NU Science Journal 2011; 7(2): 86 - 96

ชุดอุปกรณ์อย่างง่ายและราคาถูกสำหรับศึกษาสมดุลวัฏภาคระหว่างของแข็ง-ของเหลวในห้องปฏิบัติการเคมี

พรสวรรค์ อมรศักดิ์ชัย

A Simple and Low-Cost Apparatus for Educational Use in the Experiment of Binary Solid-Liquid Phase Diagram

Pornsawan Amornsakchai

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

Corresponding author. E-mail: pornsawana@nu.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาวัฏภาคของของแข็ง-ของเหลว เป็นเรื่องที่มีความสำคัญอย่างมากในสาขาวิชาเคมีและวัสดุศาสตร์ และส่งผลต่อการสร้างความเข้าใจพื้นฐานที่มีต่อสมดุลวัฏภาค จึงทำให้เนื้อหาดังกล่าวมักจะถูกบรรจุเข้าไว้ในหลักสูตรการเรียนรู้ของรายวิชาปฏิบัติการเคมีเชิงฟิสิกส์ ในงานวิจัยนี้ เป็นการสร้างเครื่องมืออย่างง่ายและมีราคาไม่แพงเพื่อหาจุดเยือกแข็งจากกราฟการเย็นตัวของสารอินทรีย์ผสมสองชนิดจากชุดของอัตราส่วนผสมของสารที่ต่างกันจำนวน 6 อัตราส่วนโดยโมล ผลของอุณหภูมิยูเทคติกและองค์ประกอบยูเทคติกที่ได้จากชุดอุปกรณ์อย่างง่ายนี้มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ และสามารถทำซ้ำได้แม้จะมาจากกลุ่มผู้เรียนที่ต่างกัน การติดตามและบันทึกข้อมูลของการทดลองระหว่างอุณหภูมิกับเวลาด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ทำให้ได้ข้อมูลอย่างรวดเร็วและตามเวลาจริง นอกจากนี้ในการทดลองด้วยชุดอุปกรณ์นี้ยังเป็นการลดปริมาณสารเคมีที่ใช้อันนำไปสู่การทดลองแบบ green chemistry

คำสำคัญ: ชุดอุปกรณ์/เครื่องมือสำหรับการทดลอง สมดุลวัฏภาคของแข็ง-ของเหลว ปฏิบัติการเคมีเชิงฟิสิกส์ อุณหภูมิยูเทคติก

Abstract

The investigation of a solid-liquid phase diagram is of considerable importance in chemistry and material science since it provides in the understanding of the fundamental concepts of phase equilibria. Therefore, most undergraduate physical chemistry laboratory courses must include the experiment of the binary solid-liquid phase diagram as a standard experiment. In this study, a homemade and low-cost apparatus was constructed to acquire the melting points from a set of six cooling curves, which were prepared from six different compositions of selected organic mixtures. The experimental results provided the eutectic temperature and the eutectic composition with good precision and also reproducibility measurement by different groups of students. Moreover, this simple apparatus allows rapid and real-time data acquisition using a personal computer. In addition, the amount of chemicals required for the experiment using this apparatus is also reduced and this is one of the key concept in green chemistry.

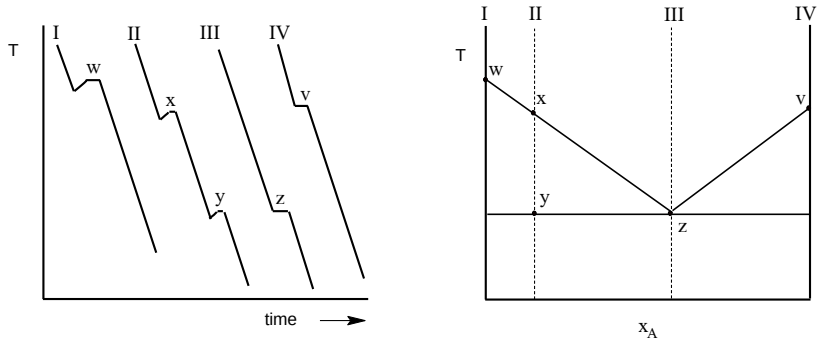
Keywords: Laboratory Equipment/Apparatus, solid-liquid phase diagram, physical chemistry laboratory, eutectic temperature

