



การวิเคราะห์หมึกสีน้ำเงินจากปากกาลูกลื่นด้วยเทคนิคทินเลเยอร์โครมาโตกราฟี
และการวิเคราะห์ภาพ

โดย
นางสาวมยุรี สมบูรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การวิเคราะห์หมึกสีน้ำเงินจากปากกาถูกลิ้นด้วยเทคนิคทินเลเยอร์โครมาโตกราฟี
และการวิเคราะห์ภาพ

โดย
นางสาวมยุรี สมบูรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร
ปีการศึกษา 2552
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**ANALYSIS OF BLUE INKS FROM BALLPOINT PENS BY THIN LAYER
CHROMATOGRAPHY AND IMAGE ANALYSIS**

**By
Mayuree Somboon**

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree
MASTER OF SCIENCE
Program of Forensic Science
Graduate School
SILPAKORN UNIVERSITY
2009**

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การวิเคราะห์หมึกสีน้ำเงินจากปากกาลูกลื่นด้วยเทคนิคทึนเลเซอร์โครมาโตกราฟี และการวิเคราะห์ภาพ ” เสนอโดย นางสาวมยุรี สมบูรณ์ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะตั้งกูร)
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.ศุภชัย สุภลักษณ์นารี
2. อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ พันตำรวจเอกสันต์ สุขวิจน์)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์อรทัย เขียวพุ่ม)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศุภชัย สุภลักษณ์นารี)
...../...../.....

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง)
...../...../.....

49312361 : สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

คำสำคัญ : ทินเลเยอร์โครมาโตกราฟี/ปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน

มยุรี สมบูรณ์ : การวิเคราะห์หมึกสีน้ำเงินจากปากกาถูกลิ้นด้วยเทคนิคทินเลเยอร์โครมาโตกราฟี และการวิเคราะห์ภาพ. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี และ อ.ดร.ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง. 77 หน้า.

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยในครั้งนี้คือ เพื่อทำการวิเคราะห์หมึกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินบนกระดาษ ด้วยเทคนิค thin-layer chromatography (TLC) ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ TLC chromatogram ผลของการวิเคราะห์ที่ได้จะนำมาใช้เพื่อประเมินความเหมือนหรือความแตกต่างของหมึกปากกาที่ใช้เขียนบนกระดาษ การวิจัยในครั้งนี้ได้นำตัวอย่างปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินทั้งหมด 28 ยี่ห้อมาเขียนและระบายลงบนกระดาษ ผลจากการศึกษาตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดหมึกออกจากกระดาษพบว่าตัวทำละลายที่ดีที่สุดคือ methanol และเฟสเคลื่อนที่ที่เหมาะสมคือระบบตัวทำละลาย *n*-butanol / ethanol / H₂O (50:15:10, v/v/v) แผ่น TLC chromatogram ที่ได้จะนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์ที่ใช้ในสำนักงาน (300 dpi) และบันทึกเป็นแฟ้มประเภท bitmap (bmp) จากนั้นนำไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ซึ่งโปรแกรมจะอ่านและเปรียบเทียบค่าความเข้มของ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB) บนภาพ TLC ผลจากการวิเคราะห์ภาพบนแผ่น TLC เดียวกันที่เตรียมโดยการเขียนและการระบายของปากกาแห่งเดียวกันจำนวน 15 ยี่ห้อ พบว่าสามารถแยกได้ถูกต้อง 70.4% และ 61.5% ตามลำดับ แต่เมื่อนำหมึกของปากกาแห่งเดียวกันจำนวน 5 ยี่ห้อ มาวิเคราะห์บนแผ่น TLC ต่างแผ่นกัน ผลที่ได้มีความถูกต้องเพียง 18.5% และ 6.7% จากการเขียนและการระบายตามลำดับ และเมื่อนำปากกาจำนวน 25 ยี่ห้อมาเขียนและระบายบนกระดาษ เพื่อวิเคราะห์แยกชนิดของปากกาพบว่าสามารถแยกความแตกต่างได้ 36.0% และ 2.0% ตามลำดับ ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นความเป็นไปได้ในการใช้วิธี TLC ร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ เพื่อตรวจพิสูจน์เอกสารทางนิติวิทยาศาสตร์

สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

49312361 : MAJOR : FORENSIC SCIENCE

KEY WORDS : THIN-LAYER CHROMATOGRAPHY/BALLPOINT PEN INKS

MAYUREE SOMBOON : ANALYSIS OF BLUE INKS FROM BALLPOINT PENS BY THIN LAYER CHROMATOGRAPHY AND IMAGE ANALYSIS. THESIS ADVISORS : SUPACHAI SUPALUKNARI, Ph.D. SIRIRAT CHOOSAKOONKRIANG, Ph.D. 77 pp.

The aim of this work is to analyse blue ballpoint pen inks on documents by the technique of thin-layer chromatography (TLC) coupled with an image analysis of the chromatogram. The results were then used to evaluate the similarity and difference of the inks used. Twenty-eight blue ballpoint pens of different brands were selected for this study. The most suitable solvent used for the extraction of ink was methanol. The dissolved ink solution was then analysed by TLC using a solvent system of *n*-butanol / ethanol / H₂O (50:15:10, v/v/v) as a mobile phase. The chromatogram of the ink was digitized by using an ordinary office scanner (300 dpi) and the image was saved as a bitmap (bmp) file. The red, green and blue (RGB) profiles of the image were processed and used to distinguish the ink by a computer software. For fifteen pens of different brands, when the inks were analysed on the same TLC plate, 70.4 % of the chromatogram images obtained from the written entries can be correctly identified as similar while 61.5 % of the images from painted entries was evaluated correctly as those from the same pen. However, when the inks were applied on different TLC plates, for a selected set of 5 pens, only 18.5% and 6.7% of the images can be correctly identified as the image from the same pen in written and painted formats respectively. In the differentiation study of 25 brands of pens, the method can differentiate the inks correctly with the percentages of 36.0% and 2.0% for the written and painted documents respectively. The result from the present work demonstrates the feasibility of the TLC and color image analysis technique in forensic examination of documents.

Program of Forensic Science Graduate School, Silpakorn University Academic Year 2009

Student's signature

Thesis Advisors' signature 1. 2.

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การวิเคราะห์หมึกสีน้ำเงินจากปากกาลูกลื่นด้วยเทคนิค
ทินเลเยอร์โครมาโตกราฟีและการวิเคราะห์ภาพ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะได้รับความร่วมมือ
และช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านที่ได้สละเวลาให้คำแนะนำ ข้อคิดและความรู้ต่างๆ อันเป็น
ประโยชน์ต่อการทำวิจัยเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ศุภชัย ศุภลักษณ์นารี และอาจารย์ ดร. ศิริรัตน์ ชูสกุลเกรียง
ที่ได้กรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ทำให้
วิทยานิพนธ์นี้มีถูกต้องสมบูรณ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ นางสาวกาญจนา ทองเชื้อ ที่ช่วยเหลือในการเตรียมตัวอย่าง

ขอขอบคุณและขอใจ พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำและ
ประสานงาน ในส่วนต่างๆ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จไปด้วยดี

ท้ายที่สุดนี้ กราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้คอยให้กำลังใจ และให้ทุกสิ่งทุกอย่างกับ

ผู้วิจัย

ผู้วิจัยจึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้ด้วย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
สมมติฐานของการศึกษา.....	2
ขอบเขตการศึกษา.....	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
ส่วนประกอบของหมึกปากกาลูกลื่น	3
หลักการของทินเลเยอร์โครมาโตกราฟี	8
รูปร่างของภาพและมาตรฐานของสี.....	10
สัมประสิทธิ์การกำหนด	10
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	13
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	15
เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	15
วิธีการทดลอง	17

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัยและการอภิปรายผล	26
การศึกษาตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดหมีออกจากกระดาศ	26
การศึกษาเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ทำ TLC	29
การหาปริมาณ methanol ที่เหมาะสมในการสกัดหมีก	31
การทำ TLC ของตัวอย่างปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน 28 ตัวอย่าง	34
การเปรียบเทียบภาพ TLC ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ	36
5 สรุปผลการวิจัย.....	44
ข้อเสนอแนะ	46
 บรรณานุกรม	 47
 ภาคผนวก	 46
ภาคผนวก ก สัญลักษณ์	48
ภาคผนวก ข TLC chromatogram	52
ภาคผนวก ค การคำนวณ score การเปรียบเทียบตัวอย่าง	65
ภาคผนวก ง แสดง score การเปรียบเทียบตัวอย่างปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน.....	76
 ประวัติผู้วิจัย	 77

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	พารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลาย.....	5
2	ตัวอย่าง dye และ pigment ที่ใช้ในปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน	7
3	เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	15
4	สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	16
5	ปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินที่นำมาศึกษา.....	18
6	ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดหมึกปากกาออกจากกระดาษ	19
7	เฟสเคลื่อนที่ 5 ระบบที่ใช้ในการศึกษา	21
8	ความสามารถในการละลายของตัวทำละลายที่ใช้สกัดหมึกบนกระดาษ.....	27
9	ผลการศึกษาเฟสเคลื่อนที่ 5 ระบบ ที่ใช้ในการทำ TLC	29
10	ผลการหาปริมาณ methanol ที่ใช้สกัดตัวอย่างจากการเขียน	32
11	ผลการหาปริมาณ methanol ที่ใช้สกัดตัวอย่างจากการระบาย.....	34
12	เกณฑ์สำหรับใช้พิจารณาความเหมือนและความแตกต่างของหมึกปากกา.....	40
13	ผลการเปรียบเทียบภาพที่อยู่บนแผ่น TLC แผ่นเดียวกัน	41
14	ผลการเปรียบเทียบภาพที่อยู่บนแผ่น TLC ต่างแผ่นกัน.....	42
15	ผลการเปรียบเทียบปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน 25 ยี่ห้อ.....	43
16	ผลการวิเคราะห์หมึกปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินที่เขียนและระบายบนกระดาษ.....	45

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	แผนภูมิแสดงการเตรียมตัวอย่างปากกาลูกลิ้นสีน้ำเงิน	17
2	แผนภูมิแสดงการศึกษาตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดหิมิกออกจากกระดาษ	20
3	แผนภูมิการศึกษาเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ทำ TLC	22
4	แผนภูมิการศึกษาปริมาณสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดหิมิก	23
5	แผนภูมิการทำ TLC ของตัวอย่างปากกาลูกลิ้นสีน้ำเงิน 28 ตัวอย่าง.....	24
6	TLC chromatogram ของตัวอย่าง S1-S5 ที่สกัดด้วย ethyl acetate, <i>n</i> – butanol, pyridine และ methanol	28
7	TLC chromatogram ของตัวอย่าง S1-S5 ที่ใช้เฟสเคลื่อนที่ทั้ง 5 ระบบ.....	30
8	TLC chromatogram ของตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนซึ่งสกัดด้วย methanol ปริมาณ 10, 15, 20, 25 และ 30 μ l ต่อตัวอย่าง 1 ชิ้น	31
9	TLC chromatogram ของตัวอย่างที่เตรียมจากการระบายซึ่งสกัดด้วย methanol ปริมาณ 50, 100, 150, 200 และ 250 μ l ต่อตัวอย่าง 1 ชิ้น	33
10	TLC chromatogram ของตัวอย่าง SW1-SW5.....	35
11	TLC chromatogram ของตัวอย่าง S1-S5	35
12	ตัวอย่าง TLC chromatogram ที่นำมาตัดด้วยโปรแกรม microsoft office picture manager	36
13	กราฟการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม แสดงผลเป็น RGB	37
14	กราฟความสัมพันธ์สีแดง (R, red) แสดง R_r^2 ของตัวอย่าง SW22-2-II และSW23-2-II	38
15	กราฟความสัมพันธ์สีเขียว (G, green) แสดง G_r^2 ของตัวอย่าง SW22-2-II และSW23-2-II	38
16	กราฟความสัมพันธ์สีน้ำเงิน (B, blue) แสดง B_r^2 ของตัวอย่าง SW22-2-II และSW23-2-II	39

บทที่ 1

บทนำ

1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การวิเคราะห์หมึกปากกาถูกลิ้น เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อกระบวนการทางนิติวิทยาศาสตร์ ซึ่งเมื่อมีการเขียนปากกาถูกลิ้นลงบนเอกสารใดๆ แล้ว สีของหมึกปากกาถูกลิ้นที่ปรากฏบนเอกสารจะไม่สามารถบอกรายละเอียดของปากกาถูกลิ้นนั้นได้ เช่น ชนิดของปากกา หรือระยะเวลาในที่เขียน เป็นต้น โดยทั่วไปได้มีการศึกษาเกี่ยวกับชนิดของน้ำหมึกที่เขียนเอกสารด้วยสองเหตุผลหลักๆ ดังนี้

1.1 เพื่อเปรียบเทียบหมึกปากกาที่ใช้ในการเขียนลงบนเอกสารในชุดเดียวกัน หรือสองชุดขึ้นไปว่าเป็นปากกาชนิดเดียวกันหรือไม่ เช่น ทำการตรวจสอบว่า เช็ค ไบเสรีร์รับเงิน พันยกรรม หรือใบบัญชีต่างๆ ได้ถูกเปลี่ยนหรือแก้ไขเพิ่มเติมรายละเอียดลงไปหรือไม่

1.2 เพื่อระบุถึงอายุของหมึกปากกาที่ใช้เขียนในเอกสารที่เกิดการสงสัยว่าการเขียนครั้งนั้นเกิดขึ้นเมื่อไร เช่น ใบสั่งแพทย์ พันยกรรม และเอกสารภาษีรายได้ เป็นต้น

น้ำหมึกปากกาถูกลิ้นมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ สารตัวนำ (vehicle) เป็นสารที่เติมลงในน้ำหมึกเพื่อการละลาย หรือการพา สีย้อมหรือ เม็ดสี รวมไปถึงความคล่องตัวในการไหลของถูกลิ้น สารสี (dyes and pigment) เป็นส่วนประกอบที่ให้สีกับน้ำหมึก บางครั้งมักจะใช้มากกว่า 1 ชนิด เช่น ในสูตรของน้ำหมึกสีน้ำเงินจะมีองค์ประกอบของ copper phthalocyanine, nigrosin, solvent fast blue และ luxol fast orange เป็นต้น เรซิน (resin) เป็นสิ่งที่เติมเข้าไปในน้ำหมึกถูกลิ้น เพื่อเติมเต็ม (extending or Filler) และเพื่อปรับในเรื่องความหนืดของน้ำหมึก เป็นต้น (อรอุยา, 2542) สำหรับส่วนประกอบที่อยู่ในน้ำหมึกนั้น ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งานตามแต่คุณสมบัติที่ผู้ผลิตแต่ละรายต้องการ เช่น ความเหนียวหนืด ลักษณะการแห้งตัว สี การไหล การทนความร้อน การทนแสง หรือการทนน้ำ เป็นต้น ซึ่งผู้ผลิตแต่ละรายก็จะมีสูตรน้ำหมึกไม่เหมือนกัน ในส่วนนี้จะ เป็นประโยชน์มากที่จะนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างกันของน้ำหมึกได้

การแยกส่วนประกอบของน้ำหมึกมีวิธีการวิเคราะห์ที่หลากหลาย เช่น Thin-Layer Chromatography, TLC (Djavanshir,2008) ; High-Performance Liquid Chromatography, HPLC (Ashwini, 2006) ; UV - VIS spectrophotometers (Craig D, 2008) ; Infrared spectroscopy, IR

(Xiang-feng, 2008) และ Fourier Transform Infrared microscopy, FT-IR (Wenxuan He, 2002) เป็นต้น

สำหรับในงานวิจัยนี้จะใช้เทคนิค thin-layer Chromatography (TLC) ซึ่งจะแยกหมึกออกเป็นแถบๆ แยกออกเป็นสีต่างๆ โดยหมึกแต่ละชนิดจะแยกกันตามส่วนประกอบที่มีในน้ำหมึก นอกจากนี้ยังใช้โปรแกรมที่ออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์ความเข้มข้นของหมึกแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน วิธีการ TLC เป็นวิธีการตรวจพิสูจน์เบื้องต้นที่มีประสิทธิภาพ เป็นวิธีที่ใช้อย่างกว้างขวาง เพราะทำได้สะดวก รวดเร็ว ราคาถูก และใช้ตัวอย่างที่นำมาวิเคราะห์ในปริมาณน้อย ผลการทดลองที่ได้เรียกว่า chromatogram การศึกษาในครั้งนี้ได้นำหมึกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินที่เขียนลงบนเอกสารมากกว่าสองชนิดมาเปรียบเทียบกัน เพื่อตรวจสอบว่าหมึกที่ใช้เหล่านั้นเหมือนกันหรือแตกต่างกัน ในขั้นตอนการเปรียบเทียบได้นำภาพสแกนของ TLC chromatogram ที่สแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์ที่มีใช้ทั่วไปตามสำนักงาน มาวิเคราะห์ความเหมือนความแตกต่างด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพ โดยโปรแกรมจะวิเคราะห์ความเหมือนและความแตกต่างของความเข้ม สีแดง (R,red) สีเขียว (G,green) และสีน้ำเงิน (B,blue) ตลอดจนการเปรียบเทียบตำแหน่งของสีบนภาพ chromatogram ซึ่งจะเป็นวิธีที่ใช้ยืนยันความเหมือนหรือความแตกต่างของหมึกปากกา ได้ทั้งตำแหน่งและความเข้มสี ทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากขึ้น นอกจากนี้ยังเป็นการพัฒนาวิธีการตรวจสอบชนิดของหมึกปากกาถูกลิ้นได้อีกด้วย

2. วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 2.1 เพื่อเปรียบเทียบหมึกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินแต่ละชนิดที่เขียนหรือระบายบนเอกสาร
- 2.2 เพื่อพัฒนาการวิเคราะห์หมึกปากกาถูกลิ้น โดยเทคนิค thin-layer chromatography

3. สมมติฐานของการศึกษา

ปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินที่ต่างยี่ห้อกันจะมีความแตกต่างกันของอัตราส่วน และชนิดของสารอินทรีย์ที่เป็นส่วนประกอบในน้ำหมึก ซึ่งจะสามารถเปรียบเทียบความแตกต่างของหมึกปากกาหลายยี่ห้อได้โดย เทคนิค thin-layer chromatography และการวิเคราะห์ภาพ TLC ด้วยโปรแกรมได้

4. ขอบเขตการศึกษา

วิเคราะห์เปรียบเทียบหมึกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินที่ใช้เขียนและระบายบนกระดาษ ซึ่งหมึกปากกาที่นำมาทดสอบเป็นหมึกปากกาที่นิยมใช้และมีขายทั่วไปในท้องตลาดประเทศไทย

5. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

วิเคราะห์เปรียบเทียบความเหมือนความแตกต่างของหมึกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน ได้อย่างง่ายๆ โดยวิธี thin-layer chromatography ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในทางนิติวิทยาศาสตร์ได้

บทที่ 2

วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

1. ส่วนประกอบของหมึกปากกาถูกลื่น

ส่วนประกอบของหมึกปากกาถูกลื่นแต่ละชนิดจะมีส่วนประกอบใดบ้าง ขึ้นอยู่กับผู้ผลิตว่าต้องการต้องการให้หมึกปากกามีคุณสมบัติแบบใด เช่น ความเหนียวหนืด ลักษณะการแห้งตัว สี การไหล การทนความร้อน การทนแสง หรือการทนน้ำ เป็นต้น หมึกปากกาถูกลื่นโดยทั่วไปประกอบไปด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน 4 อย่างคือ สารตัวนำ (vehicle) สารสี (dye and pigment) เรซิน (resin) และสารเติมแต่ง (additive)

1.1 สารตัวนำ (vehicle)

vehicle ที่เติมลงในน้ำหมึกมีหน้าที่ในการละลาย หรือ การพาสารสี รวมไปถึงควบคุมความคล่องตัวในการไหลของหมึกปากกาถูกลื่น ในส่วนของ vehicle นั้นได้มีการปรับเปลี่ยนสูตรมาตั้งแต่ ปี 1930 ซึ่งในช่วงก่อนปี 1950 vehicle ที่ใช้จะเป็นหมึกเป็นฐานน้ำมัน เช่น น้ำมันลินสีด น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันแร่ หรือ ชนิดอื่นๆ ส่วนในช่วงหลังจากปี 1950 ได้พัฒนาเป็นน้ำหมึกฐาน glycol จนกลายเป็นที่นิยมของประชาชนอย่างรวดเร็ว หมึกปากกาถูกลื่นมักจะบรรจุด้วยตัวทำละลายที่เป็น vehicle ในสูตร 1 ชนิดขึ้นไป ตัวทำละลายจะเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในน้ำหมึกประมาณ 50 % ของส่วนประกอบทั้งหมด ตัวทำละลายที่ใช้ในหมึกปากกาถูกลื่น เช่น

- 1) 1,3 propylene glycol
- 2) hexylene glycol
- 3) diethyl glycol phenyl ether
- 4) octylene glycol
- 5) benzyl alcohol
- 6) 1,3 butylene glycol
- 7) 2 ethyl hexoic acid
- 8) di and triethylene glycol
- 9) ethylene glycol
- 10) dipropylene glycol

- 11) 2,3-butylene glycol
- 12) glycerine
- 13) monophenylether
- 14) phenoxyethanol
- 15) 1,2-propylene glycol
- 16) phenoxyethylene glycol
- 17) ethylene and diethylene glycol
- 18) monomethyl ether (กฤษณา, 2005)

สำหรับการละลายของพอลิเมอร์ (polymer) หรือเรซิน (resin) ซึ่งจะสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่มีค่าพารามิเตอร์การละลาย ใกล้เคียงกับค่าพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์นั้นๆ ในการทำนายการละลายของพอลิเมอร์ต่างๆ ให้ได้ใกล้เคียงกับความจริงมากที่สุดจะต้องนำความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonded) ของตัวทำละลายเข้ามาพิจารณาด้วย โดยเบอร์เรล (burrell) ได้เป็นต้นคิดในเรื่องนี้ เขาได้แบ่งตัวทำละลายเป็น 3 กลุ่มตามความสามารถในที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจน ได้แก่

กลุ่มที่ 1 ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนต่ำ (poorly hydrogen bonded) ใช้ตัวย่อว่า $\sum p$ ได้แก่ ตัวทำละลายอะลิฟาติก (aliphatic) ตัวทำละลายอะโรมาติก (aromatic) ตัวทำละลายคลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน (chlorinated hydrocarbon) และไนโตรพารฟิน (nitroparaffin)

กลุ่มที่ 2 ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนปานกลาง (moderately hydrogen bonded) ใช้ตัวย่อว่า $\sum m$ ได้แก่ เอสเทอร์ (ester) อีเทอร์ (ether) และคีโตน (ketone)

กลุ่มที่ 3 ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจนสูง (strongly hydrogen bonded) ใช้ตัวย่อว่า $\sum s$ ได้แก่ แอลกอฮอล์ (alcohol) เอมีน (amine) และกรด (acid)

ซึ่งจะสามารถใช้พารามิเตอร์การละลายนี้ ทำนายการละลายของพอลิเมอร์ได้อย่างง่ายๆ กล่าวคือ ตัวทำละลายที่มีค่าพารามิเตอร์การอยู่ช่วงเดียวกับค่าพารามิเตอร์การละลายของพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ จะเป็นตัวทำละลายที่ดีในพอลิเมอร์นั้นๆ (อรอุษา, 2542) พารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลายต่างๆ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์การละลายของตัวทำละลาย

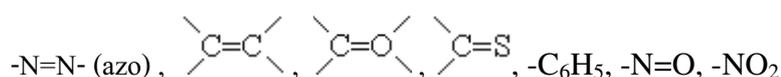
<i>Aliphatic hydrocarbons</i>	$\sum p$	<i>Esters</i>	$\sum m$
n-Hexane	7.3	Methyl acetate	9.6
n-Heptane	7.4	Ethyl acetate	9.1
n-Octane	7.6	Propyl acetate	8.8
White spirit, aromat		n-Butyl acetate	8.5
Content about 15%	7.5	Iso-butyl acetate	8.3
White spirit, odourless	6.9	n-Amyl acetate	8.5
VM & P naphtha	7.6	Methyl butyrate	8.9
Turpentine	8.1	Butyl butyrate	8.1
Cyclohexane	8.2	Di-butyl phthalate	9.4
		Ethylene carbonate	14.7
<i>Aromatic hydrocarbons</i>	$\sum p$	<i>Ketones</i>	$\sum m$
Benzene	9.2	Acetone	9.3
Toluene	8.9	Methyl ethyl	8.8
Xylene	8.8	Diethyl	8.4
Tetralin	9.5	Methyl isobutyl	9.2
		Diacetone alcohol	9.9
<i>Chlorinated hydrocarbons</i>	$\sum p$	Cyclohexanone	
Methylene chloride	9.7	<i>Ethylene glycol monoaldyl ethers</i>	$\sum m$
Chloroform	9.3	Methyl	10.8
Carbon tetrachloride	8.6	Ethyl	9.9
Trichlorethylene	9.3	Butyl	8.9
Chlorobenzene	9.5	<i>Alcohols</i>	$\sum s$
		Methanol	14.5
<i>Nitroparaffins</i>	$\sum p$	Ethanol	12.7
Nitromethane	12.7	n-Butanol	11.4
Nitroethane	11.1	sec-Butanol	10.8
Nitropropane	10.7	tert-Butanol	10.6
		n-Octanol	10.3
<i>Ethers</i>	$\sum p$	2-Ethylhexanol	9.5
Dimethyl	8.8	Ethylene glycol	14.2
Diethyl	7.4	glycerol	16.5
Dioxan	9.9	<i>Water</i>	23.4

1.3 สาระสี (dye and pigment)

สาระสีเป็นส่วนประกอบที่ให้สีกับน้ำหมึก ในหมึกปากกา 1 สูตร มักจะใช้สาระสีมากกว่า 1 ชนิด ตัวอย่างสาระสีในสูตรของหมึกปากกาถูกกลั่นสีน้ำเงิน เช่น copper phthalocyanine, nigrosi, solvent fast blue และ luxol fast Orange เป็นต้น ในส่วนประกอบของน้ำหมึกจะประกอบไปด้วย dyes หรือ pigment ประมาณ 25% (กฤษณา, 2005)

การเกิดสีของสาระสีเกิดได้จาก การที่สารประกอบอินทรีย์ต่างๆ มีโมเลกุลที่ไม่อ้อมตัวที่เหมาะสมที่เรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophore) โมเลกุลที่มี chromophore จะมีสีเข้มหรือเปลี่ยนไปในทางที่เข้มยิ่งขึ้น หากมีผู้ช่วยเร่งสีที่เรียกว่า ออกโซโครม (auxochromes) อยู่ด้วยในโมเลกุล

ตัวอย่างของ chromophore ได้แก่

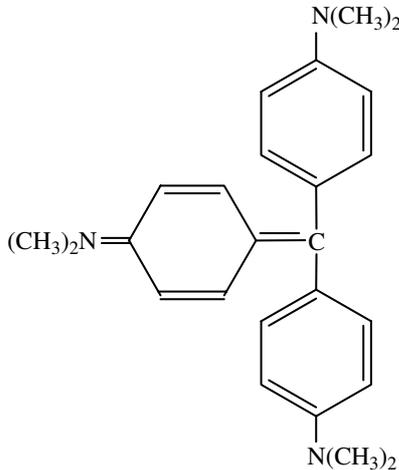
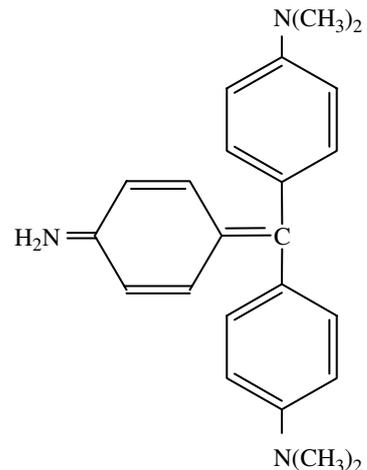
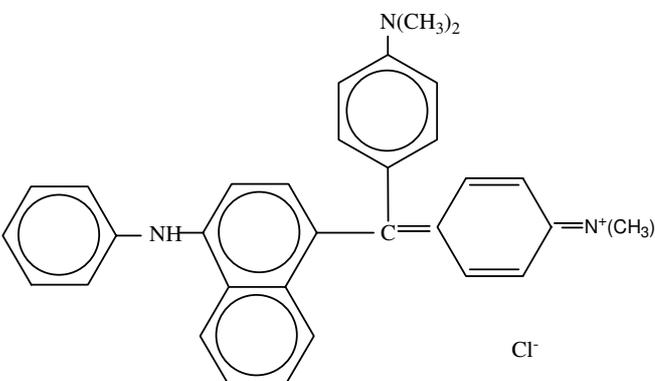


