

## การทดลองขวดสีน้ำเงิน

### The Blue Bottle Experiment

อุรวาดิ ราชกิจ และทวีธรรม ลิมปานุภาพ\*

วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม 73170

Urawadee Rajchakit and Taweetham Limpanuparb\*

Mahidol University International College, Salaya, Phutthamonthon, Nakhon Pathom 73170

#### บทคัดย่อ

การทดลองขวดสีน้ำเงินได้รับการกล่าวถึงเป็นครั้งแรกในบทความด้านเคมีศึกษา โดยใช้เป็นการทดลองอย่างง่ายสำหรับอธิบายจลนศาสตร์เคมี สูตรดั้งเดิมประกอบไปด้วยน้ำตาลกลูโคส โซดาไฟ และเมทิลีนบลูปริมาณเล็กน้อย สารละลายจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงินเมื่อเขย่าขวด และค่อย ๆ จางลงจนกระทั่งไม่มีสีเมื่อตั้งทิ้งไว้ กระบวนการเกิดสีและจางไปของสีน้ำเงินสามารถเกิดขึ้นซ้ำได้หลายครั้ง ซึ่งเปรียบเทียบกับสีของเลือดสัตว์ในกระบวนการหายใจ มีการประยุกต์ใช้การทดลองนี้เพื่อการสอนอย่างหลากหลาย ไม่เพียงเพื่ออธิบายเคมีเชิงฟิสิกส์ แต่ยังใช้ในทางเคมีเชิงชีววิทยาและเคมีอินทรีย์ แม้ว่าแนวคิดของการทดลองนี้จะไม่ซับซ้อน แต่ก็มีพัฒนาต่อยอดอีก ประกอบไปด้วย การประยุกต์จากสูตรดั้งเดิม (เช่น การทดลองไฟจากราเจอร์เคมี การทดลองวาเลนไทน์ การเปลี่ยนน้ำตาลและตัวทำละลาย การใช้กรดแอสคอร์บิกแทนโซดาไฟและน้ำตาลตามแนวคิดเคมีสะอาด การศึกษาผลของสารเคมีในระบบเมทิลีนบลู-กลูโคส) และการประยุกต์ใช้งานปฏิกิริยา (เช่น ชุดตรวจออกซิเจนสำหรับอาหารในบรรจุภัณฑ์ และตัวกำจัดออกซิเจนสำหรับสร้างสภาพความละเอียดสูง) ในบทความนี้เราสรุปงานที่เกี่ยวข้องกับการทดลองขวดสีน้ำเงิน ตั้งแต่ ค.ศ. 1954 รวมถึงเสนอช่องว่างและทิศทางของการวิจัยในอนาคต

**คำสำคัญ :** การทดลองขวดสีน้ำเงิน; เคมีเชิงชีววิทยา; จลนศาสตร์เคมี; การเกิดผลผลิตทางเคมี; เคมีศึกษา

#### Abstract

The blue bottle experiment was first mentioned in the chemical education literature as a simple experiment on kinetics. The original formulation contains only glucose, caustic soda and small amount of methylene blue. The solution turns blue when shaken and fades to colourless after standing. This bluing/de-bluing process can be repeated many times and can be compared to the colour of animal blood in the respiratory cycle. The pedagogical application of this classical demonstration is versatile, not only in physical chemistry but also in biological and organic chemistry. Though the concept of this experiment is relatively straightforward, there is

growing body of research on it. These include a number of modifications to the original formulation (e.g. chemical traffic light, vanishing valentine, variations of sugar and solvent, replacement of NaOH and sugar with ascorbic acid for green chemistry), chemical pattern formation in methylene blue-glucose system and a number of applications of the reaction (e.g. oxygen indicator for intelligent food packaging and oxygen scavenger for super-resolution imaging). In this paper, we present a comprehensive review of all literatures relating to the experiment since 1954 and discuss the gaps and directions for future research.

**Keywords:** blue bottle experiment, biological chemistry, chemical kinetics, chemical pattern formation, chemical education

## 1. บทนำ

จลนศาสตร์เคมีเป็นสาขาหนึ่งของเคมีเชิงฟิสิกส์ที่ศึกษาอัตราการเกิดและกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมี หลักการในทางจลนศาสตร์เคมีอาจนำมาใช้อธิบายการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและทางกายภาพที่พบเห็นในชีวิตประจำวันได้ อย่างไรก็ตาม เมื่อจำเป็นต้องทำการทดลองปฏิบัติการเคมีในเวลาที่ย่ำงัดและต้องการผลทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณที่แม่นยำชัดเจน กลับมีการทดลองสำหรับการสอนหลักการของจลนศาสตร์เคมีอยู่ไม่มาก ทั้งนี้เพราะข้อจำกัดหลายประการ เช่น ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดเร็วไปทำให้สังเกตไม่ทันหรืออาจใช้เวลาานานกว่าเวลาที่มีในคาบวิชาปฏิบัติการ การติดตามปฏิกิริยาเคมีเป็นไปได้ยากเพราะสารตั้งต้นและผลิตภัณฑ์ไม่มีสี รวมทั้งอาจมีข้อจำกัดอื่นในการเตรียมสารเคมีและเครื่องมือที่เกี่ยวข้อง มีเพียงสองการทดลอง คือ การทดลองขวดสีน้ำเงิน [1] และการทดลองนาฬิกาไอโอดีน [2] ที่นิยมใช้เพื่อสอนจลนศาสตร์เคมีเพราะใช้เวลาทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม สามารถติดตามปฏิกิริยาได้ด้วยตาเปล่า และใช้สารเคมีและอุปกรณ์พื้นฐานที่หาได้ให้ห้องปฏิบัติการสำหรับสอนวิทยาศาสตร์ทั่วไป สำหรับการทดลองขวดสีน้ำเงินมีข้อได้เปรียบกว่าการทดลองนาฬิกาไอโอดีนเพราะใช้สารเคมีและอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายกว่าและมี