บทนำ

การหาแผนผังวัฏภาคระหว่างของเหลวกับของแข็งเป็นส่วนหนึ่งของหลักสูตรการเรียนปฏิบัติการเคมีเชิงฟิสิกส์ การทำการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการเป็นการเสริมทักษะการเรียนรู้ ฝึกหัดให้ทำงานร่วมกับผู้อื่น และยังเป็นการส่งเสริมความเข้าใจในหลักการขั้นพื้นฐานในเรื่องของสมดุลวัฏภาค ซึ่งมีความสำคัญต่อการเรียนในสาขาวิชาเคมี และวิศวกรรมเคมี

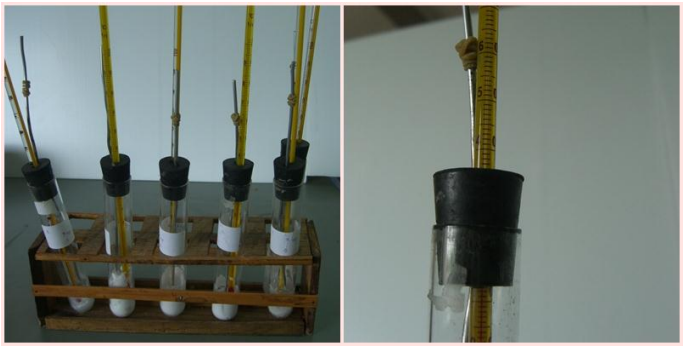
การสร้างแผนผังวัฏภาคระหว่างของเหลวกับของแข็งสามารถทำได้โดยการติดตามกราฟการเย็นตัวของสารเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น และนำข้อมูลของจุดหลอมเหลวของสารที่แต่ละองค์ประกอบมาสร้างกราฟระหว่างเศษส่วนโมลกับอุณหภูมิเพื่อหาอุณหภูมิยูเทคติกได้ (ดูรูป 1) แม้ว่าจะมีวิธีการทดลองที่อธิบายไว้ในหนังสือปฏิบัติการเคมีเชิงฟิสิกส์ (Shoemaker *et al*., 1989; Halpern and McBane, 2006) แล้วก็ตาม แต่ค่อนข้างยุ่งยาก นอกจากนี้แล้วสารที่ใช้ในการทดลองแต่ละครั้งต้องใช้ในปริมาณที่มาก ยิ่งไปกว่านั้นยังใช้เวลาในการทดลองแต่ละครั้งมากกว่า 3 ชั่วโมง ซึ่งมากกว่าเวลาที่กำหนดในการเรียนปฏิบัติการแต่ละครั้ง (3 ชั่วโมง) นอกจากนี้ยังพบว่านิสิตผู้ทำปฏิบัติการแทบทุกกลุ่ม ทำหลอดทดลองที่บรรจุสารแตก เนื่องจากในการคนต้องออกแรงกระทุ้งมากจนก้นหลอด ทดลองแตก และปัญหาหนึ่งในชุดการทดลองแบบเก่าคือ จุกยางสีดำที่ใช้ในการปิดหลอดทดลอง บังสเกลของ

เทอร์โมมิเตอร์ในช่วง 35-45^{O}C (ดูรูป 2) ซึ่งทำให้ค่าของอุณหภูมิที่อ่านได้มีความผิดพลาดได้ง่าย อย่างไรก็ตามได้มีการแก้ปัญหาด้วยการใช้เทคนิคและเครื่องมือที่ทันสมัยในการติดตามการเปลี่ยนแปลงจุดหลอมเหลวของสารกับเวลาด้วยเครื่อง Differential Scanning Calorimetry หรือมีชื่อย่อว่า DSC และวิเคราะห์หาค่าการเปลี่ยนแปลงความร้อน(ΔH) (William and Collins, 1994; Myrick *et al.,* 2010) และ David (1999) ได้สร้างชุดอุปกรณ์ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงกราฟการเย็นตัวของไบฟีนิล (biphenyl) และ แนฟทาลีน (naphthalene) ที่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงด้วยคอมพิวเตอร์โดยพบว่าจากเครื่องมือที่สร้างขึ้นสามารถทำการทดลองได้อย่างรวดเร็วและข้อมูลที่ได้มีความถูกต้องตรงและสอดคล้องกับค่าที่ได้มีการรายงานไว้ อย่างไรก็ตาม ในรายงานไม่ได้บอกถึงการเชื่อมต่อของการบันทึกข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์กับหัววัดอุณหภูมิ



