บทความวิจัย

การทดลองหาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูโดยใช้สมาร์ทโฟน สำหรับนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย

พจนา พลชัย และ ศศิธร มั่นเจริญ*

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์หาค่าคงที่สมดุล (K) ของโบรโมไทมอลบลูโดยใช้ภาพถ่ายจากกล้องสมาร์ทโฟน (smart phone) และวิเคราะห์ภาพถ่ายในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (RGB color) ด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS6 เพื่อการเรียนการสอนสำหรับนักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย โดยงานวิจัยนี้ได้ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่างๆ เช่น ตำแหน่งการวางสมาร์ทโฟน ชนิดอุปกรณ์บรรจุสารละลาย ระยะโฟกัสในการถ่ายภาพ การควบคุมความเข้มแสง และสมาร์ทโฟนจากผู้ผลิตที่ต่างกัน เป็นต้น และได้นำผลการทดลองที่ได้จากวิธีที่พัฒนาขึ้นไปศึกษาเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมททรี (วิธีมาตรฐาน) ซึ่งจากผลการศึกษาพบว่าค่า pK_a ของโบรโมไทมอลบลูจากวิธีที่พัฒนาขึ้น และจากเทคนิคสเปกโทรโฟโตเมททรี มีค่าเท่ากับ 7.07 ± 0.09 และ 7.04 ± 0.08 ตามลำดับ ซึ่งการวิเคราะห์ของทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (t_{cal} = 1.61 และ t_{table} = 2.14) นอกจากนี้ยังได้นำวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าคงที่สมดุลสำหรับอินดิเคเตอร์ชนิดอื่น เช่น โบรโมครีซอลกรีน ซึ่งให้ค่า $pK_a = 4.64 \pm 0.02$ ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน ($pK_a = 4.66 \pm 0.02$)

คำสำคัญ: โบรโมไทมอลบลู ค่าคงที่สมดุล สเปกโทรโฟโตเมททรี ระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน สมาร์ทโฟน

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน, e-mail: muncharoen@go.buu.ac.th

A Simple Experiment to Evaluate the Equilibrium Constant of Bromothymol Blue Using Smart Phone for High School Students

Podjana Palachai and Sasithorn Muncharoen*

ABSTRACT

The equilibrium constant (K) determination of bromothymol blue by analysis of images from smartphone using RGB color system within Adobe Photoshop CS6 program was presented in this work. This method was developed for teaching and learning of students in high schools. The optimum conditions for example positions of smartphone, types of sample container, focus distance, Luminous Intensity control and smartphone brands were investigated. Under the optimal condition, the results from the proposed method were compared to the results from spectrophotometric method as standard method. It was observed that pK_a values of bromothymol blue between the proposed method and standard method were 7.07 ± 0.09 and 7.04 ± 0.08, respectively. The obtained results from both methods were not significantly different at 95% confidence limit ($t_{cal} = 1.61$ and $t_{table} = 2.05$). In addition, this method was applied to determine the equilibrium constant for other indicators such as bromocresol green. The achieved pK_a value was 4.64 ± 0.02 equivalent to the value from standard method ($pK_a = 4.66 \pm 0.02$).

Keywords: bromothymol blue, equilibrium constant, spectrophotometry, RGB system, smartphone

Chemistry Department, Faculty of Science, Burapha University

*Corresponding author, email: muncharoen@go.buu.ac.th, muncharoen@buu.ac.th

บทนำ

"สมดุลเคมี" เป็นหนึ่งในเนื้อหาของการเรียนการสอนวิชาเคมี ในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย และยังเป็นความรู้พื้นฐานสำคัญสำหรับบทเรียนอื่น อาทิ กรด-เบส และไฟฟ้าเคมี เป็นต้น ซึ่งในการเรียนเรื่องสมดุลเคมี นักเรียนสามารถเรียนรู้เกี่ยวกับสมดุลเคมี และการศึกษาค่าคงที่สมดุล ได้จากการทดลองตามหนังสือเรียนรายวิชาเพิ่มเติม เคมี เล่ม 3 ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4-6 กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์ ตามหลักสูตรแกนกลางการศึกษาขั้นพื้นฐาน พุทธศักราช 2551 โดยอาศัยปฏิกิริยาระหว่างเหล็ก (III) (Fe^{3+}) และไทโอซายาเนต (SCN^-) [1] ดังสมการที่ (1)

$$Fe^{3+}(aq) + SCN^-(aq) \rightleftharpoons FeSCN^{2+}(aq) \quad \text{.....(1)}$$

เหลืองอ่อน ไม่มีสี แดงเลือด

จากการทดลองดังกล่าวทำให้ได้ของเสีย (waste) เป็นโลหะหนักที่เป็นพิษ ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้ ทั้งนี้เพราะส่วนใหญ่โรงเรียนในระดับชั้นมัธยมศึกษาในประเทศไทยนั้นไม่มีระบบการแยกหรือบำบัดน้ำทิ้งจากห้องปฏิบัติการ จึงทำให้น้ำทิ้งดังกล่าวถูกระบายลงสู่ท่อน้ำทิ้งโดยตรง ซึ่งอาจเกิดการปนเปื้อนต่อสิ่งแวดล้อมกลายเป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้นอินดิเคเตอร์ชนิดกรด-เบส (acid-base indicator) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการนำมาใช้สำหรับการศึกษาค่าคงที่สมดุล เพราะของเสียที่เกิดนั้นจะมีคุณสมบัติที่เป็นกลาง อีกทั้งอินดิเคเตอร์เองเป็นสารอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษน้อย จึงเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมรวมทั้งไม่เป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลองด้วย