ตัวอย่างของ auxochromes ได้แก่ $-\text{OH}, -\text{NH}_2, -\text{NHR}, -\text{NO}_2$

สำหรับสารที่โมเลกุลประกอบด้วย chromophore แต่ไม่มี auxochromes เรียกว่า โครโมเจน (chromogen)

ปัจจุบันนี้ ทฤษฎีโรโซแนนซ์ (resonance) อธิบายได้ว่า chromophore จะมีส่วนในการดูดแสงที่มีความยาวคลื่นบางช่วง และปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นบางช่วงของ spectrum ที่มองเห็นได้ เราจึงเห็นสีตามสีของแสงที่สะท้อนเข้าตา นอกจากนี้ยังพบอีกว่า กรุปที่ต่อกับหมู่อะโรมาติก (aromatic) จะมีผลทำให้สาระสีมีสีเป็นเฉดต่างๆ กัน เช่น ครอรีน (chlorine) จะทำให้สีไปทางเขียวใบไม้ และ $-\text{NO}_2$ จะทำให้สีไปทางเหลือง คลอรีน และหมู่เมทอกซี จะช่วยให้ผงสีทนต่อแสงยิ่งขึ้น และถ้าแทนที่ $-\text{OH}$ ในสาระสีเหลืองด้วย $-\text{NH}_2$ จะทำให้สีเปลี่ยนไปทางส้ม แต่ถ้า $-\text{NH}_2$ ถูกแทนที่ด้วย $-\text{N}(\text{CH}_3)_2$ สีจะเปลี่ยนไปทางแดง ตัวอย่างของสาระสีที่ใช้ในหมึกปากกาถูกกลั่นสีน้ำเงิน ดังตารางที่ 2 (อรอุษา, 2542)

ตารางที่ 2 ตัวอย่าง dye และ pigment ที่ใช้ในปากกาลูกคลื่นสีน้ำเงิน (กฤษณา, 2005)

ชื่อสามัญ	สูตรโครงสร้าง	สี	สูตรเคมี
Crystal violet		Blue violet	$C_{25}H_{30}N_3Cl$
Methyl violet		Violet-blue	$C_{23}H_{26}N_3Cl$
Victoria blue	 Cl ⁻	Blue	$C_{33}H_{32}N_3Cl$

1.3 เรซิน (resin)

เรซิน (resin) เป็นสิ่งที่เพิ่มเข้าไปในน้ำหมึกกลูกลิ่น เพื่อเติมเต็ม (extending or filler) และเพื่อปรับในเรื่องความหนืดของน้ำหมึก ในน้ำหมึกจะมีส่วนประกอบของ resins ประมาณ 20% ตัวอย่างของ resins บางตัวที่พบในหมึกปากกากลูกลิ่น เช่น

- Vinsol
- Nevillac Hard
- Pyrrolisone, PVP
- Krumbhaar K-1717
- Phthalopal SEB
- Synthetic Resin SK [8]

1.4 สารเติมแต่ง (additive)

สารเติมแต่งจะอยู่ในสูตรหมึกปากกาประมาณ 5 % สารเติมแต่ง คือสารที่เติมแต่งลงไปเพื่อปรับปรุงสมบัติของน้ำหมึก ให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้นๆ สารเติมแต่งทำหน้าที่แก้ไขคุณสมบัติที่บกพร่องของเรซินที่ใช้ในการผลิตน้ำหมึกในระหว่างกระบวนการผลิต รวมทั้งช่วยป้องกันการเกิดปัญหาต่างๆ ของน้ำหมึกที่อาจจะเกิดขึ้นได้ หน้าที่ของสารเติมแต่ง เช่น สารเร่งแห้ง หรือ สารป้องกันการจับตัวเป็นก้อนของสารสี เป็นต้น

2. หลักการของทินเลเยอร์โครมาโตกราฟี (thin-layer chromatography, TLC)

TLC เป็นเทคนิคที่เกี่ยวข้องกับการกระจายตัวของสาร ระหว่างเฟสคงที่ (stationary phase) ซึ่งเป็นตัวดูดซับที่เคลือบอยู่บนแผ่นแก้วหรือแผ่นพลาสติกแข็ง และตัวทำละลายซึ่งเป็นเฟสเคลื่อนที่ (mobile phase) ที่เคลื่อนที่ผ่านตัวดูดซับ TLC จึงจัดเป็น solid-liquid adsorption chromatography เช่นเดียวกับ column chromatography แต่เดิม TLC ใช้วิเคราะห์เชิงคุณภาพสำหรับสารประกอบอินทรีย์ที่มีปริมาณน้อยเพื่อหาจำนวนสารที่อยู่ในสารผสม และใช้พิสูจน์สารโดยเปรียบเทียบ R_f ของสารกับสารแท้ (authentic sample) TLC ยังใช้สำหรับหาตัวทำละลายที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในการแยกสารผสมที่มีปริมาณมากโดยวิธี column chromatography

TLC เป็นแผ่นแก้วหรือแผ่นพลาสติกแข็ง (ขนาด 5 x 10 ซม² หรือ 5 x 20 ซม²) เคลือบด้วยตัวดูดซับเป็นชั้นบางๆ (หนาขนาด 0.25-0.3 มม.) ตัวดูดซับที่ใช้กับ TLC มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าที่ใช้ใน column chromatography ชนิดของตัวดูดซับที่ใช้ก็เช่นเดียวกับที่ใช้กับ column chromatography ได้แก่ silica gel alumina และ kieselguhr เป็นต้น ตัวดูดซับเหล่านี้มักมีสารเรืองแสงผสมอยู่เพื่อใช้ตรวจสอบตำแหน่งของสารโดยมอง ภายใต้แสง UV

2.1 การเลือกตัวทำละลายที่เหมาะสมในการแยกสารผสมโดยใช้แผ่น TLC

ตัวทำละลายที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นภาคเคลื่อนที่ อาจเป็นตัวทำละลายเดี่ยวหรือเป็นตัวทำละลายผสม การหาตัวทำละลายที่เหมาะสมควรทำอย่างมีระบบดังนี้ จุดสารตัวอย่างที่เป็น สารผสมลงบนแผ่น TLC หลายๆ แผ่น เลือกตัวทำละลายหลายๆ ระบบ เช่น ปิโตรเลียมอีเทอร์ เบนซีน อีเทอร์ และเมทานอล ตามลำดับ (ตัวทำละลายเรียงลำดับจากสภาพขั้วต่ำไปยังสภาพ ขั้วสูง) แล้ววางแผ่น TLC ที่จุดสารตัวอย่างแล้วลงในตัวทำละลายแต่ละชนิดๆ ละ 1 แผ่น หาค่า R_f ของแต่ละแผ่นในตัวทำละลายที่ต่างกัน เลือกตัวทำละลายที่สามารถให้ผลการแยกที่ชัดเจน

ค่า R_f เป็นค่าประจำตัวของสารประกอบภายใต้สภาวะต่างๆ (ตัวดูดซับ , ตัวทำละลาย และความหนาของชั้นตัวดูดซับ) ที่กำหนด ค่านี้แปรเปลี่ยนได้ถ้าสภาวะในการทดลองเปลี่ยน

ค่า R_f ถูกนิยามไว้ดังนี้ :

$$R_f = \frac{\text{ระยะที่สารตัวอย่างเคลื่อนที่}}{\text{ระยะที่ตัวทำละลายเคลื่อนที่}}$$

2.2 ประโยชน์ของ TLC

1. ใช้ในการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative analysis) โดยการเปรียบเทียบค่า R_f ของสารตัวอย่างกับสารแท้ (authentic sample) เพื่อพิสูจน์ว่าเป็นสารตัวเดียวกัน ในงานวิจัย เกี่ยวกับการสังเคราะห์สาร ถ้าต้องการพิสูจน์ว่า ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากปฏิกิริยาเป็นสารที่ต้องการหรือไม่ ให้หาสารตัวเดียวกันนี้ที่ได้จากปฏิกิริยาอื่นมาจุดบนแผ่น TLC เทียบกับสารที่เกิดจากปฏิกิริยา ก็จะทราบว่าปฏิกิริยาที่วางแผนไว้ได้ผลตามที่ต้องการหรือไม่ เป็นวิธีตรวจสอบผลขั้นต้นที่รวดเร็วกว่าวิธีอื่น

2. ใช้ตรวจสอบความก้าวหน้าของปฏิกิริยา โดยใช้วิธีการหาค่า R_f ของสารตั้งต้น และผลิตภัณฑ์ เมื่อเวลาผ่านไปสารตั้งต้นย่อมมีปริมาณน้อยลง ส่วนผลิตภัณฑ์ย่อมมีมากขึ้น เราสามารถใช้ TLC ตรวจสอบระยะเวลาที่ปฏิกิริยาเกิดจนเสร็จสิ้นสมบูรณ์

3. ใช้ตรวจสอบความบริสุทธิ์ของสารตัวอย่าง สารตัวอย่างที่บริสุทธิ์ยอมให้ จุดเพียงจุด เดียวบนแผ่น TLC ในทุกระบบตัวทำละลาย

4. ใช้หาตัวทำละลายที่เหมาะสมในการแยกสารผสมโดย column chromatography (มหาวิทยาลัยรามคำแหง [ออนไลน์], 2553)

3. รูปร่างของภาพและมาตรฐานของสี

การประมวลผลภาพดิจิทัลจะเกี่ยวกับการแปลงข้อมูลภาพให้อยู่ในรูปแบบข้อมูลดิจิทัลซึ่งสามารถที่จะนำเอาข้อมูลนี้จัดผ่านกระบวนการต่าง ๆ ด้วยดิจิทัลคอมพิวเตอร์ได้ ในระบบของดิจิทัล input และ output ของระบบจะอยู่ในรูปแบบดิจิทัลเท่านั้น Digital image analysis จะเกี่ยวกับวิธีการอธิบายและการจดจำ ข้อมูลภาพดิจิทัล ซึ่ง input ของระบบจะเป็นข้อมูลภาพดิจิทัลและเอาพุตจะเป็นเครื่องหมายที่ใช้แทนข้อมูลภาพดิจิทัลเหล่านั้น ในการวิเคราะห์ภาพมีอยู่หลายวิธีด้วยกันที่ได้นำมาจากการทำ งานของตามนุษย์ (human vision) นั่นก็คืองานทางด้าน computer vision เป็นลักษณะเดียวกับ digital image analysis นั่นเอง การมองเห็นของมนุษย์นับว่าเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งลักษณะเทคนิคโดยทั่ว ๆ ไปในกระบวนการ digital image analysis และ computer vision จะค่อนข้างซับซ้อนเช่นกัน

3.1 รูปร่างของภาพ

วัตถุที่มีอยู่ตามธรรมชาติและที่มนุษย์สร้างขึ้นมีรูปร่างที่แตกต่างกันไป ทั้งที่เป็นรูปทรงเรขาคณิตและไม่เป็นรูปทรงเรขาคณิต ในศาสตร์ของการประมวลผลภาพนั้น การกำหนดขอบเขตของภาพทุกภาพให้อยู่ในรูปสี่เหลี่ยม (rectangular image model) เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากจะช่วยให้การอ่านภาพ การจัดเก็บข้อมูลของภาพในหน่วยความจำ และการประมวลผลของภาพออกทางอุปกรณ์ต่าง ๆ เป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ การเก็บข้อมูลภาพลงหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์สามารถทำได้โดยการจองหน่วยความจำของเครื่องไว้ในรูปของตัวแปรอะเรย์ (array) โดยค่าในแต่ละช่องของอะเรย์แสดงถึงคุณสมบัติของจุดภาพ (pixel) และตำแหน่งของช่องอะเรย์เป็นตัวกำหนดตำแหน่งของจุดภาพ สมมติให้ image เป็นตัวแปรแบบอะเรย์ขนาด $M \times N$ (M แถว และ N คอลัมน์) ที่ใช้เก็บภาพขนาด $M \times N$ จุด (M จุดในแนวนอน และ N จุดในแนวตั้ง) ค่าสี (หรือความสว่าง ในกรณีที่เป็นภาพ grey level) ของจุดภาพในแถวที่ 5 คอลัมน์ที่ 4 จะตรงกับค่าของ image(5,4) จะเห็นว่าเราใช้ตำแหน่งของจุดภาพทั้งสองแกนเป็นตัวชี้ค่าข้อมูลในอะเรย์

จากการใช้หน่วยความจำ เพื่อการเก็บภาพในลักษณะที่กล่าวมา เนื้อที่ในการเก็บภาพสามารถคำนวณได้ จาก $M \times N \times g$ เมื่อ g เป็นจำนวนเต็มที่แทนจำนวนบิตของข้อมูลในแต่ละจุดภาพ ตัวอย่างถ้า g มีค่าเท่ากับ 8 บิต เราจะสามารถเก็บความแตกต่างของระดับสีที่เป็นไปสูงสุด 256 ระดับ ค่า M และ N จะเป็นตัวบอกถึงความละเอียด ของภาพ สำหรับคอมพิวเตอร์ทั่วไปในระบบ VGA (Video Graphic Array) จะมีขนาด 640x480, 800x600 และ 1024x768 จุด เป็นต้น การกำหนดความละเอียดจะขึ้นอยู่กับงานที่จะใช้ ในงานบางอย่างใช้ความละเอียดแค่ 30 x 50 จุด ก็พอแล้วแต่ในงานบางชนิด ใช้ความละเอียดถึง 1000 x 1000 จุด ก็ยังไม่พอ

ตัวอย่างสำหรับระบบที่มีความละเอียดเท่ากับ 800x600 และมีขนาด 16 บิตต่อ Pixel จะสามารถแสดงสีได้ทั้งหมด 65536 ระดับและต้องใช้เนื้อที่ในการเก็บเท่ากับ 800x600x16 บิต

3.2 มาตรฐานสี

แสงขาวที่เห็นในธรรมชาติ (สีน้ำเงิน สีเขียว สีแดง) เมื่อตกกระทบลงบนวัตถุใดๆ จะเกิดการ สะท้อน ดูดกลืน และส่องผ่าน ถ้าวัตถุสามารถสะท้อนแสงทุกความยาวคลื่นในปริมาณเท่ากันจะเห็นวัตถุเป็นสีขาว ถ้าวัตถุดูดกลืนแสงไว้หมดจะเห็นวัตถุเป็นสีดำเพราะไม่มีแสงจากวัตถุเข้าตาเราเลย เช่น แอปเปิ้ล จะดูดแสง สีน้ำเงิน และสีเขียวไว้ และสะท้อนแสงสีแดงออกมาเราจึงเห็นเป็นสีแดง การผสมสีแบบบวก (Additive Color Mixing) เป็นการผสมกันของแสงเพื่อให้เกิดเป็นแสงสีใหม่ตามต้องการ โดยมีแม่สีของแสงคือ แสงสีแดง (Red, R) แสงสีเขียว (Green, G) และแสงสีน้ำเงิน (Blue, B) ตัวอย่างการผลิตสีด้วยระบบการผสมสีแบบบวก อาทิ การผลิตสีของโทรทัศน์ และจอคอมพิวเตอร์

มาตรฐานของสีที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีอยู่หลายระบบด้วยกัน ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับ การนำไปใช้ แต่โดยทั่วไปแล้วทุกมาตรฐานจะมีแนวคิดเดียวกันคือการแทนจุดสีด้วยจุดที่อยู่ภายใน space 3 มิติ โดยจะมีแกนอ้างอิงสำหรับจุดสีนั้นๆ ใน space ซึ่งแต่ละแกนก็จะมีความเป็นอิสระต่อกัน ตัวอย่างเช่นในระบบ RGB จะมีแกนสีคือ แกนสีแดง เขียว และ น้ำเงิน ในระบบ HLS จะมีแกนเป็นค่าสี (hue) ความสว่าง (lightness) และความบริสุทธิ์ของสี (saturation) ตัวอย่างระบบสีที่นิยมใช้กัน ได้แก่ ระบบ RGB HSV (Hue Saturation Value) และ HLS (Hue Lightness Saturation)

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ระบบสีที่นำมาใช้คือ ระบบสี RGB เป็นระบบสีที่เกิดจากการรวมกันของแสงสีแดง (R, red) เขียว (G, green) และน้ำเงิน (B, blue) โดยมีการรวมกันแบบการผสมสีแบบบวก (Additive Color Mixing) ซึ่งโดยปกติจะนำไปใช้ในจอภาพแบบ CRT (Cathode ray tube) ในการใช้งานระบบสี RGB ยังมีการสร้างมาตรฐานที่แตกต่างกันออกไปที่นิยมใช้งานได้ แต่ RGBCIE และ RGBNTSC ระบบสีแบบ RGB ของ CIE เป็นระบบสีที่พัฒนาขึ้นโดย CIE (Commission International l 'Eclairage) ซึ่งอ้างอิงสีด้วยสีแดงที่ 700 nm สีเขียวเท่ากับ 546.1 nm และสีน้ำเงิน 435.8 nm และ ระบบสีแบบ RGB ของ NTSC เป็นระบบที่พัฒนาโดย NTSC (National Television System Committee) เพื่อใช้สำหรับการแสดงภาพ ของจอภาพแบบ CRT เป็นมาตรฐานสำหรับผู้ผลิตแบบ CRT ให้มีลักษณะเดียวกัน (มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ [ออนไลน์], 2553)

4. สัมประสิทธิ์การกำหนด (coefficient of determination, r^2)

สัมประสิทธิ์การกำหนดเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ r^2 จะเป็นค่าที่ใช้วัดความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม (Y) และตัวแปรอิสระ (X) โดยที่ r^2 จะเป็นค่าที่บอกให้ทราบว่า การเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรอิสระมากน้อยเพียงใด การคำนวณค่า r^2 สามารถคำนวณได้จากอัตราส่วนของความแปรปรวน Y ที่เนื่องมาจากตัวแปรอิสระ X และความแปรปรวนของ Y

$$r^2 = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right\}^2}{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \right]} \quad \text{หรือ}$$

$$= \frac{\left\{ \sum_{i=1}^n X_i Y_i - n\bar{X}\bar{Y} \right\}^2}{\left[\sum_{i=1}^n X_i^2 - n\bar{X}^2 \right] \left[\sum_{i=1}^n Y_i^2 - n\bar{Y}^2 \right]}$$

โดยที่ r^2 จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ($0 \leq r^2 \leq 1$)

ถ้า $r^2 = 0$ แสดงว่าไม่มีความสัมพันธ์กันระหว่างตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตาม (Y)

ถ้า $r^2 = 1$ แสดงว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตาม (Y) อย่างสูง

ถ้า $0 < r^2 < 1$ แสดงว่า มีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (X) กับตัวแปรตาม (Y) ถ้า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าความสัมพันธ์มีน้อย หรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามไม่สามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระที่มีอยู่ในสมการ ถ้า r^2 มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าความสัมพันธ์มีมาก หรือการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตามสามารถอธิบายได้ด้วยตัวแปรอิสระที่มีอยู่ได้ในสมการได้ดี

r^2 จะเป็นค่าที่ใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม (Y) เมื่อตัวแปรอิสระ (X) เปลี่ยนแปลงไป แต่ไม่ได้บอกทิศทางของการเปลี่ยนแปลงว่าจะเพิ่มขึ้นหรือลดลง (พิสมัย, 2550)

6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปี 1999, Claude Roux, Michelle Novotny, Ian Evans และ Chris Lennard ได้ศึกษาการตรวจสอบหลักฐานเกี่ยวกับปากกาลูกกลิ้งสีน้ำเงินและสีดำ ในประเทศออสเตรเลียโดยการแยกความแตกต่างของ ยี่ห้อ รุ่น และครั้งที่ผลิต ด้วย 3 เทคนิคดังนี้คือ filtered light examination (FLE), reflectance visible microspectrophotometry (MSP) และ thin-layer chromatography (TLC) ผลการทดสอบวิธีที่ให้ข้อมูลความแตกต่างได้มากที่สุดคือ TLC มากกว่า FLE มากกว่า MSP ตามลำดับ (Claude Roux, 1999)

ปี 2006, Ashwini Kher, Mary Mulholland, Elinore Green และ Brian Reedy ได้แบ่งแยกประเภทหมึกปากกาลูกกลิ้งโดยใช้ high-performance liquid chromatography (HPLC) และ Infrared spectroscopy (IR) โดยนำเทคนิค Soft Independent Modeling of Class Analogies มาใช้ในการวิเคราะห์หาล่องค์ประกอบหลักของน้ำหมึก เพื่อแยกความแตกต่างของตัวอย่างปากกา ใช้หลักความน่าจะเป็นเพื่อแยกหมวดหมู่ของปากกาหมวดหมู่ของปากกาได้ การวิเคราะห์โดยการใช้ HPLC การศึกษานี้สามารถบ่งชี้ได้ว่าการวิเคราะห์ด้วย HPLC สามารถแบ่งแยกประเภทหมึกของปากกาลูกกลิ้งได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ด้วย IR ดังนั้นต้องพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ด้วย IR ให้มีสถานะที่เหมาะสม สำหรับนำมาวิเคราะห์หมึกของปากกาลูกกลิ้งสีน้ำเงินโดยเฉพาะ (Ashwini Kher, 2006)

ปี 2007, ปิยวรรณ แคนยุกต์, ชูชาติ ธรรมเจริญ และ สนอง เอกสิทธิ์ ได้ศึกษาลักษณะหมึกปากกาลูกกลิ้งด้วยเทคนิค ATR FT-IR microspectroscopy สามารถวิเคราะห์คราบหมึกบนกระดาษได้โดยไม่ต้องมีการเตรียมตัวอย่าง สเปกตรัมที่ได้จะแสดงความแตกต่างกันของหมึกปากกาในแต่ละสี และแต่ละยี่ห้อซึ่งสัมพันธ์กับองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในหมึกปากกาแต่ละค้ำ (ปิยวรรณ, 2007)

ปี 2008, Craig D. Adam, Sarah L. Sherratt และ Vladimir L. Zholobenko ได้ศึกษาการแยกประเภท จำแนกลักษณะเฉพาะตัวของ ปากกาลูกกลิ้งสีดำ โดยใช้ UV- VIS absorption spectra ในการวิเคราะห์องค์ประกอบหลักของหมึกปากกาลูกกลิ้ง โดยศึกษาจากหมึกปากกาลูกกลิ้งสีดำที่มีขายอยู่ในตลาดประเทศอังกฤษ ทั้งหมึกปากกาและวัตถุดิบจะสกัดจากเส้นหมึกปากกานบนกระดาษที่นำมาทดสอบ การวิเคราะห์องค์ประกอบหลักจะแสดงลักษณะเฉพาะตัวในแต่ละ spectrum (Craig D, 2008)

ปี 2008 Djavanshir Djozan, Tahmineh Baheri, Ghader Karimian และ Masomeh Shahidiwf ได้ศึกษาความแตกต่างของน้ำหมักปากกาลูกลิ้นบนเอกสาร ด้วยวิธี thin-layer chromatography และนำ chromatogram ที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์ภาพ การจำแนกความแตกต่างของหมักปากกานั้น ซอร์ฟแวร์ดังกล่าวถูกออกแบบให้ตรวจความหนาแน่นของ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน วิธีดังกล่าวสามารถจำแนกความแตกต่างของหมักได้อย่างถูกต้องแม่นยำถึง 92.8% โดยการทดสอบ ทดสอบจากน้ำหมักจำนวน 41 ตัวอย่างที่หาซื้อได้ตามท้องตลาด ซึ่งก็ได้ผลการวิเคราะห์และจำแนกได้เป็นอย่างดี (Djavanshir, 2008)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 3 เครื่องมือ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์ และเครื่องมือ	รายละเอียด
1. Micro pipet	Jencons
2. Oven	Gallenkamp
3. Scanner	Canol Lide 100
4. Test Tube	ไม่วะบุ
5. TLC silica gel 60 F ₂₅₄ (Aluminium sheets)	Merk
6. TLC Tank	ไม่วะบุ
7. Vortex Mixer	Scientific Industries รุ่น Genic 2

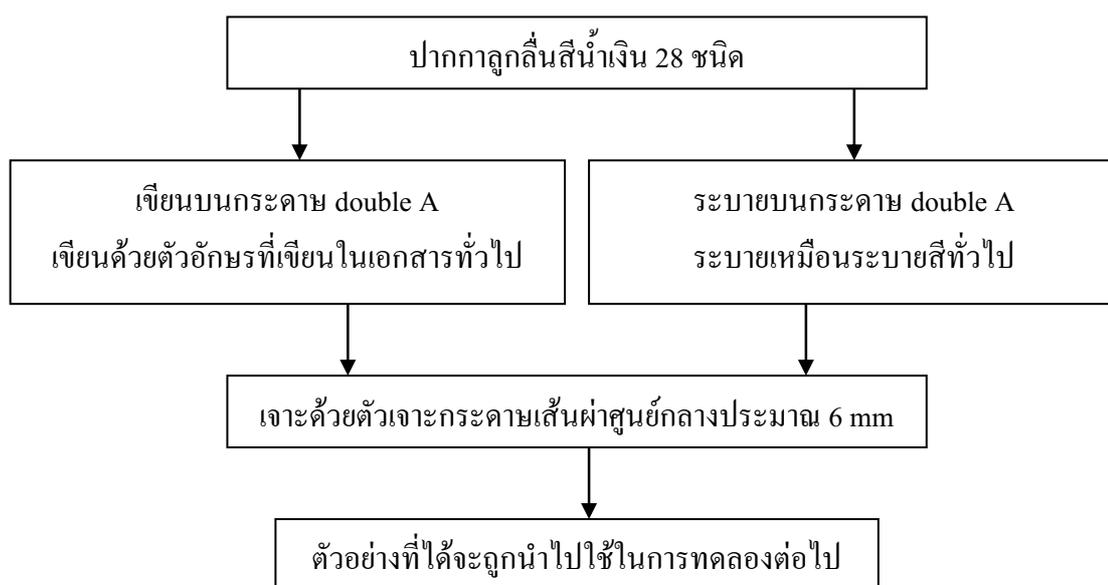
ตารางที่ 4 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

สารเคมี	รายละเอียด
1. 1,1,2,2, Tetrachloroethane (C ₂ H ₂ Cl ₄)	Fluka
2. 1,2 – Dichloroethane (C ₂ H ₂ Cl ₂)	Fluka
3. Acetic Acid (CH ₃ COOH)	BHD
4. Acetone (C ₃ H ₆ O)	Merck
5. Ammonia (NH ₃)	Meack
6. Cyclohexane (C ₆ H ₁₂)	Fluka
7. Ethanol (CH ₃ CH ₂ COOH)	Meack
8. Ethyl Acetate (CH ₃ COOC ₂ H ₅)	Sigma
9. Methanol (CH ₃ OH)	BHD
10. <i>n</i> – Butanol (C ₄ H ₁₀ O)	Meack
11. <i>n</i> – Buthyl Acetate (C ₆ H ₁₂ O ₂)	Sigma
12. Pyridine (C ₅ H ₅ N)	Sigma
13. Toluene (C ₇ H ₈)	Meack