(ก) (ข)

รูป 1 (ก) กราฟการเย็นตัวที่ได้จากการเขียนกราฟระหว่างอุณหภูมิกับเวลาโดย I และ IV เป็นกราฟการเย็นตัวของสารบริสุทธิ์ A และ B ตามลำดับ II และ III เป็นกราฟการเย็นตัวของสารผสม A กับ B ที่มีองค์ประกอบต่างกัน (ข) แผนผังวัฏภาคของระบบของแข็ง-ของเหลวที่ เกิดจากการผสมยูเทคติก (eutectic mixture) ที่สอดคล้องกับกราฟการเย็นตัวรูป (ก)



รูป 2 ชุดอุปกรณ์แบบเก่าที่ใช้ในห้องปฏิบัติการเคมีเชิงฟิสิกส์

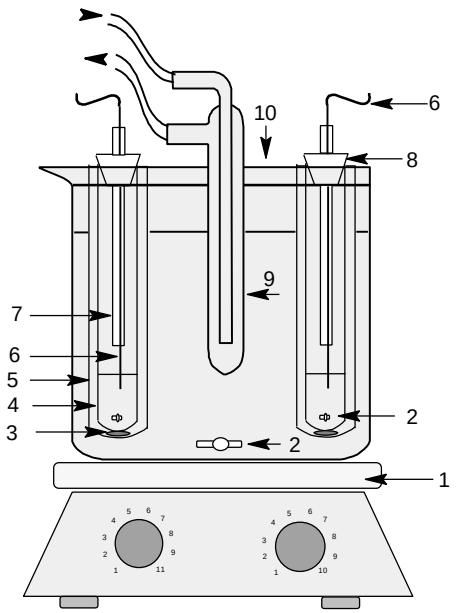
สารเคมีที่ใช้ในการศึกษาเรื่องสมดุลวัฏภาคของแข็ง-ของเหลวที่นิยมนำมาศึกษา คือ biphenyl และ naphthalene (Shoemaker *et al*., 1989; Halpern and McBane, 2006) และได้มีการศึกษาระบบของสารอินทรีย์ระหว่างแนฟทาลีน กับ พาราไดคลอโรเบนซีน (p-dichlorobenzene) (Blanchette, 1987) เพื่อให้เกิดองค์ความรู้และข้อมูลทางเทอร์โมไดนามิกส์ที่เป็นประโยชน์ นอกจากสารดังกล่าวแล้ว Meister และคณะ (Gallus *et al*., 2001) ได้ทำการเลือกสารอินทรีย์จำนวน 6 ชนิด คือ ไบฟีนิล (biphenyl) ดูรีน (durene) ไดฟี□นิลมีเทน (diphenylmethane) แนฟทาลีน (naphthalene) ฟีแนนทรีน (phenanthrene) และ ไตรฟีนิลมีเทน (triphenylmethane) เพื่อศึกษาสมดุลวัฏภาคของแข็ง—ของเหลว ทำให้ได้ทั้งหมด 15 ระบบ จากการใช้ชุดอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นเองที่มีการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิกับเวลาเพื่อสร้างกราฟการเย็นตัว โดยทำได้ครั้งละหนึ่งหลอดทดลองเท่านั้น

จากที่กล่าวมาด้านบน งานวิจัยนี้จึงได้ทำศึกษาการสร้างชุดอุปกรณ์อย่างง่ายและราคาถูกเพื่อลดความยุ่งยากของการติดตามการลดลงของอุณหภูมิกับเวลา ซึ่งจากการศึกษาพบว่ามีความถูกต้องและแม่นยำในการทดลองแม้ผู้ทำการทดลองจะต่างกลุ่มกัน เนื่องจากใช้วิธีการเก็บบันทึกข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์ที่ติดตามการเปลี่ยนแปลงแบบ real time สามารถให้ผู้เรียนสังเกต ความแตกต่างของกราฟการเย็นตัวของสารที่อัตราส่วนต่างๆและยิ่งไปกว่านั้นในการทดลองด้วย ชุดอุปกรณ์ ดังกล่าวยังสามารถลดปริมาณของสารที่ใช้ด้วย

