ชุดทดสอบแบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในหมึกกรอบ

PAPER-BASED DEVICES FOR ANALYSIS OF FORMALDEHYDE IN PICKLED SQUID

สุกัญญา ศิริมาก
SUKANYA SIRIMAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ 2561
KMITL-2018-SC-M-012-045

ชุดทดสอบแบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในหมึกกรอบ

PAPER-BASED DEVICES FOR ANALYSIS OF FORMALDEHYDE IN PICKLED SQUID

สุกัญญา ศิริมาก

SUKANYA SIRIMAK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี
ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ 2561

KMITL-2018-SC-M-012-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PAPER-BASED DEVICES FOR ANALYSIS OF FORMALDEHYDE IN PICKLED SQUID

SUKANYA SIRIMAK

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN CHEMISTRY
DEPARTMENT OF CHEMISTRY
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2018

KMITL-2018-SC-M-012-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2018

FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์ ชุดทดสอบแบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในหมึกกรอบ
นักศึกษา นางสาวสุกัญญา ศิริมาก
รหัสประจำตัว 58605030
ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา เคมี
พ.ศ. 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาและพัฒนาชุดทดสอบแบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในหมึกกรอบ โดยการตรึงรีเอเจนต์บนกระดาษทดสอบด้วยกระบวนการโซล-เจล ได้เติมฟีนิลไฮดราซีนเป็นส่วนประกอบในสารละลายโซล-เจล เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือโดยผสมเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) และสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร และสารละลายฟีนิลไฮดราซีนเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ในเอทานอล อัตราส่วน 2:1:2 โดยปริมาตร เตรียมจุดรีเอเจนต์โดยหยดสารละลายนี้ 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรอง ทิ้งไว้ให้แห้ง ทำการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์โดยในขั้นแรกทำการหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนจุดรีเอเจนต์ ทิ้งไว้ให้แห้ง 7 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับฟีนิลไฮดราซีน ต่อมาในขั้นตอนที่สองทำการหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร และปล่อยทิ้งไว้ 60 นาที เพื่อให้สารตัวกลางเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันไปเป็นผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย หลังจากปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งแล้วทำการบันทึกภาพจุดสีชมพู-แดงที่เกิดขึ้นบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน และใช้โปรแกรม Image J™ ประมวลผลค่าความเข้มแสง (RGB) แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง สำหรับสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ในช่วงความเข้มข้น 1 - 10 มิลลิกรัมต่อลิตร มีสมการเชิงเส้นคือ [ED] = 1.0041[HCHO] – 0.4007 ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) เท่ากับ 0.9992 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) เท่ากับ 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร การวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในหมึกกรอบได้ค่าร้อยละคืนกลับอยู่ในช่วง 99 – 104%

คำสำคัญ: ฟอร์มาลดีไฮด์ กระบวนการโซล-เจล ฟีนิลไฮดราซีน หมึกกรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Paper-based devices for analysis Of formaldehyde in pickled squid
Student	Miss Sukanya Sirimak
Student ID	58605030
Degree	Master of Science
Program	Chemistry
Year	2018
Thesis Advisor	Asst.Prof. Dr. Wiboon Praditweangkum

ABSTRACT

The paper-based devices for analysis of formaldehyde in pickled squid was developed. Reagents are immobilized on a filter paper by sol-gel process. Phenylhydrazine is added as an ingredient in sol-gel solution. The sol-gel solution is prepared by mixing tetraethoxysilane (TEOS), 4.0 mol L^{-1} hydrochloric acid solution and 0.069 mol L^{-1} phenylhydrazine in ethanol with volume ratio of 2:1:2. The reagent spots are prepared by dropping each 10.00 µL of this sol-gel mixed solution on a filter paper and left for drying. To analyze for formaldehyde, the first step is started by dropping 10.00 µL of standard or sample solution on a reagent spot and left for 7 minutes for reaction between formaldehyde and phenylhydrazine. Then the second step is followed up by dropping 5.00 µL of 0.030 mol L^{-1} potassiumhexacyano-ferrate(III) solution and waited 60 minutes for oxidation of intermediate to final product. After drying, the pink-red color of tested spots can be recorded by a scanner. The Image J program is used to analyze the intensity of RGB light and the Euclidean Distance can be calculated. For formaldehyde in concentration range of 1 - 10 mg L^{-1}, the linear equation of [ED] = 1.0041[HCHO] – 0.4007 and r^2 = 0.9992 are obtained. The limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ) are 0.08 and 0.28 mg L^{-1}, respectively. Accuracy can be shown by recovery of 99 - 104% in pickled squid sample.

Keywords: Formaldehyde, Sol-gel process, Phenylhydrazine, Pickled squid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำและคำปรึกษาในทุกๆ ขั้นตอนของการทำวิทยานิพนธ์นี้อย่างใกล้ชิด ซึ่งผู้เขียนต้องขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์จากกรมวิทยาศาสตร์บริการ คือ ดร.จรูญ จันทร์สมบูรณ์ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ รวมถึงชี้แนะแนวทางในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เชิงชั้น ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับการพัฒนาวิธีวิเคราะห์ รวมถึงชี้แนะแนวทางในการจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ให้ถูกต้องและเรียบร้อย

ขอขอบคุณเพื่อนจากหน่วยวิจัยเคมีวิเคราะห์เชิงประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยช่วยเหลือซึ่งกันและกันเสมอมา

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนและให้กำลังใจผู้เขียน ด้วยดีเสมอมา

นางสาวสุกัญญา ศิริมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูปภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ฟอร์มาลดีไฮด์หรือฟอร์มาลีน	5
2.1.1 แหล่งที่มาของฟอร์มาลดีไฮด์	6
2.1.2 ฟอร์มาลดีไฮด์ในอาหาร	7
2.1.3 การตรวจวัดปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์	7
2.1.4 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่พบในอาหาร	8
2.1.5 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่พบในอาหาร	9
2.1.6 อันตรายจากฟอร์มาลดีไฮด์	11
2.1.7 การปฐมพยาบาล	12
2.1.8 ข้อแนะนำสำหรับผู้บริโภค	12
2.2 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process)	13
2.3 หลักการทำงานของเครื่องสแกน (Scanner)	16
2.3.1 ประเภทของเครื่องสแกน	16
2.3.2 ภาพจากการสแกน	17
2.3.3 การทำงานของเครื่องสแกน	18
2.4 ระบบสี (Color system)	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4.1 ระบบสีแบบ RGB (Red-Green-Blue) 18
2.4.2 ระบบสีแบบ CMYK (Cyan-Magnetic-Yellow-Key) 19
2.4.3 ระบบสีแบบ HSV (Hue - Saturation - Value) 20
2.4.4 ระบบสีแบบ LAB (Luminance) 21
2.5 การประมวลผลภาพ 22
2.6 ชุดทดสอบภาคสนาม (On – Site Monitoring Test Kit) 22
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 23
2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจฟอร์มาลดีไฮด์ 23
2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์บนกระดาษ 25
2.8 หลักการตรวจวัดฟอร์มาลดีไฮด์ 27
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย 29
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ 29
3.1.1 สารเคมี 29
3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 30
3.2 การเตรียมสารละลาย 31
3.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน 31
3.2.2 การเตรียมรีเอเจนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ 32
3.3 การเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยอะซีติลอะซีโตน 33
3.3.1 สารละลายโซล-เจล 33
3.3.2 สารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยอะซีติลอะซีโตน 33
3.4 การเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนกับโพแทสเซียมเฮกซะ-ไซยาโนเฟอร์เรต 34
3.5 การเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (1) 34
3.5.1 การเตรียมสารละลายโซล-เจล 34
3.5.2 การเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน 34
3.6 การเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (2) 34
3.7 การศึกษาปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ 35
3.7.1 เมื่อใช้อะซีติลอะซีโตนเป็นรีเอเจนต์ 35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.7.2 เมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีนกับโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตเป็นรีเอเจนต์ 35
3.8 การศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์ 36
3.9 การศึกษาหาความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนต์ที่เหมาะสม 37
3.9.1 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก 37
3.9.2 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน 38
3.9.3 ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 39
3.10 การศึกษาหาปริมาณรีเอเจนต์ที่เหมาะสม 39
3.10.1 ปริมาณสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน 40
3.10.2 ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 40
3.11 การศึกษาการกระจายตัวของรีเอเจนต์ 40
3.11.1 การกระจายตัวของสารละลายสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร) 41
3.11.2 การกระจายตัวของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน (ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร) 41
3.12 การศึกษาการใช้ปริมาณสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน 41
3.13 การศึกษาการเก็บรักษาชุดทดสอบแบบกระดาษ 42
3.14 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา 43
3.14.1 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรก 43
3.14.2 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนสอง 44
3.15 การศึกษาความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์ 44
3.15.1 การเตรียมชุดกระดาษทดสอบ 44
3.15.2 ความเป็นเส้นตรง 44
3.15.3 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD) 45
3.15.4 ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ) 46
3.16 การวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบ 46
3.16.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง 46
3.16.2 วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยชุดกระดาษทดสอบ 46
3.16.3 การคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับได้ (%Recovery) 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	48
4.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ	48
4.1.1 ปฏิกิริยาที่ใช้อะซิติลอะซิโตนป็นรีเอเจนต์	48
4.1.2 ปฏิกิริยาที่ใช้ฟีนิลไฮดราซีน และโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต	49
4.2 ผลการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์	51
4.3 ผลการศึกษาหาความเข้มข้นของสารละลายรีเอนเจนต์ที่เหมาะสม	55
4.3.1 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอลิก	55
4.3.2 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน	57
4.3.3 ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต	58
4.4 ผลการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน	59
4.5 ผลการศึกษาหาปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต	60
4.6 ผลการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์	61
4.6.1 การกระจายตัวของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน	61
4.6.2 การกระจายตัวของสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน	61
4.7 ผลการศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาชุดทดสอบแบบกระดาษ	62
4.8 ผลการการศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา	63
4.8.1 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรก	63
4.8.2 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนสอง	63
4.9 ผลการศึกษาความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์	64
4.9.1 สภาวะเหมาะสมในการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ	64
4.9.2 ความเป็นเส้นตรง (Linearity)	65
4.9.3 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD)	66
4.9.4 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)	69
4.10 ผลการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบโดยใช้ชุดทดสอบแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้น	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	71
เอกสารอ้างอิง	72
ภาคผนวก	76

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

รูปที่ **หน้า**

1.1 ระยะเวลาดำเนินการ 3
2.1 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่มีอยู่ตามธรรมชาติในอาหารและผลิตภัณฑ์ 9
2.2 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่พบในอาหารประเภทต่างๆ 10
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 29
4.1 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิก 55
4.2 สภาวะเหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ 64
4.3 แสดงค่า y_i, $\hat{y}_i$ และ $(y_i - \hat{y}_i)^2$ ในการคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบ ในช่วงความเข้มข้น 10-50 มิลลิกรัมต่อลิตร 67
4.4 แสดงค่า y_i, $\hat{y}_i$ และ $(y_i - \hat{y}_i)^2$ ในการคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบในการคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบ ในช่วงความเข้มข้น 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร 68
4.5 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างหมึกกรอบ 70
4.6 แสดงร้อยละการคืนกลับ (%recovery) ของการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบ (2) 70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde)	5
2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและควบแน่นของสารประกอบอัลคอกซีไซเลน	14
2.3 โครงสร้างซิลิกา (SiO_2) ซึ่งได้จากไฮโดรไลซิสและควบแน่นของสารประกอบอัลคอกซีไซเลน	14
2.4 ผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆจากกระบวนการโซล-เจล	15
2.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซล-เจล	16
2.6 เครื่องสแกนแบบ Desktop scanner	16
2.7 เครื่องสแกนแบบ Handy scanner	17
2.8 แสดงระบบสี RGB	19
2.9 แสดงระบบสี CMYK	19
2.10 แสดงระบบสี HSV	20
2.11 แสดงระบบสี LAB	21
2.12 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์ ฟีนิลไฮดราซีน และโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน-เฟอร์เรต ในสภาวะที่เป็นกรด	28
4.1 ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับอะซิติลอะซิโตน	48
4.2 จุดสีบนกระดาษทดสอบเมื่อใช้อะซิติลอะซิโตนเป็นรีเอเจนต์	49
4.3 ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับฟีนิลไฮดราซีน และโพแทสเซียมไซยาโนเฟอร์เรต	49
4.4 จุดสีบนกระดาษทดสอบเมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีน และโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน-เฟอร์เรต เป็นรีเอเจนต์	50
4.5 จุดสีบนกระดาษทดสอบเมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีน เป็นรีเอเจนต์	51
4.6 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 1	51
4.7 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 2	52
4.8 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 3	53
4.9 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 4	53
4.10 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 5	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.11 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการทดลองใช้สารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร ฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 3, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร 56
4.12 ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิก 57
4.13 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน 58
4.14 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียม-เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 59
4.15 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลของปริมาณสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน 60
4.16 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลของปริมาตรสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะ-ไซยาโนเฟอร์เรต 61
4.17 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาการกระจายตัวของรีเอ 62
4.18 ผลการศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาชุดทดสอบแบบกระดาษ 62
4.19 ผลกระทบของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรก 63
4.20 ผลกระทบของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่สอง 64
4.21 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร 65
4.22 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 66

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ในปัจจุบันมีการนำสารฟอร์มาลดีไฮด์ไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางทั้งด้านการเกษตร ด้านการอุตสาหกรรม ด้านความงาม และด้านอื่นๆ การได้รับสารฟอร์มาลดีไฮด์ซึ่งเป็นของเหลวนั้น โดยส่วนใหญ่มาจากการปนเปื้อนในวัสดุต่างๆ ที่มีการใช้สารชนิดนี้เป็นวัตถุดิบในการผลิต โดยเฉพาะวัสดุอุปกรณ์ และผลิตภัณฑ์ต่างๆ ทางด้านการอุปโภค บริโภครอบตัวเรา ทำให้มีการเจือปนอยู่ในสิ่งแวดล้อมรอบตัวเรา

ในอุตสาหกรรมด้านอาหารก็มีการลักลอบนำฟอร์มาลดีไฮด์มาใช้เพื่อผลประโยชน์ในการรักษาสภาพของอาหาร โดยเฉพาะเนื้อสัตว์ ผัก และอาหารทะเล ซึ่งเน่าเสียได้ง่าย ดังนั้นการเติมหรือใส่สารฟอร์มาลดีไฮด์ลงไปเพื่อทำให้รักษาสภาพของอาหารไม่ก่อให้เกิดการบูดเน่าได้ง่าย เมื่อผู้บริโภคได้รับอาหารที่ปนเปื้อนเข้าไปก็จะทำให้เกิดผลต่อสุขภาพ เนื่องจากการได้รับสารฟอร์มาลดีไฮด์เข้าสู่ร่างกายจะทำให้เกิดขบวนการเมแทบอลิซึมอย่างรวดเร็ว ถึงแม้ว่าฟอร์มาลดีไฮด์มีค่าครึ่งชีวิตในร่างกายประมาณ 1.5 นาที และจะถูกขับออกจากร่างกายในรูปของฟอร์เมทแลคาร์บอนไดออกไซด์ [1] อย่างไรก็ตามแม้สารจะถูกขับออกไปอย่างรวดเร็วก็ยังมีบางส่วนคงสะสมในร่างกาย ส่วนที่ยังสะสมดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นกรดฟอร์มิก (formic acid) ซึ่งทำให้เกิดเป็นพิษต่อร่างกายโดยการทำลายเซลล์หรือเนื้อเยื่อของร่างกาย ซึ่งองค์กรนานาชาติเพื่อการวิจัยมะเร็ง (International Agency for Research on Cancer / IARC) จัดให้สารนี้อยู่ในระดับ 1 (Class 1) ของการเป็นสาเหตุให้เกิดมะเร็ง [2] ทั้งนี้กรมโรงงานอุตสาหกรรม กรมประมง และกระทรวงสาธารณสุขโดยคณะกรรมการอาหารและยาห้ามใช้สารนี้ในอาหาร โดยได้กำหนดโทษทางกฎหมายไว้อย่างชัดเจนเพื่อดูแลสุขภาพของผู้บริโภค

จากที่กล่าวมาข้างต้น จะเห็นได้ว่าฟอร์มาลดีไฮด์อาจปนเปื้อนอยู่ในอาหาร ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการรับประทานอาหารที่มีฟอร์มาลดีไฮด์เจือปน ซึ่งผู้บริโภคจะทราบได้อย่างไร ทั้งนี้อาจจะใช้วิธีการสังเกตง่ายๆ โดยดูจากเนื้อสัตว์หรือผักสดว่ายังคงมีความสดอยู่เสมอถึงแม้จะทิ้งไว้ค่อนข้างนานก็ตาม ดังนั้นจึงควรซื้อเนื้อสัตว์หรือผักสดที่ได้รับรองความปลอดภัยในการผลิตและแปรรูป อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการผลิตชุดทดสอบฟอร์มาลดีไฮด์เพื่อหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์เบื้องต้น เพื่อให้ผู้บริโภคสะดวกในการใช้ตรวจสอบสารนี้ในอาหาร ทั้งแบบที่เป็นชุดน้ำยาที่ผลิตโดยหน่วยงานต่างๆ ซึ่งสามารถทดสอบและทราบผลได้ทันที เช่น ชุดน้ำยาทดสอบ (Test kit) ที่ผลิตโดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ภายในชุดทดสอบดังกล่าวประกอบด้วยสารเคมีสำหรับการทดสอบ 3 ชนิด ได้แก่ สารละลายฟีนิลไฮดราซีนไฮโดรคลอไรด์ (phenyhlhydrazine hydrochloride /

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$C_6H_9ClN_2$) สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) (potassium hexacyanoferrate (III)/ $K_3(Fe(CN)_6)$), สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl conc.) ทั้งนี้ทำการตรวจตามคำแนะนำในชุดทดสอบ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเป็นวิธีที่ง่าย ใช้เวลาน้อย [3] ซึ่งแม้ว่าจะแสดงผลที่สามารถสังเกตได้ชัดเจนทางกายภาพ แต่ก็ยังไม่สามารถบอกได้ถึงปริมาณที่แน่นอนเพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพด้านความปลอดภัยของอาหาร อีกทั้งยังมีข้อเสียในการใช้สารเคมีที่ค่อนข้างเป็นสารเคมีที่อันตรายแก่ผู้ใช้งาน

งานวิจัยนี้จึงออกแบบและพัฒนาวิธีการตรวจวัดที่สามารถตรวจวัดหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ได้โดยง่าย โดยสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษที่มีหลักการของกระบวนการโซล-เจลในการตรึงจุดรีเอเจนต์ไว้บนกระดาษ ร่วมกับการตรวจวัดด้วยการสแกนจุดสีของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นด้วยเครื่องสแกน และหลังจากนั้นจะใช้โปรแกรม Image J™ วิเคราะห์ความเข้มของสี ซึ่งเป็นการทดสอบและตรวจวัดที่ทำได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และช่วยลดปริมาณรีเอเจนต์ที่ใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาชุดทดสอบแบบกระดาษโดยใช้กระบวนการโซล-เจลในการเตรียมจุดรีเอ-เจนต์ ร่วมกับการตรวจวัดด้วยการสแกนจุดสีและประมวลผลด้วยโปรแกรม Image J™

1.2.2 เพื่อนำชุดทดสอบแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้น ประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในหมึกกรอบ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์

1.3.2 ศึกษาปฏิกิริยา/หลักการตรวจวัดฟอร์มาลดีไฮด์

1.3.3 ศึกษากระบวนการโซล-เจล ที่จะนำมาใช้ในการเตรียมจุดรีเอเจนต์บนกระดาษ

1.3.4 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์บนชุดทดสอบแบบกระดาษ

1.3.5 ประเมินคุณลักษณะการวิเคราะห์ของชุดทดสอบแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้น

1.3.6 ประยุกต์ใช้ตรวจวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบ

1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1.4.1 ศึกษาข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์

1.4.2 ศึกษาการใช้กระบวนการโซล-เจลที่เจือรีเอเจนต์ต่างๆ เพื่อใช้ในการเตรียมชุดทดสอบแบบกระดาษสำหรับตรวจวัดปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4.3 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการใช้ชุดทดสอบแบบกระดาษเพื่อวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ โดยพิจารณาถึงตัวแปรต่างๆ ได้แก่ ความเข้มข้นของรีเอเจนต์ต่างๆ ปริมาณของรีเอเจนต์ ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยา เป็นต้น

1.4.4 ศึกษาคุณลักษณะของวิธีที่พัฒนาขึ้น ได้แก่ ช่วงความเป็นเส้นตรง ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับการตรวจวัด ขีดจำกัดต่ำสุดสำหรับการวิเคราะห์เชิงปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์ และความแม่นของวิธีวิเคราะห์

1.4.5 นำชุดทดสอบแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในหมึกกรอบ

1.4.6 รวบรวมงานวิจัยและดำเนินการเผยแพร่

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาดำเนินการ

กิจกรรม	ระยะเวลา																		
	ปี 2017 (เดือน)												ปี 2018 (เดือน)						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7
1.ศึกษางานวิจัย																			
2.ศึกษาปฏิกิริยาที่จะใช้บนชุดทดสอบแบบกระดาษ																			
3.ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของตัวแปรต่างๆ																			
4.ศึกษาคุณลักษณะของชุดทดสอบแบบกระดาษ																			
5.นำชุดทดสอบแบบกระดาษมาประยุกต์ใช้ในตัวอย่างหมึกกรอบ																			
6.รวบรวมงานวิจัยและดำเนินการเผยแพร่																			
7.เขียนรูปเล่ม Thesis																			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ชุดทดสอบแบบกระดาษสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ โดยใช้หลักการกระบวนการโซล-เจลในการเตรียมจุดรีเอเจนต์ ร่วมกับการตรวจวัดด้วยการสแกนจุดสีและประมวลผลด้วยโปรแกรม Image J™

1.5.2 สามารถนำชุดทดสอบแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นประยุกต์ใช้ในการตรวจวัดปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในหมึกกรอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟอร์มาลดีไฮด์หรือฟอร์มาลีน

สารฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde) เป็นสารที่เกิดโดยธรรมชาติ มีความสำคัญต่อกระบวนการเกี่ยวกับการสันดาปอาหารของพืชและสัตว์ และยังสามารถพบได้ในธรรมชาติที่เกิดจากการเผาไหม้ เช่น ท่อไอเสียรถยนต์ การเผาหญ้า การเผาไม้ เตาหม้อต้มอุตสาหกรรม และจากควันบุหรี่ เป็นต้น สารนี้จัดเป็นสารกลุ่มอัลดีไฮด์ชนิดหนึ่ง ปกติอยู่ในรูปก๊าซ เป็นสารเคมีที่ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds / VOCs) มีชื่อพ้องว่า ฟอร์มาลีน (formalin) ทั้งนี้ชื่อตามสหภาพเคมีบริสุทธิ์และเคมีประยุกต์ระหว่างประเทศ (International Union of Pure and Applied Chemistry/IUPAC) มีชื่อว่า “ฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde)” และสภาพของเหลวมีชื่อว่า “ฟอร์มาลีน (formalin)” เป็นสารที่มีน้ำหนักโมเลกุล (molecular formula) เท่ากับ 30.03 มีสูตรเคมีคือ CH_2O ลักษณะโดยทั่วไปเป็นสารที่ใส ไม่มีสี มีกลิ่นฉุน จัดเป็นสารรีดิวซ์ที่รุนแรง โดยจะมีการออกซิไดซ์อย่างช้าๆ กลายเป็นกรดฟอร์มิก (formic acid)

รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของสารฟอร์มาลดีไฮด์ (formaldehyde) [4]

ทั้งก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์และฟอร์มาลีน มีค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ประมาณ 2.8-4.0 (ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส) ก๊าซฟอร์มาลดีไฮด์มีจุดเดือดที่ 19.1 องศาเซลเซียส (ที่ความดันบรรยากาศ) ส่วนฟอร์มาลีนมีจุดเดือดที่ 96 องศาเซลเซียส (ที่ความดันบรรยากาศ) ฟอร์มาลีนมีจุดหลอมเหลวที่ 92 องศาเซลเซียส มีลักษณะเป็นพิษเนื่องจากมีลักษณะกัดกร่อน และเนื่องจากฟอร์มาลดีไฮด์ มีลักษณะเป็นก๊าซจึงมีการระเหยได้ง่ายกลาย เป็นก๊าซฟอร์มิกอัลดีไฮด์ (gas formic aldehyde) ซึ่งมีสูตรโมเลกุล คือ CH_2O_2 และเมื่อเกิดเพลิงไหม้จะสลายตัวให้ก๊าคาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเกิดหมอกควันที่เป็นพิษ การที่ฟอร์มาลดีไฮด์มักมีลักษณะเป็นก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ จึงต้องทำให้กลายเป็นของเหลวโดยผสมกับน้ำกลายเป็นสารละลาย เรียกว่า “ฟอร์มาลีน” ซึ่งมีความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ ประมาณ 37-55% โดยน้ำหนัก ทั้งนี้สารฟอร์มาลดีไฮด์นอกจากจะละลายได้ดีกับน้ำ แล้วยังสามารถละลายได้ดีกับแอลกอฮอล์อีกด้วย ในทางตรงกันข้ามไม่สามารถละลายได้ในสารบางชนิด เช่น ไอโอดีน ด่างทับทิม และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น อย่างไรก็ตามพบว่าสารฟอร์มาลีนมักไม่ค่อยเสถียรหรือไม่มีความคงตัว เนื่องจากมักจะเกิดการออกซิไดซ์กลายเป็นกรดฟอร์มิก โดยเฉพาะในสภาวะที่อุณหภูมิสูง ซึ่งกรดฟอร์มิกมีความเป็นพิษสูง ทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้ได้ ดังนั้นจึงมักนิยมเติมสารที่รักษาความเสถียรหรือการคงสภาพของสารฟอร์มาลีนไว้สารที่มักนิยมนำมาเติม ได้แก่ เมทานอล (methanol) ในความเข้มข้นประมาณ 5-15% ซึ่งจะทำให้สารฟอร์มาลีนอยู่ในรูปของพารา-ฟอร์มาลดีไฮด์ (paraformaldehyde) ซึ่งก็คือ ฟอร์มาลีนที่ผสมกับเมทานอลนั่นเอง พาราฟอร์มาลดีไฮด์ค่อนข้างมีความเสถียรหรือคงตัวเหมาะแก่การนำไปใช้ในด้านต่างๆ ได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามเมื่อสารพาราฟอร์มาลดีไฮด์อยู่ในภาวะอุณหภูมิต่ำประมาณ 4.4 องศาเซลเซียส จะเปลี่ยนรูปไปเป็นโพลิเมอร์พาราฟอร์มาลดีไฮด์ (polymerparaformaldehyde) ซึ่งมีลักษณะเป็นตะกอนและเป็นพิษต่อร่างกายเป็นอันตรายต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะสัตว์น้ำได้ กรมโรงงานอุตสาหกรรมจึงจัดให้สารนี้เป็นวัตถุอันตรายชนิดที่ 2 ตามพระราชบัญญัติวัตถุอันตราย พ.ศ. 2535 โดยการผลิตการนำเข้าการส่งออกหรือมีไว้ครอบครองต้องแจ้งให้พนักงานเจ้าหน้าที่ทราบก่อนและต้องปฏิบัติตามหลักเกณฑ์ ซึ่งการผลิตหรือการนำเข้าต้องขึ้นทะเบียนวัตถุอันตราย [2]