2 วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมตัวอย่าง

ในการทดลองจะใช้หมึกปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน 28 ชนิด ตามตารางที่ 5 ซึ่งเตรียมตัวอย่าง 2 แบบดังนี้คือ การเขียนบนกระดาษเพื่อการวิเคราะห์ที่สามารถนำไปใช้ได้จริง และระบายบนกระดาษเพื่อให้สามารถสกัดหมึกออกจากกระดาษ ได้ปริมาณความเข้มข้นสูงซึ่งเมื่อนำไปทำ TLC จะให้ความเข้มสีของ chromatogram ที่ชัดเจน การเตรียมตัวอย่างในการทดลองนี้ไม่มีการควบคุมน้ำหนักมือสำหรับการเขียนและการระบายหมึกปากกาบนกระดาษ กระดาษที่ใช้เป็นชนิดเดียวกันตลอดการทดลอง ในการทดลองใช้ กระดาษ double A จากนั้นนำมาเจาะด้วยตัวเจาะกระดาษ เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 6 mm แล้วนำไปทำการทดลองต่อไป การทดลองแสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภูมิแสดงการเตรียมตัวอย่างปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน

กำหนดให้

S1-S28 = ตัวอย่างปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินที่ 1-28 ที่เตรียมจากการเขียน

SW1-SW28 = ตัวอย่างปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินที่ 1-28 ที่เตรียมจากการระบาย

ตารางที่ 5 ปากกาลูกกลิ้งสีน้ำเงินที่นำมาศึกษา

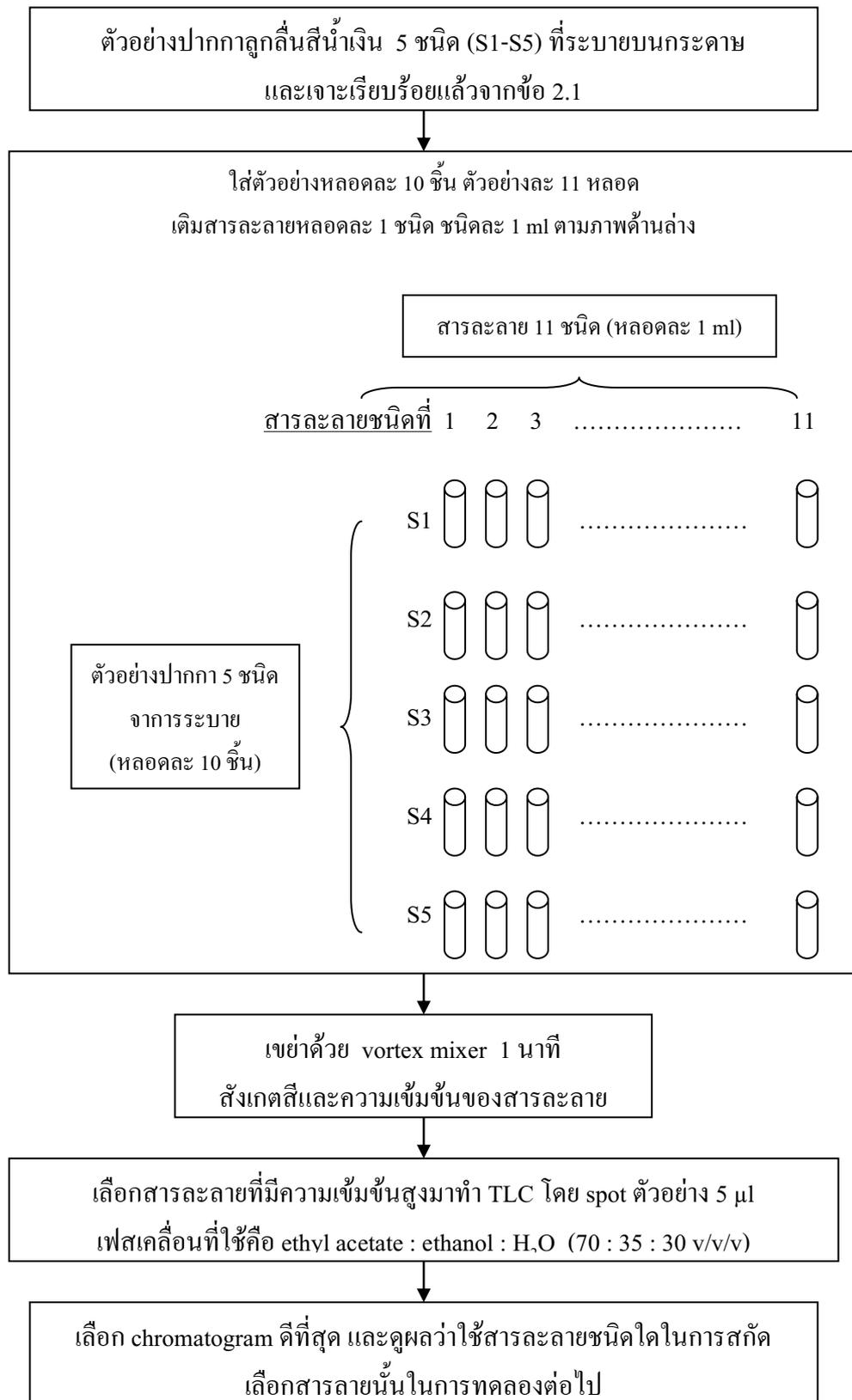
ตัวอย่างที่	ชื่อยี่ห้อหรือรุ่นปากกาลูกกลิ้งสีน้ำเงิน
1	FABER- CASSTELL Need Ball 1444 0.5 mm. S-fine Blue Made In Malaysian
2	GOLD POINT 881 0.5 Gold BKL
3	LANCER Spiral 0.5 825
4	QUANTUM Gelobal 1233 Made In India
5	HORSE Ball Pen 0.7 mm. Swiss Technique
6	AH 505 AIHAO
7	ไม่มีชื่อ
8	QUATUM GELO Gelobal 007 Made In India
9	ไม่มีชื่อ
10	TEX Mc 228 1.0 mm. 122
11	H-667 Swiss Technique
12	0.7 Tungstem European
13	M & G Yuppie 0.5 mm.
14	BKL® 045 Reynolds 0.5 France Technique 0.8
15	LINC® Glycer (Supper Smooth Ball Pen) Fine
16	ไม่มีชื่อ
17	STAEADTLER Noris Stick 434 F (Germany)
18	FASTER CX 606
19	G'Soft Fizz HI grip 0.38
20	STABILO Liner 308 (Blue Medium)
21	DBP-0049 0.5 @ Disney Based On the winie pooh By AA Milne and E.H
22	Shepard.
23	BIC Bu2 0.5
24	DIAMOND 6080
25	PENCOM Fine 0.5 mm. P.20
26	UNI Laknock Fine Made In Japan
27	FASTER 505 Made In Korea
28	PAPER : MATE Kilometrico Viz 2

2.2 การศึกษาตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดหมึกออกจากกระดาษ

ในขั้นตอนการหาสารสกัดที่เหมาะสมเพื่อสกัดหมึกออกจากกระดาษ การทดลองนี้ได้เลือกทำเฉพาะตัวอย่างหมึกปากกาที่ระบายบนกระดาษมาทดสอบเท่านั้น เนื่องจากปากกาที่ใช้เป็นชนิดเดียวกันกับตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนจึงสามารถอ้างอิงผลการทดลองกันได้ ในการทดลองนี้ใช้สารละลาย 11 ชนิดในการสกัด ตามตารางที่ 6 นำตัวอย่างจากการระบายที่เจาะแล้วจำนวน 10 ชิ้น ใส่ในหลอดทดลอง 11 หลอด เติมสารละลายแต่ละชนิดลงในหลอดทดลอง หลอดละ 1 ชนิด ด้วยปริมาณ 1 ml เขย่าประมาณ 1 min จากนั้นสังเกตสีและความเข้มข้นของสารละลายน้ำหมึก นำสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงไป spot บนแผ่น TLC เพื่อเลือก chromatogram ที่ดีที่สุด และเลือกใช้สารละลายนั้นในการทดลองต่อไป แสดงผลการทดลองตามภาพที่ 2

ตารางที่ 6 ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดหมึกปากกาออกจากกระดาษ

ชนิดที่	ชื่อตัวทำละลาย
1	ethyl acetate
2	ethanol
3	acetic acid
4	acetone
5	<i>n</i> - butanol
6	1,2 - dichloroethane
7	<i>n</i> - buthyl acetate
8	1,1,2,2 - tetrachloroethane
9	cyclohexane
10	methanol
11	pyridine



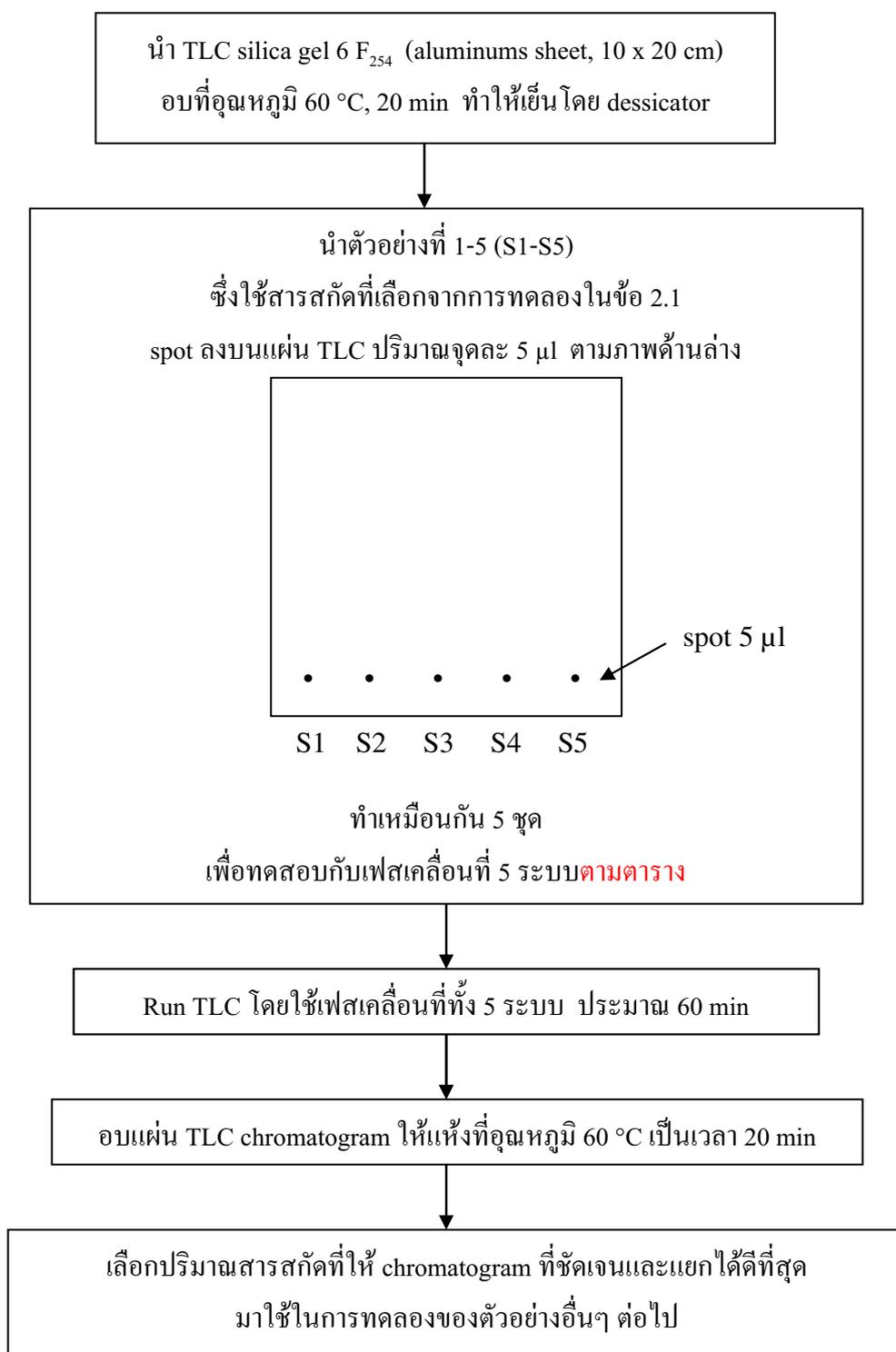
ภาพที่ 2 แผนภูมิการศึกษาตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดหมึกออกจากกระดาศ

2.3 การศึกษาเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ทำ TLC

นำแผ่น TLC silica gel 6 F₂₅₄ (aluminums sheet, 10 x 20 cm) ไปอบที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 20 min ทำให้เย็นโดยใส่ไว้ใน dessicator นำสารละลายน้ำหมึกที่สกัดจากสารละลายที่เลือกในผลการทดลองในข้อ 2.1 มา spot ลงบนแผ่น TLC ปริมาณ 5 µl จากนั้นทำการศึกษานิตของเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ทำ TLC จากเฟสเคลื่อนที่ 5 ระบบ ดังตารางที่ 7 นำแผ่น TLC มา run เป็นเวลา 60 min แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 20 min จากนั้นนำ แผ่น TLC chromatogram แสดงการทดลองตามภาพที่ 3

ตารางที่ 7 เฟสเคลื่อนที่ 5 ระบบที่ใช้ในการศึกษา

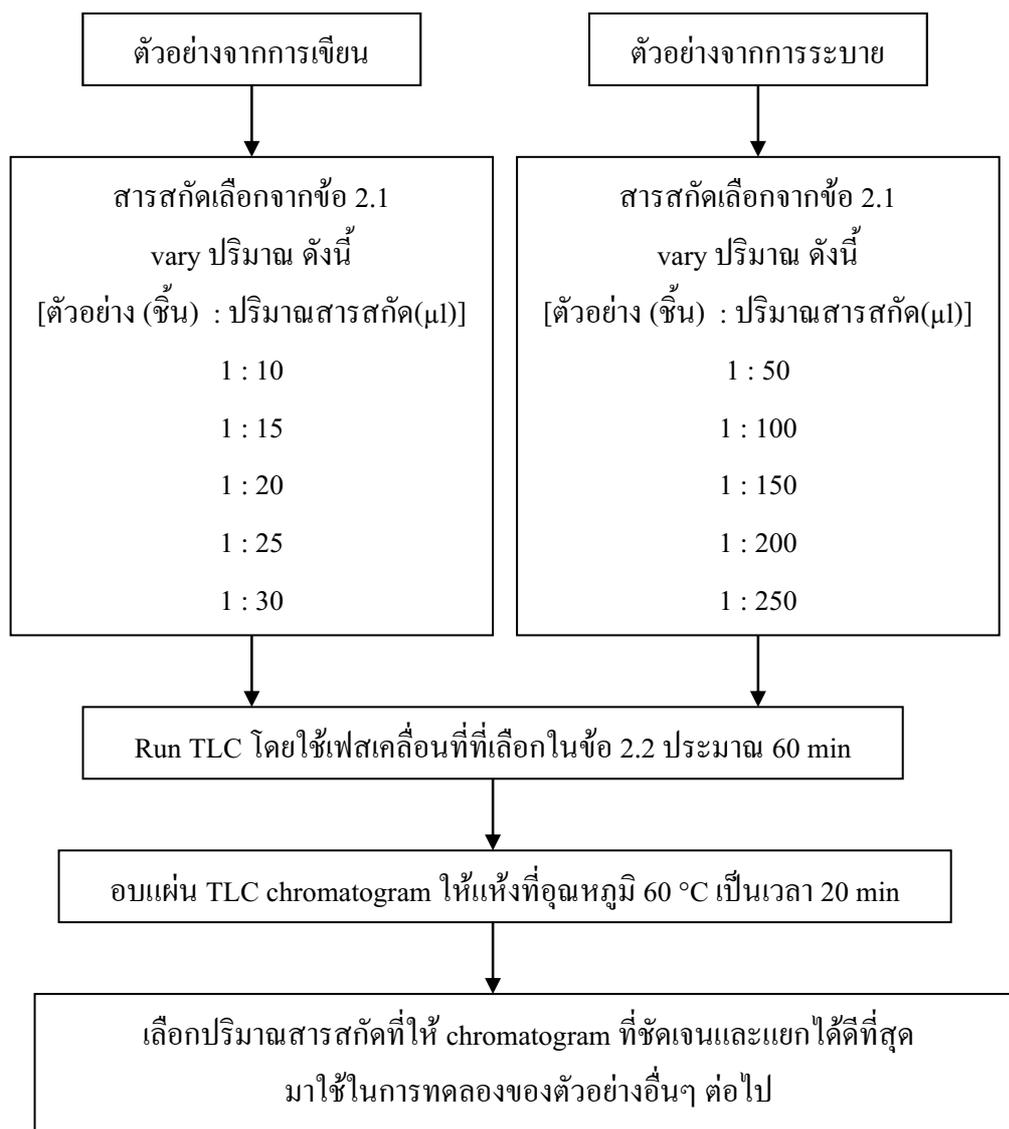
ระบบที่	เฟสเคลื่อนที่	อัตราส่วน (v/v/v)
1	<i>n</i> -butanol : ethanol : H ₂ O	50 : 15 : 10
2	ethyl acetate : cyclohexan : methanol : NH ₃	70 : 15 : 10 : 5
3	ethyl acetate : butanol : NH ₃	60 : 35 : 5
4	ethyl acetate : ethanol : H ₂ O	70 : 35 : 30
5	toluene : acetone : ethanol : NH ₃	30 : 60 : 7 : 2



ภาพที่ 3 แผนภูมิการศึกษาเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ทำ TLC

2.4 การศึกษาปริมาณสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดหมึก

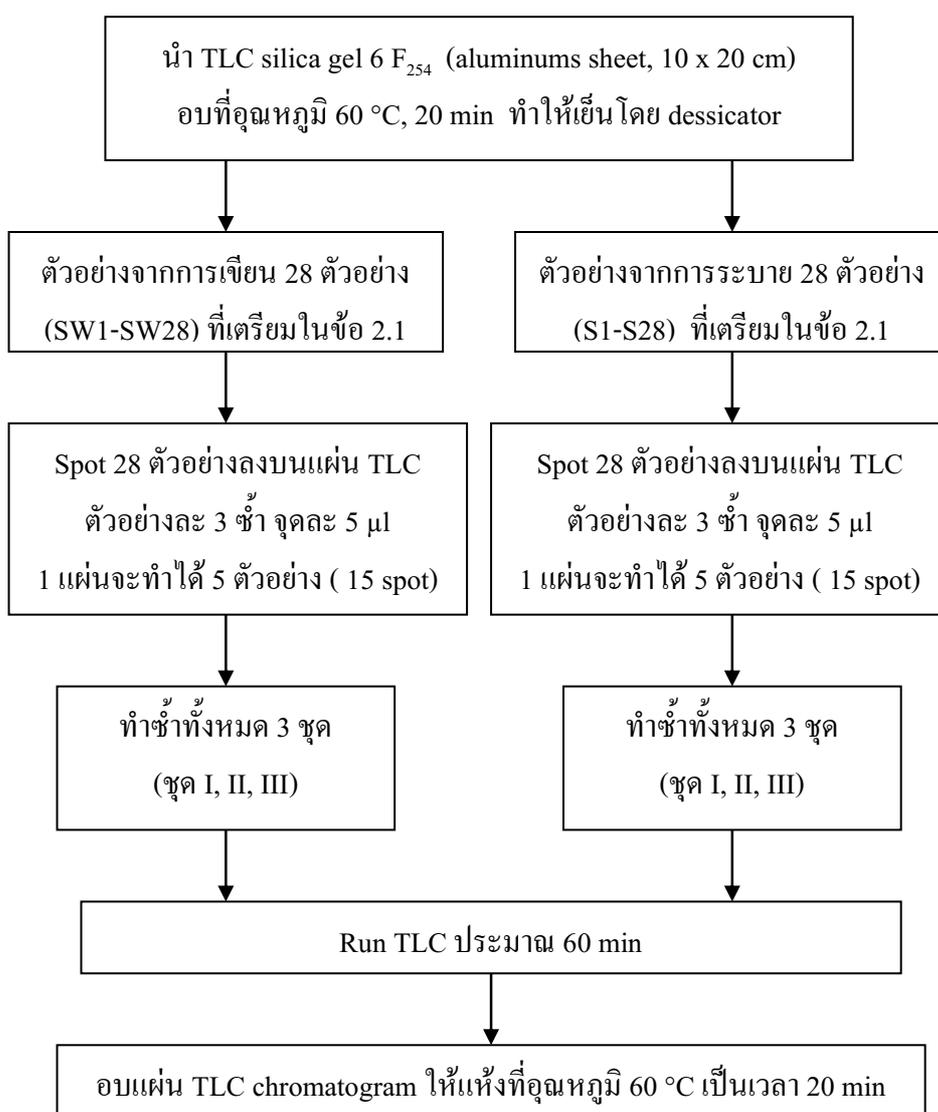
นำตัวอย่างมาหาปริมาณตัวทำละลายที่ใช้สกัดตัวอย่างเพื่อให้ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสมในการทำ TLC โดยการทดลองแสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แผนภูมิการศึกษาปริมาณสารสกัดที่เหมาะสมในการสกัดหมึก

2.5 การทำ TLC ของตัวอย่างปากกาลูกคลื่นสีน้ำเงิน 28 ตัวอย่าง

นำตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนและการระบาย 28 ตัวอย่างนำมาสกัด และทำ TLC ตามสภาวะที่ได้จากผลการทดลองใน ข้อ 2.3 และ 2.4 การทดลองแสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แผนภูมิการทำ TLC ของตัวอย่างปากกาลูกคลื่นสีน้ำเงิน 28 ตัวอย่าง

2.6 การสแกน และเตรียมภาพ TLC เพื่อไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม

เมื่อได้ TLC chromatogram แล้วนำมาสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์รุ่น Canol Lide 100 (300 dpi) และบันทึกเป็นแฟ้มประเภท bitmab (bmp) หลังจากนั้นนำภาพที่สแกนได้มาตัดให้เหลือภาพละ 1 ตัวอย่างด้วยโปรแกรม microsoft office picture manager ให้เป็นภาพขนาดความกว้าง 120 pixel โดยตัวให้แถบของตัวอย่างหมึกปากกาอยู่ตรงกลาง ส่วนความยาวตัดให้มีขนาดตามระยะการเคลื่อนที่ของเฟสเคลื่อนที่ จากนั้นนำภาพไปวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

2.7 การเปรียบเทียบภาพ TLC ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

โดยนำแผ่น TLC 2 ภาพที่ตัดแล้วมาเปรียบเทียบ ซึ่งโปรแกรมวิเคราะห์ภาพจะออกแบบให้วิเคราะห์ค่าความเข้มของแม่สีทั้ง 3 คือสีแดง (R, red) สีเขียว (G, green) สีน้ำเงิน (B, blue) เปรียบเทียบจากค่า coefficient of determination (r^2) ของแต่ละสีโดยกำหนดให้ Rr^2 , Gr^2 และ Br^2 เป็นค่า r^2 ของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ตามลำดับ ถ้าเปรียบเทียบแล้วภาพ TLC คู่ใดมีค่า r^2 เข้าใกล้ 1 หมายถึงภาพ TLC ที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีความสัมพันธ์กันมากหรือภาพ TLC ที่นำมาเปรียบเทียบนั้นมีความเหมือนกันมาก ในทางตรงกันข้ามถ้า r^2 เข้าใกล้ 0 หมายถึงภาพ TLC ที่นำมาเปรียบเทียบมีความสัมพันธ์ กันน้อยหรือภาพ TLC ที่นำมาเปรียบเทียบมีความเหมือนกันน้อย (พิสมัย, 2550) และค่า r^2 ของทั้ง 3 สีมาคำนวณความสัมพันธ์ ตามสมการ 1 โดยกำหนดเป็นค่า score ซึ่ง $W1$, $W2$ และ $W3$ เป็นน้ำหนักของแต่ละสี ซึ่งในการทดลองนี้กำหนดให้เท่ากับ 1

$$\text{Score} = [W1 \times Rr^2 + W2 \times Gr^2 + W2 \times Br^2] / W1 + W2 + W3 \quad (1)$$

บทที่ 4

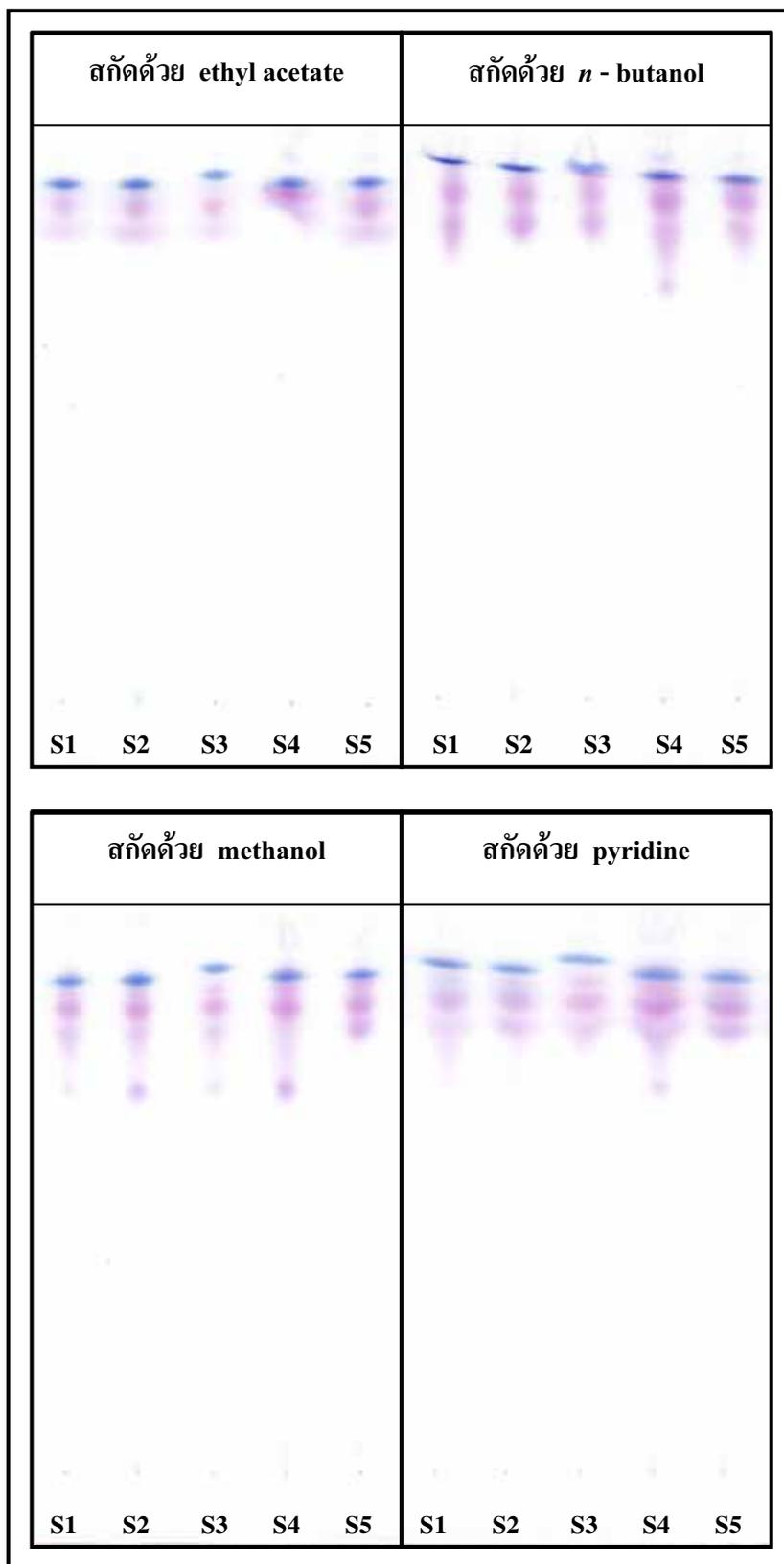
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. การศึกษาตัวทำละลายที่ใช้สกัดหมึกออกจากกระดาษ