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เครื่องกวนสารให้ความร้อน (Hot-plate stirrer)
2. แท่งแม่เหล็ก (magnetic bar)
3. แผ่นยางสำหรับรองหลอดทดลอง (o-ring)
4. หลอดทดลองขนาด o.d. 24 mm 6 หลอด
5. หลอดทดลองขนาด o.d. 15 mm 6 หลอด
6. หัววัดอุณหภูมิชนิดเค
7. หลอดแก้วขนาดเล็ก
8. จุกซิลิโคนเจาะรู
9. เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนทำจากเหล็ก
10. ฝาปิดทำจากอะครลิกเจาะรู 6 รูเพื่อใส่หลอดทดลองขนาด o.d. 24 mm



รูป 3 ชุดอุปกรณ์อย่างง่ายสำหรับการทดลอง

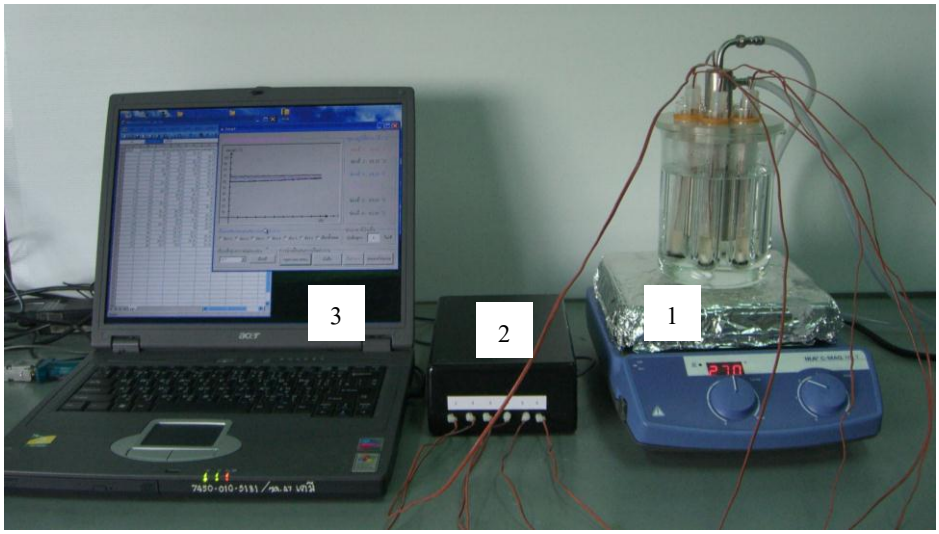
สารเคมี

1. ไบฟีนิล (AR, ARCOS)
2. แนฟทาลีน (AR, Fluka)

วิธีการ

การสร้างชุดอุปกรณ์และการออกแบบวงจร

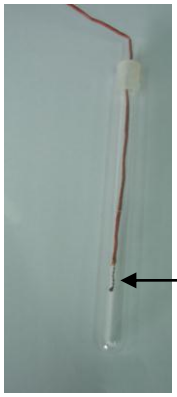
1. สร้างชุดอุปกรณ์ตามรูป 3 โดยที่ฝาปิด (หมายเลข 10 ในรูป 3) ต้องปิดได้พอดีกับบีกเกอร์ขนาด 1000 mL ทั้งนี้เพื่อป้องกันน้ำระเหยขณะที่ให้ความร้อน สำหรับหลอดทดลองทั้ง 6 หลอดต้องปิดด้วยจุกซิลิโคน (หมายเลข 8) ทั้งนี้เพื่อป้องกันการระเหยของสารเมื่อให้ความร้อนมากกว่า $95^{O}C$ และได้มีการเจาะรูขนาดประมาณ 2 mm ที่จุกซิลิโคน เพื่อใส่หลอดแก้วขนาดเล็ก (หมายเลข 7) ที่จะช่วยยึดให้หัววัดอุณหภูมิอยู่ในแกนเดียวกับหลอดทดลอง ในการออกแบบชุดการทดลองนี้มีหลอดทดลองขนาดเล็กที่ที่บรรจุสาร ใส่อยู่ในหลอดทดลองขนาดใหญ่อีกที ทั้งนี้ เพื่อให้มีช่องว่างระหว่างอากาศ ซึ่งจะเป็นการช่วยให้การลดลงของอุณหภูมิเป็นไปอย่างช้าๆ และนอกจากนี้ยังเป็นการช่วยป้องกันการหกของสารในกรณีที่หลอดทดลองที่บรรจุสารแตก



