



การวัดแรงดึงผิวและความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงดึงผิว โดยใช้วิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพ  
ด้วยสมาร์ตโฟน



ปณณพร โอมมี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

การวัดแรงดึงผิวและความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงดึงผิว โดยใช้วิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพ  
ด้วยสมาร์ทโฟน



ปณณพร โอมมี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีศึกษา

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

2567

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยบูรพา

Evaluation of Surface Tension and Critical Micelle Concentration of Surfactants Using  
the Pendant Drop Method Captured with a Smartphone



PANNAPORN OMEE

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF  
THE REQUIREMENTS FOR MASTER DEGREE OF SCIENCE  
IN CHEMICAL EDUCATION  
FACULTY OF SCIENCE  
BURAPHA UNIVERSITY

2024

COPYRIGHT OF BURAPHA UNIVERSITY

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ได้พิจารณา  
วิทยานิพนธ์ของ ปณณพร โอมิ ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพาได้

คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรนนท์ นงศ์นวล)

..... ประธาน  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธินาถ ชิตพงศ์ จันทเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรนนท์ นงศ์นวล)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.การะเกด เทศศรี)

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. อุษาวดี ตันติวรานุรักษ์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยบูรพา อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของ  
การศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมีศึกษา ของมหาวิทยาลัยบูรพา

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทวัส แจ่มเอียด)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

62920412: สาขาวิชา: เคมีศึกษา; วท.ม. (เคมีศึกษา)

คำสำคัญ: แรงตึงผิว, วิธีหยดของเหลว, ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์, สมาร์ทโฟน

ปณิณพร โอมี่ : การวัดแรงตึงผิวและความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว โดยใช้วิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน . (Evaluation of Surface Tension and Critical Micelle Concentration of Surfactants Using the Pendant Drop Method Captured with a Smartphone ) คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์: อีรพันธ์ นงคินวล, เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา ปี พ.ศ. 2567.

วิธีการในปัจจุบันสำหรับการวัดค่าแรงตึงผิวของของเหลวที่มีขั้นตอนที่ซับซ้อนในการคำนวณ และต้องใช้เครื่องมือที่ราคาแพง งานวิจัยนี้ได้พัฒนาชุดการทดลองอย่างง่ายเพื่อวัดค่าแรงตึงผิว โดยเทคนิคหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน ชุดการทดลองประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง หัวจ่ายหยดของเหลวต่อเนื่องด้วยอัตราการหยดคงที่ และสมาร์ทโฟนที่ติดตั้งเลนส์มาโครสำหรับถ่ายภาพวิดีโอ การคำนวณค่าแรงตึงผิวด้วยสมการ Young-Laplace อย่างง่ายแบบสองมิติ โดยใช้ตัวแปรขนาดความกว้างของหยดน้ำ จากนั้นทดลองศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำในการวัดค่าแรงตึงผิว ได้แก่ ขนาดหยดน้ำ วัตถุอ้างอิง และกล้องถ่ายภาพ ผลการทดลองพบว่าชุดการทดลองจะให้ค่าแรงตึงผิวถูกต้องแม่นยำมากขึ้น เมื่อทำการวัดขนาดหยดน้ำในช่วงร้อยละ 70-95 ของเวลาต่อหยด การใช้สมาร์ทโฟนร่วมกับเลนส์มาโครที่มีระยะโฟกัสสั้น ทำให้ได้ภาพที่มีความละเอียดสูงและช่วยเพิ่มความคมชัดของหยดน้ำ อีกทั้งยังสามารถใช้เข็มฉีดยาขนาดเล็กเป็นวัตถุอ้างอิงได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ชุดการทดลองยังถูกนำไปใช้ในการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (CMC) ของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) โดยค่าที่ได้จากการทดลองสอดคล้องกับค่าที่วัดด้วยวิธีการนำไฟฟ้าและการดูดกลืนแสงของสีย้อม งานวิจัยนี้นำเสนอแนวทางใหม่ในการพัฒนาชุดการทดลองที่ใช้งานง่าย ต้นทุนต่ำ และเหมาะสำหรับการเรียนการสอนในระดับมัธยมศึกษาและมหาวิทยาลัย

62920412: MAJOR: CHEMICAL EDUCATION; M.Sc. (CHEMICAL EDUCATION)

KEYWORDS: Surface tension/Pendant drop/Critical micelle concentration/Smartphone

PANNAPORN OMEE : EVALUATION OF SURFACE TENSION AND CRITICAL MICELLE CONCENTRATION OF SURFACTANTS USING THE PENDANT DROP METHOD CAPTURED WITH A SMARTPHONE . ADVISORY COMMITTEE: TEERANAN NONGNUAL, Ph.D. AKAPONG SUWATTANAMALA, Ph.D. 2024.

Traditional methods for measuring surface tension often involve complex calculations and expensive equipment, limiting their accessibility in educational settings. This study introduces a cost-effective and user-friendly experimental setup based on the pendant drop method, utilizing a smartphone equipped with a macro lens for image capture. The apparatus includes a light source, a continuous liquid drop dispenser with a fixed drop rate, and a typical smartphone for video recording. Surface tension is calculated using a simplified two-dimensional Young-Laplace equation, with droplet width as the key parameter. We investigated factors affecting measurement accuracy, such as droplet size, reference objects, and camera specifications. The results indicate that accuracy improves when droplet size measurements are taken within 70–95% of the droplet detachment time. Smartphones with macro lenses of short focal length enhance image clarity and resolution, enabling the effective use of small syringe needles as reference objects. The experimental setup was also applied to determine the critical micelle concentration (CMC) of surfactants including sodium dodecyl sulfate (SDS) and cetyltrimethylammonium bromide (CTAB). The obtained CMC values closely match those measured using traditional conductivity and dye absorbance methods. This research presents an innovative approach for surface tension measurement and CMC determination, making it suitable and practical for educational use in high schools and universities.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยการแนะนำ ช่วยเหลือเอาใจใส่เป็นอย่างดี จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรนนท์ นงศ์นวล อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์ มาลา อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งได้ให้คำปรึกษาและแนวทางอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำ วิทยานิพนธ์ อีกทั้งช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการดำเนินงาน วิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งเป็นอย่างยิ่งจึงขอกราบ ขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธินาถ ชิตพงษ์ จันทเดช ประธานสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรนนท์ นงศ์นวล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกพงษ์ สุวัฒน์มาลา และรอง ศาสตราจารย์ ดร.การะเกด เทศศรี กรรมการสอบ ที่ได้ให้คำแนะนำชี้แนะแนวทางที่ถูกต้อง ตรวจสอบแก้ไข ข้อบกพร่องต่างๆ ของวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคุณณัฐวุฒิ บุตรพรม คุณกนกศักดิ์ แซ่ลีและคุณเพชรลดา สัญชยานุกูลที่ให้ คำแนะนำในการใช้เครื่องมือในการวิเคราะห์ข้อมูลและขอบคุณห้องปฏิบัติการ SD205 อาคารสิริธร คณะวิทยาศาสตร์ ที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และสารเคมี เพื่อทำวิจัยในห้องปฏิบัติการ

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ครอบครัวและแฟนอันเป็นที่รัก ที่ได้ส่งเสริม สนับสนุน ให้ กำลังใจและเกื้อหนุนในทุกๆ ด้านเสมอมา อีกทั้งเพื่อนๆ และพี่ๆ ในหลักสูตรวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาเคมีศึกษา รวมถึงน้องๆ สาขาเคมีทุกคน ที่ได้ให้กำลังใจและสนับสนุนอย่างเต็มที่ ขอขอบพระคุณ คณะผู้บริหารสถานศึกษา คณะครู และนักเรียนโรงเรียนสุราษฎร์ธานีที่สนับสนุนการศึกษาต่อและส่ง กำลังใจมาโดยตลอด

คุณค่าและประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นกตัญญูกตเวทิตาแต่บุพการี บุรพจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน ที่ได้มีส่วนช่วยให้ข้าพเจ้าได้รับการศึกษาและประสบความสำเร็จมา จนถึงทุกวันนี้

ปณณพร โอมี

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่ 1.....	1
บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการวิจัย.....	3
สถานที่ดำเนินการวิจัย.....	3
บทที่ 2.....	4
แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
แรงตึงผิว.....	4
สารลดแรงตึงผิว.....	8
ทฤษฎีการเกิดไมเซลล์.....	13
ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์.....	15
วิธีการหาค่าแรงตึงผิวของเหลว.....	16
เครื่องมือวัดค่าแรงตึงผิวของของเหลวทางพาณิชย์.....	25

วิธีการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์.....	28
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	33
บทที่ 3 .....	45
วิธีการดำเนินการวิจัย .....	45
อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี.....	45
การเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี .....	46
การออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิวน้ำ โดยวิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน ..	48
ศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ .....	54
บทที่ 4 .....	58
ผลการวิจัยและอภิปราย.....	58
การประมวลผลภาพถ่ายหยดน้ำ และการคำนวณค่าแรงตึงผิว .....	58
ผลการออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิว โดยวิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน ..	61
ผลการศึกษาหาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต.....	72
ผลการศึกษาหาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ....	79
ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ .....	85
บทที่ 5 .....	88
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	88
สรุปผลการวิจัย.....	88
ข้อเสนอแนะ .....	89
บรรณานุกรม.....	90
ภาคผนวก.....	95
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	100

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 แรงดึงผิวของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 20 °C .....	5
ตารางที่ 2 ความแม่นยำและความเหมาะสมของเทคนิคคลาสสิกที่ใช้ในการวัดแรงดึงผิว .....	27
ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติของสมาร์ตโฟนทั้ง 3 แบบ (L, LM และ H).....	47
ตารางที่ 4 เปรียบเทียบขนาดมาตราส่วนกับวัตถุอ้างอิงที่ใช้ในการแปลงหน่วย.....	62
ตารางที่ 5 ข้อมูลเปรียบเทียบการตั้งค่าน้ำหนักและคุณภาพของวิดีโอที่ได้จากสมาร์ตโฟน 3 รุ่น.....	65
ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน.....	85
ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ จากเอกสารงานวิจัยโดยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน .....	86

## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 โมเลกุลที่ผิวหน้าของน้ำได้รับแรงดึงดูดสุทธิเข้าหาโมเลกุลอื่นในของเหลว.....	4
ภาพที่ 2 วัสดุลอยบนผิวน้ำ (ซ้าย) และจิ้งจอกน้ำเดินบนผิวน้ำได้ (ขวา) .....	6
ภาพที่ 3 หยดน้ำบนผิวแอปเปิ้ลที่มีผิวมัน (ซ้าย) และภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ของหยดน้ำบนพื้นผิวของใบบัว (ขวา).....	6
ภาพที่ 4 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว.....	8
ภาพที่ 5 หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวและการเกิดไมเซลล์ .....	9
ภาพที่ 6 สารลดแรงตึงผิวแบ่งตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ .....	10
ภาพที่ 7 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant).....	11
ภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวกลุ่มประจุบวก (Cationic Surfactant) .....	12
ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวกลุ่มประจุลบ (Anionic Surfactant) .....	13
ภาพที่ 10 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวกลุ่มไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant) .....	13
ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของสารลดแรงตึงผิวและการเกิดไมเซลล์ตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย .....	14
ภาพที่ 12 วิธีการหาแรงตึงผิวโดยแผ่นของวิลเฮล์ม .....	16
ภาพที่ 13 วงแหวนดุนอยส์ที่แสดงสมบัติของวงแหวนและการกระทำของ F กับวงแหวนในระหว่างการวัดในโหมดการแยกตัว.....	18
ภาพที่ 14 หยดของเหลวที่ห้อยอยู่ใต้เข็มในสถานะที่มีแรงโน้มถ่วงทำให้เกิดรูปทรงหยดน้ำ .....	20
ภาพที่ 15 ภาพหยดของเหลว.....	22
ภาพที่ 16 เครื่องวัดแรงตึงผิว (Tensiometers) KRÜSS K6 Tensiometer.....	25
ภาพที่ 17 เครื่องเทนซิโอมิเตอร์ Sigma 700/701 ของ Biolin Scientific.....	26
ภาพที่ 18 เครื่อง Attension Theta Series จาก Biolin Scientific .....	26

ภาพที่ 19 แรงตึงผิวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เมื่อถึงความเข้มข้นวิกฤตสำหรับการเกิดไมเซลล์ แรงตึงผิวจะคงที่เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวเพิ่มเติม .....	28
ภาพที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลาย SDS.....	30
ภาพที่ 21 จำลองความเข้มแสงที่ลดลง เมื่อแสงเดินทางผ่านสารละลายตัวอย่าง .....	31
ภาพที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว..	33
ภาพที่ 23 ขยายของปลายเข็มฉีดยาผ่านเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์ชนิดเวอร์เนียร์ .....	34
ภาพที่ 24 ของเหลวขณะกำลังจะหลุดออกจากปลายเข็มฉีดยา (ก) น้ำกลั่น (ข) กลีเซอริน และ (ค) น้ำมันมะกอก.....	34
ภาพที่ 25 (a) การออกแบบการทดลองถ่ายภาพของเหลวโดยสมาร์ทโฟน (b) การวัดขนาดหยดของเหลวจากหน้าจอสมาร์ทโฟน (c) กราฟระหว่าง $1/H$ และฟังก์ชันของอัตราส่วน $D_g/D_e$ .....	35
ภาพที่ 26 หยดของเหลวของน้ำเปล่า น้ำมัน เอทานอลจากปลายปิเปต น้ำเปล่าจากปลาย pen tube และน้ำเปล่าจากปลายหลอดตามลำดับ .....	36
ภาพที่ 27 การติดตั้ง CapCam .....	37
ภาพที่ 28 หยดน้ำถูกวิเคราะห์โดย Pendent Drop หลังจากการปรับค่าพารามิเตอร์ .....	38
ภาพที่ 29 กราฟแสดงค่าแรงตึงผิวกับความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ที่นักศึกษาได้จากการทดลอง.....	40
ภาพที่ 30 แสดงการแพร่กระจายของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง และการลดลงของมุมสัมผัสเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว .....	42
ภาพที่ 31 (A) มุมมองจากด้านบนของจานเพาะเชื้อที่มีการหยดสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (10 ไมโครลิตรต่อหยด) ซึ่งมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (B) การตั้งค่าการถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ USB ที่มีต้นทุนต่ำ แสดงให้เห็นการจัดตำแหน่งของเลนส์กับหยดสารที่ถูกนำมาใช้.....	42
ภาพที่ 32 การวัดมุมสัมผัสของหยดสารที่ถูกถ่ายภาพโดยใช้โปรแกรม ImageJ.....	43
ภาพที่ 33 (A) เข็มฉีดยาปลายแหลมและ (B) เข็มฉีดยาปลายทุ่ที่ใช้ในการทดลอง .....	46
ภาพที่ 34 การติดตั้งชุดการทดลอง .....	49
ภาพที่ 35 วิธีการวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรม ImageJ.....	50
ภาพที่ 36 การเทียบมาตรฐานส่วนของโปรแกรม ImageJ .....	51

ภาพที่ 37 แสดงการตั้งค่าการติดตั้งกล้องของสมาร์ทโฟน 3 แบบ (L, LM, และ H) .....	52
ภาพที่ 38 วิธีการวัดแรงดึงผิวด้วยการใช้โปรแกรม ImageJ ปลั๊กอิน Pendent Drop .....	53
ภาพที่ 39 อุปกรณ์การทดลองการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายแรงดึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ .....	56
ภาพที่ 40 ตัวอย่างหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดยสมาร์ทโฟน H (A) ภาพก่อนปรับคอนทราสต์ (B) ภาพหลังปรับคอนทราสต์ (C) การวัดระยะ $D_{Tube}$ , $D_E$ และ $D_S$ (D) ตัวอย่างผลการวัดมุมและระยะ	58
ภาพที่ 41 การเทียบมาตรฐาน pixel/mm ของวัตถุอ้างอิง (a) ไม้บรรทัด, (b) กระดาษ และ (c) ขนาดเข็มฉีดยา .....	61
ภาพที่ 42 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงดึงผิวกับขนาดหยดน้ำโดยเทียบกับมาตราส่วนอ้างอิง .....	62
ภาพที่ 43 ภาพถ่ายหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดย L, LM และ H .....	64
ภาพที่ 44 แสดงตัวอย่างการวัดขนาดหยดน้ำ, ขนาดภาพ และขนาดของเข็มที่ใช้เป็นสเกลของภาพถ่ายหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดย H .....	64
ภาพที่ 45 ตัวอย่างการบันทึกภาพร้อยละของเวลาต่อหยดโดยอุปกรณ์ H .....	67
ภาพที่ 46 เปรียบเทียบค่าแรงดึงผิววิธีการของผู้วิจัยและวิธี A.D. โดยใช้สมาร์ทโฟน L, LM และ H	68
ภาพที่ 47 หยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายภาพโดยอุปกรณ์ L .....	70
ภาพที่ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงดึงผิว และระยะการวัดขนาดของระยะ $D_E$ และ $D_S$ .....	71
ภาพที่ 49 แสดงตัวอย่างหยดสารละลายโซเดียมโอดีซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นระหว่าง 0 ถึง 8 mM	73
ภาพที่ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต โดยใช้วิธีการหาแรงดึงผิวหยดของของเหลว .....	74
ภาพที่ 51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของโซเดียมโอดีซิลซัลเฟต....	75
ภาพที่ 52 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายคริสตัลไวโอเล็ตในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ช่วงความยาวคลื่น 350-800 nm .....	76
ภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายคริสตัลไวโอเล็ต และค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด เท่ากับ 590 nm .....	77