จากการศึกษาตัวทำละลาย 11 ชนิด โดยตัวทำละลายที่ใช้ได้เลือกตามงานวิจัยของ Djavanshir Djozan ในปี 2008 ซึ่งได้ทำการทดลองการสกัดหมึกปากกาออกจากกระดาษเช่นกัน (Djavanshir, 2008) ในการทดลองนี้วัดผลโดยการที่ผู้ทดลองสังเกตสีและความเข้มข้นของหมึกที่ถูกสกัดออกจากกระดาษด้วยสารละลาย จากผลการทดลองผู้ทำการทดลองพบว่า *n*-buthyl acetate และ cyclohexane ไม่สามารถสกัดหมึกออกจากกระดาษได้ ส่วนตัวทำละลาย 9 ชนิดที่เหลือสามารถสกัดหมึกปากกาออกจากกระดาษออกมาได้ ซึ่งสังเกตได้จากสีของหมึกที่ถูกสกัดและกระจายตัวอย่างในสารละลาย และพบว่าความเข้มข้นสีสารละลายพบว่ามี 4 ชนิดที่ให้ความเข้มข้นสูงกว่าสารละลายตัวอื่นๆ คือ ethyl acetate, *n* – butanol, pyridine และ methanol ผลการทดลองดังตารางที่ 8 และเมื่อนำสารสกัดจากทั้ง 4 ชนิด มาทำ TLC ด้วยเฟสเคลื่อนที่ที่ประกอบไปด้วย ethyl acetate : ethanol : H₂O พบว่าให้ความเข้มข้นของแถบชัด แต่การแยกของแถบไม่ดี เนื่องจากเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้มีเพียงระบบเดียวซึ่งอาจมีสภาพขั้วไม่เหมาะในการทำ TLC ผลดังภาพที่ 6 เนื่องจากการแยกไม่ดี และผลโดยรวมใกล้เคียงกันผู้ทดลองจึงไม่นำค่า R_f เปรียบเทียบ ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงเลือกตัวทำละลาย methanol มาใช้ในการทดลองหาเฟสเคลื่อนที่ที่เหมาะสมต่อไป ด้วยเหตุผลคือ methanol มีกลิ่นฉุนน้อยที่สุด และเป็นพิษน้อยสุดจากตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิด

ตารางที่ 8 ความสามารถในการละลายของตัวทำละลายที่ใช้สกัดหมึกบนกระดาษ

ตัวทำละลาย	การละลาย	สี	ความเข้มข้น
1) ethyl acetate	ละลาย	ม่วง	มาก
2) ethanol	ละลาย	สีน้ำเงิน	ปานกลาง
3) acetic acid	ละลาย	สีน้ำเงิน	ปานกลาง
4) acetone	ละลาย	สีน้ำเงิน	ปานกลาง
5) <i>n</i> - butanol	ละลาย	สีน้ำเงิน	มาก
6) 1,2 – dichloroethane	ละลาย	สีน้ำเงิน	ปานกลาง
7) <i>n</i> – buthyl Acetate	ไม่ละลาย	ไม่มีสี	ไม่ละลาย
8) 1,1,2,2 – tetrachloroethane	ละลาย	สีน้ำเงิน	ปานกลาง
9) cyclohexane	ไม่ละลาย	ไม่มีสี	ไม่ละลาย
10) methanol	ละลาย	สีน้ำเงิน	มาก
11) pyridine	ละลาย	สีน้ำเงิน	มาก



ภาพที่ 6 TLC chromatogram ของตัวอย่าง S1-S5 ที่สกัดด้วย ethyl acetate, *n* - butanol, pyridine และ methanol

2. การศึกษาเฟสเคลื่อนที่ที่ใช้ทำ TLC

สำหรับการทดลองหาเฟสเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำ TLC ในการทดลองนี้ใช้ methanol ในการสกัดหิมึกออกจากกระดาษตามผลการทดลองในข้อ 1 การวัดผลการทดลองจะสังเกตจากความคมชัดในการแยกสีของหิมึกปากกาตามเกณฑ์คะแนน ซึ่งได้ผลการทดลองดังตารางที่ 9 เฟสเคลื่อนที่ที่ดีที่สุดคือ *n*-butanol : ethanol : H₂O (50 : 15 : 10, v/v/v) เพราะสามารถแยกแถบของหิมึกปากกาถูกลิ้นได้ชัดเจนที่สุด ดังภาพที่ 7

ตารางที่ 9 ผลการศึกษาเฟสเคลื่อนที่ 5 ระบบ ที่ใช้ในการทำ TLC

ระบบเฟสเคลื่อนที่	A	B	คะแนนรวม
1) <i>n</i> -butanol : ethanol : H ₂ O	4	5	9
2) ethyl acetate : cyclohexan : methanol : NH ₃	1	1	2
3) ethyl acetate : butanol : NH ₃	1	1	2
4) ethyl acetate : ethanol : H ₂ O	4	3	7
5) toluene : acetone : ethanol : NH ₃	2	1	2

หมายเหตุ A : ความคมชัดของโครมาโตแกรม B : การแยกของโครมาโตแกรม

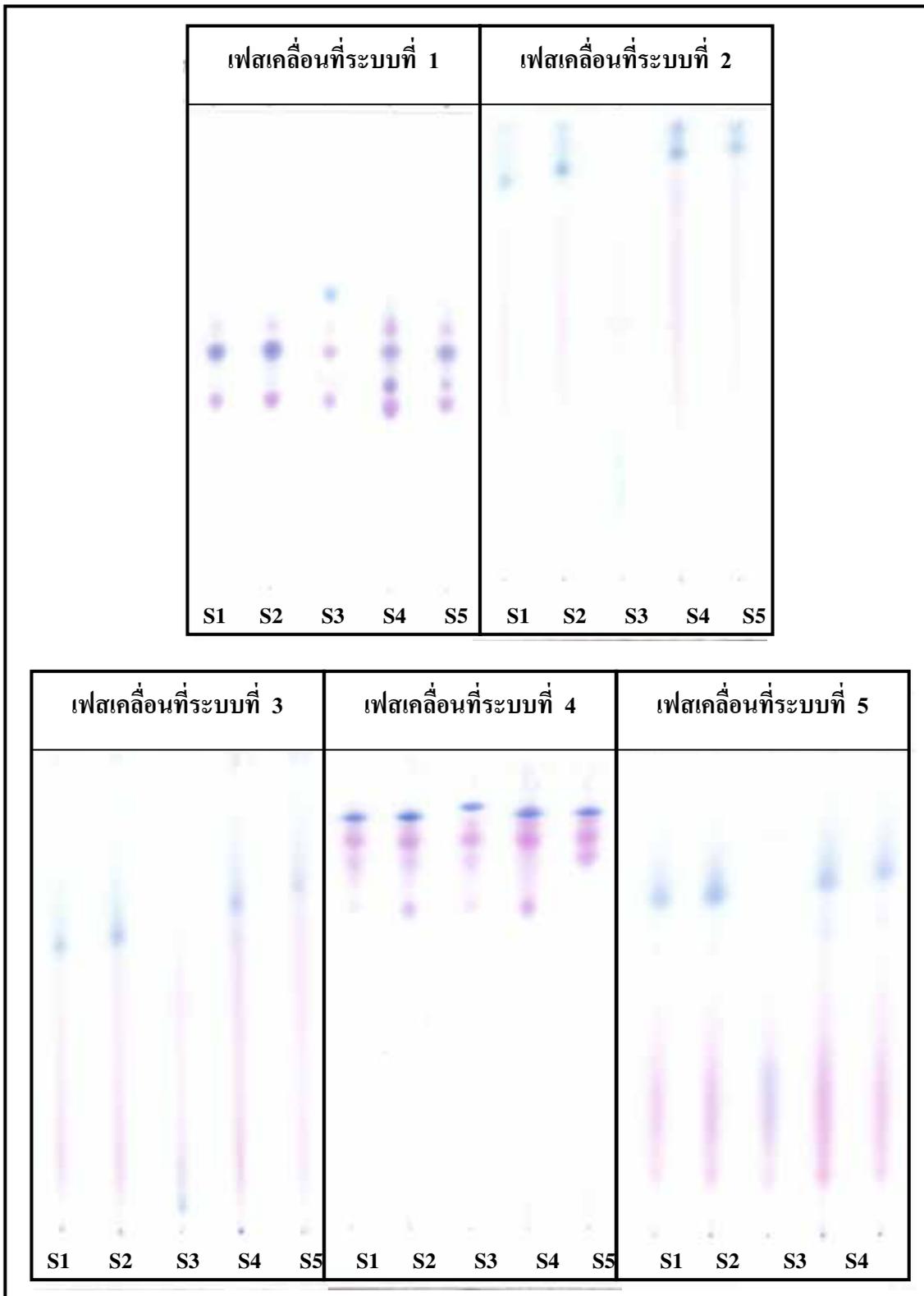
คะแนน : 1 = คมชัดน้อยที่สุด / การแยกไม่ดี

2 = คมชัดน้อย / การแยกได้น้อย

3 = คมชัดปานกลาง / การแยกได้ดีปานกลาง

4 = คมชัดมาก / การแยกดี

5 = คมชัดมากที่สุด / การแยกดีที่สุด



ภาพที่ 7 TLC chromatogram ของตัวอย่าง S1-S5 ที่ใช้เฟสเคลื่อนที่ทั้ง 5 ระบบ

3. การหาปริมาณ methanol ที่เหมาะสมในการสกัดหมึก

3.1 ตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียน

จากผลการทดลองหาปริมาณ methanol ที่เหมาะสมที่ใช้ในการสกัดตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนพบว่าจากการใช้ methanol 10 μ l ต่อตัวอย่าง 1 ชิ้น ให้ chromatogram ดีที่สุด chromatogram แยกกันชัดเจน แต่หากต้องการเพิ่มความเข้มข้นสารตัวอย่างโดยการลดปริมาณ methanol ลงไปอีก ซึ่งจะช่วยให้ของแถบ chromatogram มีสีเข้มมากยิ่งขึ้น การลดปริมาณ methanol ดังกล่าวไม่สามารถทำได้เนื่องจากถ้าลดปริมาณ methanol น้อยกว่า 10 μ l แล้วกระดาษจะดูดซับ methanol จนหมด ไม่เหลือสารละลายออกมา ผลการทดลองดังภาพที่ 8 และ ตารางที่ 10

ตัวอย่างที่ใช้ : SW13

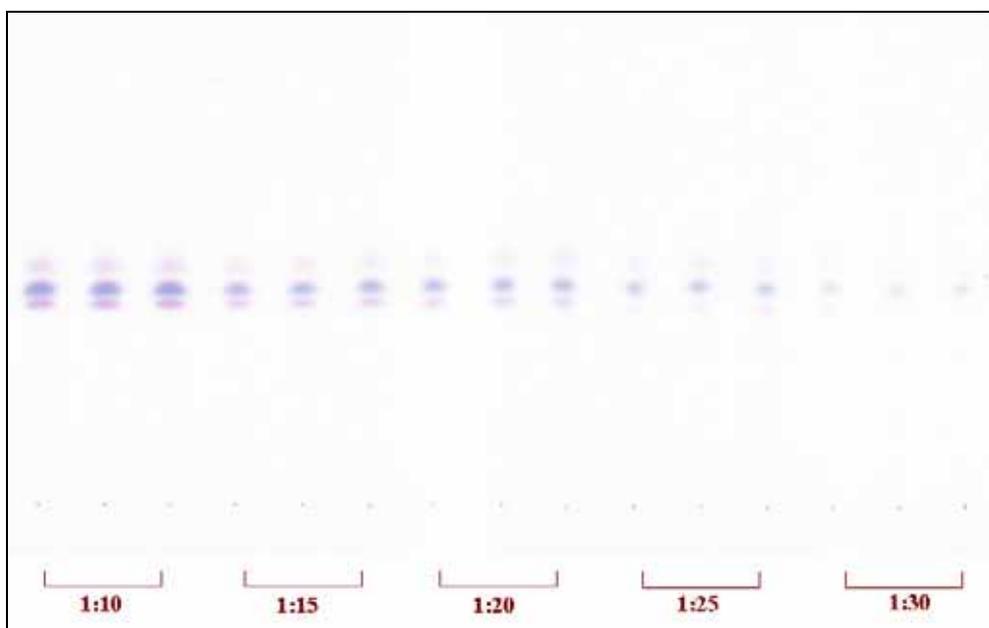
สารสกัด : methanol

เฟสเคลื่อนที่ : *n*-butanol : ethanol : H₂O (50 : 15 : 10 v/v/v)

ปริมาณสารสกัด (ต่อตัวอย่าง 1 ชิ้น) : 10, 15, 20, 25 และ 30 μ l

จำนวนซ้ำการทดลองต่อ 1 สภาวะ : 3 ซ้ำ

ปริมาณที่ใช้จุดบนแผ่น TLC : 5 μ l



ภาพที่ 8 TLC chromatogram ของตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนซึ่งสกัดด้วย methanol ปริมาณ 10, 15, 20, 25 และ 30 μ l ต่อตัวอย่าง 1 ชิ้น

ตาราง 10 ผลการหาปริมาณ methanol ที่ใช้สกัดตัวอย่างจากการเขี่ยน

ตัวอย่าง (ชิ้น) : methanol (μ l)	A	B	คะแนนรวม
1:10	5	5	10
1:15	4	5	9
1:20	3	4	7
1:25	2	4	6
1:30	1	4	5

หมายเหตุ A: ความคมชัดของโครมาโตแกรม

B: การแยกของโครมาโตแกรม

คะแนน : 1 = คมชัดน้อยที่สุด / การแยกไม่ดี

2 = คมชัดน้อย / การแยกได้น้อย

3 = คมชัดปานกลาง / การแยกได้ดีปานกลาง

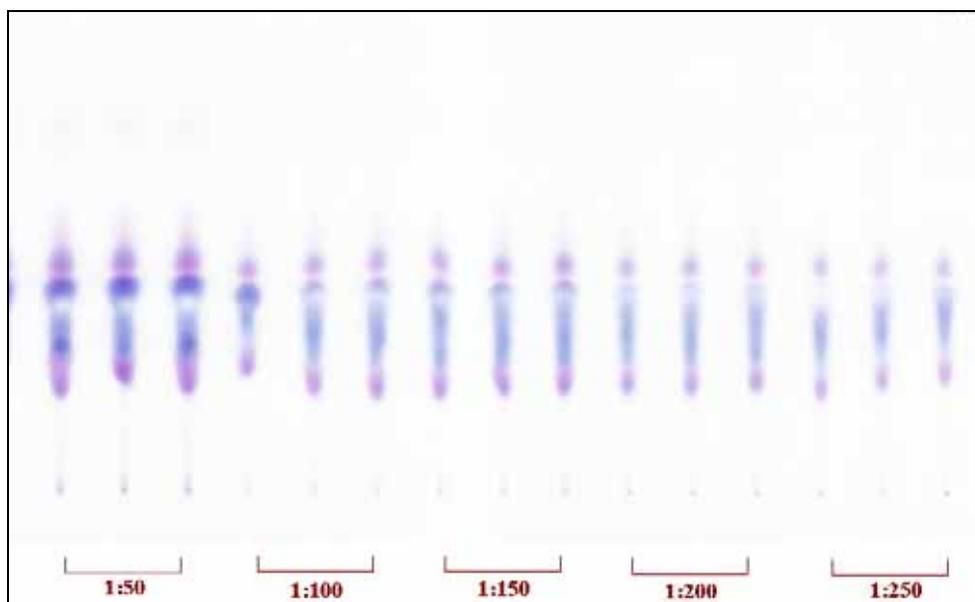
4 = คมชัดมาก / การแยกดี

5 = คมชัดมากที่สุด / การแยกดีที่สุด

3.2 ตัวอย่างที่เตรียมจากการระบาย

จากผลการทดลองหาปริมาณ methanol ที่เหมาะสมที่ใช้ในการสกัดที่เตรียมจากการระบาย จากโครมาโตแกรมจะสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณ methanol น้อยกว่า 150 μl ซึ่งจะทำให้ความเข้มข้นของสารตัวอย่างที่สูง แต่แถบของตัวอย่างแยกกันได้ไม่ค่อยสม่ำเสมอ ดังนั้นเลือกใช้ methanol 150 μl ต่อตัวอย่าง 1 ชี้น ให้ chromatogram ดีที่สุด แยกได้ชัดเจนและความเข้มข้นอยู่ในเกณฑ์ที่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้ด้วยโปรแกรมได้ ผลการทดลองดังภาพที่ 9 และตารางที่ 11

ตัวอย่าง	: S13
สารสกัด	: methanol
เฟสเคลื่อนที่	: <i>n</i> -butanol : ethanol : H ₂ O (50 : 15 : 10 v/v/v)
ปริมาณสารสกัด (ต่อตัวอย่าง 1 ชี้น)	: 50, 100, 150, 200 และ 250 μl
จำนวนซ้ำการทดลองต่อ 1 สภาวะ	: 3 ซ้ำ
ปริมาณที่ใช้จุดบนแผ่น TLC	: 5 μl



ภาพที่ 9 TLC chromatogram ของตัวอย่างที่เตรียมจากการระบายซึ่งสกัดด้วย methanol ปริมาณ 50, 100, 150, 200 และ 250 μl ต่อตัวอย่าง 1 ชี้น

ตารางที่ 11 ผลการหาปริมาณ methanol ที่ใช้สกัดตัวอย่างจากการระบาย

ตัวอย่าง (จีน) : methanol (μ l)	A	B	คะแนนรวม
1:50	4	2	6
1:100	4	2	6
1:150	4	3	7
1:200	3	3	6
1:250	3	2	5

หมายเหตุ A: ความคมชัดของโครมาโตแกรม

B: การแยกของโครมาโตแกรม

คะแนน : 1 = คมชัดน้อยที่สุด / การแยกไม่ดี

2 = คมชัดน้อย / การแยกได้น้อย

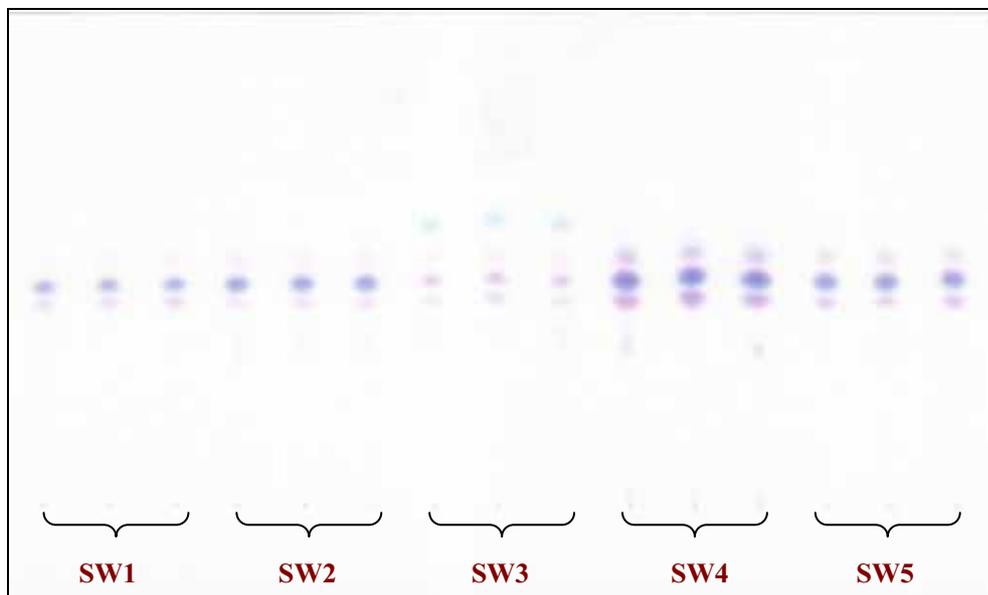
3 = คมชัดปานกลาง / การแยกได้ดีปานกลาง

4 = คมชัดมาก / การแยกดี

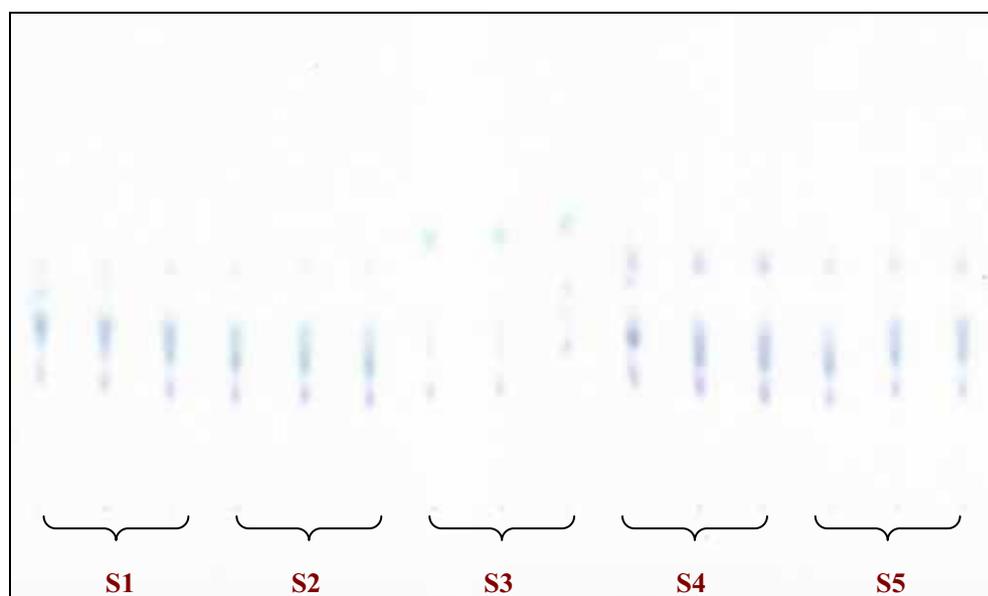
5 = คมชัดมากที่สุด / การแยกดีที่สุด

4. การทำ TLC ของตัวอย่างปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน 28 ตัวอย่าง

การศึกษาสถานะที่ใช้ในการทำ TLC ได้ผลการทดลองตามข้อ 1, 2 และ 3 สรุปได้ดังนี้คือใช้ methanol ปริมาณ 10 μ l สกัดหมึกที่เขียนออกจากกระดาษ และใช้ methanol 150 μ l สกัดหมึกที่ระบายออกจากกระดาษ เฟสเคลื่อนที่ใช้คือ *n*-butanol : ethanol : H₂O (50 : 15 : 10, v/v/v) เมื่อทำ TLC ตามเวลาแล้ว แล้วนำไปสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์ จะได้ภาพ chromatogram ดังภาพที่ 10 และ 11 จากการเขียนและการระบาย ตามลำดับตัว ส่วน chromatogram ของตัวอย่างที่เหลือแสดงผลในภาคผนวก จากการสังเกต chromatogram โดยรวมแล้วพบว่าตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนสามารถแยกหมึกตัวอย่างได้ดีกว่าการระบาย อาจเป็นไปได้ว่าในการเตรียมตัวอย่างจากการระบายนั้นมีการระบายเข้าไปมาของเส้นหมึกซึ่งอาจจะทำให้ dyes หรือ pigments จับตัวกัน (flocculation) และเมื่อนำมาสกัดด้วยตัวทำละลายทำให้กระจายตัวได้ไม่ดี ดังนั้นเมื่อนำมาทำ TLC จึงส่งผลให้ได้ chromatogram ที่ได้ไม่สม่ำเสมอและมีการแยกที่ไม่ดี ซึ่งแตกต่างจากตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนโดยที่ dye หรือ pigment ของตัวอย่างจากการเขียนสามารถกระจายตัวได้ดีกว่า เพราะไม่มีการเขียนซ้อนทับกันของเส้นหมึกไม่เกิดการจับตัวกัน



ภาพที่ 10 TLC chromatogram ของตัวอย่าง SW1-SW5

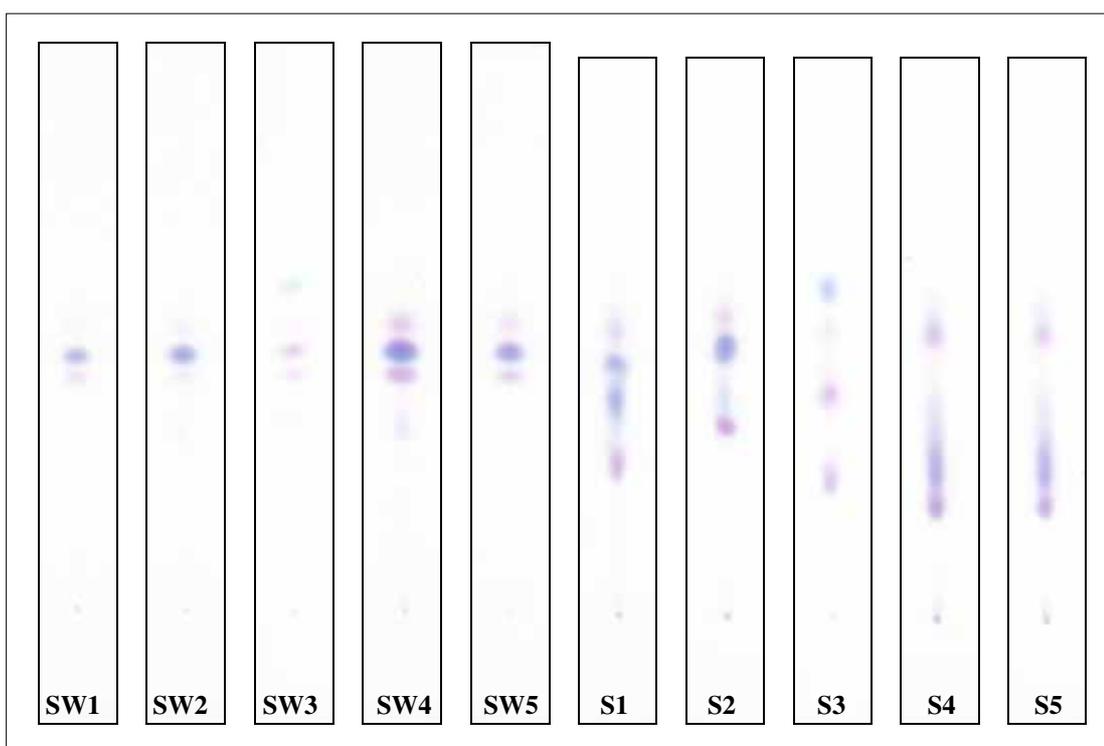


ภาพที่ 11 TLC chromatogram ของตัวอย่าง S1-S5

5. การเปรียบเทียบภาพ TLC ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

5.1 ภาพ TLC ซึ่งถูกตัดด้วยโปรแกรม Microsoft Office Picture Manager เพื่อนำไปเปรียบเทียบด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

ภาพ chromatogram หลังจากสแกนแล้วจะถูกนำมาตัดด้วยด้วยโปรแกรม microsoft office picture manager โดยมีขนาดความกว้าง x ความยาว ดังนี้คือ ความกว้าง 120 pixels และความยาวตามระยะทางของเฟสเคลื่อนที่ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้อยู่ที่ประมาณ 1000 – 1080 pixels ซึ่งจะตัด 1 ภาพ ต่อ 1 ตัวอย่าง โดยให้แถบตัวอย่างอยู่ตรงกลางของภาพ ภาพที่ได้จะนำไปจับคู่เปรียบเทียบกันด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ตัวอย่างภาพ TLC ที่ตัดแล้ว ดังภาพที่ 12

