

ผลการวิจัยและการวิจารณ์

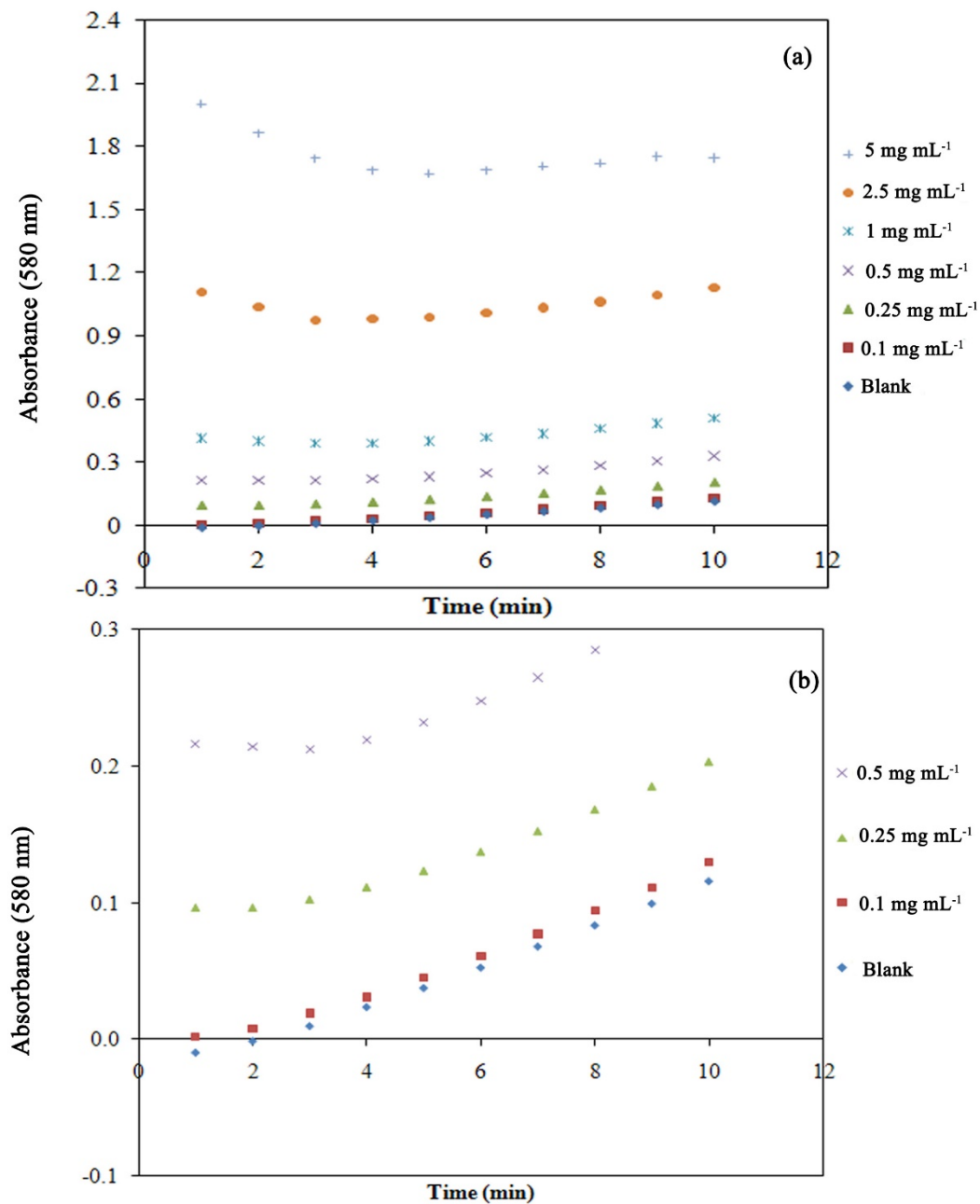
การวิเคราะห์ปริมาณเมทแอมเฟตามีนโดยใช้ ColorAssist app

จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมของการทำปฏิกิริยาทางเคมีของเมทแอมเฟตามีนและน้ำยาเคมีไซมอน ได้แก่ การใช้สารละลายอะซีตัลดีไฮด์ในโซเดียมไนโตรปริสไซด์ (10% โดยปริมาตร) ปริมาตร 10 ไมโครลิตร ทำปฏิกิริยากับสารละลายเมทแอมเฟตามีนปริมาตร 20 ไมโครลิตร และเติมสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (2% w/v) ปริมาตร 80 ไมโครลิตร ปฏิกริยาเคมีดังกล่าวให้ผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินอมม่วง (รูปที่ 3) จากสารประกอบเชิงซ้อน Simon-awe (Kovar and Laudszun, 1989) โดยผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนสูงขึ้นและมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร และมีสมการของกราฟมาตรฐานสำหรับตรวจวัดปริมาณเมทแอมเฟตามีนด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่นดังกล่าว คือ $y = (0.38 \pm 0.01)x + (0.01 \pm 0.03)$



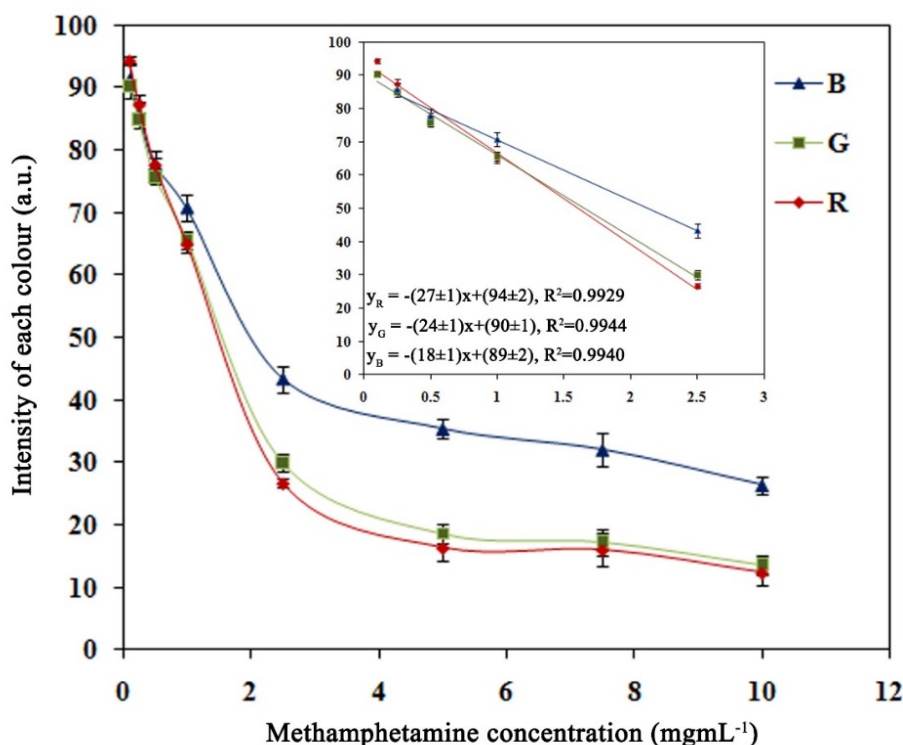
รูปที่ 3 ผลิตภัณฑ์สีที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีของเมทแอมเฟตามีนและน้ำยาเคมีไซมอน (ซ้ายมือ:แบลงค์)

การศึกษาความเสถียรของผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินจากปฏิกิริยาของเมทแอมเฟตามีนพบว่า หากสังเกตด้วยตาเปล่า เมื่อความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนสูงกว่า 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินจะคงที่อยู่ 3-4 นาที ก่อนจะเปลี่ยนเป็นสีม่วงอย่างช้าๆ โดยมีสีม่วงเข้มขึ้นเมื่อเวลามากขึ้น ขณะที่เมื่อความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จะสังเกตเห็นผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินเพียงไม่กี่วินาทีก่อนเปลี่ยนเป็นสีม่วง เมื่อศึกษาการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินพบว่า ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 580 นาโนเมตร มีค่าลดลงภายใน 3-4 นาที หลังจากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้า (รูปที่ 4) จึงมีความเป็นไปได้ว่า ค่าการดูดกลืนแสงที่ลดลงน่าจะเกิดจากการสลายตัว (Decomposition) ของผลิตภัณฑ์สีน้ำเงิน ในขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงที่เพิ่มขึ้นหลัง 4 นาที น่าจะสอดคล้องกับการเกิดขึ้นของผลิตภัณฑ์สีม่วง เมื่อความเข้มข้นต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ค่าการดูดกลืนแสงคงที่ 2-3 นาที และเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จึงมีความเป็นไปได้ว่า ผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินที่ได้ปฏิกิริยาของเมทแอมเฟตามีนกับน้ำยาเคมีไซมอน จะยังคงอยู่ประมาณ 3 นาทีก่อนที่จะสลายตัวเป็นผลิตภัณฑ์สีม่วง ดังนั้นการตรวจวัดปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยา ควรอยู่ภายใน 3 นาทีแรกของการทำปฏิกิริยา ผู้วิจัยจึงเลือกเวลาตรวจวัดที่ 2 นาที



รูปที่ 4 ค่าการดูดกลืนแสงของผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินอมม่วงที่ความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีน (a) 0 (Blank) ถึง 5 mgmL⁻¹ (b) 0 (Blank) ถึง 0.5 mgmL⁻¹

เมื่อวิเคราะห์ความเข้มสีของผลิตภัณฑ์โดยใช้ ColorAssist app ของโทรศัพท์ไอโฟน 4.0 ด้วยระบบตรวจวัดความเข้มสีที่พัฒนาขึ้น (รูปที่ 1) พบว่า ค่าความเข้มแสง (Intensity) น้ำเงิน (B) สูงกว่าสีแดง (R) และเขียว (G) เนื่องจากผลิตภัณฑ์สีได้เป็นสีน้ำเงินอมม่วง จึงสามารถสะท้อนแสงสีน้ำเงินเข้าสู่กล้องดิจิทัลได้มากที่สุด โดยค่าความเข้มแสง RGB มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีน (รูปที่ 5) เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีสีเข้มขึ้น

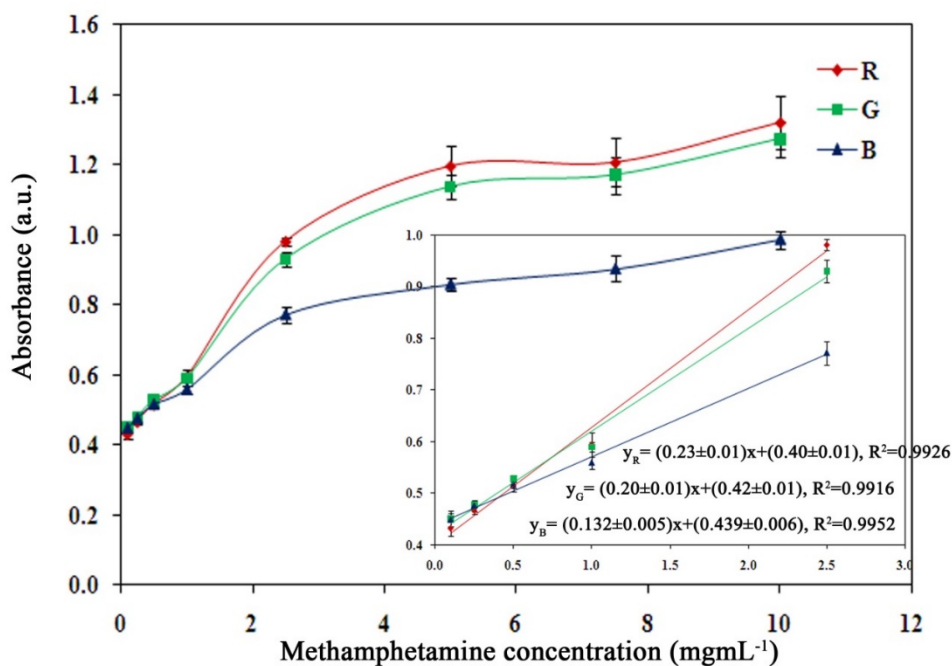


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ของค่าความเข้มแสง RGB กับความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีน

เมื่อคำนวณค่าการดูดกลืนแสงของโมเลกุลของผลิตภัณฑ์สีโดยใช้สมการที่ 1 (Kompany-Zareh *et al.*, 2002; Choodum and Daeid., 2011)

