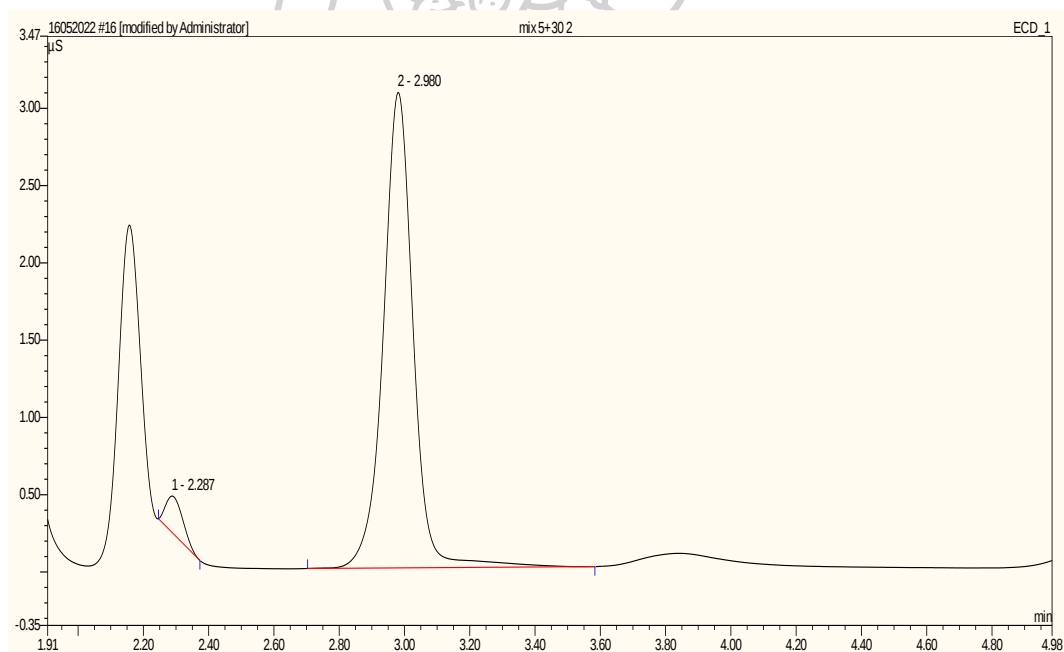
ภาพที่ 40 โครมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานในไดรต์ 0.01 μM และไนเตรท 0.005 μM



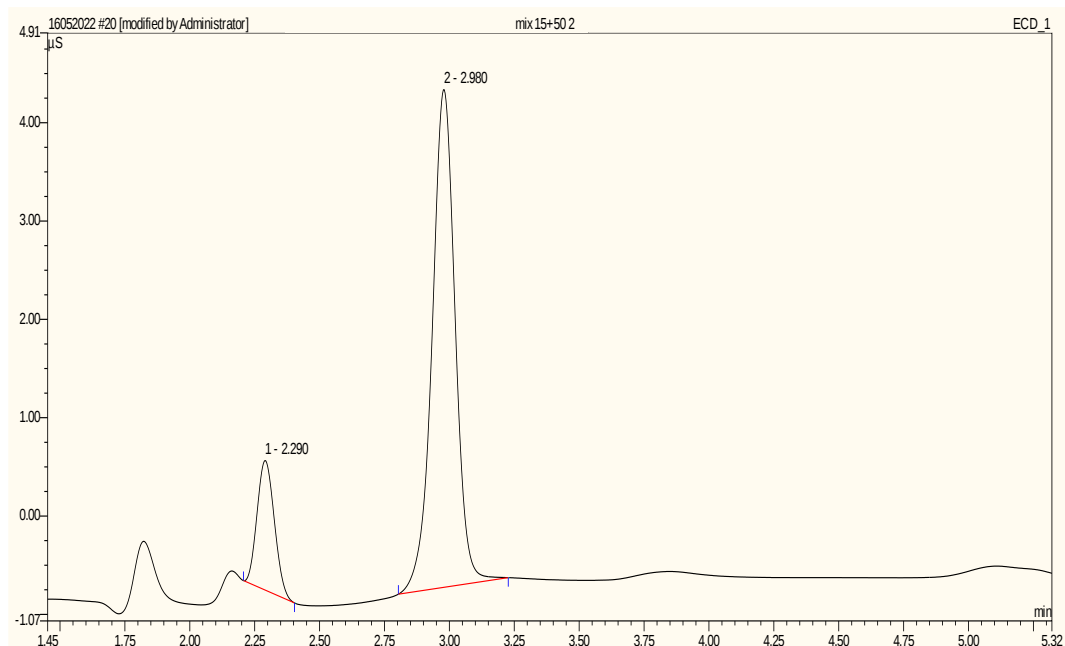
ภาพที่ 41 โครมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานในไดรต์ 1 μM และไนเตรท 10 μM



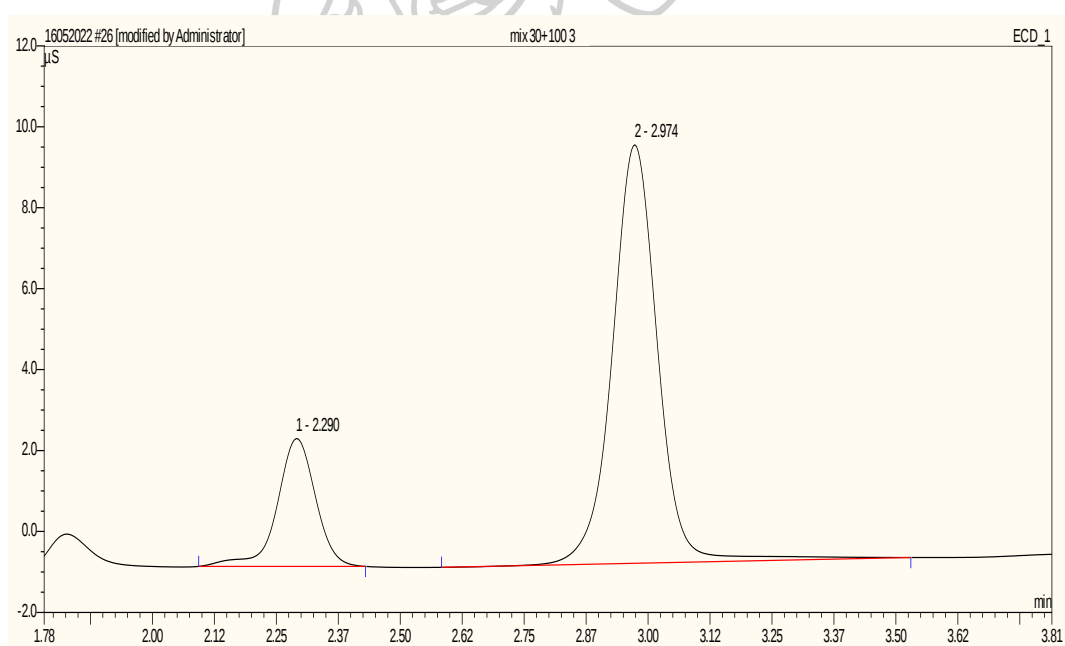
ภาพที่ 42 โครมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ 3 μ M และไนเตรท 15 μ M



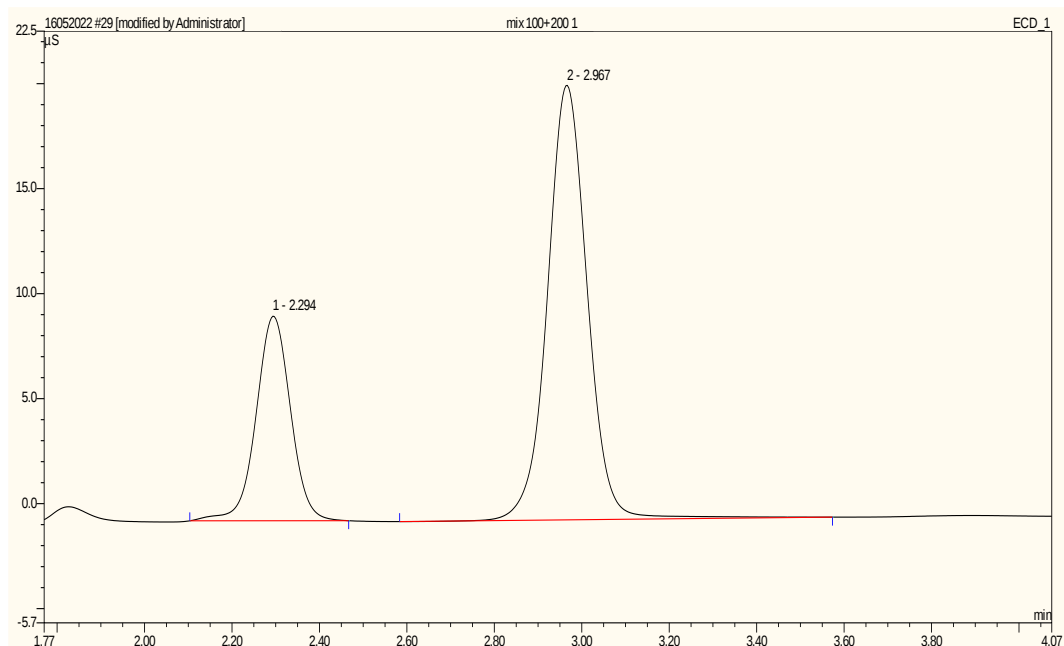
ภาพที่ 43 โครมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ 5 μ M และไนเตรท 30 μ M