2.1.1 แหล่งที่มาของฟอร์มาลดีไฮด์

แหล่งที่มาของฟอร์มาลดีไฮด์มี 2 ลักษณะคือ ฟอร์มาลดีไฮด์ที่เกิดภายนอกร่างกาย (exogenous formaldehyde) และฟอร์มาลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นภายในร่างกาย (endogenous formaldehyde)

1) Exogenous formaldehyde [5]

ฟอร์มาลดีไฮด์ได้จากภายนอกร่างกายได้จากการผลิตในอุตสาหกรรมและจากการเกิดในสิ่งแวดล้อม การผลิตในอุตสาหกรรมนั้นฟอร์มาลดีไฮด์เป็นสารเคมีที่เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในอุตสาหกรรมการผลิตผลิตภัณฑ์หลากหลายชนิดในประเทศไทยมีโรงงานผลิตฟอร์มาลดีไฮด์จากวัตถุดิบหลักคือ เมทานอล ซึ่งต้องนำเข้าจากต่างประเทศฟอร์มาลดีไฮด์ที่ได้จากโรงงานผลิตจะอยู่ในรูปของสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์หรือฟอร์มาลีนที่ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 37-55 โดยน้ำหนักและมีเมทานอลผสมอยู่ระหว่างร้อยละ 1-14 โดยน้ำหนักขึ้นอยู่กับการนำ ไปใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) Endogenous formaldehyde [6]

ฟอร์มาลดีไฮด์ถูกสร้างขึ้นมาเองได้จากกระบวนการต่างๆ ภายในร่างกาย มี 3 รูปแบบคือ รูปสารอิสระ (free state) รูปที่รวมกับสารโมเลกุลใหญ่ในสภาพคืนกลับได้ (reversibly bound to macromolecules) และรูปที่รวมกับสารโมเลกุลใหญ่ในสภาพคืนกลับไม่ได้ (irreversibly bound to macromolecules) จากกระบวนการทั้งที่อาศัยเอนไซม์และไม่มีเอนไซม์มาเกี่ยวข้อง

2.1.2 ฟอร์มาลดีไฮด์ในอาหาร [7]

ฟอร์มาลดีไฮด์ในอาหารพบทั้งในรูปสารอิสระและในรูปที่รวมอยู่กับสารอื่น คือ โปรตีน กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) กรดอะมิโน (amino acid) เอมีน (amine) ครีเอติน (creatine) และนิวคลีโอไทด์ (nucleotide) โดยพันธะเคมีของการรวมกันมี 3 ชนิดคือ รีเวอร์สซิเบิล (reversible bond) แอซิด-ลาไบล์(acid-labile bond) และ แอซิด-รีซิสแทนท์ (acid-resistant bond) มีลักษณะดังนี้

1. reversible bond เป็นการเกิดพันธะเคมีระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์ และโปรตีนในส่วน ของ ε-amino group ของ lysine, α-amino group ของ N-terminal amino acid, guanidyl group of arginine และ aromatic ring nitrogen of histamine และทริฟโตเฟน (tryptophan)

2. acid-labile bond เป็นการเกิดพันธะ ระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับโปรตีน ซึ่งทำให้เกิดการเชื่อมกันของไลซีน (lysine) กับอาร์จินีน (arginine) แอสพาราจีน (asparagine) หรือกลูตามีน (glutamine) โดยหมู่เมทิลลีน (methylene bridges)

3. acid-resistant bond เป็นการเกิดพันธะระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับโปรตีน โดยการเกิดเมทิลไลซีน (methyl-lysine) ฟอร์มิลไลซีน (formyl-lysine) และไลซีนไทโรซีน (lysine-tyrosine) ที่เชื่อมกันด้วยหมู่เมทิลลีน (methylene bridges) มีศึกษาพบว่าอาร์จินีน (arginine) ไทโรซีน (tyrosine) และไลซีน (lysine) มีความว่องไวที่จะทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์ทำให้เกิดการรวมกันโดยพันธะเคมีระหว่างอัลดีไฮด์และโปรตีนขึ้นในลักษณะของ methylol groups, Schiff bases, methylene bridges และ imidazolidinone adducts

2.1.3 การตรวจวัดปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์

เนื่องจากฟอร์มาลดีไฮด์หรือฟอร์มาลีนอาจปนเปื้อนอยู่ในอาหาร ดังนั้นจึงควรหลีกเลี่ยงการรับประทานอาหารที่มีฟอร์มาลีนเจือปน ซึ่งผู้บริโภคจะทราบได้อย่างไร ทั้งนี้อาจจะใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีสังเกตง่ายๆ โดยดูจากเนื้อสัตว์หรือผักสดว่ายังคงมีความสดอยู่เสมอ ถึงแม้จะทิ้งไว้ค่อนข้างนานก็ตาม ดังนั้นจึงควรซื้อเนื้อสัตว์หรือผักสดที่ได้รับรองความปลอดภัยในการผลิตหรือการแปรรูป อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการผลิตชุดทดสอบหาสารฟอร์มาลีนเพื่อหาปริมาณฟอร์มาลีนหรือฟอร์มาลดีไฮด์เบื้องต้น เพื่อให้ผู้บริโภคสะดวกในการใช้ตรวจสอบสารนี้ในอาหาร ทั้งแบบที่เป็นชุดน้ำยาที่ผลิตโดยหน่วยงานต่าง ๆ ซึ่งสามารถทดสอบและทราบผลได้ทันทีและแบบการตรวจด้วยวิธีต่างๆ เพื่อหาปริมาณที่แน่นอนเพื่อเป็นการตรวจสอบคุณภาพด้านความปลอดภัยของอาหารและการเจือปนในสิ่งแวดล้อม โดยมีวิธีการตรวจได้แก่ วิธีคัลเลอริเมทรี (Colorimetric method) วิธีโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography, HPLC), วิธีสเปกโทรเมตรี (spectrometry) และชุดน้ำยาทดสอบ

2.1.4 ข้อมูลการตรวจพบสารฟอร์มาลินฟอร์มัลดีไฮด์

เมื่อปี ค.ศ. 2013 Food Safety News ของสหรัฐอเมริกาพาดหัวข่าวว่ามีการตรวจพบฟอร์มาลดีไฮด์จากปลานำเข้าจากเอเชียในร้านอาหารขายของขนาดใหญ่ (supermarket) ของสหรัฐอเมริกา โดยปลาที่ตรวจพบฟอร์มาลดีไฮด์นั้น เป็นปลานำเข้าจากสาธารณรัฐประชาชนจีน และสังคมนิยมเวียดนาม ซึ่งตรวจพบฟอร์มาลดีไฮด์ในปลาร้อยละ 25 จากปลาที่เก็บตัวอย่างทั้งหมดจากร้านขายของขนาดใหญ่ แต่เป็นที่น่าสังเกตว่าปลาที่ตรวจพบฟอร์มาลดีไฮด์นั้น เป็นปลานำเข้าจากประเทศในกลุ่มเอเชีย ในขณะที่ปลาของสหรัฐอเมริกาเองหรือกลุ่มประเทศอื่นๆ ตรวจไม่พบสารดังกล่าว

เมื่อปี พ.ศ.2557 นักวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของไทยได้ทำการสุ่มตัวอย่างอาหารทะเลและเนื้อสัตว์ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ พบว่าตรวจพบสารฟอร์มาลีนเจือปนในอาหารและปีเดียวกันนี้ กรมอนามัย จ.นครสวรรค์ เก็บตัวอย่างอาหารจากตลาดสด 5 แห่ง จำนวน 275 ตัวอย่าง พบว่ามีการใช้ฟอร์มาลีนจำนวน 102 ตัวอย่าง คิดเป็นร้อยละ 25 ดังนั้นกระทรวงสาธารณสุขกำหนดให้ฟอร์มาลีน/ฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นวัตถุห้ามใช้ในอาหารตามประกาศกระทรวงสาธารณะสุข ฉบับที่ 151 (พ.ศ. 2536) แห่งพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 ผู้ใช้สารนี้กับอาหารหรือทำให้อาหารนั้นเกิดพิษภัยต่อผู้บริโภค จัดเป็นการผลิตจำหน่ายอาหารที่ไม่บริสุทธิ์และถ้าสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาตรวจพบสารดังกล่าวจะต้องถูกดำเนินการตามกฎหมายอาจต้องโทษจำคุกไม่เกิน 2 ปี หรือปรับไม่เกิน 20,000 บาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

World Health Organization (WHO) พบว่าในธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ต่างๆ มีสารฟอร์มาลีนอยู่ตามธรรมชาติในแต่ละชนิดอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 ปริมาณสารฟอร์มาลินที่มีอยู่ตามธรรมชาติในอาหารและผลิตภัณฑ์ [7]

Food and Product type	Level (ppm)
Meat and meat products Food type	
Beef	4.6
Pig	5.8-20
Sheep	8
Poultry	2.5-5.7
Processed meat products (including ham and sausages)	≤ 20.7
Liver paste	≤ 11.9
Seafood type	
Crustacean	1-98
Bombay-duck	≤ 140
Dairy products Food type	
Goat's Milk	1
Cow's Milk	≤ 3.3
Cheese	≤ 3.3
Others Food type	
Alcoholic beverage	0.02-3.8
Soft drinks	8.7
Brewed coffee	3.4-4.5
Instant coffee	10-16
Syrup	<1-1.54

2.1.5 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่พบในอาหาร

ในอาหารจะมีฟอร์มาลดีไฮด์ที่เกิดขึ้นได้ ตามธรรมชาติ หรือจากการรมควันเพื่อฆ่าแมลง จากการปรุงอาหาร หรือมาจากภาชนะบรรจุที่ทำจากเรซินที่มีฟอร์มาลดีไฮด์เป็นส่วนประกอบ ในเนยบางชนิดมีการใช้เพื่อยับยั้งแบคทีเรีย ค่าพื้นฐานของปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในอาหารพบน้อยสุดในนมสด คือ 0.03 - <1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนในอวัยวะของหมู ได้แก่ ตับ ไต และเนื้อมีค่าเท่ากับ 11.8±0.17, 8.75±0.28 และ 6.24±0.12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในแฮมที่ทำจากหมูและไก่งวง มีค่าเท่ากับ 2.9-4.6 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในไส้กรอกมีค่าเท่ากับ 10- 20.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และในแฮมรมควันมีปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในระดับสูงถึง 224-267 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [11] ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในปลาจะพบปริมาณสูงกว่าอาหารประเภทอื่นมีรายงานว่าในปลาเฮค (hake) แช่แข็งมีค่าของปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ประมาณ 232-293 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมปลาแฮคดัค (haddock) และปลากระบอก (mullet) พบค่ำในช่วง 1.47- 4.87 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและค่าเฉลี่ยของปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในปลาคอด (cod) เท่ากับ 100 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในอาหารประเภทผลไม้ เช่น แอปเปิ้ล และแครอท พบปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์อยู่ในช่วง 6.3-6.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วนในแตงโม มะเขือเทศ กล้วย และมันฝรั่ง พบปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 9.0, 13.3, 16.3 และ 19.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ กลุ่มผักต่างๆ เช่น กะหล่ำดอก กะหล่ำปลี และบีทรูท พบปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ เท่ากับ 26.9, 31 และ 35 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ [9-10] และปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่พบในอาหารประเภทต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่พบในอาหารประเภทต่างๆ [9-10]

ผลิตภัณฑ์อาหาร	ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ผลิตภัณฑ์ที่พบสูงสุด
เนื้อสัตว์ (เนื้อทำแซนวิช เนื้อตัดเย็น แฮม ไส้กรอก แฮมรมควัน)	2.5-267	แฮมรมควัน
นมและผลิตภัณฑ์นม (นมแพะ นมวัว นมสด นมปรุงแต่ง ชีส)	0.041-3.3	ชีส
อาหารทะเล		
- ปลา	6.4-293	ปลาทะเลน้ำลึกแช่แข็ง (deep frozen hake)
- Crusteceans (กุ้ง กั้ง ปู)	1-98	
- ปลาหมึกสด	0.26-19.7	
- ปลาหมึกแห้งฉีก	0-169.6	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 (ต่อ) ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่พบในอาหารประเภทต่างๆ [9-10]

ผลิตภัณฑ์อาหาร	ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ผลิตภัณฑ์ที่พบสูงสุด
กาแฟ (กาแฟพร้อมดื่ม กาแฟผงสำเร็จรูป)	3.4-16.3	กาแฟผงสำเร็จรูป
เครื่องดื่ม (ผสมแอลกอฮอล์ ไม่ผสมแอลกอฮอล์ เบียร์)	0.02-8.7	เครื่องดื่มไม่ผสมแอลกอฮอล์

2.1.6 อันตรายจากฟอร์มาลดีไฮด์ [11]

ในกรณีที่เราได้รับในปริมาณต่ำร่างกายสามารถกำจัดได้ แต่หากได้รับในปริมาณที่สูงขึ้นหรือมีความเข้มข้นมากขึ้น ฟอร์มาลินจะเปลี่ยนรูปเป็นกรดฟอร์มิค (Formic acid) ซึ่งมีฤทธิ์ทำลายการทำงานของเซลล์ในร่างกายทำให้เซลล์ตายได้ ฟอร์มาลินนั้นมีพิษต่อระบบต่างๆ เกือบทั่วทั้งร่างกายดังนี้

ฟอร์มาลินจะมีพิษต่อระบบทางเดินหายใจ หากได้รับในรูปของไอระเหยของฟอร์มาลดีไฮด์ แม้จะปริมาณต่ำ ๆ ถ้าถูกตาจะระคายเคืองตามาก ถ้าสูดดมเข้าไปจะทำให้หลอดลมบวม ทำให้แสบจมูก เจ็บคอ ไอ หายใจไม่ออก ปอดอักเสบ น้ำท่วมปอด ทำให้เป็นแผลหรือถึงขั้นตาบอด ถ้าสูดดมเข้าไปมาก ๆ จะทำให้น้ำท่วมปอด จนหายใจไม่ออกแน่นหน้าอกและตายในที่สุด อาการเหล่านี้อาจเกิดขึ้นหลายชั่วโมงหลังจากได้รับสารโดยไม่มีอาการเจ็บปวดเลยก็ได้ หากได้รับปริมาณน้อยเป็นเวลานานจะมีอาการไอและหายใจติดขัดเพราะหลอดลมอักเสบ เป็นต้น

ฟอร์มาลินจะมีพิษร้ายแรงต่อระบบทางเดินอาหาร เมื่อรับประทานอาหารที่ปนเปื้อนฟอร์มาลินในปริมาณมาก จะทำให้ปวดศีรษะอย่างรุนแรง หัวใจเต้นเร็ว แน่นหน้าอก ปากและคอแห้ง คลื่นไส้อาเจียน ถ่ายท้อง ปวดท้องอย่างรุนแรง กระเพาะอาหารอักเสบ เกิดแผลในกระเพาะอาหาร หากได้รับสารนี้โดยการบริโภคจะเกิดอาการพิษโดยเฉียบพลัน ซึ่งอาการมีตั้งแต่ปวดท้องอย่างรุนแรง อาเจียน อุจจาระร่วง ปัสสาวะไม่ออก หมดสติ ถ้าปล่อยทิ้งไว้อาจเสียชีวิตเพราะระบบหมุนเวียนเลือดล้มเหลว ถ้าหากได้รับในปริมาณ 60-90 ซีซี จะทำให้การทำงานของตับ ไต หัวใจ และสมองเสื่อมลง และก่อให้เกิดการปวดแสบปวดร้อนที่คอและปากเกิดการระคาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคืองต่อเยื่อบุทางเดินหายใจ คลื่นไส้ อาเจียน ปวดท้องอย่างรุนแรง หมดสติได้ นอกจากนี้ยังพบว่าฟอร์มาลินเป็นสารก่อมะเร็งด้วย

ฟอร์มาลีนมีผลต่อผิวหนัง เมื่อสัมผัสจะเกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ทำให้เกิดผื่นคันเป็นผื่นแดงเหมือนลมพิษจนถึงผิวหนังไหม้เปลี่ยนเป็นสีขาวได้หากสัมผัสโดยตรง

2.1.7 การปฐมพยาบาล [11]

2.1.7.1 หากถูกผิวหนัง ให้รีบล้างออกทันทีด้วยการรินน้ำผ่านเป็นปริมาณมากๆ เป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที และจะได้ผลดียิ่งขึ้นเมื่อใช้น้ำยาแอมโมเนีย 5% ถ้าเปื้อนเสื้อผ้าให้รีบถอดออกแล้วล้างร่างกายด้วยน้ำและสบู่อ่อน ส่วนเสื้อผ้าให้นำไปซักก่อนนำกลับมาใช้ใหม่ ในกรณีที่อาการไม่ดีขึ้นให้รีบนำผู้ป่วยส่งแพทย์

2.1.7.2 หากผู้ป่วยเกิดระคายเคืองตา ให้รีบล้างออกจากตาโดยเร็วให้ล้างด้วยน้ำเกลือ น้ำเย็น ให้ไหลผ่านตาเป็นเวลาอย่างน้อย 15 นาที พร้อมเปิดเปลือกตาบนและล่างเป็นครั้งคราว หากยังมีอาการระคายเคืองอยู่ให้นำผู้ป่วยไปพบแพทย์

2.1.7.3 หากหายใจเข้าไป ให้รีบนำผู้ป่วยออกจากบริเวณที่สัมผัสมายังที่ซึ่งมีอากาศบริสุทธิ์ และให้ผู้ป่วยสูดไอน้ำจากน้ำที่เติมแอมโมเนียสำหรับสูดดมลงไป 2-3 หยด ถ้ามีอาการรุนแรงให้ช่วยผายปอดและปั๊มหัวใจ และรีบนำผู้ป่วยส่งแพทย์

2.1.7.4 หากกลืนหรือกินฟอร์มาลินเข้าไป ถ้าผู้ป่วยยังมีสติอยู่ให้ดื่มน้ำตามเข้าไปเป็นปริมาณมากๆ หรือให้ดื่มน้ำนมตามเข้าไปหลังจากดื่มน้ำเข้าไปแล้ว หรือให้ activated charcoal เข้าไปล้างบริเวณปากผู้ป่วย และให้บ้วนปากด้วยน้ำ รีบนำผู้ป่วยส่งแพทย์โดยเร็วที่สุด

2.1.8 ข้อแนะนำสำหรับผู้บริโภค [11]

แหล่งอาหารที่มักพบฟอร์มาลินปนเปื้อน ได้แก่ อาหารทะเล เนื้อสัตว์ ผักสดและผลไม้ ถ้าผู้บริโภคสงสัยว่าอาหารที่บริโภคนั้นมีฟอร์มาลินไม่ควรซื้อมารับประทาน เพราะฟอร์มาลินเป็นสารที่มีกลิ่นฉุนมากเมื่อนำไปใส่ในอาหารดังกล่าวผู้บริโภคจะได้กลิ่นฉุนแน่นอน ดังนั้นก่อนการรับประทานหรือประกอบอาหารควรล้างให้สะอาดเสียก่อนเพื่อความมั่นใจและรับประทานได้อย่างปลอดภัย วิธีการตรวจสอบว่าอาหารมีฟอร์มาลินปนเปื้อนอยู่หรือไม่อาจใช้วิธีสังเกตง่ายๆ ได้ดังนี้ ถ้าเป็นเนื้อสัตว์ให้สังเกตว่า หากถูกแสงแดด หรือลมเป็นเวลานาน แล้วยังสดอยู่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ก็ไม่ควรซื้อ ถ้าเป็นผัก ผลไม้ที่มีลักษณะแข็ง เขียว กรอบหรือสดผิดปกติ และถ้าเป็นปลา หรือกุ้งเนื้อแข็งแต่บางส่วนเปื่อยยุ่ย ไม่ควรซื้อมาประกอบอาหารเนื่องจากอาจจะได้รับอันตรายจากฟอร์มาลินที่ปนเปื้อนมาได้ ส่วนผักหรือผลไม้ให้ดมที่ใบ หรือหักก้านดม หรือดมที่ผล ว่ามีกลิ่นแสบจมูกหรือไม่ ถ้ามีแสดงว่ามีฟอร์มาลินปนเปื้อน สำหรับการเลือกอาหารให้ปลอดภัยจากอันตรายของฟอร์มาลิน ควรเลือกซื้อดังนี้ ถ้าเป็นเนื้อที่ไม่แช่ฟอร์มาลิน หากถูกแสงแดด หรือลม เป็นเวลานานๆ เนื้อจะมีลักษณะแห้ง และไม่เต่งตึงอยู่เหมือนเดิม ควรเลือกซื้อผักอนามัยหรือผักกางมุ้ง เลือกผักที่ไม่มีลักษณะแข็งหรือกรอบจนเกินไป การเลือกอาหารทะเลควรเลือกอาหารที่สดเนื้อไม่เปื่อยยุ่ย สีไม่ผิดปกติ และอาหารทะเลต้องวางจำหน่ายในน้ำแข็งตลอดเวลาที่สำคัญต้องล้างอาหารให้สะอาดก่อนการปรุงเสมอ ฟอร์มาลีนเป็นสารอันตรายหากใช้ในทางที่ผิด ดังนั้นจึงควรใช้ด้วยความระมัดระวังและใช้อย่างถูกต้องเหมาะสม จึงจะมีประโยชน์ต่อเราและสังคมอย่างแท้จริง

2.2 กระบวนการโซล-เจล (Sol-Gel Process)

Segal (1989) ได้ให้ความหมายของกระบวนการโซลเจลไว้ว่าเป็นกระบวนการที่ใช้สังเคราะห์ออกไซด์ของสารอนินทรีย์ โดย“โซล (sol)” หมายถึงอนุภาคของแข็งที่เป็นคอลลอยด์กระจายตัวอยู่ในของเหลวอย่างมีเสถียรภาพ ส่วน“เจล (gel)” หมายถึงของแข็งที่มีโครงสร้างร่างแหใน 3 มิติ และเต็มไปด้วยรูพรุน ในกระบวนการโซลเจลนั้นเมื่ออนุภาคคอลลอยด์ใน “โซล” เกิดการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) และปฏิกิริยาควบแน่น (condensation) จะได้ของแข็งที่มีรูพรุนที่เรียกว่า “เจล” จึงเป็นที่มาของชื่อกระบวนการนั่นเอง [12] กระบวนการโซล-เจลนี้สามารถใช้เคลือบผิววัสดุต่างๆ ได้มากมายโดยอาศัยเทคนิคการเคลือบผิวทั่วไป ตัวอย่างวัสดุที่สามารถปรับปรุงสมบัติด้วย กระบวนการโซลเจลได้ คือ แก้ว ไม้ พลาสติก กระดาษ โลหะ และสิ่งทอ เป็นต้น [13] ข้อดีของกระบวนการโซลเจลคือทำได้ที่อุณหภูมิต่ำและปรับปรุงโครงสร้างได้หลากหลาย สามารถควบคุมอนุภาคหรือชั้นของออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ให้มีขนาดระดับนาโนได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นที่ใช้ สารเติมแต่ง และ สภาวะที่ทำการทดลอง [14] สารตั้งต้นที่นิยมใช้ในกระบวนการโซลเจลมักเป็นพวกอัลคอกไซด์ของโลหะหรือกึ่งโลหะ ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้เป็น $M(OR)_x$ เมื่อ M คือ โลหะหรือกึ่งโลหะ R คือ alkyl group และ x เป็น valence state ของโลหะหรือกึ่งโลหะนั้น ปฏิกิริยาโดยรวมเกิดขึ้นดังนี้

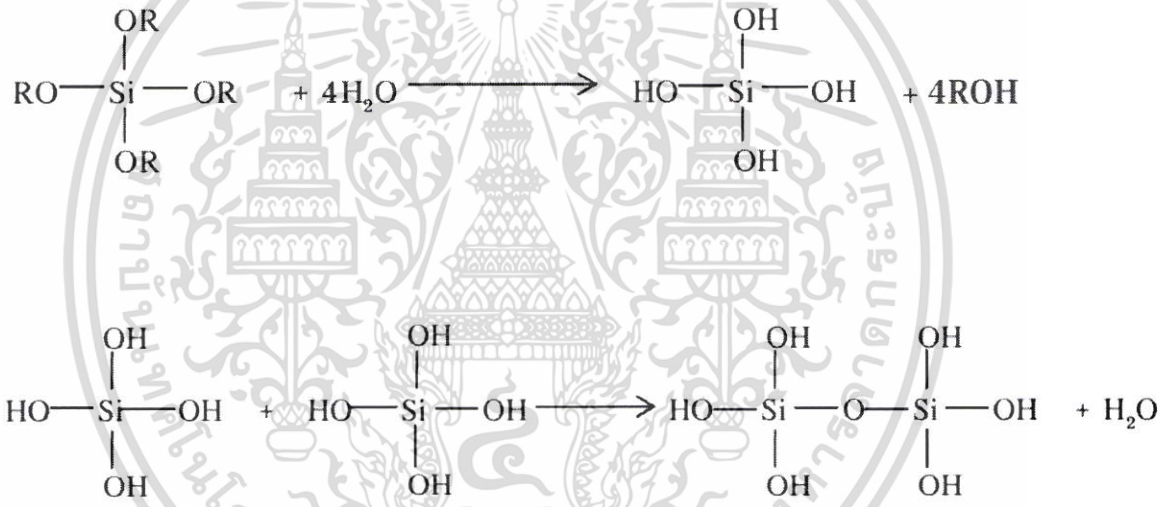
$$M(OR)_x + xH_2O \rightarrow M(OH)_x + xROH$$

$$2M(OH)_x \rightarrow M_2O_x + xH_2O$$

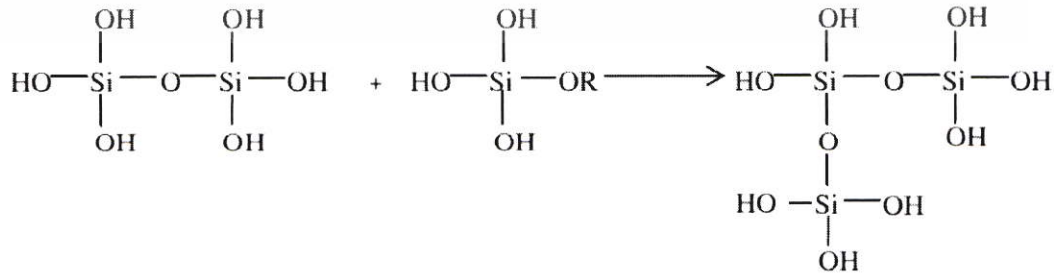
จะเห็นได้ว่าผลพลอยได้ที่เกิดจากปฏิกิริยานี้ คือแอลกอฮอล์ ROH ที่สามารถระเหยออกไปได้ สารตั้งต้นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากคือ สารจำพวกอัลคอกซีไซเลน (alkoxysilane) ซึ่งเป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบไซเลนที่มีพันธะ Si-O-R โดย -R เป็นหมู่อัลคิล ตัวอย่าง เช่น tetraethyl orthosilicate ($Si(OC_2H_5)_4$) เรียกโดยย่อว่า TEOS เป็นสารที่ศึกษากันมากที่สุดเนื่องจากสามารถควบคุมการเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายและมีราคาถูกในกระบวนการโซล-เจลของสารประเภทนี้สามารถใช้กรดหรือเบสเพื่อเร่งปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันก็ได้ แต่ในระบบจะต้องมีน้ำซึ่งจำเป็นสำหรับกระบวนการไฮโดรไลซิส และอาจผสมแอลกอฮอล์เพื่อช่วยในการละลายสารตั้งต้น ในกระบวนการโซล-เจลที่เร่งปฏิกิริยาด้วยกรดจะได้เจลที่มีโครงสร้างเป็นสายโซ่พอลิเมอร์เส้นตรงยาวพันกัน ขณะที่การเร่งปฏิกิริยาด้วยเบสจะได้โครงสร้างเจลที่มีช่องว่างขนาดใหญ่อยู่ระหว่างอนุภาคที่ยึดติดกัน [15] ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและการควบแน่นในกระบวนการโซลเจลของสารอัลคอกซีไซเลนสรุปได้ ดังรูปที่ 2.2 เมื่อใช้อัลคอกซีไซเลนเป็นสารตั้งต้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือซิลิกา (SiO_2) (รูปที่ 2.3) ที่มี โครงสร้างอสัณฐาน (amorphous) และมีรูพรุน (porous)