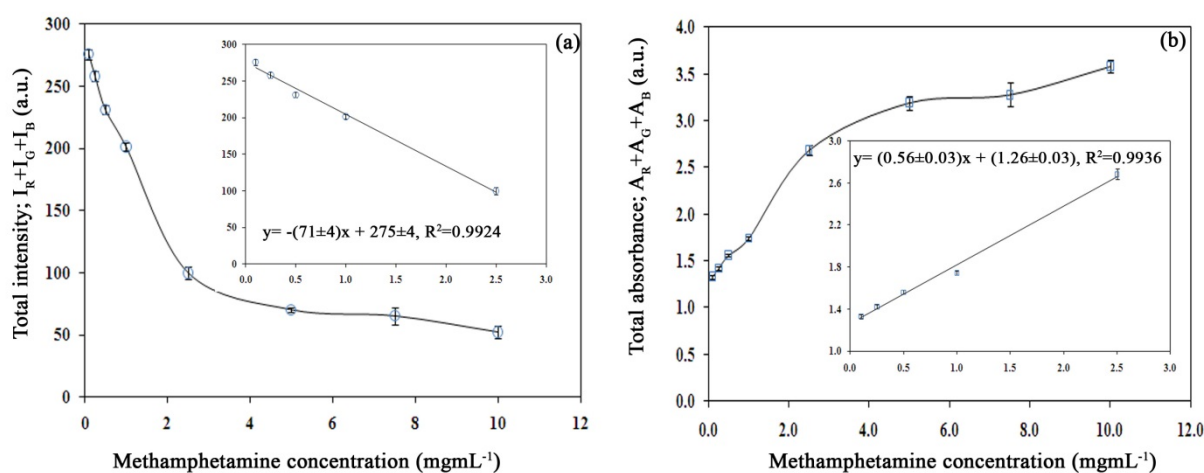
$$A_X = -\log \frac{(I_X - I_{X,b})}{(I_{X,w} - I_{X,b})} = -\log \frac{(I_X)_c}{(I_{X,w})_c} = -\log R_X \quad \text{สมการที่ 1}$$

โดย A_X : ค่าการดูดกลืนแสงของสี X, I_X : ค่าความเข้มแสงของสี X, $I_{X,b}=0$ (ภาพโทนสีดำ), $I_{X,w}=255$ (ภาพโทนสีขาว), R_X = ค่าการสะท้อนแสงของสี X และ C = ความเข้มข้นของตัวอย่าง ให้ผลการวิจัยแสดงดังรูปที่ 6 โดยพบว่า ค่าการดูดกลืนแสงสีเขียวและแดงมีค่ามากกว่าสีน้ำเงิน ทั้งนี้เนื่องจากผลิตภัณฑ์สีจะสะท้อนแสงในช่วงสีที่สามารถสังเกตด้วยตาได้ แต่จะดูดกลืนแสงช่วงอื่นๆ ไว้ ผลิตภัณฑ์สีน้ำเงินม่วงจึงสะท้อนสีน้ำเงินออกมามาก แต่จะดูดกลืนแสงสีเขียวและแดงไว้มาก ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการคำนวณของทั้งสองสีนี้จึงมีค่ามากกว่าสีน้ำเงินซึ่งมีการสะท้อนมากกว่า เมื่อความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนมากขึ้น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีสีเข้มขึ้น จึงมีดูดกลืนแสงมากขึ้นด้วย ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสงที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลของผลิตภัณฑ์สีด้วย app มีลักษณะเหมือนกับความสัมพันธ์ที่ได้จากการศึกษาการดูดกลืนแสงโดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่มีรายงานโดยทั่วไป



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ของค่าการดูดกลืนแสง RGB กับความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีน

เนื่องจากภาพดิจิทัลเกิดจากการรวมกันของแสงที่ผ่านตัวกรองแต่ละสีที่ถูกอ่านโดยตัวรับภาพ การศึกษาความสัมพันธ์ของผลรวมของค่าความเข้มสีกับความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนอาจให้ข้อมูลที่แตกต่างจากความสัมพันธ์ของค่าความเข้มสีแต่ละสีเดี่ยวๆ ได้ (Lopez-Moliner et al., 2010) จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ของผลรวมของค่าความเข้มสี ($I_R+I_G+I_B$) กับความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนพบว่า มีความสัมพันธ์ดังรูปที่ 7a ในขณะที่ผลรวมของค่าการดูดกลืนแสง ($A_R+A_G+A_B$) แสดงดังรูปที่ 7b โดยพบว่า ความสัมพันธ์แบบผลรวมให้ช่วงความเป็นเส้นตรงช่วงเดียวกับความสัมพันธ์แบบเดี่ยว แต่ให้ค่าความชันของการวิเคราะห์สูงกว่า ดังแสดงในตารางที่ 1



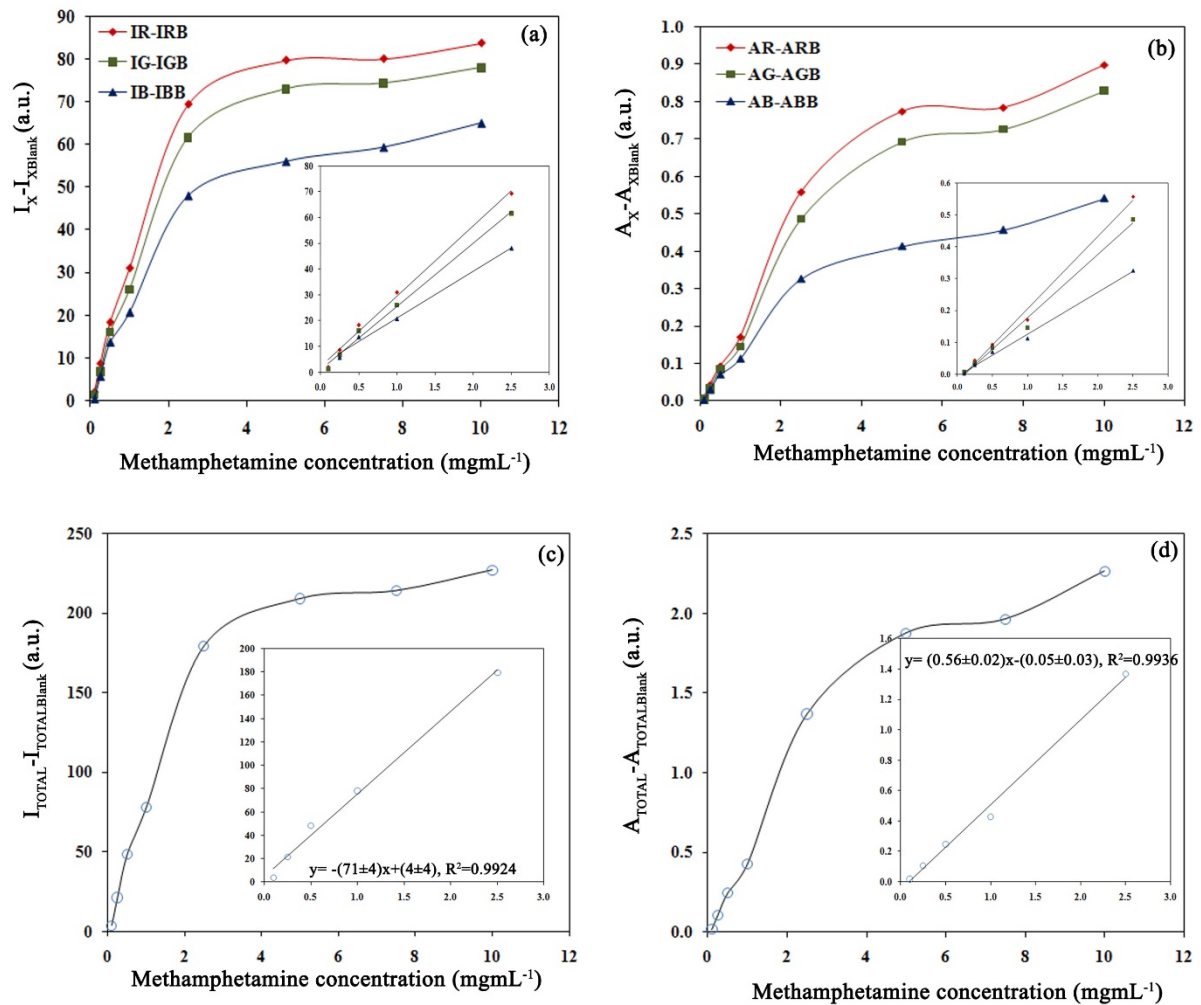
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนกับ (a) ค่าความเข้มสีรวม (b) ค่าการดูดกลืนแสงรวม