รูป 4 ชุดสำเร็จของอุปกรณ์อย่างง่ายสำหรับการทดลองที่ประกอบไปด้วย (1) ชุดอุปกรณ์อย่างง่าย (2) กล่องควบคุมการทำงาน และ (3) คอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการบันทึกข้อมูล

2. หัววัดอุณหภูมิชนิดเคจะต่อเข้ากับกล่องควบคุม (หมายเลข 2 รูป 4) ซึ่งวงจรได้ถูกออกแบบเพื่อประมวลผลและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิของหลอดทดลองทั้ง 6 ด้วยการเขียนคำสั่งผ่านโปรแกรม visual basic 6 (License Campus Agreement, CD KEY: 884-9017396) แล้วแสดงผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ (หมายเลข 3 รูป 4) โดยบันทึกผลของอุณหภูมิและเวลาของทั้ง 6 หลอด ซึ่งอยู่ในรูปของตารางของ Microsoft excel

อย่างไรก็ตามยังมีข้อควรระวังในการสร้างชุดอุปกรณ์อย่างง่ายในส่วนของหัววัดอุณหภูมิเพื่อให้การวัดได้ผลอย่างถูกต้องนั้น ควรต้องลอกหรือปลอกพลาสติกที่หุ้มลวดออก ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับสารเคมี และใช้ลมร้อนเป่าที่ปลายหัววัดอุณหภูมิเพื่อเชื่อมลวดทั้งสองเข้าด้วยกัน (รูป 5)



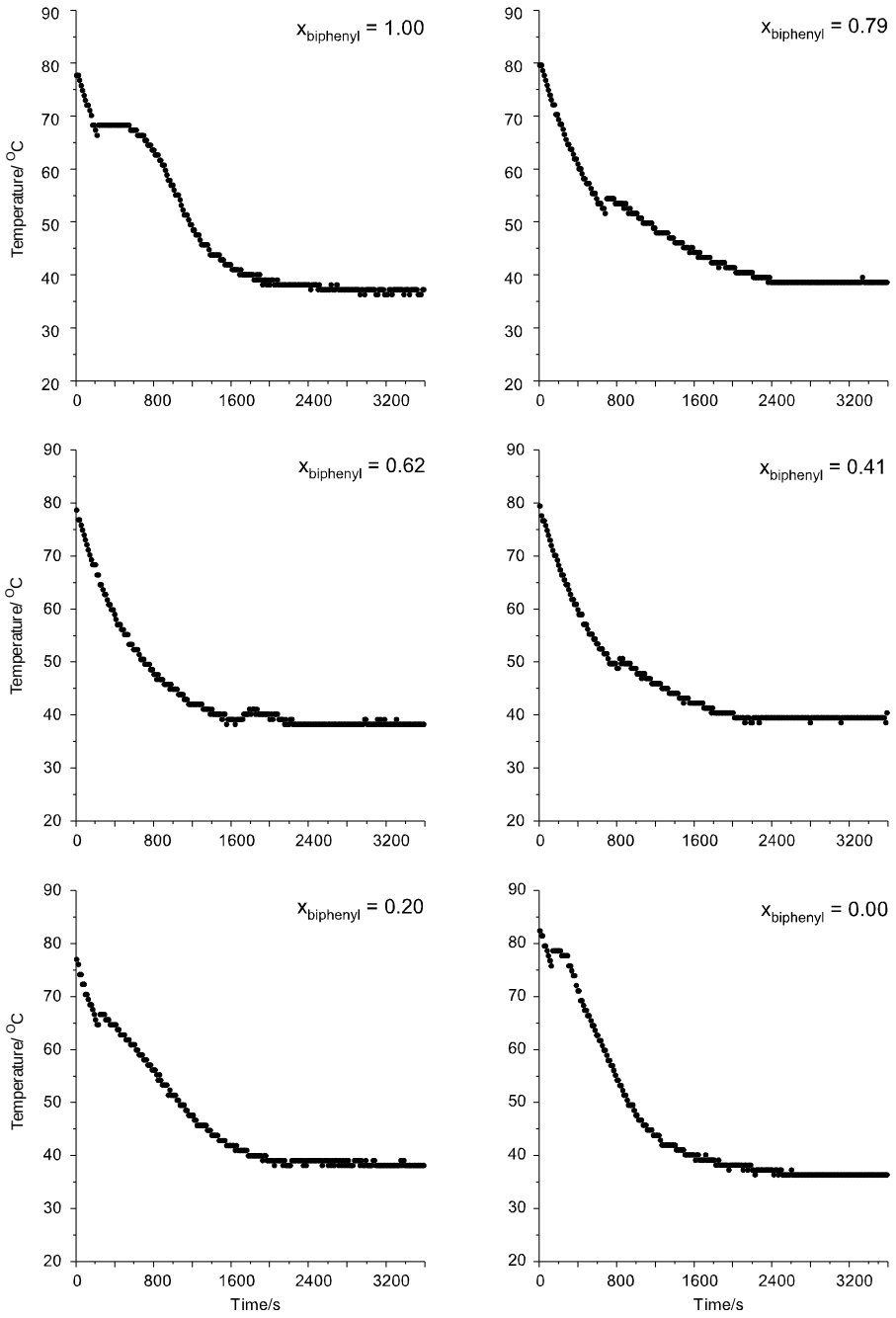
รูป 5 หัววัดอุณหภูมิชนิดเคที่ใช้ในการสร้างชุดอุปกรณ์อย่างง่าย