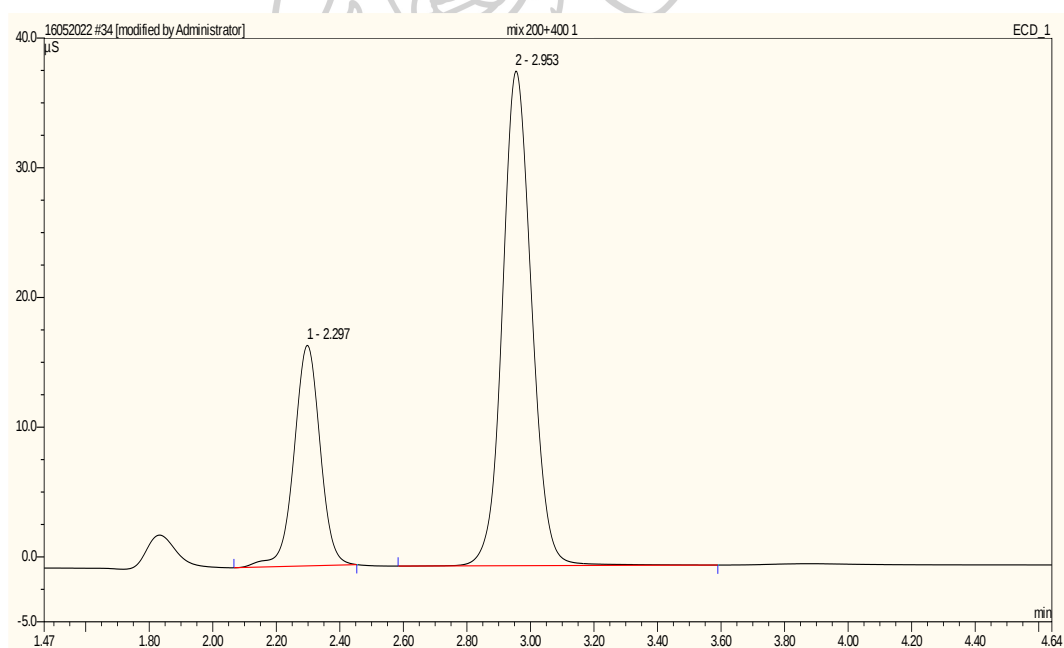
ภาพที่ 44 โครมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ 15 μ M และไนเตรท 50 μ M



ภาพที่ 45 โครมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ 30 μ M และไนเตรท 100 μ M



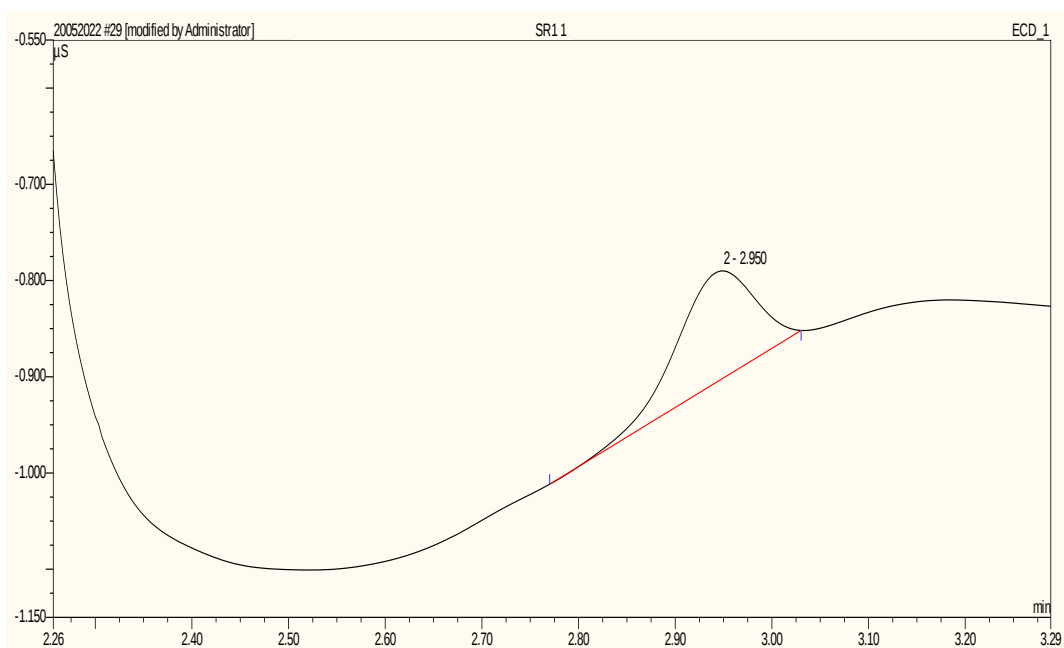
ภาพที่ 46 โครมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานในไตรท์ 100 μM และไนเตรท 200 μM



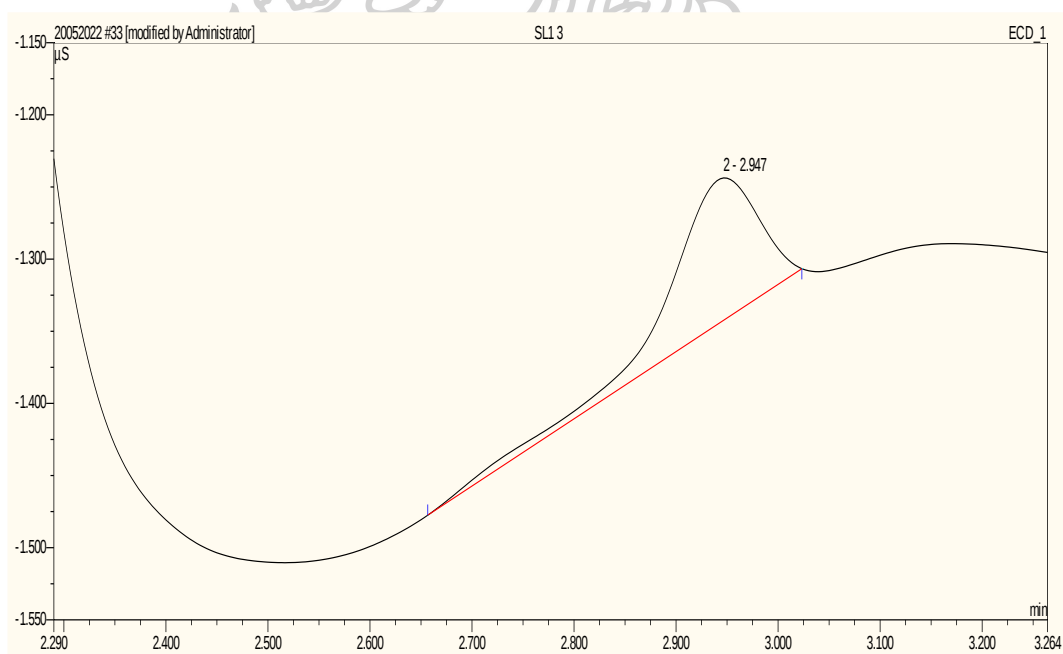
ภาพที่ 47 โครมาโตแกรมสารละลายมาตรฐานในไตรท์ 200 μM และไนเตรท 400 μM

ภาคผนวก ง โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนบริเวณมือและปลอกกระสุน

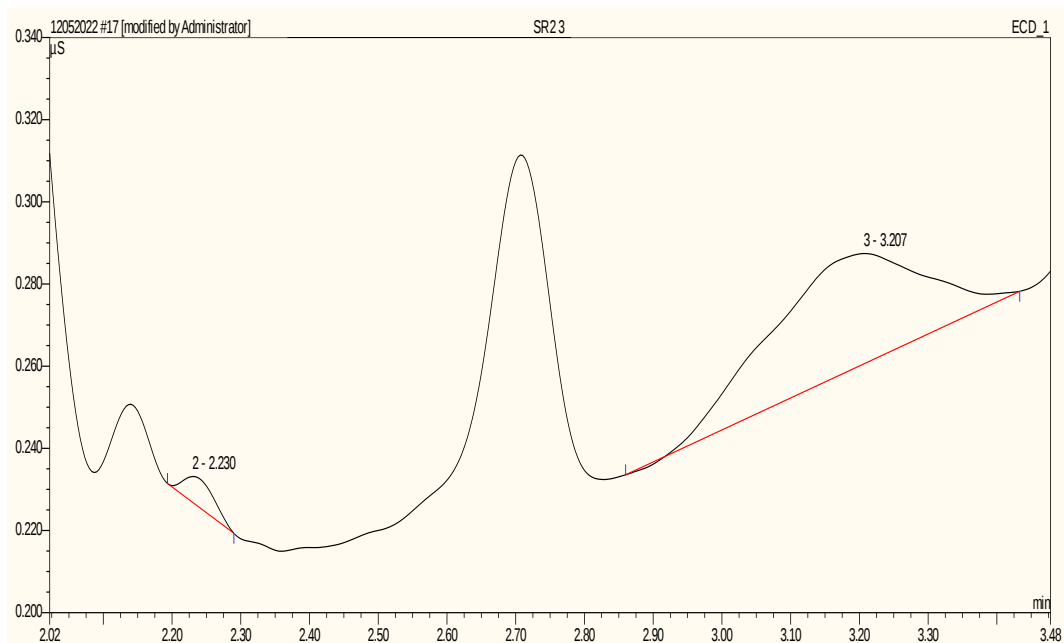




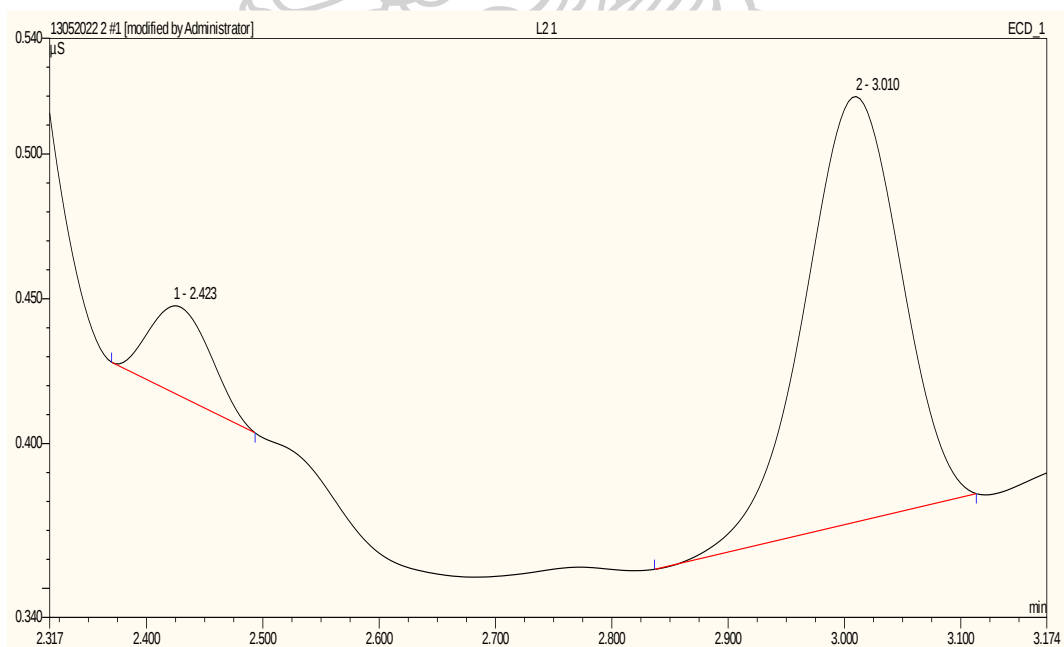
ภาพที่ 48 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 1 บริเวณมือขวา