ตารางที่ 1 สมรรถนะของการวิเคราะห์ปริมาณเมทแอมเฟตามีนโดยใช้ ColorAssist app

Relationships*	ความไววิเคราะห์ (a.u. mLmg ⁻¹)	ช่วงความเป็นเส้นตรง mgmL ⁻¹	LOD** (mgmL ⁻¹)
I _R	27±1	0.1 – 2.5	0.044±0.002
I _G	24±1	0.1 – 2.5	0.0110±0.0001
I _B	18±1	0.25 – 2.5	0.0243±0.0007
A _R	0.23±0.01	0.1 – 2.5	0.035±0.001
A _G	0.20±0.01	0.1 – 2.5	0.0161±0.0003
A _B	0.132±0.005	0.1 – 2.5	0.0216±0.0005
I _{TOTAL}	71±4	0.1 – 2.5	0.0200±0.0005
A _{TOTAL}	0.56±0.03	0.1 – 2.5	0.01378±0.00009
I _R -I _{Rblank}	27±1	0.1 – 2.5	0.123±0.005
I _G -I _{Gblank}	24 ±1	0.1 – 2.5	0.142±0.002
I _B -I _{Bblank}	18±1	0.25 – 2.5	0.196±0.006
A _R -A _{Rblank}	0.23±0.01	0.1 – 2.5	0.137±0.006
A _G -A _{Gblank}	0.20±0.01	0.1 – 2.5	0.150±0.003
A _B -A _{Bblank}	0.132±0.005	0.1 – 2.5	0.191±0.005
(I _{TOTAL} -I _{TOTALBlank})	71±4	0.1 – 2.5	0.147±0.003
(A _{TOTAL} -A _{TOTALBlank})	0.56±0.02	0.1 – 2.5	0.150±0.002

*I = intensity, A = absorbance, **LOD คือ ขีดจำกัดของการตรวจวัด คำนวณได้จาก $y_{LOD} = y_B + 3S_B$ (Miller and Miller, 2005)

อย่างไรก็ตามค่าความเข้มข้นที่ได้จากการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลของผลิตภัณฑ์อาจมีผลของค่าความเข้มสีของแบลงค์และอาจส่งผลต่อความถูกต้องได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อตัวอย่างจริงมีสี เช่น ยาบ้า จึงได้ศึกษาความสัมพันธ์ที่มีการตัดผลของค่าความเข้มสีหรือค่าการดูดกลืนแสงของแบลงค์ออกไป โดยได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์แบบตัดผลของแปลงระหว่างความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนกับ (a) ค่าความเข้มสี (b) ค่าการดูดกลืนแสง (c) ค่าความเข้มสีรวม (d) ค่าการดูดกลืนแสงรวม

ความสัมพันธ์ของความเข้มสีเขียวของผลิตภัณฑ์ให้ขีดจำกัดการตรวจวัดต่ำที่สุด สามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์สารเสพติดเชิงปริมาณได้ โดยไม่จำเป็นต้องมีการถ่ายภาพผลิตภัณฑ์ ทำให้สามารถทราบผลการวิเคราะห์ ณ เวลาที่สารเสพติดทำปฏิกิริยากับน้ำยาเคมีได้ทันที (Real time detection) และลดความยุ่งยากลงได้ และไม่ต้องใช้เครื่องมือที่มีราคาแพง โดยให้สมรรถนะของวิธี ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สมรรถนะของวิธีตรวจวัดปริมาณสารเสพติดเมทแอมเฟตามีนโดยการวิเคราะห์ค่าความเข้มสีเขียวของภาพดิจิทัลจากผลิตภัณฑ์โดยใช้ ColorAssist app ของไอโฟน 4.0

พารามิเตอร์	กรรมวิธีที่พัฒนาขึ้น
1. ความไววิเคราะห์	24±1 AU mL/mg
2. ความแม่นยำ (สารควบคุม)	1.48% relative error
3. ความแม่นยำ (ตัวอย่างปัสสาวะ)	6.34% relative error
4. ช่วงความเป็นเส้นตรง	0.1-2.5 mg/mL
5. ค่าความเป็นเส้นตรง	0.9944
6. ขีดจำกัดการตรวจวัด	0.0110±0.0001 mg/mL
7. Intra-day precision (n=3)	2.27-4.49% RSD
8. Inter-day precision (n=3)	2.65-5.62% RSD