การทดลอง

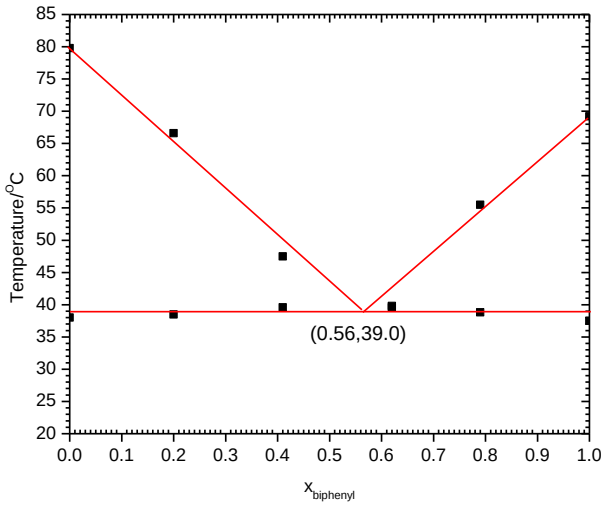
1. เตรียมไบฟีนิล-แนฟทาลีน ที่อัตราส่วนโดยโมลที่แตกต่างกันจำนวน 6 หลอด โดยมีน้ำหนักรวมของแต่ละหลอดประมาณ 3 กรัม
2. ใส่หลอดดังกล่าวในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นในรูป 2
3. ให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิสูงถึงประมาณ 80^{O}C แล้วปล่อยน้ำเข้าที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงถึง 85^{O}C ให้ปิดเครื่องกวนสารให้ความร้อน อุณหภูมิจะค่อยๆ ลดลง
4. เริ่มบันทึกผลการทดลองเมื่ออุณหภูมิลดลงถึง 80^{O}C โดยเลือกบันทึกที่ทุก 15 วินาที (โปรแกรมได้) ออกแบบให้สามารถเลือกช่วงเวลาได้ตั้งแต่ 10 วินาที ถึง 5 นาที ซึ่งในการทดลองแต่ละครั้งจะใช้เวลาทั้งหมดประมาณ 40-60 นาที
5. หาค่าอุณหภูมิที่จุดยูเทคติกจากข้อมูลที่บันทึกได้ (อ่านจากกราฟการเย็นตัวที่แต่ละองค์ประกอบ) และนำไปเขียนแผนผังวัฏภาคของแข็ง-ของเหลวระบบไบฟีนิล-แนฟทาลีน