โบรโมไทมอลบลู (Bromothymol blue) เป็นอินดิเคเตอร์ชนิดกรดเบสที่นิยมนำมาใช้ศึกษาค่าคงที่สมดุล ซึ่งโบรโมไทมอลบลูมีการเปลี่ยนแปลงสีอยู่ช่วงกรดเบสอยู่ระหว่าง 6.0-7.6 (เหลือง-น้ำเงิน) โดยเมื่ออยู่ในสภาวะกรดจะมีสีเหลือง เมื่ออยู่ในสภาวะเบสจะมีสีน้ำเงิน และเมื่ออยู่ในสภาวะสมดุลจะมีสีเขียว ซึ่งสามารถนำมาศึกษาค่าคงที่สมดุลได้โดยการนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ [2] และจากรายงานวิจัยต่างๆ พบว่าการวิเคราะห์หาค่าคงที่สมดุลส่วนใหญ่จะใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมททรี [2-4] อย่างไรก็ตามแม้ว่าเทคนิคทางสเปกโทรโฟโตเมททรีนี้จะมีข้อดีคือให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องแม่นยำ แต่มีข้อเสียที่สำคัญสำหรับการเรียนการสอนในระดับชั้นมัธยมศึกษาคือเครื่องมือมีราคาแพง ซึ่งทำให้บางโรงเรียนไม่สามารถบรรจุการทดลองเรื่องการศึกษาค่าคงที่สมดุลลงในหลักสูตรการเรียนรู้ได้ จึงทำได้แต่เพียงให้นักเรียนเรียนรู้เรื่องค่าคงที่สมดุลจากการคำนวณตามข้อมูลที่ครูผู้สอนกำหนดให้เท่านั้น ไม่ได้ลงมือทำการทดลองจริง ซึ่งจะส่งผลต่อความเข้าใจอย่างแท้จริงในการเรียนของนักเรียนได้ อย่างไรก็ตาม พบว่าในปัจจุบันได้มีการพัฒนาหรือการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีราคาถูกมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์อย่างมากมาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประยุกต์ใช้สมาร์ทโฟนเพื่อเป็นอุปกรณ์ในการตรวจวิเคราะห์ทางเคมี เช่น การหาปริมาณคลอรีน [5] และไตรไนโตรโทลูอีน [6] รวมทั้งการนำไปประยุกต์ใช้เป็นอุปกรณ์ในการวิเคราะห์สำหรับห้องปฏิบัติการ เพื่อใช้จัดกิจกรรมการเรียนรู้ทั้งในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย และอุดมศึกษา เช่น การใช้สมาร์ทโฟนในการหาค่าคงที่สมดุลของไอออนเชิงซ้อนระหว่าง เหล็ก(II) กับ 1,10-phenanthroline สำหรับการจัดการเรียนรู้ในห้องปฏิบัติการทางเคมีวิเคราะห์ และเคมีเชิงฟิสิกส์ ของนักศึกษาระดับปริญญาตรี เป็นต้น

ด้วยเหตุนี้ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความประสงค์ที่จะพัฒนาวิธีในการศึกษาค่าคงที่สมดุลให้มีความสะดวก รวดเร็ว ถูกต้อง แม่นยำ และมีราคาถูก โดยการพัฒนาวิธีการศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลู โดยอาศัยสมาร์ทโฟนเป็นอุปกรณ์การตรวจวัด (detector) ทดแทนการใช้เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ นอกจากนี้ยังพบว่าในปัจจุบันนักเรียนส่วนใหญ่มีสมาร์ทโฟนเป็นของตนเอง ซึ่งหากมีการนำสมาร์ทโฟนมาใช้เป็นอุปกรณ์ในการเรียนการสอนจะทำให้นักเรียนทำการทดลองได้ทั่วถึง ส่งผลให้นักเรียนสามารถเข้าใจบทเรียนได้มากขึ้น และยังเป็นการนำเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนทางด้านเคมีได้อีกทางหนึ่งด้วย

อุปกรณ์และวิธีทดลอง

สารเคมีและอุปกรณ์

โบรโมไทมอลบลู ($C_{27}H_{28}Br_2O_5S$) เกรดห้องปฏิบัติการ บริษัทแกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด โซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) สำหรับการเตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ ของบริษัทแกมมาโก้ (ประเทศไทย) จำกัด สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ และสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้น 0.1 โมลาร์ เกรดอุตสาหกรรมของศึกษาภัณฑ์พาณิชย์ ใช้สำหรับปรับค่าพีเอชของสารละลายบัฟเฟอร์

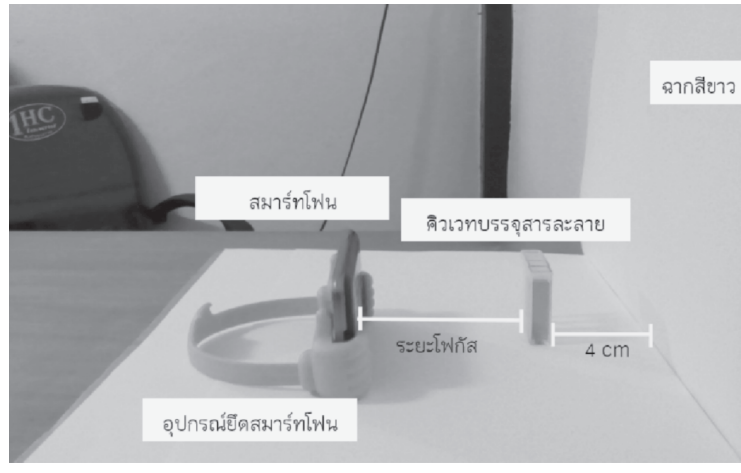
การวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น UV-1601 (Shimudzu) เครื่องวัดค่าพีเอช (บริษัทเมทเล่อร์-โทเลโด (จำกัด)) และโปรแกรมสำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลสีจากระบบสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน คือ Adobe Photoshop CS6 ซึ่งพัฒนาขึ้นโดยบริษัทอะโดบีซิสเต็มส์ สำหรับสมาร์ทโฟนที่ทำการศึกษามีทั้งหมด 3 บริษัท ได้แก่ Wiko Lenny 2 (กล้อง 5 ล้านพิกเซล) Samsung Galaxy J1 mini (กล้อง 5 ล้านพิกเซล) และ iPhone 6s (กล้อง12 ล้านพิกเซล)

การเตรียมสารเคมี

เตรียมสารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟต พีเอช 7.0 โดยชั่งโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตหนัก 0.40 กรัม และสารไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตหนัก 0.80 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 50.0 มิลลิลิตร เติมสารละลายโบรโมไทมอลบลู จำนวน 20 หยด (ได้สารละลายสีเขียว) บันทึกค่าพีเอช จากนั้นปิเปตสารละลายสีเขียวของโบรโมไทมอลบลูใส่ลงในบีกเกอร์ จำนวน 3 ใบๆ ละ 10.00 มิลลิลิตร บีกเกอร์ใบที่ 1 เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาตร 2มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเหลือง บีกเกอร์ใบที่ 2 เติมน้ำกลั่น จำนวน 2 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเขียว และบีกเกอร์ใบที่ 3 เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ จำนวน 2 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีน้ำเงิน นำสารละลายที่ทั้ง 3 บีกเกอร์ไปถ่ายภาพสำหรับนำไปวิเคราะห์ความเข้มแสงของสีในระบบสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงิน เพื่อคำนวณค่าคงที่สมดุลต่อไป และสำหรับวิธีสเปกโทรโฟโตเมททรี (วิธีมาตรฐาน) นำสารละลายทั้ง 3 ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 433 และ 616 นาโนเมตร จากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดไปคำนวณหาค่าคงที่สมดุลตามรายงานวิจัยของ Klotz และคณะ [2]

