เครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสง
An Automatic Titrator Based on a Photometric Sensor

สัตยา บุญรัตนชู[1*]และทรงสุดา พรหมทอง[1]
Sathaya Bunratchoo[1*] and Songsuda Promthong[1]

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยอาศัยสัญญาณจากตัวตรวจวัดแสงแบบ RGB (Red Green Blue) มาคำนวณหาจุดยุติจากการเปลี่ยนสีของอินดิเคเตอร์ โดยการตรวจวัดแสงนั้นอาจจะเป็นสีแดง สีเขียว สีน้ำเงิน หรือทั้งสามสีขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของตัวอย่างที่แตกต่างกัน สัญญาณแสงสีที่ตรวจวัดได้จะถูกนำมาวาดกราฟเทียบกับปริมาณของสารไทเทรตที่ใช้ไป ข้อมูลเส้นกราฟที่ได้นี้จะใช้สำหรับคำนวณหาจุดยุติที่แม่นยำต่อไป เครื่องไทเทรตอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้นใช้ไซริงจ์ปั๊ม (Syringe Pump) ที่มีความแม่นยำสูงในการควบคุมปริมาตรของสารไทเทรต นอกจากนี้งานวิจัยนี้ยังแสดงผลการเปรียบเทียบการใช้เครื่องไทเทรตอัตโนมัติกับวิธีการไทเทรตมือซึ่งดูจุดยุติด้วยตา ในการหาปริมาณค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม โดยการเปรียบเทียบด้วย t-Test พบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างทั้งสองวิธีที่ระดับความเชื่อมั่น 95% และความแม่นยำแสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ พบว่าผลที่ได้จากเครื่องไทเทรตอัตโนมัติที่พัฒนาขึ้น มีความแม่นยำกว่าวิธีการไทเทรตมือเล็กน้อย (RSD = 1.54% ที่ n = 10) และเมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบสำหรับค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์มระหว่างห้องปฏิบัติการกับเครื่องไทเทรตอัตโนมัติประเมินผลด้วยค่า Z-score พบว่า ให้ค่าเท่ากับ 0.84 ซึ่งค่า Z-score น้อยกว่า 2 แสดงว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้เครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงแบบ RGB ยังเป็นเครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์ที่สามารถสร้างได้ในราคาไม่แพง สามารถใช้แทนเครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตได้ และช่วยแก้ปัญหาการดูจุดยุติด้วยตาของการไทเทรตมือ อีกทั้งช่วยลดความเสี่ยงในการสัมผัสและสูดดมสารเคมีซึ่งเป็นอันตรายแก่ผู้ทดสอบอีกด้วย

คำสำคัญ : เครื่องไทเทรตด้วยตัวตรวจวัดแสง เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ

Abstract

This research presents the design and the development of an automatic titrator using a red green blue (RGB) detector for the detection of the endpoint with colour indicators. A monitored colour signal may be displayed red, green, blue or both of thesecolours, which depends on the characteristic of a sample. A titration curve is plotted and used to calculate the endpoint. In the developed titrator, a syringe pump used to deliver a precise volume of titrant into the sample. The developed titration result was compared with manual titration and did not show statistically significant differences between two systems when the paired t-Test at the 95% confidence level was applied, and the results was provided a good repeatability (relative standard deviation (RSD) = 1.54 %; n = 10). Moreover, the inter-laboratory comparison was performed to evaluate the developed titrator for quantification of iodine value in palm oils. The inter-laboratory comparison result showed that Z-score value (0.84) is less than 2, regarding as satisfactory. The developed titrator is inexpensive, simple also minimize operator error and improve operator safety.

Keywords: photo titrator, an automatic titrator

[1]สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ สงขลา 90110
[1]Office of Scientific Instrument and Testing, Prince of Songkla University, Hat Yai Campus, Songkla, 90110
*Corresponding author: e-mail: sathaya.b@psu.ac.th

Received: *15 December 2019.,* ***Accepted:*** *17 February 2020,* ***Published:*** *2 March, 2020*

บทนำ

หนึ่งในปัญหาและอุปสรรคที่นักวิจัยหรือผู้ทำการทดสอบส่วนใหญ่ประสบ คือ ความล่าช้าและเวลาที่เสียไปจากการทำการทดลองซึ่งต้องอาศัยทั้งเวลาและทักษะของผู้ทำการทดลองเอง หนึ่งในการทดลองที่ว่านี้ คือ การไทเทรต เพื่อหาจุดยุติของการทำปฏิกิริยาของสารที่ผู้วิจัย ผู้ทดสอบสนใจ หากการทดสอบนี้ต้องทำซ้ำหลาย ๆ ครั้ง เวลาที่ใช้ไปย่อมมีมากขึ้น หากต้องการความรวดเร็วก็จะต้องแก้ปัญหาโดยการจ้างผู้ช่วยวิจัยเพื่อลดเวลาในการทำการทดลอง สิ่งหนึ่งที่ผู้วิจัยมักกังวล คือ ทักษะในการทำการทดสอบซึ่งจะส่งผลต่อความถูกต้องและน่าเชื่อถือของผลการทดสอบ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่น่าเชื่อถือและรวดเร็ว การใช้เครื่องไทเทรตอัตโนมัติจึงเป็นทางเลือกที่ดี แต่มีข้อเสียคือ เครื่องมือนี้มีราคาแพงเนื่องจากต้องนำเข้าจากต่างประเทศ และมักจะไม่ครอบคลุมทุกการทดสอบ เนื่องจากเครื่องไทเทรตอัตโนมัติส่วนใหญ่มักจะตรวจสอบจุดยุติโดยใช้อิเล็กโทรดซึ่งส่วนใหญ่ใช้หลักการทางไฟฟ้าเคมี ทำให้การไทเทรตของสารแต่ละประเภทต้องใช้อิเล็กโทรดที่ต่างกัน

งานวิจัยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงนี้ ผู้วิจัยมุ่งเน้นเพื่อใช้หาค่าปริมาณไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมหรืองานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังไม่พบว่ามีงานวิจัยใดที่วิจัยในเรื่องดังกล่าว แม้จะมีงานวิจัยเกี่ยวกับเครื่องไทเทรตอัตโนมัติอยู่บ้าง แต่ก็จะมุ่งเน้นเป้าหมายในการทดสอบสารที่แตกต่างกัน รวมทั้งเทคนิคในการตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัดแสงที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างที่ทดสอบ ในเรื่องของความขุ่น ความเข้มข้น และอินดิเคเตอร์ที่ใช้บ่งชี้ถึงจุดยุติของการไทเทรต เช่น ปริญญา และคณะ (2549) เสนอการออกแบบและสร้างเครื่องไมโครไทเทรตอัตโนมัติแบบย่อส่วนพร้อมทั้งการหาจุดยุติด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีสำหรับการวิเคราะห์หาความแรงของกรดในน้ำผลไม้ที่มีรสเปรี้ยวบางชนิด โดยอาศัยพื้นฐานของวิธีโพเทนชิโอเมตริกไทเทรชันแบบออนไลน์ซึ่งจะไทเทรตหาปริมาณของกรดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และได้ทำการหาสภาวะต่าง ๆ ของการวิเคราะห์โดยวิธียูนิวาริเอท ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับที่ได้จากวิธีการไทเทรตมาตรฐานแบบดั้งเดิม ส่วน De Sena et al. (2011) เสนอการพัฒนาวิธีการอย่างง่ายและต้นทุนต่ำบนพื้นฐานของการวิเคราะห์สัญญาณวิดีโอและภาพโดยมุ่งเป้าไปที่การตรวจสอบแบเรียมซัลเฟตตกตะกอนที่ระดับความเข้มข้นต่ำ โดยการใช้เว็บเคมซึ่งมี CCD และใช้โคมไฟแฮโลเจนแบบทั่วไป ใช้ซอฟต์แวร์ประมวลผลและวิเคราะห์ภาพดิจิทัลบนพื้นฐานของระบบสี RGB (แดง, เขียวและน้ำเงิน) ผลการทดสอบแสดงการทำซ้ำที่ดีมากเป็น เส้นเชิงเส้นและมีความไวสูง ขณะที่ Garcia and Reis (2006) เสนอเครื่องมือวัดและระบบไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้การไทเทรตแบบแสงเพื่อหาค่าความเป็นกรดในไวน์แดงโดยสร้างระบบการไหลแบบหลายช่องทาง โดยใช้การตรวจวัดแบบแอลอีดีและเครื่องวัดแสงอุปกรณ์ตรวจวัดได้ออกแบบให้ผนึกเข้าด้วยกันเพื่อให้มีขนาดเล็ก ระบบการไหลประกอบไปด้วยการฉีดตัวอย่างอัตโนมัติ และ โซลินอยด์วาล์วแบบสามทาง ซึ่งถูกควบคุมด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ การพัฒนาโปรแกรมได้ใช้ Quick BASIC 4.5 เมื่อนำผลการวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐาน AOAC พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ที่ 2 % (n=9)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้หลักการตรวจวัดแสง ซึ่งจะให้ผลการตรวจวัดเพื่อหาจุดยุติของการไทเทรตที่แม่นยำและใช้ได้กับการไทเทรตที่หลากหลายโดยมุ่งเน้นไปที่การไทเทรตเพื่อหาค่าปริมาณไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม ซึ่งค่าไอโอดีนเป็นตัวบ่งชี้ว่าไขมันหรือน้ำมันมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบอยู่ในโมเลกุลมากน้อยเพียงใด ถ้ามีค่าไอโอดีนสูงแสดงว่า มีปริมาณกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบมากและจะเกิดการหืน ดังนั้นค่าไอโอดีนจึงเป็นคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับตรวจสอบคุณภาพของน้ำมันปาล์มตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 56 (พ.ศ.2524) เรื่องน้ำมันปาล์มที่ผลิตเพื่อจำหน่าย นำเข้าเพื่อจำหน่ายหรือที่จำหน่ายเพื่อใช้รับประทานหรือใช้ปรุงแต่งอาหาร ต้องมีคุณภาพหรือมาตรฐานสำหรับค่าไอโอดีนแบบวิจส์ ระหว่าง 50 - 56 สำหรับน้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์ม ไม่น้อยกว่า 55 สำหรับน้ำมันปาล์มโอลีอินจากเนื้อปาล์ม และไม่เกิน 48 สำหรับน้ำมันปาล์มสเตียรินจากเนื้อปาล์ม นอกจากนี้น้ำมันปาล์มจากเมล็ดปาล์มมีค่าไอโอดีนแบบวิจส์ ระหว่าง 13 - 23 เว้นแต่น้ำมันปาล์มโอลีอินจากเมล็ดปาล์ม และน้ำมันปาล์มสเตียรินจากเมล็ดปาล์ม ให้มีได้ตามที่ได้รับความเห็นชอบจากสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยา

ตัวตรวจวัดแสงที่เลือกใช้ จะมุ่งเน้นไปที่ตัวตรวจวัดแบบโฟโตไดโอดซึ่งตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกัน สามช่วงคือ ช่วงแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน หรือแสงขาว (ไม่มีฟิลเตอร์) ซึ่งจะทำให้สามารถตรวจจับหาจุดยุติของการไทเทรตได้แม่นยำ แม้เมื่อมีการใช้อินดิเคเตอร์ที่แตกต่างกัน ด้วยหลักการนี้ทำให้สามารถเปลี่ยนจากการไทเทรตมือซึ่งปกติจะใช้อินดิเคเตอร์แสดงจุดยุติ มาใช้เครื่องไทเทรตอัตโนมัติที่ออกแบบขึ้นได้ทันที ส่งผลให้สามารถทำการวิจัยได้อย่างต่อเนื่องและทวนสอบได้ง่าย ข้อดีอีกประการที่สำคัญของตัวตรวจวัดแสง คือ บำรุงรักษาง่ายและอายุการใช้งานนาน เนื่องจากไม่ได้สัมผัสกับสารเคมีโดยตรง ต่างจากอิเล็กโทรดที่ใช้หลักการไฟฟ้าเคมีซึ่งจะเสื่อมสภาพไปเรื่อย ๆ ตามอายุการใช้งาน