ผลการทดลองและวิจารณ์

ผลการทดลองที่ได้แสดงในรูป 6 นั้นเป็นกราฟที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาที่อัตราส่วนโดยโมลของไบฟีนิลจากชุดอุปกรณ์อย่างง่ายที่สร้างขึ้น ทำให้ได้ค่าของจุดเยือกแข็งของสารผสมที่อัตราส่วนต่างๆ รวมถึงอุณหภูมิยูเทคติกดังแสดงในรูป 7 อัตราส่วนของสารที่ใช้ในการทดลองนี้ได้เลือกจากชุดการทดลองจำนวนหกตัวอย่าง มีค่าอัตราส่วนโดยโมลของไบฟีนิลเท่ากับ 1.0, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2 และ 0.0 ซึ่งค่าดังกล่าวเป็นช่วงที่เหมาะสมในการทดลอง และการวาดกราฟสมดุลวัฏภาคของแข็ง-ของเหลวในการทำการทดลองผู้เรียนแต่ละกลุ่มทำการทดลองจำนวน 2 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ยของจุดเยือกแข็งที่ได้จากการวาดกราฟการเย็นตัวแล้วนำค่าที่ได้มาวาดกราฟสมดุลวัฏภาค โดยพบว่าจุดเยือกแข็งที่ได้ของทุกหลอดมีค่าเบี่ยงเบนเฉลี่ยเท่ากับ $\pm$ 0.2 ^{O}C ซึ่งค่าดังกล่าวนั้นขึ้นอยู่กับความไว (sensitivity) และความถูกต้อง (accuracy) ของหัววัดอุณหภูมิ และค่าการนำไฟฟ้าของสาร (David, 1999) โดยความไวและความถูกต้องของค่าอุณหภูมิที่วัดได้จากหัววัดอุณหภูมิชนิดเคที่ใช้ในกับอุปกรณ์ชุดนี้มีค่า $\pm$0.1 ^{O}C



รูป 6 กราฟการเย็นตัวจากชุดอุปกรณ์อย่างง่ายที่อัตราส่วนโดยของไบฟีนิลที่ต่างกัน



รูป 7 กราฟสมดุลวัฏภาคของแข็ง-ของเหลว ที่ได้จากชุดการทดลองอย่างง่าย

จากรูป 7 อุณหภูมิยูเทคติก เท่ากับ 39.0 ^{O}C ที่อัตราส่วนโดยโมลของไบฟีนิลเท่ากับ 0.56 ซึ่งค่าดังกล่าวมีค่าสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเครื่อง DSC คือ 37.0 ^{O}C และ 0.55 ของอัตราส่วนโดยโมลไบฟีนิล (David, 1999) นอกจากนี้ยังได้ทำการทดลองด้วยชุดอุปกรณ์แบบเก่าพบว่าอุณหภูมิยูเทคติก เท่ากับ 39.5 ^{O}C ที่อัตราส่วนโดยโมลของไบฟีนิลเท่ากับ 0.61 ดังแสดงในตาราง 1 ข้อสังเกตอย่างหนึ่งของความถูกต้องของค่าจุดหลอมเหลวของสารบริสุทธิ์ที่ได้จากชุดอุปกรณ์อย่างง่ายนั้นสอดคล้องกับค่าที่ได้จาก CRC Handbook of Chemistry and Physics (Lide, 2008) มากกว่าชุดการทดลองแบบเก่า

ตาราง 1 จุดเยือกแข็งของสารบริสุทธิ์ (T_f) องค์ประกอบยูเทคติก (x_E) และอุณหภูมิยูเทคติก (T_E) ที่ได้จากอุปกรณ์อย่างง่าย และชุดอุปกรณ์แบบเก่า

ชุดอุปกรณ์	$T_{f,naphthalene}$ /^{O}C	$T_{f,biphenyl}$ /^{O}C	T_E /^{O}C	x_E
อย่างง่าย	69.0	80.0	39.0	0.56
แบบเก่า	67.0	77.0	39.5	0.61
ข้อมูลจากเอกสารอ้างอิง	68.9[a]	80.3[a]	37[b]	0.55[b]

[a] (Lide, 2008)

[b] (David, 1999)