การติดตั้งอุปกรณ์

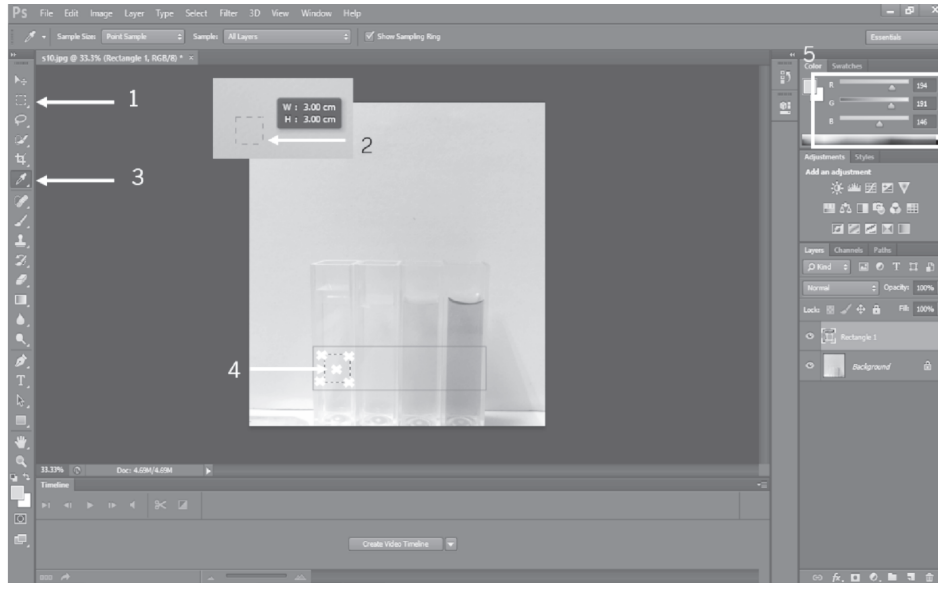
การศึกษาค่าคงที่สมดุลโดยการใช้กล้องจากสมาร์ทโฟนถ่ายภาพสารละลายของโบรโมไทมอลบลูที่มีสีเหลือง สีเขียว และสีน้ำเงิน โดยนำสารละลายอินดิเคเตอร์ทั้งสามสี และสารละลายแบลงค์ (blank) บรรจุลงในคิวเวทพลาสติกแล้วนำไปถ่ายภาพ โดยจัดวางองค์ประกอบตามภาพที่ 1 ฉากสีขาวที่ใช้ในการถ่ายภาพทำมาจากกระดาษขาวร้อยปอนด์ชนิดละเอียด วางคิวเวทที่บรรจุสารละลายดังกล่าวโดยให้ระยะห่างจากฉากสีขาวด้านหลังถึงคิวเวทบรรจุสารละลายมีระยะห่าง 4.0 เซนติเมตร (ดังภาพที่ 1) เพื่อลดการเกิดเงาของคิวเวทบรรจุสารละลายบนฉากหลัง และระยะระหว่างคิวเวทบรรจุสารละลายถึงสมาร์ทโฟน (ระยะโฟกัส) มีระยะห่าง 10.0 เซนติเมตร วางสมาร์ทโฟนให้ตั้งฉากกับพื้น โดยยึดสมาร์ทโฟนด้วยอุปกรณ์ดังภาพที่ 1 จากนั้นเลือกโหมดการถ่ายภาพแบบปกติ ไม่มีการซูมภาพ ไม่เปิดแฟลช และไม่ใช้แอพพลิเคชันใดๆ ในการถ่ายภาพ ทำการถ่ายภาพที่ตำแหน่งเดียวกันทุกครั้ง จัดเก็บเป็นไฟล์รูปภาพนามสกุล JPEG นำภาพถ่ายที่ได้ประมวลค่าสีในระบบระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS6 [5-7]



รูปที่ 1 ภาพถ่ายการจัดวางอุปกรณ์สำหรับวิธีการวิเคราะห์ที่พัฒนาขึ้น

การวิเคราะห์ความเข้มสีด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS6

ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเข้มสีของภาพถ่ายที่ได้ในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS6 มีขั้นตอนการวิเคราะห์ดังภาพที่ 2 โดยเริ่มจากเมาส์คลิกที่ปุ่ม (หมายเลข 1) แล้วเลือกให้มีพื้น ที่ W และ H เป็น 3.00 และ 3.00 เซนติเมตร (หมายเลข 2) แล้วลากไปแล้วบริเวณตามหมายเลข 4 จากนั้นคลิกปุ่ม (หมายเลข 3) แล้วนำไปคลิกตามจุด x ทั้งหมด 5 จุด (หมายเลข 4) โดยแต่ละจุดอ่านค่าความเข้มสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน (หมายเลข 5) [5-8]



รูปที่ 2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ความเข้มสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินด้วยโปรแกรม Adobe Photoshop CS6

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

การคำนวณค่าคงที่สมดุล

(ก) เครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

การศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ซึ่งจัดเป็นวิธีมาตรฐานในการศึกษาค่าคงที่สมดุล โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงของโบรโมไทมอลบลูในสภาวะกรด (สารละลายสีเหลือง) สภาวะเบส (สารละลายสีน้ำเงิน) และสารละลายผสมระหว่างสภาวะกรด และเบส (สารละลายสีเขียว) ที่ความยาวคลื่น 616 และ 433 นาโนเมตร แล้วคำนวณค่าคงที่สมดุล (K_c) ดังสมการที่ (2) ตามรายงานวิจัยของ Klotz และคณะ [2]

$$K_c = \frac{[H_3O^+](A^{green}_{616\,nm} - A^{yellow}_{616\,nm}) \times A^{yellow}_{433\,nm}}{(A^{green}_{433\,nm} - A^{blue}_{433\,nm}) \times A^{blue}_{616\,nm}}$$

โดยให้ $[H_3O^+]$: ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนที่ได้จากการวัดค่าพีเอชของสารละลายสีเขียว

$A^{green}_{616\,nm}$: ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีเขียวที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร

$A^{yellow}_{616\,nm}$: ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีเหลืองที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร

$A^{yellow}_{433\,nm}$: ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีเหลืองที่ความยาวคลื่น 433 นาโนเมตร

$A^{green}_{433\,nm}$: ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีเขียวที่ความยาวคลื่น 433 นาโนเมตร

$A^{blue}_{433\,nm}$: ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 433 นาโนเมตร

$A^{blue}_{616\,nm}$: ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 616 นาโนเมตร

ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (2) จะมีค่าน้อยมาก ซึ่งทำให้การพิจารณาเปรียบเทียบผลของค่าคงที่สมดุลที่คำนวณได้ดังกล่าวเห็นไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงนิยมนำค่า pKc มาใช้พิจารณาในการศึกษาค่าคงที่สมดุล นอกจากนี้ยังพบว่าอินดิเคเตอร์โบรโมไทมอลบลูเป็นกรดอ่อน จึงสามารถรายงานในรูปของ pK_a แทน pK_c ได้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า Ka และ pKa ดังสมการที่ (3) [9]

$$pK_a = -\log K_a \qquad \text{.....(3)}$$

และจากผลการศึกษาค่าคงที่สมดุลด้วยด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่า pK_a มีค่าเท่ากับ 7.04 ± 0.08 (n=15) และเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่า pK_a ของโบรโมไทมอลบลูตามหนังสือ “Handbook of Analytical Chemistry” [10] พบว่ามีค่าไม่แตกต่างกัน ($pK_a = 7.1$) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ค่า $pK_a = 7.04$ เป็นค่า pK_a มาตรฐานในการเปรียบเทียบสำหรับการศึกษาต่อไป

(ข) สมาร์ทโฟน

สำหรับการศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูด้วยกล้องจากสมาร์ทโฟนนั้น สามารถทำการทดลองโดยการนำภาพถ่ายที่ได้จากสมาร์ทโฟนมาวิเคราะห์ค่าสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน โดยทำการเปลี่ยนค่าความเข้มสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินให้เป็นค่าการดูดกลืนแสงโดยใช้สูตรตามสมการที่ (4) [11] ซึ่ง A คือค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) I คือค่าความเข้มสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินของสารละลายโบรโมไทมอลบลูสีต่างๆ I_0 คือค่าความเข้มสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ของสารละลายแบลงค์ (น้ำกลั่น)

$$\text{ค่าการดูดกลืนแสง} = -\log \frac{I}{I_0} \qquad \text{.....(4)}$$

จากนั้นนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ มาคำนวณหาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลู ดังสมการที่ (5) ซึ่งเป็นสมการที่ประยุกต์มาจากงานวิจัยของ Klotz และคณะ [2] และการรายงานผลค่าคงที่สมดุลจะรายงานในรูปของค่า pK_a โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างค่า K_a และ pK_a (ตามสมการที่ (3)) เช่นเดียวกับการคำนวณค่าคงที่สมดุลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

$$K_c = \frac{[H_3O^+]\,(A_R^{green} - A_R^{yellow}) \times A_B^{yellow}}{(A_B^{green} - A_B^{blue}) \times A_R^{blue}} \qquad \text{.....(5)}$$

โดยให้ $[H_3O^+]$: ค่าความเข้มข้นของไฮโดรเนียมไอออนที่ได้จากการวัดค่าพีเอชของสารละลายสีเขียว

A_R^{green} : ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีเขียวที่ระบบสีแดง (R)

A_R^{yellow} : ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีเหลืองที่ระบบสีแดง (R)

A_B^{yellow} : ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีเหลืองที่ระบบสีน้ำเงิน (B)

A_B^{green} : ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีเขียวที่ระบบสีน้ำเงิน (B)

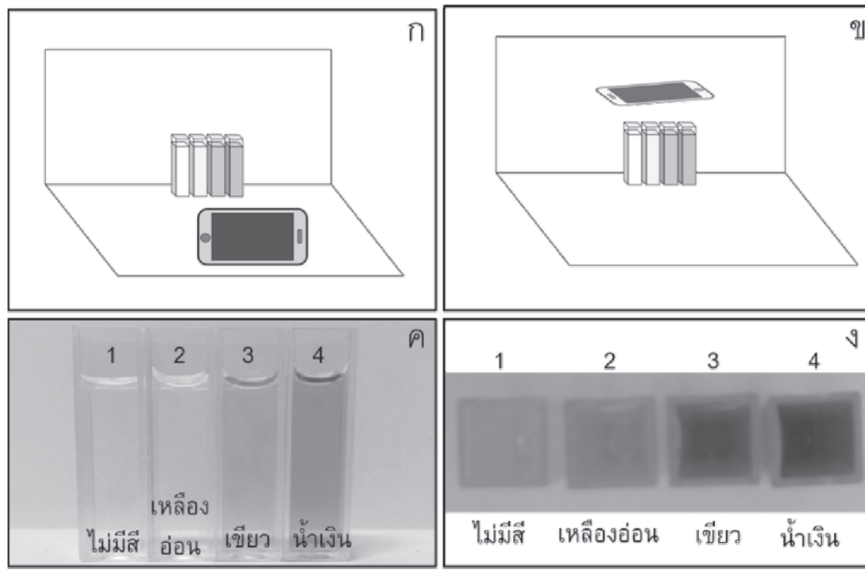
A_B^{blue} : ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีน้ำเงินที่ระบบสีน้ำเงิน (B)

A_R^{blue} : ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายสีน้ำเงินที่ระบบสีแดง (R)

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสม

(ก) ตำแหน่งการวางสมาร์ทโฟน

การศึกษาผลของตำแหน่งการวางสมาร์ทโฟนสำหรับการหาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลู ในการทดลองนี้ได้ศึกษาที่ตำแหน่งการวางสมาร์ทโฟน 2 ตำแหน่ง คือ ถ่ายภาพด้านข้าง (side view) และถ่ายภาพด้านบน (top view) ดังภาพที่ 3 ซึ่งจากผลการศึกษาเมื่อนำภาพถ่ายด้านข้าง และภาพถ่ายด้านบนมาวิเคราะห์หาค่าคงที่สมดุลโดยใช้ค่าสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน พบว่าค่า pK_a ของโบรโมไทมอลบลูจากการถ่ายภาพด้านข้าง และการถ่ายภาพด้านบนมาเปรียบเทียบกับค่า pK_a ที่ได้จากเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ (relative error) เท่ากับ ร้อยละ 0.99 และ 3.98 ตามลำดับ ดังนั้นตำแหน่งการถ่ายภาพที่เหมาะสมในการศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูจึงเป็นการถ่ายภาพด้านข้าง เพราะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของค่า pK_a ที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่า pK_a ที่ได้จากการถ่ายภาพด้านบน (ดังตารางที่ 1) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการถ่ายภาพด้านบนทำให้สารละลายได้รับแสงไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากโทรศัพท์และตัวของผู้ทำการทดลองบดบังแสงจึงเกิดเงาขึ้น ทำให้ภาพถ่ายที่นำไปวิเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนสูงกว่า ส่วนการถ่ายภาพด้านข้างนั้นสารละลายทั้งหมดอยู่ในสภาวะเดียวกันไม่มีเงาใดๆ รบกวนขณะถ่ายภาพ และเมื่อนำภาพถ่ายที่ได้ไปวิเคราะห์หาค่าคงสมดุลจึงทำให้ค่าคงที่สมดุลที่ได้จากการถ่ายภาพด้านข้างมีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่า ดังนั้นในจึงเลือกใช้ตำแหน่งการวางสมาร์ทโฟนในตำแหน่งของการถ่ายภาพด้านข้างเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป



รูปที่ 3 บน : ภาพจำลองการศึกษาผลของตำแหน่งการถ่ายภาพสำหรับการหาค่า pK_a ของโบรโมไทมอลบลู (ก) ถ่ายภาพด้านข้าง (side view) และ (ข) ถ่ายภาพด้านบน (top view) และล่าง : ภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพตามตำแหน่งด้านบน (ค) ภาพถ่ายด้านข้าง และ (ง) ภาพถ่ายด้านบน (1: แบลงค์ (น้ำกลั่น), 2-4: โบรโมไทมอลบลู)

ตารางที่ 1 ค่า pKa ของโบรโมไทมอลบลูที่ได้จากการศึกษาตำแหน่งการถ่ายภาพ

ตำแหน่งการถ่ายภาพ	ค่า pK_a จากการวิเคราะห์ด้วยสมาร์ทโฟน			ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
-ถ่ายภาพด้านข้าง (side view)	7.01	6.90	6.99	6.97 ± 0.06
-ถ่ายภาพด้านบน (top view)	6.76	6.80	6.73	6.76 ± 0.04

(ข) ชนิดอุปกรณ์บรรจุสารละลาย

ผลของชนิดอุปกรณ์บรรจุสารละลายที่มีต่อค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลู ที่ทำการศึกษาโดยการใช้กล้องถ่ายรูปจากสมาร์ทโฟน โดยในการศึกษานี้ได้เลือกชนิดอุปกรณ์บรรจุสารละลายที่มีในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ คิว เวทควอซ์ต (quartz cuvette) คิวเวทแก้ว (glass cuvette) คิวเวทพลาสติก (plastic cuvette) และหลอดทดลองแก้วขนาดเล็ก (glass test tube) ทำการทดลองโดยการวิเคราะห์ภาพถ่ายสารละลายโบรโมไทมอลบลูที่บรรจุอยู่ในอุปกรณ์ชนิดต่างๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2 และจากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าการศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูที่ใช้อุปกรณ์บรรจุสารละลายทั้ง 4 ชนิด พบว่า คิวเวทควอซ์ต คิวเวทแก้ว คิวเวทพลาสติก และหลอดทดลองขนาดเล็ก มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ เท่ากับร้อยละ 0.14, 8.95, 0.99 และ 0.71 ตามลำดับ (เปรียบเทียบกับค่า pKa ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์) ซึ่งจะเห็นว่าคิวเวทควอซ์ตมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยที่สุด แต่เนื่องจากคิวเวทควอซ์ทมีราคาที่แพง และแตกหักได้ง่าย อีกทั้งต้องใช้จำนวนมากในการทำการทดลองในห้องเรียน จึงไม่เหมาะสำหรับการนำมาใช้ในการเรียนการสอน และเมื่อพิจารณาระหว่างคิวเวทพลาสติก และหลอดทดลองแก้วขนาดเล็ก ถึงแม้หลอดทดลองแก้วขนาดเล็กจะมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยที่สุดแต่เนื่องจากวัสดุทำมาจากแก้ว ซึ่งหากเกิดแตกหักระหว่างทำการทดลองก็อาจก่อให้เกิดอันตรายแก่นักเรียนที่ทำการทดลองได้ ดังนั้นคิวเวทพลาสติกจึงเป็นอุปกรณ์บรรจุสารละลายที่มีความเหมาะสม เนื่องจากให้ผลการทดลองที่มีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อย มีราคาถูก และปลอดภัยต่อนักเรียนที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 2 ค่า pK_a ของโบรโมไทมอลบลูที่ได้จากการศึกษาผลของชนิดอุปกรณ์บรรจุสารละลาย

อุปกรณ์บรรจุสารละลาย	ค่า pK_a จากการวิเคราะห์ด้วยสมาร์ทโฟน			ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
คิวเวทควอซ์ต	7.25	6.91	6.92	7.03 ± 0.19
คิวเวทแก้ว	6.46	6.21	6.56	6.41 ± 0.18
คิวเวทพลาสติก	7.01	6.90	6.99	6.97 ± 0.06
หลอดทดลองแก้วขนาดเล็ก	6.96	7.04	6.97	6.99 ± 0.04

(ค) ระยะโฟกัสที่ใช้ในการถ่ายภาพ

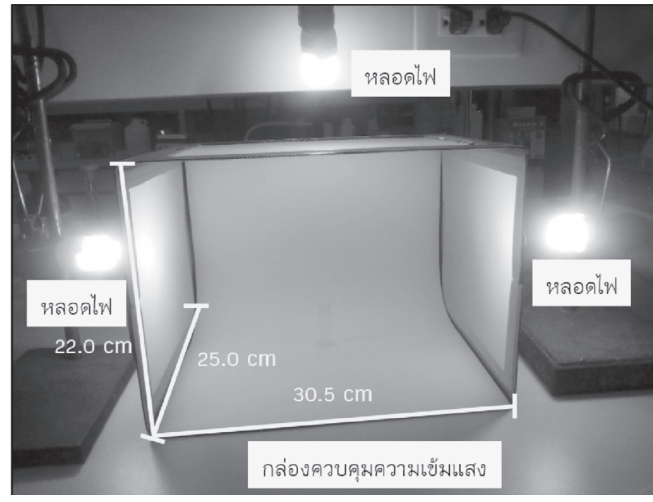
การศึกษาผลของระยะโฟกัสที่ใช้ในการถ่ายภาพที่มีต่อค่าคงที่สมดุลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยการถ่ายภาพจากสมาร์ทโฟน และเมื่อจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟนตามภาพที่ 1 โดยปรับเปลี่ยนระยะโฟกัสในการถ่ายภาพตั้งแต่ 10.0, 12.5 และ 15.0 เซนติเมตร จากการศึกษาพบว่าค่าคงที่สมดุลที่ได้จากการถ่ายภาพที่ระยะโฟกัส 10.0, 12.5 และ 15.0 เซนติเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าคงที่สมดุลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 0.99, 4.26 และ 1.56 ตามลำดับ (ตารางที่ 3) นอกจากนี้พบว่าเมื่อทำการศึกษาโดยการปรับระยะโฟกัสน้อยกว่า 10.00 เซนติเมตร ไม่สามารถทำการทดลองได้ ทั้งนี้เพราะกล้องจากสมาร์ทโฟนไม่สามารถโฟกัสภาพได้ จึงทำให้ภาพถ่ายที่ได้ขาดความคมชัด ดังนั้นในการทดลองนี้จึงเลือกระยะโฟกัสในการถ่ายภาพที่ 10.0 เซนติเมตร เป็นระยะโฟกัสที่มีความเหมาะสมในการใช้ในการศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูต่อไป