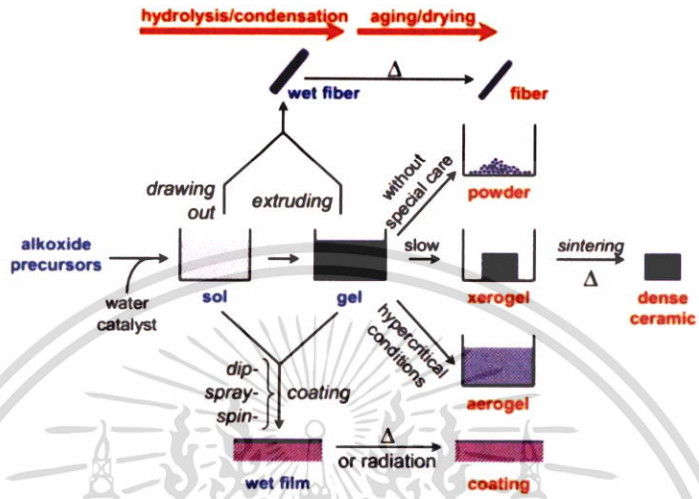
รูปที่ 2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและควบแน่นของสารประกอบอัลคอกซีไซเลน [16]



รูปที่ 2.3 โครงสร้างซิลิกา (SiO_2) ซึ่งได้จากไฮโดรไลซิสและควบแน่นของสารประกอบอัลคอก-ซีไซเลน [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

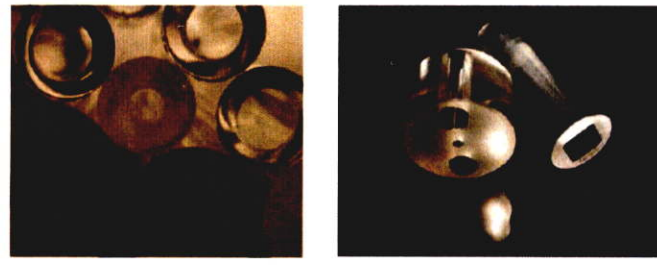
ในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็น Sol และ Gel เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้ง จะได้ผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆ เช่น fiber, aerogel, xerogel, powder และ coating film ดังแสดงในรูปที่ 2.4 เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมอื่นๆ ต่อไป



รูปที่ 2.4 ผลิตภัณฑ์รูปแบบต่างๆจากกระบวนการโซล-เจล [16]

การนำเทคโนโลยีโซล-เจลมาใช้ประโยชน์สามารถทำได้หลายรูปแบบเช่น ผงละเอียด ฟิล์มบาง เส้นใย และวัสดุก้อน ซึ่งเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น แก้วซิลิกา สารเคลือบป้องกันการสึกกร่อน การสะท้อนแสง และการเกาะติดผิวของน้ำ เป็นต้น เทคโนโลยีโซล-เจลจะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการผลิตสารหรือวัสดุมีสมบัติเฉพาะตัวหรือต้องการความบริสุทธิ์สูง หรือแม้แต่การผลิตสารหรือวัสดุทดแทนการใช้แร่หรือทรัพยากรธรรมชาติหายากและมีอยู่จำกัดเป็นวัตถุดิบ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลจะมีความบริสุทธิ์สูงเนื่องจากเป็นการเตรียมสารหรือวัสดุในระดับโมเลกุล ทำให้สามารถกำหนดสมบัติต่างๆ ที่ต้องการได้ง่ายนับเป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเคมี เทคโนโลยีพลังงาน อุตสาหกรรมรถยนต์ และอุตสาหกรรมเซรามิก เป็นต้น การนำเทคโนโลยีโซล-เจลมาใช้ประโยคในเชิงอุตสาหกรรม ยังต้องศึกษาในรายละเอียดเกี่ยวกับสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมและลักษณะหรือสมบัติของสารหรือวัสดุที่ต้องการ ซึ่งมีความแตกต่างกันในแต่ละผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามแนวโน้มการนำเทคโนโลยีดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากกระบวนการโซล-เจลเป็นเทคโนโลยีการผลิตที่ทำได้ที่อุณหภูมิห้อง สามารถทำได้ตั้งแต่ระดับห้องปฏิบัติการจนถึงระดับอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถสนองตอบความต้องการของผู้บริโภคได้จริง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซล-เจล ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์แก้วจากกระบวนการโซล-เจล [16]

2.3 หลักการทำงานของเครื่องสแกน (Scanner) [17]

เครื่องสแกน คือ อุปกรณ์ต่อเชื่อมคอมพิวเตอร์แบบกราฟิก ที่มีหน้าที่ในการเปลี่ยนแปลงภาพต้นฉบับ (รูปถ่าย, ตัวอักษรบนหน้ากระดาษ, ภาพวาด) ให้เป็นข้อมูล เพื่อให้คอมพิวเตอร์สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้ประโยชน์ในการแสดงผลที่หน้าจอ ทำให้สามารถแก้ไขตกแต่งเพิ่มเติมและจัดเก็บข้อมูลได้ โดยคำว่าสแกน (scan) หมายถึง กราดตรวจ, กราดภาพเครื่องสแกนหรือเครื่องกราด-ภาพจะทำการตรวจสอบข้อมูลในลักษณะตัวอักษร หรือภาพโดยเรียงลำดับทีละส่วน

2.3.1 ประเภทของเครื่องสแกน

2.3.1.1 Desktop scanner มีลักษณะเป็นแท่นในแนวราบ แบ่งเป็น 2 แบบ

1. แบบใส่กระดาษ แล้วเลื่อนกระดาษเองเรียกว่า sheet fed scanner
2. แบบวางกระดาษ แล้วให้หัวสแกนเลื่อนอ่านข้อมูลจากกระดาษ เรียกว่า Flatbed scanner

เครื่องสแกนภาพ Desktop scanner ดังแสดงในรูปที่ 2.6

sheet fed scanner[18] flatbed Scanner [19]

รูปที่ 2.6 เครื่องสแกนแบบ Desktop scanner

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.1.2 Handy scanner มีขนาดเล็กสามารถจับถือได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.7

รูปที่ 2.7 เครื่องสแกนแบบ Handy scanner [20]

เครื่องสแกน มีหลักการทำงานคือ เครื่องอ่านภาพจะทำการอ่านภาพโดยอาศัยการสะท้อนหรือการส่องผ่านของแสงกับภาพต้นฉบับที่ทึบแสงหรือโปร่งแสงให้ตกกระทบกับแถบของอุปกรณ์ไวแสง (photosensitive) ซึ่งมีชื่อในทางเทคนิคว่า Charge-Couple Device (CCD) ตัว CCD จะรับแสงดังกล่าวลงไปเก็บไว้ในเส้นเล็กของเซลล์และจะแปลงคลื่นแสงของแต่ละเซลล์เล็กๆ ให้กลายเป็นคลื่นความต่างศักย์ ซึ่งจะแตกต่างไปตามอัตราส่วนของระดับความเข้มของแสงแต่ละจุด ตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล หรือ ADC : Analog to Digital Convertor จะแปลงคลื่นความต่างศักย์ให้เป็นข้อมูลในรูปแบบที่คอมพิวเตอร์เข้าใจในเวลาเดียวกัน โปรแกรมในการอ่านจะควบคุมการทำงานของเครื่องอ่านภาพให้รับข้อมูลเข้าและจัดรูปแบบเป็นแฟ้มข้อมูลของภาพในระบบคอมพิวเตอร์ต่อไป

2.3.2 ภาพจากการสแกน

ภาพในคอมพิวเตอร์จะอยู่ในรูปแบบดิจิทัล คอมพิวเตอร์แทนส่วนเล็กๆ ของภาพที่เรียกว่า พิกเซล (pixels) ขนาดของไฟล์รูปภาพ จะประกอบด้วยจำนวนพิกเซลเป็นร้อยเป็นพัน คอมพิวเตอร์จะบันทึกค่าความเข้มและค่าสีของพิกเซลแต่ละพิกเซลด้วยจำนวน 1 บิต หรือหลายๆ บิต จำนวนของพิกเซลจะเป็นตัวแสดงถึงความละเอียด และถ้ามีจำนวนบิตต่อพิกเซลมาก สีที่ได้ก็จะมากตามไปด้วยรูปแบบการเก็บข้อมูลมีหลายระบบ เช่น 1 บิต 8 บิต และ 24 บิต โดยถ้าเป็นข้อมูลแบบ 1 บิต จะใช้สำหรับเก็บข้อมูลต่อพิกเซล 2 สถานะ คือ 1 และ 0 ซึ่งจะแสดงสีได้เฉพาะขาวกับดำ แต่ถ้าเป็น 8 บิต จะใช้ความแตกต่างของสีถึง 256 ระดับ การรวมแม่สีมีเทคนิคที่เรียกว่า dithering ซึ่งจะแสดงสีได้ไม่เหมือนกับ ความจริงที่เรามองเห็นได้ สำหรับระบบ 24 บิต จะให้ภาพที่มีสีใกล้เคียงจริงมากที่สุด เรียกว่า photo-realistic โดยจะแบ่ง 24 บิต เป็น 3 ส่วน คือ แดง เขียว น้ำเงิน ส่วนละ 8 บิต เมื่อรวมทั้ง 3 ส่วนเข้ากันแล้ว จะสามารถแสดงสีได้ถึง 16.7 ล้านสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.3 การทำงานของเครื่องสแกน

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องสแกน คือแหล่งกำเนิดแสงซึ่งจะทำหน้าที่ฉายแสงไปที่กระดาษที่วางอยู่บนกระจก พื้นที่สีขาวที่ฝาปิดจะช่วยให้การสะท้อนของแสงดีขึ้น เมื่อสั่งให้เครื่องสแกนทำงาน มอเตอร์จะขับเคลื่อนหัวสแกนผ่านใต้กระดาษ ในระหว่างที่เคลื่อนที่นี้หัวสแกนจะจับแสงที่สะท้อนมาจากแต่ละพื้นที่ของกระดาษ ซึ่งพื้นที่นี้จะมีขนาดประมาณ 1/90,000 ตารางนิ้ว แสงจากกระดาษจะสะท้อนผ่านระบบกระจกเพื่อทำให้ลำแสงนั้นได้ไปในทิศทางที่เหมาะสมไปยังเลนส์ เลนส์จะรวมแสงเพื่อไปผ่านไดโอดแสง เพื่อแปลงข้อมูลแสงนี้ให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้า ถ้ามีแสงผ่านไปที่ไดโอดมากปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่ได้ก็จะมากขึ้น ถ้าเป็นเครื่องสแกนแบบสีแสงที่สะท้อนนี้จะผ่านไปยังฟิลเตอร์แดง เขียว หรือน้ำเงินที่อยู่หน้าไดโอด ADC จะเก็บข้อมูลอนาล็อกแต่ละส่วนนี้ไว้ ซึ่งข้อมูลแต่ละส่วนนี้เรียกว่า พิกเซล ซึ่งในความยาวหนึ่งนิ้วจะประกอบด้วยพิกเซลประมาณ 300 - 1,200 พิกเซล การเคลื่อนที่ของเครื่องสแกนบางประเภทตัวกระดาษไม่เคลื่อนที่สิ่งที่เคลื่อนที่คือ หัวสแกน แต่ในเครื่องสแกนระดับสูงหัวอ่านจะไม่เคลื่อนที่จะมีตัวหมุนกระดาษเข้าไปด้วยวิธีนี้ทำให้คุณภาพที่ได้จากการเครื่องสแกนแบบนี้สูงกว่า

2.4 ระบบสี (Color System) [21]

ระบบสีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายระบบด้วยกัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับการนำไปใช้ แต่โดยทั่วไปแล้วทุกระบบสีจะมีแนวคิดเดียวกันคือ การแทนจุดสีด้วยจุดที่อยู่ภายในสเปส 3 มิติ โดยจะมีแกนอ้างอิงสำหรับจุดสีนั้นในสเปส ซึ่งแต่ละแกนจะมีความเป็นอิสระต่อกัน ตัวอย่างเช่นในระบบ RGB จะมีแกนสีคือ แกนสีแดง เขียว และน้ำเงิน ในระบบ HSV จะมีแกนเป็น ค่าสี (hue) ความบริสุทธิ์ของสี (saturation) และความสว่าง (value)

โดยปกติแล้วระบบสี หรือระบบการแทนค่าสีที่ใช้ในงานกราฟิกคอมพิวเตอร์ หลักๆ ที่ใช้กันทั่วไปประกอบไปด้วย 4 ระบบสีด้วยกัน คือ RGB, CMYK, HSV และ Lab โดยแต่ละระบบสีนั้นมีความหมายที่แตกต่างกันดังนี้

2.4.1 ระบบสี RGB

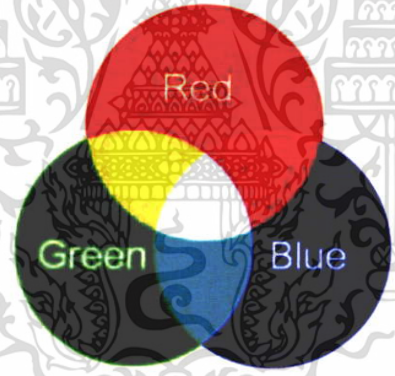
ระบบสี RGB เป็นระบบสีของแสง ซึ่งเกิดจากการหักเหของแสงผ่านแท่งแก้วปริซึมจะเกิดแถบสีที่เรียกว่า สีรุ้ง (Spectrum) ซึ่งแยกสีตามที่สายตามองเห็นได้ 7 สี คือ แดง แสด เหลือง เขียว น้ำเงิน คราม ม่วง ซึ่งเป็นพลังงานอยู่ในรูปของรังสี ที่มีช่วงคลื่นที่สายตาสามารถมองเห็นได้ แสงสีม่วงมีความถี่คลื่นสูงที่สุด คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าแสงสีม่วงเรียกว่า อัลตราไวโอเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Ultra Violet) และคลื่นแสงสีแดงมีความถี่คลื่นต่ำที่สุด คลื่นแสงที่ต่ำกว่าแสงสีแดงเรียกว่า อินฟราเรด (Infrared) คลื่นแสงที่มีความถี่สูงกว่าสีม่วงและต่ำกว่าสีแดงนั้น สายตาของมนุษย์ไม่สามารถรับได้ และเมื่อศึกษาดูแล้วแสงสีทั้งหมดเกิดจากแสงสี 3 สี คือ สีแดง สีน้ำเงิน และสีเขียว ในสัดส่วนความเข้มข้นที่แตกต่างกัน เมื่อนำมาผสมกันทำให้เกิดสีต่างๆ บนจอคอมพิวเตอร์ได้มากถึง 16.7 ล้านสี ซึ่งใกล้เคียงกับสีที่ตาเรามองเห็นได้โดยปกติ และจุดที่สีทั้งสามสีรวมกันจะกลายเป็นสีขาว นิยมเรียกการผสมสีแบบนี้ว่าแบบ “Additive” หรือการผสมสีแบบบวก ซึ่งเป็นการผสมสีขั้นที่ 1 หรือถ้านำเอา Red Green Blue มาผสมครั้งละ 2 สี ก็จะทำให้เกิดสีใหม่ เช่น

Blue	+	Green	=	Cyan
Red	+	Blue	=	Magenta
Red	+	Green	=	Yellow

แสงสี RGB มักจะถูกใช้สำหรับการส่องสว่างทั้งบนจอทีวีและจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งสร้างจากการให้กำเนิดแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ทำให้สีดูสว่างกว่าความเป็นจริง ระบบสี RGB แสดงในรูปที่ 2.8



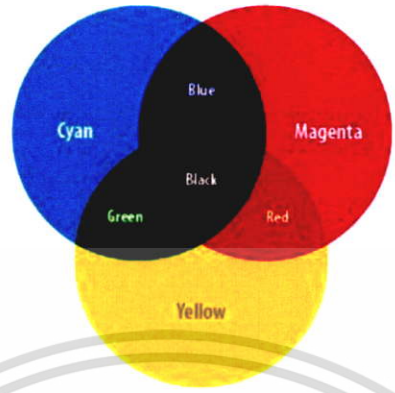
รูปที่ 2.8 แสดงระบบสี RGB [22]

2.4.2 ระบบสี CMYK

เป็นระบบสีที่ใช้กับเครื่องพิมพ์ ซึ่งประกอบด้วยสีพื้นฐาน คือ สีฟ้า (Cyan), สีม่วงแดง (Magenta), สีเหลือง (Yellow) และเมื่อนำสีทั้ง 3 สีมาผสมกันจะเกิดสีเป็น สีดำ (Black) แต่จะไม่ดำสนิทเนื่องจากหมึกพิมพ์มีความไม่บริสุทธิ์ โดยเรียกการผสมสีทั้ง 3 สีข้างต้นว่า “Subtractive Color” หรือการผสมสีแบบลบหลักการเกิดสีของระบบนี้คือ หมึกสีหนึ่งจะดูดกลืนสีจากสีหนึ่งแล้วสะท้อนกลับออกมาเป็นสีต่างๆ เช่น สีฟ้าดูดกลืนสีม่วงแล้วสะท้อนออกมาเป็นสีน้ำเงิน ซึ่งจะสังเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้ว่าสีที่สะท้อนออกมาจะเป็นสีหลักของระบบ RGB การเกิดสีนี้ในระบบนี้จึงตรงข้ามกับการเกิดสีในระบบ RGB ระบบสี CMYK แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แสดงระบบสี CMYK [23]

2.4.3 ระบบสี HSV

เป็นระบบสีพื้นฐานในการมองเห็นสีด้วยสายตาของมนุษย์ ประกอบด้วยลักษณะของสี 3 ลักษณะ คือ

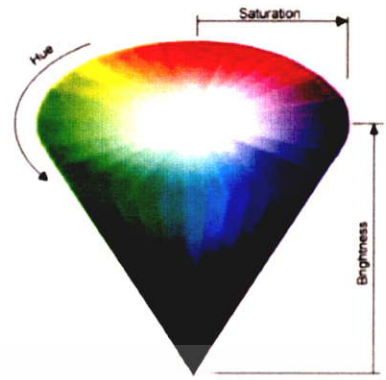
- Hue คือ สีต่างๆ ที่สะท้อนออกมาจากวัตถุเข้ามายังตาของเรา ทำให้เราสามารถมองเห็นวัตถุเป็นสีต่างๆ ได้ ซึ่งแต่ละสีจะแตกต่างกันตามความยาวของคลื่นแสงที่มากระทบวัตถุและสะท้อนกลับที่ตาของเรา Hue ถูกวัดโดยตำแหน่งการแสดงสีบน Standard Color Wheel ซึ่งถูกแทนด้วยองศาตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ซึ่งสามารถแทนให้อยู่ในรูปขององศาได้ดังนี้คือ สีแดง = 0 องศา สีเขียวเท่ากับ 120 องศา สีน้ำเงินเท่ากับ 240 องศา

- Saturation คือ ความสดของสี โดยค่าความสดของสีจะเริ่มที่ 0 ถึง 100 ถ้ากำหนด Saturation ที่ 0 สีจะมีความสดน้อย แต่ถ้ากำหนดที่ 100 สีจะมีความสดมาก ถ้าถูกวัดโดยตำแหน่งบน Standard Color Wheel ค่า Saturation จะเพิ่มขึ้นจากจุดกึ่งกลางจนถึงเส้นขอบ โดยค่าที่เส้นขอบจะมีสีที่ชัดเจนและอิ่มตัวที่สุด

- Value คือ ระดับความสว่างและความมืดของสี โดยค่าความสว่างของสีจะเริ่มที่ 0 ถึง 100 ถ้ากำหนดที่ 0 ความสว่างจะน้อยซึ่งจะเป็นสีดำ แต่ถ้ากำหนดที่ 100 สีจะมีความสว่างมากที่สุดยิ่งมีค่า Value มากจะทำให้สีนั้นสว่างมากขึ้น

ระบบสี HSV แสดงในรูปที่ 2.10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แสดงระบบสี HSV [24]

2.4.4 ระบบ LAB [24]

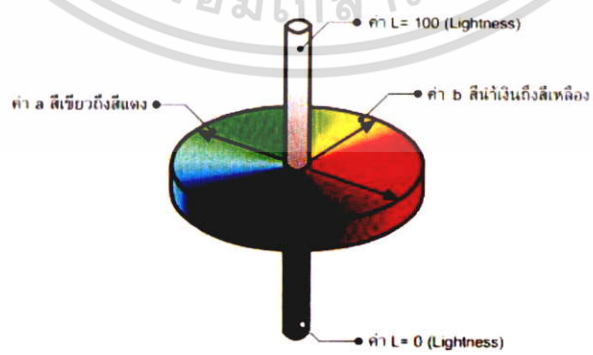
ระบบสีแบบ Lab เป็นค่าสีที่ถูกกำหนดขึ้นโดย CIE (Commission Internationale d' Eclarirage) เพื่อให้เป็นสีมาตรฐานกลางของการวัดสีทุกรูปแบบ ครอบคลุมทุกสีใน RGB และ CMYK และใช้ได้กับสีที่เกิดจากอุปกรณ์ทุกอย่างไม่ว่าจะเป็นจอคอมพิวเตอร์ เครื่องพิมพ์ เครื่องสแกน และอื่นๆ ส่วนประกอบของโหมดสีนี้ได้แก่

L หรือ Luminance เป็นการกำหนดความสว่างซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 100 ถ้ากำหนดที่ 0 จะกลายเป็นสีดำ แต่ถ้ากำหนดที่ 100 จะกลายเป็นสีขาว

A เป็นค่าของสีที่ไล่จากสีเขียวไปสีแดง

B เป็นค่าของสีที่ไล่จากสีน้ำเงินไปสีเหลือง

ระบบสี LAB แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงระบบสี LAB [25]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 การประมวลผลภาพ (Image Processing) [26]

การประมวลผลภาพ (Image Processing) หมายถึง การนำภาพมาประมวลผลหรือคิดคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เราต้องการทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยมีขั้นตอนต่างๆ ที่สำคัญ คือ การทำให้ภาพมีความคมชัดมากขึ้น การกำจัดสัญญาณรบกวนออกจากภาพ การแบ่งส่วนของวัตถุที่สนใจออกมาจากภาพ เพื่อนำภาพวัตถุที่ได้ไปวิเคราะห์หาข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น ขนาด รูปร่าง และทิศทางการเคลื่อนของวัตถุในภาพ จากนั้นนำข้อมูลเชิงปริมาณเหล่านี้ไปวิเคราะห์ และสร้างเป็นระบบ เพื่อใช้ประโยชน์ในงานด้านต่างๆ หนึ่งในขั้นตอนของการประมวลผลภาพคือ การประมวลผลสีของภาพซึ่งจะใช้ระบบสี (Color Model) ในการประมวลผลภาพ

เมื่อหลายสิบปีมาแล้ว การประมวลผลภาพนั้น จะอยู่ในรูปของการประมวลผลสัญญาณอนาล็อก (analog) โดยใช้อุปกรณ์ปรับแต่งแสง (optics) ซึ่งวิธีเหล่านั้นก็ไม่ได้หายสาบสูญ หรือเลิกใช้ไป ยังมีใช้เป็นส่วนสำคัญ สำหรับการประยุกต์ใช้งานบางอย่าง เช่น ฮอโลกราฟี (holography) แต่เนื่องจากอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในปัจจุบัน ราคาถูกลง และเร็วขึ้นมาก การประมวลผลภาพดิจิทัล (digital image processing) จึงได้รับความนิยมมากกว่า เพราะการประมวลผลที่ทำได้ซับซ้อนขึ้น แม่นยำ และง่ายในการลงมือปฏิบัติ ยกตัวอย่างการนำภาพมาเปลี่ยนเป็นข้อมูลดิจิทัล เช่นระบบตรวจกระดาษคำตอบ ระบบตรวจจับใบหน้าในกล้องดิจิทัล ระบบอ่านบาร์โค้ด ระบบตรวจจับความเคลื่อนไหวเพื่อการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น

2.6 ชุดทดสอบภาคสนาม (On-site monitoring test kit) [27]

โดยทั่วไปมีจุดประสงค์เพื่อใช้สำหรับการทดสอบ หรือการวิเคราะห์สารที่ได้ในภาคสนามอย่างง่ายและรวดเร็วสำหรับผู้ใช้ที่ทำการสำรวจวิจัยในภาคสนาม ชุดทดสอบสารภาคสนามอย่างง่ายจึงต้องมีสมบัติง่ายๆ ที่เป็นข้อดีคือ ใช้ในการทดสอบสารอย่างรวดเร็วในภาคสนาม เพื่อให้ได้ผลทดสอบทันที เพื่อการทดสอบตัวอย่างจำนวนมาก เพื่อให้สามารถทดสอบในสภาวะจริง เนื่องจากการทดสอบที่ทำในห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องมีการเก็บตัวอย่างและเติมสารคงตัว (Preservative) ตามความจำเป็นจึงไม่ใช่การทดสอบสภาวะจริง ชุดทดสอบภาคสนามอย่างง่ายส่วนใหญ่มีข้อเสียคือมีไว้ใช้สำหรับการคัดกรอง (screening) ใช้ได้เพียงตัวอย่างที่ไม่มีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน มีความถูกต้องแม่นยำน้อยกว่าวิธีในห้องปฏิบัติการ และไม่สามารถใช้การทดสอบที่ต้องการความแม่นยำสูง เพราะชุดทดสอบสามารถทำได้เพียงวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) แต่สิ่งที่เป็นนวัตกรรมใหม่ คือ การพัฒนาให้นำไปใช้งานได้ง่าย นำไปใช้ในภาคสนามได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สิ่งที่พัฒนาขึ้นคือ การคิดค้นประดิษฐ์กระดาษทดสอบอันเป็นนวัตกรรม มีการใช้รีเอเจนต์ปริมาณลดลงและสามารถวัดสารในเชิงปริมาณได้แม่นยำ และสามารถวัดปริมาณสารในระดับต่ำมากถึง ppm (Part Per Million) ส่วนในล้านส่วน โดยปกติแล้วชุดทดสอบในภาคสนามไม่สามารถนำมาวิเคราะห์ในเชิงปริมาณได้ (Quantitative analysis)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.7.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจฟอร์มาลดีไฮด์

ประกาย อนันคำ และ รัชนี ใจดี [28] ได้ศึกษาวิจัยทำการวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในผลิตภัณฑ์สำหรับล้างจานที่ทำการสุ่มตัวอย่างจากร้านค้าและห้างสรรพสินค้าภายในเขตอำเภอเมือง จังหวัดลำปาง การตรวจสอบอาศัยหลักการของปฏิกิริยาการควบแน่นระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์ด้วยกรดซัลฟิวริกเข้มข้นที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ทำให้เปลี่ยนเป็นสารประกอบควิโนนที่มีสีม่วงเข้ม มีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 578 นาโนเมตร จากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ จำนวน 6 ตัวอย่าง ตรวจพบปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์อยู่ในช่วง 5-20 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ของฟอร์มาลดีไฮด์ มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 0.017 (n=11) เมื่อใช้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 3 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ขีดจำกัดของการวิเคราะห์เท่ากับ 0.08 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร มีการทดสอบประสิทธิภาพของวิธีวิเคราะห์พบว่ามีค่าร้อยละของการกลับคืนของฟอร์มาลดีไฮด์เท่ากับ 100

กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ [29] ได้ผลิตชุดทดสอบฟอร์มาลีนในอาหารที่สะดวกรวดเร็วต่อการตรวจภายในชุดทดสอบดังกล่าวประกอบด้วยสารเคมีสำหรับการทดสอบ 3 ชนิด และหลอดสำหรับใช้บรรจุของเหลวที่แช่อาหาร โดยชุดน้ำยาที่ 1 ได้แก่สารละลายฟีนิลไฮดราซีน-ไฮโดรคลอไรด์ ชุดน้ำยาที่ 2 ได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซด์ยาโนเฟอร์เรตและน้ำยาชุดที่3 ได้แก่ สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ทั้งนี้ทำการตรวจตามคำแนะนำในชุดทดสอบ ซึ่งการทดสอบดังกล่าวเป็นวิธีการที่ง่าย ระดับต่ำสุดที่สามารถตรวจได้คือ 0.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม โดยกรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ได้รายงานผลการตรวจสอบอาหารในตลาดสดของกรุงเทพมหานคร จำนวน 48 ตัวอย่าง พบฟอร์มาลีนในผ้าขี้ริ้ววัว จำนวน 3 ตัวอย่าง (จากการสุ่ม จำนวน 4 ตัวอย่าง) ในปลาหมึกกรอบที่ใส่ในเย็นตาโฟจำนวน 2 ตัวอย่าง (จากการสุ่มจำนวน 6ตัวอย่าง)

British Standard DD CEN/TS 13130-23 [30] เป็นวิธีวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่แพร่จากผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ภายใต้สภาวะทดสอบ migration ที่กำหนดสกัด formaldehyde จากตัวอย่างด้วยน้ำภายใต้สภาวะทดสอบ migration ที่อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยที่ฟอร์มาดีไฮด์ในน้ำทำปฏิกิริยากับอะซีติลอะซีโตนได้ dimethyl pyridine นำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง spectrophotometer ที่ความยาวคลื่น 413 nm วัดปริมาณเทียบกับกราฟมาตรฐาน

A. N. Ramdzan และคณะ [31] ได้เสนออุปกรณ์ μPAD ที่พัฒนาขึ้นสำหรับการตรวจวัดอัลดีไฮด์ทั้งหมดในตัวอย่างน้ำลาย ซึ่งมันอาจก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง ผู้วิจัยได้เลือกปฏิกิริยาที่ขึ้นอยู่กับการเกิดสีระหว่างอัลดีไฮด์, 3-methyl-2-benzothiazolinone hydrazone (MBTH) และ iron(III) จะทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินของ formazan dye นอกจากนี้ μPAD ได้รับการออกแบบแบบสามมิติที่มีกระดาษ 2 ชั้นซ้อนทับกัน และทำการใช้หมึกพิมพ์แบบ wax ปริ้น μPAD ให้มีส่วนที่ไม่ชอบน้ำตามรูปแบบที่ออกแบบไว้ และที่ต้องทำเป็น 2 ชั้น เพราะว่าปฏิกิริยาที่เลือกใช้มี 2 ขั้นตอน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของ μPAD แสดงผลโดยช่วงความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 20.4-114.0 ไมโครโมลาร์ ค่าขีดจำกัดที่ตรวจพบเท่ากับ 6.1 ไมโครโมลลาร์ และค่า %RSD เท่ากับ 12.7% (n=5) สามารถเก็บรักษา μPAD ที่อุณหภูมิต่ำกว่า -20 องศาเซลเซียส ได้ 41 วัน

O.Bunkoed และคณะ [32] ได้ทำการพัฒนาเซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในอากาศ โดยเลือกวิธีการโซล-เจลในการจับกับรีเอเจนต์ที่ใช้ในการตรวจวัดฟอร์มาลดีไฮด์ ซึ่งคณะผู้วิจัยเลือกใช้รีเอเจนต์เป็นอะซีติลอะซีโตนเมื่อทำปฏิกิริยากับฟอร์มาลดีไฮด์จะให้ผลิตภัณฑ์สีเหลืองซึ่งทำการตรวจวัดได้โดยตรง โดยใช้วิธีสเปกโตรเมทรีไม่ต้องเตรียมตัวอย่างก่อนการวิเคราะห์ จากผลการทดลองพบว่าขีดจำกัดของการตรวจพบเท่ากับ 0.03 ppmv ซึ่งต่ำกว่าค่าสัมผัสความเข้มข้นสูงสุดที่รายงานโดยองค์การอนามัยโลก และในตัวอย่างอากาศพบว่าวิธีที่พัฒนามีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 6.3% และ 4.6% ที่ความเข้มข้น 0.2 และ 1 ppmv ตามลำดับ

P.Wahed และคณะ [33] ได้ทำการศึกษาวิธีการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในอาหารและอาหารสัตว์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟเหลวความดันสูง (HPLC) โดยหาสภาวะที่เหมาะสมและตรวจสอบความถูกต้องของวิธีโครมาโทกราฟเหลวความดันสูงพบว่าวิธีนี้เป็นวิธีที่มีคุณลักษณะของวิธีวิเคราะห์ที่ดีโดยพิจารณาจากความเป็นเส้นตรง ความเที่ยง ความแม่นยำ ความจำเพาะเจาะจง และความคงทน วิธีวิเคราะห์นี้สามารถประยุกต์ใช้กับตัวอย่างอาหารที่มีความหลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพเทียบเท่ากับวิธีอ้างอิงมาตรฐาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

S.T. Girousi และคณะ [34] ได้เสนอวิธี fluorometry ซึ่งเป็นวิธีวิเคราะห์ที่ง่าย มีความไวและมีความจำเพาะเจาะจงสำหรับการตรวจวัดฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างน้ำ สามารถตรวจหาปริมาณได้อย่างต่อเนื่องและคณะผู้วิจัยได้เลือกใช้ 3,4-diaminoanisole ในสารละลายเอทานอล-น้ำ ในสภาวะด่างเป็นสารฟลูออเรสเซนต์เซ็นเซอร์ความเข้มแสงของฟลูออเรสเซนต์ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบในตัวทำละลายและตัวรบกวนอื่นๆในวิธีการวิเคราะห์นี้พบค่าขีดจำกัดของการตรวจพบเท่ากับ 0.6 ไมโครกรัมต่อลิตร ค่าร้อยละคืนกลับเท่ากับ 93% และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์เท่ากับ 6.05% ที่ความเข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อลิตร

S. Teerasong และคณะ [35] ได้พัฒนาระบบการไหลที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดปริมาณของฟอร์มาลดีไฮด์ปนเปื้อนในอาหาร โดยอาศัยพื้นฐานของปฏิกิริยา hantzsch และภายใต้สภาวะที่เหมาะสมให้กราฟเป็นเส้นตรงที่ความเข้มข้น 10-100 ไมโครโมลาร์ ได้ให้ค่าขีดจำกัดของการตรวจพบและค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณเท่ากับ 0.06 และ 0.10 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ได้ประยุกต์ระบบวิเคราะห์เพื่อวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในผลิตภัณฑ์หมึกแห้ง ผัก และเห็ด

K. P. Shrivastaw and S. Singh [36] ทำการพัฒนาวิธีตรวจหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในสารชีวภาพ โดยเสนอโครงสร้างเชิงซ้อนที่เกิดสีโดยเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างสารฟอร์มาลดีไฮด์กับฟีนิลไฮดราซีน โพแทสเซียมเฟอริกไซยาไนด์ และคลอโรฟอร์มที่มีเมทานอลปรากฏอยู่ ซึ่งมีความเสถียรภาพสูง มีความจำเพาะ และมีความไวในการวิเคราะห์

2.7.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างอุปกรณ์ตรวจวิเคราะห์บนกระดาษ

ปริวรรต โนนศิริ และคณะ [27] ได้ศึกษาและพัฒนาการใช้ชุดทดสอบแบบจุดบนกระดาษ การเตรียมจุดรีเอเจนต์ใช้สารละลายโซล–เจลเจือด้วยรีเอเจนต์ที่เหมาะสม ประกอบด้วยแมกนีเซียม-อีดีทีเอ และอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที ซัลเฟตไอออนในน้ำทำปฏิกิริยากับสารละลายแบเรียมคลอไรด์มากเกินพอ ได้ตะกอนแบเรียมซัลเฟต นำส่วนของสารละลายหลังตกตะกอนแล้วไปหยดบนจุดรีเอเจนต์บนกระดาษ แบเรียมคลอไรด์ที่เหลือจะทำปฏิกิริยากับแมกนีเซียมอีดีทีเอและแอริโอโครมแบลคที สารเชิงซ้อนที่ได้คือแมกนีเซียมแอริโอโครมแบลคที ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสี ความเข้มข้นของซัลเฟตที่ทำการทดสอบคือ 50, 100, 250 และ 500 ppm ตรวจสอบความเข้มสีด้วยเครื่องสแกน ได้กราฟมาตรฐานมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงตามสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$y = 0.0541x + 18.809$ มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) เท่ากับ 0.9938 ได้ค่าร้อยละการคืนกลับอยู่ในช่วง 89 – 145 %

กฤตยพร ศรทอง และคณะ [37] ได้ศึกษาและพัฒนาชุดทดสอบแบบจุดบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์ไนไตรท์ โดยการเตรียมจุดรีเอเจนต์บนกระดาษด้วยวิธีโซล-เจล ใช้ซัลฟานิลาไมด์เป็นรีเอเจนต์ เมื่อหยดสารละลายมาตรฐานไนไตรท์ลงบนจุดรีเอเจนต์ ไนไตรท์จะทำปฏิกิริยากับซัลฟานิลาไมด์ได้สารประกอบ Diazonium ซึ่งจะทำปฏิกิริยาต่อกับแนฟทิลเอทิลีนไดอะมีนไดไฮโดร-คลอไรด์ (NED) ได้สีชมพูของสารประกอบ Azo dye หยดโซล-เจลเจือซัลฟานิลาไมด์ในปริมาตร 10.00 ไมโครลิตรลงบนกระดาษกรอง เพื่อใช้เป็นจุดรีเอเจนต์ ทำการวิเคราะห์ไนไตรท์โดยหยดสารละลายมาตรฐานไนไตรท์หรือสารละลายตัวอย่างปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร และสารละลาย NED (0.0039 M) ปริมาตร 3.00 ไมโครลิตร ลงบนจุดรีเอเจนต์ กราฟมาตรฐานที่ได้มีความเป็นเส้นตรงในช่วง 2-10 mg-N/L ตามสมการ ED = $14.53[NO_2^-] + 8.160$ ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัด (LOD) และขีดจำกัดต่ำสุดของการวิเคราะห์ (LOQ) เท่ากับ 1.66 และ 5.55 mg-N/L ตามลำดับ ผลการการวิเคราะห์หาไนไตรท์ในตัวอย่างผักบุ้งจีน ผักกวางตุ้งและผักคะน้า พบว่ามีไนไตรท์เท่ากับ 1.66, 0.41 และ 1.61 mg-N/L ตามลำดับ วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ให้ค่าวิเคราะห์คืนกลับ (%recovery) อยู่ในช่วง 100.34 - 105.22% และค่า %RSD อยู่ในช่วง 0.55 - 0.93%

ฉันท์ทัต วงษ์ดี [38] ได้พัฒนาชุดทดสอบบนกระดาษสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กโดยทำการเติมออโทฟีแนนโทรลีนเป็นส่วนผสมในสารละลายโซล-เจล ใช้ไมโครปิเปตหยดสารละลายนี้ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตรลงบนกระดาษกรอง ตัดแผ่นกระดาษกรองเป็นรูปวงกลมตามรอยขอบของสารละลายโซล-เจล ได้เป็นกระดาษทดสอบ สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบปริมาณเหล็กคือทำการแช่แผ่นกระดาษทดสอบในสารละลายผสมระหว่างสารละลายเหล็กกับสารละลายไฮดรอกซาลา-มีนไฮโดรคลอไรด์ที่ปรับ pH เป็น 4.5 ปริมาตรในช่วง 0.10 - 0.40 มิลลิลิตร เป็นเวลา 15 นาทีจะเกิดสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก (II) กับออโทฟีแนนโทรลีนเป็นสีส้มบนกระดาษทดสอบ นำไปสแกนรูปสีด้วยเครื่องสแกน ตั้งค่าความละเอียดในการสแกนเท่ากับ 600 จุดต่อตารางนิ้ว และค่าความสว่างของหลอดไฟเท่ากับ -50 คำนวณหาค่าความแตกต่างความเข้มแสงด้วยโปรแกรม Image J™ กระดาษทดสอบนี้สามารถตรวจวัดความเข้มข้นของสารละลายเหล็กได้ถึงระดับ 0.20 มิลลิกรัมต่อลิตร

จินตพร ไข่สีทอง และคณะ [39] ได้ศึกษาและพัฒนาชุดทดสอบแบบจุดบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์หาปริมาณของไทโอไซยาเนตในปุ๋ย เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาคสนาม การทดสอบนี้ใช้กระดาษกรองเป็นซับสเตรท ใช้สารละลายโซล-เจลเจือเหล็ก (III) ความเข้มข้นร้อยละ 0.20 (w/v) เป็นจุดรีเอเจนต์ โดยหยดลงบนกระดาษกรอง ปริมาตร 10 ไมโครลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

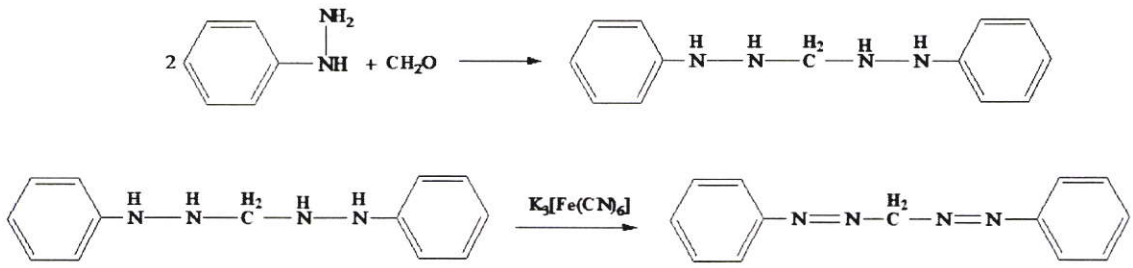
ทิ้งไว้ 30 นาที แล้วทำการหยดกรดไนตริกความเข้มข้น 0.50 โมลาร์ ตามด้วยสารละลายมาตรฐานไทโอไซยาเนตหรือสารละลายตัวอย่าง ปริมาตรอย่างละ 10.00 ไมโครลิตร ลงบนจุดรีเอเจนต์ ทิ้งไว้ให้แห้ง 20 นาที บันทึกภาพจุดสีส้มแดงที่เกิดจากสารเชิงซ้อนระหว่างเหล็ก (III) กับไทโอไซยาเนตด้วยเครื่องสแกนใช้โปรแกรม Image J™ วัดและบันทึกภาพความเข้มแสง RGB คำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสงด้วยสมการยูคลิด กราฟมาตรฐานที่ได้มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 10 - 100 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์น้อยกว่า 8.01% ขีดจำกัดของการตรวจพบและขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณเท่ากับ 4.85 และ 15.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ การวิเคราะห์หาปริมาณไทโอไซยาเนตในตัวอย่างปุ๋ยแอมโมเนียมซัลเฟตและปุ๋ยยูเรียได้ค่าร้อยละคืนกลับอยู่ในช่วง 53.96 - 62.14% และ 92.92 - 106.26% ตามลำดับ

A.Samadi และคณะ [40] ได้ศึกษาการใช้ซิลิกาโซล-เจล จากเทรทะออกท็อกซี่-ไซเลน (TEOS) มีลักษณะเป็นฟิล์มบางๆ เคลือบบนพื้นผิวแก้ว การเกิดโซล–เจล ที่ pH เท่ากับ 3 อัตราส่วนระหว่างน้ำต่ออัลโคไซด์เป็น 4 ต่อ 1 ฟิล์มโซล-เจลสามารถใช้ในการตรวจวัดหาปริมาณเหล็ก (II) มีความสามารถในการจำเพาะสูง มีช่วงการใช้งาน 5 - 115 ng/mL มีขีดจำกัดการตรวจหา 1.68 ng/mL มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.5% และ 1.27% สำหรับ 10 และ 90 ng/mL ของ Fe (II) ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการตอบสนองที่รวดเร็วคือ 120 วินาที เหล็กทั้งหมดถูกรีดิวซ์จาก Fe (III) เป็น Fe (II) โดยใช้กรดแอสคอบิคเป็นตัวรีดิวซ์ จากนั้นหาความเข้มข้นของ Fe (III) คำนวณโดยการลบความเข้มข้นของ Fe (II) ออกจากความเข้มข้นของเหล็กทั้งหมด

2.8 หลักการตรวจวัดฟอร์มาลดีไฮด์

สำหรับในงานวิจัยนี้ทำการพัฒนาการวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์โดยอาศัยการเกิดปฏิกิริยาของสารละลายฟีนิลไฮดราซีนกับสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ซึ่งปฏิกิริยาจะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนแรกสารฟอร์มาลดีไฮด์จะทำปฏิกิริยากับสารละลายฟีนิลไฮดราซีนทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นมา หลังจากนั้นผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะไปเกิดปฏิกิริยาต่อกับสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน-เฟอร์เรต เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีสีชมพู-แดง ซึ่งการเกิดปฏิกิริยานี้ต้องทำในสภาวะการทดลองที่เป็นสภาวะกรด ดังแสดงปฏิกิริยาในรูปที่ 2.12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 การเกิดปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์ ฟีนิลไฮดราซีน และโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน-เฟอร์เรต ในสภาวะที่เป็นกรด [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีและอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ความบริสุทธิ์ (%)	ยี่ห้อและประเทศผู้ผลิต
เททระเอทอกซีไซเลน (Tetraethoxysilane)	$SiC_8H_{20}O_4$	98.0	Sigma Aldrich, Germany
ฟีนิลไฮดราซีน (phenylhydrazine)	$C_6H_5NHNH_2$	97.0	ACROS ORGANICS, Belgium
โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (III) (Potassium hexacyanoferrate (III))	$K_3(Fe(CN)_6)$	99.0	Carlo Erba, France
กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid)	HCl	37.0	Merck , Thailand
เอทานอล (ethanol)	C_2H_5OH	96.0	Carlo Erba, France
ฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)	HCHO	37.0 (w/v)	Carlo Erba, France
โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium sulfite)	Na_2SO_3	98.0	AR/ACS – LOBAL Chemie, India
โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide)	NaOH	98.0	Rankem, India
อะซีติลอะซีโตน (Acetylacetone)	$C_5H_8O_2$	99.5	Sigma Aldrich, Germany
แอมโมเนียมอะซิเตท (Ammonium acetate)	$C_2H_7NO_2$	98.0	AR/ACS – LOBAL Chemie, India

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 (ต่อ) สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ความบริสุทธิ์ (%)	ยี่ห้อและประเทศผู้ผลิต
โพแทสเซียมไฮโดรเจนพทาเลต (Potassium hydrogen phthalate)	$C_8H_5KO_4$	99.5	Carlo Erba, France
กรดอะซิติก (Acetic acid)	CH_3COOH	99.9	Carlo Erba, France
กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid)	H_2SO_4	95.0	Fisher, Finland
ไทมอล์ฟทาลีน (Thymolphthalein)	$C_{28}H_{30}O_4$	95.0	Carlo Erba, France
ฟีนอล์ฟทาลีน (Phenolphthalein)	$C_{20}H_{14}O_4$	98.0	Carlo Erba, France
น้ำปราศจากไอออน (Deionized water)	-	-	Milli Q gradient

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ขวดวัดปริมาตร
2. บีกเกอร์
3. ปิเปต, ลูกยาง
4. หลอดหยด
5. บิวเรต
6. กระบอกตวง
7. ขวดรูปชมพู่
8. แท่งแก้วคนสาร
9. ช้อนตักสาร
10. กระจกนาฬิกา
11. นาฬิกาจับเวลา
12. ไมโครปิเปต รุ่น Finnpipette ขนาด 1-10 ไมโครลิตร (Micropipette; Finnpipette - Thermo scientific, USA)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. กระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาด 125 มิลลิเมตร (Filter paper qualitative Advantec - Toyo Roshi Kaaisha, Ltd., Japan)

14. เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ((Analysis balance: CPA224S – Sartorius, Canada)

15. เครื่องกวนแม่เหล็ก พร้อมแท่งกวน (Magnetic Stirrer - HARIKUL SCIENCE CO.,LTD.)

16. เครื่องสแกน (Cannon scan LiDE110, USA)

3.2 การเตรียมสารละลาย

3.2.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

3.2.1.1 สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นประมาณ 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (Stock solution)

ปิเปตสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ (ความเข้มข้นร้อยละ 37 w/v) 0.25 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน (ใช้ได้ไม่เกิน 1 เดือน) สอบเทียบความเข้มข้น (Standardized) ของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ดังนี้

1. ปิเปตสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ (ความเข้มข้น 1.00 โมลต่อลิตร ปริมาตร) ปริมาตร 50.00 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ หยดไทมอล์ฟทาลีน 2 หยด (เป็นตัวอินดิเคเตอร์) สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีฟ้า หยดกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 0.010 โมลต่อลิตร 2-3 หยด จนกระทั่งสีฟ้าจางหายไป

2. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร (stock solution) ปริมาตร 10.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่เดิม จะได้สารละลายสีฟ้ากลับมาไทเตรทด้วยกรดซัลฟิวริก (ความเข้มข้น 0.010 โมลต่อลิตร) จนถึงจุดยุติ (สีฟ้าจางหายไป) บันทึกปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ คำนวณความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์

$$B = \frac{0.6 \times V1 \times 1000}{V2}$$

เมื่อ B คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เป็น มิลลิกรัมต่อลิตร

V1 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไทเทรตเป็น มิลลิลิตร

V2 คือ ปริมาตรของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เป็น มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 1065 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 2.30 มิลลิลิตร (ปริมาตรได้จากการคำนวณโดยอิงกับค่าความเข้มข้นที่ standardized แล้ว) ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน คำนวณปริมาตรสารละลายมาตรฐาน formaldehyde

$$\text{ปริมาตร (mL)} = \frac{100\ \text{mg/L} \times 25\ \text{mL}}{C\ \text{mg/L}}$$

เมื่อ C คือ ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์จากการสอบเทียบความเข้มข้น (Standardization)

3.2.1.3 สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ สำหรับสำหรับสร้างกราฟมาตรฐาน

1. สำหรับความเข้มข้นในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณ 2.50, 5.00, 7.50, 10.00 และ 12.50 มิลลิลิตร ตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นปรับด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ที่ความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. สำหรับความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00, 2.25 และ 2.50 มิลลิลิตรตามลำดับ ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 มิลลิลิตร จากนั้นปรับด้วยน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดบอกปริมาตร จะได้สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ที่ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 และ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.2.2 การเตรียมรีเอเจนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์

3.2.2.1 สารละลายอะซีติลอะซีโตน

ชั่งแอมโมเนียมอะซิเตท 0.75 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนแล้วใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมอะซีติลอะซีโตนปริมาตร 20.00 ไมโครลิตรและเติมกรดอะซิติกเข้มข้นปริมาตร 0.20 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตรเก็บไว้ในขวดสีชา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2.2 สารละลายฟีนิลไฮดราซีน (ความเข้มข้น 0.69 M) (1)

ปิเปตสารละลายฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 0.070 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร เติมเอทานอล 5.00 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร เก็บไว้ในขวดสีชา

3.2.2.3 สารละลายฟีนิลไฮดราซีน (ความเข้มข้น 0.69 โมลต่อลิตร) (2)

ปิเปตสารละลายฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 0.070 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นปรับปริมาตรด้วยเอทานอลจนถึงขีดปริมาตร เก็บไว้ในขวดสีชา

3.2.2.4 สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (ความเข้มข้น 0.30 โมลต่อลิตร)

ชั่งโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 1.00 กรัม ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออน ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออนจนถึงขีดปริมาตร เก็บไว้ในขวดสีชา

3.2.2.5 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้น 0.10โมลต่อลิตร)

ปิเปตสารละลายกรดไฮโดรคลอริก 0.98 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน เก็บไว้ในขวดแก้วสีชา

3.3 การเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยอะซีติลอะซีโตน

3.3.1 สารละลายโซล-เจล

เตรียมโดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้นข้น 0.10 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และเอทานอลปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก ซึ่งอัตราส่วนในการผสมสารละลายคือ 2:1:2 โดยปริมาตร หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

3.3.2 สารละลายโซล-เจลเจือด้วยอะซีติลอะซีโตน

เตรียมโดยปิเปตสารละลายโซล-เจล (ที่ได้จากข้อ 3.3.1) ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายอะซีติลอะซีโตน (ที่ได้จากข้อ 3.2.2.1) ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก ซึ่งอัตราส่วนในการผสมสารละลายคือ 1:1 โดยปริมาตร หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาทีที่อุณหภูมิห้อง

3.4 การเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนกับโพแทสเซียมเฮกซะ-ไซยาโนเฟอร์เรต

เตรียมโดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร, กรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ฟีนิลไฮดราซีน (ที่ได้จากข้อ 3.2.2.2) ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร, และสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์พลาสติก ซึ่งอัตราส่วนในการผสมสารละลายคือ 2:1:2 โดยปริมาตร หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

3.5 การเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (1)

3.5.1 สารละลายโซล-เจล

เตรียมโดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดร-คลอลิกความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และเอทานอล ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก ซึ่งอัตราส่วนในการผสมสารละลายคือ 2:1:2 โดยปริมาตร หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง

3.5.2 สารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน

เตรียมโดยปิเปตสารละลายโซล-เจล (ที่ได้จากข้อ 3.5.1) ปริมาตร1.00 มิลลิลิตร และปิเปตสารละลายฟีนิลไฮดราซีน (ที่ได้จากข้อ 3.2.2.2) ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์พลาสติก ซึ่งอัตราส่วนในการผสมสารละลายคือ 1:1 โดยปริมาตร หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

3.6 การเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (2)

เตรียมโดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 0.10 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และสารละลายฟีนิลไฮดราซีน (ที่ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อ 3.2.2.3) ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก ซึ่งอัตราส่วนในการผสมสารละลาย คือ 2:1:2 โดยปริมาตร หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง

3.7 การศึกษาปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ

3.7.1 เมื่อใช้อะซีติลอะซีโตนเป็นรีเอเจนต์

โดยนำไมโครปิเปตดูดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยอะซีติลอะซีโตน (จากข้อ 3.3.2) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 หลังจากนั้นทิ้งไว้ 1 นาที แล้วหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาทีหรือรอให้แห้งบันทึกภาพจุดสีด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำค่าที่ได้มาบันทึกค่าความเข้มแสง(RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ นำค่าความเข้มแสงมาคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED) จากสมการทางคณิตศาสตร์ดังนี้

$$ED=\sqrt{(\Delta I_R)^2+(\Delta I_G)^2+(\Delta I_B)^2}$$

โดย Δ คือ ผลต่างของแสงที่จุด blank กับค่าความเข้มแสง ณ จุดเกิดปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