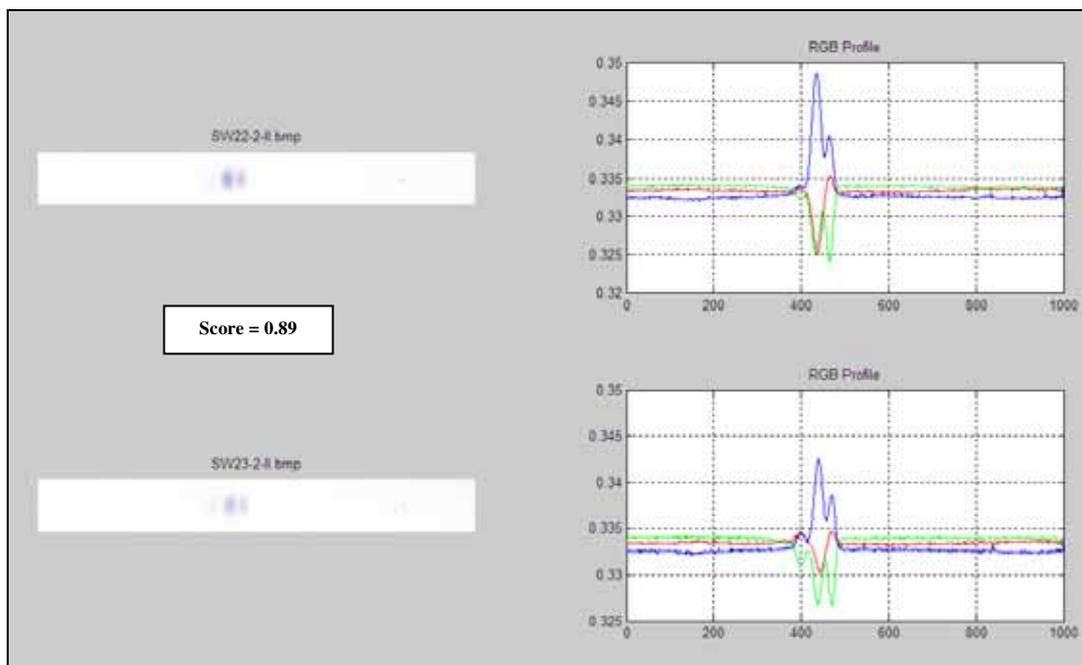


ภาพที่ 12 ตัวอย่าง TLC chromatogram ที่นำมาตัดด้วย โปรแกรม microsoft office picture manager

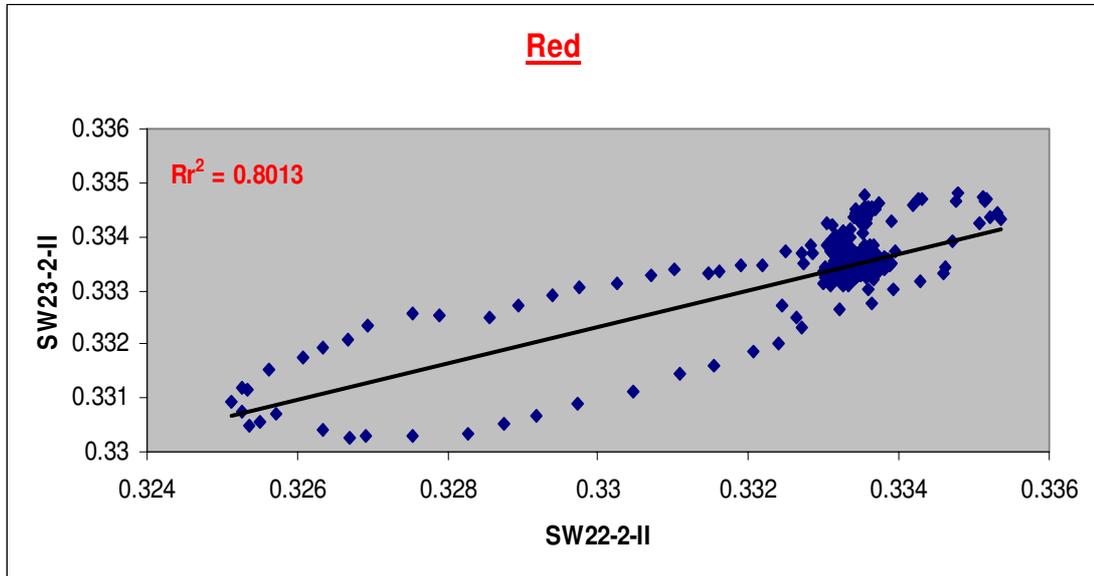
5.2 การวิเคราะห์เปรียบเทียบภาพด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ

โปรแกรมวิเคราะห์ภาพแสดงผลเป็นกราฟของ สีแดง (R, red) สีเขียว (G, green) สีน้ำเงิน (B, blue) ของแต่ละตัวอย่าง โดยแกน X เป็นค่าความเข้ม RGB สัมพัทธ์ แกน Y เป็นความยาวของภาพมีค่า 0 – 1000 pixels แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 13

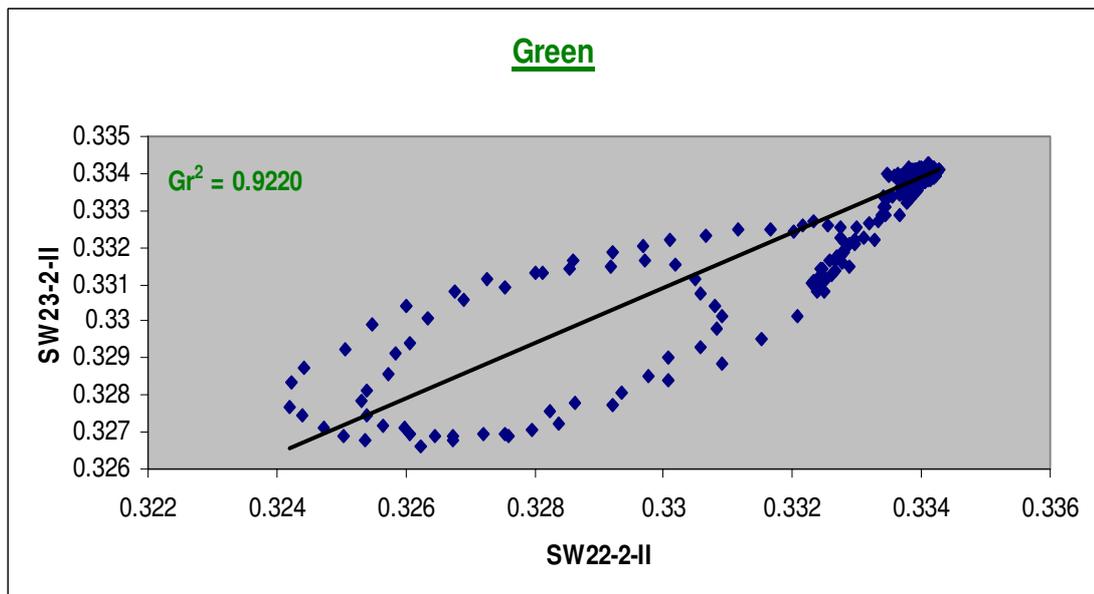
จากนั้นสร้างกราฟความสัมพันธ์ของสีและตำแหน่ง chromatogram ในภาพ TLC 2 ภาพ โดยแยกเป็นกราฟความสัมพันธ์ของสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน เพื่อหา r^2 ดังภาพที่ 14, 15 และ 16 ตามลำดับ Rr^2 , Gr^2 และ Br^2 ที่ได้จากกราฟจะถูกนำมาคำนวณหาค่า score โดยแสดงตัวอย่างการคำนวณตามภาคผนวก ค ซึ่งถ้า score ที่ได้มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าภาพ TLC ที่นำมาเปรียบเทียบกันนั้นมีแนวโน้มที่จะเหมือนกันหรือกล่าวได้ว่ามีแนวโน้มเป็นปากกาเขียนหรือเดียวกัน และในทางตรงข้ามถ้า score มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่ามีแนวโน้มที่จะแตกต่างกันหรือมีแนวโน้มที่จะเป็นปากกาต่างยี่ห้อกัน



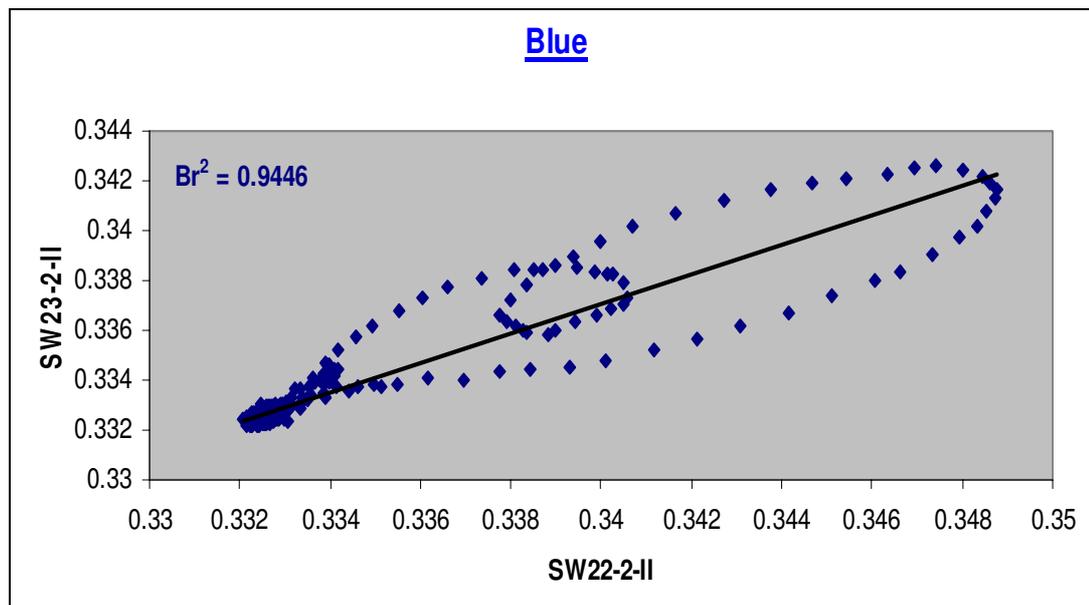
ภาพที่ 13 กราฟการวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม แสดงผลเป็น RGB



ภาพที่ 14 กราฟความสัมพันธ์สีแดง (R, red) แสดง Rr^2 ของตัวอย่าง SW22-2-II และ SW23-2-II



ภาพที่ 15 กราฟความสัมพันธ์สีเขียว (G, green) แสดง Gr^2 ของตัวอย่าง SW22-2-II และ SW23-2-II



ภาพที่ 16 กราฟความสัมพันธ์สีน้ำเงิน (B, blue) แสดง Br^2 ของตัวอย่าง SW22-2-II และ SW23-2-II

5.3 ผลการหาเกณฑ์การพิจารณาความเหมือนและความแตกต่างของปากกา

การหาเกณฑ์พิจารณาความเหมือนและความแตกต่างของปากกานั้น จะเปรียบเทียบภาพ TLC 252 คู่ ของตัวอย่างที่อยู่บนแผ่นเดียวกันที่เขียนและระบายโดยปากกาแท่งเดียวกันจำนวน 28 ยี่ห้อย วิธีหาเกณฑ์พิจารณาทำได้โดยนำ score ของทั้ง 252 คู่ที่แสดงในภาคผนวก ง.1 ของตัวอย่างจากการเขียน และ ภาคผนวก ง.2 ของตัวอย่างจากการระบาย มาคำนวณเพื่อหาค่าเฉลี่ย และ ค่าต่ำสุดของข้อมูล โดยนำมาตั้งเกณฑ์การวิเคราะห์คือ ถ้า score มีค่า \geq ค่าเฉลี่ยแสดงว่าเป็นหมึกปากกาลูกกลืนสีน้ำเงินที่มียี่ห้อเดียวกัน ถ้า score ที่ได้อยู่ระหว่าง ค่าเฉลี่ยและค่าต่ำสุด จะไม่สามารถระบุว่าเป็นหมึกปากกาลูกกลืนสีน้ำเงินที่มาจากยี่ห้อเดียวกันหรือต่างกัน และถ้า score มีค่า \leq ค่าต่ำสุด แสดงว่าเป็นหมึกปากกาลูกกลืนสีน้ำเงินต่างยี่ห้อกันซึ่งจากการวิเคราะห์ จากการนำข้อมูลมาวิเคราะห์ได้ผลดังนี้คือ score ของตัวอย่างจากการเขียนมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.93 และค่าต่ำสุดเท่ากับ 0.59 ส่วนตัวอย่างจากการระบายมีค่าเฉลี่ยและค่าต่ำสุด มีค่าเท่ากับ 0.89 และ 0.22 ตามลำดับ จากผลการทดลองได้เกณฑ์พิจารณา ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 เกณฑ์สำหรับใช้พิจารณาความเหมือนและความแตกต่างของหมึกปากกา

Score		เกณฑ์การพิจารณา
จากการเขียน	จากการระบาย	
≥ 0.93	≥ 0.89	แสดงว่าเป็นหมึกปากกาลูกกลืนสีน้ำเงินที่มียี่ห้อเดียวกัน
0.59-0.92	0.23-0.88	ระบุไม่ได้ว่าเป็นหมึกปากกาลูกกลืนสีน้ำเงินยี่ห้อเดียวกันหรือต่างกัน
≤ 0.58	≤ 0.22	แสดงว่าเป็นหมึกปากกาลูกกลืนสีน้ำเงินต่างยี่ห้อกัน

5.4 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบภาพที่อยู่บนแผ่น TLC แผ่นเดียวกัน

การวิเคราะห์จะเปรียบเทียบภาพ TLC 135 คู่ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบภาพ TLC ที่อยู่บนแผ่น TLC เดียวกัน ที่เขียนและระบายโดยปากกาแท่งเดียวกันจำนวน 15 ยี่ห้อ ตัวอย่างจากการเขียนใช้ SW1-SW15 และ ตัวอย่างจากการระบายใช้ S1-S15 ซึ่งจะนำ score ของภาพ TLC ทั้ง 135 คู่ ที่แสดงในภาคผนวก ง.1 และ ภาคผนวก ง.2 มาวิเคราะห์ผลตามเกณฑ์การพิจารณา ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้แสดงผลดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการเปรียบเทียบภาพที่อยู่บนแผ่น TLC แผ่นเดียวกัน

ผลการวิเคราะห์	จำนวน	ตัวอย่างจากการเขียน		ตัวอย่างจากการระบาย	
		จำนวนภาพที่เปรียบเทียบ (คู่)	%	จำนวนภาพที่เปรียบเทียบ (คู่)	%
เป็นปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินชนิดเดียวกัน		95	70.4	83	61.5
ยังไม่สามารถจำแนกชนิดได้		40	29.6	51	37.8
เป็นปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินต่างชนิดกัน		0	0	1	0.7

5.5 ผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบภาพที่อยู่บนแผ่น TLC ต่างแผ่นกัน

การวิเคราะห์จะเปรียบเทียบภาพ TLC 135 คู่ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบภาพ TLC ที่อยู่บนแผ่น TLC ต่างแผ่นกัน ที่เขียนและระบายโดยปากกาแท่งเดียวกันจำนวน 5 ยี่ห้อ ซึ่งจะนำ score ของภาพ TLC ทั้ง 135 คู่ ที่แสดงในภาคผนวก ง.3 และ ภาคผนวก ง.4 มาวิเคราะห์ผลตามเกณฑ์การพิจารณา ซึ่งจากการวิเคราะห์ได้แสดงผลดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการเปรียบเทียบภาพที่อยู่บนแผ่น TLC ต่างแผ่นกัน

ผลการวิเคราะห์	จำนวน		ตัวอย่างจากการเขียน		ตัวอย่างจากการระบาย	
	จำนวนภาพที่เปรียบเทียบ (คู่)	%	จำนวนภาพที่เปรียบเทียบ (คู่)	%	จำนวนภาพที่เปรียบเทียบ (คู่)	%
เป็นปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินชนิดเดียวกัน	25	18.5	9	6.7		
ยังไม่สามารถจำแนกชนิดได้	42	31.1	120	88.9		
เป็นปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินต่างชนิดกัน	68	50.4	6	4.4		

5.6 เปรียบเทียบความเหมือนความแตกต่างของปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน 25 ยี่ห้อ

การวิเคราะห์จะเปรียบเทียบภาพ TLC 50 คู่ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบภาพ TLC ที่อยู่บนแผ่น TLC แผ่นเดียวกัน ที่เขียนและระบายโดยปากกาต่างแท่งกันจำนวน 25 ยี่ห้อ ซึ่งจะนำ score ของภาพ TLC ทั้ง 50 คู่ มาวิเคราะห์ผลตามเกณฑ์การพิจารณา ซึ่งจากการวิเคราะห์ที่แสดงในภาคผนวก ง.7 ได้แสดงผลตามตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ผลการเปรียบเทียบปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน 25 ยี่ห้อ

ผลการวิเคราะห์	จำนวน		ตัวอย่างจากการเขียน		ตัวอย่างจากการระบาย	
	จำนวนภาพที่เปรียบเทียบ (คู่)	%	จำนวนภาพที่เปรียบเทียบ (คู่)	%	จำนวนภาพที่เปรียบเทียบ (คู่)	%
เป็นปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินชนิดเดียวกัน	5	10.0	5	10.0	5	10.0
ยังไม่สามารถจำแนกชนิดได้	27	54.0	44	2.0	44	2.0
เป็นปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินต่างชนิดกัน	18	36.0	1	88.0	1	88.0

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาเปรียบเทียบหมึกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินที่เขียนลงบนเอกสาร ด้วยการใช้เทคนิค TLC และการวิเคราะห์ภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัวอย่างปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินทั้งหมด 28 ยี่ห้อ เตรียมตัวอย่างโดยการเขียนและระบายลงบนกระดาษ ผลการศึกษาครั้งนี้อธิบายได้จากการทดลอง 2 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ในขั้นแรกซึ่งศึกษาโดยเทคนิค TLC ในขั้นตอนนี้ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการหาตัวทำละลายที่จะนำมาสกัดน้ำหมึกออกจากกระดาษ ตัวทำละลายส่วนใหญ่ที่นำมาทดสอบสามารถสกัดน้ำหมึกออกมาได้แต่จะต่างกันตรงความเข้มข้นของน้ำหมึกที่สกัดออกมาเท่านั้น ในการทดลองพบว่า ethyl acetate, *n*-butanol, pyridine และ methanol สกัดออกมาได้ตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูงที่สุดจากกลุ่มของตัวทำละลายทั้ง 11 ชนิดที่นำมาทดลอง ซึ่งเมื่อนำมาทำ TLC ก็ให้ความคมชัดและการแยกตัวอย่างใกล้เคียงกัน ในการทดลองนี้เลือกใช้ methanol ในการสกัดตัวอย่างด้วยเหตุผลคือ methanol มีกลิ่นฉุนน้อย และเป็นพิษน้อยที่สุด และได้มีการศึกษาเฟสเคลื่อนที่สำหรับการทำ TLC ศึกษาทั้งหมด 5 ระบบ เฟสเคลื่อนที่ที่เลือกใช้ในการทดลองนี้คือ *n*-butanol : ethanol : H₂O (50 : 15 : 10, v/v/v) ซึ่งสามารถให้ chromatogram ที่ดีที่สุดจากทั้ง 5 ระบบที่นำมาทดสอบ มีการศึกษาเกี่ยวกับปริมาณ methanol ที่ใช้ในการสกัดตัวอย่างซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้คือ การสกัดตัวอย่างจากการเขียนจะใช้ methanol 10 μ l ต่อตัวอย่าง 1 ชิ้น ส่วนการสกัดตัวอย่างจากการเขียนใช้ methanol 150 μ l ต่อตัวอย่าง 1 ชิ้น จากผลการทดลองได้นำสภาวะที่ได้ทั้งหมดมาใช้ในการทำ TLC เพื่อศึกษาตัวอย่างจากการเขียนและการระบายทั้ง 28 ยี่ห้อ เมื่อได้ TLC chromatogram ก็นำมาสแกนด้วยเครื่องสแกนเนอร์

ส่วนในขั้นตอนของการนำภาพสแกนของ TLC chromatogram มาวิเคราะห์เปรียบเทียบความเหมือนความแตกต่าง ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ สามารถสรุปผลได้ดังนี้คือ เมื่อเปรียบเทียบการวิเคราะห์ของตัวอย่างที่เตรียมจากเขียนและการระบายพบว่า ตัวอย่างจากการเขียนสามารถวิเคราะห์ได้ถูกต้องมากกว่าการระบายทั้งการวิเคราะห์บน TLC แผ่นเดียวกันและต่างแผ่นกัน ผลการทดลองดังตารางที่ 16 อาจเป็นเพราะในการเขียนหมึกปากกาลงบนกระดาษนั้นมีความสม่ำเสมอในการเขียนไม่มีการซ้อนทับกันของเส้นหมึก ทำให้ในส่วนของสารสี (dyes and pigments) สามารถ

กระจายตัวได้ดีในสารละลายที่ใช้สกัด ส่วนตัวอย่างจากการระบายนั้นมีการเขียนทับกันของเส้นหมึกเข้าไปมาอาจทำให้สารสีเกิดการจับตัวกัน เมื่อสกัดออกมาจะทำให้สารสีกระจายตัวได้ไม่ดีในตัวทำละลายที่ใช้สกัด ทำให้เมื่อนำมาทำ TLC ได้ chromatogram ที่ไม่สม่ำเสมอส่งผลต่อความถูกต้อง

จากผลการทดลองมีข้อสรุปอีกข้อว่าการวิเคราะห์ตัวอย่างที่อยู่บนแผ่น TLC เดียวกันนั้นมีความถูกต้องมากกว่าการวิเคราะห์ตัวอย่างที่อยู่บนแผ่น TLC ต่างแผ่นกัน ทั้งจากการเขียนและการระบายน ผลดังตารางที่ 16 การวิเคราะห์บนแผ่น TLC เดียวกันนั้นมีสถานะทุกอย่างเหมือนกัน ทำในเวลาเดียว ระยะเวลาในการทำเท่ากัน การเคลื่อนที่ของตัวทำละลายเท่ากัน จึงทำให้ผลการทดลองมีความถูกต้องมากกว่าการวิเคราะห์บน TLC ต่างแผ่นกัน

และสำหรับการเปรียบเทียบปากกาลูกกลิ้งสีน้ำเงินเขียนบนกระดาษ 25 ยี่ห้อพบว่า เป็นปากกาเขียนเหมือนกัน 10 % เป็นปากกาคณะยี่ห้ออื่น 36 % และยังไม่สามารถระบุได้ 54% ทั้งนี้ในการทดลองแยกความเหมือน และความแตกต่างของปากกาได้ไม่ถึง 50 % ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าตัวอย่างหมึกปากกาลูกกลิ้งสีน้ำเงินที่ใช้โดยทั่วไปมีส่วนประกอบของหมึกปากกาใกล้เคียงกันหรือบางยี่ห้ออาจใช้หมึกปากกาที่มาจากแหล่งผลิตเดียวกัน

ตามตารางที่ 16 ผลการวิเคราะห์หมึกปากกาลูกกลิ้งสีน้ำเงินที่เขียนและระบายบนกระดาษ

วิธีการเปรียบเทียบ ตัวอย่าง ผลการแยก ความแตกต่างของ ยี่ห้อปากกา	ปากกาแท่งเดียวกัน				ปากกาต่างแท่งกัน	
	แผ่นเดียวกัน (15 ยี่ห้อ)		ต่างแผ่นกัน (5 ยี่ห้อ)		แผ่นเดียวกัน (25 ยี่ห้อ)	
	เขียน	ระบาย	เขียน	ระบาย	เขียน	ระบาย
เป็นปากกาเขียนเหมือนกัน(%)	70.4	61.5	18.5	6.7	10.0	10.0
เป็นปากกาต่างยี่ห้อกัน (%)	0	0.7	50.4	4.4	36.0	2.0
ไม่สามารถสรุปได้ (%)	29.6	37.8	31.1	88.9	54.0	88.0
ความถูกต้อง (%)	70.4	61.5	18.5	6.7	—	—

การศึกษาในครั้งนี้สามารถนำไปใช้วิเคราะห์ปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน ที่ใช้เขียนบนเอกสาร ที่ต้องสงสัยว่าเป็นแท่งเดียวกันหรือไม่ได้โดยวิธีง่ายๆ โดยใช้เทคนิค TLC และการวิเคราะห์ภาพ ด้วยโปรแกรม ซึ่งสามารถนำวิธีนี้ไปปรับใช้เพื่อให้เกิดประโยชน์ในทางนิติวิทยาศาสตร์ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับการเปรียบเทียบหมึกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษา ตั้งแต่การเตรียมตัวอย่างไปจนถึงการวิเคราะห์ผลเปรียบเทียบ จากการศึกษาดังกล่าวผู้ทำวิจัยจึงมี ข้อเสนอแนะสำหรับผู้สนใจจะศึกษา ดังนี้คือ

1. การเปรียบเทียบหมึกปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงินควรทำในแผ่น TLC เดียวกัน เพื่อควบคุม การทดลองให้อยู่ภายใต้สภาวะเดียวกัน ป้องกันความคลาดเคลื่อน
2. ภาพสแกน TLC chromatogram ที่นำมาตัด ควรตัดให้มีความกว้างและความยาวของ ภาพที่นำมาเปรียบเทียบเท่ากันทั้งสองภาพเพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อน เมื่อวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม
3. การศึกษาครั้งต่อไปในขั้นตอนของการเตรียมตัวอย่างอาจมีการควบคุมน้ำหนักมือที่ ใช้เขียนให้เท่ากันเพื่อป้องกันการคลาดเคลื่อนของการลงน้ำหมึกที่แตกต่างกันในแต่ละจุด
4. การศึกษาควรทราบส่วนประกอบที่แน่นอนของหมึกปากกาถูกลิ้น เพื่อยืนยันความ ถูกต้องในการวิเคราะห์เปรียบเทียบ

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

กฤษณา แสนปลื้ม. “การศึกษาการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของหมึกตามอายุหมึก.” วิทยานิพนธ์
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (นิติวิทยาศาสตร์) มหาวิทยาลัยมหิดล, 2005.

ปิยวรรณ แคนยุกต์ม ชูชาติ ธรรมเจริญ และสนอง เอกสิทธิ์. “การวิเคราะห์หมึกปากกาถูกลิ้นด้วย
เทคนิคเอทีอาร์เอฟทีไออาร์ไมโครสเปกโทรสโกปี.” การประชุมวิชาการครั้งที่ 15 คณะ
วิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2007.

พิสมัย หาญมงคลพิพัฒน์. หลักสถิติ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2550.

อรอุษา สรวารี. สารเคลือบผิว (สี วาร์นิช และแล็กเกอร์). พิมพ์ครั้งที่ 1 : พิมพ์ที่โรงพิมพ์ จุฬาลง
กรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. แนะนำสู่การประมวลผลภาพดิจิทัล (Introduction to Digital Image
Processing). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้เมื่อ 1 มีนาคม 2553. เข้าถึงได้จาก
<http://fivedots.coe.psu.ac.th/~montri/Teaching/image/chap1.pdf>

มหาวิทยาลัยรามคำแหง. Preparation thin-layer chromatography. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้เมื่อ 25
กุมภาพันธ์ 2553. เข้าถึงได้จาก
<http://e-book.ram.edu/e-book/c/CM328/CM328-5.pdf>.

ภาษาอังกฤษ

Ashwini Kher, Mary Mulholland, Elinore Green and Brian Reedy. “Forensic classification of
ballpoint pen inks using high performance liquid chromatography and infrared
spectroscopy with principal components analysis and linear discriminant analysis.”
Vibrational Spectroscopy 40 (2006) : 270-277.

Brunelle, R. L. & Reed, R. W. Forensic examination of ink and paper. Illinois : Charles Thomas,
1984.

Claude Roux, Michelle Novotny, Ian Evans and Chris Lennard. “A study to investigate the
evidential value of blue and black ballpoint pen inks in Australia.” *Forensic science
international* 101 (1999) : 167-176.