ข้อดีอีกอย่างของการใช้อุปกรณ์อย่างง่ายที่สร้างขึ้นมาคือเรื่องของปริมาณของสารที่ใช้ในแต่ละครั้ง นั้นใช้เพียงประมาณ 3 กรัม (น้ำหนักรวม) ซึ่งลดลงจากเดิมถึง 5 เท่า (ในชุดอุปกรณ์แบบเก่าน้ำหนักรวมประมาณ 15 กรัม) และที่สำคัญยังลดปัญหาการสัมผัสกับสารเคมีโดยตรง ซึ่งทั้งไบฟีนิลและแนฟทาลีนนั้นจัดเป็นสารเคมีอันตรายหรือก่อให้เกิดการระคายเคือง (Halpern and McBane, 2006) โดยในชุดการทดลองอย่างง่ายนี้มีแท่งแม่เหล็กขนาดเล็กช่วยกวนสาร ขณะที่ชุดอุปกรณ์แบบเก่านั้นผู้เรียนต้องคนสารเองด้วยแท่งคน และบ่อยครั้งที่ผู้เรียนทำหลอดแตกจากการใช้แท่งคนสารกระทุ้งก้นหลอดทดลอง ทำให้สารหกออกจากหลอดทดลองที่แตก ซึ่งนอกจากจะมีโอกาสสัมผัสกับสารเคมีที่ใช้แล้ว ยังเป็นการสิ้นเปลืองสารเคมีที่ต้องใช้ในการทำการทดลองใหม่อีกด้วย ซึ่งชุดการทดลองอย่างง่ายที่สร้างขึ้นสามารถลดปัญหาดังกล่าวได้เป็นอย่างดี และที่สำคัญยังเป็นต้นแบบของปฏิบัติการเคมีเชิงฟิสิกส์ที่จัดเป็น green chemistry อีกด้วย

สรุปผลการทดลอง

การศึกษาสมดุลวัฏภาคระหว่างของแข็ง-ของเหลวระหว่างไบฟีนิลกับแนฟทาลีนด้วยชุดอุปกรณ์อย่างง่ายนั้นสามารถใช้งานได้ง่าย ข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง และแม่นยำ แม้จะทำการทดลองด้วยกลุ่มผู้เรียนที่ต่างกัน ใช้สารเคมีในปริมาณที่น้อย ผู้เรียนสามารถทำการทดลองได้เสร็จภายใน 2 ชั่วโมง และใช้เวลาที่เหลืออีก 1 ชั่วโมงในการทำความเข้าใจและวิเคราะห์ผลของข้อมูล ที่ได้ นอกจากนี้ชุดอุปกรณ์อย่างง่ายที่ได้สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ในการหาจุดเยือกแข็งของสารเคมีคู่อื่นๆ ได้เช่นกัน และยังสามารถประยุกต์ใช้ในการหาค่า ΔH ได้อีกด้วย โดยต้องมีการทำการทดลองเพิ่มเติมเพื่อหาจุดเยือกแข็งในช่วงอัตราส่วนโดยโมลของสารระหว่าง 0.0-0.3

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัย รศ.ดร.ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย ที่ช่วยเหลือในส่วนของฝาปิดของชุดอุปกรณ์อย่างง่าย นายพงษ์ศักดิ์ โขขุนทด และอาจารย์เกรียงศักดิ์ พรมภักดิ์ ที่ช่วยเหลือและให้คำปรึกษาในเรื่องของ การออกแบบวงจรในงานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

Blanchette, P.P. (1987). The binary liquid-solid phase diagram of naphthalene-*p*-dichlorobenzene. *Journal of Chemical Education*, *64*, 267-268.

David, C. (1999). Equipment for a low-cost study of the naphthalene-biphenyl phase diagram. *Journal of Chemical Education*, *76*, 668-670.

Gallus, J., Lin, Q., Zumbühl, A.; Friess, S.D., Hartmann, R. and Meister, E. C. (2001). Binary solid-liquid phase diagrams of selected organic compounds. *Journal of Chemical Education*, *78*, 961-964.

Halpern, A.M. and McBane, G.C. (2006). *Experimental in Physical Chemistry.* New York: W.H. Freeman and Company.

Lide, D.R., (Eds.). (2008). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (88th ed.). New York: Taylor&Francis Group.

Myrick, M.L., Baranowski, M. and Profeta, L.T.M. (2010). An Experiment in Physical Chemistry: Polymorphism and Phase Stability in Acetaminophen (Paracetamol). *Journal of Chemical Education*, *87*, 842-844.

Shoemaker, D. P., Garland, C.W. and Nibler, J.W. (1989). *Experiments in Physical Chemistry* (5th ed.). New York: McGraw-Hill, 238–246.

Williams, K.R. and Collins S.E. (1994). The solid-liquid phase diagram experiment. *Journal of Chemical Education*, *71*, 617-620.