ความเชื่อมโยงกับชีวิตประจำวันมากกว่า สามารถดึงดูดความสนใจของนักศึกษาที่ไม่ได้เรียนเคมีโดยตรงได้



รูปที่ 1 การทดลองขวดสีน้ำเงิน

## 2. การทดลองขวดสีน้ำเงิน

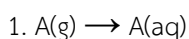
การทดลองขวดสีน้ำเงินตีพิมพ์ครั้งแรกในวารสาร Journal of Chemical Education ใน ค.ศ. 1963 โดย Campbell [1] โดยผู้เขียนบทความกล่าวว่าได้เรียนรู้การทดลองนี้จาก University of Wisconsin ใน ค.ศ. 1954 และการทดลองนี้อาจมีที่มาจาก California Institute of Technology การทดลองนี้ใช้น้ำเป็นตัวทำละลาย ในสารละลายหนึ่งลิตรตามสูตรของ Campbell มีสารเคมี 3 ชนิด คือ โซดาไฟ น้ำตาลกลูโคส และเมทิลีนบลู 1 % ในอัตราส่วน 20 กรัม 20 กรัม และ 0.5 มิลลิลิตร ตามลำดับ โดย

อัตราส่วนนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสม ไม่จำเป็นต้องชี้ให้เห็นอน [1]

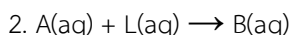
สารละลายในการทดลองขวดสีน้ำเงินใสไม่มีสี คล้ายกับน้ำธรรมดา แต่เมื่อเขย่าขวดแล้วจะกลายเป็นสีน้ำเงิน เป็นที่มาของชื่อการทดลองขวดสีน้ำเงิน เมื่อตั้งทิ้งไว้ให้สารละลายอยู่นิ่ง จะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินกลับมาเป็นสารละลายใสได้ดังเดิม Campbell เป็นผู้ริเริ่มเขียนบทความ [1] และหนังสือ [3] เกี่ยวกับการทดลองขวดสีน้ำเงิน โดยนอกจากใช้เพื่อการอธิบาย จลนศาสตร์เคมีแล้ว ยังใช้ในการสอนกระบวนการคิด วิทยาศาสตร์ รวมถึงอธิบายความเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของปฏิกิริยาในขวดด้วย Campbell ประสบ

ความสำเร็จในการใช้การทดลองนี้เพื่อการเรียนการสอนทั้งในระดับมัธยมศึกษาจนถึงระดับบัณฑิตศึกษา

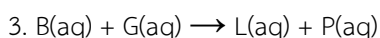
Engerer และ Cook [4] ได้พัฒนาการทดลอง ต่อจาก Campbell โดยผลิตคู่มือปฏิบัติการสำหรับการทดลองนี้ประกอบไปด้วยคำถาม 16 ข้อ [4] โดยให้ผู้ทดลองทำการทดลองกับสารละลายโดยไม่ทราบว่าสารละลายประกอบไปด้วยอะไร ผู้ทดลองต้องตั้งสมมติฐานและตอบไปที่ละขั้นจนสามารถหาหลักการเกิดปฏิกิริยาได้เอง แม้ว่าจะไม่ทราบองค์ประกอบของสารละลายเลย แต่เมื่อได้ทำการลองตามลำดับขั้นตอนดังกล่าวแล้ว ก็อาจพอสรุปหลักการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้



ก๊าซ A จากอากาศละลายลงในสารละลาย (เกิดได้เร็วเมื่อเขย่าขวด)



ก๊าซ A ในสารละลายทำปฏิกิริยากับสารไม่มีสี L กลายเป็นสารสีน้ำเงิน B (เร็ว)



สารสีน้ำเงิน B ทำปฏิกิริยากับสารไม่มีสี G กลายเป็นสารไม่มีสี L และสารผลิตภัณฑ์ P (ช้า)

ทุกปฏิกิริยา 1. 2. และ 3. เกิดขึ้นตลอดเวลา

ปฏิกิริยาสุทธิ คือ  $A(g) + G(aq) \rightarrow P(aq)$  โดยมี L และ B เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

อัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ  $k[B][G]$  (ปฏิกิริยาอันดับสอง)

ปฏิกิริยาอย่างง่ายนี้ A คือ อากาศ (ออกซิเจน) L คือ สารไม่มีสีที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (ลิวโคเมทิลีนบลู) B คือ สารสีน้ำเงินที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (เมทิลีนบลู) G คือ สารตั้งต้นไม่มีสี (กลูโคส) และ P คือ สารผลิตภัณฑ์ไม่มีสี (เกลือกลูโคเนต) ซึ่งหากมีข้อมูลเพิ่มเติมก็สามารถอธิบายได้ว่าสาร A, L, B, G และ P คือ สารที่ระบุไว้ในวงเล็บ