- Craig D. Adam, Sarah L. Sherratt and Vladimir L. Zholobenko. "Classification and individualization of black ballpoint pen inks using principal component analysis of UV-vis absorption spectra." *Forensic science International* 174 (2008) : 16-25.
- Djavanshir Djozan, Tahmineh Baheri and Ghader Karimian. "Forensic discrimination of blue ballpoint pen inks based on thin layer chromatography and image analysis." *Forensic science international* 179 (2008) : 199-205.
- Hu-sheng Chen. "Analyses of four ball point pen inks and two dyes by thin-layer chromatography with fluorescence detection and matrix assisted laser desorption time-of-flight and electrospray ionization mass spectrometry." *Forensic science journal*, 2005 : 15-27.
- Nicholas C. Thanasoulia, Nikolaos A. Parisi and Nicholas P. Evmiridis. "Multivariate chemometrics for the forensic discrimination of blue ball-point pen inks based on their vis spectra." *Forensic science international* 138 (2003) : 75-85.
- Wenxuan He, Robert Shanks and Gandara Amarasinghe. "Analysis of additives in polymers by thin-layer chromatography couple with fourier transform-infrared microscopy." *Vibration spectroscopy* 30 (2002) : 147-156.
- Xiang-Feng Wang, Jing Yu, Meng-Xia Xie, Ya-Tong Yao and Jie Han. "Identification and dating of the fountain pen ink entries on documents by ion-pairing high-performance liquid chromatography." *Forensic science international* 180 (2008) : 43-39.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

สัญลักษณ์

ภาคผนวก ก

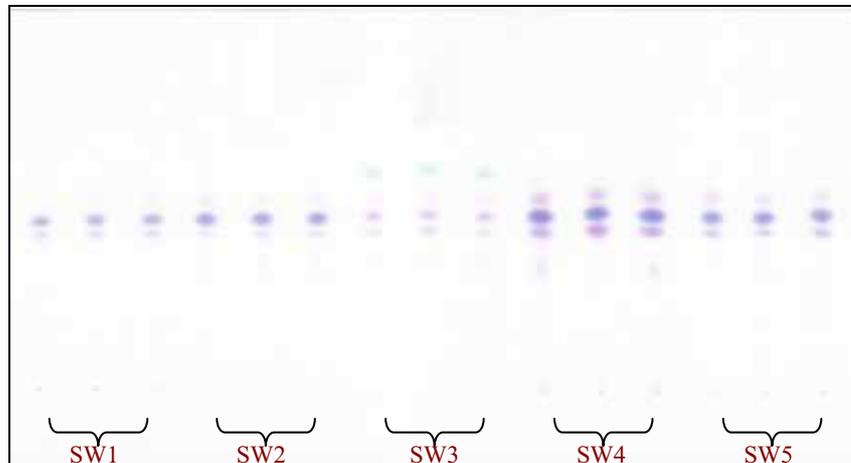
สัญลักษณ์

cm	Centimeter
hr	Hour
min	Minute
ml	Milliter
mm	Millimeter
RGB	Red Green Blue
r^2	Coefficient of determination
S	ตัวอย่างที่เตรียมจากการระบายน
SW	ตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียน
TLC	Thin-layer chromatography
UV	Ultraviolet
v	Volume
w	Weight
μ l	Micro liter
$^{\circ}$ C	Degree Celsius
%	Percentage
>	Greater-than
<	Less-than
=	Equal
\geq	Greater-than or Equal
\leq	Less-than or Equal

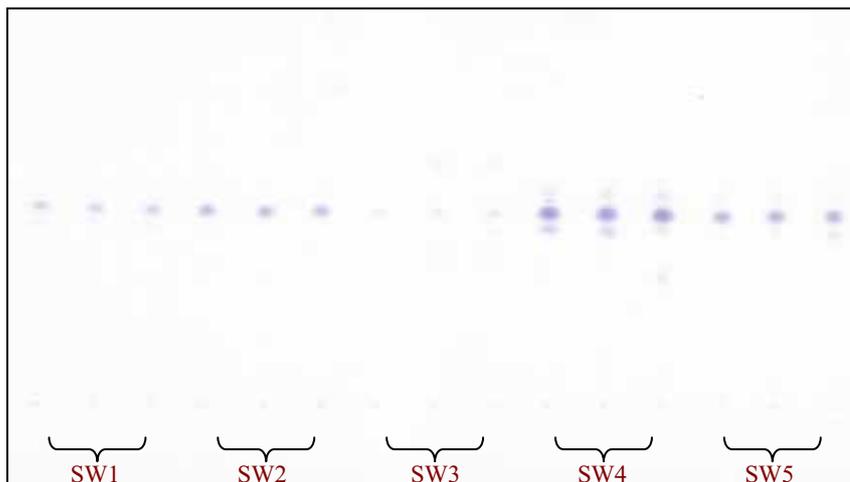
ภาคผนวก ข
TLC chromatogram

ภาพผนวก ข.1

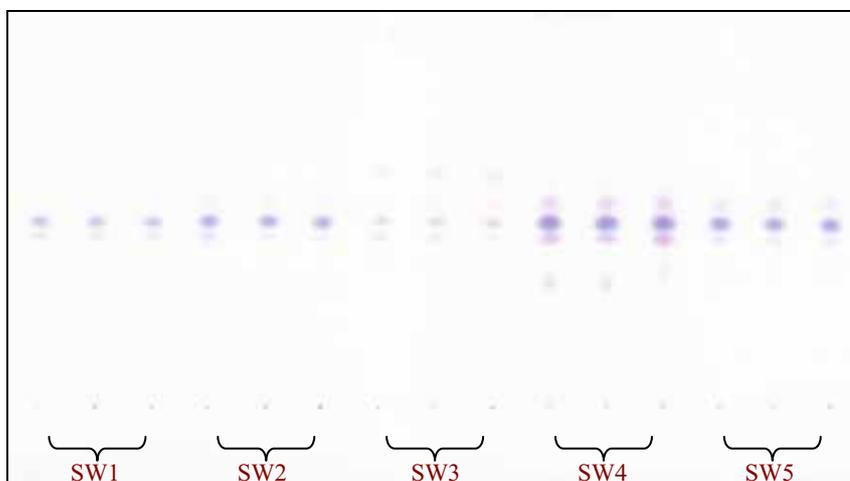
TLC chromatogram ของปากกาถูกล้างสีน้ำเงิน 28 ชนิดที่เตรียมโดยการเขียน (SW1-SW28) ชุด I,II,III



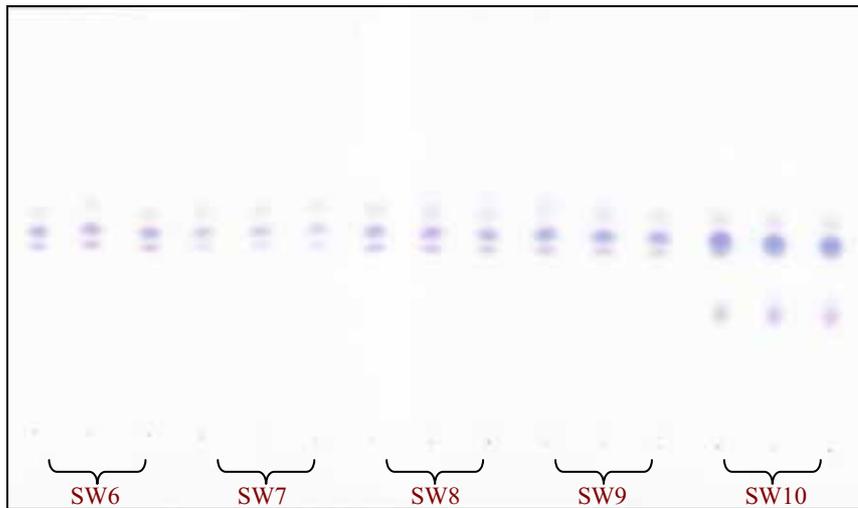
SW1-SW5 ชุด I



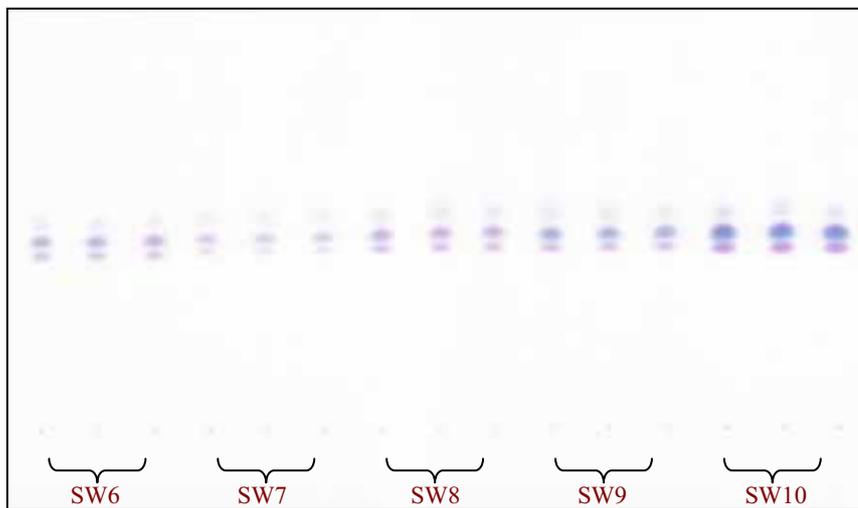
SW1-SW5 ชุด II



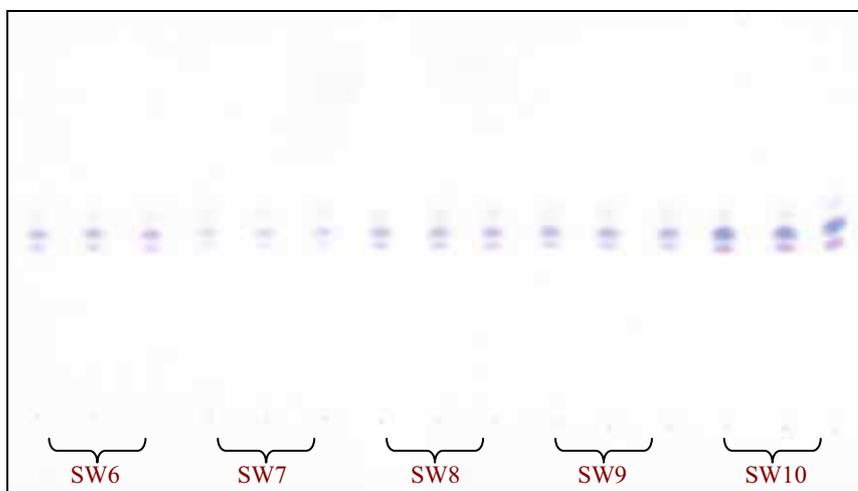
SW1-SW5 ชุด III



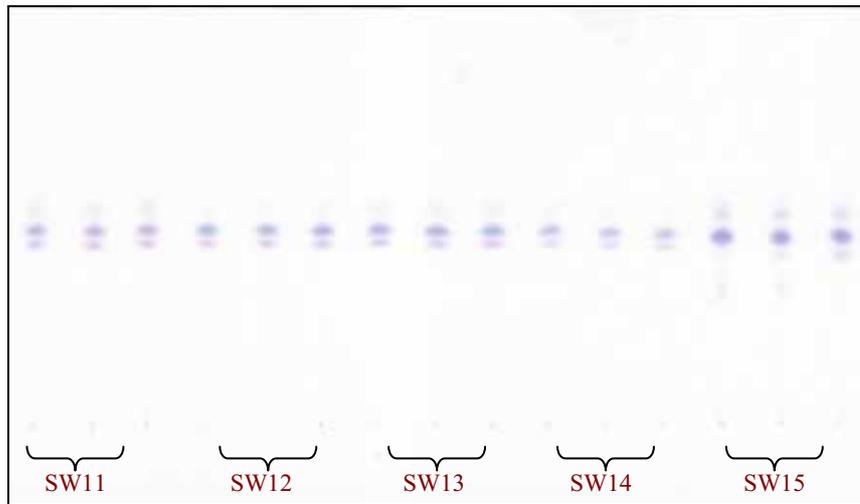
SW6-SW10 ชุด I



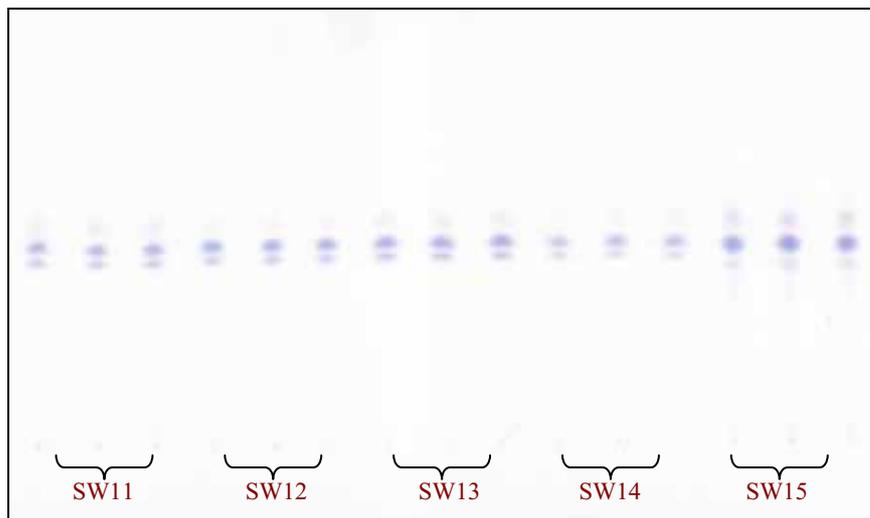
SW6-SW10 ชุด II



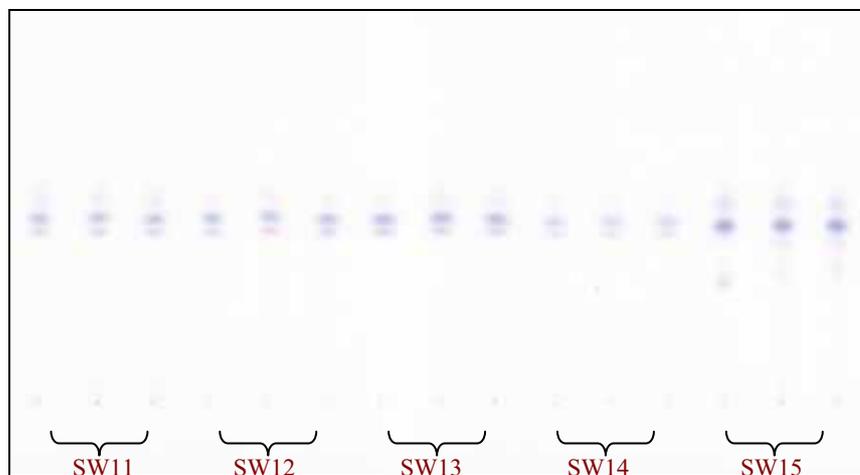
SW6-SW10 ชุด III



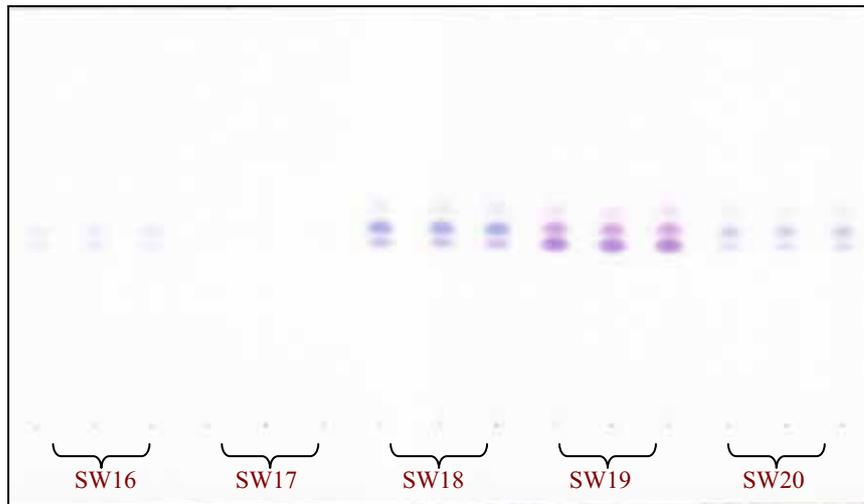
SW11-SW15 ឆ្នាំ I



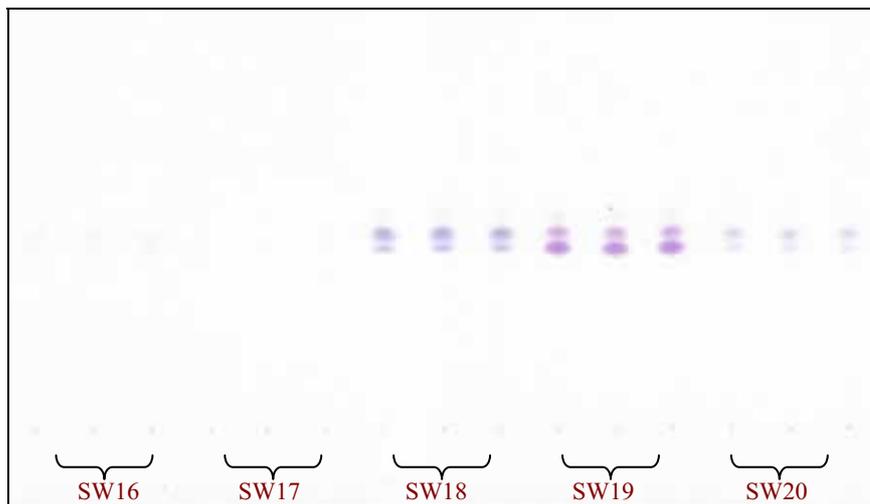
SW11-SW15 ឆ្នាំ II



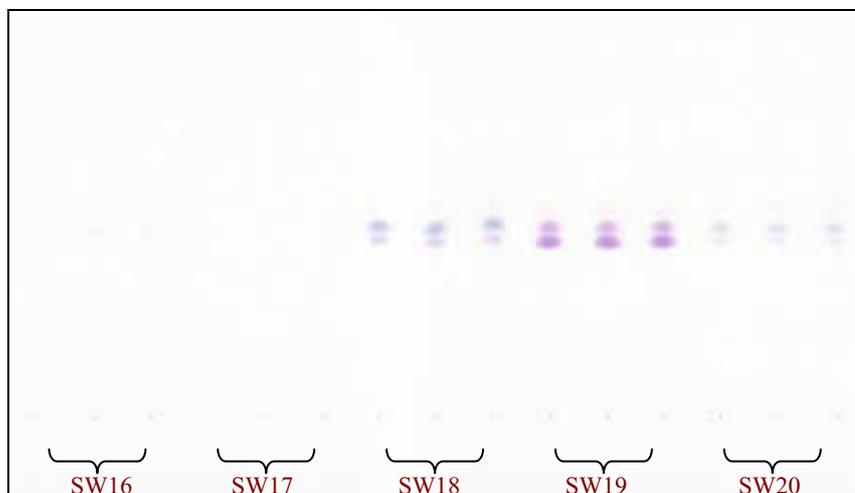
SW11-SW15 ឆ្នាំ III



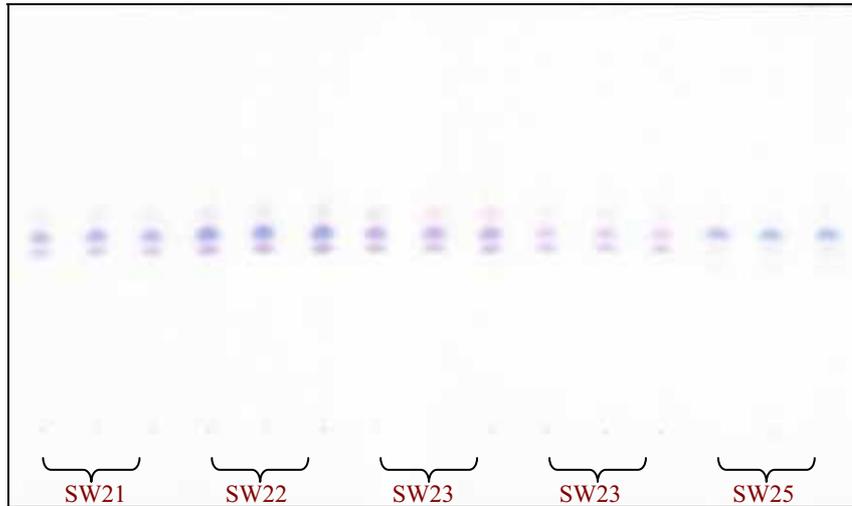
SW16-SW20 ក្រុម I



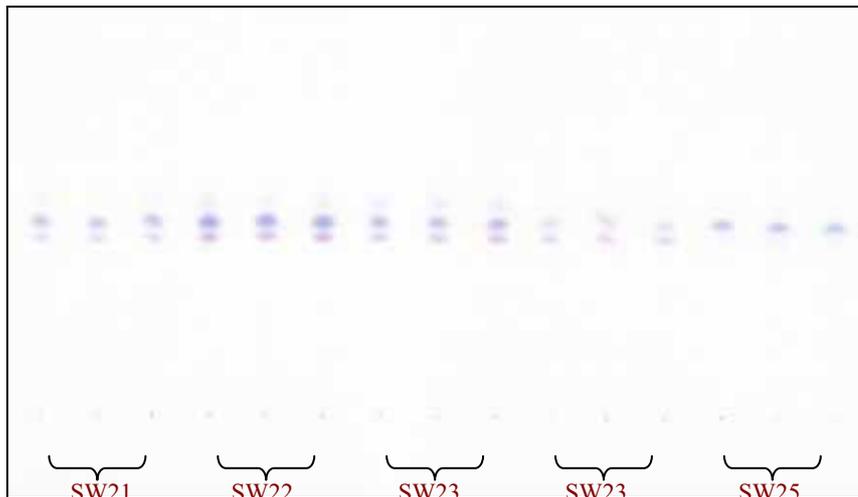
SW16-SW20 ក្រុម II



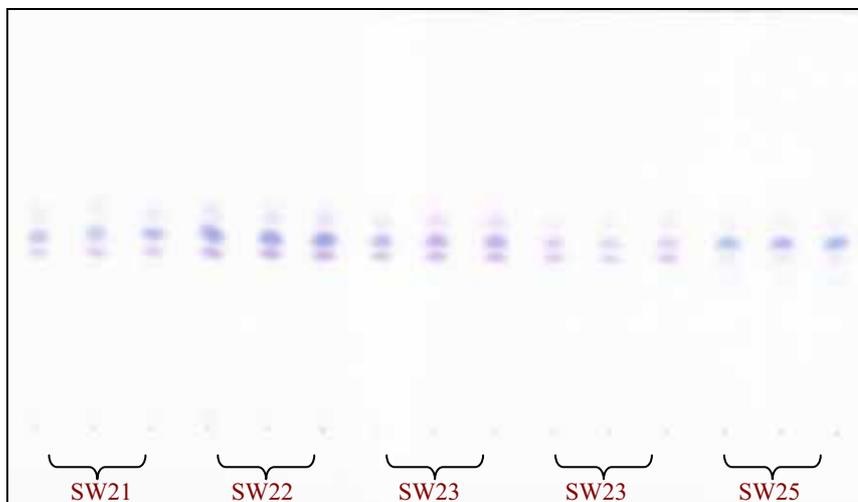
SW16-SW20 ក្រុម III



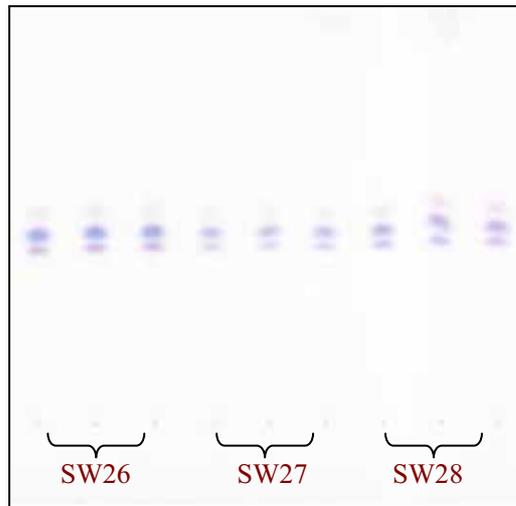
SW21-SW25 ឆ្នាំ I



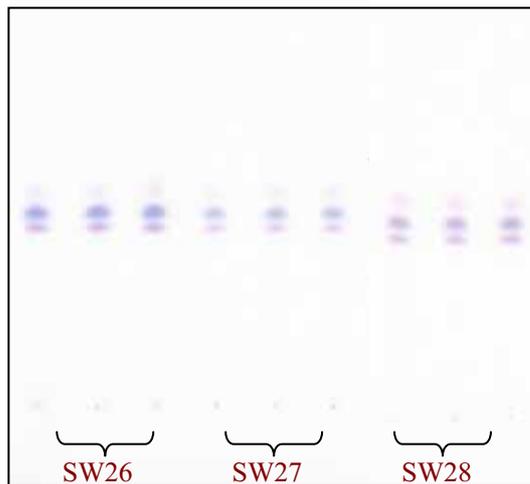
SW21-SW25 ឆ្នាំ II



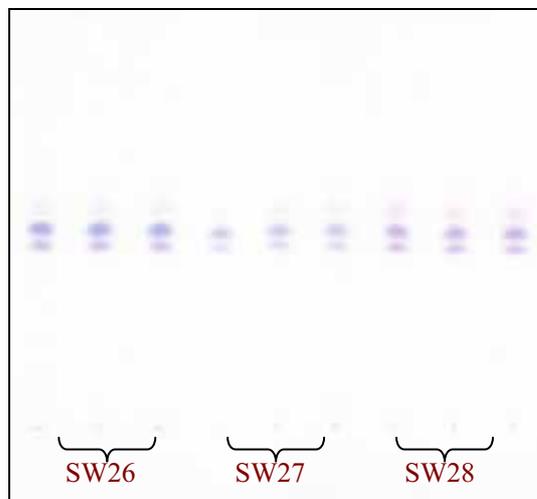
SW21-SW25 ឆ្នាំ III



SW26-SW28 ក្រុម I



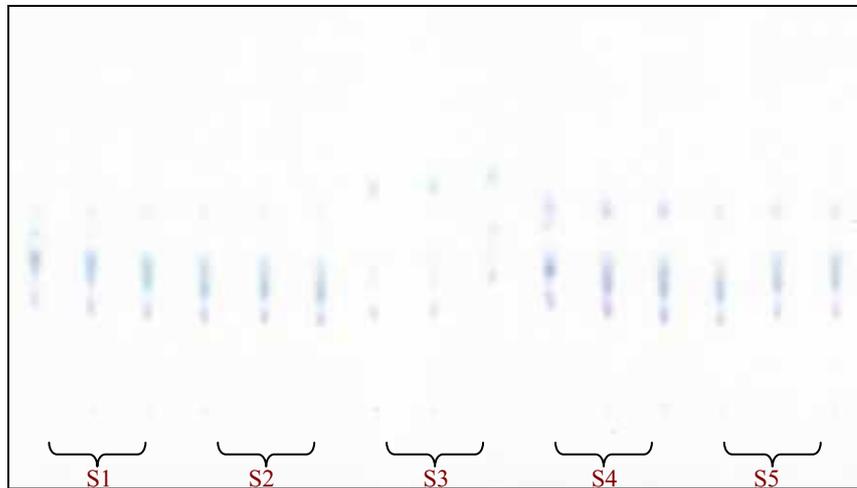
SW26-SW28 ក្រុម II



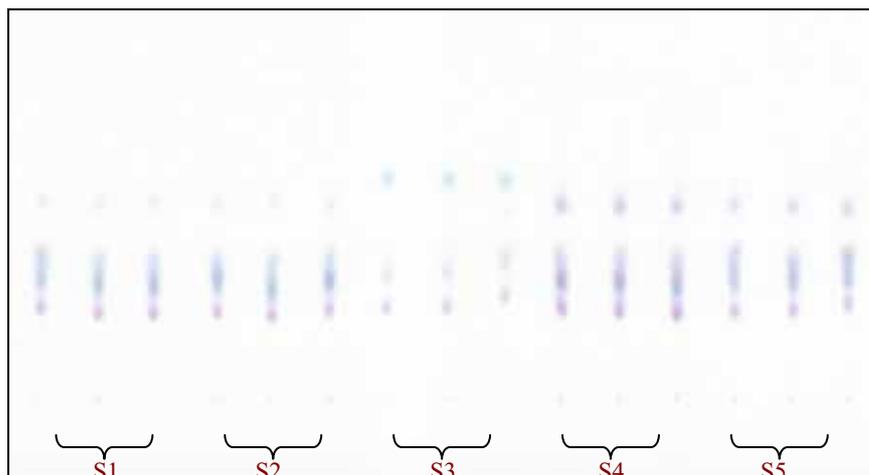
SW26-SW28 ក្រុម III

ภาพผนวก ข.2

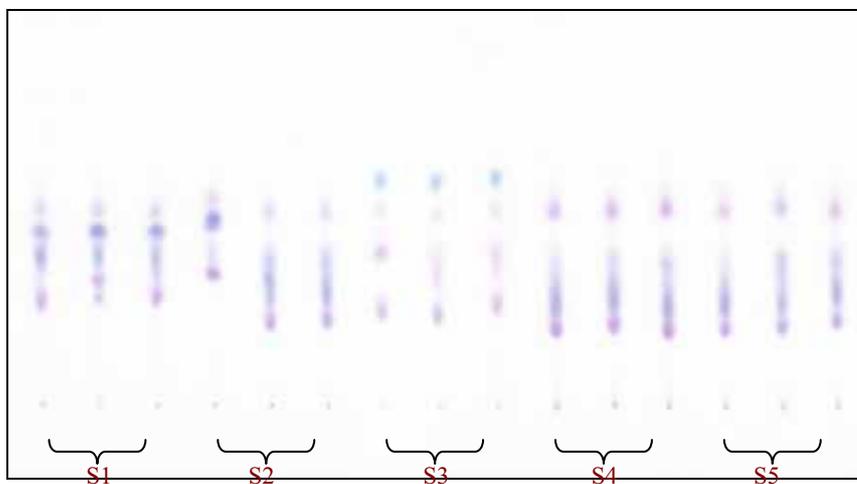
TLC chromatogram ของปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน 28 ชนิดที่เตรียมโดยการระบาย (S1-S28) ชุด I,II,III