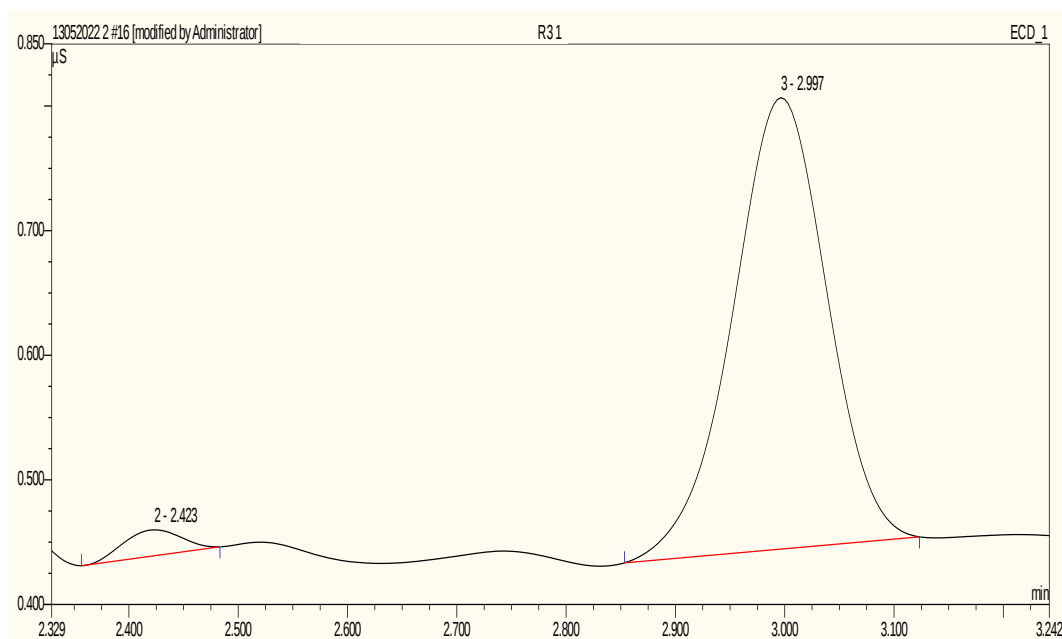
ภาพที่ 49 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 1 บริเวณมือซ้าย



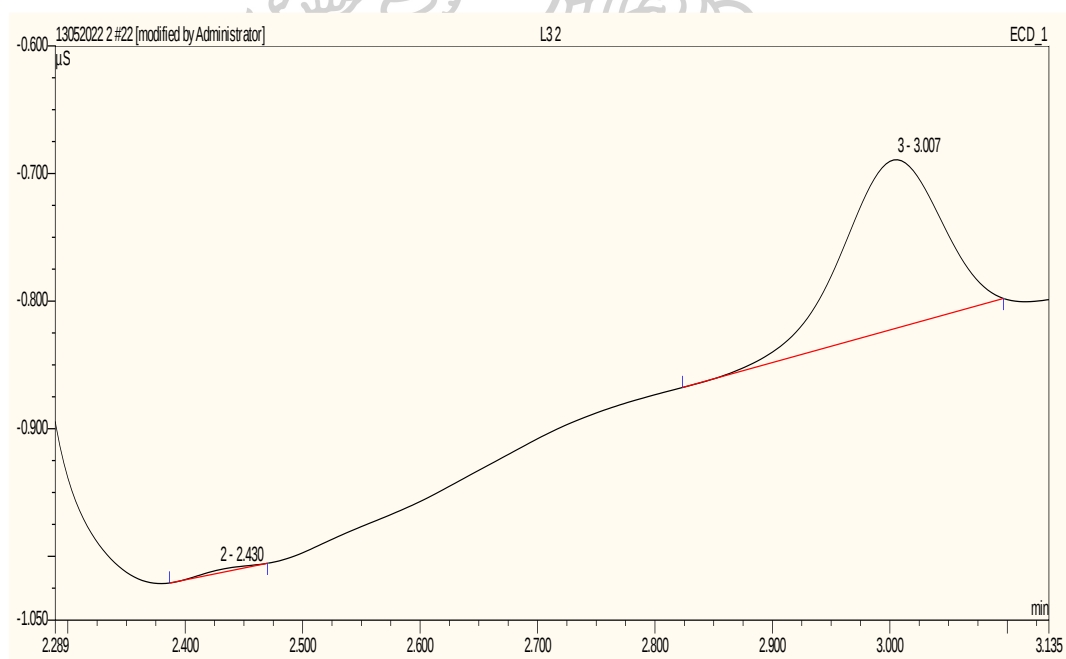
ภาพที่ 50 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 2 บริเวณมือขวา



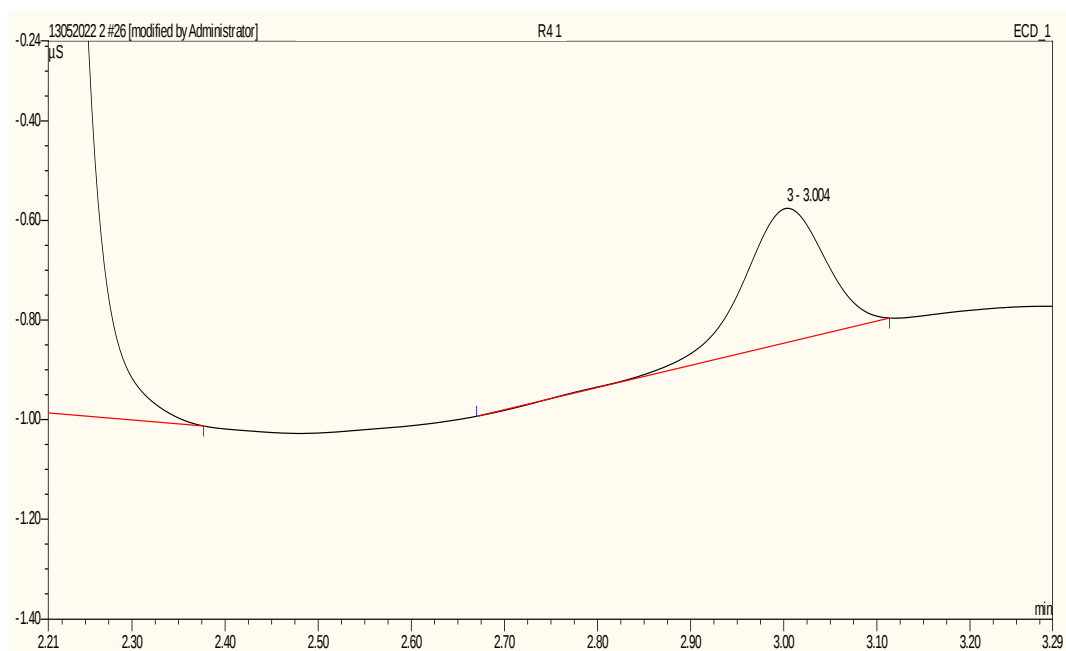
ภาพที่ 51 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 2 บริเวณมือซ้าย



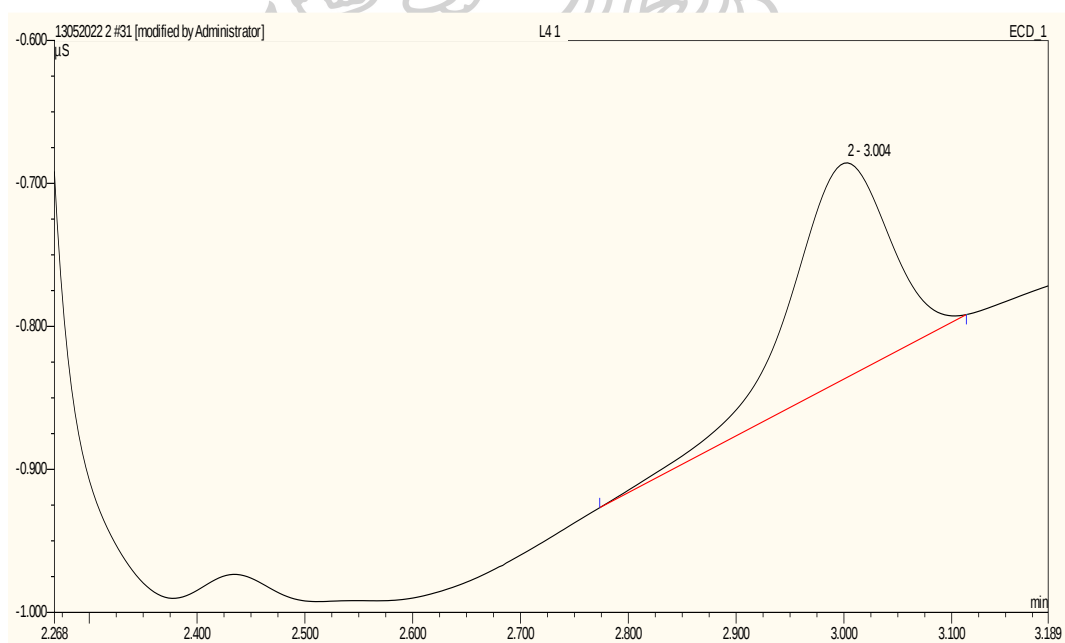
ภาพที่ 52 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 3 บริเวณมือขวา