ตารางที่ 3 ค่า pK_a ของโบรโมไทมอลบลูที่ได้จากการศึกษาผลของระยะโฟกัสในการถ่ายภาพ

ระยะโฟกัส (เซนติเมตร)	ค่า pK_a จากการวิเคราะห์ด้วยสมาร์ทโฟน			ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
10.0	7.01	6.90	6.99	6.97 ± 0.06
12.5	6.93	6.99	6.32	6.74 ± 0.37
15.0	6.42	7.01	7.36	6.93 ± 0.48

(ง) การควบคุมความเข้มแสง

การศึกษาผลของความเข้มแสงที่ใช้ในการถ่ายภาพ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์แบบเกลียวที่มีกำลังไฟฟ้า 5 วัตต์ จำนวน 3 ดวง ติดตั้งบริเวณด้านข้าง และด้านบนรวม 3 ตำแหน่ง (ภาพที่ 4) เพื่อควบคุมความเข้มแสงภายในกล่องให้มีความเข้มแสงคงที่และสม่ำเสมอ ซึ่งกล่องควบคุมแสงนี้เรียกว่า “soft box” ที่ใช้ในการศึกษานี้ได้ปรับปรุงมาจากหนังสือเกี่ยวกับการถ่ายภาพ [12] โดยกล่องควบคุมแสงนี้มีขนาดกว้าง × ยาว × สูง เท่ากับ 30.5 × 25.0 × 22.0 เซนติเมตร^3 และมีการใช้กระดาษไขกรุข้างกล่องเพื่อให้มีความนุ่มนวลมากขึ้น ซึ่งวัดความเข้มแสงภายในกล่องด้วย Lux Meter application ในสมาร์ทโฟน พบว่าค่าความเข้มแสงที่ได้มีค่าเท่ากับ 1,250 Lux และเมื่อจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพดังภาพที่ 1 ทั้งใช้และไม่ใช้กล่องควบคุมแสงนี้ จากผลการศึกษาค่าคงที่สมดุลพบว่าการถ่ายภาพโดยใช้กล่องควบคุมความเข้มแสง และไม่ใช้กล่องควบคุมความเข้มแสง มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 1.70 และ 0.99 ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาการถ่ายภาพทั้ง 2 แบบนั้นมีความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์น้อยไม่แตกต่างกัน แต่การควบคุมแสงจะต้องใช้อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายภาพค่อนข้างมาก เช่น กล่องควบคุมแสง หลอดไฟ และปลั๊กไฟ ซึ่งต้องทำการจัดเก็บและติดตั้งใหม่ทุกครั้งที่เลิกใช้และเริ่มใช้งานก่อให้เกิดความยุ่งยากสำหรับผู้ทำการทดลอง ดังนั้นในการทดลองในห้องปฏิบัติการสำหรับนักเรียนจึงเลือกวิธีการถ่ายภาพโดยไม่ใช้กล่องควบคุมแสง เนื่องจากการถ่ายภาพมีอุปกรณ์น้อยสะดวกทั้งในการจัดเก็บและเคลื่อนย้ายอุปกรณ์



รูปที่ 4 องค์ประกอบและขนาดของกล่องควบคุมความเข้มแสงที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยกล้องจากสมาร์ทโฟน

ตารางที่ 4 ค่า pK_a ของโบรโมไทมอลบลูที่ได้จากการศึกษาผลของการควบคุมแสง

การควบคุมแสง	ค่า pK_a จากการวิเคราะห์ด้วยสมาร์ทโฟน			ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
- ถ่ายภาพโดยใช้กล่องควบคุมความเข้มแสง	7.11	7.19	7.18	7.16 ± 0.04
- ถ่ายภาพโดยไม่ใช้กล่องควบคุมความเข้มแสง	7.01	6.90	6.99	6.97 ± 0.06

(จ) สมาร์ทโฟน

การศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูโดยการใช้กล้องถ่ายรูปจากสมาร์ทโฟนที่มีผลิตจากบริษัทต่างกัน โดยเลือกบริษัทที่นักเรียนนิยมใช้ด้วยกันทั้งหมด จำนวน 3 บริษัท ได้แก่ Wiko Lenny 2 (กล้อง 5 ล้านพิกเซล) Samsung Galaxy J1 mini (กล้อง 5 ล้านพิกเซล) และ iPhone 6s (กล้อง12 ล้านพิกเซล) จากการทดลองพบว่าเมื่อนำภาพถ่ายที่ได้จากสมาร์ทโฟนทั้ง 3 บริษัทมาวิเคราะห์หาค่าคงที่สมดุลโดยใช้ค่าสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน พบว่าค่า pKa ของโบรโมไทมอลบลูจากการถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟนที่ผลิตจากบริษัท Wiko Lenny 2 Samsung Galaxy J1 mini และ iPhone 6s (ตารางที่ 5) พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 และเมื่อนำค่า pKa ที่วิเคราะห์ได้จากสมาร์ทโฟนทั้ง 3 บริษัท ไปเปรียบเทียบกับค่า pKa ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ค่ามาตรฐาน) มีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 0.99, 0.71 และ 0.71 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์มีค่าแตกต่างกันน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าสมาร์ทโฟนที่นักเรียนใช้ทั่วไปสามารถนำมาใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูได้

ตารางที่ 5 ผลของการถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟนที่ผลิตจากบริษัทต่างๆ ที่มีต่อการหาค่า pK_a ของโบรโมไทมอลบลู

บริษัทสมาร์ทโฟน	ค่า pK_a จากการวิเคราะห์ด้วยสมาร์ทโฟน			ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
-Wiko Lenny 2	7.01	6.90	6.99	6.97 ± 0.06
-Samsung Galaxy J1 mini	7.08	6.94	6.95	6.99 ± 0.08
-iPhone 6s	7.00	6.96	7.01	6.99 ± 0.03

การหาค่าคงที่สมดุลในสภาวะที่เหมาะสม

เมื่อนำค่าคงที่สมดุล pK_a ของโบรโมไทมอลบลูที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และการวิเคราะห์จากค่าสีของภาพถ่ายในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินด้วยกล้องถ่ายรูปจากสมาร์ทโฟน มาทดสอบสมมติฐานทางสถิติด้วยวิธีวิเคราะห์ค่าที (paired *t*-test method) จากผลการศึกษาพบว่า ค่าคงที่สมดุลของทั้งสองวิธีไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ซึ่งมีระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) เท่ากับ 14 ($t_{คำนวณ}$ เท่ากับ 1.61 และ $t_{ตาราง}$ เท่ากับ 2.14) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ให้ผลการวิเคราะห์ที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงสามารถนำวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอนเรื่องการหาค่าคงที่สมดุลแก่นักเรียนในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายได้