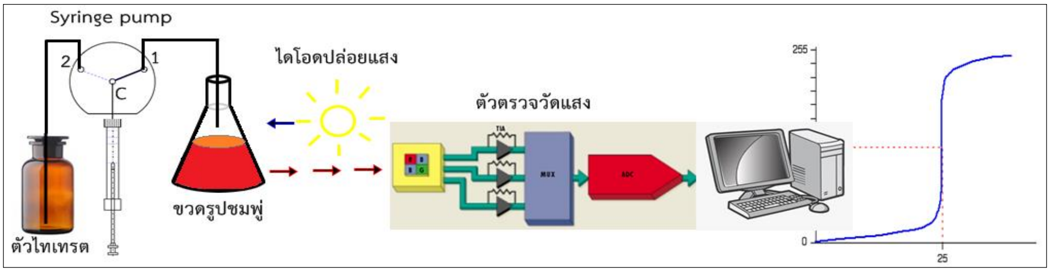
วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. สร้างเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้หลักการตรวจวัดแสง
2. เพื่อใช้ในการไทเทรตหาค่าปริมาณไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม

ระเบียบวิธีวิจัย

1. การออกแบบระบบตรวจวัด

ประยุกต์ใช้ตัวตรวจวัดแสงโดยใช้ตัวตรวจวัดความสว่างของสี TCS230 ซึ่งราคาไม่แพง และสามารถตรวจวัดความสว่างของสีได้ทั้งสามสี คือ สีแดง สีน้ำเงิน และสีเขียวในตัวเดียว ทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้ฟิลเตอร์แสงจากภายนอก สัญญาณจากตัวตรวจวัดเป็นแบบ พัลส์ดิจิทัลซึ่งแผนภาพของการตรวจวัดดังภาพที่ 1 ขั้นตอนการทำงานเริ่มจากโปรแกรมสั่งงานให้ไซริงจ์ปั๊มทำการดูดสารจากตัวไทเทรตมาเก็บไว้ผ่านวาล์วช่องที่ 2 จากนั้นสลับวาล์วไปช่องที่ 1 และปล่อยตัวไทเทรตลงไปทำปฏิกิริยาในขวดรูปชมพู่ สีของสารละลายที่เกิดขึ้นจะได้รับการส่องให้สว่างด้วยไดโอดปล่อยแสง (LED) แสงสีที่เกิดขึ้นจะได้รับการตรวจวัดด้วยตัวตรวจวัดแสงแล้วส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกกราฟความเข้มแสงทั้งสามสีเทียบกับปริมาตรของตัวไทเทรตที่ได้รับการเติมเข้าไปแล้วนำมาคำนวณหาจุดยุติของการไทเทรต



ภาพที่ 1 แผนภาพของการตรวจวัด

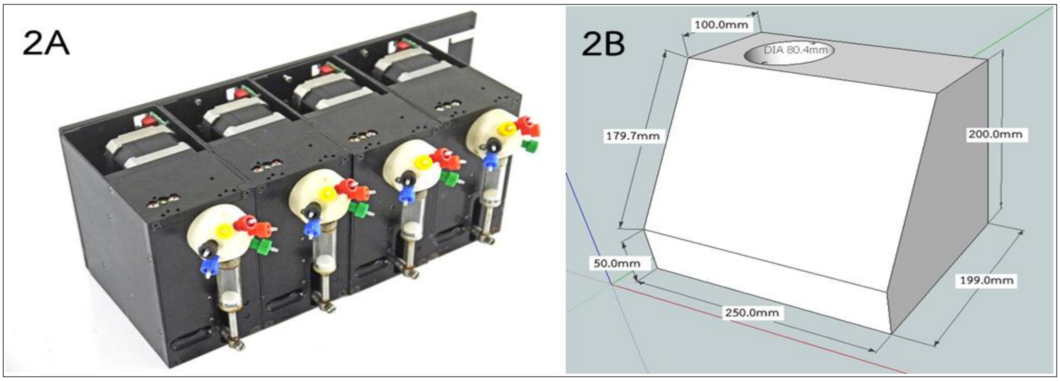
ที่มา: https://qtxasset.com/files/sensorsmag/nodes/2003/1078/fig3-4.jpg

2. ออกแบบ Titration pump

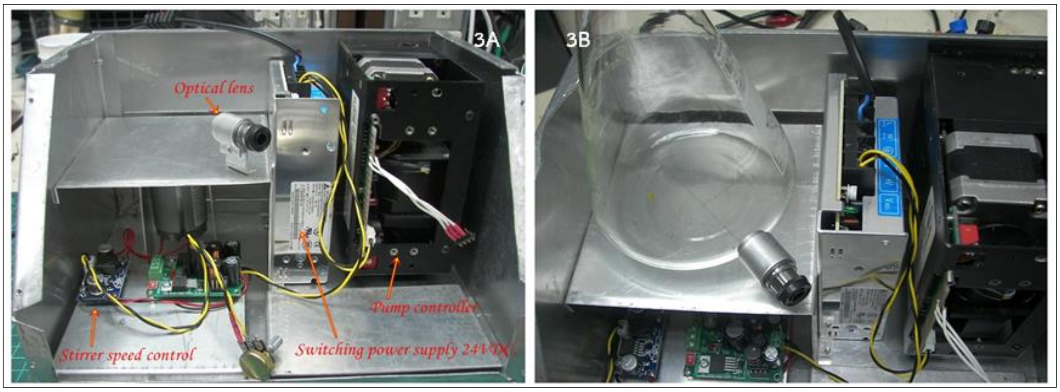
พิจารณาเลือกใช้ไซริงจ์ปั๊มสำเร็จรูปที่มีขายมือสองพบว่า เหมาะสมกับการใช้งาน เนื่องจากประกอบไปด้วยตัวปั๊มซีเล็คเตอร์วาล์วคอนโทรลเลอร์ในชุดเดียวกันซึ่งใช้งานได้ง่าย โดยเลือกใช้ไซริงจ์ปั๊มผลิตโดย Kloehn รุ่น VersaPump-3 (Kloehn Ltd.,2002) ซึ่งสามารถหาซื้อได้จากอีเบย์ ดังภาพที่ 2A โดยใช้เพียงหนึ่งชุดจากจำนวนสี่ชุดที่ติดกัน