ภาพที่ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียม โทเดซิลซัลเฟต เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์.....	78
ภาพที่ 55 แสดงตัวอย่างหยดสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0-2 mM.....	79
ภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยใช้วิธีการหาแรงตึงผิวหยดของของเหลว.....	80
ภาพที่ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายเซทิลไตรเมทิล.....	81
ภาพที่ 58 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเคอร์คูมินในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 300-800 nm.....	82
ภาพที่ 59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคอร์คูมิน และค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 433 nm.....	83
ภาพที่ 60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงต่อความเข้มข้นของ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยใช้วิธีการด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิทรี.....	84

## บทที่ 1

### บทนำ

#### ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

แรงตึงผิว (Surface Tension) คือแรงที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของของเหลวเป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่ทำให้พื้นผิวของของเหลวหดตัวจนมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในขณะที่โมเลกุลภายในของเหลวถูกดึงดูดกันอย่างสม่ำเสมอทุกทิศทาง ส่งผลให้ผิวของเหลวมีลักษณะเหมือนฟิล์มบางที่ตึงอยู่ตลอดเวลา (Petrucci, R. H., 1993) การศึกษาแรงตึงผิวมีความสำคัญในหลายสาขา เช่น เคมี ฟิสิกส์ วิศวกรรมศาสตร์ และชีววิทยา เนื่องจากแรงตึงผิวส่งผลต่อปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในธรรมชาติและอุตสาหกรรม เช่น การลอยตัวของแมลงบนผิวน้ำ การเกาะของหยดน้ำบนใบไม้ การทำงานของหลอดเลือดฝอยในปอด และการพัฒนาสูตรเคมีในอุตสาหกรรมเคมีภัณฑ์ การคำนวณค่าแรงตึงผิวได้ทั้งแบบทางตรงคือวัดแรงตึงผิวจากแรงที่กระทำบนผิวของของเหลว แล้วคำนวณอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำต่อความยาวที่ตั้งฉากกับแรง (Ebnesaajjad, 2011) โดยมีหน่วยเป็นนิวตันต่อเมตร (N/m) และวิธีทางอ้อมใช้การวิเคราะห์รูปทรงหรือพฤติกรรมของหยดของเหลว (Drelich et al., 2002)

การวัดแรงตึงผิวในห้องปฏิบัติการที่นิยมใช้มีวิธีที่สำคัญดังนี้ วิธีแบบแผ่นของวิลเฮลมี (Wilhelmy Plate Method) ใช้แผ่นโลหะแพลทินัม-อิริเดียมจุ่มลงในของเหลวเพื่อวัดแรงที่เกิดขึ้นระหว่างแผ่นและผิวของของเหลว โดยอุปกรณ์ที่ใช้ต้องมีความละเอียดสูงและการเตรียมแผ่นต้องสะอาดปราศจากสิ่งปนเปื้อนเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ อย่างไรก็ตามความละเอียดอ่อนของแผ่นและการบำรุงรักษาที่ซับซ้อนเพิ่มเติมต้นทุนในการใช้งาน วิธีแบบวงแหวนของดูนอยด์ (Du Nouy Ring Method) วิธีนี้ใช้วงแหวนโลหะแพลทินัม-อิริเดียม ยกขึ้นจากผิวของของเหลวเพื่อวัดแรงที่ต้องใช้ในการยกอุปกรณ์นี้ต้องการการสอบเทียบอย่างละเอียดเพื่อหลีกเลี่ยงความผิดพลาดที่เกิดจากการบิดเบี้ยวของวงแหวนและการเปลี่ยนแปลงของความเปียกชื้นของพื้นผิววงแหวน แม้ว่าวิธีนี้จะใช้กันอย่างแพร่หลายในห้องปฏิบัติการ แต่ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาและการจัดการวงแหวนอย่างเหมาะสมมีราคาสูง และวิธีหยดของเหลว (Pendant Drop Method) ใช้การหยดของเหลวแขวนจากปลายเข็มหรือปลายท่อ โดยรูปร่างของหยดที่ถูกควบคุมด้วยสมดุลของแรงตึงผิวและน้ำหนักของหยด แล้ววิเคราะห์ผ่านกล้องและซอฟต์แวร์เฉพาะที่ช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดเวลาในการวิเคราะห์ แต่ต้นทุนของอุปกรณ์ เช่น กล้องและระบบวิเคราะห์ที่ซับซ้อน มีราคาสูงและเหมาะกับการวัดที่ต้องการความแม่นยำสูงในระบบที่ซับซ้อน ทั้งสามวิธีมีความแม่นยำสูง แต่ต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนและมีราคาแพง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการพัฒนาเทคนิคการวัดแรงตึงผิวให้เข้าถึงได้ง่ายขึ้นโดยใช้อุปกรณ์พื้นฐาน เช่น งานวิจัยของ Goy et al. (2017) นำเสนอวิธีการวัดแรงตึงผิวด้วยวิธีหยดของเหลว อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบด้วยเข็มฉีดยา หลอดหยดพลาสติก และกล้องสมาร์ทโฟน iPhone 4s สำหรับบันทึกภาพหยดของเหลว และวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดน้ำโดยตรงบนหน้าจอ พร้อมคำนวณแรงตึงผิวด้วยสมการ Young-Laplace ผลการศึกษาพบว่าค่าแรงตึงผิวที่ได้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับค่ามาตรฐานแต่มีความกระจายของข้อมูล การใช้ซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพ เช่น ImageJ อาจช่วยลดความคลาดเคลื่อนของการวัดได้ ในขณะเดียวกัน Ahmed et al. (2022) ได้ออกแบบเครื่องมือวัดแรงตึงผิวและมุมสัมผัสที่มีต้นทุนต่ำ โดยใช้วิธีหยดของเหลวร่วมกับกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลในการถ่ายภาพ และวิเคราะห์ข้อมูลผ่านปลั๊กอิน Pendent Drop ของซอฟต์แวร์ ImageJ เมื่อเปรียบเทียบผลกับเครื่องมือเชิงพาณิชย์ Kruss DSA25 พบว่าความคลาดเคลื่อนของแรงตึงผิวอยู่ในช่วง 0.4–6% ซึ่งแสดงถึงความแม่นยำของเครื่องมือพื้นฐานที่สามารถให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ โดยการใช้ซอฟต์แวร์ช่วยเพิ่มความแม่นยำและลดข้อผิดพลาดของการวัด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิวของของเหลวโดยใช้วิธีหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน เพื่อให้เหมาะสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาและนักศึกษาระดับปริญญาตรี โดยใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่าย มีความปลอดภัย และมีต้นทุนต่ำ ทั้งนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อความแม่นยำของการวัดค่าแรงตึงผิว เพื่อกำหนดเป็นแนวปฏิบัติของชุดทดลอง วัตถุประสงค์ของการทดลองคือ ให้นักเรียนได้ฝึกใช้อุปกรณ์พื้นฐานและวัดขนาดหยดน้ำ เพื่อทำความเข้าใจความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของหยดน้ำและค่าแรงตึงผิว นอกจากนี้ชุดการทดลองยังถูกใช้ในการศึกษาผลของแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) เพื่อให้นักเรียนเข้าใจพฤติกรรมของสารลดแรงตึงผิวและสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความเข้มข้นสารลดแรงตึงผิวเริ่มรวมตัวเป็นไมเซลล์ในสารละลาย การทราบค่าดังกล่าวมีความสำคัญในการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมยาและชีวเคมี (Rosen, 2012)

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิวของของเหลว โดยใช้วิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน
- 2) เพื่อศึกษาผลของแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และคำนวณหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

### ขอบเขตของการวิจัย

- 1) วัตถุอ้างอิงที่ใช้เทียบขนาดภาพ ได้แก่ ไม้บรรทัด, กระดาษ และเข็มฉีดยา
- 2) สมาร์ทโฟนและเลนส์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ iPhone 13, iPhone 15 pro max และเลนส์มาโคร ยี่ห้อ Ulanzi Super
- 3) สารลดแรงตึงผิว ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) และเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB)
- 4) วิธีหาความเข้มข้นวิกฤตโมเซลล์ 3 วิธี ได้แก่ วิธีวัดหาแรงตึงผิวของของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน, การหาค่าการนำไฟฟ้า และวิธีหาค่าการดูดกลืนแสง