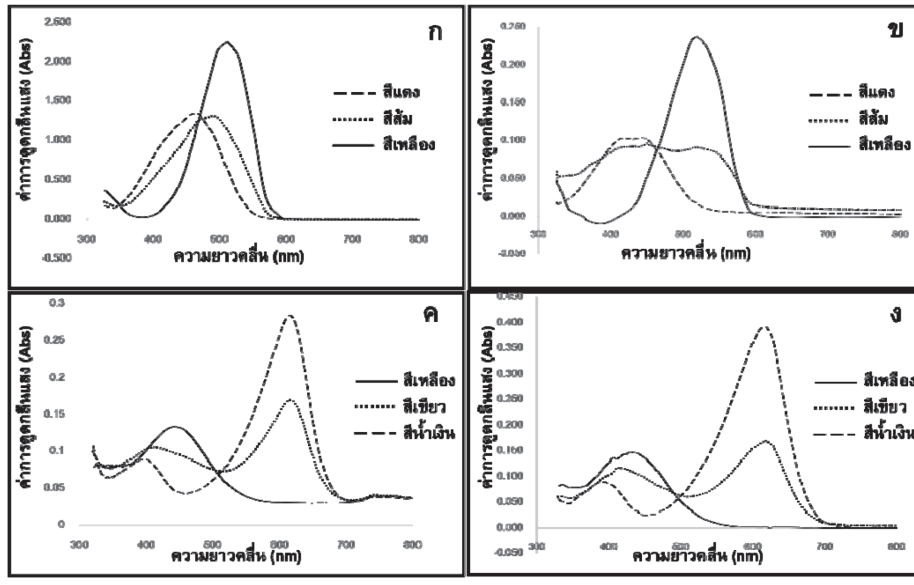
ตารางที่ 6 ผลการศึกษาค่า pK_a เฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่า $t_{คำนวณ}$ ที่ได้จากการวิธีวิเคราะห์ค่าที (paired *t*-test method) ที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีสเปกโตรโฟโตเมทรี และการวิเคราะห์ภาพถ่ายด้วยกล้องจากสมาร์ทโฟน (n=15)

วิธีการวิเคราะห์	ค่า pK_a เฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	$t_{คำนวณ}$
สเปกโทรโฟโตมิเตอร์	7.04	0.08	1.61
สมาร์ทโฟน*	7.07	0.09	

หมายเหตุ *วิเคราะห์ด้วยสมาร์ทโฟนจากบริษัท Wiko Lenny 2

การศึกษาค่าคงที่สมดุลของอินดิเคเตอร์ชนิดอื่น

จากการศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูโดยการวิเคราะห์ค่าสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินของภาพถ่ายด้วยกล้องจากสมาร์ทโฟนเปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าการใช้กล้องจากสมาร์ทโฟนสามารถใช้ศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูได้ดีไม่ต่างจากการใช้สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ทำให้มีการศึกษาเพิ่มเติมกับอินดิเคเตอร์ชนิดอื่นๆ ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ ได้แก่ เมทิลออเรนจ์ (Methyl orange), เมทิลเรด (Methyl red) และโบรโมครีซอลกรีน (Bromocresol green) ซึ่งอินดิเคเตอร์ทั้งสามชนิดนี้มีช่วงกรดเบสการเปลี่ยนแปลงสี (pH range) อยู่ระหว่าง 3.1–4.4 (แดง-เหลือง), 4.2–6.3 (แดง-เหลือง) และ 3.8-5.4 (เหลือง-น้ำเงิน) ตามลำดับ และมีค่า pK_a มาตรฐานเท่ากับ 3.46 สำหรับเมทิลออเรนจ์ 5.00 สำหรับเมทิลเรด และ 4.66 สำหรับโบรโม-ครีซอลกรีน [10] เมื่อทำการศึกษาค่าคงที่สมดุลของอินดิเคเตอร์ทั้งสามชนิดโดยการวิเคราะห์ค่าสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินของภาพถ่ายด้วยกล้องจากสมาร์ทโฟน พบว่าค่า pK_a ของ เมทิลออเรนจ์ เมทิลเรด และโบรโมครีซอลกรีน ให้ค่า pK_a เท่ากับ 3.1 7, 4.87 และ 4.64 ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่า pK_a ที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินของภาพถ่ายด้วยกล้องจากสมาร์ทโฟนกับการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ พบว่าค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์เท่ากับร้อยละ 18.51, 3.56 และ 0.43 ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นว่าค่า pK_a ของเมทิลออเรนจ์ และเมทิลเรดมีค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ค่อนข้างสูง (ร้อยละ 18.51 และ 3.56) ในขณะที่ค่าความคลาดเคลื่อนสัมพัทธ์ของโบรโมครีซอลกรีนมีค่าต่ำ (0.43) และเมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงสีของอินดิเตอร์จะเห็นว่าโบรโมครีซอลกรีน มีการเปลี่ยนแปลงสีเช่นเดียวกับโบรโมไทมอลบลู คือเหลือง-น้ำเงิน ในขณะที่เมทิลออเรนจ์ และเมทิลเรดมีการเปลี่ยนแปลงสีที่เหมือนกัน คือ แดง-เหลือง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะสีที่มีการเปลี่ยนแปลงของอินดิเคเตอร์ทั้งสอง (เมทิลออเรนจ์ และเมทิลเรด) มีความยาวคลื่นในการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ใกล้เคียงกันมาก (แดง-เหลือง) อาจส่งผลรบกวนต่อการคำนวณค่าคงที่สมดุลได้ ซึ่งแตกต่างจากสีที่มีการเปลี่ยนแปลงของโบรโมไทมอลบลู และโบรโมครีซอลกรีน (เหลือง-น้ำเงิน) แสดงดังภาพที่ 5 ดังนั้นหากนำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้มาคำนวณค่าคงที่สมดุลตามสมการที่ (5) ก็อาจส่งผลในค่าคงที่ที่คำนวณได้มีความคลาดเคลื่อนจากค่ามาตรฐานได้ ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงขอเสนอว่าหากต้องการจะนำวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ไปประยุกต์ใช้ในการหาค่าคงที่สมดุลของอินดิเคเตอร์ ควรจะเลือกใช้อินดิเคเตอร์ที่มีสีที่เปลี่ยนแปลงระหว่างช่วงความเป็นกรดเบสของอินดิเตอร์นั้นๆ ให้มีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เพื่อลดผลรบกวนที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 5 สเปกตรัมของอินดิเคเตอร์กรดเบส 4 ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสีในช่วงกรด-เบสที่แตกต่างกัน คือ (ก) เมทิลออเรนจ์ (ข) เมทิลเรด (ค)โบรโมครีซอลกรีน และ (ง) โบรโมไทมอลบลู