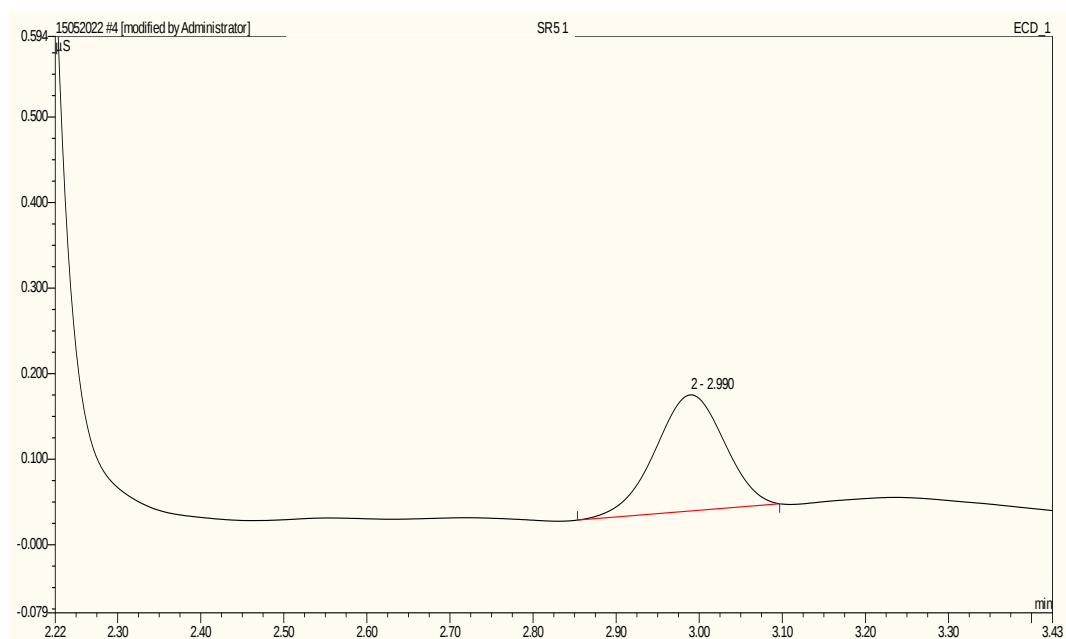
ภาพที่ 53 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 3 บริเวณมือซ้าย



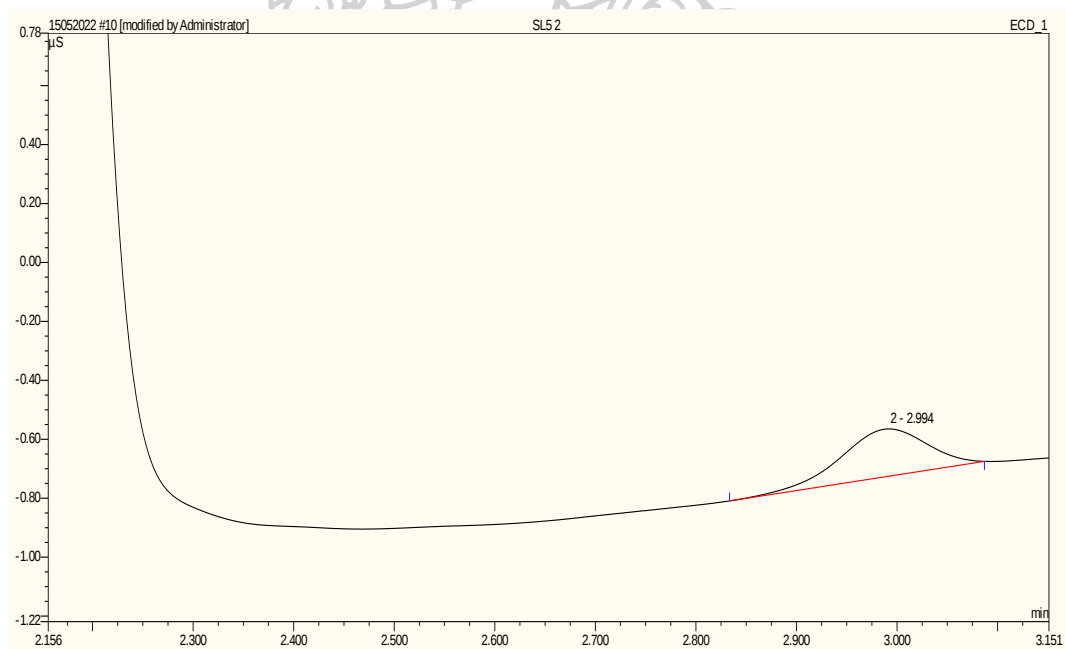
ภาพที่ 54 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 4 บริเวณมือขวา



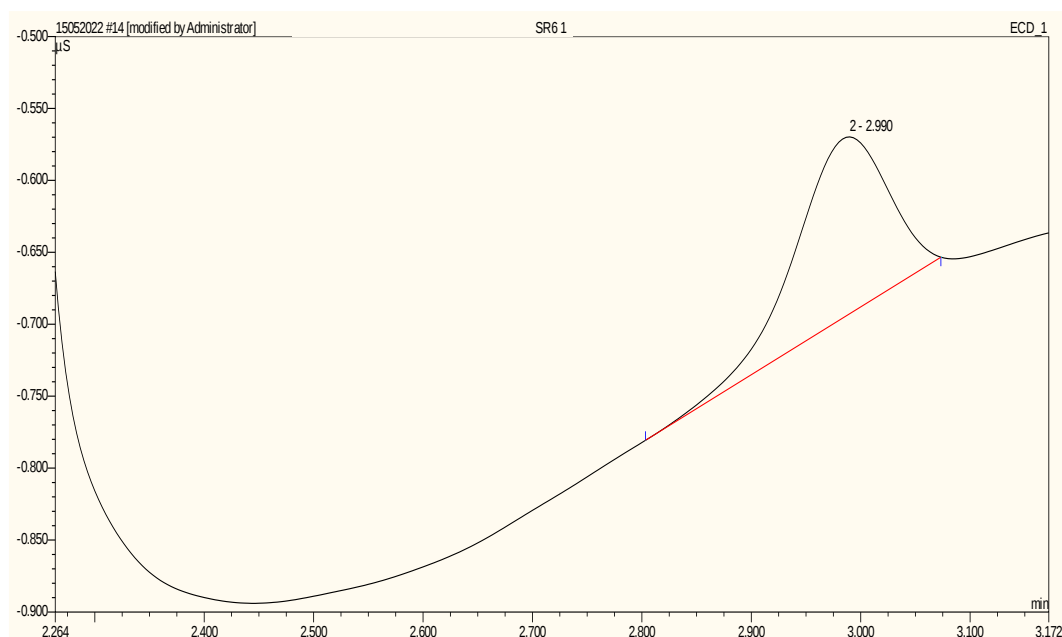
ภาพที่ 55 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 4 บริเวณมือซ้าย



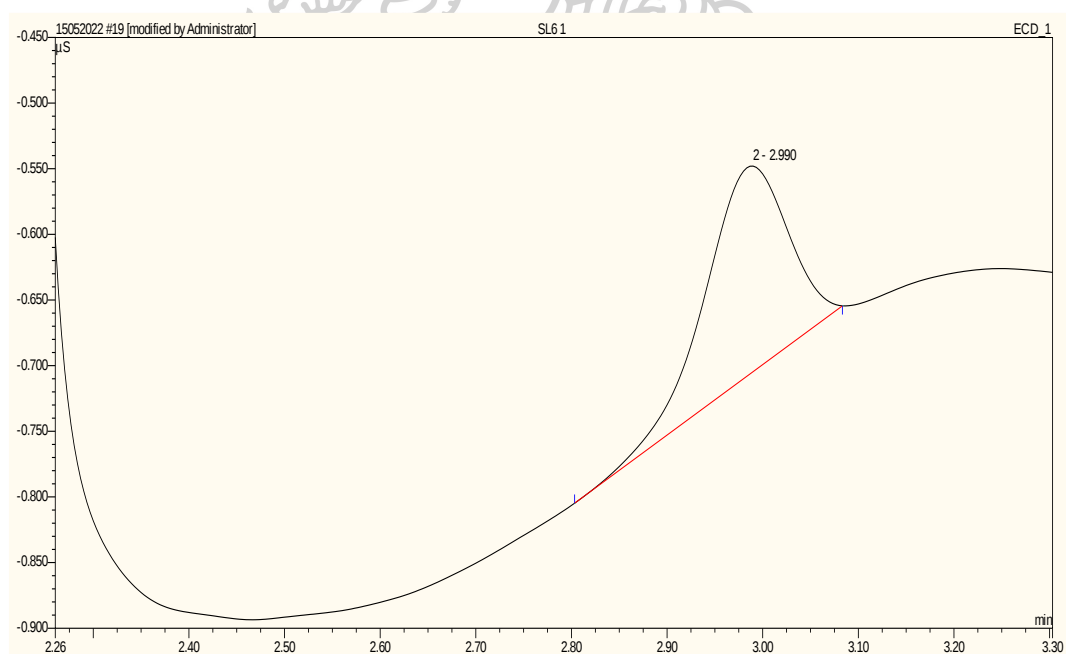
ภาพที่ 56 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 5 บริเวณมือขวา



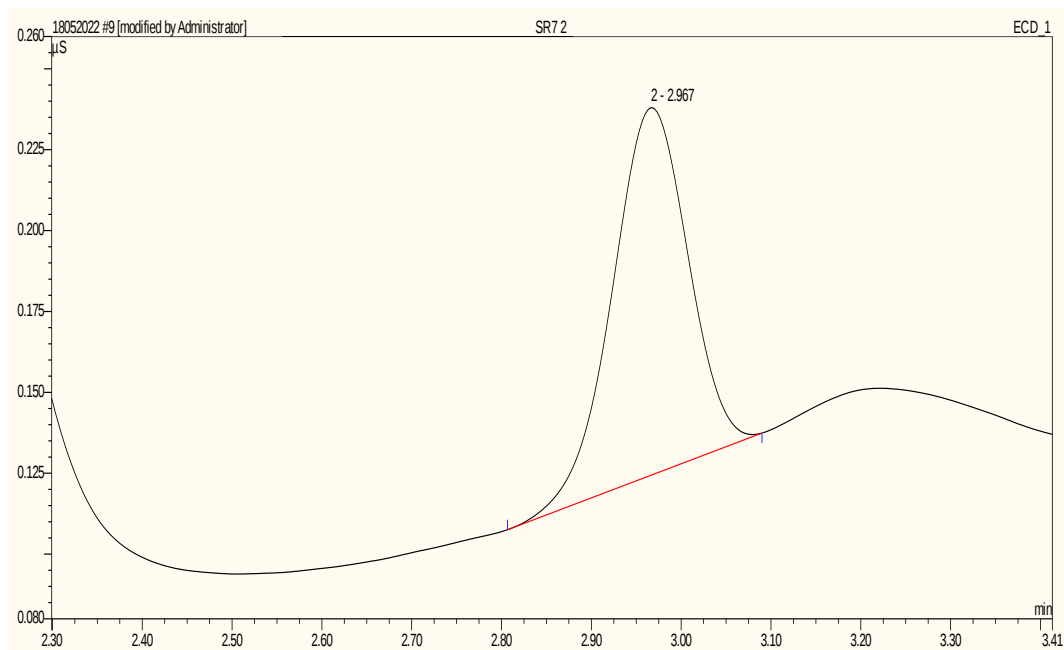
ภาพที่ 57 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 5 บริเวณมือซ้าย