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

- 1) ได้วิธีการหาค่าแรงตึงผิวของเหลวที่มีประสิทธิภาพ โดยวิธีที่ใช้อุปกรณ์ที่หาง่าย ราคาประหยัด และใช้ทักษะวิทยาศาสตร์พื้นฐาน นักเรียน นักศึกษาสามารถทำได้เอง
- 2) ได้ชุดการทดลองศึกษาผลของแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เพื่อประเมินหาค่าความเข้มข้นวิกฤตโมเซลล์ได้

### สถานที่ดำเนินการวิจัย

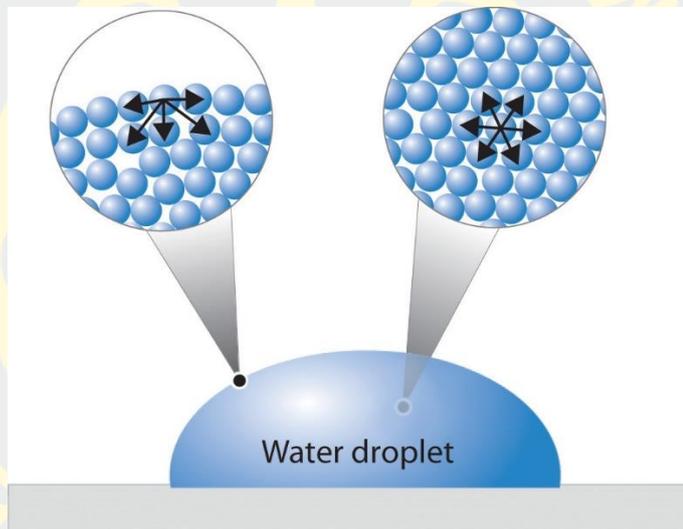
ห้องปฏิบัติการ SD205 อาคารสิรินธร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี

## บทที่ 2

### แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### แรงตึงผิว

แรงตึงผิว (Surface tension) คือ แรงที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของของเหลว เป็นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลทำให้พื้นผิวของของเหลวหดตัวจนมีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ในขณะที่โมเลกุลภายในของเหลวแรงลัพธ์เป็นศูนย์ เนื่องจากโมเลกุลรอบข้างถูกดึงดูดอย่างสม่ำเสมอเท่ากันทุกทิศทาง ผิวของของเหลวมีลักษณะเหมือนฟิล์มซึ่งถูกแรงตึงให้ตึงอยู่เสมอ ดังภาพที่ 1 (Petrucci, R. H., 1993)



ภาพที่ 1 โมเลกุลที่ผิวหน้าของน้ำได้รับแรงดึงดูดสุทธิเข้าหาโมเลกุลอื่นในของเหลว (Aldridge, B., & Brar, N., 2024)

แรงตึงผิวเป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่กระทำไปตามผิวของของเหลวต่อความยาวที่ตั้งฉากกับแรง มีหน่วยเป็นนิวตันต่อเมตร (N/m) หรือพลังงานที่จำเป็นในการเพิ่มพื้นที่ผิวของของเหลวเนื่องจากแรงระหว่างโมเลกุล แสดงเป็นพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ มีหน่วยเป็น จูลต่อเมตร<sup>2</sup> (J/m<sup>2</sup>) สามารถคำนวณได้ดังสมการ (1) หรือ (2) ดังนี้

$$\gamma = \frac{F}{L} \quad (1)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ แรงตึงผิว หน่วย N/m หรือ mN/m

F คือ แรงที่กระทำไปตามผิวของของเหลว หน่วย N

L คือ ความยาวของของเหลว หน่วย m

$$\text{หรือ} \quad \gamma = \frac{W}{A} \quad (2)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ แรงตึงผิว หน่วย  $J/m^2$

$W$  คือ พลังงานที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ผิว หน่วย  $J$

$A$  คือ พื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น  $m^2$

ตัวอย่าง แรงตึงผิวของเหลวที่  $20^\circ C$  แสดงไว้ในตารางที่ 1 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าขนาดของแรงตึงผิวบอกลักษณะของแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของเหลวนั้น  
ตารางที่ 1 แรงตึงผิวของเหลวชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ  $20^\circ C$

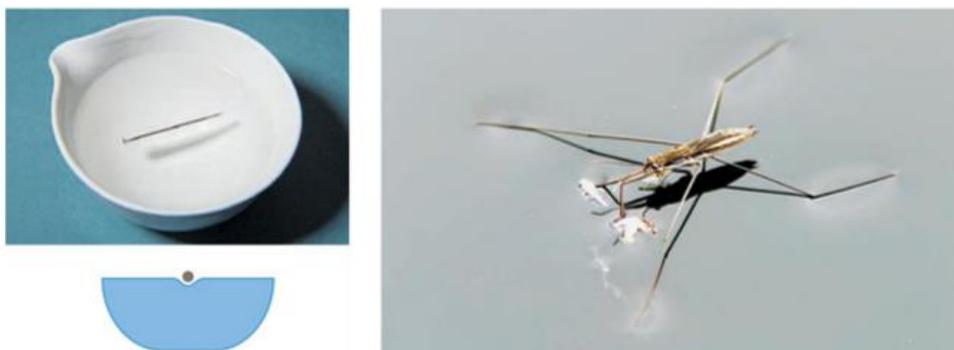
ของเหลว	$\gamma$ (mN/m)
เอทิลอีเทอร์	17.01
เฮกเซน	18.43
เมทิลแอลกอฮอล์	22.61
เอทิลแอลกอฮอล์	22.75
อะซิโตน	23.7
โทลูอีน	28.5
เบนซีน	28.85
น้ำ	72.75
ปรอท	490.81

(ดัดแปลงจาก อรวรรณ ศิริโชติ, 2549)

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าแรงตึงผิวเกิดจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของของเหลว ดังนั้นของเหลวที่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลสูงจะมีแรงตึงผิวมาก ส่วนของเหลวที่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลต่ำจะมีแรงตึงผิวน้อย เช่นปรอทมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลเป็นพันธะโลหะ ดังนั้นปรอทจึงมีแรงตึงผิวสูงมาก ของเหลวที่มีพันธะไฮโดรเจนเช่น น้ำ จะแรงตึงผิวสูงกว่าของเหลวที่มีเพียงแรงลอนดอน เช่น สารจำพวกน้ำมัน เป็นต้น

แรงตึงดูระหว่างโมเลกุลมีแนวโน้มจะดึงโมเลกุลเข้าไปภายในของเหลวและทำให้พื้นผิวมีความตึงคล้ายฟิล์มบาง ดังภาพที่ 2 จะเห็นได้ว่า เข็มลอยบนน้ำ และจิ้งจิกน้ำสามารถเดินบนผิวน้ำได้จากสมบัตินี้ ของเหลวปริมาตรน้อยจึงพยายามรักษารูปทรงเป็นทรงกลมเอาไว้เพราะทรงกลมเป็นรูป

ที่มีพื้นที่ผิวน้อยที่สุดภายใต้ปริมาตรที่กำหนดไว้ (ทวิชัย อมรศักดิ์ชัย, 2560) เช่นเดียวกันกับการหยดน้ำบนผิวแอปเปิ้ลและหยดน้ำบนใบบัว ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 2 วัสดุลอยบนผิวน้ำ (ซ้าย) และจิ้งจอกน้ำเดินบนผิวน้ำได้ (ขวา)  
(ดัดแปลงจาก Ebbing, D.D. and Gammon, S.D., 2007)



ภาพที่ 3 หยดน้ำบนผิวแอปเปิ้ลที่มีผิวมัน (ซ้าย) และภาพถ่ายกล้องจุลทรรศน์ของหยดน้ำบนพื้นผิวของใบบัว (ขวา)

(Brown, T. L. et al., 2015 และ Chang, R., 2010)

### ความสำคัญของการศึกษาแรงตึงผิว

การศึกษาแรงตึงผิวมีความสำคัญในหลากหลายสาขา เช่น เคมี ฟิสิกส์ วิศวกรรมศาสตร์ และชีววิทยา เนื่องจากแรงตึงผิวส่งผลต่อการเกิดและควบคุมปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในธรรมชาติและอุตสาหกรรม การทำความเข้าใจเกี่ยวกับแรงตึงผิวช่วยพัฒนานวัตกรรมใหม่ ๆ และแก้ปัญหาในด้านต่าง ๆ เช่น การผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำ การพัฒนาผลิตภัณฑ์สารลดแรงตึงผิว และการประยุกต์ใช้ในด้านชีวการแพทย์

1) ด้านการประยุกต์ในอุตสาหกรรม แรงตึงผิวมีบทบาทสำคัญในการผลิตสารลดแรงตึงผิว ซึ่งใช้ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด สารซักฟอก ยา เครื่องสำอาง และสารเคลือบผิว สารลดแรงตึงผิวช่วย