I_R คือ ค่าความเข้มสีแดง

I_G คือ ค่าความเข้มสีเขียว

I_B คือ ค่าความเข้มสีน้ำเงิน

แสงสีขาวจะประกอบด้วยแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ซึ่งมีค่าความเข้มแสงสูงสุดเท่ากับ 255, 255, 255 (R, G, B) และแสงสีดำจะมีค่าความเข้มแสงต่ำสุดเท่ากับ 0, 0, 0 (R, G, B)

3.7.2 เมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีนกับโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตเป็นรีเอเจนต์

แบบที่ 1 ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนกับสารละลาโพแทสเซียม-เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (จากข้อ 3.4) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 หลังจากนั้นทิ้งไว้ 1 นาที แล้วหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที หรือรอให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 2 ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (จากข้อ 3.5.2) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งไว้ 1 นาที แล้วหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หลังจากนั้นทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

3.8 การศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์

แบบที่ 1 ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (จากข้อ 3.5.2) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งไว้ 1 นาที แล้วหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้อีก 1 นาที หลังจากนั้นทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

แบบที่ 2 ปิเปตสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (จากข้อ 3.5.2) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งไว้ 1 นาที แล้วหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้อีก 1 นาที และหยดกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 1 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หลังจากนั้นทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

แบบที่ 3 ปิเปตสารละลายโซล-เจล (จากข้อ 3.5.1) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งไว้ 1 นาที และหยดสารละลายฟีนิลไฮดราซีน(จากข้อ 3.2.2.3) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้อีก 1 นาที แล้วหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที ต่อมาหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หลังจากนั้นทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

แบบที่ 4 ปิเปตสารละลายโซล-เจล (จากข้อ 3.5.1) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งไว้ 1 นาที และหยดสารละลายฟีนิลไฮดราซีน (จากข้อ 3.2.2.3) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้อีก 1 นาที แล้วหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ประมาณ 5 นาที ต่อมาหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้อีก 1 นาที และหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หลังจากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษกรองด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง(Euclidean distance; ED)

แบบที่ 5 ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (จากข้อ 3.6) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน แล้วหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

3.9 การศึกษาหาความเข้มข้นของสารละลายรีเอเจนต์ที่เหมาะสม

3.9.1 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก

1. ตวงกรดไฮโดรคลอริกปริมาตร 24.64 มิลลิลิตร โดยใช้กระบอกตวง ใส่ลงในขวดวัดปริมาตร ขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5.0 โมลต่อลิตร

2. นำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 5.0 โมลต่อลิตร มาเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตสารละลายฟีนิลไฮดราซีนปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร เททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร และสารละลายกรดไฮโดคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง โดยหยดสารละลายสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที

4. บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

5. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 2-4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริกจากความเข้มข้น 5.0 โมลต่อลิตร เป็นความเข้มข้น 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5 โมลต่อลิตร

3.9.2 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน

1. ปิเปตสารละลายฟีนิลไฮดราซีนปริมาตร 0.70 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 10.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยเอทานอล จะได้สารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่ความเข้มข้น 0.69 โมลต่อลิตร

2. เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตสารละลายฟีนิล-ไฮดราซีนความเข้มข้น 0.69 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร เททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร และสารละลายกรดไฮโดคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง ทำการหยดสารละลายสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

3. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบ โดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 5.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตนความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที

4. บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 2-4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายฟีนิล-ไฮดราซีน จากความเข้มข้น 0.69 โมลต่อลิตร เป็นความเข้มข้น 0.0069 และ 0.069 โมลต่อลิตร

3.9.3 ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

1. ชั่งโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 1.00 กรัม ใช่ลงในบีกเกอร์ละลายด้วยน้ำปราศจากไอออนจนของแข็งละลายหมด เทใส่ขวดวัดปริมาตร ขนาด 10.00 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ความเข้มข้น 0.30 โมลต่อลิตร

2. เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตสารละลายฟีนิล-ไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร เททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร และสารละลายกรดไฮโดคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง ทำการหยดสารละลายสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

3. ทำการทดสอบหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 5 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษทดสอบ และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที

4. แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ความเข้มข้น 0.30 โมลต่อลิตร (จากข้อ 1) ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษทดสอบ ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

5. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 2-4 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นของโพแทสเซียมเฮกซะไซยา-โนเฟอร์เรตจากความเข้มข้น 0.30 โมลต่อลิตร เป็นความเข้มข้น 0.0030 และ 0.030 โมลต่อลิตร

3.10 การศึกษาหาปริมาณรีเอเจนต์ที่เหมาะสม

เตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร กรดไฮโดคลอลิกที่ความเข้มข้น 4 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และฟีนิล-ไฮดราซีนที่ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตรใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10.1 ปริมาณสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน

1. ใช้ไมโครปิเปตดูดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

2. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบ โดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที

3. บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

4. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-3 โดยเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน จากปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร เป็นปริมาตร 8.00, 5.00, 4.00 ไมโครลิตร

3.10.2 ปริมาณสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

1. ปิเปตสารละลายฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

2. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบ โดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที

3. บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

4. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 2 และ 3 โดยเปลี่ยนปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียม-เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตจากปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร เป็นปริมาตร 8.00, 5.00, 4.00 ไมโครลิตร

3.11 การศึกษาการกระจายตัวของรีเอเจนต์

เตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และสารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

3.11.1 การกระจายตัวของสารละลายสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน (ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร)

1. ปิเปตสารละลายโซลเจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

2. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบ โดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที

3. บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

3.11.2 การกระจายตัวของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน (ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร)

1. ปิเปตสารละลายโซลเจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

2. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบ โดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที

3. บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

3.12 การศึกษาการใช้ปริมาณสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน

เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร กรดไฮโดคลอลิกที่ความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

1. ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 โดยกำหนดเงื่อนไขให้หยดเพียงครั้งเดียว จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

2. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบ โดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที

3. บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

4. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-3 โดยเปลี่ยนเงื่อนไขจากการหยดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร เพียงครั้งเดียว ไปใช้เงื่อนไขการหยด 2 ครั้ง (ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนหยดครั้งที่ 2 ประมาณ 1-2 นาที) และหยด 3 ครั้ง (ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนหยดครั้งที่ 2, 3 ประมาณ 1-2 นาที)

3.13 การศึกษาการเก็บรักษาชุดทดสอบแบบกระดาษ

1. เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และสารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิห้อง

2. ปิเปตสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้ง 1 วัน ที่อุณหภูมิห้อง

3. ปิเปตสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นความเข้มข้น 10, 20.00, 30, 40 และ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองที่เตรียมได้จากข้อ 2 ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 7 นาที ต่อมาหยดตามด้วยสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 60 นาที หรือรอให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน นำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ และคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

5. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-4 โดยเปลี่ยนเงื่อนไขการทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้งในข้อ2 จากเวลา 1 วัน เป็น 2 และ 3 วัน

3.14 การศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร กรดไฮโดคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และฟีนิล-ไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นปิเปตสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิล-ไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 จากนั้นทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

3.14.1 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรก

1. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบ โดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร โดยมีเงื่อนไขระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 5 นาที

2. หยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้ให้เกิดปฏิกิริยา 60 นาที

3. บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

4. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-4 โดยเปลี่ยนเงื่อนไขจากระยะเวลาที่ทิ้งไว้แห้งประมาณ 5 นาที ไปใช้เงื่อนไขระยะเวลาที่ทิ้งทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 3, 7 และ 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.14.2 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนสอง

1. นำกระดาษทดสอบที่เตรียมได้มาทำการทดสอบ โดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร โดยมีเงื่อนไขระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 5 นาที

2. หยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ความเข้มข้น 0.030 โมล-ต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้ให้เกิดปฏิกิริยา 60 นาที

3. บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

4. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 1-4 โดยเปลี่ยนเงื่อนไขจากระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 60 นาที ไปใช้เงื่อนไขระยะเวลาที่ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 15, 30, 45 และ 75 นาที

3.15 การศึกษาความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

3.15.1 การเตรียมชุดกระดาษทดสอบ

เตรียมสารละลายสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน โดยปิเปตเททระเอ-ทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอลิกที่ความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร และสารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์พลาสติก หลังจากนั้นปั่นกวนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นหยดสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน

3.15.2 ความเป็นเส้นตรง

1. สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้นในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัม-ต่อลิตร

ขั้นตอนแรกหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษทดสอบที่เตรียมได้ในข้อ 3.14.1 ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 7 นาที ต่อมาในขั้นตอนที่สองทำการหยดสารละลายโพแทสเซียม-เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ตามลงไปบนจุดทดสอบ ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 60 นาที หรือรอให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์กับความแตกต่างความเข้มแสง และหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Determination coefficient, r^2)

2. สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัม-ต่อลิตร

ขั้นตอนแรกหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษทดสอบที่เตรียมได้ในข้อ 3.14.1 ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 7 นาที ต่อมาในขั้นตอนที่สองทำการหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน-เฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ตามลงไปบนจุดทดสอบ ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 60 นาที หรืออให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีที่ได้บนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน จากนั้นนำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ แล้วคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์กับความแตกต่างความเข้มแสง และหาค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Determination coefficient, r^2)

3.15.3 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD)

สามารถหาได้จากกราฟมาตรฐาน โดยใช้สูตร

$$LOD = Y_B + 3S_B$$

เมื่อ Y_B คือ y-intercept

S_B คือ Random error in y- intercept : ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y

$$S_B = \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)}{n-2}}$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจริงที่ได้จากการเครื่องมือ

$\hat{y}_i$ คือ ค่าที่ได้จากการแทนค่า x ลงในสมการเส้นตรง y

n คือ จำนวนจุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.15.4 ขีดจำกัดของการวิเคราะห์ (Limit of quantitation, LOQ)

$$LOQ = Y_B + 10S_B$$

เมื่อ Y_B คือ y-intercept

S_B คือ Random error in y-intercept : ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y

3.16 การวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบ

3.16.1 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

หั่นตัวอย่างเป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำมาชั่งให้ได้ 5 กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ขนาด 25 มิลลิลิตร ปิเปตน้ำปราศจากไอออน 10.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในบีกเกอร์ แล้วทำการล้างตัวอย่าง

3.16.2 วิเคราะห์ตัวอย่างด้วยชุดกระดาษทดสอบ

1. ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.16.1 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร มาหยดลงบนชุดกระดาษทดสอบ ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 7 นาที

2. หยดตามด้วยสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้ให้เกิดปฏิกิริยา 60 นาที หรืออให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน นำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ และคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

3. คำนวณหาความเข้มข้นของตัวอย่างโดยเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 3.15.2 (ในช่วงความเข้มข้น 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

3.16.3 การคำนวณหาค่าร้อยละของการคืนกลับได้ (%Recovery)

การเตรียมสารละลายตัวอย่างที่เติมสารมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์

1. ปิเปตน้ำตัวอย่างที่ได้จากข้อ 3.16.1 ปริมาตร 5.00 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดปรับปริมาตรขนาด 10 มิลลิลิตร จากนั้นปิเปตสารสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 0.10 มิลลิลิตร ใส่ลงในน้ำตัวอย่างและปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำสารละลายที่ไปทดสอบกับชุดกระดาษทดสอบ

2. ปิเปตสารละลายตัวอย่างที่เตรียมได้จากข้อ 3.16.1 ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร มาหยดลงบนชุดกระดาษทดสอบ ทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยา 7 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. หยดตามด้วยสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้ให้เกิดปฏิกิริยา 60 นาที หรือรอให้แห้ง บันทึกภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบด้วยเครื่องสแกน นำไปหาค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™ และคำนวณค่าความแตกต่างความเข้มแสง (Euclidean distance; ED)

4. ทำการทดลองซ้ำข้อ 1. โดยเปลี่ยนจากสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เข้มข้น 3, 5 และ 7 มิลลิกรัมต่อลิตร

5. คำนวณหาความเข้มข้นของตัวอย่างที่มีการเติมสารมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เทียบกับกราฟมาตรฐานที่ได้จากข้อ 3.16.2 (ในช่วงความเข้มข้น 1-10 มิลลิกรัมต่อลิตร) และคำนวณหาร้อยละการคืนกลับ

ค่าร้อยละของการคืนกลับได้ (%Recovery)

สามารถหาได้โดยใช้สูตร

$$\%\ \text{Recovery} = \frac{\text{Spiked sample} - \text{Sample}}{\text{Standard}}$$

เมื่อ Spiked sample คือ ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในสารตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ลงไป

Sample คือ ความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในสารตัวอย่าง

Standard คือ ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่เติมลงไปในสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
ผลการทดลองและอภิปรายผล

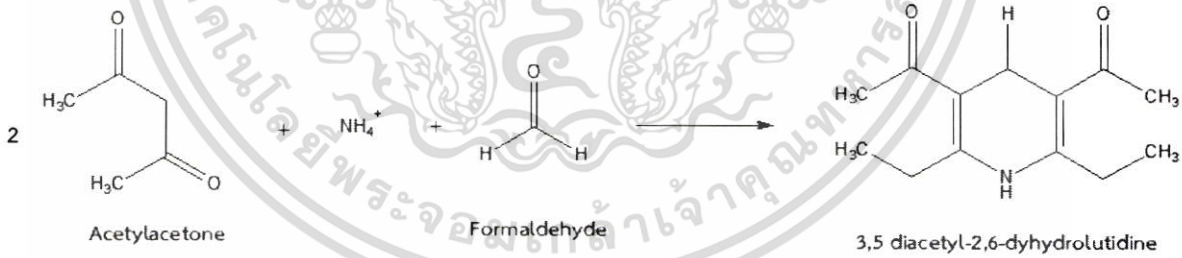
งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้ชุดทดสอบแบบกระดาษร่วมกับการตรวจวัดด้วยการสแกนจุดสีและประมวลผลด้วยโปรแกรม Image J™ ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการวิจัยและอภิปรายผล การศึกษาปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ การหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับวิธีที่พัฒนาขึ้น การประเมินคุณลักษณะต่างๆ ของวิธี และการนำวิธีที่พัฒนาขึ้นไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบ

4.1 ผลการศึกษาปฏิกิริยาที่เหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ

ทำการศึกษาปฏิกิริยาที่เหมาะสมบนกระดาษทดสอบ โดยทำการเลือกใช้ปฏิกิริยาที่สามารถตรวจหาฟอร์มาลดีไฮด์ได้มาศึกษาทั้งหมด 2 แบบ คือ

4.1.1 ปฏิกิริยาที่ใช้อะซิติลอะซิโตนป็นรีเอเจนต์

การวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้อะซิติลอะซิโตนป็นรีเอเจนต์ มีปฏิกิริยาดังนี้

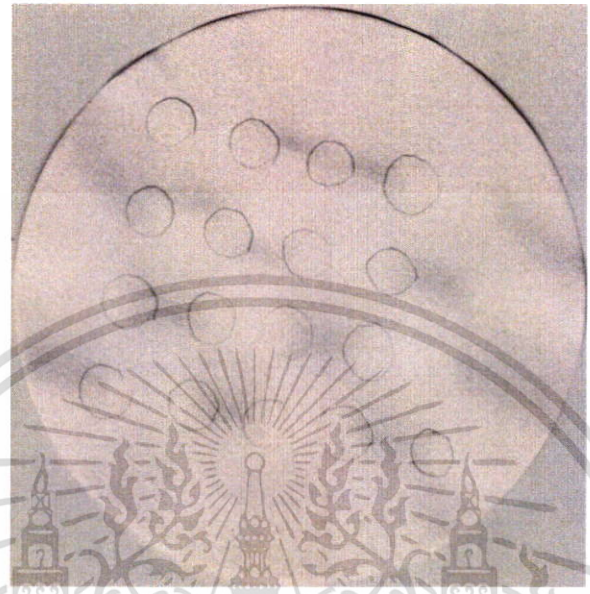


รูปที่ 4.1 ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับอะซิติลอะซิโตน [32]

ทำการศึกษาปฏิกิริยานี้โดยนำสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยอะซิติลอะซิโตนหยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร หยดปริมาตรหยดละ 10.00 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปตทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร จากนั้นทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง พบว่าจากการสังเกตด้วยตาเปล่าสังเกตเห็นจุดทดสอบบนกระดาษทดสอบมีสีเหลืองอ่อนเกิดขึ้น แต่เมื่อนำมาทำการสแกนจุดสีด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

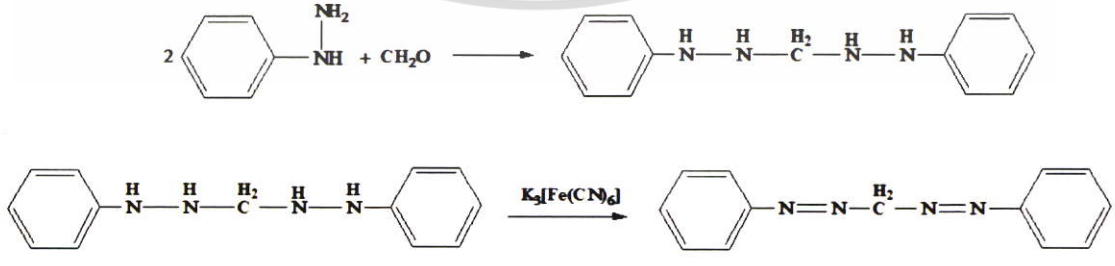
เครื่องสแกนผลปรากฏว่าภาพที่ได้เมื่อนำมาประมวลผลด้วยโปรแกรม Image J™ ปรากฏสีเหลืองอ่อนมากๆ บนกระดาษทดสอบ ทำให้ไม่สามารถประมวลผลออกมาเป็นค่าความเข้มแสง (RGB) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 จุดสีบนกระดาษทดสอบเมื่อใช้อะซิติลอะซิโตนเป็นรีเอเจนต์

4.1.2 ปฏิกิริยาที่ใช้ฟีนิลไฮดราซีน และโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

การวิเคราะห์ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์โดยฟีนิลไฮดราซีน และโพสแทสเซียมไซยาโน-เฟอร์เรตเป็นรีเอเจนต์ มีปฏิกิริยาดังนี้

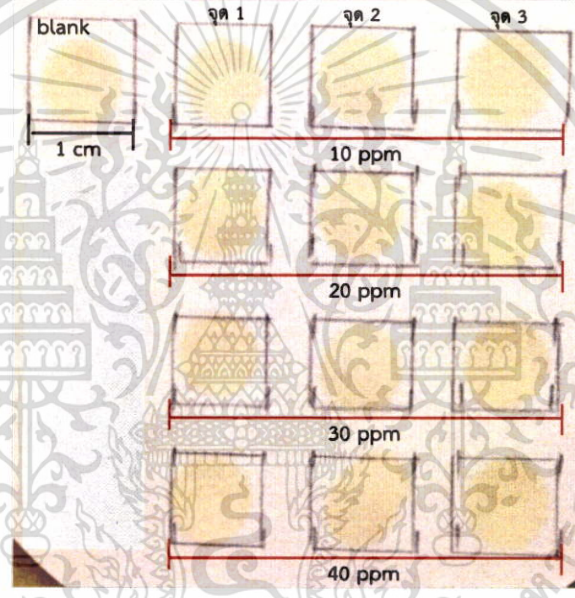


รูปที่ 4.3 ปฏิกิริยาระหว่างฟอร์มาลดีไฮด์กับฟีนิลไฮดราซีน และโพแทสเซียมไซยาโนเฟอร์เรต [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2.1 เมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีนและโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตเตรียมเป็นสารละลายโซล-เจล

ทำการศึกษาโดยนำสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยใช้ฟีนิลไฮดราซีนโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร หยดปริมาตรหยดละ 10.00 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปต ทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานความเข้มข้นในช่วง 10 – 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 10.00 ไมโครลิตร จากนั้นทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง พบว่าจากการสังเกตด้วยตาเปล่าจะไม่เห็นการเปลี่ยนแปลงสีบนจุดทดสอบบนกระดาษ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



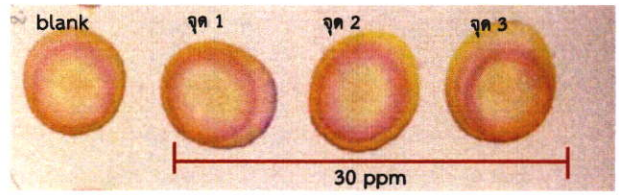
รูปที่ 4.4 จุดสีบนกระดาษทดสอบเมื่อใช้ฟีนิลไฮดรา-ซีนและโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน-เฟอร์เรต เป็นรีเอเจนต์

4.1.2.2 เมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีนเตรียมเป็นสารละลายโซล-เจล

ทำการศึกษาโดยหยดสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร หยดปริมาตรหยดละ 10.00 ไมโครลิตร โดยใช้ไมโครปิเปต ทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นที่ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง 5 นาที แล้วหยดตามด้วยสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าจุดทดสอบบนกระดาษทดสอบมีสีชมพูเกิดขึ้นเป็นวงแหวน ทำให้ไม่สามารถประมวลค่าความเข้มแสง (RGB) ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.5

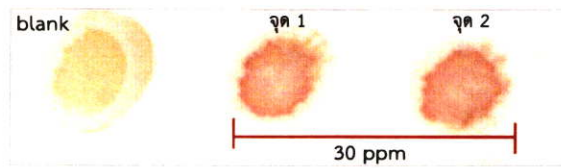


รูปที่ 4.5 จุดสีบนกระดาษทดสอบเมื่อใช้ฟีนิลไฮดราซีน เป็นรีเอเจนต์

จากผลการทดลองข้างต้น ทำให้สรุปได้ว่าจะเลือกศึกษาปฏิกิริยาที่ใช้ฟีนิลไฮดราซีนและโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตเป็นรีเอเจนต์ในการสร้างชุดกระดาษทดสอบ โดยใช้ฟีนิล-ไฮดราซีนเตรียมเป็นสารละลายโซล-เจล นำไปเตรียมเป็นจุดรีเอเจนต์บนกระดาษกรอง และในขั้นตอนการวิเคราะห์จะทำการหยดสารละลายฟอร์มาลดีไฮด์ แล้วตามด้วยสารละลายโพแทสเซียม-เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตเป็นรีเอเจนต์ขั้นสุดท้าย

4.2 ผลการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์

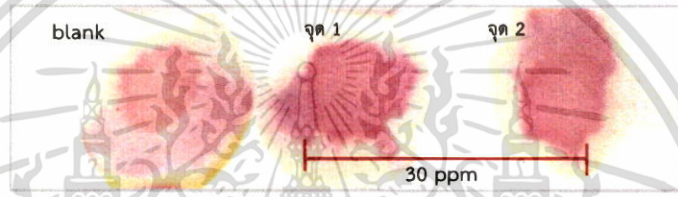
แบบที่ 1 ทำการศึกษาโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลที่ผสมกับสารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร จากนั้นปิเปตสารละลายโซล-เจลนี้ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 3-5 นาที ต่อมาทำการหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง จากการสังเกตด้วยตาเปล่าพบว่าจุดทดสอบบนกระดาษทดสอบมีสีชมพูเกิดขึ้นในลักษณะที่กระจัดกระจายไม่รวมกันเป็นจุดสีชมพูที่ชัดเจนและยังสังเกตเห็นสีเหลืองของรีเอเจนต์รวมอยู่ด้วยกัน ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบที่ 2 ทำการศึกษาโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลที่ผสมกับสารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร จากนั้นปิเปตสารละลายโซล-เจลนี้ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ให้แห้ง หลังจากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตรลงไป 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้งประมาณ 3-5 นาที ต่อมาทำการหยดโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง ตามด้วยการหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ผลการทดลองปรากฏว่าสังเกตเห็นจุดทดสอบบนกระดาษมีสีชมพูเกิดเพิ่มมากขึ้นในลักษณะที่รวมกันเป็นจุดสีชมพูอมม่วงที่ชัดเจน แต่ยังคงเป็นจุดทดสอบที่มีรูปร่างไม่เท่ากันและไม่เป็นรูปวงกลมดังแสดงในรูปที่ 4.7

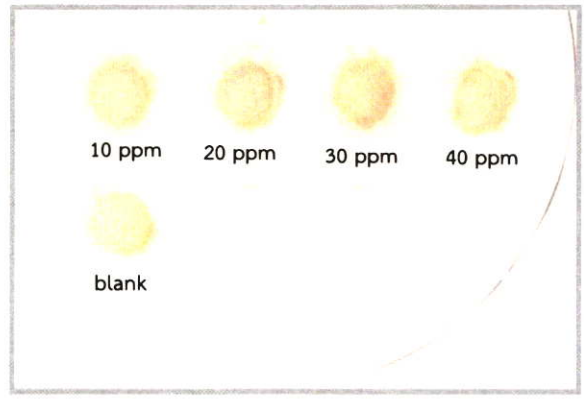


รูปที่ 4.7 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 2

จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 1 และ แบบที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการเตรียมสารละลายโซล-เจลที่ผสมกับสารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร จะได้สารละลายที่เป็นเนื้อเดียวกัน แต่เมื่อนำมาหยดลงบนกระดาษกรอง พบว่ารูปร่างวงกลมของจุดรีเอเจนต์ยังคงมีรูปร่างไม่แน่นอน ไม่เป็นขอบเขตที่ชัดเจนและเมื่อหยดตามด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาโดยทำให้สามารถเห็นสีชมพูชัดเจนเพิ่มขึ้นบนจุดทดสอบ

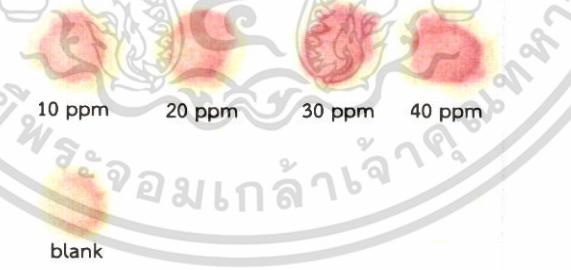
แบบที่ 3 ทำการศึกษาโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที ต่อมาหยดตามด้วยสารละลายฟีนิลไฮดราซีน ทิ้งไว้อีก 1 นาที จากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที ต่อมาหยดสารละลายโพแทสเซียมไซยาโนเฟอร์เรต 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง พบว่าจุดทดสอบบนกระดาษทดสอบยังคงมีสีเหลืองของรีเอเจนต์ปรากฏอยู่ ดังแสดงในรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 3

แบบที่ 4 ทำการศึกษาโดยหยดสารละลายโซล-เจลปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที ต่อมาหยดตามด้วยสารละลายฟีนิลไฮดราซีนทิ้งไว้อีก 1 นาที จากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานที่ความเข้มข้นต่างๆ ลงไป 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที ต่อมาหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง แล้วหยดตามด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ผลปรากฏว่าจุดทดสอบบนกระดาษที่มีการหยดกรดไฮโดรคลอริกนี้เกิดเป็นจุดสีชมพูชัดเจน ดังแสดงในรูปที่ 4.9