จากการประยุกต์ใช้วิธีที่พัฒนาขึ้นเพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารเสพติดเมทแอมเฟตามีนในตัวอย่างยาบ้าที่จับกุมได้จำนวน 5 ตัวอย่าง โดยใช้สมการความสัมพันธ์ของค่าความเข้มแสงสีเขียวกับความเข้มข้นของสารเสพติดเปรียบเทียบกับวิธีแก๊สโครมาโทกราฟี พบว่า ตรวจพบปริมาณเมทแอมเฟตามีนในเม็ดยาบ้าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยวิธีทั้งสองให้ผลที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างยาบ้าจำนวน 5 ตัวอย่าง

ตัวอย่างที่.	วิธีที่พัฒนาขึ้น*	วิธีมาตรฐาน (GC-FID)	%Relative error	$P = 0.05$
1.	20±1%	19.9±0.4%	+0.2%	ns**
2.	16±1%	17.4±0.1%	- 7.3%	ns
3.	20.1±0.9 %	18.7±0.2%	+7.1%	ns
4.	19±2%	19.3±0.3%	-1.2%	ns
5.	19±1%	18.1±0.5%	+4.3%	ns

*ใช้สมการความสัมพันธ์ของ I_G **ns = แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ

โครงการวิจัยส่วนนี้สรุปได้ว่า สามารถประยุกต์ใช้ app ติดตั้งไว้บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สมรรถนะสูงเพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างเมทแอมเฟตามีนและน้ำยาเคมีไซมอนทำให้สามารถทราบค่าความเข้มสีของผลิตภัณฑ์ ณ ขณะที่สารกำลังเกิดปฏิกิริยา (Real time detection) บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (On-mobile detection) จึงทราบปริมาณเมทแอมเฟตามีนในตัวอย่างทันที แม่นยำ เทียบตรง และเชื่อถือได้ โดยใช้เพียงแค่อุปกรณ์ที่ใช้อยู่ในชีวิตประจำวัน และไม่

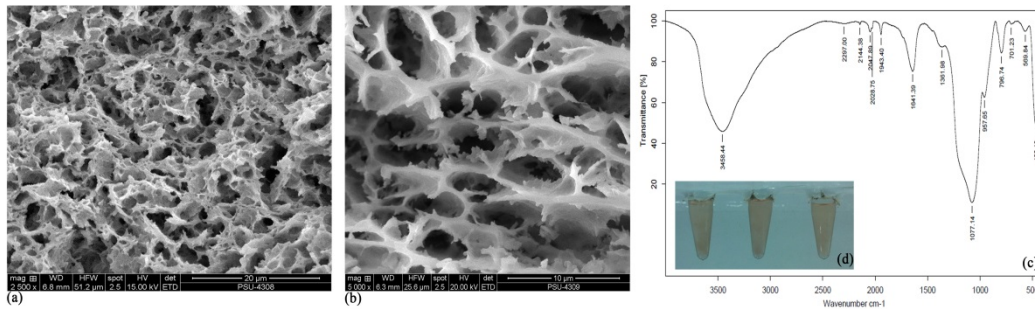
จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์ นอกจากนี้วิธีที่พัฒนาขึ้นยังให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับวิธีการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง

การสังเคราะห์เซนเซอร์แบบตรวจวัดสีชนิดโซล-เจล

แม้ว่าโครงการวิจัยส่วนแรกจะประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้ app สำหรับหาค่าความเข้มข้นของภาพดิจิทัลของผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาเคมีระหว่างเมทแอมเฟตามีนและน้ำยาเคมีไซมอนทำให้สามารถทราบค่าความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ ณ ขณะที่สารกำลังเกิดปฏิกิริยา (Real time detection) บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (On-mobile detection) และให้ผลการวิเคราะห์ปริมาณเมทแอมเฟตามีนในตัวอย่างอย่างถูกต้อง แม่นยำ เทียบตรง และสอดคล้องกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือขั้นสูง การทำปฏิกิริยาเคมียังต้องใช้น้ำยาเคมีในรูปของเหลว จึงอาจมีความเสี่ยงจากการหกหรือผสมสารเคมีอันตราย และไม่สะดวกต่อการนำไปใช้ในงานภาคสนาม (On-site) คณะผู้วิจัยจึงได้ต่อยอดงานวิจัยโดยได้พัฒนาการทำปฏิกิริยาเคมีให้มีลักษณะเป็นเซนเซอร์แบบตรวจวัดสีชนิดโซล-เจลโดยกัก (Entrapment) น้ำยาเคมีไซมอนไว้ในโครงข่ายของพอลิเมอร์และสังเคราะห์เซนเซอร์ภายในหลอดทดลองขนาดเล็กที่มีฝาปิด (ใช้ micro-PCR tube) จึงสามารถลดข้อด้อยดังกล่าวลงได้ อีกทั้งยังสามารถเติมตัวอย่างลงในหลอดทดลองขนาดเล็กได้โดยตรง จึงสามารถตรวจวัดภายในหลอดทดลอง (In-tube detection) ได้ และยังมีขนาดเล็ก พกพาสะดวกและเก็บรักษาได้ง่าย

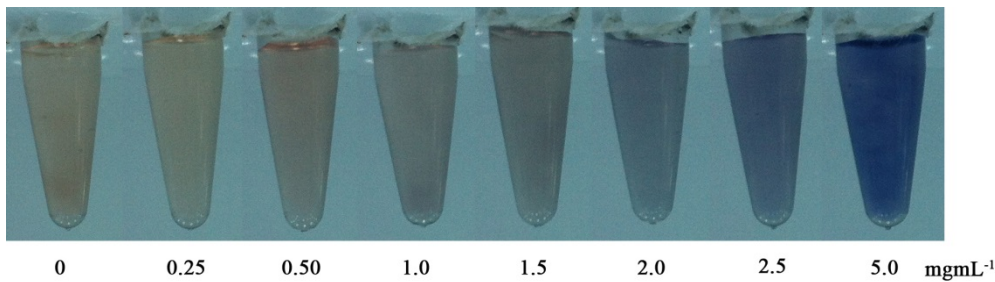
จากการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมเซนเซอร์แบบตรวจวัดสีชนิดโซล-เจล ได้แก่ การใช้สาร Tetraethyl orthosilicate (TEOS): 0.04 M HCl: ethanol เท่ากับ 2:1:2 (โดยปริมาตร) สำหรับเตรียมสารละลายโซล และใช้น้ำยาเคมีไซมอนที่ประกอบด้วย สารละลายอะซีตัลดีไฮด์ในโซเดียมไนโตรปริลไซด์ (10% โดยปริมาตร) และสารละลายโซเดียมคาร์บอเนต (2% w/v) ในอัตราส่วน 1:2 หลังจากนั้นเตรียมเจลโดยใช้อัตราส่วนสารละลายโซล: น้ำยาเคมีไซมอน เท่ากับ 1:2 โดยปริมาตร กล่าวคือ ใช้สารละลายโซล 25 ไมโครลิตร ผสมกับน้ำยาเคมีไซมอน 50 ไมโครลิตร จะได้เซนเซอร์แบบตรวจวัดสีชนิดโซล-เจลที่มีลักษณะเป็นก้อนเจลสีน้ำตาลอ่อนอยู่บริเวณก้นของหลอดพลาสติกขนาดเล็ก (รูปที่ 9d)

การศึกษาลักษณะพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope: SEM) พบว่า เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีรูพรุนเพียงพอ (รูปที่ 9a-b) ให้เมทแอมเฟตามีนจากตัวอย่างซึ่งจะถูกเติมในรูปแบบของเหลวลงในหลอดเข้าทำปฏิกิริยากับน้ำยาเคมีไซมอนที่ถูกกักไว้ในโครงข่ายของพอลิเมอร์ได้ (ยืนยันผลด้วยสเปกตรัมการส่องผ่านแสงจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ ทรานสฟอร์ม สเปกโทรเมทรี (FTIR) ดังรูปที่ 9c)



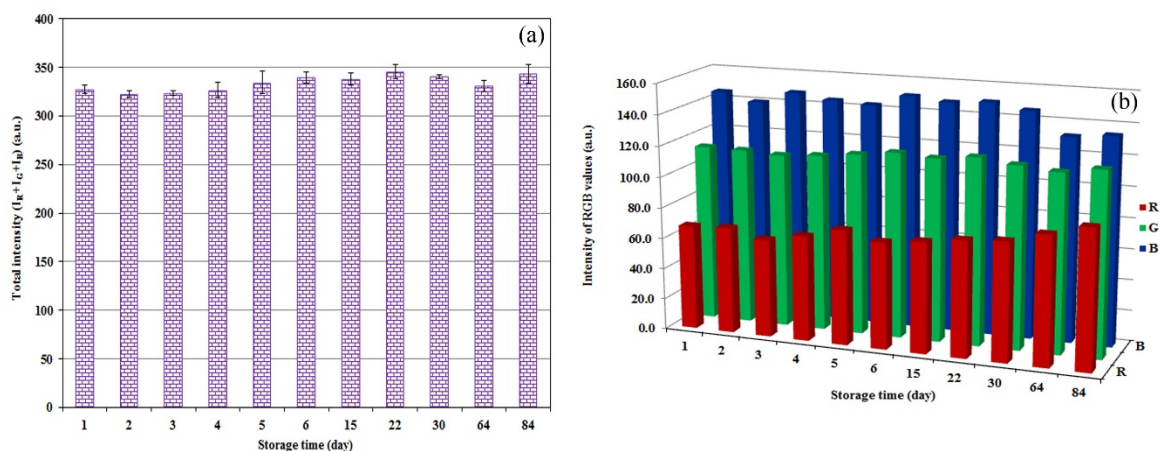
รูปที่ 9 (a-b) ลักษณะพื้นผิวของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น (c) สเปกตรัมจากการวิเคราะห์เซนเซอร์ด้วยเทคนิค FTIR (d) เซนเซอร์ที่เติมน้ำปราศจากไอออน (ไม่เกิดการเปลี่ยนสี)

เมื่อนำตัวอย่างที่มีเมทแอมเฟตามีนประกอบอยู่ด้วยเติมลงไปในหลอดทดลองขนาดเล็กที่มีเซนเซอร์ชนิดโซล-เจลบรรจุอยู่จะเกิดการเปลี่ยนสีจากสีน้ำตาลอ่อนเป็นสีน้ำเงินอมม่วงโดยมีความเข้มสีแปรผันตามความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีน ดังรูปที่ 10



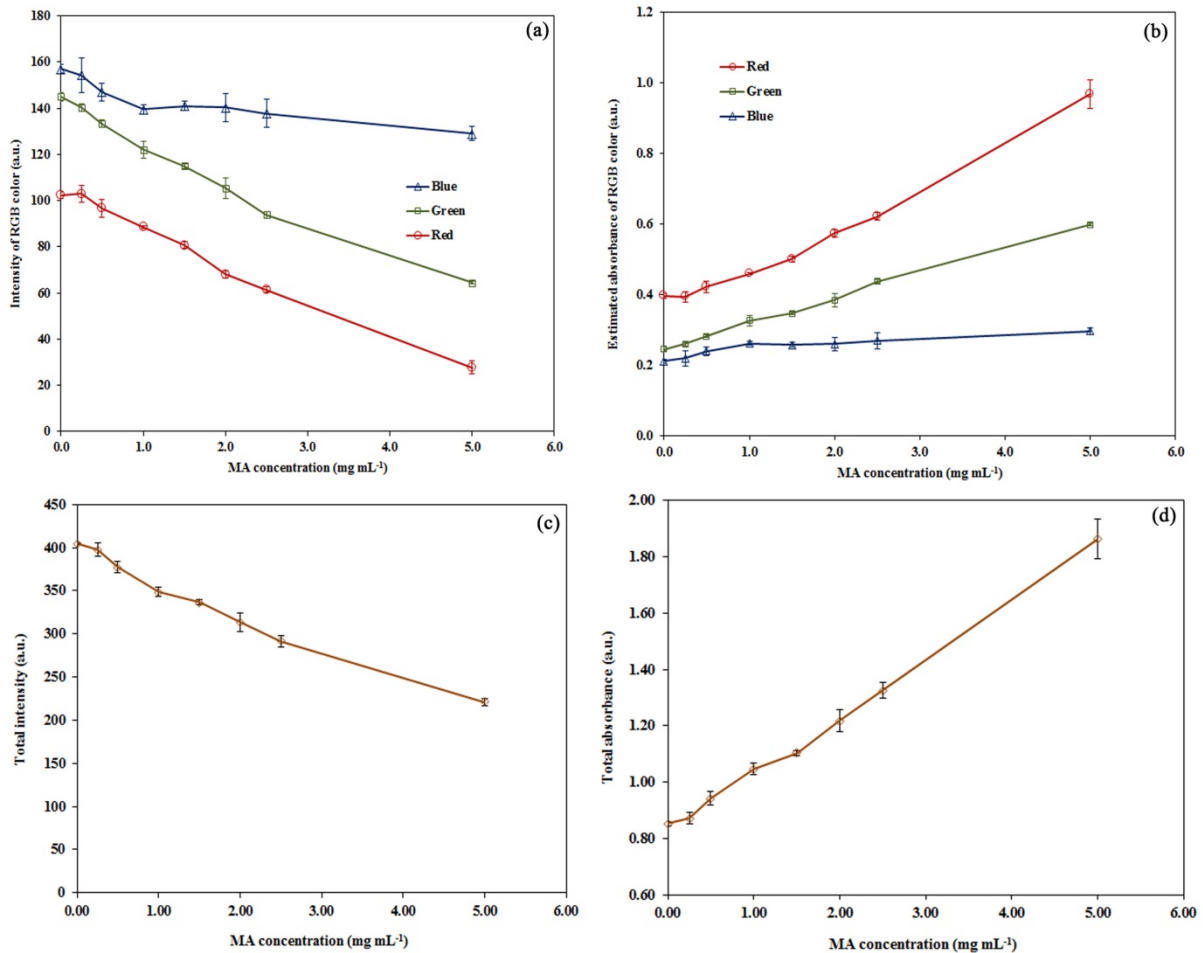
รูปที่ 10 สีของเซนเซอร์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีน

จากการศึกษาพบว่า เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นสามารถเก็บรักษาไว้ในช่องแช่แข็งของตู้เย็น (อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส) ได้นานกว่า 84 วัน (ประมาณ 3 เดือน) โดยค่าความเข้มสีรวมของผลิตภัณฑ์สีเปลี่ยนไปเพียง 4.89% เมื่อเทียบกับวันแรกที่เตรียม (รูปที่ 11)

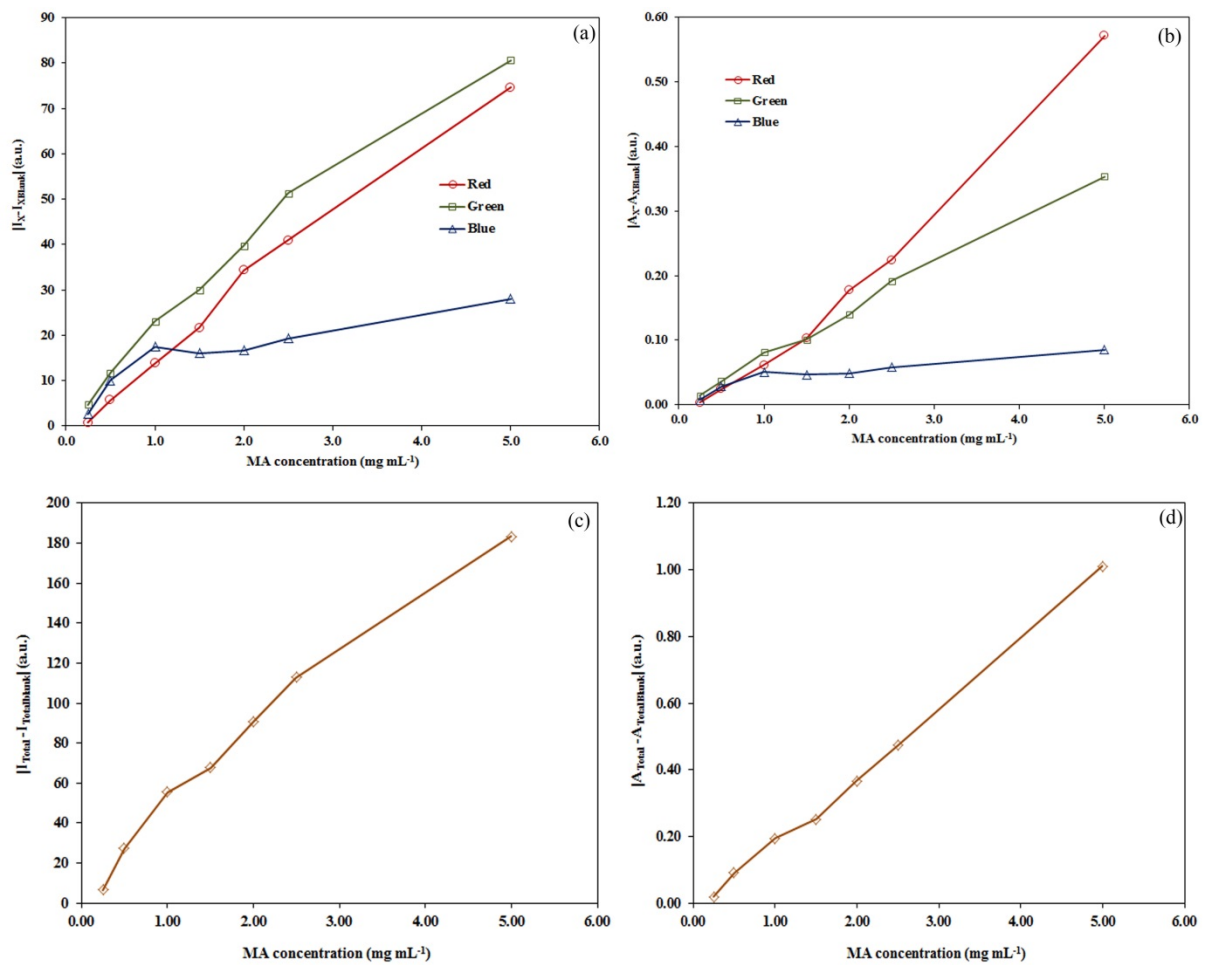


รูปที่ 11 ความเสถียรของเซนเซอร์แบบตรวจวัดสีชนิดโซล-เจล

เมื่อนำมาใช้ร่วมกับการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลโดยใช้ app (ColorAssist) บนโทรศัพท์เคลื่อนที่สมรรถนะสูง (iPhone 4.0) ทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มสี (และค่าการดูดกลืนแสง) กับความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนดังรูปที่ 12 และ 13 โดยสามารถนำช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงมาใช้ในการหาปริมาณของสารได้ ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนกับ (a) ค่าความเข้มสีเดี่ยว (Intensity) (b) ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) (c) ค่าความเข้มสีรวม (Total intensity) (d) ค่าการดูดกลืนแสงรวม (Total absorbance)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์แบบตัดผลของแปลงค์ระหว่างความเข้มข้นของเมทแอมเฟตามีนกับ (a) ค่าความเข้มสีเดี่ยว (Intensity) (b) ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) (c) ค่าความเข้มสีรวม (Total intensity) (d) ค่าการดูดกลืนแสงรวม (Total absorbance)