หนังสือการทดลองสาธิตทางเคมีทั่วไปมักมีการทดลองขวดสีน้ำเงินรวมอยู่ด้วยเสมอ เช่น Shakhshiri

[5] Summerlin และ Ealy [6] และ Lister และคณะ [7] โดยมีส่วนผสมและคำอธิบายอย่างง่ายดังที่ได้กล่าวไปข้างต้น

### 3. การปรับปรุงการทดลอง

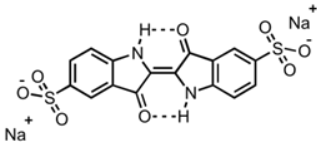


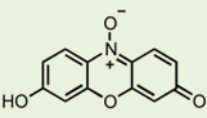


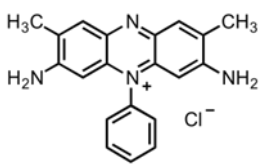


มีผู้วิจัยหลายกลุ่มได้ทดลองปรับปรุงการทดลองขวดสีน้ำเงินหลายรูปแบบ ได้แก่ การเปลี่ยนสารสี การเปลี่ยนตัวทำละลาย การเปลี่ยนน้ำตาล การเปลี่ยนสารตั้งต้น รวมถึงเปลี่ยนรูปแบบการทดลอง ซึ่ง

สรุปได้ดังนี้

สำหรับการเปลี่ยนสารสี Chen [8] รายงานการใช้อินดิโกคาร์มีน ส่วน Cook และคณะ [9] รายงานการใช้สี 15 ชนิด จาก 3 ตระกูล คือ ไทอาซีน (เช่น เมทิลินบลู) ออกซาซีน (เช่น ริซาซูริน) และเอซีน (เช่น ซาฟรานีน) ซึ่งให้สีที่ต่างกันออกไปและมีความเร็วในการเกิดปฏิกิริยาต่างกันออกไปด้วย ในหนังสือการ

สาธิตทางเคมีจะเรียกการทดลองที่ใช้อินดิโกคาร์มีนว่า การทดลองไฟจราจรเคมี (the chemical traffic light) และเรียกการทดลองที่ใช้ริซาซูรินว่าการทดลองวาเลนไทน์ (the vanishing valentine experiment) ซึ่งแสดงไว้ไว้ในตารางที่ 1 สำหรับการทดลองไฟจราจรเคมี Fleming พบว่าสามารถปรับสีให้ต่างออกไปอีกเล็กน้อยได้ด้วยการควบคุม pH ของสารละลาย [10]

ตารางที่ 1 สรุปสารรีดออกซ์อินดิเคเตอร์ที่ใช้แทนเมทิลินบลูและสีที่ได้ในการทดลอง

Redox indicator และโครงสร้าง	สีในน้ำกลั่น	สีในรูปรีดิวซ์ $\xrightleftharpoons[\text{ตั้งทิ้งไว้}]{\text{เขย่าขวด}}$ สีในรูปออกซิไดซ์
อินดิโกคาร์มีน 		 เมื่อตั้งทิ้งไว้จะเป็นสารละลายสีเหลือง เมื่อเริ่มเขย่าจากเบา ๆ จะเปลี่ยนเป็นสีแดงและเมื่อเขย่าแรงขึ้นจะกลายเป็นสีเขียว หากตั้งทิ้งไว้จะได้สีเหลืองอีกครั้ง
ริซาซูริน 		
ซาฟรานีน 		

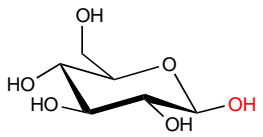
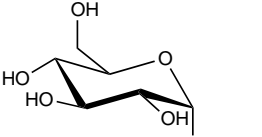
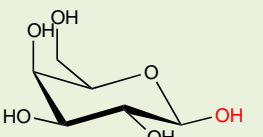
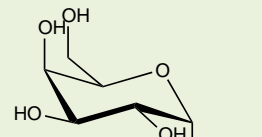
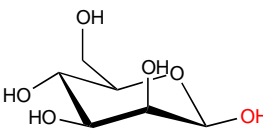
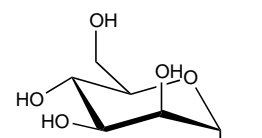
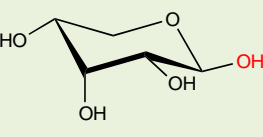
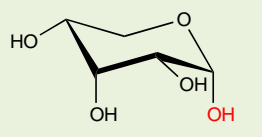
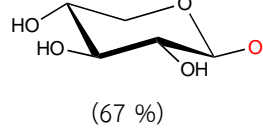
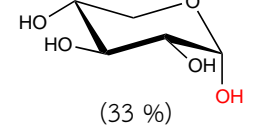
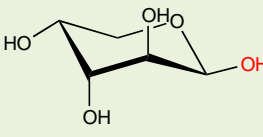
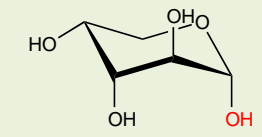
Cook และคณะ [9] ยังทำการทดลองศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาโดยเปลี่ยนตัวทำละลายและ