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีการศึกษาค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลู ด้วยการวิเคราะห์ค่าสีในระบบสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินของภาพถ่ายด้วยกล้องจากสมาร์ทโฟน โดยใช้โปรแกรม Adobe Photoshop cs6 ซึ่งภายใต้สภาวะที่เหมาะสมค่าคงที่สมดุลของโบรโมไทมอลบลูที่ได้จากวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้ มีค่าที่ไม่แตกต่างจากค่าคงที่สมดุลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ซึ่งเป็นวิธีมาตรฐาน และสามารถใช้หาค่าคงที่สมดุลสำหรับอินดิเคเตอร์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสีของอินดิเคเตอร์ที่แตกต่างกันในสภาวะกรดและเบสที่ เช่น โบรโมไทมอลบลู หรือโบรโมครีซอลกรีน (มีการเปลี่ยนแปลงสีจากเหลือง-น้ำเงินในสภาวะที่เป็นกรดและเบส) เป็นต้น นอกจากวิธีที่พัฒนาขึ้นนี้จะให้ผลการทดลองที่ถูกต้อง แม่นยำแล้ว พบว่ายังใช้อุปกรณ์ในการวิเคราะห์ที่มีราคาไม่แพง หาได้ง่าย และมีวิธีการทำการทดลองที่ไม่ยุ่งยาก สนุกสนาน ซึ่งเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้สำหรับการเรียนการสอน โดยเฉพาะในระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย อีกทั้งสารเคมีที่ใช้ยังมีความปลอดภัย จึงเป็นการลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่งด้วย

การทดลองที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ มีศักยภาพที่จะนำไปใช้เป็นการทดลองในห้องเรียนสำหรับการเรียนการสอนเรื่องค่าคงที่สมดุลได้โดยไม่ต้องมีอุปกรณ์อื่นใดเพิ่มเติม จึงสามารถนำการทดลองนี้ไปใช้เป็นสื่อการเรียนรู้ประกอบการสอนให้กับนักเรียน เพื่อกระตุ้นให้ผู้เรียนเกิดความกระตือรือร้นในการเรียนรู้ และเสริมสร้างความรู้ความเข้าใจให้กับนักเรียนได้มากขึ้น นอกจากนี้นักเรียนยังได้เป็นผู้ลงมือปฏิบัติการทดลองด้วยตนเอง เป็นการเรียนรู้แบบเรียนรู้ด้วยการกระทำ (Learning-by-doing) ตามทฤษฎีการศึกษาของ John Dewey [13] ซึ่งครูผู้สอนสามารถนำไปใช้เพื่อศึกษาพัฒนาการของผลสัมฤทธิ์ทางการเรียน และความพึงพอใจของนักเรียน เพื่อใช้เป็นแนวทางในการทำวิจัยในชั้นเรียนต่อไปได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์สำหรับการทดลองบางส่วนจากโปรแกรมวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ขอขอบคุณคณะผู้บริหารและครูกลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์โรงเรียนกาญจนานุเคราะห์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนแก่ผู้ทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Education, Ministry. 2013. Textbook of Chemistry 3 for Secondary High School. Bangkok. Kurusapa Printing Ladphrao, p 32-58. (in Thai)
2. Klotz, E., Doyle, R., Gross, E., & Mattson, B. 2011. The Equilibrium Constant for Bromothymol Blue: A General Chemistry Laboratory Experiment Using Spectroscopy. *Journal of Chemical Education* 88(5): 637-639.
3. Patterson, G. S. 1999. A Simplified Method for Finding the pKa of an Acid-Base Indicator by Spectrophotometry. *Journal of Chemical Education* 76(3): 395-398.
4. Rodríguez, H. B., and Mirenda, M. 2012. A Simplified Undergraduate Laboratory Experiment to Evaluate the Effect of the Ionic Strength on the Equilibrium Concentration Quotient of the Bromocresol Green Dye. *Journal of Chemical Education* 89(9): 1201-1204.
5. Sumriddetchkajorn, S., Chaitavon, K., and Intaravanne, Y. 2013. Mobile Device-based Self-referencing Colorimeter for Monitoring Chlorine Concentration in Water. *Sensors and Actuators B* 182: 592–597.
6. Choodum, A., Kanatharana, P., Wongniramaikul, W., and Daeid, N. 2.13. Using the iPhone as a Device for a Rapid Quantitative Analysis of Trinitrotoluene in Soil. *Talanta* 115: 143-149.
7. Morais, C. L. M., Silva, S. R. B., Vieira, D. S., and Lima, K. M. G. 2016. Integrating a Smartphone and Molecular Modeling for Determining the Binding Constant and Stoichiometry Ratio of the Iron(II)- Phenanthroline Complex: An Activity for Analytical and Physical Chemistry Laboratories. *Journal of Chemical Education* 93: 1760-1765.
8. Moraes, E. P., Confessor, M. R., and Gasparotto L. H. S. 2015. Integrating Mobile Phones into Science Teaching to Help Students Develop a Procedure to Evaluate the Corrosion Rate of Iron in Simulated Seawater. *Journal of Chemical Education* 92: 1696-1699.
9. Chang, R. 2007. Chemistry 2. Translated by Amornsakchai, T., Tantirungrotechai, Y., Tiensing T., and Amornsakchai, P. 9th Edition. Bangkok. McGraw-Hill, p 151. (in Thai)
10. Meites, L. 1963. Handbook of Analytical Chemistry. New York. McGraw-Hill, Sec. 3 p 35-36.

11. Campos, A. R., Knutson, C. M., Knutson, T. R., Mozzetti A. R., Haynes, C. L. & Penn, R. L. 2016. Quantifying Gold Nanoparticle Concentration in a Dietary Supplement Using Smartphone Colorimetry and Google Applications. *Journal of Chemical Education* 93: 318-321.
12. Siriwattanacharoen, N. 2012. Easy Photo How to Take Pictures of the Sold Product. Bangkok. Witty Group. (in Thai)
13. Siha-Umphai, P. 2000. Basic of Religious and Ethical Education. Bangkok. Chaulalongkorn University Printing House. (in Thai)

ได้รับบทความวันที่ 8 มิถุนายน 2560
ยอมรับตีพิมพ์วันที่ 20 กันยายน 2560