ลดแรงตึงผิวของน้ำ ทำให้เกิดการกระจายตัวและการแทรกซึมในวัสดุได้ดีขึ้น เช่นเดียวกับที่ใช้ในอุตสาหกรรมเคมีในการควบคุมการละลาย การกระจายตัว และการหลอมรวมของสาร (Gibbs, 1961)

2) ด้านชีววิทยาและการแพทย์ ในร่างกายมนุษย์แรงตึงผิวเป็นสิ่งสำคัญในปอด เนื่องจากช่วยให้การแลกเปลี่ยนก๊าซเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยเซลล์ในปอดสร้างสารลดแรงตึงผิวเพื่อควบคุมแรงตึงผิวที่บริเวณถุงลม ป้องกันการยุบตัวของถุงลมและช่วยการหายใจ (Weibel, 1984)

3) ด้านเคมีคอลลอยด์และเคมีพื้นผิว การศึกษาแรงตึงผิวสำคัญในเคมีคอลลอยด์ ซึ่งศึกษาเกี่ยวกับอนุภาคขนาดเล็กในสารละลาย และการเปลี่ยนแปลงแรงตึงผิวที่เกิดขึ้นเป็นสัญญาณของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในระบบ การลดแรงตึงผิวมีบทบาทสำคัญในการทำให้อิมัลชันและสารแขวนลอยมีเสถียรภาพ (Damson, 1997)

4) ด้านเทคโนโลยีขั้นสูง แรงตึงผิวมีบทบาทในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และนาโนเทคโนโลยี การผลิตวัสดุที่มีคุณสมบัติไม่เปียกน้ำหรือการพัฒนาโครงสร้างนาโนต่าง ๆ ต้องใช้ความเข้าใจแรงตึงผิวอย่างลึกซึ้ง เช่น การพัฒนาโครงสร้างพื้นผิวที่มีแรงตึงผิวต่ำช่วยป้องกันการเกาะติดของน้ำและสิ่งสกปรก (Bhushan, 2011)

5) ด้านการทดสอบและการวิเคราะห์ การวัดแรงตึงผิวเป็นเครื่องมือสำคัญในการทดสอบคุณภาพของวัสดุ เช่น ในการประเมินคุณสมบัติของน้ำมัน สารเคมี หรือพลาสติก และเพื่อหาขอบเขตความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว (CMC) ซึ่งมีความสำคัญในหลายงานวิจัย เช่น การควบคุมคุณภาพในอุตสาหกรรมอาหารและเภสัชกรรม (Rosen, 2012)

### ปัจจัยที่มีผลต่อแรงตึงผิว

ปัจจัยที่มีผลต่อแรงตึงผิวของของเหลวมีหลายประการ ซึ่งแต่ละปัจจัยมีผลต่อโครงสร้างและแรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลบนพื้นผิวของเหลว สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) อุณหภูมิ อุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้แรงตึงผิวลดลง เพราะการเพิ่มอุณหภูมิจะเพิ่มพลังงานจลน์ของโมเลกุล ทำให้โมเลกุลบนพื้นผิวมีความสามารถในการกระจายตัวและเคลื่อนที่มากขึ้น จึงทำให้แรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลบนพื้นผิวลดลง (Harkins, 1930)

2) ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในของเหลว สารลดแรงตึงผิวจะไปสะสมที่ผิวหน้าของของเหลวและลดแรงตึงผิวระหว่างโมเลกุลของของเหลว ส่งผลให้แรงตึงผิวลดลง (Damson, 1997)

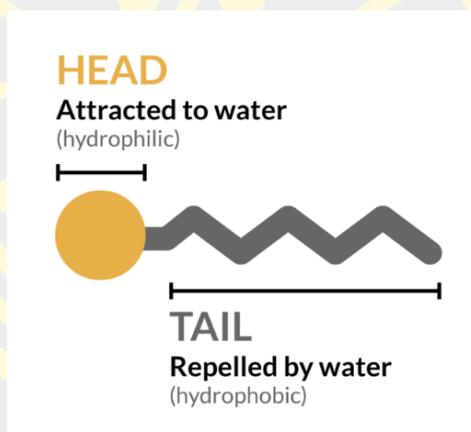
3) ชนิดของสารลดแรงตึงผิว สารลดแรงตึงผิวชนิดต่าง ๆ มีโครงสร้างโมเลกุลที่แตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อความสามารถในการลดแรงตึงผิว เช่น สารลดแรงตึงผิวชนิดไอออนิกและไม่มีไอออนิกมีผลที่แตกต่างกันตามลักษณะของประจุและการรวมตัวกัน (Rosen, 2004)

4) ความเข้มข้นของสารละลาย การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย (เช่น เกลือ) จะทำให้แรงตึงผิวเพิ่มขึ้น เนื่องจากไอออนของเกลือที่ละลายในสารละลายจะไปขัดขวางการสะสมตัวของสารลดแรงตึงผิวที่ผิวหน้าของของเหลว ทำให้สารลดแรงตึงผิวทำงานได้ยากขึ้น (Ninham, 1997)

5) ชนิดของตัวทำละลาย ของเหลวที่มีโครงสร้างโมเลกุลและพันธะระหว่างโมเลกุลที่ต่างกันจะมีแรงตึงผิวที่ต่างกัน เช่น น้ำมีแรงตึงผิวสูงเนื่องจากพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง ในขณะที่ตัวทำละลายอื่นที่ไม่มีพันธะไฮโดรเจนจะมีแรงตึงผิวต่ำกว่า (Israelachvili, 2011)

### สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (Surfactant) คือ สารที่ทำให้เกิดการดำเนินงานบนพื้นผิว (surface-active agent) โครงสร้างโมเลกุลมีสมบัติเป็นแอมฟิฟิลิก (amphiphilic) ประกอบด้วยโครงสร้างโมเลกุล 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic head) และส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic tail) อยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ดังแสดงในภาพที่ 4

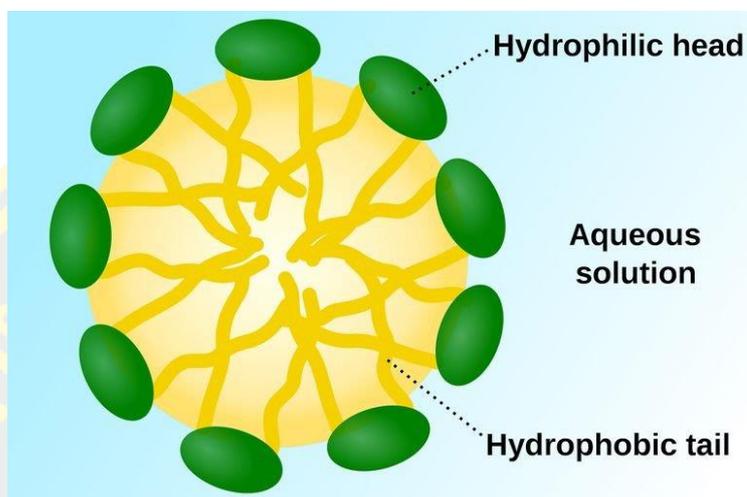


ภาพที่ 4 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิว

(Ahmed E., 2020)

หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวเริ่มจากการโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวดูดซับบนพื้นผิวหรือขอบเขตของสองเฟสที่ไม่ผสมกัน เช่น รอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ หรือระหว่างน้ำมันกับน้ำ เมื่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวอยู่ในน้ำ จะแทรกตัวเข้าไประหว่างโมเลกุลของของเหลว โดยจะจัดเรียงตัวให้ส่วนหัวที่ชอบน้ำหันเข้าหาของเหลวที่เป็นน้ำ และส่วนหางที่ไม่ชอบน้ำหันออกไปทางอากาศ น้ำมันหรือสิ่งสกปรกพวกไขมันที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ทำให้สิ่งสกปรกหลุดออกไปแขวนลอยอยู่ในน้ำ โมเลกุลของของเหลวสัมผัสกันน้อยลงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลลดลงและทำให้พื้นที่ผิวของของเหลวขยายตัวได้ง่ายขึ้น พลังงานอิสระพื้นผิว (surface free energy) และแรงตึงผิวลดลงตามไปด้วย การทำงานของสารลดแรงตึงผิวนี้ทำให้สารลดแรงตึงผิวถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น การทำความสะอาด (detergent) การทำให้เกิดอิมัลชัน (emulsification) การกระจาย

ตัวของอนุภาค (dispersion) และการปรับปรุงการแพร่กระจายบนพื้นผิว (wetting) เนื่องจากสามารถปรับเปลี่ยนสมบัติพื้นผิวระหว่างเฟสและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้อง (Rosen, 2012)



ภาพที่ 5 หลักการทำงานของสารลดแรงตึงผิวและการเกิดไมเซลล์  
(Afolabi et al., 2024)