เปลี่ยนน้ำตาล โดยพบว่าหากใช้ dimethyl sulfoxide (DMSO) เป็นตัวทำละลายแทนน้ำจะทำให้ปฏิกิริยา

เกิดข้างลง (พลังงานก่อกัมมันต์สูงขึ้น) เพราะว่าเบตาอะโนเมอร์ของน้ำตาลซึ่งมีหมู่ OH อยู่ในตำแหน่ง equatorial ซึ่งเป็นรูปที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาจะมีได้มากกว่าในตัวทำละลายที่มีขั้วมากกว่า สำหรับการทดลองกับน้ำตาลชนิดอื่น ผลการทดลองเรียงตาม

ลำดับจากพลังงานก่อกัมมันต์น้อยไปมาก (ปฏิกิริยาเกิดได้เร็วไปช้า) ได้ดังนี้ ไรโบส ฟรุกโตส ไฮโลส กลูโคส กาแลคโตส อาราบิโนส และแมนโนส แต่แมนนิทอล อินโนซิทอล และเมทิลกลูโคไซด์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ (ตารางที่ 2)

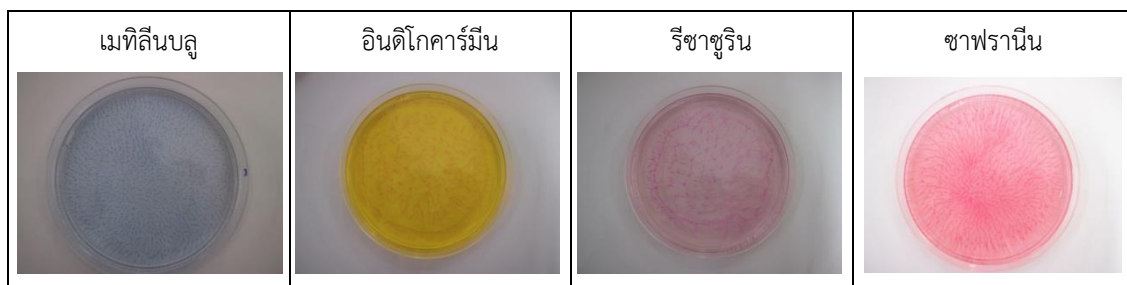
ตารางที่ 2 โครงสร้างน้ำตาลและอัตราส่วนร้อยละของเบตาและแอลฟาอะโนเมอร์ในน้ำ [9]

ชื่อน้ำตาล	โครงสร้างเบตาอะโนเมอร์	โครงสร้างแอลฟาอะโนเมอร์
กลูโคส	 (64 %)	 (36 %)
กาแลคโตส	 (73 %)	 (27 %)
แมนโนส	 (32 %)	 (68 %)
ไรโบส	 (56 %)	 (20 %)
ไฮโลส	 (67 %)	 (33 %)
อาราบิโนส	 (34 %)	 (63 %)

สำหรับการเปลี่ยนสารตั้งต้น Wellman และ Noble [11] ยังเปลี่ยนน้ำตาลและโซดาไฟเป็นวิตามินซี เพื่อทำสารละลายให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและลดความเป็นเบสของสารละลายที่มี pH ค่อนข้างสูงได้ ส่วนผสมใหม่คือ กรดแอสคอร์บิก 2.40 กรัม  $\text{NaHCO}_3$  75 มิลลิกรัม เมทิลีนบลู 3 มิลลิกรัม  $\text{NaCl}$  1.00 กรัม และ  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  36 มิลลิกรัม ในน้ำ 600 มิลลิลิตร โดยในสารละลายนี้ copper (II) ion ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของลิควิเมทิลีนบลูให้เป็นสีน้ำเงิน ในขณะที่ chloride ion ช่วยในการรีดิวซ์สารสีน้ำเงิน ดังนั้นอาจจะใช้  $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  แทน  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  ก็ได้ สารละลายเริ่มต้นจะมี pH ประมาณ 2.7-2.8 แต่สามารถปรับให้ pH เป็น 3.0 ได้โดย  $\text{NaHCO}_3$  หากค่า pH สูงเกินไป (>3.5) จะทำให้ตกตะกอนและผลที่ออกมาดูไม่สวย ปฏิกิริยานี้มีความซับซ้อนมากกว่าปฏิกิริยาตามสูตรต้นฉบับของ Campbell และผลที่ได้ก็ขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้นอย่างมากจึงมีความจำเป็นที่จะต้องชั่งสารส่วนผสมทุกชนิดโดยละเอียด Wellman และ Noble [11] ยังเสนอส่วนผสมสำหรับ

ปฏิกิริยานี้กรณที่ต้องการให้เปลี่ยนสีเร็ว และกรณที่ใช้สารเคมีที่หาได้ทั่วไปในท้องตลาด