ตารางที่ 4 สมการกราฟมาตรฐานและสมรรถนะของเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้น

Relationship	Calibration equation ($y = a.u.$, $x = \text{mgmL}^{-1}$)	Linear range (mgmL^{-1})	Linearity (R^2)	Accuracy (%RE [*])	LOD ^{**} (mgmL^{-1})
I_R	$y = -(18.6 \pm 0.7)x + (107 \pm 1)$	0.25 – 2.5	0.9955	+8.0	0.223 $\pm$ 0.009
I_G	$y = -(20.1 \pm 0.6)x + (144.3 \pm 0.9)$	0 – 2.5	0.9940	+5.3	0.207 $\pm$ 0.006
A_R	$y = (0.124 \pm 0.006)x + (0.33 \pm 0.02)$	0.50 – 5.0	0.9908	+9.3	0.52 $\pm$ 0.02
A_G	$y = (0.071 \pm 0.002)x + (0.246 \pm 0.004)$	0 – 5.0	0.9964	+0.1	0.318 $\pm$ 0.008
$ I_R - I_{R\text{blank}} $	$y = (18.2 \pm 0.7)x - (4 \pm 1)$	0.25 – 2.5	0.9943	+2.2	0.212 $\pm$ 0.008
$ I_G - I_{G\text{blank}} $	$y = (19.8 \pm 0.8)x + (1 \pm 1)$	0.25 – 2.5	0.9941	+9.3	0.225 $\pm$ 0.009
$ A_R - A_{R\text{blank}} $	$y = (0.124 \pm 0.006)x - (0.06 \pm 0.02)$	0.50 – 5.0	0.9908	+9.3	0.53 $\pm$ 0.02
$ A_G - A_{G\text{blank}} $	$y = (0.071 \pm 0.002)x + (0.002 \pm 0.005)$	0.25 – 5.0	0.9957	+6.7	0.35 $\pm$ 0.01
$I_{\text{Total}} (I_R + I_G + I_B)$	$y = -(41 \pm 2)x + (395 \pm 4)$	0.50 – 2.5	0.9893	+0.9	0.29 $\pm$ 0.02
$A_{\text{Total}} (A_R + A_G + A_B)$	$y = (0.203 \pm 0.005)x + (0.83 \pm 0.01)$	0 – 5.0	0.9965	+0.8	0.310 $\pm$ 0.008
$ I_{\text{Total}} - I_{\text{Totalblank}} $	$y = (32 \pm 2)x + (25 \pm 5)$	1.0 – 5.0	0.9906	+9.3	0.53 $\pm$ 0.03
$ A_{\text{Total}} - A_{\text{Totalblank}} $	$y = (0.206 \pm 0.005)x + (0.03 \pm 0.01)$	0.25 – 5.0	0.9971	+6.7	0.59 $\pm$ 0.01

*%RE= $(x_e - x_{\text{control}})/x_{\text{control}} \times 100$, x_{control} = a known-concentration of MA standard solution (0.75 mgmL^{-1}), x_e = concentration of MA quantified using external calibration
 ** LOD = limit of detection calculated by y at $\text{LOD} = y_B + 3S_B$ where y_B is intercept of calibration curve and S_B is standard deviation of blank).

เมื่อนำเซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมาประยุกต์ใช้สำหรับตรวจวัดเมทแอมเฟตามีนในตัวอย่างยาบ้าพบว่า ให้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการใช้เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี ดังแสดงในตาราง 5 ในขณะที่การวิเคราะห์ตัวอย่างปัสสาวะที่เติม (Spike) เมทแอมเฟตามีนให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกับค่าจริงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างยาบ้า

Sample no.	% of MA in Yaba samples		%Relative error
	Sol-gel MA sensor *	GC-FID	
1.	18.±1%	19.9±0.4%	-9.5%
2.	18±1%	17.4±0.1%	+3.4%
3.	18±2 %	18.7±0.2%	-3.7%
4.	19±2%	19.3±0.3%	-1.6%
5.	19.9±0.3%	18.1±0.5%	+9.9%

* quantified by using I_G equation: $y = - (20.1 \pm 0.6)x + (144.3 \pm 0.9)$

ตารางที่ 6 การวิเคราะห์ตัวอย่างปัสสาวะ

Sample no.	Spiked	Quantified *	%Relative error
1.	1.0	0.94	-6%
2.	1.0	1.04	+4%
3.	1.0	1.03	+3%
4.	1.0	1.04	+4%
5.	1.0	0.91	-9%

* quantified by using I_G equation: $y = - (20.1 \pm 0.6)x + (144.3 \pm 0.9)$

ผลการวิจัยส่วนนี้ชี้ให้เห็นว่า เซนเซอร์ที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพและสามารถนำไปประยุกต์ใช้จริงสำหรับวิเคราะห์เมทแอมเฟตามีนในยาเสพติดหรือปัสสาวะภาคสนามได้โดยเซนเซอร์ดังกล่าวใช้ง่าย ทราบผลทันที มีความถูกต้อง แม่นยำสูงเทียบเท่าเครื่องมือวิเคราะห์ที่มีราคาแพงแต่มีราคาถูกลงกว่าหลายเท่าตัว โดยจากการประมาณราคาต้นทุนของการใช้สารเคมีทั้งหมดพบว่า มีต้นทุนสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเซนเซอร์ประมาณ 9 สตางค์ต่อเซนเซอร์ ในขณะที่ราคาภาชนะบรรจุเซนเซอร์ (Micro-PCR tube) ประมาณ 0.50 บาท/หลอด จึงมีต้นทุนของเซนเซอร์ประมาณ 60 สตางค์ แตกต่างจากชุดทดสอบยาเสพติดเบื้องต้นที่มีขายตามท้องตลาด (ราคาประมาณ 70 ถึง 100 บาท) หลายเท่าตัว

ต้นแบบ (Prototype) สำหรับการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์

ผลงานวิจัยนี้ได้รับการออกแบบต้นแบบสำหรับการจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ดังรูปที่ 14 ขณะนี้กำลังอยู่ในระหว่างการให้บริการฟรีกับประชาชน องค์การบริหารส่วนท้องถิ่น และหน่วยงานราชการอื่นที่สนใจ ณ ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมสิ่งแวดล้อมอันดามัน คณะเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตภูเก็ต อ.กะทู้ จ.ภูเก็ต โทรศัพท์ 0 7627 6481