3. ออกแบบตัวถังสำหรับต้นแบบ

ตัวถังเลือกใช้การขึ้นรูปด้วยอะลูมิเนียมโดยการพับอะลูมิเนียมแล้วนำมายึดต่อกัน ได้ออกแบบโดยใช้โปรแกรม Google Sketchup ซึ่งสามารถออกแบบโครงสร้างสามมิติได้ ทำให้เห็นภาพโครงร่างที่ออกแบบก่อนที่จะสร้างเป็นชิ้นงานจริง ทำให้มีการแก้ไขแบบให้ได้ตามที่ต้องการได้ง่าย ดังภาพที่ 2B และเมื่อได้โครงร่างของตัวถัง จากนั้นจึงออกแบบส่วนเครื่องคน เพื่อคนสารโดยเลือกใช้เทคนิคการคนแบบเครื่องคนแม่เหล็ก (Magnetic stirrer) พร้อมทั้งจัดวางวงจรอิเล็กทรอนิกส์และส่วนควบคุมต่าง ๆ ดังภาพที่ 3

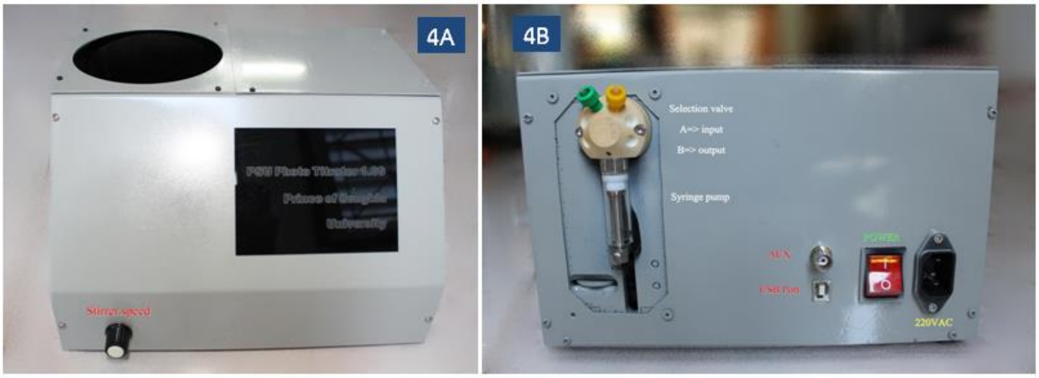


ภาพที่ 2 A: ไซริงจ์ปั๊มรุ่น VersaPump-3,B: ตัวถังของเครื่องไทเทรตอัตโนมัติที่ออกแบบด้วย Google Sketchup



ภาพที่ 3 A: การจัดวางวงจรตรวจวัดและวงจรควบคุม, B: การจัดวาง Optical lens สำหรับรวมแสงแสงที่ตรวจวัด

การออกแบบระบบผสมสาร เลือกใช้การผสมสารโดยวิธีใช้เครื่องคนแบบแม่เหล็ก ซึ่งประกอบไปด้วยมอเตอร์กระแสตรงและแท่งแม่เหล็กแรงสูงขนาดเล็ก ควบคุมความเร็วในการคนด้วยเครื่องควบคุมความเร็วมอเตอร์กระแสตรงเพื่อให้เกิดการทำปฏิกิริยาที่รวดเร็วและไม่เกิดการปนเปื้อนจากใบพัดคนสารซึ่งมีโอกาสปนเปื้อนได้ หากทำความสะอาดตามซอกของใบพัดไม่สะอาดพอ ในขณะที่แท่งแม่เหล็กสามารถทำความสะอาดได้ง่ายและเปลี่ยนแท่งใหม่ได้สะดวกกว่า หลังจากทำสีแล้วเสร็จจึงประกอบส่วนวงจรควบคุมเข้าด้วยกันเป็นตัวเครื่องที่พร้อมใช้งาน ดังภาพที่ 4



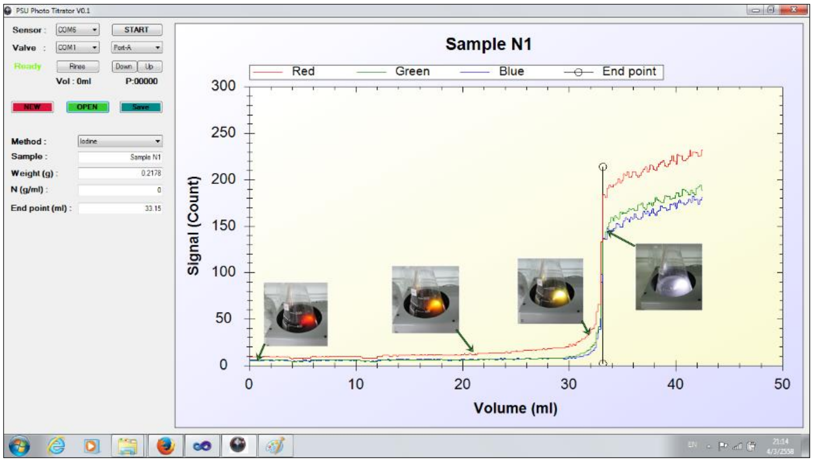
ภาพที่ 4 ตัวเครื่องที่ประกอบเสร็จแล้ว, A: ด้านหน้าเครื่อง, B: ด้านหลังเครื่อง

4. การพัฒนาโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์และโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การพัฒนาโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์เลือกใช้การพัฒนาด้วยภาษาซี และเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F252 ทำหน้าที่เชื่อมต่อกับตัวตรวจวัด TCS230 ผ่านขา C0 โดยกำหนดให้ทำหน้าที่เป็นสัญญาณนาฬิกาแก่ Timer1 ซึ่งใช้ในการนับความถี่ที่ได้จากตัวตรวจวัด TCS230 โดยใช้งาน Timer1 ในโหมดตัวนับสัญญาณจากภายนอกสัญญาณความเข้มแสงที่วัดได้แต่ละสีจะถูกส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านทางสัญญาณ RS232

การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์เลือกใช้เครื่องมือพัฒนาคือ Visual Basic 2010 (อยู่ในชุดพัฒนา Visual Studio 2010) ซึ่งสามารถสร้างส่วนต่อประสานกับผู้ใช้แบบกราฟิกทำให้การใช้งานโปรแกรมเข้าใจได้ง่ายโดยไม่ต้องเรียนรู้มากนัก การเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถเชื่อมต่อได้โดยใช้ USB to serial port ซึ่งสามารถใช้งานได้ทั้ง Windows XP Windows 7 หรือ Windows 10