นอกจากนี้ ยังมีการปรับปรุงรูปแบบการทดลองขวดสีน้ำเงินไปอีกสองรูปแบบ Vandaveer และ Mosher [12] เห็นว่าสารละลายในการทดลองขวดสีน้ำเงินปกติเมื่อตั้งทิ้งไว้เป็นสารละลายใสไม่มีสี จึงได้เติม pH indicator ชนิดอื่นลงไปอีกเพื่อเพิ่มสีสันให้การทดลองทำให้สีที่ได้จากการทดลองเปลี่ยนไปในขณะที่ Adamcikova และ Sevcik [13] เติสารละลายจากการทดลองขวดสีน้ำเงินลงในจานเพาะเชื้อ แล้วตั้งทิ้งไว้ให้เกิดลวดลาย Pons และคณะ [14,15] อธิบายว่าลวดลายนี้เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ chemoconvection ไม่ใช่การแพร่ทั่วไป Limpanuparb และ Hsu [16,18] พบว่าภาพลวดลายที่เกิดขึ้นนอกจากพบได้ในการทดลองในสูตรดั้งเดิมของ Campbell แล้วยังพบได้ในการทดลองที่เปลี่ยนสารสี redox indicator และเปลี่ยนสารตั้งต้นอีกด้วยดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ลวดลายที่เกิดในสารละลายขวดสีน้ำเงินและสารละลายดัดแปลงจากการทดลองขวดสีน้ำเงิน

#### 4. การใช้งานในประเทศไทย

ลิมปานภาพ ได้นำการทดลองไฟจราจรเคมี และการทดลองขวดสีน้ำเงินมาใช้ในกิจกรรมการแสดงสาธิตของสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ตั้งแต่ พ.ศ. 2547 และได้พัฒนาเป็น

ชุดการทดลองขวดเคมีหลากสีใน พ.ศ. 2549 ดังรูปที่ 3 [19] โดยผลิตด้วยอุปกรณ์ที่ทำได้ง่ายแต่สามารถใช้ในการทดลองคล้ายกับอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ที่มีราคาแพง และมีความแม่นยำสูง เช่น ใช้ขวดยาแทนขวดปรับปริมาตร ใช้หลอดฉีดยาแทนปิเปตต์และมีสารสีชนิด

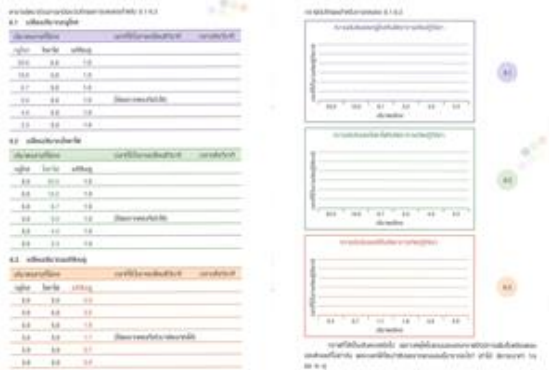
คือ กลูโคส โซดาไฟ เมทิลีนบลู และอินดิโกคาร์มิน จำหน่ายทั่วประเทศในราคา 99 บาท จำนวน 2,000 ชุด ปัจจุบัน สวทช. ใช้การทดลองนี้สำหรับการจัดค่ายวิทยาศาสตร์ในบ้านวิทยาศาสตร์ สิริธร การทดลองนี้ยังได้นำมาใช้ในวิชา ICCH224 Integrated Laboratory Techniques in Chemistry ณ วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล ตั้งแต่ พ.ศ. 2557 [16]



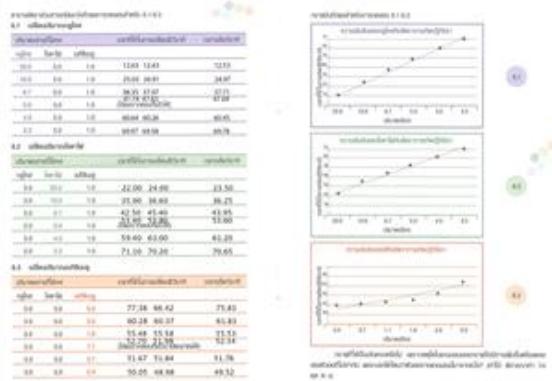
รูปที่ 3 ชุดการทดลองขวดเคมีหลากสีและอุปกรณ์ภายใน

คู่มือการทดลองของชุดการทดลองขวดเคมีหลากสีมีหลักการและคำอธิบายการทดลองในแนวทางเดียวกับ Campbell และ Cook [1,3,4,9] แต่มีการเพิ่มสารสีอินดิโกคาร์มินอีกหนึ่งชนิดและมีการออกแบบการทดลองในลักษณะชุดการทดลองซื้อไปทำเองได้ที่บ้านด้วยการเติมน้ำเพียงอย่างเดียว โดยใช้ขวดพลาสติกสีที่หาได้ง่ายในการทดลอง วิธีการทดลองเน้นให้มีความแม่นยำในการอ่านปริมาตรและจับเวลา ซึ่งในที่สุดแล้วสามารถนำมาพล็อตกราฟเพื่อหาค่าคงที่อัตราได้ เพื่อให้ทดลองได้กราฟออกมาเป็นเส้นตรงและไม่ซับซ้อนเกินไปสำหรับผู้ที่ยังไม่ได้ศึกษาเรื่อง

ฟังก์ชันเอ็กโปเนนเชียล ในคู่มือได้ทำตารางและกราฟไว้ให้ โดยเปลี่ยนค่าแกนอนเป็น  $\frac{1}{x}$  และ  $\ln x$  เพื่อให้ค่าเวลาที่พล็อตออกมาได้เป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 4