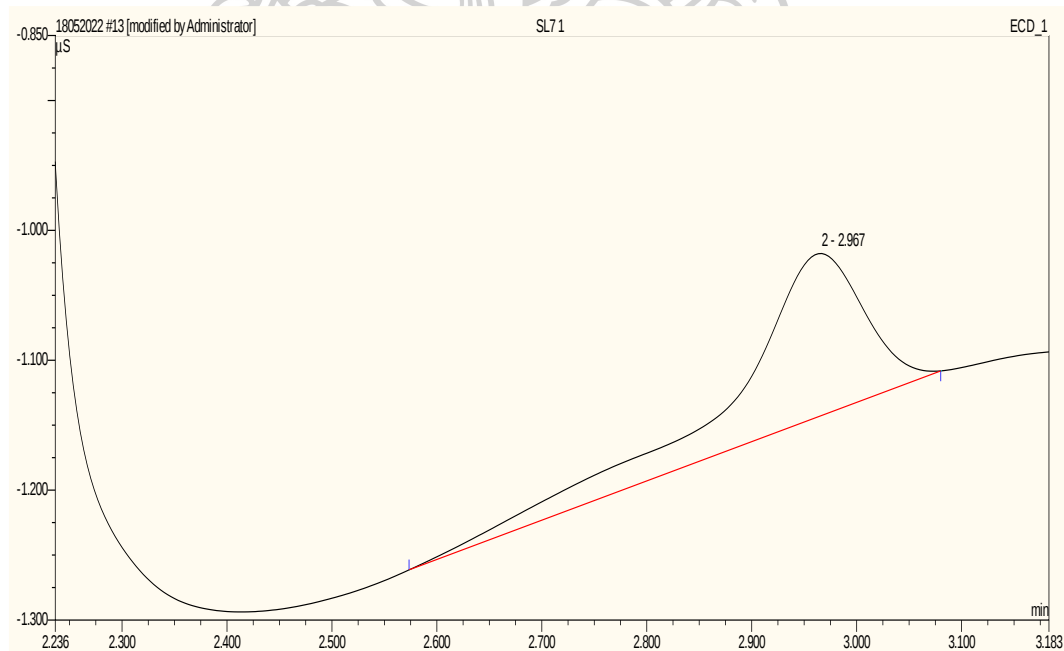
ภาพที่ 58 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 6 บริเวณมือขวา



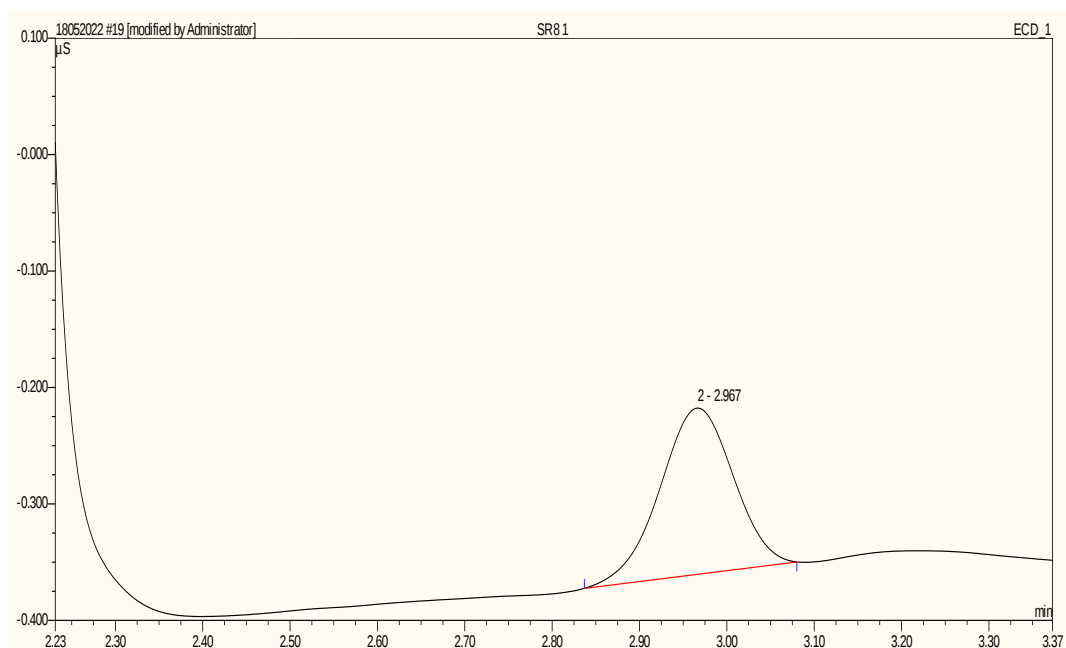
ภาพที่ 59 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 6 บริเวณมือซ้าย



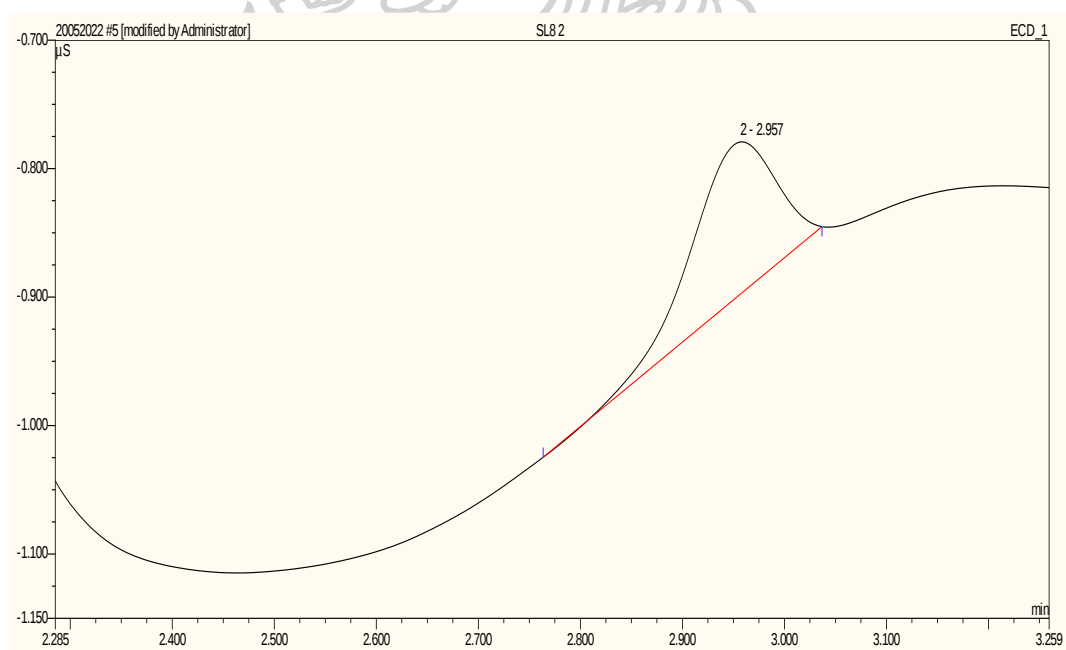
ภาพที่ 60 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 7 บริเวณมือขวา



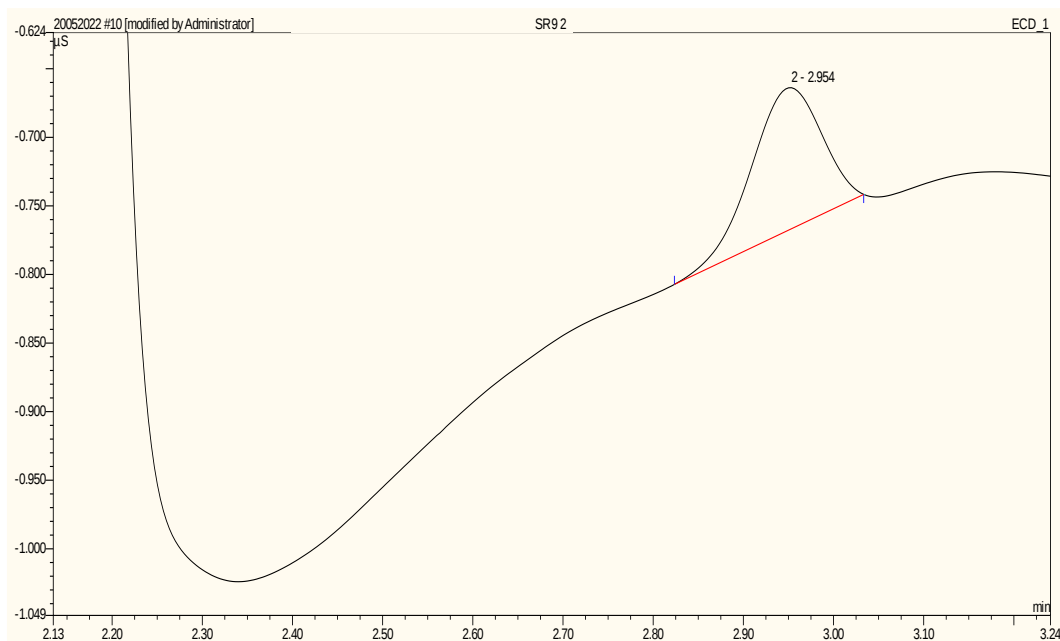
ภาพที่ 61 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 7 บริเวณมือซ้าย