ขั้นตอนการไทเทรตทำได้โดยคลิกปุ่ม START โปรแกรมจะสั่งให้ไซริงจ์ปั๊มดูดสารและเริ่มไทเทรตพร้อมทั้งแสดงกราฟของแสงสีต่าง ๆ ที่วัดได้ของแต่ละความยาวคลื่น อันได้แก่ แดง เขียวและน้ำเงินเทียบกับปริมาตรของตัวไทเทรตที่ใช้ไป กรณีการไทเทรตหาค่าไอโอดีนเมื่อเริ่มไทเทรต สีเริ่มต้นของสารจะเป็นสีแดงเข้ม เมื่อใกล้ถึงจุดยุติจะเป็นสีแดงอ่อนและหากเลยจุดยุติจะเป็นสีขาวขุ่นหรือไม่มีสี ดังภาพที่ 5 เมื่อสังเกตกราฟของสีแดงจะพบว่า สีแดงจะเพิ่มขึ้นก่อนถึงจุดยุติเล็กน้อย ในขณะที่สีเขียวและน้ำเงินจะมีสัญญาณที่ต่ำ ด้วยสัญญาณลักษณะนี้เราสามารถพัฒนาโปรแกรมให้ควบคุมความเร็วของปั๊มที่แตกต่างกันเพื่อลดเวลาการไทเทรต แต่ยังคงมีความแม่นยำของการไทเทรต กล่าวคือ ในช่วงเริ่มต้นไทเทรตจะใช้ความเร็วของไซริงจ์ปั๊มที่เร็วกว่า ช่วงที่ใกล้จุดยุติ (กราฟสีแดงเริ่มสูงขึ้น) และโปรแกรมสามารถตรวจสอบจุดยุติโดยประมาณได้จากระดับสัญญาณที่สูงขึ้นกว่าจุดเริ่มต้น (ช่วงที่ความชันสูงมาก) ในโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นได้กำหนดให้เครื่องทำการไทเทรตต่ออีกเล็กน้อยหลังจากตรวจสอบพบจุดยุติแล้วเพื่อความแม่นยำในการคำนวณภายหลัง ก่อนที่จะสั่งให้ไซริงจ์ปั๊มหยุดการทำงาน สีของสารละลายตัวอย่างเทียบกับสัญญาณที่วัดได้ระหว่างไทเทรตหาค่าไอโอดีน ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 สีของสารละลายตัวอย่างเทียบกับสัญญาณที่วัดได้ระหว่างไทเทรตหาค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม

5. ตัวอย่างทดสอบที่ใช้สำหรับทดลองทดสอบค่าไอโอดีนตามวิธีแบบวิจส์ (Wijs method) ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสง คือ ตัวอย่างน้ำมันปาล์มจากเนื้อปาล์มจำนวน 1 ตัวอย่าง ที่ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแห่งหนึ่งในจังหวัดกระบี่

6. สารเคมีที่ใช้ได้แก่ สารละลายวิจส์ (Wijs Solution) กรดไฮโดรคลอริก (AR grade) ไซโคลเฮกเซน (AR grade) ทั้งหมดซื้อจาก RCI Labscan (Bangkok, Thailand) โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) โซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3{\cdot}5H_2O$) โพแทสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) ทั้งหมดซื้อจาก Merck (Darmstadt, Germany) Starch ซื้อจาก Ajax (Germany)

7. ขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและตัวอย่าง อ้างอิงจาก AOAC.993.20

7.1 การเตรียมสารเคมีสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) เข้มข้น 10 % เตรียมโดยชั่งน้ำหนัก KI 50 กรัมละลายและปรับปริมาตรให้ได้ 500 มิลลิลิตรด้วยน้ำ สารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ เตรียมโดยชั่งน้ำหนักโซเดียมไทโอซัลเฟต 24.82 กรัมละลายและปรับปริมาตรให้ได้ 1,000 มิลลิลิตรด้วยน้ำสารละลายกรดไฮโดรคลอริก(HCl) เข้มข้น 1 โมลาร์เตรียมโดยปิเปต HCl(ความเข้มข้น 12 โมลาร์) ปริมาตร 8.33 มิลลิลิตรปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำ

7.2 การหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต โดยชั่งน้ำหนักโพแทสเซียมไดโครเมตที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ประมาณ 0.1 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมโพแทสเซียมไอโอไดด์ประมาณ 2 กรัม เติมลงในขวดรูปชมพู่ที่ชั่งโพแทสเซียมไดโครเมตไว้แล้ว จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร 80 มิลลิลิตร เติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 1 โมลาร์ปริมาตร 20 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งในที่มืดเป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปไทเทรตกับสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตข้างต้นด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้น้ำแป้งเข้มข้น 1 % เป็นอินดิเคเตอร์ จุดยุติเป็นจุดที่สีน้ำเงินหมดไป โดยโปรแกรมจะบันทึกปริมาตรเริ่มต้นและสิ้นสุดให้โดยอัตโนมัติ

7.3 การเตรียมตัวอย่างน้ำมันปาล์ม เพื่อทดสอบค่าไอโอดีนตามวิธีแบบวิจส์ ไม่ต้องเจือจางตัวอย่างน้ำมันปาล์มก่อนนำไปไทเทรตซึ่งค่าไอโอดีน คือ จำนวนกรัมของไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยากับกรดไขมัน ณ คาร์บอนตำแหน่งที่ไม่อิ่มตัวของไขมันหรือน้ำมัน จำนวน 100 กรัม ซึ่งเป็นดัชนีบ่งชี้ว่า ไขมันหรือน้ำมันนั้นมีองค์ประกอบที่เป็นกรดไขมันไม่อิ่มตัวเท่าใด ถ้าไขมันหรือน้ำมันมีค่าไอโอดีนสูง แสดงว่าในตัวอย่างประกอบด้วยกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวสูง โดยขั้นตอนการทดสอบ คือ ชั่งตัวอย่างน้ำมันปาล์มใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตรประมาณ 0.2 กรัม บันทึกน้ำหนักที่แน่นอน เติมไซโคลเฮกเซนปริมาตร 15 มิลลิลิตร เติมสารละลายวิจส์ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เขย่าขวดและตั้งไว้ในที่มืด 1 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาเติมสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 10 % ปริมาตร 20 มิลลิลิตรและน้ำปริมาตร 150 มิลลิลิตร ขั้นตอนต่อจากนี้ คือ นำไปทดสอบด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสง โดยนำไปไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ที่ทราบความเข้มข้นแน่นอนจากข้อ 7.2) ขณะไทเทรตให้คนอย่างสม่ำเสมอ จนได้สารละลายสีเหลืองอ่อนเติมน้ำแป้งเข้มข้น 1 % เป็นอินดิเคเตอร์ 2-3 หยด สารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีน้ำเงินแล้วไทเทรตต่อไปจนสีน้ำเงินเปลี่ยนเป็นไม่มีสี คือ จุดยุติ โดยโปรแกรมจะบันทึกปริมาตรเริ่มต้นและสิ้นสุดของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ที่ใช้ไปให้โดยอัตโนมัติ ในการทดสอบนี้จะต้องทดสอบสารละลานที่ไม่มีตัวอย่างที่ต้องการวัด (blank) ด้วย โดยการเตรียม blank เป็นการเตรียมสารละลายทดสอบเช่นเดียวกับการเตรียมตัวอย่างน้ำมันปาล์มแต่ไม่มีน้ำมันปาล์มเติมลงไปในขวดรูปชมพู่