#### บทบาทและการประยุกต์ใช้ของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทสำคัญในหลายอุตสาหกรรมและการประยุกต์ใช้งานที่หลากหลาย เนื่องจากความสามารถในการลดแรงตึงผิวและสร้างไมเซลล์ ซึ่งช่วยในการทำมาความสะอาด การกระจายตัวของสารไม่ละลายน้ำ และการปรับปรุงสมบัติของสารละลาย ตัวอย่างบทบาทและการประยุกต์ใช้สารลดแรงตึงผิวมีดังนี้

1) อุตสาหกรรมทำความสะอาด (Cleaning Industry) สารลดแรงตึงผิวมีความสามารถในการทำให้สิ่งสกปรกและน้ำมันที่ติดอยู่กับพื้นผิวหลุดออกได้ง่ายขึ้น โดยสร้างไมเซลล์ที่สามารถเก็บสิ่งสกปรกไว้ภายในและล้างออกด้วยน้ำ ทำให้สารลดแรงตึงผิวเป็นส่วนประกอบหลักในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น สบู่ แชมพู และผงซักฟอก (Rosen, 2004)

2) อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง (Cosmetic Industry) สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทสำคัญในการผลิตเครื่องสำอาง เช่น โลชั่น ครีม และผลิตภัณฑ์สำหรับผิวหน้า โดยช่วยเพิ่มการกระจายตัวของสารออกฤทธิ์ ทำให้เกิดเนื้อสัมผัสที่เนียนนุ่ม และทำให้สารที่ไม่ละลายน้ำสามารถกระจายตัวในสูตรเครื่องสำอางได้อย่างมีประสิทธิภาพ (McClements, 1999)

3) อุตสาหกรรมอาหาร (Food Industry) ในอุตสาหกรรมอาหาร สารลดแรงตึงผิวถูกใช้เพื่อสร้างอิมัลชัน (emulsion) เพื่อให้เกิดการกระจายตัวของไขมันในน้ำ ทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสและความเสถียร เช่น ในการผลิตมายองเนส ไอศกรีม และผลิตภัณฑ์นม (Dickinson, 1993)

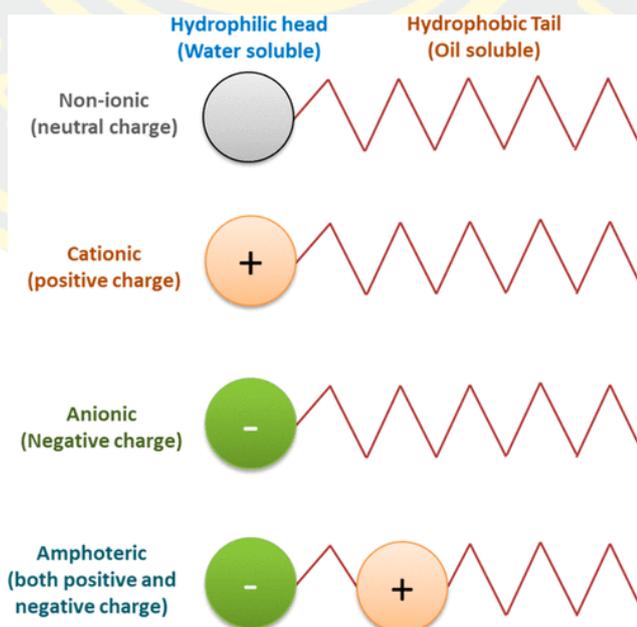
4) อุตสาหกรรมยาและชีวเภสัชกรรม (Pharmaceutical and Biopharmaceutical Industry) สารลดแรงตึงผิวถูกใช้เพื่อปรับปรุงการละลายและการดูดซึมของยาที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ และในกระบวนการผลิตวัคซีนหรือยาที่ต้องการความเสถียรสูง สารลดแรงตึงผิวชีวภาพ (biosurfactants) เช่น รามโนไลปิด (rhamnolipid) นิยมใช้ในกระบวนการนี้เนื่องจากมีความปลอดภัยและย่อยสลายได้ (Banat et al., 2000)

5. การบำบัดน้ำเสียและสิ่งแวดล้อม (Wastewater Treatment and Environmental Applications) สารลดแรงตึงผิวมีบทบาทในการช่วยย่อยสลายและกำจัดสารปนเปื้อน เช่น น้ำมันและโลหะหนักในแหล่งน้ำ สารลดแรงตึงผิวชีวภาพถูกนำมาใช้มากขึ้นเนื่องจากมีความปลอดภัยและสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ทำให้เป็นที่นิยมในการบำบัดน้ำเสียและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Desai & Banat, 1997)

6. การสกัดน้ำมันและปิโตรเลียม (Oil Recovery and Petroleum Industry) ในกระบวนการสกัดน้ำมันดิบและการทำความสะอาดท่อปิโตรเลียม สารลดแรงตึงผิวช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำกับน้ำมัน ทำให้สามารถสกัดน้ำมันออกจากแหล่งกักเก็บได้มากขึ้น รวมถึงช่วยทำความสะอาดท่อและอุปกรณ์ในอุตสาหกรรมนี้ (Zhou & Rhue, 2000)

### ประเภทของสารลดแรงตึงผิว

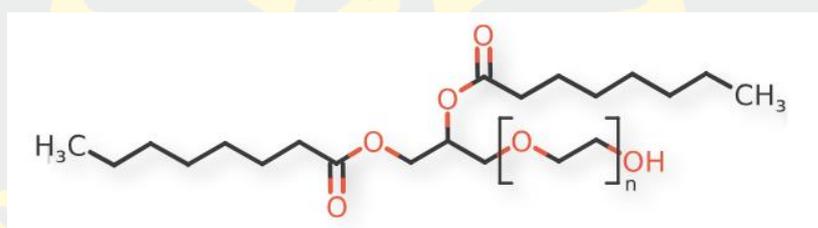
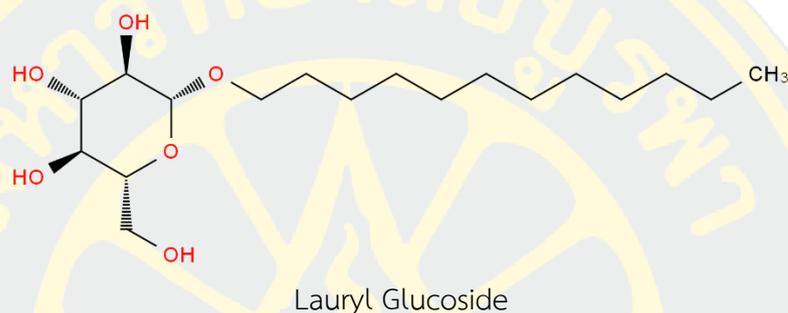
สารลดแรงตึงผิวสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภท ตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic group) ดังนี้



ภาพที่ 6 สารลดแรงตึงผิวแบ่งตามลักษณะหรือประจุของส่วนที่ชอบน้ำ

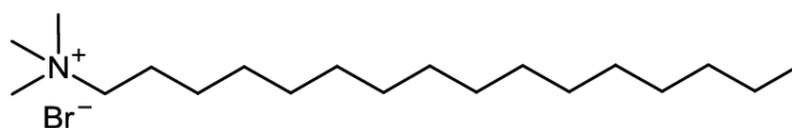
(Chowdhury et al., 2022)

1) สารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant) คือ สารในกลุ่มนี้มีแตกต่างกันไป ตั้งแต่ละลายน้ำไม่ได้ จนละลายน้ำได้ดีมาก สารกลุ่มนี้อ่อนโยนต่อผิวมาก แต่ไม่ให้ฟอง บางคนไม่ชอบ เพราะไม่มีฟอง ทำให้รู้สึกว่ามันไม่สะอาด จริงๆแล้ว การมีฟองหรือไม่มี ไม่ได้เกี่ยวกับการทำความสะอาด ซะล้างสิ่งสกปรกเลย มันจึงเป็นความเชื่อผิดๆที่ว่ายิ่งฟองเยอะยิ่งสะอาด การที่ฟองยิ่งเยอะจะทำให้ผิว ยิ่งระคายเคือง เช่น Lauryl Glucoside, PEG-6 Caprylic/Capric Glycerides เป็นต้น ซึ่งนิยมใช้ใน เจลล้างหน้าสูตรไม่มีฟอง และผลิตภัณฑ์กลุ่มล้างเครื่องสำอางต่าง ๆ ซึ่งแสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวดังภาพที่ 7

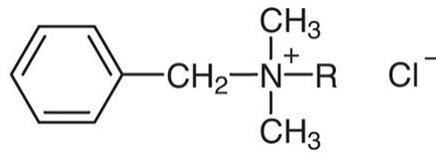


ภาพที่ 7 โครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวที่ไม่มีประจุ (Nonionic surfactant)