แบบบันทึกผลการทดลองในชุดการทดลอง



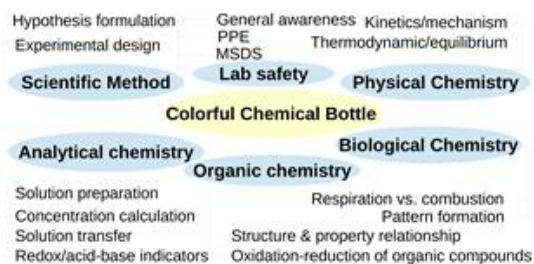
ตัวอย่างผลการทดลองของนักศึกษาในกลุ่มหนึ่ง

รูปที่ 4 หน้าสำหรับบันทึกที่ผลการทดลองในคู่มือชุดการทดลองขวดเคมีหลากสี [19]

### 5. คุณค่าในเชิงการสาธิตและการสอน

คุณค่าในเชิงการสาธิตและการสอนของการทดลองขวดสีน้ำเงินมีได้มีแต่เพียงในเชิงจลนศาสตร์เคมีซึ่งให้อธิบายกลไกการเกิดและอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเท่านั้น การทดลองขวดเคมีหลากสียังให้อธิบายทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ ความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ และสาขาอื่นของเคมีได้อีก ดังสรุปไว้ใน

รูปที่ 5 จาก Limpanuparb และ Hsu [16]



รูปที่ 5 คุณค่าในเชิงการสาธิตและการสอนของการทดลองขวดเคมีหลากสี [16]

5.1 ด้านทักษะกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ การทดลองนี้ส่งเสริมให้ตั้งสมมติฐานและออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบสมมติฐาน

5.2 ด้านความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ การทดลองนี้สามารถใช้สอนเรื่องเอกสารข้อมูลความปลอดภัยเคมีภัณฑ์ (material safety data sheet, MSDS) อุปกรณ์ป้องกันอันตรายส่วนบุคคล (personal protective equipment, PPE) และความรู้เบื้องต้นทั่วไปเกี่ยวกับการทำปฏิบัติการวิทยาศาสตร์

5.3 ด้านเคมีเชิงฟิสิกส์ การเตรียมสารละลายโซดาไฟและกลูโคสสามารถใช้เป็นตัวอย่างการละลายที่คายความร้อนและดูดความร้อนได้ตามลำดับ สมดุล

ระหว่างโซดาไฟกับน้ำตาลกลูโคสสามารถนำมาใช้สอนเรื่องสมดุลเคมีได้

5.4 ด้านเคมีวิเคราะห์ การทดลองนี้ใช้สอนเรื่องการเตรียมสารละลาย การคำนวณความเข้มข้นของสารละลาย การถ่ายเทสารละลาย รวมถึงอินดิเคเตอร์ทั้งชนิดที่ใช้แสดงความเข้มข้นกรดเบส และใช้ในปฏิกิริยารีดอกซ์

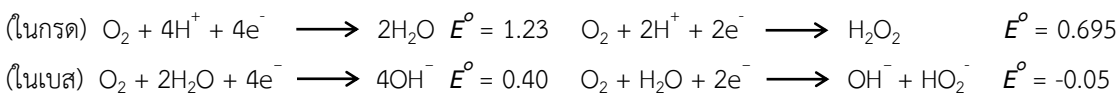
5.5 ด้านเคมีอินทรีย์ การทดลองนี้สามารถใช้สอนความสัมพันธ์ระหว่างโครงสร้างและสมบัติของสาร รวมถึงใช้สอนการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันรีดักชันของสารประกอบอินทรีย์ได้

5.6 ด้านเคมีเชิงชีววิทยา การทดลองนี้ใช้อธิบายการหายใจระดับเซลล์ ซึ่งเปรียบเสมือนเมแทบอลิซึมที่พาออกซิเจนไปทำปฏิกิริยากับกลูโคส รวมถึงใช้อธิบายการเกิดสัณฐานและสลายในสิ่งมีชีวิต

## 6. สรุป

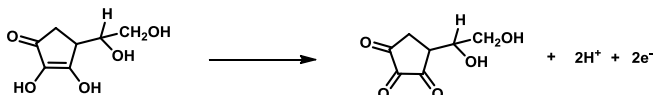
การทดลองขวดสีน้ำเงินและการทดลองที่ปรับปรุงจากการทดลองขวดสีน้ำเงินเป็นปฏิกิริยาของน้ำตาลรีดิวซ์หรือวิตามินซีกับออกซิเจน โดยมีสารสีที่มีสมบัติเป็นรีดอกซ์อินดิเคเตอร์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ครึ่งปฏิกิริยาเคมีออกซิเดชัน รีดักชัน และปฏิกิริยาของสารสีสรุปได้ดังนี้

รีดักชันของออกซิเจน [17]



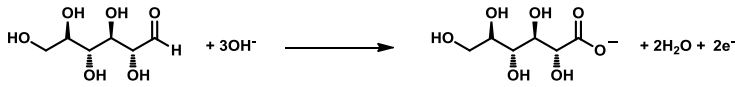
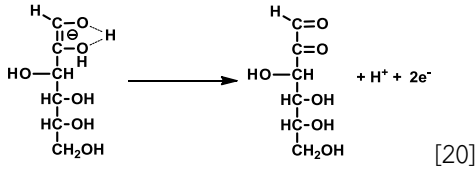
ออกซิเดชัน