ผลการวิจัย

การทดสอบการทำงานของเครื่องในการหาปริมาณไอโอดีนในน้ำมันปาล์มโดยวางเครื่องในตู้ดูดควันเพื่อป้องกันอันตรายจากสารเคมีที่ใช้ในการไทเทรตและต่อสายต่าง ๆ เข้ากับคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมและบันทึกผลการทดสอบแสดง ดังภาพที่ 6

ภาพที่ 6 การจัดวางตัวเครื่องเพื่อทำการทดสอบการทำงาน

การหาค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์มด้วยวิธีแบบวิจส์ เมื่อเติมรีเอเจนต์และสารละลายวิจส์ลงในตัวอย่างน้ำมันปาล์มที่ทราบน้ำหนักแน่นอนและทำปฏิกิริยาโดยเก็บไว้ที่มืด 1 ชั่วโมง และไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตเข้มข้น 0.1 โมลาร์ซึ่งสารละลายวิจส์เป็นสารละลายไอโอดีนที่ละลายอยู่ในกรดอะซิติกและมีไอโอดีนโมโนคลอไรด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยามีการเติมน้ำแป้งเพื่อใช้ในการดูจุดยุติการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็น ไม่มีสี (ตามขั้นตอนข้อที่ 7.3) แสดงสมการเคมีการเกิดปฏิกิริยาการทดสอบไอโอดีนที่เกิดขึ้น แสดงดังสมการ

$$R\text{-}CH{=}CH\text{-}R' + ICl_{(excess)} \longrightarrow R\text{-}CHI\text{-}CHCl\text{-}R' + ICl_{(remaining)}$$

$$ICl_{(remaining)} + I^- \longrightarrow Cl^- + I_2$$

$$\underset{(blue)}{I_2} + starch + 2\,S_2O_3^{2-} \longrightarrow \underset{(colorless)}{2\,I^- + starch + S_4O_6^{2-}}$$

ก่อนทดสอบค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์มจะต้องคำนวณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่แน่นอนที่ใช้ในการไทเทรตตามขั้นตอนที่ 7.2 ด้วยสมการที่ 2 และการคำนวณหาค่าไอโอดีนดังสมการที่3 ซึ่งคำนวณให้อัตโนมัติด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ โดยใช้ตัวตรวจวัดแสง ดังนี้

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต(M)} = \frac{\text{น้ำหนักโพแทสเซียมไดโครเมต (g)}}{\text{ปริมาตรสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรต (mL)} \times 0.0490}$$

เมื่อ สมมูลของโพแทสเซียมไดโครเมต = 49.032

$$\text{คำนวณค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีนต่อ 100กรัม)} = \frac{(b-a) \times N \times 12.69}{W}$$

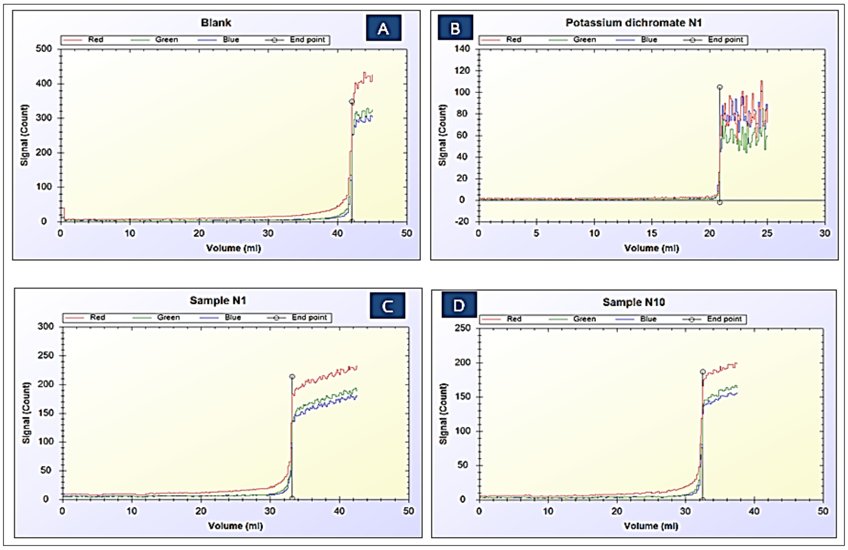
โดย a= ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร, mL)

b= ปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไทเทรตกับ blank (มิลลิลิตร, mL)

N= ความเข้มข้นโซเดียมไทโอซัลเฟต (โมลาร์, M)

W= น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

กราฟแสดงผลการทดสอบจะหาค่าของ blank ค่าความเข้มข้นโซเดียมไทโอซัลเฟต กราฟผลการไทเทรตไอโอดีนในน้ำมันปาล์มซ้ำที่ 1 และกราฟผลการไทเทรตไอโอดีนในน้ำมันปาล์มซ้ำที่ 10 แสดงดังภาพที่ 7 โดยสีแดง (Red) สีเขียว (Green) และสีน้ำเงิน (Blue) แสดงถึงความสว่างของแสงแต่ละสีที่สามารถตรวจวัดได้เทียบกับปริมาตรโซเดียมไทโอซัลเฟตที่ใช้ไป



ภาพที่ 7 A: ผลการไทเทรต blank, B: ผลการไทเทรตหาความเข้มข้นโซเดียมไทโอซัลเฟต ซ้ำที่ 1, C: ผลการไทเทรตไอโอดีนในน้ำมันปาล์มซ้ำที่ 1, D: ผลการไทเทรตไอโอดีนในน้ำมันปาล์มซ้ำที่10