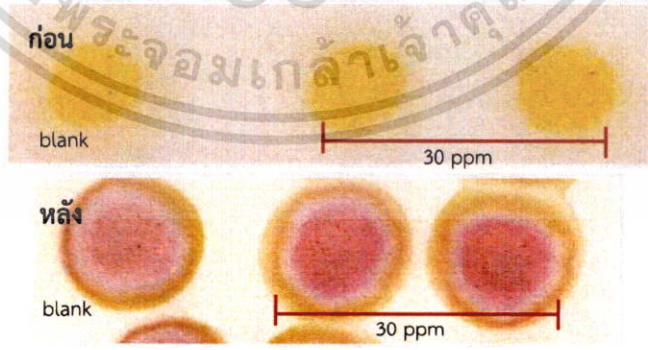
รูปที่ 4.9 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 4

จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 3 กับแบบที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้สารละลายโซล-เจลปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร หยดลงบนกระดาษทิ้งไว้ประมาณ 1 นาที ต่อมาหยดสารละลายฟีนิลไฮดราซีนทิ้งไว้อีก 1 นาที และทิ้งไว้ให้แห้ง ผลปรากฏว่าจุดทดสอบที่ได้มีรูปร่างที่ดีขึ้นและสามารถทำการประมวลผลได้ง่าย หากทำการหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกเพิ่มจะส่งผลต่อการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาและทำให้เกิดเป็นจุดสีชมพูชัดเจนขึ้น แต่จากการสังเกตในลักษณะของจุดรีเอเจนต์บนกระดาษทดสอบที่เตรียมได้นั้นอาจจะต้องใช้เวลาในการทิ้งไว้ให้แห้งนานกว่านี้

แบบที่ 5 จากผลการศึกษาในข้อ 4.1.2.2 ซึ่งได้ทำการศึกษาสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนที่ทำการเตรียมด้วยน้ำกับเอทานอล แสดงให้เห็นว่าสารละลายโซล-เจลที่ได้ไม่รวมตัวเป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้การทดสอบบนจุดทดสอบที่ได้เกิดเป็นวงแหวนสีชมพูและมีสีเหลืองอยู่ตรกลาง ดังนั้นในแบบที่ 5 จะทดลองโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือฟีนิลไฮดราซีน โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลาย จากนั้นหยดสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนลงบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 มิลลิเมตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งอย่างน้อย 1 วัน หลังจากนั้นหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไป 10.00 ไมโครลิตร จากนั้นทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง ตามด้วยการหยดสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งกระดาษกรองไว้ให้แห้ง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.10 แสดงให้เห็นว่าสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนที่เตรียมได้จากฟีนิลไฮดราซีนในตัวทำละลายเอทานอล ได้สารละลายโซล-เจลที่มีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน และจุดรีเอเจนต์ที่เตรียมโดยใช้สารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนนี้ หลังจากทิ้งไว้อย่างน้อย 1 วัน จะสังเกตได้ว่าจุดรีเอเจนต์มีรูปร่างเป็นขอบเขตชัดเจนขึ้น หลังจากทำการทดสอบกับสารมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์และหยดตามด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกแล้ว แสดงให้เห็นว่ากรดไฮโดรคลอลิกมีความสำคัญในการเกิดปฏิกิริยา จึงต้องทำการศึกษาหาความเข้มข้นของรีเอเจนต์ต่างๆ ที่เหมาะสมต่อไป



รูปที่ 4.10 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาลำดับการหยดรีเอเจนต์แบบที่ 5

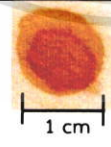
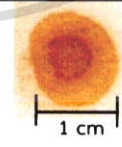
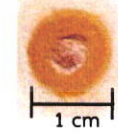
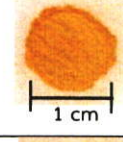
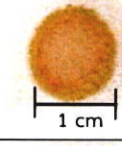
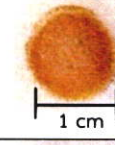
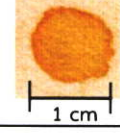
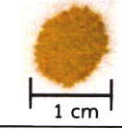
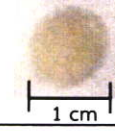
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการศึกษาหาความเข้มข้นของสารละลายรีเอนเจนต์ที่เหมาะสม

4.3.1 ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอลิก

จากผลการทดลองที่ได้ในหัวข้อที่ 4.2 พบว่ารีเอเจนต์ที่มีผลอย่างมากในการเกิดปฏิกิริยาคือกรดไฮโดรคลอริก ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก โดยที่ความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีนสัมพันธ์กับความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก เพราะรีเอเจนต์ทั้ง 2 ชนิดนี้ใช้ในการเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน และจากการที่จุดทดสอบยังมีรูปร่างไม่เป็นขอบเขตวงกลมที่ชัดเจน เนื่องด้วยจุดรีเอเจนต์ยังไม่แห้งดี ดังนั้นหลังจากการเตรียมจุดรีเอเจนต์แล้วจะทิ้งกระดาษทดสอบไว้ให้แห้งเป็นเวลาอย่างน้อย 1 วัน ในการทดสอบผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกให้ผลการทดลองในตารางที่ 4.1 ซึ่งรูปจุดทดสอบแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีนต่อความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริก เมื่อสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ชุดทดสอบจะปรากฏสีชมพูชัดเจนขึ้น เมื่อสารละลายฟีนิลไฮดราซีนมีความเข้มข้น 0.69 โมลต่อลิตรนั้น การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิก จะทำให้สารละลายโซล-เจลที่เตรียมได้มีลักษณะการเกิดของผลึกเล็กๆ ปนอยู่ในสารละลาย ซึ่งเมื่อหยดสารละลายโซล-เจลนี้บนกระดาษกรองแล้วผลึกเล็กๆ จะรวมตัวกันอยู่กลางวงของจุดทดสอบ ทำให้เป็นอุปสรรคในขั้นตอนการตรวจวัดสีของชุดกระดาษทดสอบ

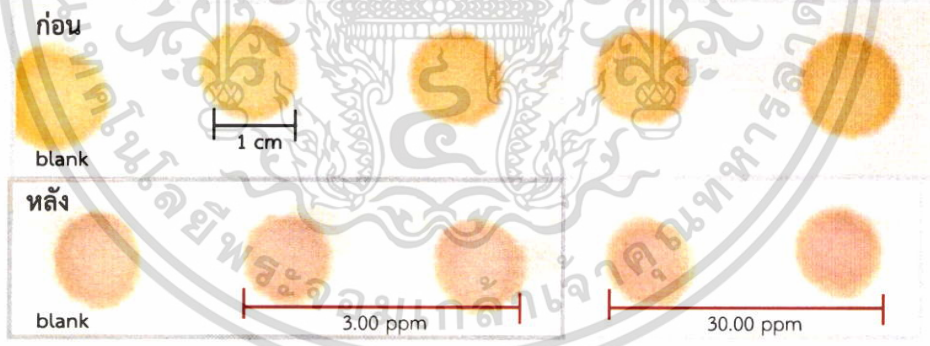
ตาราง 4.1 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิก

ความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน	ความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรคลอริก		
	0.5 M	1 M	2 M
0.69 M			
0.069 M			
0.0069 M			

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการทดลองข้างต้น ทำให้งานวิจัยนี้เลือกใช้สารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร และความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร ใช้เป็นอัตราส่วนความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดหาฟอร์มาลดีไฮด์ในช่วงความเข้มข้น 10 - 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เนื่องจากกระทรวงสาธารณสุขกำหนดให้ฟอร์มาลีน/ฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นวัตถุห้ามใช้ในอาหาร ตามประกาศกระทรวงสาธารณะสุข ฉบับที่ 151 (พ.ศ. 2536) แห่งพระราชบัญญัติอาหาร พ.ศ. 2522 [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการตรวจวัดหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในช่วงความเข้มข้น 1–10 มิลลิกรัม-ต่อลิตร ได้ทำการทดลองโดยใช้สารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่ความเข้มข้น 0.069 โมล-ต่อลิตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอริกที่ความเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร ทดสอบกับสารมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ต่อมาหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโน-เฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ทิ้งไว้ 60 นาที ผลปรากฏว่าจุดทดสอบบนกระดาษเกิดจุดสีชมพูตรงกลางวง ดังแสดงในรูปที่ 4.11 เมื่อนำไปประมวลผลด้วยโปรแกรม Image J™ และคำนวณหาค่าความแตกต่างความเข้มแสง และสร้างกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าให้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) = 0.897 ซึ่งยังไม่มีความเป็นเส้นตรง

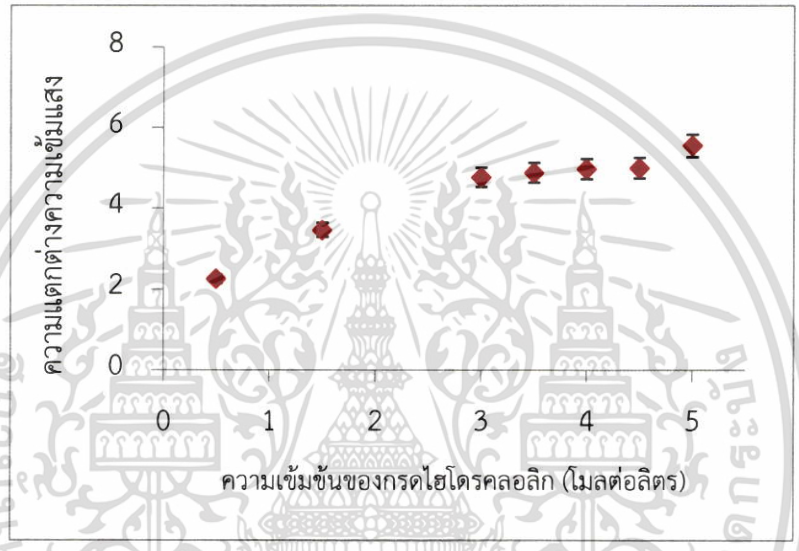


รูปที่ 4.11 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการทดลองใช้สารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร สารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.0 โมลต่อลิตร ฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 3, 30 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร

จากผลการทดลองข้างต้นทำให้ต้องศึกษาหาความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดร-คลอลิกที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์หาฟอร์มาลดีไฮด์ในช่วงความเข้มข้น 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำการทดลองโดยการเตรียมสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 0.5, 1.5, 3.0, 3.5, 4.0,

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 โมลต่อลิตร แล้วนำสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกนี้เตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิล-ไฮดราซีนที่ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร นำสารละลายโซล-เจลที่เตรียมได้หยดลงบนกระดาษกรอง ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วัน ต่อมาหยดฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วยการหยดโพแทสเซียมเฮกซะ-ไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ทิ้งไว้ 60 นาที ทำการสแกนจุดสีด้วยเครื่องสแกน ประมวลผลด้วยโปรแกรม Image J™ และคำนวณหาค่าความแตกต่างความเข้มแสง พบว่าค่าความแตกต่างความเข้มแสงที่คำนวณได้เมื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกได้ผลแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ผลกระทบจากความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิก

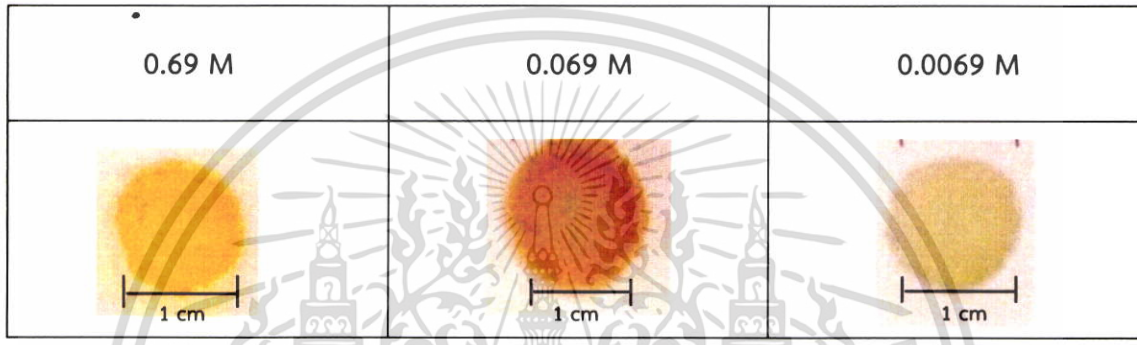
จากรูปที่ 4.12 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกค่าความแตกต่างความเข้มแสงก็เพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อถึงความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกตั้งแต่ 3.0 โมลต่อลิตร เป็นต้นไป ค่าความแตกต่างความเข้มแสงหลังเริ่มจะคงที่ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้นที่ 4.0 โมลต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป

4.3.2 ความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน

ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน จากการผสมเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.69, 0.069, 0.0069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตรลสารละลายกรดไฮรโดคลอลิกความเข้มข้น 4.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร จากนั้นทำการหยดสารละลายโซล-เจลนี้ลงบนกระดาษกรอง ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วัน ทดสอบโดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วยการหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ทิ้งไว้ 60 นาที ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าจุดทดสอบบนกระดาษเกิดจุดสีชมพูตรงกลางวงเมื่อใช้สารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.069 โมลต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกใช้สารละลายฟีนิลไฮดราซีนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.069 โมลต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป

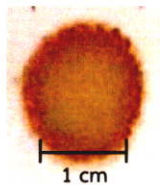
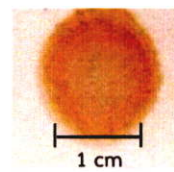
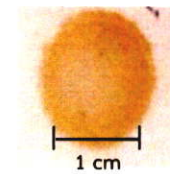


รูปที่ 4.13 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน

4.3.3 ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน จากเททระ-เอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร และสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร จากนั้นทำการหยดสารละลายโซล-เจลนี้ลงบนกระดาษกรอง ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วัน ทดสอบโดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 5.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วยการหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.30, 0.030, 0.0030 โมลต่อลิตร ทิ้งไว้ 60 นาที ได้ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.14 พบว่าจุดทดสอบบนกระดาษเกิดจุดสีชมพูตรงกลางวงเมื่อใช้สารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 0.030 โมลต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกใช้โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.030 โมลต่อลิตร เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.30 M	0.030 M	0.0030 M
		

รูปที่ 4.14 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียม-เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

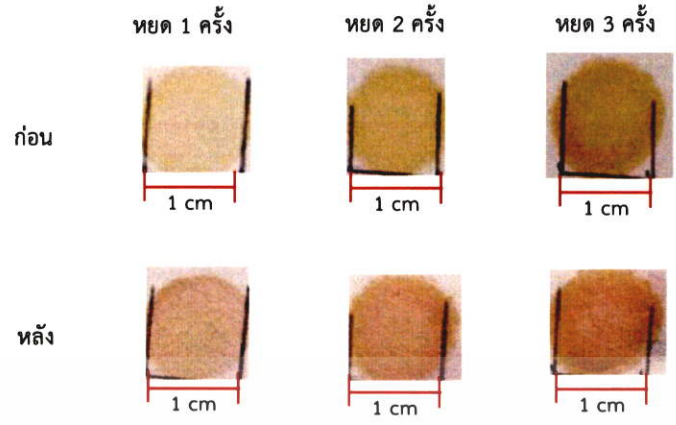
4.4 ผลการศึกษาหาปริมาณที่เหมาะสมของสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน

ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน จากการผสมเททระ-เอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตรและสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร จากนั้นทำการหยดสารละลายโซล-เจลนี้ลงบนกระดาษทดสอบ ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วัน ทดสอบโดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร และทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 5 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที โดยมีเงื่อนไขการหยดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนดังนี้

1. หยด 1 ครั้ง
2. หยด 2 ครั้ง (ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนหยดครั้งที่ 2 ประมาณ 1-2 นาที)
3. หยด 3 ครั้ง (ระยะเวลาที่ทิ้งไว้ก่อนหยดครั้งที่ 2, 3 ประมาณ 1-2 นาที)

ผลการทดลองแสดงภาพจุดสีบนกระดาษทดสอบดังรูปที่ 4.15 พบว่า การหยดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนทั้งหมด 3 ครั้ง ครั้งละ 10.00 ไมโครลิตร ได้จุดทดสอบเกิดเป็นสีชมพูรวมกันตรงกลางไม่กระจายออกเหมือนการหยด 1 ครั้ง และ 2 ครั้ง ดังนั้นจึงเลือกปริมาณสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนโดยทำการหยดทั้งหมด 3 ครั้ง ครั้งละ 10.00 ไมโครลิตร เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลของปริมาณสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน

4.5 ผลการศึกษาหาปริมาตรที่เหมาะสมของสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะ-ไซยาโนเฟอร์เรต

นอกจากการศึกษาหาความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารละลายรีเอเจนต์ต่างๆ ที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาแล้ว ปริมาตรของรีเอเจนต์ตัวสุดท้ายที่หยดคือ โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาเช่นกัน ทำให้จำเป็นต้องศึกษาหาปริมาตรที่เหมาะสมของโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่หยดลงบนกระดาษทดสอบ โดยทำการทดลองหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตในปริมาตรที่ต่างกัน 3 ระดับ คือ

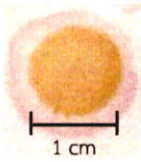
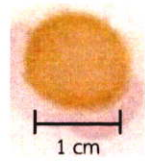
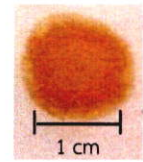
1.) 10.00 ไมโครลิตร

2.) 8.00 ไมโครลิตร

3.) 5.00 ไมโครลิตร

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16 พบว่าปริมาตรในการหยดของสารละลายโพแทสเซียม-เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยา ถ้าปริมาตรที่หยดมากเกินกว่าปริมาตรของสารละลายที่หยดก่อนหน้านี้ จะทำให้ผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกระจายตัวออกไปอยู่บริเวณรอบๆ วง มีผลกระทบต่อค่าความแตกต่างความเข้มแสงที่คำนวณได้เกิดค่าที่แปรปรวน ดังนั้นจึงเลือกใช้การหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ปริมาตร 5.00 ไมโครลิตรเป็นปริมาตรที่เหมาะสมสำหรับการทดลองต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.00 µL	8.00 µL	5.00 µL
		

รูปที่ 4.16 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาผลของปริมาตรสารละลายโพแทสเซียม-เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต

4.6 ผลการศึกษาการกระจายตัวของรีเอเจนต์

4.6.1 การกระจายตัวของสารละลายฟีนิลไฮดราซีน

ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายผสมของสารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 1.00 มิลลิลิตร จากนั้นหยดสารละลายผสมนี้ลงบนกระดาษกรอง ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วัน ทำการทดสอบโดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ทิ้งไว้ 60 นาที

4.6.2 การกระจายตัวของสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน

ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน จากเททระเอทอกซีไซเลน (TEOS) 2.00 มิลลิลิตร สารละลายฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตรและสารละลายกรดไฮโดรคลอลิกความเข้มข้น 4.0 โมลต่อลิตร ปริมาตร 2.00 มิลลิลิตร จากนั้นหยดสารละลายโซล-เจลนี้ลงบนกระดาษกรอง ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วัน ทำการทดสอบโดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร และหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ทิ้งไว้ 60 นาที

ผลการทดลองในหัววข้อที่ 4.7.1 กับ 4.7.2 ดังแสดงในรูปที่ 4.17 พบว่า ถ้าไม่ใช้สารละลายโซล-เจลในการเตรียมจุดรีเอเจนต์บนกระดาษ รีเอเจนต์จะกระจายตัวเป็นวงกว้าง

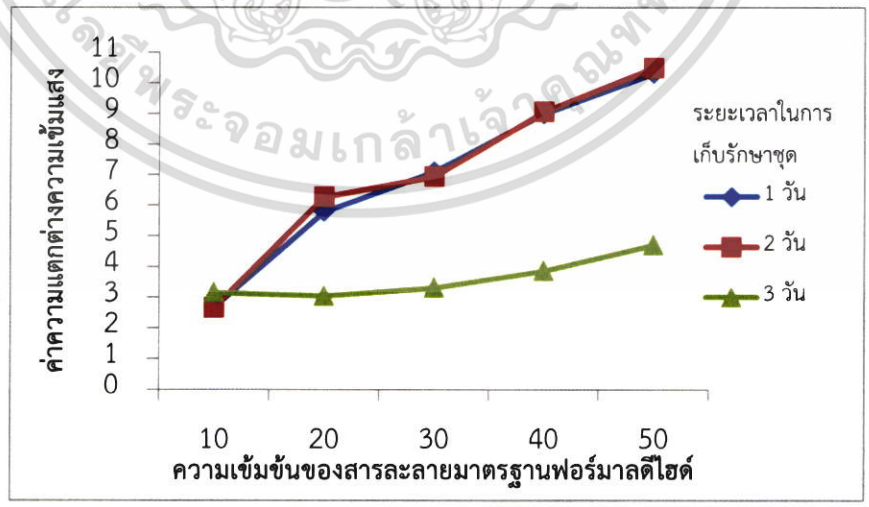
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(รูปที่ 4.17 a.) แต่เมื่อใช้สารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนสามารถที่จะกักรีเอเจนต์ไม่ให้กระจายตัวออกได้ (รูปที่ 4.17 b.) ดังนั้นสารละลายโซล-เจลช่วยในการตรึงรีเอเจนต์ไว้ได้

รูปที่ 4.17 จุดสีบนกระดาษทดสอบที่ได้จากการศึกษาการกระจายตัวของรีเอเจนต์ a.) ไม่ใช้สารละลายโซล-เจล และ b.) ใช้สารละลายโซล-เจล ในการเตรียมจุดรีเอเจนต์

4.7 ผลการศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาชุดทดสอบแบบกระดาษ

ได้ทำการศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาชุดทดสอบแบบกระดาษ หลังจากเตรียมจุดรีเอเจนต์โดยการหยดสารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนลงบนกระดาษกรอง แล้วทิ้งไว้ อย่างน้อย 1, 2 และ 3 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ก่อนนำมาใช้ในการตรวจวิเคราะห์ ฟอร์มาลดีไฮด์ ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า ระยะเวลาในการเก็บรักษาชุดทดสอบ 1 วัน และ 2 วัน ให้ค่าความแตกต่างความเข้มแสงที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อระยะเวลาในการเก็บรักษาชุดทดสอบเป็น 3 วัน พบว่าค่าความแตกต่างความเข้มแสงมีค่าลดลงอย่างมาก เมื่อเทียบกับระยะเวลาในการเก็บรักษาที่ 1 และ 2 วัน ดังนั้นชุดทดสอบแบบกระดาษที่เตรียมไว้ก่อนใช้งานสามารถเก็บรักษาได้ไม่เกิน 2 วัน ที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 4.18 ผลการศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาชุดทดสอบแบบกระดาษ

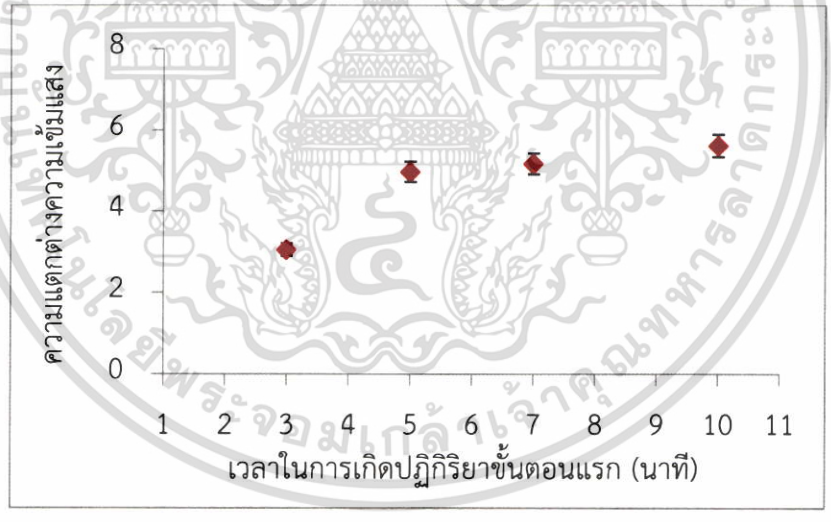
4.8 ผลการการศึกษาเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปัจจัยที่ทำการศึกษาลำดับต่อมาคือ เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยา โดยปฏิกิริยาที่ใช้ในการศึกษานี้เกิดขึ้นเป็น 2 ขั้นตอน

4.8.1 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรก

ทำการทดลองโดยเตรียมสารละลายโซล-เจลที่เจือด้วยฟีนิลไฮดราซีน 0.069 M แล้วหยดบนกระดาษกรองเบอร์ 2 ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วัน หลังจากนั้นนำมาทดสอบโดยหยดสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยากับฟีนิลไฮดราซีนในขั้นตอนแรก ทำการศึกษาการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรกที่เวลาต่างๆ กัน โดยกำหนดให้เกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่สองใช้เวลาคงที่ 60 นาที ได้ผลการทดลองแสดงในรูปที่ 4.19 พบว่าค่าความแตกต่างความเข้มแสงเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลา 3 - 5 นาที หลังจาก 5 นาทีไปถึง 10 นาที ค่าความแตกต่างความเข้มแสงค่อนข้างคงที่ โดยที่เวลา 10 นาที ค่าความแตกต่างความเข้มแสงจะมีความเบี่ยงเบนมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เวลาที่ 7 นาที เป็นเวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรก



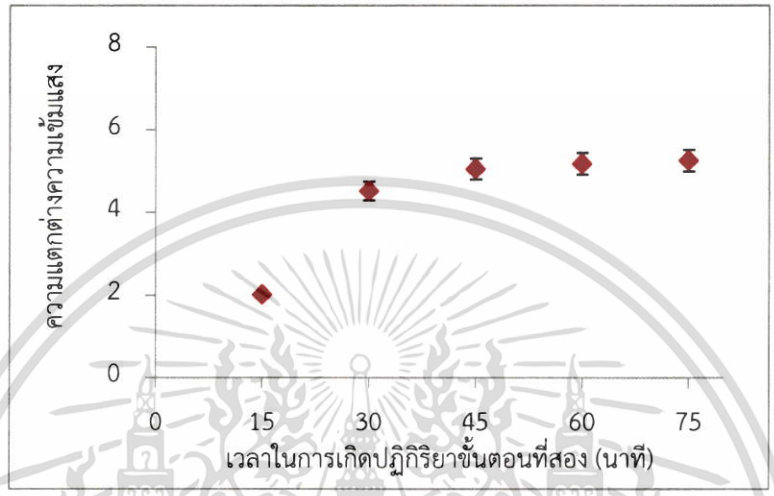
รูปที่ 4.19 ผลกระทบของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรก

4.8.2 เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนสอง

ปฏิกิริยาขั้นตอนสองคือการหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตเพื่อทำการออกซิไดซ์กับสารตัวกลางที่เกิดปฏิกิริยาในขั้นตอนแรกเป็นผลิตภัณฑ์ ได้ทำการทดลองโดยกำหนดการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรกใช้เวลาคงที่ ที่ 7 นาที และแปรเปลี่ยนเวลาที่ใช้ในการเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาขั้นตอนสอง ผลการทดลองแสดง ในรูปที่ 4.20 พบว่าค่าความแตกต่างความเข้มแสงเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลา 15 - 30 นาที หลังจาก 30 นาที ไปถึง 75 นาที ค่าความแตกต่างความเข้มแสงค่อนข้างคงที่ โดยที่เวลา 75 นาที ค่าความแตกต่างความเข้มแสงจะมีความเบี่ยงเบนมากขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้เวลาที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่สองเป็น 60 นาที



รูปที่ 4.20 ผลกระทบของเวลาในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนที่สอง