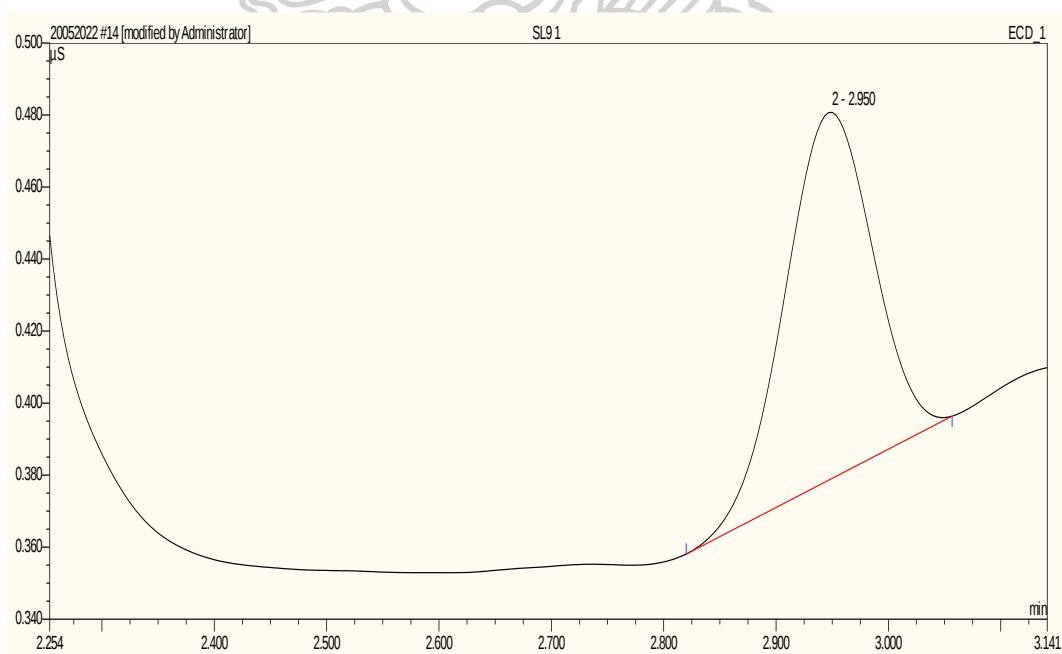
ภาพที่ 62 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 8 บริเวณมือขวา



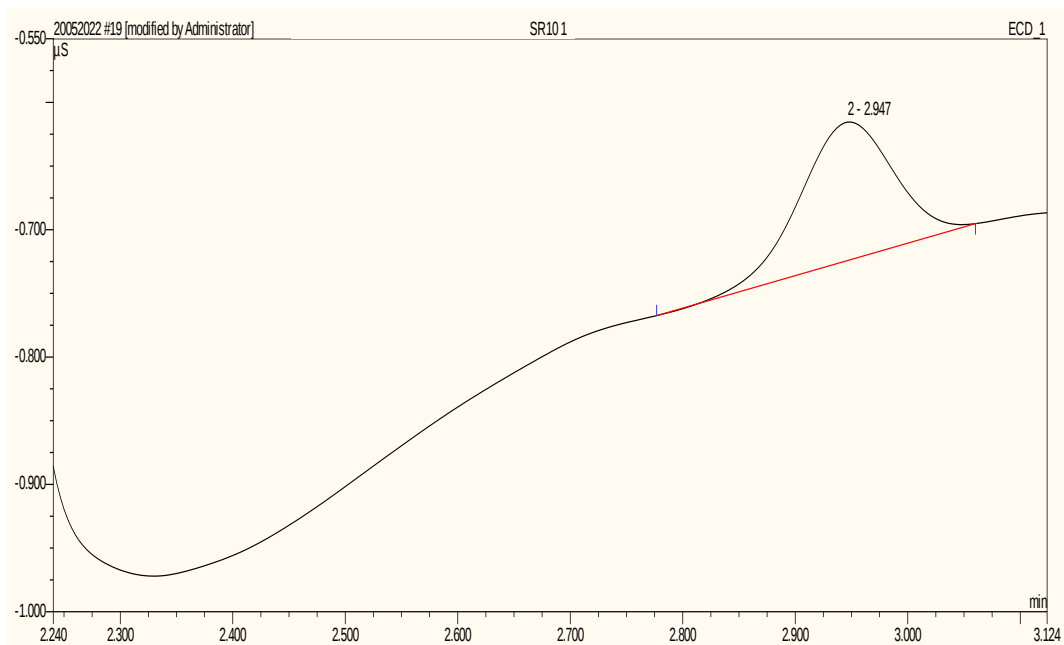
ภาพที่ 63 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 8 บริเวณมือซ้าย



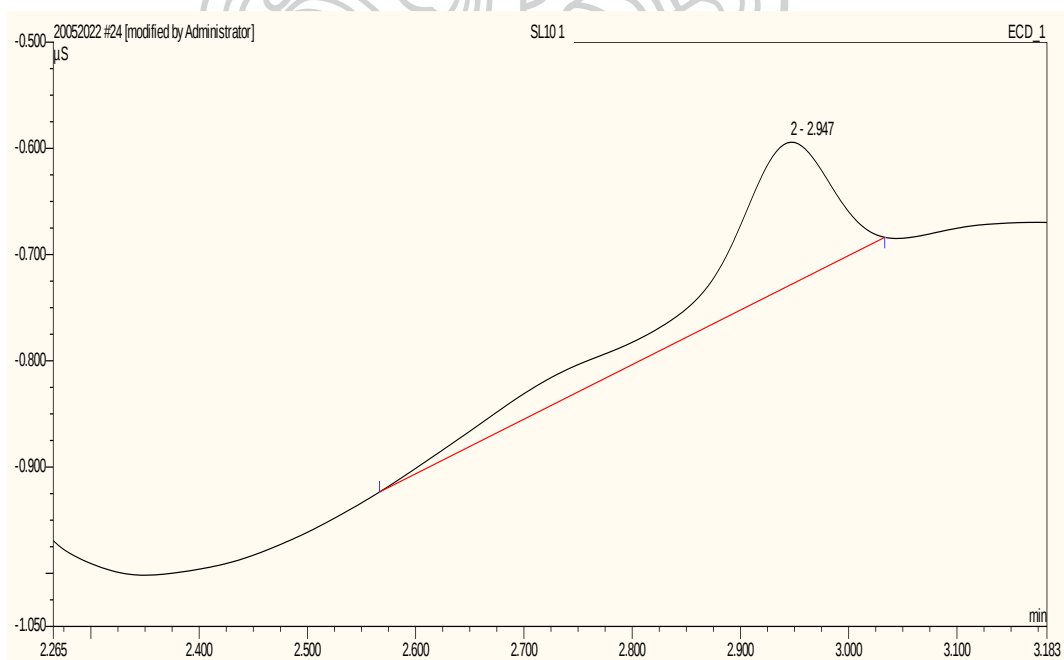
ภาพที่ 64 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 9 บริเวณมือขวา



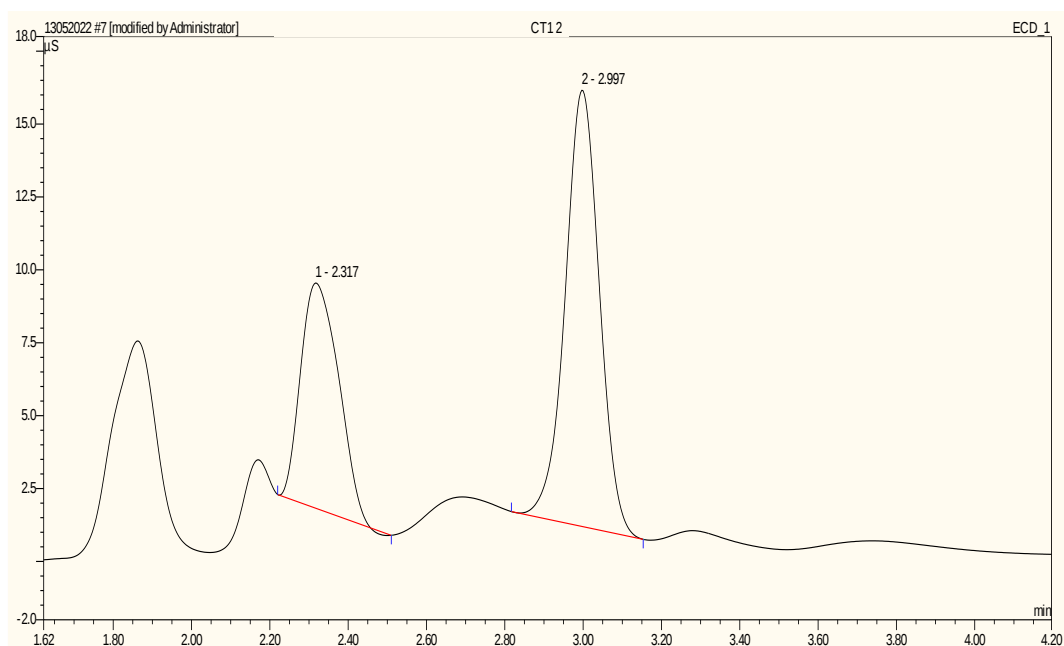
ภาพที่ 65 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 9 บริเวณมือซ้าย