ผลการทดสอบค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์มจากข้อที่ 5 ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงเปรียบเทียบกับผลการไทเทรตมือตามวิธีมาตรฐานจำนวน 10 ซ้ำ เพื่อทดสอบคุณสมบัติของเครื่องไทเทรตอัตโนมัติที่สร้างขึ้นพบว่า ให้ค่าไอโอดีนเฉลี่ยไม่แตกต่างกับการทดสอบไทเทรตมือ คือ 58.06 และ 58.26 กรัมไอโอดีน/100 กรัม ตามลำดับ และพบว่าให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน(SD) จากเครื่องไทเทรตอัตโนมัติและไทเทรตมือ เป็น 0.89 และ 1.15 กรัมไอโอดีน/100 กรัม ตามลำดับ และค่าความแม่นยำ (%RSD) จากเครื่องไทเทรตอัตโนมัติและไทเทรตมือ เป็น 1.54 และ 1.97 ตามลำดับ จากผลการทดสอบดังกล่าวพบว่า การใช้เครื่องไทเทรตอัตโนมัติให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานและค่าความแม่นยำที่ดีกว่าการไทเทรตมือ และตามประกาศกระทรวงสาธารณสุขฉบับที่ 56 (พ.ศ.2524) เรื่องน้ำมันปาล์มที่ผลิตเพื่อจำหน่าย นำเข้าเพื่อจำหน่ายหรือที่จำหน่ายเพื่อใช้รับประทานหรือใช้ปรุงแต่งอาหาร ต้องมีคุณภาพหรือมาตรฐานสำหรับค่าไอโอดีนแบบวิจส์ ไม่น้อยกว่า 55 กรัมไอโอดีน/100 กรัม สำหรับน้ำมันปาล์มโอลีอินจากเนื้อปาล์ม พบว่า ค่าการทดสอบไอโอดีนในตัวอย่างน้ำมันปาล์มที่ได้สอดคล้องกับมาตรฐานกำหนด ผลการทดสอบ 10 ซ้ำ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงผลการไทเทรตค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงเปรียบเทียบกับผลการไทเทรตมือ

n จำนวนซ้ำของการทดสอบ (n=10)	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/ 100 กรัม)	
	เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ	ไทเทรตมือ
1	56.52	56.90
2	58.52	57.83
3	58.04	59.40
4	58.46	58.30
5	57.73	59.54
6	60.05	57.89
7	57.69	59.26
8	57.72	57.48
9	58.10	56.42
10	57.74	59.57
Mean (ค่าเฉลี่ย)	**58.06**	**58.26**
SD (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	**0.89**	**1.15**
%RSD (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์,ความแม่นยำ)	**1.54**	**1.97**

อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ผลที่ได้จากการไทเทรตหาค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม ด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงเมื่อคำนวณหาค่าปริมาตร ณ จุดยุติด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นแล้วนำมาคำนวณค่าไอโอดีนโดยอัตโนมัติตามสมการที่ 3 เปรียบเทียบกับผลการไทเทรตมือ พบว่า มีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกันและความแม่นยำแสดงด้วยค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ หากค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์มีค่าน้อยแสดงถึงความแม่นยำของผลการทดสอบ ซึ่งผลการไทเทรตค่าไอโอดีนด้วยเครื่องไทเทรตอัตโนมัติมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์น้อยกว่าการไทเทรตมือ จากตารางที่ 1 นำผลการทดสอบที่ได้จากวิธีทดสอบที่ต่างกันนำมาเปรียบเทียบด้วยกลวิธีทางสถิติ t-Test คือการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดลองจากวิธีทดลองที่แตกต่างกัน โดยใช้ excel โปรแกรมสถิติ Data analysis ด้วย t-Test พบว่า ค่า t ที่ได้จากการคำนวณแบบ one tailt cal = 0.44 และค่า t จากตารางแบบ one tailt critical = 1.73 พบว่า t cal< t critical สรุปว่าผลการทดสอบของทั้งสองวิธีไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงผลการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของผลการทดลองจากวิธีทดลองที่แตกต่างกัน t-Tests โดยใช้ excel โปรแกรมสถิติ Data analysis

t-Test: Two-Sample Assuming Equal Variances		
	ไทเทรตมือ	**เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ**
Mean	58.26	58.06
Variance	1.31	0.80
Observations	10	10
Pooled Variance	1.06	
Hypothesized Mean Difference	0	
Df	18	
t Stat	0.44	
P(T<=t) one-tail	0.33	
t Critical one-tail	1.73	
P(T<=t) two-tail	0.67	
t Critical two-tail	2.10	

นอกจากนี้การเปรียบเทียบผลระหว่างห้องปฏิบัติการ สำหรับการทดสอบค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม เปรียบเทียบกับ 2 ห้องปฏิบัติการเพื่อประกันผลว่า ผลการทดสอบไอโอดีนที่ได้จากเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ และไทเทรตมือตามวิธีมาตรฐาน เป็นที่น่าพอใจหรือไม่ การประเมินผลใช้ค่า Z-score

$$Z = (X_i - X^*)/s^*$$

เมื่อ Xi คือ ค่าที่ได้จากห้องปฏิบัติการ

X* คือ ค่าเฉลี่ย

S* คือ Standard Deviation

โดยคำนวณจากสมการ เกณฑ์การประเมินค่า Z-score แสดงดังตารางที่ 3 และการเปรียบเทียบผลระหว่างห้องปฏิบัติการสำหรับค่าไอโอดีนและค่า Z-score แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 เกณฑ์การประเมินค่า Z-score

การแสดงค่า Z-score	เกณฑ์การยอมรับ
$\lvert Z \rvert \le 2$	ผลเป็นที่น่าพอใจ (Satisfactory)
$2 < \lvert Z \rvert < 3$	ผลเป็นที่น่าสงสัย (Questionable)
$\lvert Z \rvert \ge 3$	ผลไม่เป็นที่น่าพอใจ (Unsatisfactory)

ที่มา : สมการที่ 4 และ เกณฑ์การประเมินค่า Z-score จาก QP-RES-004 ระเบียบวิธีปฏิบัติเรื่องการตรวจสอบและประกันผลการทดสอบ ฉบับที่ 20 สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ ม.สงขลานครินทร์