4.9 ผลการศึกษาความใช้ได้ของวิธีวิเคราะห์

4.9.1 สภาวะเหมาะสมในการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ

สามารถเตรียมชุดทดสอบแบบกระดาษสำหรับวิธีวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 สภาวะเหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ

พารามิเตอร์	สภาวะที่เหมาะสม
ความเข้มข้นของสารละลาย	
- ฟีนิลไฮดราซีนที่เตรียมในเอทานอล	0.069 โมลต่อลิตร
- โพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต	0.030 โมลต่อลิตร
- กรดไฮโดรคลอลิก	4.0 โมลต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

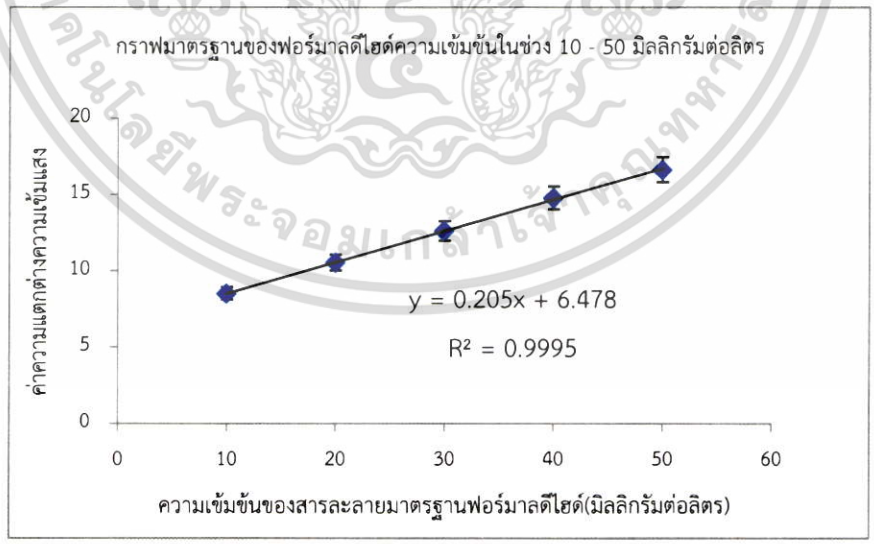
ตารางที่ 4.2 (ต่อ) สภาวะเหมาะสมสำหรับการสร้างชุดทดสอบแบบกระดาษ

พารามิเตอร์	สภาวะที่เหมาะสม
สารละลายโซล-เจล	
- TEOS : กรดไฮโดรคลอลิก : ฟีนิลไฮดราซีน	2 : 1 : 2 (โดยปริมาตร)
ปริมาตรของสารละลายโซล-เจลที่หยดบนกระดาษทดสอบ	10.00 ไมโครลิตร
ปริมาตรของสารละลายมาตรฐาน/สารละลายตัวอย่าง	10.00 ไมโครลิตร
ปริมาตรของสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต	5.00 ไมโครลิตร
เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนแรก	7 นาที
เวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาขั้นตอนสอง	60 นาที

4.9.2 ความเป็นเส้นตรง (Linearity)

เมื่อนำค่าความแตกต่างความเข้มแสงและความเข้มแสงของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์มาสร้างกราฟมาตรฐาน ได้ผลดังต่อไปนี้

4.9.2.1 สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 10– 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

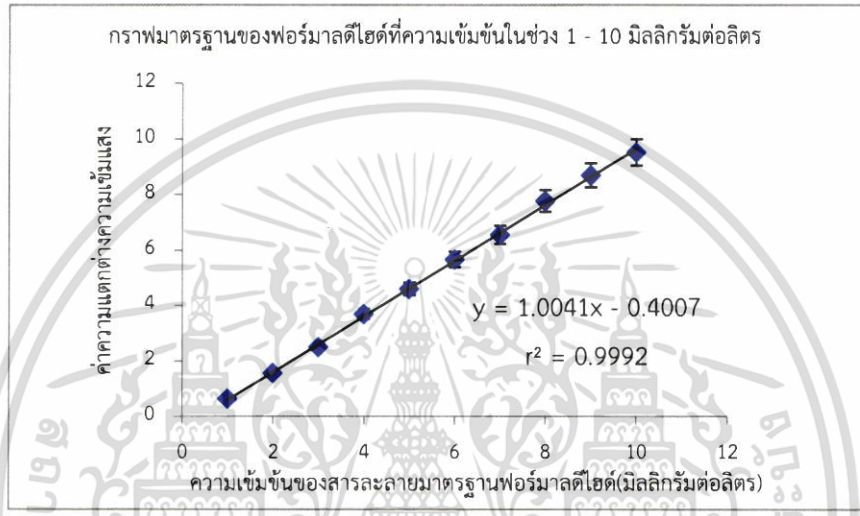


รูปที่ 4.21 กราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.21 พบว่ากราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร สมการเชิงเส้นตรงคือ [ED] = 0.205[HCHO] + 6.478 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) เท่ากับ 0.9995

4.9.2.2 สารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์สำหรับสร้างกราฟมาตรฐานที่ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.22 กราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ที่ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากรูปที่ 4.22 พบว่ากราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สมการเชิงเส้นถดถอยคือ [ED] = 1.0041[HCHO] - 0.4007 และมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (r^2) เท่ากับ 0.9992

4.9.3 ขีดจำกัดของการตรวจพบ (Limit of detection, LOD)

สามารถหาได้จากกราฟมาตรฐาน โดยใช้สูตร

$$LOD = Y_B + 3S_B$$

เมื่อ Y_B คือ y-intercept

S_B คือ Random error in y- intercept : ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_B=\sqrt{\frac{\sum_i (y_i-\hat{y}_i)}{n-2}}$$

เมื่อ y_i คือ ค่าจริงที่ได้จากการทดลอง

$\hat{y}_i$ คือ ค่าที่ได้จากการแทนค่า x ลงในสมการเส้นตรง

n คือ จำนวนจุด

4.9.3.1 ขีดจำกัดของการตรวจพบสำหรับฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นใน 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์กับค่าความแตกต่างความเข้มแสงได้สมการเส้นตรงคือ [ED] = 0.205[HCHO] + 6.478 นำไปคำนวณค่าต่างๆ เพื่อหาค่าขีดจำกัดของการตรวจพบ ดังแสดงในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่า y_i, $\hat{y}_i$ และ $(y_i - \hat{y}_i)^2$ ในการคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบ

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	y_i	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
10	8.52	8.53	-0.0080	0.0001
20	10.55	10.58	-0.0280	0.0008
30	12.63	12.63	0.0020	0.0000
40	14.79	14.68	0.1120	0.0125
50	16.65	16.73	-0.0780	0.0061
			รวม	**0.0039**
			S_B	**0.0360**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่าและคำนวณแล้วพบว่าได้ค่าขีดจำกัดของการตรวจพบฟอร์มาลดีไฮด์ มีค่าเท่ากับ 0.53 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.9.3.2 ขีดจำกัดของการตรวจพบสำหรับฟอร์มาลดีไฮด์ ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากกราฟมาตรฐานความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์กับค่าความแตกต่างความเข้มแสงได้สมการเส้นตรงคือ [ED] = 1.0041[HCHO] - 0.4007 นำไปคำนวณค่าต่างๆ เพื่อหาค่าขีดจำกัดของการตรวจพบ ดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงค่า y_i, $\hat{y}_i$ และ $(y_i - \hat{y}_i)^2$ ในการคำนวณขีดจำกัดของการตรวจพบ

ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	y_i	$\hat{y}_i$	$y_i - \hat{y}_i$	$(y_i - \hat{y}_i)^2$
1	0.64	0.60	0.0366	0.0013
2	1.57	1.61	-0.0375	0.0014
3	2.51	2.61	-0.1016	0.0103
4	3.70	3.62	0.0843	0.0071
5	4.60	4.62	-0.0198	0.0004
6	5.67	5.62	0.0461	0.0021
7	6.55	6.63	-0.0780	0.0061
8	7.77	7.63	0.1379	0.0190
9	8.69	8.64	0.0538	0.0029
10	9.52	9.64	-0.1203	0.0145
			รวม	**0.0065**
			S_B	**0.0285**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแทนค่าและคำนวณแล้วพบว่าได้ค่าขีดจำกัดของการตรวจพบมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ มีค่าเท่ากับ 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.9.4 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ)

$$LOQ = Y_B + 10S_B$$

เมื่อ Y_B คือ y-intercept

S_B คือ Random error in y-intercept : ค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกน y

4.9.4.1 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการแทนค่าและคำนวณแล้วพบว่า ได้ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณมีค่าเท่ากับ 1.75 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 10 – 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.9.4.2 ขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณของสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

จากการแทนค่าและคำนวณแล้วพบว่า ได้ค่าขีดจำกัดของการตรวจวัดเชิงปริมาณมีค่าเท่ากับ 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร สำหรับฟอร์มาลดีไฮด์ความเข้มข้นในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.10 ผลการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบโดยใช้ชุดทดสอบแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้น

ทำการเตรียมตัวอย่างหมึกกรอบทั้งหมด 4 ตัวอย่าง และนำมาทดสอบหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยใช้ชุดทดสอบแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้น ซึ่งใช้สารละลายโซล-เจลเจือด้วยด้วยฟีนิลไฮดราซีนที่ความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ในการเตรียมจุดรีเอเจนต์ทิ้งไว้ให้แห้ง 1 วัน ทดสอบหาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์โดยหยดสารละลายตัวอย่างหรือสารละลายตัวอย่างที่มีการเติมสารละลายมาตรฐานฟอร์มาลดีไฮด์ ปริมาตร 10.00 ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้ง 7 นาที แล้วหยดสารละลายโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตความเข้มข้น 0.030 โมลต่อลิตร ปริมาตร 5.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครลิตร ทิ้งไว้ให้แห้งประมาณ 60 นาที ทำการบันทึกภาพด้วยเครื่องสแกน นำไปประมวลผลค่าความเข้มแสง (RGB) ด้วยโปรแกรม Image J™

คำนวณค่า Euclidean distance และหาความเข้มข้นของฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างจากกราฟมาตรฐาน คำนวณปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในหน่วยมิลลิกรัมต่อกิโลกรัมและรายงานค่าร้อยละการคืนกลับ (%recovery) ของตัวอย่างหมึกกรอบ (2) ได้ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 4.5 และ 4.6 พบฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบ (2) และ (3) ในปริมาณ 2.12±0.01 และ 3.02±0.02 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และการวิเคราะห์ตัวอย่างหมึกกรอบ (2) ได้ค่าร้อยละการคืนกลับในช่วง 99 – 104 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4.5 ปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างหมึกกรอบ

ตัวอย่างหมึกกรอบ	ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)
1	ND*
2	2.12 ± 0.01
3	3.02 ± 0.02
4	ND*

*Not detected

ตารางที่ 4.6 แสดงร้อยละการคืนกลับ (%recovery) ของการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบ (2)

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นฟอร์มาลดีไฮด์		ร้อยละการคืนกลับ (%)
	ที่เติม (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ที่วิเคราะห์ได้ (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
หมึกกรอบ (2)	0	2.12±0.01	-
	1	3.14±0.01	102±0.02
	3	5.23±0.16	104±0.02
	5	7.05±0.11	99±0.03
	7	9.16±0.01	100±0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์โดยใช้ชุดทดสอบแบบกระดาษ ซึ่งใช้กระบวนการโซล-เจลในการตรึงจุดรีเอเจนต์ ใช้สารละลายโซล-เจลเจือด้วยฟีนิลไฮดราซีนความเข้มข้น 0.069 โมลต่อลิตร ในการเตรียมจุดรีเอเจนต์ วิธีที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถลดปริมาณการใช้สารเคมีที่ใช้ในการทดสอบเมื่อเทียบกับชุดทดสอบหาฟอร์มาลดีไฮด์แบบดั้งเดิม (Test kit) และมีข้อดีคือ ราคาถูก ใช้งานง่าย ปลอดภัย สามารถวิเคราะห์ผลได้รวดเร็วโดยใช้เครื่องมือที่ง่ายต่อการตรวจวัดผลการทดลอง ชุดทดสอบแบบกระดาษที่พัฒนาขึ้นนี้เหมาะกับการวิเคราะห์ฟอร์มาลดีไฮด์ในช่วง 1 – 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีขีดจำกัดของการตรวจพบ (LOD) เท่ากับ 0.08 มิลลิกรัมต่อลิตร ขีดจำกัดต่ำสุดของการตรวจวัดปริมาณ (LOQ) เท่ากับ 0.28 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถนำไปประยุกต์ใช้วิเคราะห์หาฟอร์มาลดีไฮด์ในตัวอย่างหมึกกรอบได้ และให้ค่าร้อยละการกลับคืนอยู่ในช่วง 99-104 เปอร์เซ็นต์

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการทดลองมีขั้นตอนการหยดรีเอเจนต์ทั้งหมด 2 ขั้นตอน ดังนั้นควรปรับปรุงให้เหลือเพียงขั้นตอนเดียว เพื่อสามารถทำการวิเคราะห์ได้รวดเร็วขึ้น

5.2.2 ในชุดทดสอบที่พัฒนาขึ้นยังต้องใช้กรดไฮโดรคลอลิกเข้มข้น ควรปรับปรุงโดยใช้กรดที่มีความอันตรายน้อยลงในขั้นตอนการเตรียมชุดทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] J.J.Clary and J.B.Sullivan. 2001. **Clinical environmental health and toxic exposures**. 2nd ed. Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins. p. 1008.

[2] มงคล พันธุมโกมล ปณตพร บุญเปี่ยมศักดิ์ และกฤตพัฒน์ จุ้ยเตย. 2553. **คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูง ฟอร์มาลดีไฮด์(Formaldehyde)**, พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: กรม-โรงงาน อุตสาหกรรม.

[3] **การปฏิบัติการการสร้างชุดตรวจสอบหาสารพิษที่ปนเปื้อนในอาหาร**. [Online]. Available : sc.nsru.ac.th/sciencecenter/new/files/sidemenu/20170325-143637.pdf . accessed : 4 Jan 2018

[4] **ภาพโครงสร้างทางเคมีของสารฟอร์มาลดีไฮด์**. [Online]. Available: https://www.chemi-pan.com/home/index.php/html. accessed : 11 Jan 2017.

[5] **คู่มือการจัดการสารเคมีอันตรายสูงฟอร์มาลดีไฮด์ (Formaldehyde)**. [Online]. Available http://php:diw.go.th/safety/wp-content/uploads/2015/01/formaldehyde.pdf. accessed : 5 Jan 2018

[6] **Chronic formaldehyde-mediated impairments and age-related dementia.** [Online]. Available : https://www.intechopen.com/books/neurdegene-ration/chronic-formaldehyde-mediated-impairments-and-age-related-dementia. accessed : 5 Jan 2018.

[7] Y. Tai-Sheng, L. Tzu-Chun, C. Ching-Chuan. 2013. **Analysis of free and bound formaldehyde in squid and squid products by gas chromatography-mass spectrometry**. J. Food and Drug Analysis. 21: 190-7.

[8] World Health Organization. 2003. **The World health report 2003 : shaping the future**

[9] F. Bianchi, M. Careri, M. Musci and A. Mangia. 2007. **Fish and food safety:determination of formaldehyde in 12 fish species by SPME extraction and GC-MS analysis**. J.Food Chemistry. 100 : 1049-53.

[10] W. Claeys , C. Vleminckx and A. Dubois . 2009. **Formaldehyde in cultivated mushroom:a negligible risk for the consumer**. J. Food Additives Contaminants. 19 : 1265-72.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] **ฟอร์มาลิน : สารปนเปื้อนในอาหาร** [Online]. Available : http://fd.surinpho.go.th/files-_download/659I9B.doc. **accessed** : 11 Jan 2018.

[12] D. Segal. 1989. **Chemical Synthesis of Advanced Ceramic Materials**, Cambridge University Press. Cambridge. p. 58-88.

[13] B. Mahltig and T. Textor. 2008. **Nanosols and Textiles**. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. Singapore : p. 2-7.

[14] S. Falaize, S. Radin, and P. Ducheyne. 1999. **In vitro behavior of silica-based xerogels intended as controlled release carriers**. J. American Ceramic Society. 8 : 969-976.

[15] **กระบวนการโซล-เจล**. [Online] ; 2556 Available : http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream/2010/9307/1/375494.pdf. accessed : 4 Jan 2018

[16] **กระบวนการโซลเจล (Sol-Gel Technology).** [Online] Available : http://www.dpim.go.th/articles/article?catid=125&articleid=3251. accessed : 4 Jan 2018

[17] **เครื่องสแกน** [Online]. Available : http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/computer/System/scanner.htm. accessed : 9 Jan 2018

[18] **Sheetfed scanner picture** [Online]. Available : http://images.pcworld.com/images/article/2012/09/neat20receipts20scanner-11404615.jpg. accessed : 9 Jan 2018

[19] **Flatbed Scannerpicture** [Online]. Available : http://i.ebayimg.com/00/s/NTY2WDg0OQ==/z/aS0AAOSwRLZT1iRM/$_32.JPG?set_id=880000500F. accessed : 9 Jan 2018

[20] **Handy scanner picture** [Online]. Available : https://pimg.tradeindia.com/00624355/b/2/Portable-A4-Handy-Scanner.jpg. accessed : 9 Jan 2018

[21] **ระบบสี** [Online]. Available : https://sites.google.com/site/wbicomputergraphics/Rabb-si-color-model; accessed : 9 Jan 2018.

[22] **ภาพระบบสีแบบ RGB** [Online]. Available : https://www.lcipaper.com/kb/what-arethe-differences-between-pantone-cmyk-rgb.html. accessed : 11 Jan 2018.

[23] **ภาพระบบสีแบบ CMYK** [Online]. Available : http://www.hiland.com/knowledge-base/getting-to-know-rgb-and-cmyk/. Accessed : 11 Jan 2018.

[24] **ระบบสีแบบ HSV ภาพระบบสีแบบ HSV** [Online]. Available : http://lprusofteng.blogspot.com/2012/04/blog-post_04.html. accessed: 11 Jan 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[25] **ระบบสีแบบ LAB ภาพระบบสีแบบ LAB** [Online]. Available : http://lprusofteng.blogspot.com/2012/04/blog-post_04.html. accessed : 11 Jan 2018.

[26] **เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ (Image processing).** [Online]. Available : https://silllovely.wordpress.com/2013/06/11/เทคโนโลยีการประมวลผลภาพ/. accessed: 11 Jan 2018.

[27] ปริวรรต โนนศิริ, ปิยะพงษ์ นิ่มเสนาะ และภูมิ อัครศรีภูมิ, 2555. **"การทดสอบแบบจุดบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์ซัลเฟต."** วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[28] **การวิเคราะห์หาปริมาณฟอร์มาลดีไฮด์ในผลิตภัณฑ์สำหรับล้างจานโดยวิธีคัลเลอริเมทรี**. [Online]. Available : http://www.rsc.lpru.ac.th/ab%2046/stab468.doc. accessed : 25 May 2017

[29] **ฟอร์มาลิน.** [Online]. Available :http://scijournal.hcu.ac.th/ojs/index.php/scijournal/article/view/28/21. accessed : 25 May 2017

[30] British Standard . DD CEN/TS 13130-23. **2005. Materials and articles in contact with foodstuffs-Plastics substances subject to limitation-Part 23 Determination of formaldehyde and hexamethylene-tetramine in food simulants.** DD CEN/TS. 13130-19. pp.1-16.

[31] A. N. Ramdzan, G.S. Almeida, M. J. McCullough and S.D. Kolev. 2016. **Development of A Microfluidic Paper-based Analytical Device for The Determination of Salivary Aldehydes.** J. Analytica Chimica Acta. 919 : 47-54

[32] O. Bunkoed, F. Davisc, P. Kanatharana, P. Thavarungkul and S.P.J. Higsonc. 2010. **Sol–gel Based Sensor for Selective Formaldehyde Determination.** J. Analytica Chimica Acta, 659 : 251–257.

[33] P. Wahed , Md.A. Razzaq, S. Dharmapuri and M. Corrales. 2016 **Determination of formaldehyde in food and feed by an in-house validated HPLC method.** J. Food Chemistry. 202 : 476–483.

[34] S.T. Girousi, E.E. Golia, A.N. Voulgaropoulos and A. J. Maroulis. 1997. **Fluorometric Determination of Formaldehyde.** Fresenius. J.Analytical Chemistry. 358 : 667-668.

[35] S. Teerasong, N. amornthamaraong, K. Grudpan, N. Teshima, T. Sakai, D. Nacapricha, and N. Ratanawimarnwong. 2010. **A Multiple Processing**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Hybrid Flow System for Analysis of Formaldehyde Contamination in Food" J.Analytical Science. 26 : **629-633.**

[36] K. P. Shrivastaw and S. Singh. 1995. **A New Method for Spectrophotometric Determination of Formaldehyde in Biologicals**, Biologicah. 23 :47-53.

[37] กฤตยพร ศรทอง, วัชรพล ขาเขียว และณัฐพัชร์ ช่วยทุกข์เพื่อน, 2556. "**ชุดทดสอบแบบจุดบนกระดาษสำหรับการวิเคราะห์ไนไตรท์**" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[38] ฉันท์ทัต วงษ์ดี และวิบูลย์ ประดิษฐ์เวียงคำ "**การพัฒนาชุดทดสอบบนกระดาษสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณเหล็กทำการเติมออโทฟีแนนโทรลีนเป็นส่วนผสมในสารละลายโซล-เจล**" การประชุมวิชาการ ครั้งที่ 34 The National Graduate Research conference. ขอนแก่น :อาคารเรียนรวมคณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

[39] จินตพร ไข่สีทอง, จินตภา ไข่สีทอง และสุชาดา สมนาม, 2557. "การวิเคราะห์ไทโอไซยาเนตด้วย การทดสอบแบบจุดบนกระดาษโดยใช้โซล-เจลเจือด้วยเหล็ก(III)" วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

[40] A. Samadi, V. Rezaei and S. Rastegarzadeh. 2015. **Sol-gel based optical sensor for determination of Fe (II) : A novel probe for iron speciation.**J.Spectro chimica Acta. Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy.136 : 832-837.

[41] **Methodical Instruction for Students of The 3rd Course.** [Online]. Available : https://goo.gl/images/BJXDTv. accessed in 07 July, 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Understand Science, Apply Technology,
Create Innovation for Sustainable Society

17-19 OCTOBER 2017

STT43 PROCEEDINGS BOOK

การประชุมวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 43 (วทท 43)
เข้าใจวิทยาศาสตร์ เข้าถึงเทคโนโลยี สร้างนวัตกรรม นำสังคมยั่งยืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STT 43

UNDERSTAND SCIENCE
APPLY TECHNOLOGY
CREATE INNOVATION FOR SUSTAINABLE SOCIETY

PROCEEDINGS BOOK

The 43rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT43)

"Understand Science, Apply Technology, Create Innovation for Sustainable Society"

October 17-19, 2017
Venue: Chaloem Rajakumari 60 Building
Chulalongkorn University, Thailand

Organized by:
The Science Society of Thailand under the Patronage of His Majesty the King
In Association with
Chulalongkorn University

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Editor-in-chef:
Assoc.Prof.Dr.Pranut Potiyaraj — Chulalongkorn University
Assoc.Prof.Dr.Onruthai Pinyakong — Chulalongkorn University

Advisory Board:
Assoc.Prof.Dr.Napavarn Noparatnaraporn — The Science Society of Thailand
Prof.Dr.Piamsook Pongsawasdi — The Science Society of Thailand
Assoc.Prof.Dr.Thararat supasiri — The Science Society of Thailand
Assoc.Prof.Dr.Polkit Sangvanich — Chulalongkorn University
Prof.Dr.Tirayut Vilaivan — Chulalongkorn University
Asst.Prof.Dr.Sureerat Deowanish — Chulalongkorn University
Asst.Prof.Dr.Sirithan Jiemsirilers — Chulalongkorn University

Editorial Secretary:
Ms.Daneeya Hengphum
Mr.Weerasak Chongfuengprinya

Published by — The Science Society of thailand Under the Patronage of His Majesty the King
Faculty of Science, Chulalongkorn University, Patumwan Road, Bangkok, Thailand
Published date — October 2017 (available in PDF version only)
ISBN — 978-616-91224-9-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Editorial committee:

Session A: AGRICULTURAL SCIENCE / BIOTECHNOLOGY

Associate Professor Dr.Suchana Chavanich	Chulalongkorn University
Associate Professor Dr.Nuttha Thongchul	Chulalongkorn University

Session B: BIOLOGICAL SCIENCE

Associate Professor Dr.Rudee Surarit	Mahidol University
Associate Professor Dr.Chanitra Thuwajit	Mahidol University
Associate Professor Dr.Tuangporn Suthiphongchai	Mahidol University
Associate Professor Dr.Chanpen Chanchao	Chulalongkorn University
Associate Professor Dr.Tanapat Palaga	Chulalongkorn University
Associate Professor Dr.Supachitra Chadchawan	Chulalongkorn University

Session C: CHEMISTRY

Professor Dr.Vatcharin Rukachaisirikul	Prince of Songkla University
Professor Dr.Orawon Chailapakul	Chulalongkorn University
Professor Dr.Thawatchai Tuntulani	Chulalongkorn University
Professor Dr.Vithaya Ruangpornvisuti	Chulalongkorn University
Associate Professor Dr.Khanitha Pudhom	Chulalongkorn University
Associate Professor Dr.Weena Siangproh	Srinakharinwirot University
Assistant Professor Dr.Yaowapa Sukpondma	Prince of Songkla University
Assistant Professor Dr.Thanyada Rungrotmongkol	Chulalongkorn University
Dr.Chittreeya Tansakul	Prince of Songkla University

Session D: MATERIALS SCIENCE Polymer / Ceramic / Metallurgy / Nanotechnology

Associate Professor Dr.Supon Ananta	Chiang Mai University
Associate Professor Dr.Taweechai Amornsakchai	Mahidol University
Associate Professor Dr.Duangdao Aht-ong	Chulalongkorn University

Session E: ENERGY / ENVIRONMENTAL& EARTH SCIENCE

Professor Dr.Montri Choowong	Chulalongkorn University
Associate Professor Dr.Kraichat Tantrakarnapa	Mahidol University
Associate Professor Dr.Prasert Reubroycharoen	Chulalongkorn University

Session F: PHYSICS / APPLIED PHYSICS

Associate Professor Dr.Pisith Singjai	Chiang Mai University
Assistant Professor Dr.Boonchoat Paosawatyanyong	Chulalongkorn University

Session G: MATHEMATICS / STATISTICS / COMPUTER SCIENCE

Professor Dr.Kritsana Neammanee	Chulalongkorn University
Associate Professor Dr.Rajalida Lipikorn	Chulalongkorn University

Session SP1: CRYSTALLOGRAPHY

Professor Dr.Nongnuj Muangsin	Chulalongkorn University
Assistant Professor Dr.Kittipong Chainok	Thammasat University
Assistant Professor Dr.Kuakarun Krusong	Chulalongkorn University

Session SS1: SYMPOSIUM ON FOOD FOR THE FUTURE
(Science and Technology for Innovation and Sustainability in Food Sector Towards Thailand 4.0)

Associate Professor Dr.Saiwarun Chaiwanichsiri	Chulalongkorn University
Associate Professor Dr.Kanitha Tananuwong	Chulalongkorn University
Assistant Professor Dr.Chaleeda Borompichaichartkul	Chulalongkorn University

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

C1_018_PF: DEVELOPMENT OF SOL-GEL BASED PAPER TEST KIT FOR ANALYSIS OF FORMALDEHYDE CONTAMINATION IN PICKLED SQUID

Sukanya Sirimak[1,*], Wiboon Praditweangkum[1]
[1]Department of Chemistry, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand
*e-mail: sukanya_sirimak@hotmail.com

Abstract: The sol-gel based paper test kit for determination of formaldehyde in pickled squid has been developed. Phenylhydrazine is added as an ingredient in sol-gel solution. The sol-gel solution is prepared by mixing tetraethoxysilane,4.0 mol L^{-1} hydrochloric acid solution and 0.069 mol L^{-1} phenylhydrazine in ethanol with volume ratio of 2:1:2 (v/v). The reagent spot is prepared by dropping 10.0 µL of sol-gel solution on filter paper and left for drying. To analyze for formaldehyde, the first step is started by dropping 10.0 µL of standard or sample solution on reagent spot and left for 7 minutes for reaction between formaldehyde and phenylhydrazine. Then the second step is followed up by dropping 5.0 µL of 0.030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) solution and waiting no less than 30 minutes for oxidation of intermediate to final product. After drying, the pink-red color of tested spot can be recorded by a scanner. The Image J program is used to analyze the intensity of RGB light and the Euclidean Distance can be calculated. For formaldehyde in concentration range of 1.0 - 10.0 mg L^{-1}, the linear equation of [ED] = 1.0041[HCHO] – 0.4007 and r^2 = 0.999 are obtained. The limit of detection (LOD) and limit of quantitation (LOQ) are 0.40 and 1.34 mg L^{-1}, respectively. Accuracy can be shown by recovery of 99 - 104% in pickled squid sample.