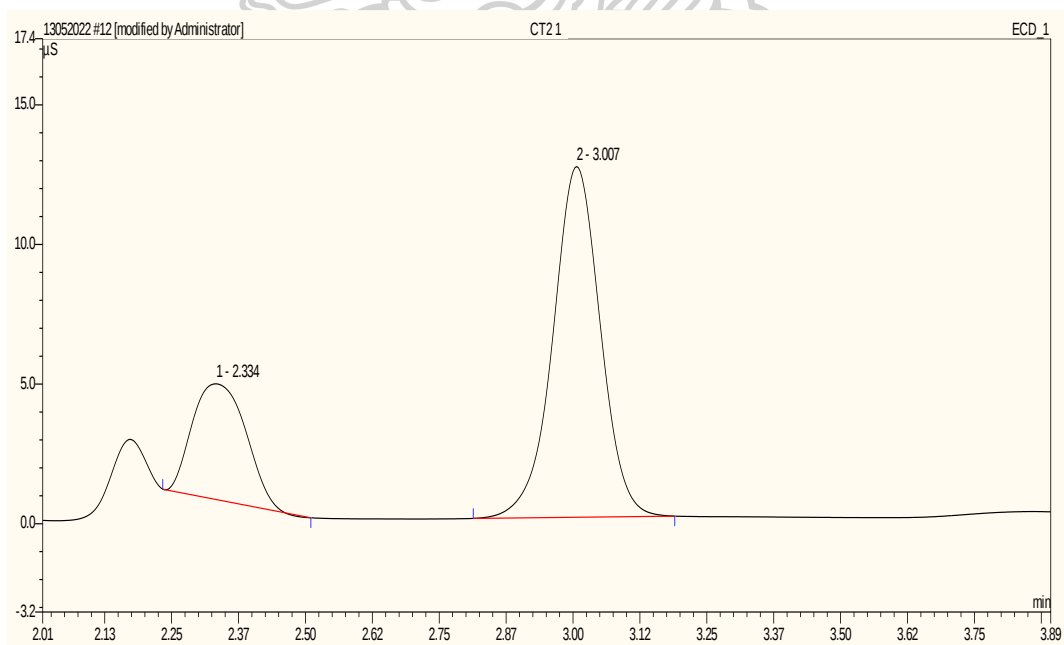
ภาพที่ 66 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 10 บริเวณมือขวา



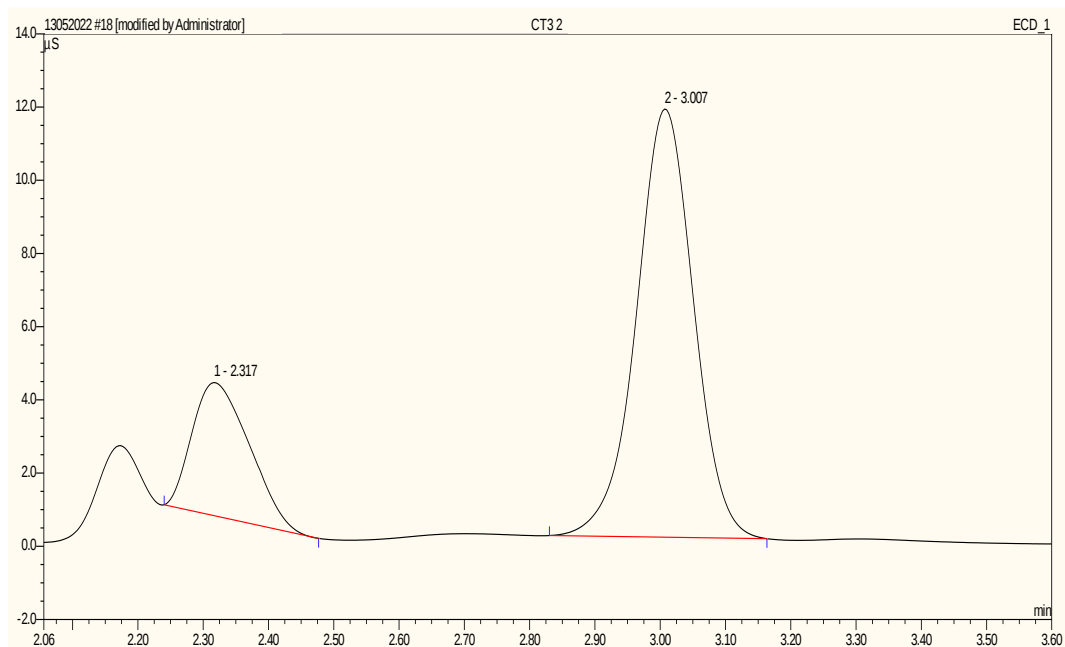
ภาพที่ 67 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนที่ 10 บริเวณมือซ้าย



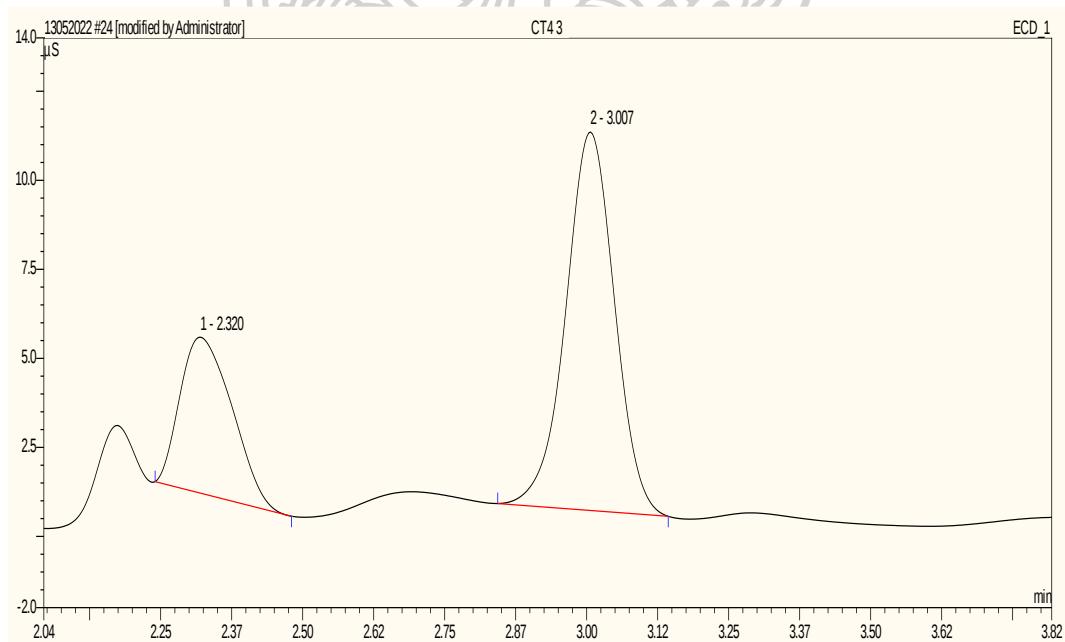
ภาพที่ 68 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 1



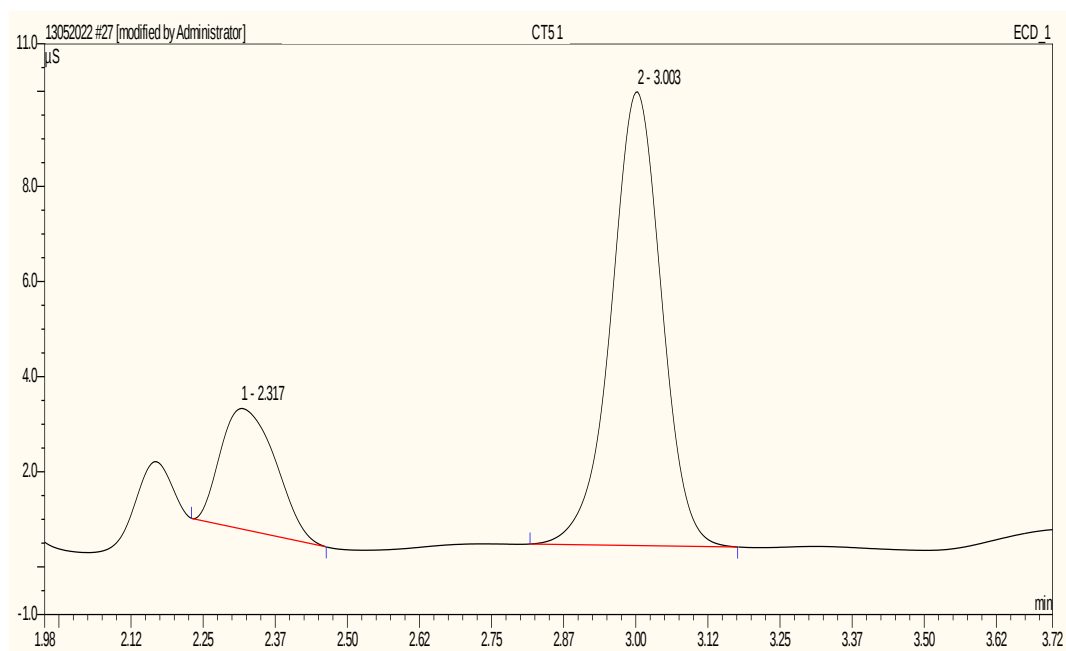
ภาพที่ 69 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 2



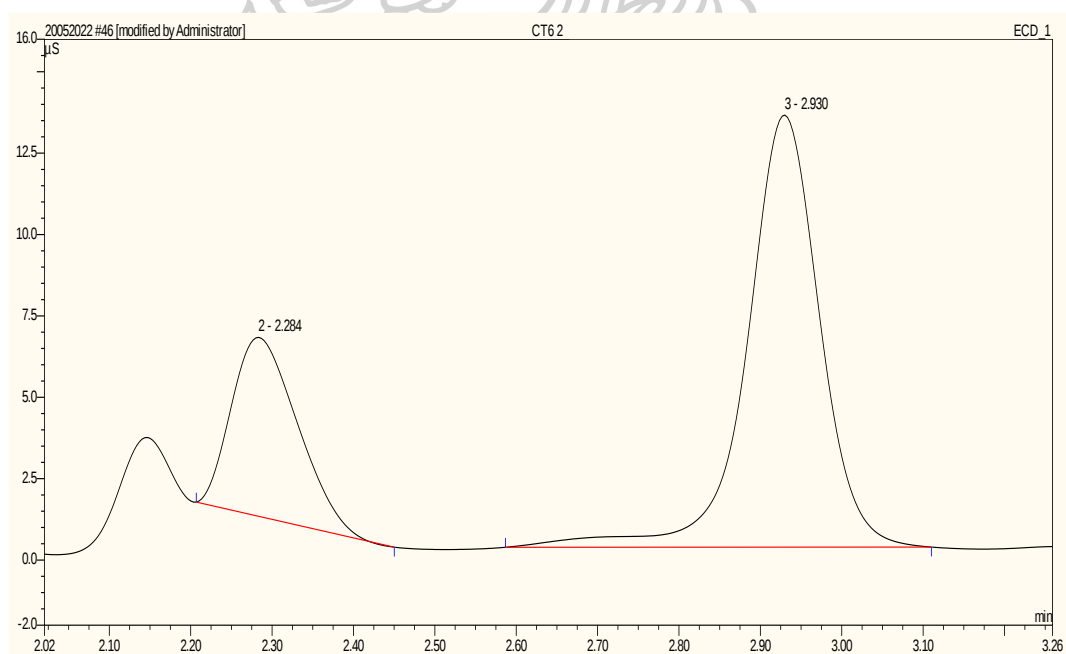
ภาพที่ 70 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 3