วิตามินซี (ในกรด)



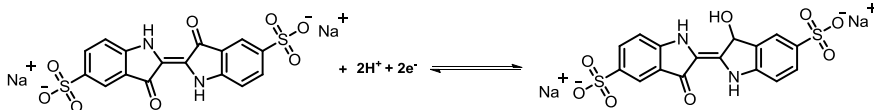


น้ำตาล (ในเบส)



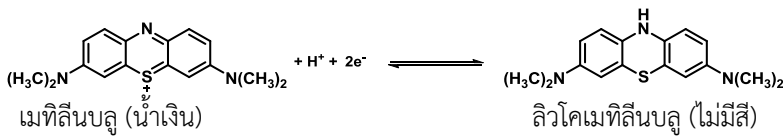
ปฏิกิริยาของสารสี (ตัวเร่งปฏิกิริยา)

อินดิโกคาร์มีน [5]

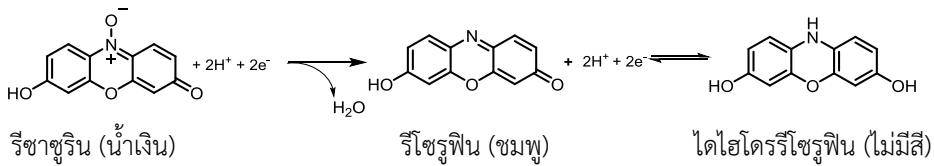


อินดิโกคาร์มีน (ไม่สามารถระบุสีได้เนื่องจากเป็นอินดิเคเตอร์กรดเบสด้วยและสีที่เห็นในการทดลองอาจเป็นสีของหลายโครงสร้างรวมกัน)

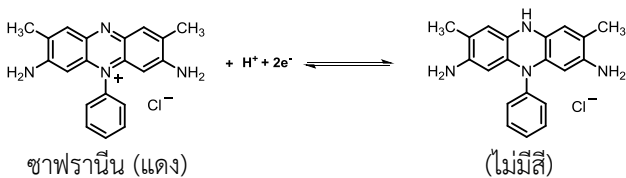
เมทิลีนบลู [5]



รีชาซูริน [5]



ซาฟรานีน



ในอดีตบทความส่วนใหญ่ระบุว่าปฏิกิริยาของตัวสีน้ำเงินเกิดขึ้นโดยปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจนแบบสี่อิเล็กตรอนต่อโมเลกุลของออกซิเจน แต่การศึกษาล่าสุดของ Anderson และคณะ [20] เสนอว่าผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นอาจเป็นไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเกิดจากรีดักชันที่ใช้สองอิเล็กตรอนต่อโมเลกุลออกซิเจน แต่ยังไม่มีการศึกษาต่อยอดเพื่อยืนยันผล

การศึกษานี้ ดังนั้นในบทสรุปของปฏิกิริยาแสดงความเป็นไปได้ทั้งหมดของออกซิเจน (ตัวออกซิไดซ์) น้ำตาลหรือวิตามินซี (ตัวรีดิวซ์) และสารสี (ตัวเร่งปฏิกิริยา) ผู้อ่านสามารถเลือกขึ้นมาใช้อธิบายปฏิกิริยาที่ทำการทดลองได้ตามความเหมาะสม

แม้ว่าการทดลองของตัวสีน้ำเงินมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ง่ายต่อการใช้สาธิตและการเรียนการสอน โดย

สามารถนำไปเปรียบเทียบอธิบายในหลายเรื่องที่เกี่ยวข้องในชีวิตประจำวัน แต่ผู้ทำการทดลองควรทำความเข้าใจข้อจำกัดของการอุปมาอุปมัยที่ใช้ในการอธิบายนั้นด้วย เช่น หากจะใช้แนวคำอธิบายของ Campbell เรื่อง การหายใจระดับเซลล์ [1] ก็ควรจะต้องระมัดระวังว่าในปฏิกิริยานี้เฝ้าผลาณูกลูโคสได้เพียงขั้นแรก ๆ เท่านั้น และสารสีที่ทำหน้าที่ทำลายออกซิเจนคล้ายเลือดนั้นมิได้มีอะตอมของออกซิเจนเพิ่มเข้าไปเมื่อถูกออกซิไดซ์ ในขณะที่ฮีโมโกลบินในเลือดสามารถรับโมเลกุลของออกซิเจนเข้าไปได้จริง นอกจากนี้คำอธิบายบางส่วนของ Campbell เกี่ยวกับการใช้เมทิลีนบลูเป็นสารแก๊พิจจากภาวะขาดอากาศหายใจที่เกิดจากก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ [1] ก็ล้าสมัยแล้ว

การทดลองขวดสีน้ำเงินยังมีประเด็นให้ศึกษาทดลองเพื่อทำความเข้าใจอีกมาก ทั้งการเปลี่ยนเงื่อนไขในการทดลองเพื่อประโยชน์เชิงสาธิตและการสอน และการทำความเข้าใจกลไกการเกิดปฏิกิริยาระดับโมเลกุล [20] ปฏิกิริยาของการทดลองขวดสีน้ำเงินสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่เป็นประโยชน์ได้โดยตรง เช่น ใช้เป็นตัวตรวจวัดออกซิเจนในบรรจุภัณฑ์อาหาร [21] ใช้เป็นตัวจับออกซิเจนเพื่อสร้างภาพความละเอียดสูง [22] รวมถึงอาจนำไปเชื่อมโยงกับการสังเคราะห์ด้วยแสง [23]