ตารางที่ 4การเปรียบเทียบผลระหว่างห้องปฏิบัติการสำหรับค่าไอโอดีนและค่า Z-score

	ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีน/100กรัม)	**Z-score**
เครื่องไทเทรตอัตโนมัติ	58.06	-0.84
ไทเทรตมือ	58.26	1.45
ห้องปฏิบัติการอื่น (1)	58.10	-0.36
ห้องปฏิบัติการอื่น (2)	58.11	-0.25
Mean (ค่าเฉลี่ย)	58.13	-
SD (ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)	0.09	-

จากตารางที่ 4 พบว่า Z-score ของผลไอโอดีนที่ได้จากเครื่องไทเทรตอัตโนมัติ เท่ากับ -0.84 เมื่อประเมินผลจากเกณฑ์การประเมินพบว่า │Z│ ≤ 2 แสดงว่า ผลเป็นที่น่าพอใจและให้ค่าที่ดีกว่าจากผลการไทเทรตมือ ในขณะที่ผลการไทเทรตมือให้ค่า Z- score ค่อนข้างสูงกว่า คือ 1.45

จากผลการทดสอบการทำงานของเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงโดยการทดสอบหาค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม ผลจากการเปรียบเทียบด้วยกลวิธีทางสถิติ t-Test ระหว่างสองวิธีพบว่า ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ และผลจากการประเมินค่า Z-score เทียบกับห้องปฏิบัติการอื่นพบว่า │Z│ ≤ 2 แสดงว่าผลเป็นที่น่าพอใจ สรุปได้ว่าเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้หาค่าปริมาณไอโอดีนในน้ำมันปาล์มได้เป็นอย่างดี ช่วยให้นักวิจัยสัมผัสกับสารเคมีน้อยลง ลดต้นทุนจากการซื้อเครื่องไทเทรตอัตโนมัติราคาแพง

ข้อเสนอแนะ

แม้งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การสร้างเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงเพื่อทดสอบค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม แต่จากการออกแบบตัวเครื่อง ได้ออกแบบเผื่อไว้ให้สามารถพัฒนาต่อยอดเพื่อใช้อิเล็กโทรดซึ่งใช้หลักการไฟฟ้าเคมีในการตรวจวัดได้เช่นกัน โดยการพัฒนาวงจรขยายสัญญาณอิเล็กโทรดและเชื่อมต่อกับไมโครคอนโทรลเลอร์ PIC18F252 เพื่ออ่านค่า ก่อนส่งข้อมูลให้แก่คอมพิวเตอร์ประมวลผลต่อไป ซึ่งจะช่วยในการตรวจสอบจุดยุติในการไทเทรตที่หลากหลายเทคนิคมากขึ้น เช่น การไทเทรตเพื่อหาปริมาณน้ำในตัวอย่างน้ำมันโดยใช้เทคนิค Karl Fischer method เป็นต้น

สรุปผลการวิจัย

ผลการทดสอบการทำงานของเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถให้ผลการทดสอบที่แม่นยำในการหาค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์ม โดยมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์น้อยกว่าการไทเทรตมือตามวิธีมาตรฐานเล็กน้อย เมื่อเปรียบเทียบด้วย t-Test พบว่า ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างทั้งสองวิธี ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และเมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบสำหรับค่าไอโอดีนในน้ำมันปาล์มระหว่างห้องปฏิบัติการกับเครื่องไทเทรตอัตโนมัติประเมินผลด้วยค่า Z-score พบว่า ให้ค่า Z-score น้อยกว่า 2 แสดงว่าให้ผลเป็นที่น่าพอใจ นอกจากนี้เครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงแบบ RGB ยังเป็นเครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์ที่สามารถสร้างได้ในราคาไม่แพง สามารถนำมาใช้แทนเครื่องมือสำหรับการตรวจวิเคราะห์ด้วยวิธีไทเทรตได้อย่างประหยัด และช่วยแก้ปัญหาการดูจุดยุติด้วยตาของการไทเทรตมือ อีกทั้งช่วยลดความเสี่ยงในการสัมผัสและสูดดมสารเคมีซึ่งเป็นอันตรายแก่ผู้ทดสอบอีกด้วย เครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสงที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้งานได้

คุณสมบัติเครื่อง

คุณสมบัติของเครื่องไทเทรตอัตโนมัติโดยใช้ตัวตรวจวัดแสง มีดังนี้

ระบบตรวจวัด	: TCS230, Photodiodes array with red green blue filters
ระบบปั๊ม	: VersaPump3, Syringe dispenser module with six port valves
อัตราไหล	: 0.01 - 1.30 mL/s
ระบบควบคุม	: ควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงผลแบบกราฟฟิก
การเชื่อมต่อ	: USB Port
ขนาดตัวเครื่อง	: 25.5 x 21.0 x 16.5 cm
พลังงาน	: AC220V 50/60Hz 50VA
ต้นทุนการผลิต	: 42,900 บาท

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ซึ่งได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัยด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน ส่งผลให้งานวิจัยชิ้นนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีและขอขอบคุณผู้อำนวยการสำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนและเอื้ออำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

ปริญญา มาสวัสดิ์ สายสุนีย์ เหลี่ยวเรืองรัตน์ และ ศุภโชค อุปาลี.2549. การออกแบบและสร้างเครื่องไมโครไทเทรตอัตโนมัติแบบย่อส่วนพร้อมทั้งการหาจุดยุติด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีสำหรับการวิเคราะห์หาความแรงของกรดในน้ำผลไม้บางชนิด.33 rd Congress on Science and Technology of Thailand.

De Sena,R.C..,Soares, M.,Pereira,M.L.O., da Silva, R.C.D., do Rosário, F.F. and J.F.C. da Silva. 2011. A Simple Method Based on the Application of a CCD Camera as a Sensor to Detect Low Concentrations of Barium Sulfate in Suspension. Sensors. 11: 864-875.

Garcia A.J.C.and B.F. Reis. 2006. Instrumentation and Automated Photometric Titration Procedure for Total Acidity Determination in RedWine Employing a Multicommuted Flow System. Journal of Automated Methods and Management in Chemistry.2006: 1–8.

Kloehn Ltd. 2002. HARDWARE USER'S MANUAL for the VersaPump3 SYRINGE DISPENSER MODULE. Las Vegus, NV U.S.A..1-116.