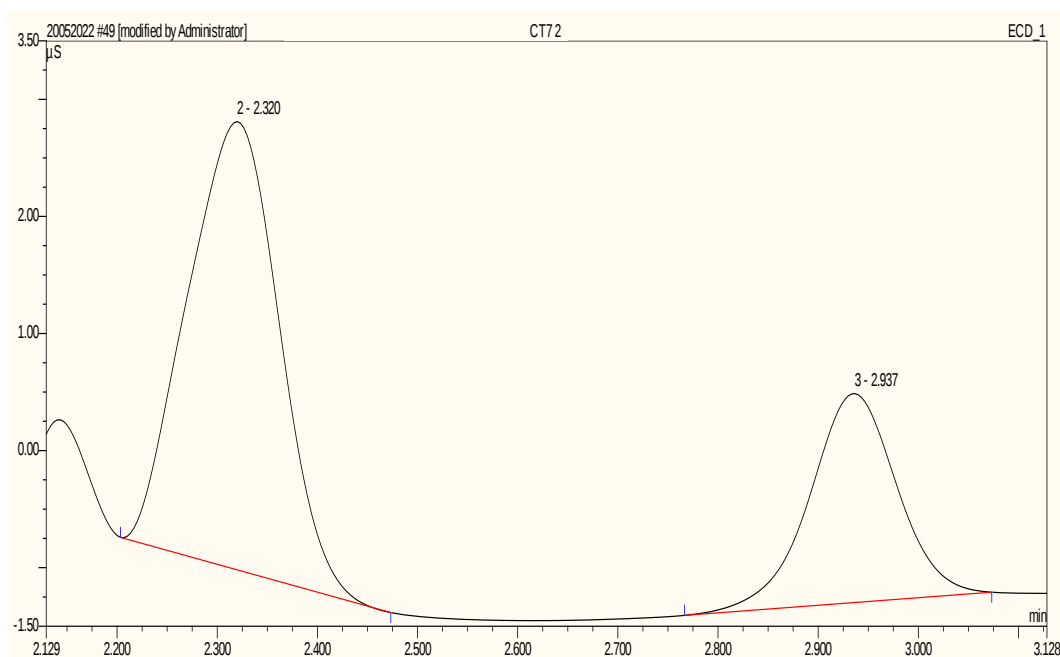
ภาพที่ 71 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 4



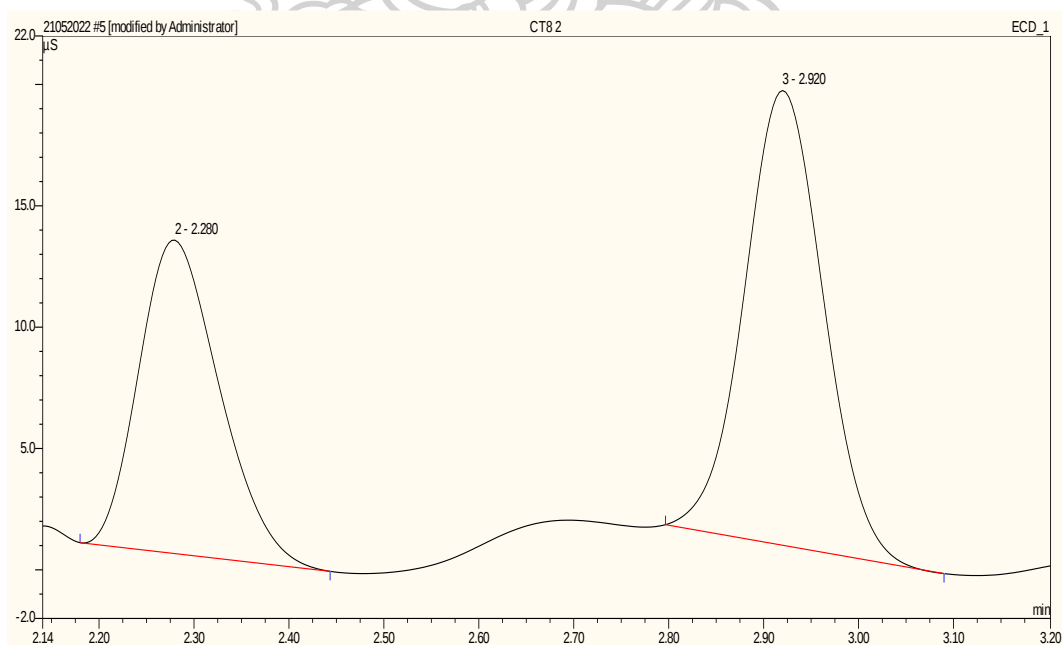
ภาพที่ 72 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 5



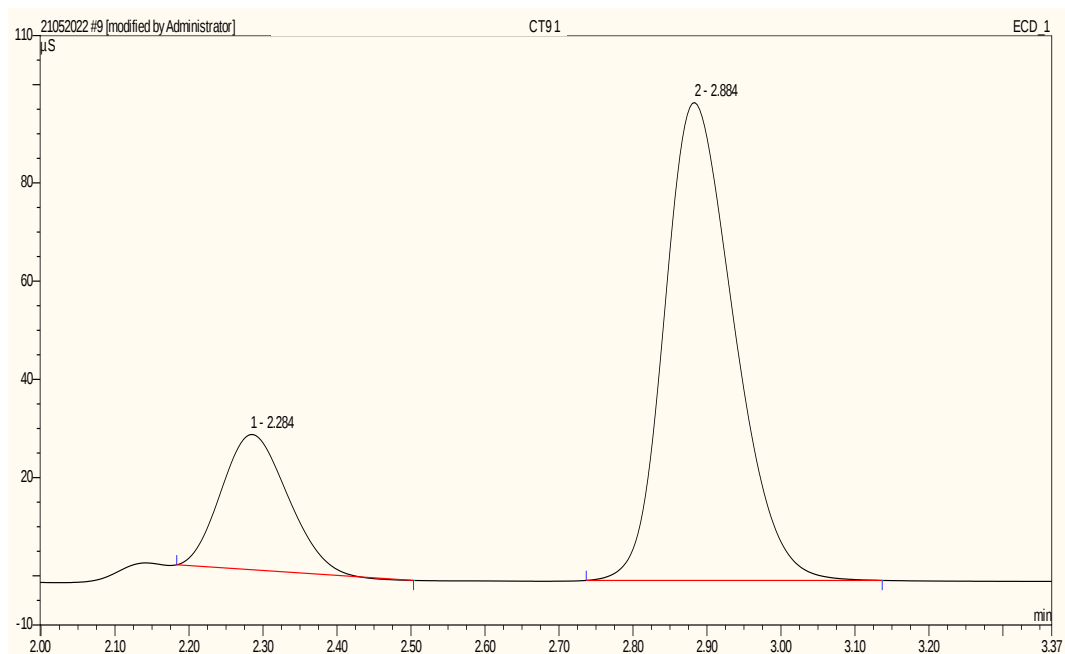
ภาพที่ 73 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 6



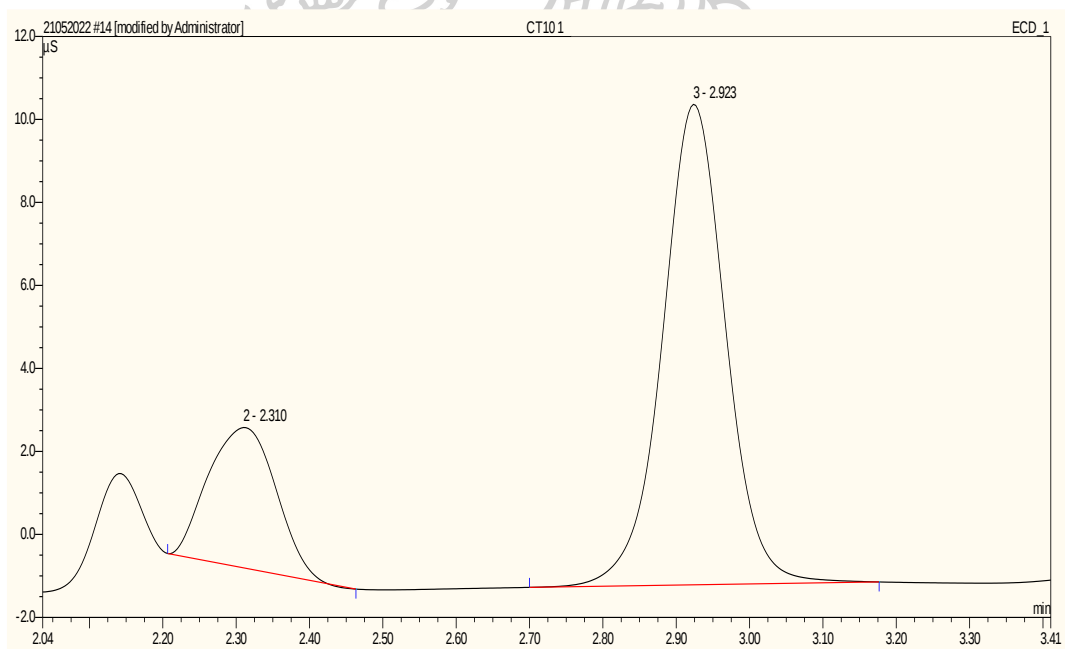
ภาพที่ 74 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 7



ภาพที่ 75 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 8



ภาพที่ 76 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 9



ภาพที่ 77 โครมาโตแกรมของตัวอย่างเขม่าดินปืนจากปลอกกระสุนที่ 10



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	รักษันก อินทรสุขศรี
วัน เดือน ปี เกิด	21 กุมภาพันธ์ 2541
สถานที่เกิด	ศรีสะเกษ
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2562 ปริญญาตรี วท.บ.(เคมี) มหาวิทยาลัยศิลปากร
รางวัลที่ได้รับ	รางวัลบทความดีเด่นด้านเคมี (NCST 5th 2022)