## 7. กิตติกรรมประกาศ

ขอบคุณ วิทยาลัยนานาชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล สำหรับทุนวิจัย (สัญญาเลขที่ 004/2558) ขอบคุณ คุณธนกร ความหมั่น และคุณสุรพันธ์ อนันต์ชัยศิลป์ ผู้ช่วยคุมปฏิบัติการ ICCH224 ที่ช่วยค้นคว้าข้อมูล ขอบคุณ คุณสุภาภรณ์ พรหมสุรินทร์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์ ที่ช่วยจัดหาอุปกรณ์และสารเคมี และขอบคุณ คุณปยุณวีร์ เลิศวรวิฑูมิ ที่วาดรูป

ที่ 5

## 8. รายการอ้างอิง

- [1] Campbell, J., 1963, Kinetics: Early and often, J. Chem. Educ. 40: 578-583.
- [2] Sattang, P.D., 2011, A microscale approach to chemical kinetics in the general chemistry laboratory: The potassium iodide hydrogen peroxide iodine-clock reaction, J. Chem. Educ. 88: 184-188.
- [3] Campbell, J., 1965, Why Do Chemical Reactions Occur ?, Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey.
- [4] Engerer, S.C. and Cook, A.G., 1999, The blue bottle reaction as a general chemistry experiment on reaction mechanisms, J. Chem. Educ. 76: 1519-1520.
- [5] Shakhshiri, B.Z., 1985, Chemical Demonstrations: a Handbook for Teachers of Chemistry, University of Wisconsin Press, Madison.
- [6] Summerlin, L.R. and Ealy, J.L., 1988, Chemical Demonstrations: a Sourcebook for Teachers, American Chemical Society, Washington, D.C.
- [7] Lister, T., O'Driscoll, C. and Reed, N., 1995, Classic Chemistry Demonstrations, Royal Society of Chemistry, London.
- [8] Chen, P.S., 1970, Oxidation and reduction of indigo carmine aided by Benzoin, J. Chem. Educ. 47: A335.

- [9] Cook, A.G., Tolliver, R.M. and Williams, J.E., 1994, The blue bottle experiment revisited: How blue ? How sweet ?, J. Chem. Educ. 71: 160-161.
- [10] Fleming, D., 2014, Beyond the 'Blue Bottle', Educ. Chem. May 2014: 12-13.
- [11] Wellman, W.E., Noble, M.E. and Healy, T., 2003, Greening the blue bottle, J. Chem. Educ. 80: 537-540.
- [12] Vandaveer, W.R. and Mosher, M., 1997, The blue bottle revisited, J. Chem. Educ. 74: 402.
- [13] Adamcikova, L. and Sevcik, P., 1997, The blue bottle experiment and pattern formation in this system, Z. Naturforsch. 52A: 650-654.
- [14] Bees, M., Pons, A., Sorensen, P.G. and Sagues, F., 2001, Chemoconvection: A chemically driven hydrodynamic instability, J. Chem. Phys. 114: 1932-1943.
- [15] Pons, A.J. and Sagues, F., Bees, M.A. and Sorensen, P.G., 2002, Quantitative analysis of chemoconvection patterns in the methylene-blue-glucose system, J. Phys. Chem. B. 106: 7252-7259.
- [16] Limpanuparb, T. and Hsu, S., 2015, The colorful chemical bottle experiment kit: From school laboratory to public demonstration, pp. 470-473, Pure and Applied Chemistry International Conference, Bangkok.
- [17] Bratsch, S.G., 1989, Standard electrode potentials and temperature coefficients in water, J. Phys. Chem. Ref. Data. 18: 14.
- [18] Hsu, S., 2014, Beyond the Blue Bottle Experiment, B.Sc. Senior Project in Chemistry, Mahidol University, Nakhon Pathom.
- [19] ทวีธรรม ลิ้มปานภาพ, 2549, ชุดการทดลองขวดเคมีหลากสี, สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ, ปทุมธานี.
- [20] Anderson, L., Wittkopp, S.M., Painter, C.J., Liegel, J.J., Schreiner, R., Bell, J.A. and Shakhshiri, B.Z., 2012, What is happening when the blue bottle bleaches: An investigation of the methylene blue-catalyzed air oxidation of glucose, J. Chem. Educ. 89: 1425-1431.
- [21] Jang, N.Y. and Won, K., 2014, New pressure-activated compartment oxygen indicator for intelligent food packaging, Int. J. Food Sci. Technol. 49: 650-654.
- [22] Oja, S.M., Guerrette, J.P., David, M.R. and Zhang, B., 2014, Fluorescence-enabled electrochemical microscopy with dihydroresorufin as a new fluorogenic indicator, Anal. Chem. 86: 6040-6048.
- [23] Korn, S. and Tausch, M.W., 2001, A laboratory simulation for coupled cycles of photosynthesis and respiration, J. Chem. Educ. 78: 1238-1240.