Introduction: Formaldehyde (HCHO) is a flammable, colorless reactive and readily polymerized gas at normal room temperature and pressure, with a relative molecular mass of 30.03 g mol^{-1} and a pungent odor. Formaldehyde is soluble in water, ethanol and diethyl ether. Formaldehyde occurs naturally in foods, and foods may be contaminated as a result of fumigation (e.g. of grain), cooking (as a combustion product) and release from formaldehyde-resin-based tableware. Formaldehyde has been used as a bacteriostatic agent in some foods, such as cheese. Fruits and vegetables typically contain 3-60 mg kg^{-1}, milk and milk products about 1 mg kg^{-1}, meat and fish 6-20 mg $kg^{-1}$and squid 1.8 mg kg^{-1}.[1] However, formaldehyde contamination is one of the most significant sources of foodborne diseases and the consumption of formalin solution directly causes toxic symptoms, symptoms of abdominal pain, vomiting, diarrhea, circulatory collapse and death. Therefore, it was classified in Group I "as carcinogenic to humans" by the International Agency for Research on Cancer (IARC).[1] In general the various types of food, there will be natural formaldehyde, which the human body can eliminate by itself. It is naturally degraded by the sun, oxygen and heat, but the formaldehyde used in food is currently a crucial problem. Because local stores and markets often sell fruits, fish, and vegetables that have been treated with formalin to keep them fresh. However, the use of formaldehyde can preserve food from spoilage, but the excessive use of formalin causes residues in food and harmful to consumers. So, Ministry of Public Health issued Act No. 151(B.E.2536) specified that the use of formalin in food is prohibited.[2] The most widely used methods for detection of formaldehyde are based on spectrophotometry[3] and other methods, such as colorimetry[4], fluorimetry[5], high-performance liquid chromatography[6] and gas chromatography[7]. However, most of these techniques have limitation in requisite of expensive or sophisticated equipment. The microfluidic paper-based analytical device (µPAD) for the determination of salivary aldehydes has also been also developed. This µPAD is based on the color reaction between aldehyde, 3-methyl-2-benzothiazolinone hydrazone and iron(III) to form an intense blue color formazan dye.[8] The qualitative analysis for formaldehyde can be examined by using a test kit.[9,10] The method is based on reaction of formaldehyde and phenylhydrazine to form an intermediate that can be oxidized by potassium hexacyanoferrate(III) to form a product of pink-red color. The mechanism of this reaction can be illustrated in **Figure 1**.

© The 43rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT 43)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

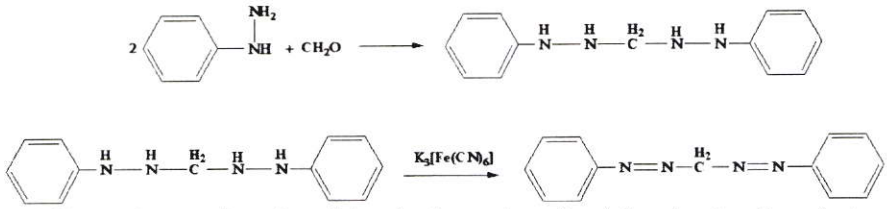


Figure 1. Stoichiometric equations describing the formation of a pink-red colored product as a result of the reactions between formaldehyde, phenylhydrazine and potassium hexacyanoferrate.[11]

The sol-gel technology has recently attracted considerable attention for the development of the sensors. Because simplicity and versatility. Sol-gel process is process a means of coating an unclad optical fiber with a porous cladding, within which an analyte-sensitive reagent is entrapped. In this technique, under appropriate process parameters the reagent cannot be leached out, but smaller analyte molecules can permeate the interconnecting micro porous pores. The sol-gel produced thin films offer many advantages over other immobilization techniques.[12,13] Various sol-gel colorimetric sensors have been developed for determination of nitrite[14], bismuth[15] and copper(II)[16]. The colorimetric spot-test on paper for determination of iron(II) using sol-gel doped with orthophenanthroline has been developed, and sol-gel used to control the spacing of reaction zone has been also reported[17]. The sol-gels with entrapped sensitive and selective reagents for the determination of formaldehyde have also been reported. This method is based on the adsorption of formaldehyde from the air and reaction with β-diketones in a sol-gel matrix to produce a yellow product, lutidine[18].

This work aims to develop a sol-gel based paper test kit for determination of formaldehyde contaminated in pickled squid samples. The method is based on the reaction between formaldehyde, phenylhydrazine and potassium hexacyanoferrate(III), same as the reaction in qualitative analysis for formaldehyde using a test kit.[9,10] The sol-gel process has been also cooperated in developed paper test kit for entrapping reagent and pink-red colored product and limiting the reaction zone.

Methodology:

Reagent: All chemicals used were of analytical reagent grade. Formaldehyde stock solution (1000 mg L−1) was prepared by appropriate diluting 37% (w/v) solution (Carlo Erba, France) and standardization was also processed by titration with sulfuric acid solution19. Standard working solutions were prepared daily by appropriate diluting of the stock solution in deionized water which was purified with a Milli-Q system (Millipore, USA). The 0.069 mol L-1 phenylhydrazine solution was prepared by diluting 0.070 mL of phenylhydrazine (C6H5NHNH2, ACROS ORGANICS, Belgium) in 10.0 mL of ethanol (Carlo Erba, France). 0.030 mol L-1 Potassium hexacyanoferrate(III) solution was prepared by dissolving 0.060 g of potassium hexacyanoferrate(III) (K3[Fe(CN)6], (Carlo Erba, France) in 10.0 mL of deionized water. 4.0 M Hydrochloric acid solution was prepared by diluting 3.9 mL of concentrated hydrochloric acid (HCl, Merck , Thailand) in 10 mL of deionized water.

Preparation of sol–gel solution: Sol–gel solution was prepared by mixing tetraethoxysilane (TEOS) (Sigmae Aldrich, Germany), 4.0 mol L^{-1} hydrochloric acid solution and 0.069 mol L^{-1} phenylhydrazine solution in the volume by volume ratio of 2:1:2 (v/v). The mixture solution was then magnetically stirred for 1 hour at room temperature.

Preparation of reagent spot on paper: The reagent spots can be prepared on filter paper by dropping 10.0 µL of sol-gel solution on filter paper (Advantec No. 2, Japan) and waiting for drying.

Analysis for formaldehyde: The first step, 10.0 µL of formaldehyde working solution or sample solution is applied on reagent spot and left for 7 minutes for reaction between formaldehyde and phenylhydrazine. The second step, 5.0 µL of 0.030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) is also dropped on previous reagent spot and left for 60 minutes for reaction producing final produce and drying. The pink-red color of tested spots can be recorded by a scanner (Canon™ Lide 210, Japan). The image is interpreted from the center point as a circle of 80 (width) x 80 (height). The Image J program[20] (free and open source software) is used to analyze the light intensity value of RGB (Red Green Blue) and the measured color intensity value is calculated into Euclidean Distance value, defined as:

$$ED = \sqrt{(\Delta I_R)^2 + (\Delta I_G)^2 + (\Delta I_B)^2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Where Δ is difference value of light intensity at spot blank with light intensity value of spots standard or sample

Sample preparation: The sample preparation was processed as described in test kit for formalin in food.[21] Pickled squid samples were collected by purchasing from Huatakae local market, Ladkrabang Bangkok Thailand. The sample was cut into small pieces, accurately weighed (5.0 g) into a 25 mL beaker and rinsed with 5.0 mL of deionized water. The rinsed-water is then poured into a beaker and tested for formaldehyde.

Results and Discussion:

Optimization of the fabrication process: All reagents; 1.0 mL of 0.069 mol L^{-1} phenylhydrazine in ethanol, 1.0 mL of 0.030 M potassium hexacyanoferrate(III) and 1 mL of 0.10 mol L^{-1} hydrochloric acid were mixed together with 2.0 mL of TEOS for preparing sol-gel solution and dropped on paper as the first fabrication of the reagent spot. The color of this reagent spot was light orange. 10.0 µL of 10 mg L^{-1} formaldehyde standard solution was then applied on the reagent spot. The color of light orange still appeared on tested spot instead of intending pink color of final product. This result can describe that the first fabrication process was not appropriate for preparing of sol-gel based reagent spot. According to the chemical reaction as shown in **Figure 1**, formaldehyde must be reacted at first with phenylhydrazine then the intermediate product can be oxidized by potassium hexacyanoferrate(III) to form the final product of pink-red color. The second fabrication was then developed by inducing of this mechanism. Potassium hexacyanoferrate(III) should be separated out of sol-gel solution to allow phenylhydrazine to react at first with formaldehyde. Hydrochloric acid was still an ingredient in sol-gel solution to make acidic media for hydrolysis and condensation of alkoxide precursor. The sol-gel solution consisting of 2.0 mL of TEOS, 1.0 mL of 0.10 mol L^{-1} hydrochloric acid and 2.0 mL of 0.069 mol L^{-1} phenylhydrazine in ethanol and was prepared and dropped on paper as the reagent spot. The color of reagent spot fabricated by the second process was also light orange. Each 10.0 µL of formaldehyde standard solution and 0.030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) was then applied on the reagent spot, respectively. The color of tested spot was yellow. The intending pink-red color of final product was still not appeared. The concentration of hydrochloric acid was next considered. In test kit method for detecting formaldehyde[9,10], conc. hydrochloric acid was used without dilution. Each 10.0 µL of 0.50 mol L^{-1} hydrochloric acid was then repeatedly applied on the previous tested spot of yellow color for testing the effect of hydrochloric acid. The result was that the pink-red color could start to appear on tested spot. Increasing concentration of hydrochloric acid in sol-gel solution ingredient was then considered.

Effect of hydrochloric acid concentration: The sol-gel solution consisting of 2.0 mL of TEOS, 1.0 mL of various concentrations of hydrochloric acid and 2.0 mL of 0.069 mol L^{-1} phenylhydrazine in ethanol was prepared and dropped on paper as the reagent spot. Each 10.0 µL of 5.0 mg L^{-1} formaldehyde standard solution and 0.030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) was then applied on the reagent spot, respectively. The influence of hydrochloric acid was studied with concentration starting from 0.50 mol L^{-1} to 5.0 mol L^{-1}. **Figure 2** depicts ED as a function of hydrochloric acid concentration. The ED response increases dramatically as concentration of hydrochloric acid increases from 0.50 mol L^{-1} to 3.0 mol L^{-1} and reaches the rather constant after 3.0 mol L^{-1}. The concentration of hydrochloric acid can be optimized at 4.0 mol L^{-1}.

© The 43rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT 43)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

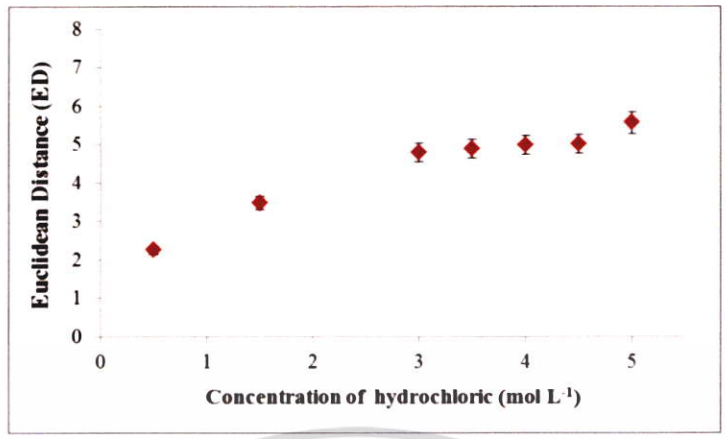


Figure 2. The ED response in different concentration of hydrochloric acid.

Effect of phenylhydrazine concentration: The sol-gel solution consisting of 2.0 mL of TEOS 2.0 mL of various concentrations of phenylhydrazine in ethanol and 1.0 mL of 4.0 mol L^{-1} hydrochloric acid was prepared and dropped on paper as the reagent spot. Each 10.0 µL of 5.0 mg L^{-1} formaldehyde standard solution and 0.030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) was then applied on the reagent spot, respectively. The concentration of phenylhydrazine was studied at 0.69 mol L^{-1}, 0.069 mol L^{-1} and 0.0069 mol L^{-1}. The results are illustrated in **Figure 3**.

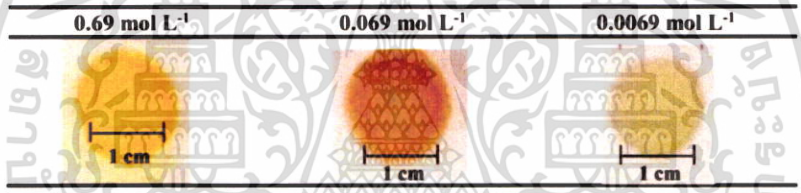


Figure 3. Effect of phenylhydrazine concentration.

Effect of potassium hexacyanoferrate(III) concentration: The sol-gel solution consisting of 2.0 mL of TEOS, 1.0 mL of 4.0 mol L^{-1} hydrochloric acid and 2.0 mL of 0.069 mol L^{-1} phenylhydrazine in ethanol was prepared and dropped on paper as the reagent spot. Each 10.0 µL of 5 mg L^{-1} formaldehyde standard solution and various concentrations of potassium hexacyanoferrate(III) was then applied on the reagent spot, respectively. The concentration of potassium hexacyanoferrate(III) was studied at 0.30 mol L^{-1}, 0.030 mol L^{-1} and 0.0030 mol L^{-1}. The results are illustrated in **Figure 4**. The color of 0.30 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) solution is dark yellow. After applying this solution on tested spot, pink-red color of the final product is obscured by dark yellow color. At the same time, when 0.0030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) is applied, the pink-red color is not clear. This concentration of potassium hexacyanoferrate(III) is probably not enough for the reaction. The pink-red color can appear when 0.030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) is used.

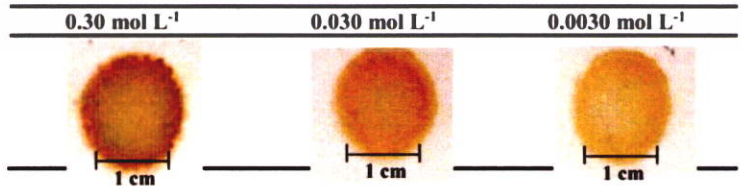


Figure 4. Effect of potassium hexacyanoferrate(III) concentration.

Effect of volume of potassium hexacyanoferrate(III) solution dropped on spot: For analysis of formaldehyde, 10.0 µL of 5 mg L^{-1} formaldehyde standard solution is applied on the reagent spot. Various volumes of potassium hexacyanoferrate(III) solution dropping on tested spot is considered. The results are illustrated in **Figure 5**. When 0.030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) solution is applied by

© The 43rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT 43)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10.0 and 8.0 μL, the color of tested spots is light pink. Excess volume of this solution can disperse out of tested area while as the reaction cannot be reach in time. This causes light pink-red color on tested spots. The dark pink-red color and no dispersal of tested spot can be obtained when 0.030 mol L^{-1} potassium hexacyanoferrate(III) is dropped by volume of 5.0 μL.

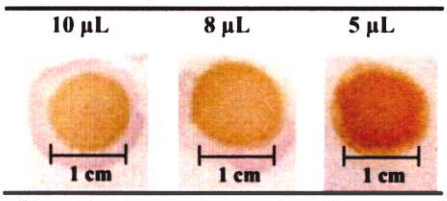


Figure 5. Effect of volume of potassium hexacyanoferrate(III).

Effect of reaction time: According to reaction mechanism shown in **Figure 1**, formaldehyde reacts with phenylhydrazine in first step and the intermediate then react with potassium hexacyanoferrate(III) in second step. The effect of reaction time of each step is approved and the results can be shown in **Figure 6**. Effect of reaction time for the first step is tested by varying time after formaldehyde is applied on reagent spot or before potassium hexacyanoferrate(III) is dropped. **Figure 6 (a)** depicts ED as a function of reaction time. The ED response increases as reaction time increases from 3 mins to 5 mins and becomes the rather constant after 5 mins. The reaction time of first step may be taken at least in 5 mins for reaction between formaldehyde and phenylhydrazine and the optimum time is chosen at 7 mins. The time after dropping of potassium hexacyanoferrate(III) is recorded for effect of reaction time for the second step and the result is illustrated in **Figure 6 (b).** The ED is believed to increase with increasing reaction time until 30 mins. The ED becomes rather constant after 30 mins so the optimum time for recording color of tested spot can be done after 30 mins.

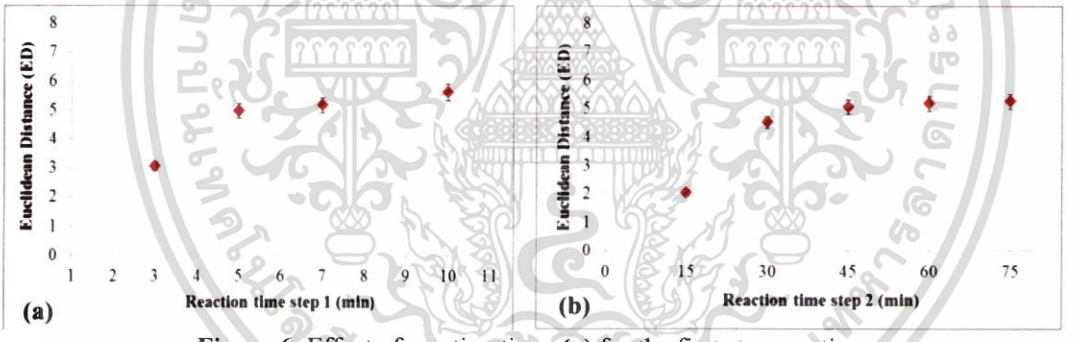


Figure 6. Effect of reaction time. **(a)** for the first step reaction. **(b)** for the second step of reaction.

Calibration curve: The optimum condition of developed method, sol-gel based paper test kit for determination of formaldehyde in pickled squid, can be summarized in **Table 1**. The calibration curve plotted between ED and concentration of formaldehyde can be illustrated in **Figure 7**. The linear equation, ED = 1.0041 [HCHO] -0.4007, is demonstrated for formaldehyde in range of 1.0-10.0 mg L^{-1} with r^2 = 0.999. The limit of detection (LOD, 3sd/slope) and limit of quantitation (LOQ, 10sd/slope) are 0.40 and 1.34 mg L^{-1}, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1. The optimum condition of developed method.

Parameters	Condition
Concentration of solution	
- Phenylhydrazine in ethanol	0.069 mol L^{-1}
- Potassium hezacyanoferrate(III)	0.030 mol L^{-1}
- Hydrochloric acid	4.0 mol L^{-1}
Sol-gel solution	
- TEOS : Hydrochloric acid : Phenylhydrazine	2 : 1 : 2 (by volume)
Volume of sol-gel solution dropped on paper	10.0 µL
Volume of standard or sample solution	10.0 µL
Volume of potassium hezacyanoferrate(III) solution	5.0 µL
Reaction time for first step	7 mins
Reaction time for second step	> 30 mins

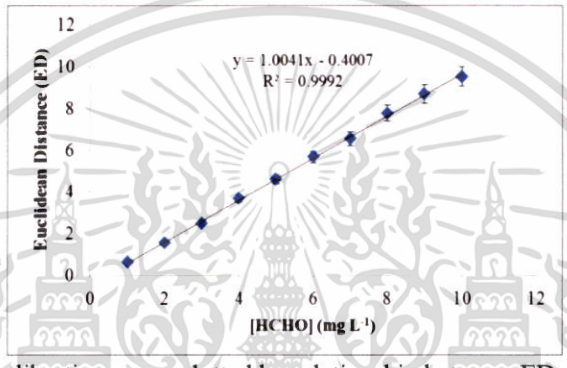


Figure 7. The calibration curve plotted by relationship between ED response (n = 3) and concentration of formaldehyde.

Application for analysis of formaldehyde in samples: The pickled squid is usually used as an ingredient in Thai pink noodle soup (Yen Ta Fo noodle soup). The developed method, sol-gel based paper test kit, has been applied for determination of formaldehyde in pickled squid and the results are shown in **Table 2**. The accuracy has also been proved and the results can be illustrated in **Table 3**. The recovery in range of 99-104% is reported.

Table 2. Determination of formaldehyde in samples.

Sample No.	Concentration of formaldehyde (mg kg^{-1})
1	ND*
2	2.12 ± 0.01
3	3.02 ± 0.02
4	ND*

*Not detected.

Table 3. The recovery.

Sample	Concentration of formaldehyde (mg kg^{-1})		Recovery (%)
	Added	Found	
No. 2	0	2.12±0.01	-
	1.0	3.14±0.01	102±0.02
	3.0	5.23±0.16	104±0.02
	5.0	7.05±0.11	99±0.03
	7.0	9.16±0.01	100±0.01

Conclusion: The method of sol-gel based paper test kit for detection of formaldehyde in pickled squid has been developed. The network of silica sol-gel can be utilized for trapping phenylhydrazine and

© The 43rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT 43)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

chemical products in its porous matrix. The pink-red color of tested spot can vary with concentration of formaldehyde. The advantages of this developed method are easy to use, less consumption of reagent, fast analysis and low cost. This method is also applied for determination of formaldehyde in pickled squid samples and the recovery in range of 99-104% can be obtained.

References:

1. WHO Regional Office for Europe Copenhagen, Netherlands, 2000, Air Quality Guidelines-Second Edition, Chapter 5.8;1-25.
2. S. Ratanakorn, Thailand, 1979, Food Regulations and Enforcement in Thailand,available in https://www.amchamthailand.com/asp/view_doc.asp?DocCID=5318:137-138, accessed in June 29, 2017.
3. K. P. Shrivastaw and S. Singh, A New Method for Spectrophotometric Determination of Formaldehyde in Biologicals, Biologicah, 1995, 23; 47-53.
4. J. Chrastil and R. M. Reinhardt, Direct colorimetric determination of formaldehyde in textile fabrics and other materials, Anal. Chem., 1986, *58* (13) ; 2848–2850.
5. S.T. Girousi, E.E. Golia, A.N. Voulgaropoulos and A. J. Maroulis. 1997. Fluorometric Determination of Formaldehyde. Fresenius. J. Anal. Chem ; 358:667-668.
6. P. Wahed , Md.A. Razzaq, S. Dharmapuri, M. Corrales, Food Chemistry , 2016; 476–483.
7. M. Dalene, P. Persson, S. Gunnar, Determination of Formaldehyde in Air by Chemisorptions on Glass Filters Impregnated with 2,4-dinitrophenylhydrazine using Gas Chromatography with Thermionic Specific Detection. J. of Chromatography A,1992, 626(2); 284-288.
8. N. Ramdzan, G.S. Almeida, M. J. McCullough, S.D.Kolev, Development of A Microfluidic Paper-based Analytical Device for The Determination of Salivary Aldehydes, Analytica Chimica Acta, 2016; 47-54
9. M. Tanenbaum and C. E. Bricker, Microdetermination of Free Formaldehyde, February, 1951; 354-357.
10. T. Suwanaruang, Formalin Contamination in Fruits and Vegetables at Kalasin Fresh Market, Thailand, 2015; 370-373.
11. Quality control of organic official, Methodical Instruction for Students of The 3rd Course, available in https://goo.gl/images/BJXDTv, accessed in July 07, 2017.
12. B.D. MacCraith, C.M. McDonagh, G.O'Keeffe, E.T. Keyes, J.G. Vos, B. O'Kelly, J.F. McGilp, Fibre Optic Oxygen Sensor Based on Fluorescence Quenching of Evanescent-Wave Excited Ruthenium Complexes in Sol Gel-Derived Porous Glass Coating, Analyst, 1993, 118; 385-388.
13. David Gerard O'Keeffe B.Sc. (Hons), Development of Fibre Optic Evanescent-Wave Fluorescence-Based Sensors, March 1995; 11-14.
14. S.D hanya, J.Joy, Talasila P.Rao, Fabrication and Characterization of Rhodamine 6G Entrapped Sol-gel Film Test Strip for Virtually Specific and Sensitive Sensing of Nitrite, Sensors and Actuators B: Chemical, 2012 , Volume 173; 510-516.
15. P.C.A. Jerónimo, A.N. Araújo , M.Conceição, B.S.M.Montenegro, Colorimetric Bismuth Determination in Pharmaceuticals using A Xylenol Orange Sol–gel Sensor Coupled to A Multicommutated Flow System, Analytica Chimica Acta, 2004, Volume 504 ; 235-241.
16. L. Feng, Y. Zhang, L. Wen, Z. Shen, Y. Guan, Colorimetric Determination of Copper(II) ions by Filtration on Sol-gel Membrane Doped with Diphenylcarbazide, Talanta, 2011, 84 ; 913-917.
17. W. Praditweangkum, K. Hengcharounsuk, S. Namhongsa and A. Keadlap, Proceedings of The Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON), 2017 ; 174-179.
18. O. Bunkoed, F. Davisc, P. Kanatharana, P. Thavarungkul, S.P.J. Higsonc, Sol–gel Based Sensor for Selective Formaldehyde Determination, Analytica Chimica Acta, 2010; 251–257.
19. Department of Medical Sciences, Standard Methods for Food Analysis, Volume II, September 2014; 81-85.
20. Image J, available in https://imagej.net/Welcome, accessed in May 01, 2017.
21. Government Pharmaceutical Organization (GPO), 2536 , available in www.gccthai.com/pdf/Formalin%20in%20Food.pdf, accessed in May 03, 2017.

© The 43rd Congress on Science and Technology of Thailand (STT 43)
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวสุกัญญา ศิริมาก
วัน เดือน ปีเกิด	20 สิงหาคม 2535
ที่อยู่ปัจจุบัน	100 ซอยหมู่บ้านลพบุรีวิลล์ แยก 7 ตำบลเขาสามยอด อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี 1500
ประวัติการศึกษา	(2558) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี เกรดเฉลี่ย 2.53 มหาวิทยาลัยนเรศวร
	(2561) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี เกรดเฉลี่ย 3.75 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผลงานทางวิชาการ	S. Sirimak, W. Praditweangkum. Paper-based devices for analysis Of formaldehyde in pickled squid. The 43th Congress on Science and Technology of Thailand (STT43), 2017 ; 364-370.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้