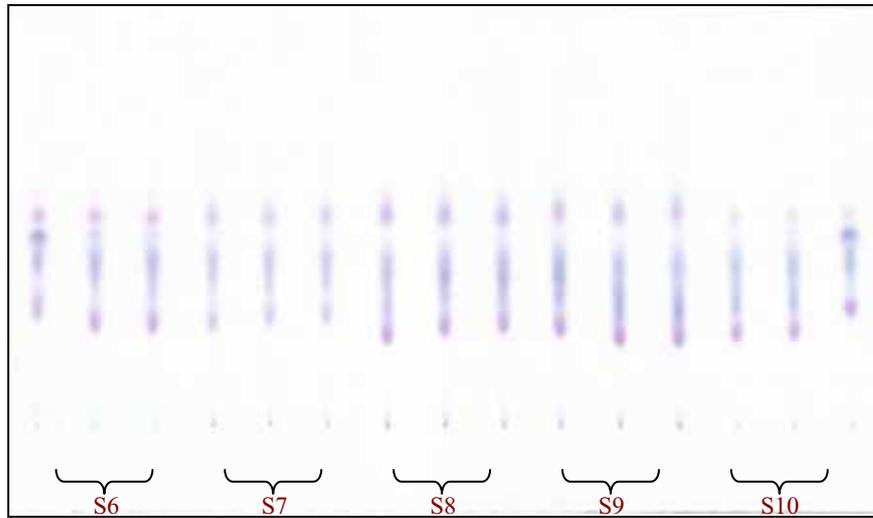
S1-S5 ชุด I



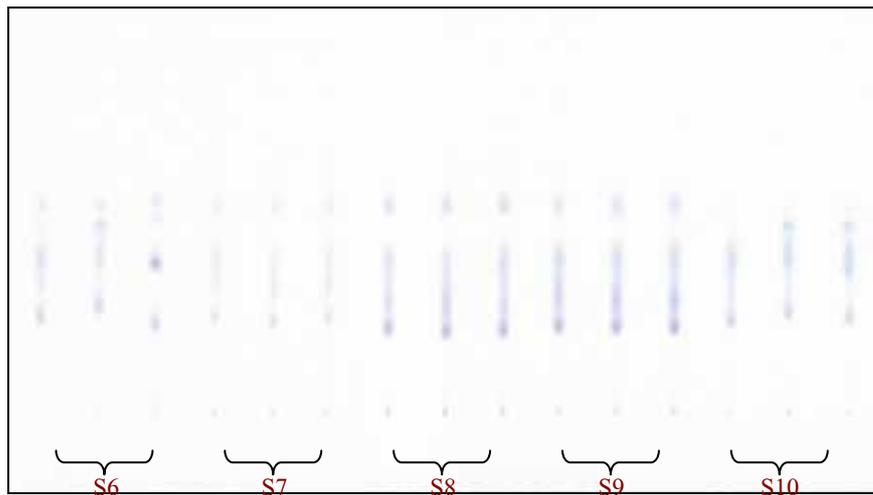
S1-S5 ชุด II



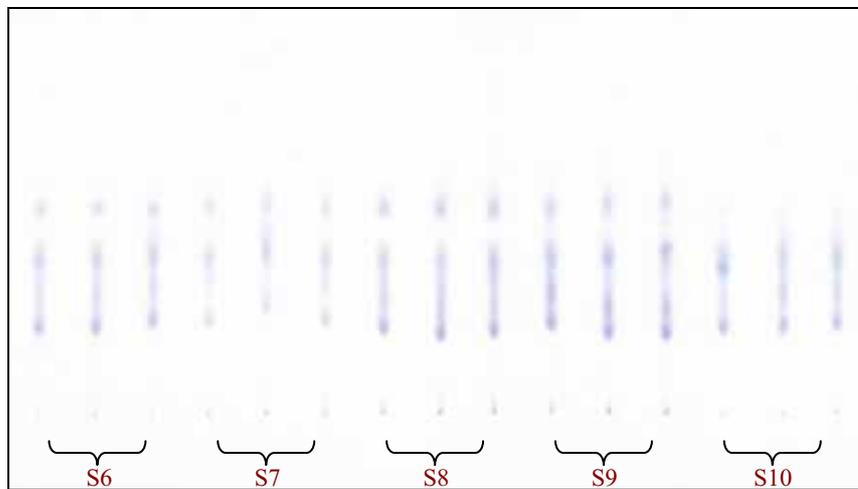
S1-S5 ชุด III



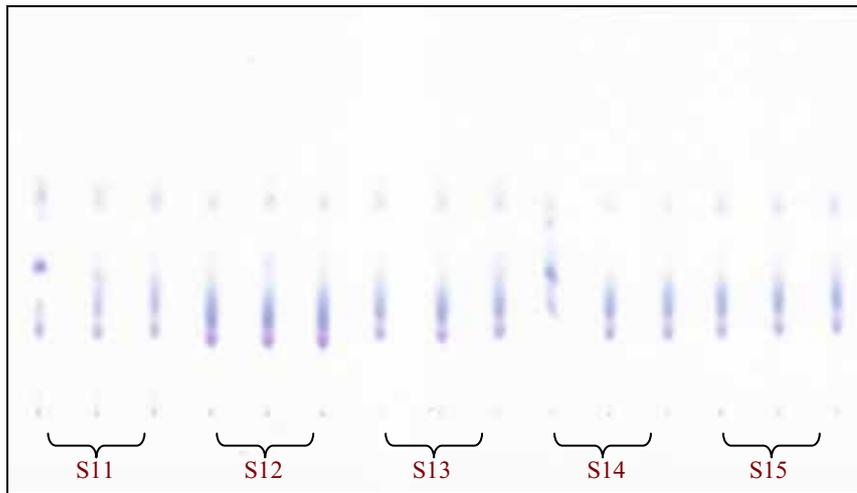
S6-S10 ក្រុម I



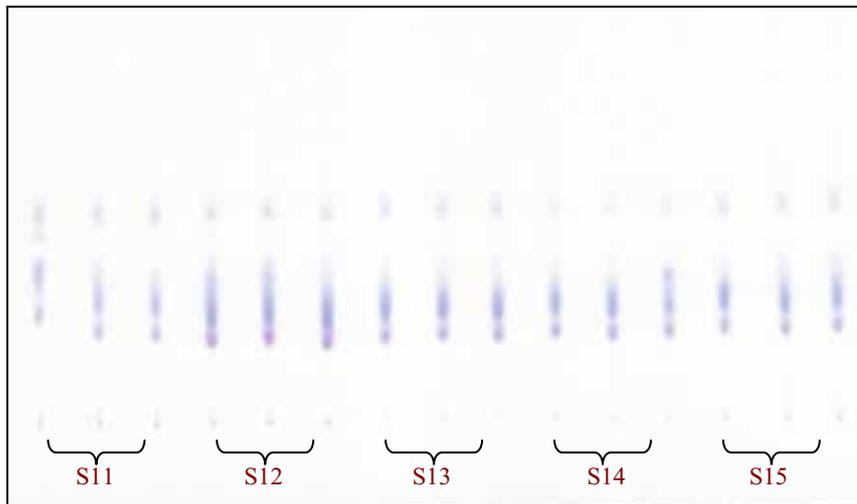
S6-S10 ក្រុម II



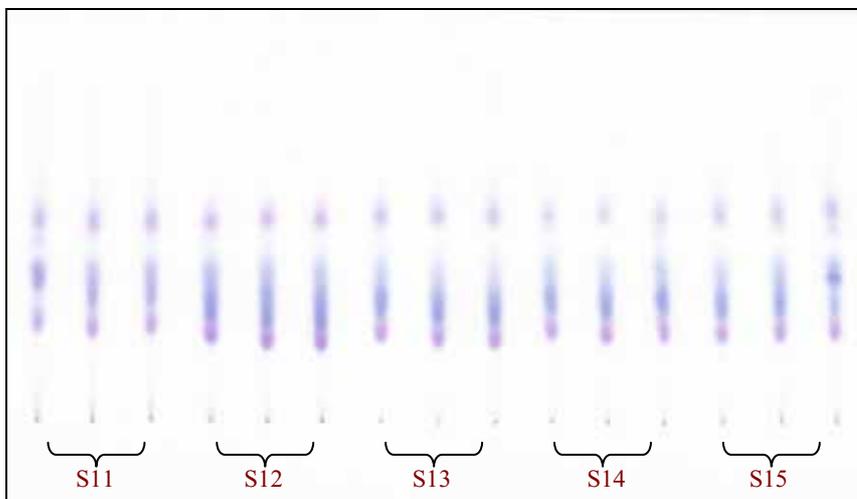
S6-S10 ក្រុម III



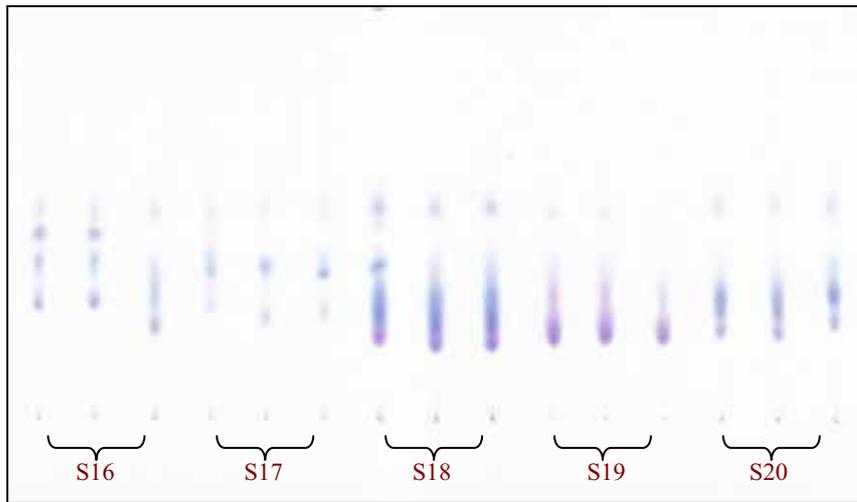
S11-S15 ชุด I



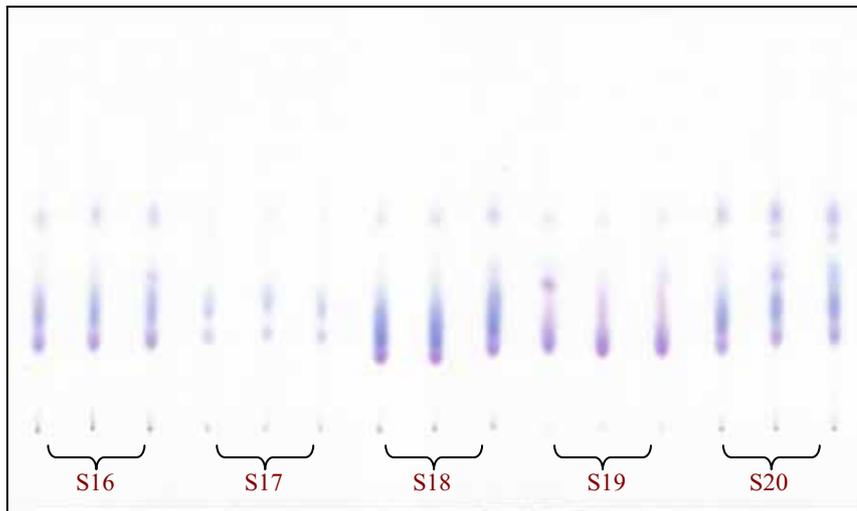
S11-S15 ชุด II



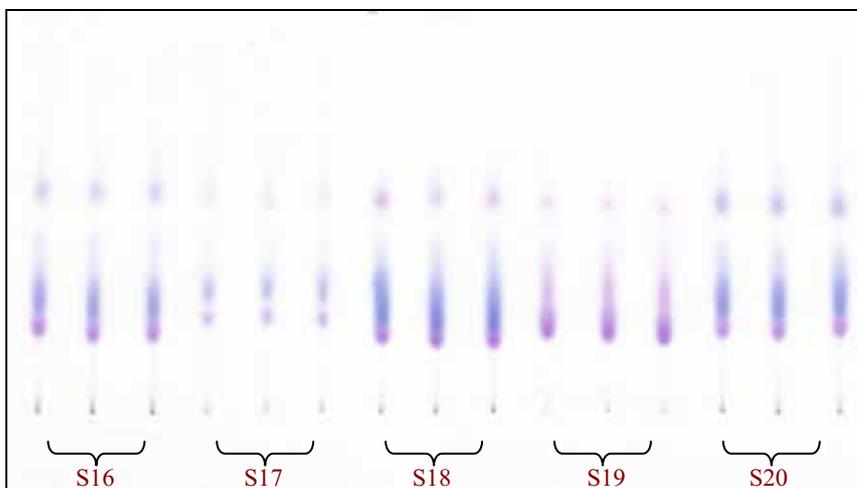
S11-S15 ชุด III



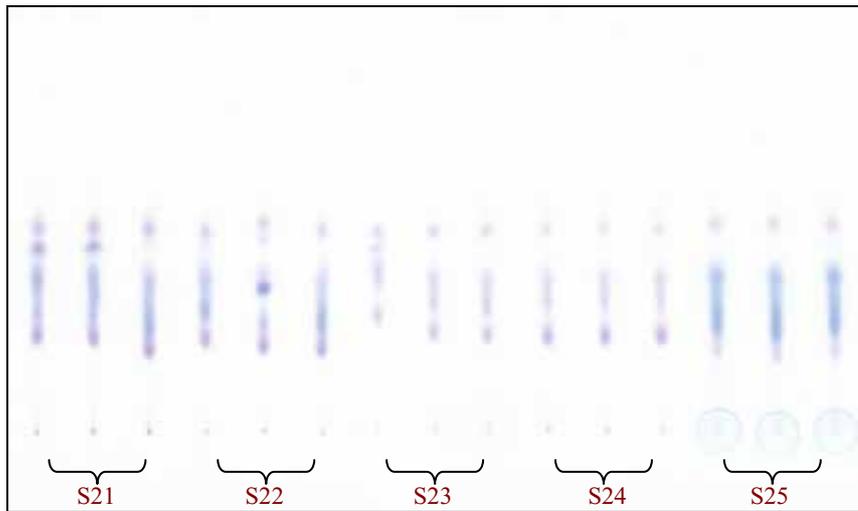
S16-S20 ក្រុម I



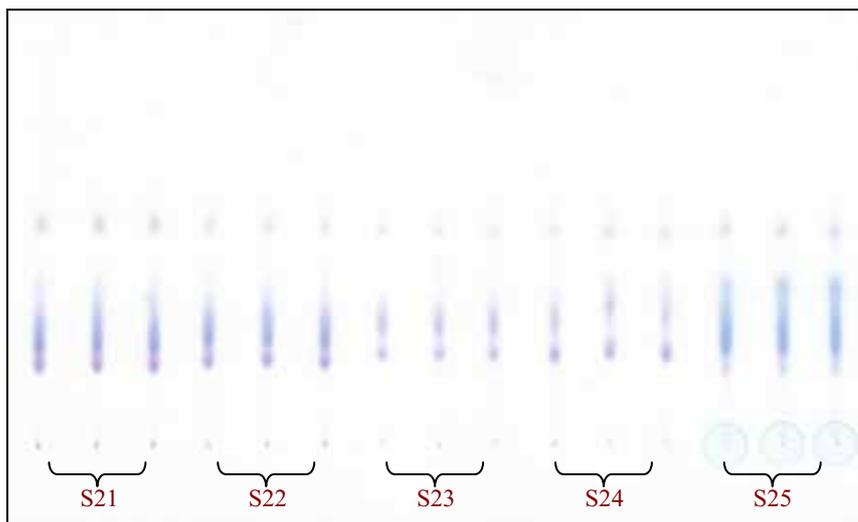
S16- S20 ក្រុម II



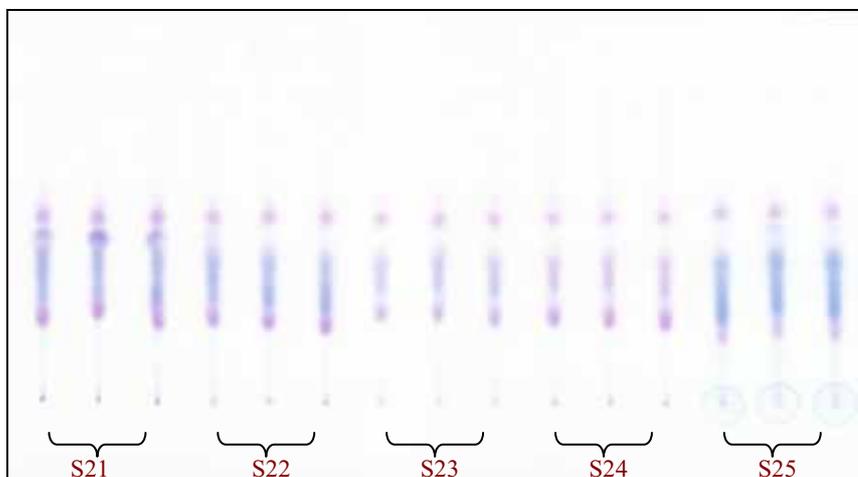
S16- S20 ក្រុម III



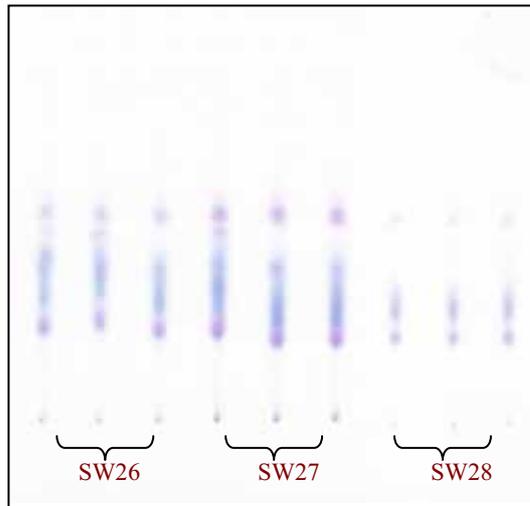
S21-S25 ក្រុម I



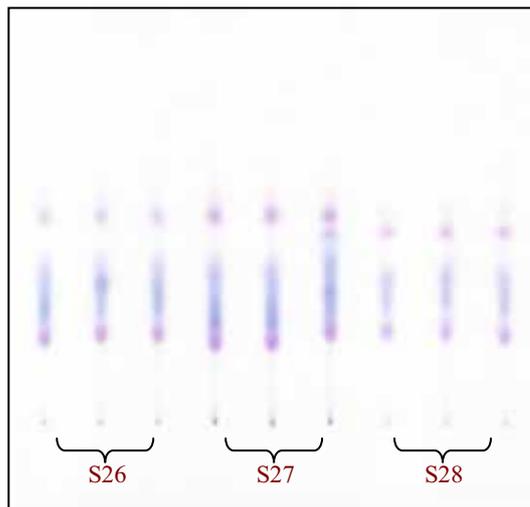
S21-S25 ក្រុម II



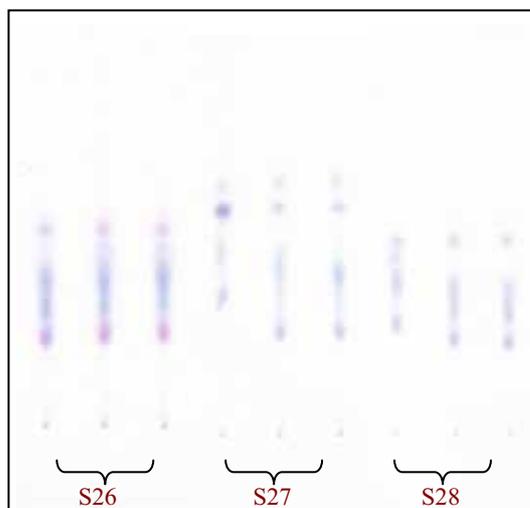
S21-S25 ក្រុម III



S26-S28 ชุด I



S26-S28 ชุด II



S26-S28 ชุด III

ภาคผนวก ค

การคำนวณ score การเปรียบเทียบตัวอย่าง

ภาคผนวก ค

การคำนวณ score การเปรียบเทียบตัวอย่าง

ตัวอย่างการคำนวณ score ของการเปรียบเทียบภาพ TLC SW22-2-II และ ภาพ TLC SW23-2-II สมการที่ใช้คำนวณคือ

$$\text{Score} = \frac{W1 \times Rr^2 + W2 \times Gr^2 + W3 \times Br^2}{W1 + W2 + W3}$$

Rr^2 , Gr^2 และ Br^2 หาได้จากกราฟความสัมพันธ์ของตัวอย่าง ในภาพที่ และ ตามลำดับ W เป็นน้ำหนักของทั้ง 3 สี ซึ่งในที่นี้จะกำหนดให้แต่ละสีมีค่าเป็น 1

จะได้สมการในการคำนวณดังนี้

$$\text{Score} = \frac{Rr^2 + Gr^2 + Br^2}{3}$$

$$\begin{aligned} \text{Score} &= \frac{0.8013 + 0.9220 + 0.9446}{3} \\ &= 0.8893 \end{aligned}$$

ภาคผนวก ง

แสดง score การเปรียบเทียบตัวอย่างปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน

ภาพผนวก ง.1

แสดง score การเปรียบเทียบตัวอย่างจากการเขียนโดยปากกาแท่งเดียว
บนภาพ TLC แผ่นเดียวกัน ชุด I,II,III

ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score	ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score	ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score
SW1-1,2-I	0.98	SW1-1,2-II	0.97	SW1-1,2-III	0.60
SW1-1,3-I	0.92	SW1-1,3-II	0.98	SW1-1,3-III	0.80
SW1-2,3-I	0.96	SW1-2,3-II	0.98	SW1-2,3-III	0.87
SW2-1,2-I	0.99	SW2-1,2-II	0.96	SW2-1,2-III	0.98
SW2-1,3-I	0.99	SW2-1,3-II	0.96	SW2-1,3-III	0.95
SW2-2,3-I	0.99	SW2-2,3-II	0.97	SW2-2,3-III	0.97
SW3-1,2-I	0.87	SW3-1,2-II	0.88	SW3-1,2-III	0.94
SW3-1,3-I	0.97	SW3-1,3-II	0.83	SW3-1,3-III	0.85
SW3-2,3-I	0.87	SW3-2,3-II	0.90	SW3-2,3-III	0.94
SW4-1,2-I	0.87	SW4-1,2-II	0.98	SW4-1,2-III	0.99
SW4-1,3-I	0.98	SW4-1,3-II	0.92	SW4-1,3-III	0.98
SW4-2,3-I	0.93	SW4-2,3-II	0.96	SW4-2,3-III	0.98
SW5-1,2-I	0.99	SW5-1,2-II	0.98	SW5-1,2-III	0.99
SW5-1,3-I	0.94	SW5-1,3-II	0.87	SW5-1,3-III	0.95
SW5-2,3-I	0.93	SW5-2,3-II	0.88	SW5-2,3-III	0.97
SW6-1,2-I	0.89	SW6-1,2-II	0.96	SW6-1,2-III	0.95
SW6-1,3-I	0.89	SW6-1,3-II	0.91	SW6-1,3-III	0.96
SW6-2,3-I	0.81	SW6-2,3-II	0.95	SW6-2,3-III	0.95
SW7-1,2-I	0.95	SW7-1,2-II	0.95	SW7-1,2-III	0.92
SW7-1,3-I	0.84	SW7-1,3-II	0.88	SW7-1,3-III	0.89
SW7-2,3-I	0.92	SW7-2,3-II	0.92	SW7-2,3-III	0.89
SW8-1,2-I	0.95	SW8-1,2-II	0.90	SW8-1,2-III	0.95
SW8-1,3-I	0.86	SW8-1,3-II	0.83	SW8-1,3-III	0.96
SW8-2,3-I	0.95	SW8-2,3-II	0.97	SW8-2,3-III	0.98
SW9-1,2-I	0.95	SW9-1,2-II	0.99	SW9-1,2-III	0.96
SW9-1,3-I	0.87	SW9-1,3-II	0.95	SW9-1,3-III	0.96
SW9-2,3-I	0.97	SW9-2,3-II	0.97	SW9-2,3-III	0.99
SW10-1,2-I	0.95	SW10-1,2-II	0.98	SW10-1,2-III	0.99
SW10-1,3-I	0.89	SW10-1,3-II	0.99	SW10-1,3-III	0.58
SW10-2,3-I	0.98	SW10-2,3-II	0.99	SW10-2,3-III	0.63
SW11-1,2-I	0.98	SW11-1,2-II	0.78	SW11-1,2-III	0.97
SW11-1,3-I	0.97	SW11-1,3-II	0.80	SW11-1,3-III	0.97
SW11-2,3-I	0.96	SW11-2,3-II	0.88	SW11-2,3-III	0.96
SW12-1,2-I	0.99	SW12-1,2-II	0.97	SW12-1,2-III	0.95
SW12-1,3-I	0.98	SW12-1,3-II	0.87	SW12-1,3-III	0.97
SW12-2,3-I	0.99	SW12-2,3-II	0.92	SW12-2,3-III	0.90
SW13-1,2-I	0.96	SW13-1,2-II	0.99	SW13-1,2-III	0.95
SW13-1,3-I	0.96	SW13-1,3-II	0.93	SW13-1,3-III	0.95
SW13-2,3-I	0.99	SW13-2,3-II	0.93	SW13-2,3-III	1.00
SW14-1,2-I	0.95	SW14-1,2-II	0.97	SW14-1,2-III	0.85
SW14-1,3-I	0.95	SW14-1,3-II	0.97	SW14-1,3-III	0.94
SW14-2,3-I	0.93	SW14-2,3-II	0.98	SW14-2,3-III	0.92

ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score	ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score	ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score
SW15-1,2-I	0.96	SW15-1,2-II	0.98	SW15-1,2-III	0.96
SW15-1,3-I	0.95	SW15-1,3-II	0.99	SW15-1,3-III	0.96
SW15-2,3-I	0.96	SW15-2,3-II	0.99	SW15-2,3-III	0.99
SW16-1,2-I	0.84	SW16-1,2-II	0.85	SW16-1,2-III	0.93
SW16-1,3-I	0.68	SW16-1,3-II	0.81	SW16-1,3-III	0.93
SW16-2,3-I	0.82	SW16-2,3-II	0.87	SW16-2,3-III	0.98
SW17-1,2-I	0.67	SW17-1,2-II	0.78	SW17-1,2-III	0.94
SW17-1,3-I	0.49	SW17-1,3-II	0.79	SW17-1,3-III	0.56
SW17-2,3-I	0.68	SW17-2,3-II	0.80	SW17-2,3-III	0.72
SW18-1,2-I	0.95	SW18-1,2-II	0.98	SW18-1,2-III	0.95
SW18-1,3-I	0.89	SW18-1,3-II	0.99	SW18-1,3-III	0.85
SW18-2,3-I	0.92	SW18-2,3-II	0.99	SW18-2,3-III	0.73
SW19-1,2-I	0.95	SW19-1,2-II	0.98	SW19-1,2-III	0.98
SW19-1,3-I	0.93	SW19-1,3-II	0.96	SW19-1,3-III	0.95
SW19-2,3-I	0.98	SW19-2,3-II	0.97	SW19-2,3-III	0.98
SW20-1,2-I	0.91	SW20-1,2-II	0.96	SW20-1,2-III	0.96
SW20-1,3-I	0.75	SW20-1,3-II	0.89	SW20-1,3-III	0.95
SW20-2,3-I	0.80	SW20-2,3-II	0.93	SW20-2,3-III	0.94
SW21-1,2-I	0.94	SW21-1,2-II	0.95	SW21-1,2-III	0.93
SW21-1,3-I	0.91	SW21-1,3-II	0.97	SW21-1,3-III	0.93
SW21-2,3-I	0.98	SW21-2,3-II	0.92	SW21-2,3-III	0.96
SW22-1,2-I	0.97	SW22-1,2-II	0.97	SW22-1,2-III	0.91
SW22-1,3-I	0.93	SW22-1,3-II	0.99	SW22-1,3-III	0.83
SW22-2,3-I	0.95	SW22-2,3-II	0.97	SW22-2,3-III	0.97
SW23-1,2-I	0.96	SW23-1,2-II	0.97	SW23-1,2-III	0.97
SW23-1,3-I	0.95	SW23-1,3-II	0.87	SW23-1,3-III	0.96
SW23-2,3-I	0.98	SW23-2,3-II	0.93	SW23-2,3-III	0.99
SW24-1,2-I	0.85	SW24-1,2-II	0.81	SW24-1,2-III	0.74
SW24-1,3-I	0.61	SW24-1,3-II	0.80	SW24-1,3-III	0.85
SW24-2,3-I	0.86	SW24-2,3-II	0.70	SW24-2,3-III	0.91
SW25-1,2-I	0.96	SW25-1,2-II	0.91	SW25-1,2-III	0.99
SW25-1,3-I	0.90	SW25-1,3-II	0.85	SW25-1,3-III	0.99
SW25-2,3-I	0.93	SW25-2,3-II	0.97	SW25-2,3-III	0.99
SW26-1,2-I	0.94	SW26-1,2-II	0.99	SW26-1,2-III	0.99
SW26-1,3-I	0.87	SW26-1,3-II	0.99	SW26-1,3-III	0.98
SW26-2,3-I	0.98	SW26-2,3-II	0.99	SW26-2,3-III	0.99
SW27-1,2-I	0.96	SW27-1,2-II	0.99	SW27-1,2-III	0.89
SW27-1,3-I	0.98	SW27-1,3-II	0.99	SW27-1,3-III	0.89
SW27-2,3-I	0.98	SW27-2,3-II	0.99	SW27-2,3-III	0.97
SW28-1,2-I	0.62	SW28-1,2-II	0.96	SW28-1,2-III	0.95
SW28-1,3-I	0.86	SW28-1,3-II	0.96	SW28-1,3-III	0.92
SW28-2,3-I	0.84	SW28-2,3-II	0.99	SW28-2,3-III	0.98

หมายเหตุ

SW1-1,2-I หมายถึง ตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนของปากกาเคมีข้อที่ 1 โดยเปรียบเทียบซ้ำที่ 1 และ ซ้ำที่ 2 ใน TLC ชุด I

ภาพผนวก ง.2

แสดง score การเปรียบเทียบตัวอย่างจากการระบายโดยปากกาแท่งเดียว

บนภาพ TLC แผ่นเดียวกัน ชุด I,II,III

ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score	ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score	ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score
S1-1,2-I	0.81	S1-1,2-II	0.90	S1-1,2-III	0.91
S1-1,3-I	0.61	S1-1,3-II	0.87	S1-1,3-III	0.96
S1-2,3-I	0.88	S1-2,3-II	0.99	S1-2,3-III	0.94
S2-1,2-I	0.98	S2-1,2-II	0.92	S2-1,2-III	0.26
S2-1,3-I	0.92	S2-1,3-II	0.96	S2-1,3-III	0.22
S2-2,3-I	0.95	S2-2,3-II	0.87	S2-2,3-III	0.98
S3-1,2-I	0.93	S3-1,2-II	0.96	S3-1,2-III	0.87
S3-1,3-I	0.47	S3-1,3-II	0.76	S3-1,3-III	0.91
S3-2,3-I	0.58	S3-2,3-II	0.83	S3-2,3-III	0.84
S4-1,2-I	0.80	S4-1,2-II	0.98	S4-1,2-III	0.96
S4-1,3-I	0.65	S4-1,3-II	0.94	S4-1,3-III	0.97
S4-2,3-I	0.92	S4-2,3-II	0.97	S4-2,3-III	0.93
S5-1,2-I	0.71	S5-1,2-II	0.97	S5-1,2-III	0.91
S5-1,3-I	0.65	S5-1,3-II	0.89	S5-1,3-III	0.84
S5-2,3-I	0.94	S5-2,3-II	0.91	S5-2,3-III	0.91
S6-1,2-I	0.78	S6-1,2-II	0.80	S6-1,2-III	0.98
S6-1,3-I	0.74	S6-1,3-II	0.61	S6-1,3-III	0.99
S6-2,3-I	0.99	S6-2,3-II	0.45	S6-2,3-III	0.93
S7-1,2-I	0.96	S7-1,2-II	0.68	S7-1,2-III	0.73
S7-1,3-I	0.95	S7-1,3-II	0.70	S7-1,3-III	0.96
S7-2,3-I	0.99	S7-2,3-II	0.94	S7-2,3-III	0.71
S8-1,2-I	0.88	S8-1,2-II	0.95	S8-1,2-III	0.94
S8-1,3-I	0.78	S8-1,3-II	0.82	S8-1,3-III	0.97
S8-2,3-I	0.97	S8-2,3-II	0.91	S8-2,3-III	0.97
S9-1,2-I	0.88	S9-1,2-II	0.96	S9-1,2-III	0.88
S9-1,3-I	0.85	S9-1,3-II	0.96	S9-1,3-III	0.81
S9-2,3-I	0.98	S9-2,3-II	0.99	S9-2,3-III	0.97
S10-1,2-I	0.95	S10-1,2-II	0.82	S10-1,2-III	0.92
S10-1,3-I	0.58	S10-1,3-II	0.75	S10-1,3-III	0.90
S10-2,3-I	0.68	S10-2,3-II	0.83	S10-2,3-III	0.96
S11-1,2-I	0.58	S11-1,2-II	0.67	S11-1,2-III	0.88
S11-1,3-I	0.50	S11-1,3-II	0.56	S11-1,3-III	0.92
S11-2,3-I	0.97	S11-2,3-II	0.96	S11-2,3-III	0.99
S12-1,2-I	0.99	S12-1,2-II	0.99	S12-1,2-III	0.96
S12-1,3-I	0.99	S12-1,3-II	0.94	S12-1,3-III	0.93
S12-2,3-I	0.99	S12-2,3-II	0.94	S12-2,3-III	0.99
S13-1,2-I	0.97	S13-1,2-II	0.89	S13-1,2-III	0.95
S13-1,3-I	0.98	S13-1,3-II	0.78	S13-1,3-III	0.92
S13-2,3-I	0.94	S13-2,3-II	0.90	S13-2,3-III	0.99
S14-1,2-I	0.38	S14-1,2-II	0.66	S14-1,2-III	0.96
S14-1,3-I	0.42	S14-1,3-II	0.70	S14-1,3-III	0.99
S14-2,3-I	0.99	S14-2,3-II	0.82	S14-2,3-III	0.96

ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score	ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score	ตัวอย่างที่เปรียบเทียบ	score
S15-1,2-I	0.98	S15-1,2-II	0.81	S15-1,2-III	0.99
S15-1,3-I	0.93	S15-1,3-II	0.81	S15-1,3-III	0.84
S15-2,3-I	0.97	S15-2,3-II	0.80	S15-2,3-III	0.90
S16-1,2-I	0.97	S16-1,2-II	0.98	S16-1,2-III	0.94
S16-1,3-I	0.41	S16-1,3-II	0.90	S16-1,3-III	0.93
S16-2,3-I	0.42	S16-2,3-II	0.94	S16-2,3-III	0.99
S17-1,2-I	0.77	S17-1,2-II	0.92	S17-1,2-III	0.97
S17-1,3-I	0.85	S17-1,3-II	0.98	S17-1,3-III	0.98
S17-2,3-I	0.84	S17-2,3-II	0.93	S17-2,3-III	0.98
S18-1,2-I	0.90	S18-1,2-II	0.99	S18-1,2-III	0.95
S18-1,3-I	0.91	S18-1,3-II	0.85	S18-1,3-III	0.95
S18-2,3-I	1.00	S18-2,3-II	0.86	S18-2,3-III	1.00
S19-1,2-I	0.99	S19-1,2-II	0.83	S19-1,2-III	0.98
S19-1,3-I	0.95	S19-1,3-II	0.81	S19-1,3-III	0.91
S19-2,3-I	0.94	S19-2,3-II	0.98	S19-2,3-III	0.95
S20-1,2-I	0.98	S20-1,2-II	1.00	S20-1,2-III	0.99
S20-1,3-I	0.88	S20-1,3-II	1.00	S20-1,3-III	0.99
S20-2,3-I	0.83	S20-2,3-II	1.00	S20-2,3-III	0.98
S21-1,2-I	0.98	S21-1,2-II	0.99	S21-1,2-III	0.92
S21-1,3-I	0.72	S21-1,3-II	0.99	S21-1,3-III	0.98
S21-2,3-I	0.77	S21-2,3-II	0.99	S21-2,3-III	0.90
S22-1,2-I	0.76	S22-1,2-II	0.99	S22-1,2-III	0.96
S22-1,3-I	0.85	S22-1,3-II	0.99	S22-1,3-III	0.87
S22-2,3-I	0.79	S22-2,3-II	0.98	S22-2,3-III	0.95
S23-1,2-I	0.69	S23-1,2-II	0.99	S23-1,2-III	0.98
S23-1,3-I	0.61	S23-1,3-II	0.98	S23-1,3-III	0.96
S23-2,3-I	0.96	S23-2,3-II	0.98	S23-2,3-III	0.96
S24-1,2-I	0.97	S24-1,2-II	0.88	S24-1,2-III	0.98
S24-1,3-I	0.97	S24-1,3-II	0.88	S24-1,3-III	0.94
S24-2,3-I	0.97	S24-2,3-II	1.00	S24-2,3-III	0.96
S25-1,2-I	0.97	S25-1,2-II	0.99	S25-1,2-III	0.94
S25-1,3-I	0.99	S25-1,3-II	0.97	S25-1,3-III	0.97
S25-2,3-I	0.97	S25-2,3-II	0.99	S25-2,3-III	0.99
S26-1,2-I	0.94	S26-1,2-II	0.93	S26-1,2-III	0.96
S26-1,3-I	0.91	S26-1,3-II	0.95	S26-1,3-III	0.93
S26-2,3-I	0.84	S26-2,3-II	0.97	S26-2,3-III	0.99
S27-1,2-I	0.85	S27-1,2-II	0.99	S27-1,2-III	0.51
S27-1,3-I	0.86	S27-1,3-II	0.80	S27-1,3-III	0.46
S27-2,3-I	0.99	S27-2,3-II	0.80	S27-2,3-III	0.95
S28-1,2-I	0.98	S28-1,2-II	0.99	S28-1,2-III	0.98
S28-1,3-I	0.96	S28-1,3-II	0.98	S28-1,3-III	0.98
S28-2,3-I	0.98	S28-2,3-II	0.96	S28-2,3-III	0.99

หมายเหตุ

S1-1,2-I หมายถึง ตัวอย่างที่เตรียมจากการระบายนของปากกาคีย์ห้อยที่ 1 โดยเปรียบเทียบซ้ำที่ 1 และ ซ้ำที่ 2 ใน TLC ชุด I

ภาพผนวก ง.3

แสดง score การเปรียบเทียบตัวอย่างจากการเขียนโดยปากกาแท่งเดียว บนภาพ TLC ต่างแผ่นกัน

ตัวอย่าง SW1	SW1-1-I	SW1-2-I	SW1-3-I	SW1-1-II	SW1-2-II	SW1-3-II
SW1-3-III	0.39	0.51	0.59	0.23	0.31	0.47
SW1-2-III	0.37	0.49	0.56	0.24	0.33	0.5
SW1-1-III	0.38	0.49	0.56	0.28	0.36	0.52
SW1-3-II	0.18	0.19	0.19	-	-	-
SW1-2-II	0.20	0.19	0.18	-	-	-
SW1-1-II	0.18	0.18	0.17	-	-	-

ตัวอย่าง SW2	SW2-1-I	SW2-2-I	SW2-3-I	SW2-1-II	SW2-2-II	SW2-3-II
SW2-3-III	0.71	0.75	0.77	0.56	0.66	0.59
SW2-2-III	0.59	0.63	0.65	0.69	0.78	0.72
SW2-1-III	0.58	0.63	0.64	0.68	0.76	0.7
SW2-3-II	0.22	0.24	0.25	-	-	-
SW2-2-II	0.25	0.27	0.29	-	-	-
SW2-1-II	0.21	0.22	0.23	-	-	-

ตัวอย่าง SW3	SW3-1-I	SW3-2-I	SW3-3-I	SW3-1-II	SW3-2-II	SW3-3-II
SW3-3-III	0.86	0.92	0.89	0.57	0.62	0.75
SW3-2-III	0.81	0.95	0.81	0.68	0.72	0.83
SW3-1-III	0.73	0.91	0.70	0.77	0.77	0.84
SW3-3-II	0.58	0.76	0.59	-	-	-
SW3-2-II	0.50	0.66	0.50	-	-	-
SW3-1-II	0.50	0.64	0.46	-	-	-

ตัวอย่าง SW4	SW4-1-I	SW4-2-I	SW4-3-I	SW4-1-II	SW4-2-II	SW4-3-II
SW4-3-III	0.96	0.94	0.98	0.82	0.88	0.90
SW4-2-III	0.95	0.93	0.97	0.84	0.93	0.93
SW4-1-III	0.94	0.95	0.97	0.86	0.91	0.94
SW4-3-II	0.83	0.90	0.88	-	-	-
SW4-2-II	0.79	0.94	0.86	-	-	-
SW4-1-II	0.71	0.91	0.79	-	-	-

ตัวอย่าง SW5	SW5-1-I	SW5-2-I	SW5-3-I	SW5-1-II	SW5-2-II	SW5-3-II
SW5-3-III	0.97	0.97	0.93	0.83	0.82	0.81
SW5-2-III	0.95	0.95	0.96	0.89	0.89	0.86
SW5-1-III	0.94	0.94	0.96	0.89	0.89	0.87
SW5-3-II	0.81	0.79	0.86	-	-	-
SW5-2-II	0.80	0.79	0.87	-	-	-
SW5-1-II	0.81	0.81	0.86	-	-	-

หมายเหตุ

SW1-1-I หมายถึง ตัวอย่างที่เตรียมจากการเขียนของปากกาคีย์ห้อยที่ 1 ซ้ำที่ 1 ใน TLC แผ่น I

ภาคผนวก ง.4

แสดง score การเปรียบเทียบตัวอย่างจากการระบายโดยปากกาแท่งเดียว บนภาพ TLC ต่างแผ่นกัน

ตัวอย่าง S1	S1-1-I	S1-2-I	S1-3-I	S1-1-II	S1-2-II	S1-3-II
S1-3-III	0.37	0.48	0.34	0.41	0.31	0.29
S1-2-III	0.49	0.32	0.20	0.31	0.23	0.21
S1-1-III	0.64	0.56	0.40	0.48	0.33	0.30
S1-3-II	0.37	0.52	0.68	-	-	-
S1-2-II	0.40	0.55	0.72	-	-	-
S1-1-II	0.53	0.73	0.86	-	-	-

ตัวอย่าง S2	S2-1-I	S2-2-I	S2-3-I	S2-1-II	S2-2-II	S2-3-II
S2-3-III	0.67	0.69	0.72	0.86	0.91	0.86
S2-2-III	0.64	0.66	0.68	0.84	0.88	0.83
S2-1-III	0.05	0.04	0.01	0.14	0.07	0.15
S2-3-II	0.87	0.88	0.84	-	-	-
S2-2-II	0.77	0.81	0.86	-	-	-
S2-1-II	0.86	0.88	0.87	-	-	-

ตัวอย่าง S3	S3-1-I	S3-2-I	S3-3-I	S3-1-II	S3-2-II	S3-3-II
S3-3-III	0.56	0.66	0.74	0.72	0.68	0.68
S3-2-III	0.69	0.73	0.65	0.88	0.84	0.69
S3-1-III	0.64	0.71	0.70	0.78	0.72	0.63
S3-3-II	0.81	0.86	0.53	-	-	-
S3-2-II	0.90	0.91	0.56	-	-	-
S3-1-II	0.85	0.86	0.58	-	-	-

ตัวอย่าง S4	S4-1-I	S4-2-I	S4-3-I	S4-1-II	S4-2-II	S4-3-II
S4-3-III	0.52	0.63	0.66	0.67	0.68	0.71
S4-2-III	0.56	0.69	0.72	0.76	0.79	0.83
S4-1-III	0.48	0.64	0.67	0.69	0.71	0.75
S4-3-II	0.63	0.82	0.92	-	-	-
S4-2-II	0.67	0.88	0.95	-	-	-
S4-1-II	0.70	0.92	0.96	-	-	-

ตัวอย่าง S5	S5-1-I	S5-2-I	S5-3-I	S5-1-II	S5-2-II	S5-3-II
S5-3-III	0.75	0.68	0.65	0.86	0.83	0.75
S5-2-III	0.61	0.64	0.61	0.74	0.71	0.67
S5-1-III	0.64	0.56	0.52	0.64	0.66	0.58
S5-3-II	0.68	0.90	0.90	-	-	-
S5-2-II	0.87	0.85	0.82	-	-	-
S5-1-II	0.85	0.85	0.82	-	-	-

หมายเหตุ

S1-1-I หมายถึง ตัวอย่างที่เตรียมจากการระบายของปากกาคีย์ห้อยที่ 1 ซ้ำที่ 1 ใน TLC แผ่น I

ภาคผนวก ง.5

แสดง score การเปรียบเทียบของตัวอย่างที่เขียนโดยปากกาถูกคลื่นสีน้ำเงิน 25 ยี่ห้อ
เปรียบเทียบบน TLC แผ่นเดียวกัน ชุด I,II,III

ชุด I					ชุด II					ชุด III				
SW	1	2	3	4	SW	1	2	3	4	SW	1	2	3	4
5	0.92	0.98	0.48	0.80	5	0.23	0.56	0.27	0.86	5	0.81	0.84	0.42	0.96
4	0.64	0.73	0.48	-	4	0.40	0.79	0.39	-	4	0.86	0.87	0.46	-
3	0.39	0.43	-	-	3	0.18	0.37	-	-	3	0.44	0.41	-	-
2	0.96	-	-	-	2	0.66	-	-	-	2	0.96	-	-	-
SW	6	7	8	9	SW	6	7	8	9	SW	6	7	8	9
10	0.36	0.38	0.50	0.66	10	0.34	0.48	0.86	0.93	10	0.94	0.59	0.88	0.97
9	0.58	0.71	0.89	-	9	0.35	0.56	0.93	-	9	0.94	0.63	0.93	-
8	0.75	0.89	-	-	8	0.31	0.57	-	-	8	0.91	0.67	-	-
7	0.89	-	-	-	7	0.66	-	-	-	7	0.53	-	-	-
SW	11	12	13	14	SW	11	12	13	14	SW	11	12	13	14
15	0.67	0.60	0.66	0.69	15	0.54	0.84	0.87	0.75	15	0.49	0.43	0.53	0.68
14	0.93	0.88	0.95	-	14	0.37	0.64	0.82	-	14	0.86	0.77	0.86	-
13	0.96	0.96	-	-	13	0.45	0.86	-	-	13	0.96	0.96	-	-
12	0.94	-	-	-	12	0.57	-	-	-	12	0.94	-	-	-
SW	16	17	18	19	SW	16	17	18	19	SW	16	17	18	19
20	0.49	0.13	0.63	0.46	20	0.61	0.34	0.86	0.51	20	0.13	0.14	0.88	0.44
19	0.48	0.08	0.39	-	19	0.42	0.20	0.47	-	19	0.05	0.08	0.55	-
18	0.52	0.08	-	-	18	0.56	0.28	-	-	18	0.12	0.18	-	-
17	0.22	-	-	-	17	0.68	-	-	-	17	0.93	-	-	-
SW	21	22	23	24	SW	21	22	23	24	SW	21	22	23	24
25	0.82	0.86	0.77	0.51	25	0.72	0.58	0.72	0.38	25	0.56	0.79	0.90	0.84
24	0.60	0.59	0.75	-	24	0.45	0.44	0.57	-	24	0.45	0.63	0.82	-
23	0.77	0.85	-	-	23	0.92	0.89	-	-	23	0.62	0.87	-	-
22	0.88	-	-	-	22	0.92	-	-	-	22	0.86	-	-	-

ภาคผนวก ง.6

แสดง score การเปรียบเทียบของตัวอย่างที่ระบายโดยปากกาถูกลิ้นสีน้ำเงิน 25 ยี่ห้อ
เปรียบเทียบบน TLC แผ่นเดียวกัน ชุด I,II,III

ชุด I					ชุด II					ชุด III				
S	1	2	3	4	S	1	2	3	4	S	1	2	3	4
5	0.78	0.78	0.28	0.93	5	0.90	0.82	0.37	0.97	5	0.34	0.89	0.36	0.93
4	0.72	0.67	0.29	-	4	0.90	0.83	0.36	-	4	0.30	0.91	0.40	-
3	0.14	0.13	-	-	3	0.30	0.26	-	-	3	0.18	0.42	-	-
2	0.66	-	-	-	2	0.96	-	-	-	2	0.41	-	-	-
S	6	7	8	9	S	6	7	8	9	S	6	7	8	9
10	0.52	0.49	0.56	0.6	10	0.33	0.18	0.3	0.62	10	0.8	0.59	0.82	0.88
9	0.68	0.75	0.79	-	9	0.26	0.34	0.77	-	9	0.83	0.67	0.95	-
8	0.82	0.86	-	-	8	0.19	0.47	-	-	8	0.81	0.58	-	-
7	0.81	-	-	-	7	0.11	-	-	-	7	0.55	-	-	-
S	11	12	13	14	S	11	12	13	14	S	11	12	13	14
15	0.91	0.74	0.86	0.93	15	0.75	0.67	0.67	0.72	15	0.91	0.93	0.94	0.97
14	0.92	0.86	0.97	-	14	0.79	0.82	0.81	-	14	0.83	0.95	0.97	-
13	0.89	0.93	-	-	13	0.84	0.88	-	-	13	0.79	0.98	-	-
12	0.8	-	-	-	12	0.85	-	-	-	12	0.81	-	-	-
S	16	17	18	19	S	16	17	18	19	S	16	17	18	19
20	0.38	0.38	0.85	0.71	20	0.84	0.5	0.85	0.59	20	0.93	0.76	0.87	0.52
19	0.27	0.39	0.77	-	19	0.69	0.65	0.68	-	19	0.56	0.41	0.53	-
18	0.23	0.37	-	-	18	0.69	0.52	-	-	18	0.9	0.63	-	-
17	0.43	-	-	-	17	0.68	-	-	-	17	0.71	-	-	-
S	21	22	23	24	S	21	22	23	24	S	21	22	23	24
25	0.68	0.72	0.79	0.73	25	0.76	0.74	0.77	0.71	25	0.68	0.88	0.82	0.71
24	0.77	0.71	0.85	-	24	0.77	0.77	0.78	-	24	0.57	0.85	0.87	-
23	0.80	0.67	-	-	23	0.80	0.87	-	-	23	0.74	0.86	-	-
22	0.73	-	-	-	22	0.95	-	-	-	22	0.68	-	-	-

ภาคผนวก ง.7

แสดง score การเปรียบเทียบของตัวอย่างที่ระบายโดยปากกาลูกลื่นสีน้ำเงิน 25 ยี่ห้อ
เปรียบเทียบบน TLC แผ่นเดียวกัน *

ตัวอย่างจากการเขียน					ตัวอย่างจากการระบาย				
SW	1	2	3	4	S	1	2	3	4
5	U	U	D	U	5	U	U	U	A
4	U	U	D	-	4	U	U	U	-
3	D	D	-	-	3	D	U	-	-
2	A	-	-	-	2	U	-	-	-
SW	6	7	8	9	S	6	7	8	9
10	D	D	D	A	10	U	U	U	U
9	D	U	U	-	9	U	U	U	-
8	U	U	-	-	8	U	U	-	-
7	U	-	-	-	7	U	-	-	-
SW	11	12	13	14	S	11	12	13	14
15	U	U	U	U	15	L	U	U	A
14	U	U	U	-	14	U	U	A	-
13	A	A	-	-	13	U	A	-	-
12	A	-	-	-	12	U	-	-	-
SW	16	17	18	19	S	16	17	18	19
20	D	D	U	D	20	U	U	U	U
19	D	D	D	-	19	U	U	U	-
18	D	D	-	-	18	U	U	-	-
17	U	-	-	-	17	U	-	-	-
SW	21	22	23	24	S	21	22	23	24
25	U	U	U	D	25	U	U	U	U
24	D	U	U	-	24	U	U	U	-
23	U	U	-	-	23	U	U	-	-
22	U	-	-	-	22	U	-	-	-

หมายเหตุ

- A, alike = เป็นหมึกปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินยี่ห้อเดียวกัน
 U, uncertain = ระบุไม่ได้ว่าเป็นหมึกปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินยี่ห้อเดียวกันหรือต่างกัน
 D, different = เป็นหมึกปากกาลูกลื่นสีน้ำเงินต่างยี่ห้อกัน

* ใช้ข้อมูลจากภาคผนวก ค.2 และ ภาคผนวก ค.3 โดยนำผล ชุด I,II,II มาเปรียบเทียบกันแล้วเลือกผลการเปรียบเทียบที่ได้ 2 ใน 3 มาใส่ตารางในภาคผนวก ค.4

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – ชื่อสกุล

นางสาวมยุรี สมบูรณ์

ที่อยู่

68 หมู่ 4 ตำบลป่าแฝก

อำเภอกรโกราช จังหวัดสุโขทัย 64170

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2548

สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี

จากมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่

พ.ศ. 2549

ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิชานิติวิทยาศาสตร์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร จังหวัดนครปฐม