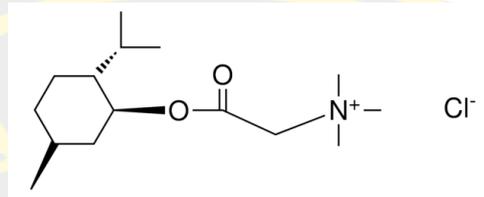
2) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุบวก (Cationic surfactant) สารกลุ่มนี้ไม่มีความสามารถในการทำความสะอาด และไม่มีฟอง แต่สามารถเกาะและเคลือบเส้นผมได้ดี จึงนิยมใช้ใน กลุ่มของ ครีมนวดผม หรือ น้ำยาปรับผ้านุ่ม เช่น Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB), Benzalkonium chloride, Polyquaternium, Alkyltrimethyl ammonium chloride ซึ่งแสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวดังภาพที่ 8



Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB)



Benzalkonium chloride



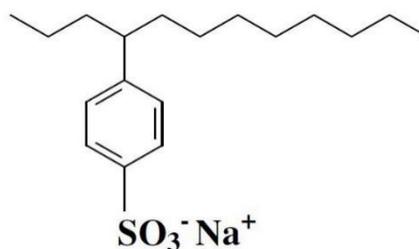
Alkyltrimethyl ammonium chloride

ภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวกลุ่มประจุบวก (Cationic Surfactant)

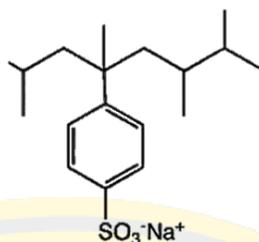
3) สารลดแรงตึงผิวที่มีประจุลบ (Anionic surfactant) เป็นสารพวกที่มีประจุลบอยู่ที่ส่วนของไฮโดรฟิลิก (Hydrophilic head group) สารลดแรงตึงผิวกลุ่มนี้ เนื่องจากมีราคาถูกและมีประสิทธิภาพในการทำงานได้ดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น จึงนิยมนำมาใช้อย่างกว้างขวาง ในงานซักล้างทำความสะอาด ช่วยชะล้างสิ่งสกปรกได้ดีมาก มีฟองมาก และละลายน้ำได้ดี แต่ค่อนข้างระคายเคืองผิว เช่น Sodium dodecyl sulfate (SDS), Branch alkyl benzene sulfonate (BAS) และ Linear alkyl benzene sulfonate (LAS) ซึ่งแสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวดังภาพที่ 9



Sodium dodecyl sulfate (SDS)



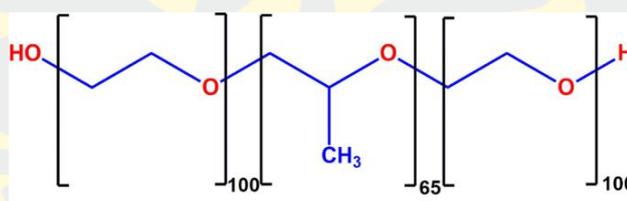
Linear alkyl benzene sulfonate (LAS)



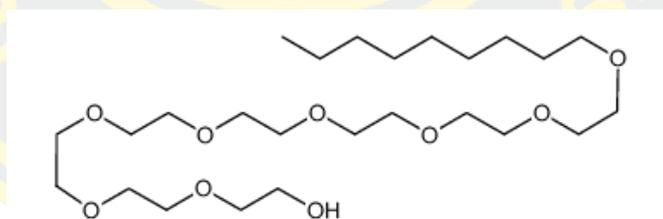
Branch alkyl benzene sulfonate (BAS)

ภาพที่ 9 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวกลุ่มประจุลบ (Anionic Surfactant)

4) สารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบ (Zwitterionic surfactant) เป็นสารทำความสะอาดกลุ่มน้ำมีคุณสมบัติทนต่อน้ำกระด้าง อ่อนโยนต่อผิว สามารถใช้ร่วมกับ SLS, SLES ได้ดี เมื่อใช้ร่วมกันสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อเนียนขึ้นได้ ให้ฟองนุ่มมาก แต่ทำความสะอาดได้ไม่ดีเท่า Anionic Surfactant จึงนิยมใช้ร่วมกัน ซึ่งแสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวดังภาพที่ 10



Pluronic F-127



Alcohol ethoxylates (AE)

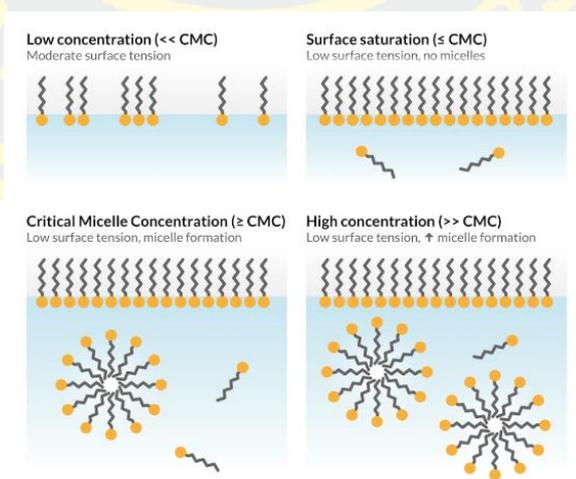
ภาพที่ 10 แสดงโครงสร้างของสารลดแรงตึงผิวกลุ่มไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant)

### ทฤษฎีการเกิดไมเซลล์

ไมเซลล์ (Micelle) คือโครงสร้างที่เกิดจากการรวมตัวกันของโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวแบบโมโนเมอร์ที่กระจายอยู่ในคอลลอยด์ของเหลว ซึ่งมีลักษณะเป็นกลุ่มโครงสร้างทรงกลมที่มีส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic tail) อยู่ภายในและส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic head) หันออกด้านนอกสู่สารละลายที่เป็นน้ำ โครงสร้างนี้ช่วยให้สารที่ไม่ละลายน้ำสามารถกักเก็บอยู่ภายในไมเซลล์และทำให้

ละลายในน้ำได้ง่ายขึ้น ไมเซลล์ทั่วไปมีโครงสร้างเป็นทรงกลมและประกอบด้วยโมโนเมอร์ประมาณ 50-100 โมเลกุลจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายถึงค่าที่เรียกว่า “ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์” (Critical Micelle Concentration, CMC) ซึ่งเป็นจุดที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายไม่สามารถสะสมบนผิวหน้าของสารละลายได้อีกเริ่มรวมตัวกันเป็นกลุ่มไมเซลล์ เพื่อสร้างสมดุลและลดพลังงานอิสระของระบบ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการเกิดไมเซลล์ได้แก่ ความยาวของสายไฮโดรโฟบิก สายที่ยาวขึ้นทำให้ไมเซลล์เกิดได้ง่ายขึ้น ชนิดของประจุของส่วนที่ชอบน้ำ สารลดแรงตึงผิวมีประจุสามารถเพิ่มการสร้างไมเซลล์ในสภาวะที่มีอิเล็กโทรไลต์สูง อุณหภูมิและแรงไอออน อุณหภูมิที่สูงและแรงไอออนที่สูงสามารถเพิ่มโอกาสในการเกิดไมเซลล์

การเกิดไมเซลล์ตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย ความเข้มข้นต่ำกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะกระจายตัวที่พื้นผิวของสารละลาย ทำให้แรงตึงผิวลดลงในระดับปานกลางแต่ยังไม่เกิดการสร้างไมเซลล์ ที่ความเข้มข้นใกล้ถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์พื้นผิวจะอึดตัวด้วยสารลดแรงตึงผิว แรงตึงผิวลดลงไปถึงระดับต่ำสุดแต่ยังไม่มีการเกิดไมเซลล์ เมื่อความเข้มข้นถึงหรือเกินความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์จะเริ่มมีการก่อตัวของไมเซลล์ในสารละลาย ในขณะที่เดียวกันแรงตึงผิวจะคงที่เนื่องจากพื้นผิวอึดตัวและสารลดแรงตึงผิวที่เหลือจะรวมตัวเป็นไมเซลล์ในสารละลาย และเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงกว่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์มาก จะมีการสร้างไมเซลล์ในสารละลายเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่แรงตึงผิวที่พื้นผิวยังคงอยู่ในระดับต่ำเหมือนเดิม เนื่องจากโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่เกินมาจะเข้าไปสร้างไมเซลล์ในสารละลายแทน ดังภาพที่ 11 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการที่สำคัญในการเกิดไมเซลล์ และความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว



ภาพที่ 11 การเปลี่ยนแปลงของสารลดแรงตึงผิวและการเกิดไมเซลล์ตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย

(Ahmed E., 2020)

## ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (CMC) คือความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวในสารละลายที่เริ่มมีการก่อตัวของไมเซลล์ขึ้น โดยก่อนถึงจุดความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะอยู่ในรูปของโมเลกุลอิสระและมักกระจายตัวอยู่ที่ผิวสัมผัส เช่น ผิวระหว่างน้ำกับอากาศเพื่อช่วยลดแรงตึงผิว เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวถึงความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่เติมเพิ่มเข้าไปจะเริ่มรวมตัวกันในสารละลายเป็นโครงสร้างไมเซลล์ โครงสร้างนี้ช่วยลดพลังงานอิสระของระบบและทำให้หางที่ไม่ชอบน้ำหลีกเลี่ยงการสัมผัสกับน้ำ ทั้งนี้สารลดแรงตึงผิวแต่ละชนิดจะมีความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์เฉพาะสารนั้นๆ ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์เป็นจุดเปลี่ยนสำคัญที่ส่งผลให้คุณสมบัติต่าง ๆ ของสารละลาย เช่น แรงตึงผิว การนำไฟฟ้า และการกระเจิงแสง เปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน

### ความสำคัญของค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์มีความสำคัญอย่างยิ่งในการใช้งานและอุตสาหกรรมหลายด้าน เนื่องจากค่าความเข้มข้นนี้เป็นจุดที่สารลดแรงตึงผิวในสารละลายเริ่มก่อตัวเป็นไมเซลล์ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการต่าง ๆ ดังนี้

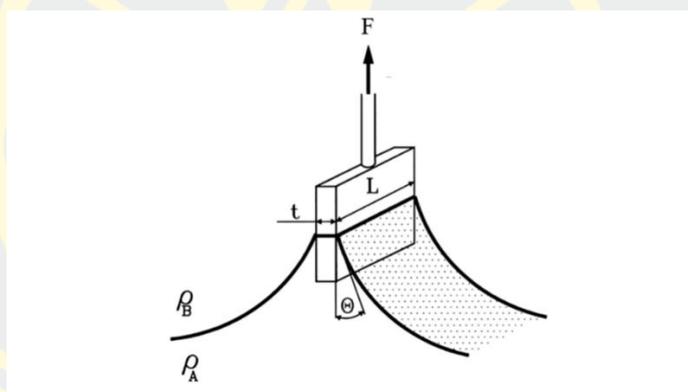
- 1) การควบคุมปริมาณสารลดแรงตึงผิว ช่วยให้สามารถใช้สารลดแรงตึงผิวในปริมาณที่เพียงพอสำหรับการลดแรงตึงผิวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่ต้องเพิ่มปริมาณสารเกินความจำเป็น ซึ่งช่วยประหยัดทรัพยากรและลดต้นทุนในกระบวนการผลิต (Rosen & Kunjappu, 2012)
- 2) การออกแบบผลิตภัณฑ์ซักฟอกและทำความสะอาด ในอุตสาหกรรมซักฟอก การเลือกความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวให้เหมาะสมกับค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดคราบสกปรก เนื่องจากไมเซลล์ที่เกิดขึ้นจะสามารถจับคราบมันและสารที่ไม่ละลายน้ำได้ดีขึ้น (Myers, 2006)
- 3) การนำส่งยาในอุตสาหกรรมเภสัชภัณฑ์ ในการพัฒนายา มีความสำคัญต่อการสร้างไมเซลล์ที่สามารถห่อหุ้มตัวยาสำคัญและนำส่งยาไปยังเป้าหมาย ทำให้ตัวยามีการละลายและการดูดซึมที่ดีขึ้น เพิ่มประสิทธิภาพในการรักษา (Lawrence & Rees, 2012)
- 4) การผลิตอิมัลชันในอุตสาหกรรมอาหาร มีความสำคัญในการสร้างอิมัลชันที่เสถียร ช่วยกระจายไขมันในน้ำให้คงตัว เหมาะสำหรับผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความคงตัวของอิมัลชัน เช่น มายองเนส และไอศกรีม (McClements, 2005)
- 5) การปกป้องสิ่งแวดล้อม ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ถูกนำมาใช้ในการกำจัดสารพิษในสิ่งแวดล้อม โดยไมเซลล์สามารถห่อหุ้มและละลายสารพิษที่ไม่ละลายน้ำได้ ทำให้สามารถขจัดออกจากน้ำหรือดินได้ดีขึ้น (Jardine & Rasmussen, 2010)

6) การสกัดน้ำมันในอุตสาหกรรมน้ำมันและปิโตรเลียม การใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์เหมาะสมในอุตสาหกรรมน้ำมัน ช่วยให้สามารถสกัดน้ำมันจากชั้นหินได้ดีขึ้น โดยไมเซลล์จะช่วยลดแรงตึงผิวระหว่างน้ำมันและหิน ทำให้น้ำมันเคลื่อนที่ออกจากชั้นหินได้ง่ายขึ้น (Sjoblom et al., 2013)

## วิธีการหาค่าแรงตึงผิวของเหลว

### วิธีแบบแผ่นของวิลเฮลมี (Wilhelmy plate method)

เป็นเทคนิคที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในการวัดแรงตึงผิว ในวิธีนี้จะใช้แผ่นบางมักทำจากแพลทินัม จุ่มบางส่วนลงในของเหลวโดยที่แผ่นโลหะถูกเชื่อมติดอยู่กับคานซึ่งถ่วงน้ำหนักไว้ด้วยวัตถุ อีกด้านหนึ่งของคาน จากนั้นให้ปรับสมดุลของคานโดยการเพิ่มน้ำหนักของวัตถุที่ใช้ถ่วงเรื่อย ๆ จนกระทั่งแผ่นโลหะหลุดออกจากพื้นผิวหรือรอยต่อระหว่างเฟส แสดงในภาพที่ 12 (Korenko & Šimko, 2010)



ภาพที่ 12 วิธีการหาแรงตึงผิวโดยแผ่นของวิลเฮลมี

(Korenko & Šimko, 2010)

การวัดแรง ( $F$ ) ที่กระทำในแนวตั้งต่อแผ่นโลหะ โดยใช้ไมโครบาลานซ์ แรงที่กระทำต่อแผ่นจะเท่ากับน้ำหนักของของเหลวที่ยกขึ้นเหนือพื้นผิวแนวนอน เมื่อวัดแรงนี้แล้วสามารถคำนวณแรงตึงผิวระหว่างเฟสได้โดยใช้สมการ 3 แสดงสมการที่ใช้ในการคำนวณแรงตึงผิวระหว่างผิวสัมผัสของเหลว มีสองสมการหลักที่ใช้คำนวณแรงตึงผิวระหว่างของเหลว ดังนี้

$$\gamma = \frac{F}{p \cos \theta} \quad (3)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ แรงตึงผิวของของเหลว มีหน่วยเป็น N/m

$F$  คือ แรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงแผ่นออกจากผิวสัมผัส มีหน่วยเป็น N

$p$  คือ เส้นรอบวงของเส้นสัมผัสระหว่างแผ่นและของเหลว

$\theta$  คือ มุมสัมผัสระหว่างของเหลวกับแผ่นโลหะบาง

จากสมการที่ 3 เมื่อ  $p$  คือเส้นรอบวงของแผ่น ซึ่งเท่ากับสองเท่าของผลรวมระหว่างความกว้าง ( $L$ ) และความหนา ( $t$ ) ของแผ่น ไม่จำเป็นต้องทราบความหนาแน่นของของเหลว การเป็ยกที่ดีของของเหลวทดสอบกับแผ่น ( $\cos\theta=1$ ) สมการนี้ใช้ในการคำนวณแรงตึงผิวในโหมตการแยกตัวออกโดยการวัดแรงสูงสุดที่ใช้ในการดึงแผ่นออกจากผิวสัมผัสของของเหลว ดังสมการต่อไปนี้

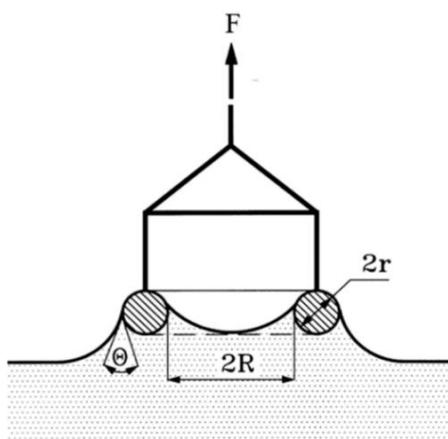
$$\gamma = \frac{W_{\text{tot}} - (W_{\text{plate}} - Lthg\rho_A)}{2(L+t)\cos\theta} \quad (4)$$

โดยที่	$\gamma$	คือ แรงตึงผิวของของเหลว มีหน่วยเป็น N/m
	$W_{\text{tot}}$	คือ น้ำหนัก (หรือแรงที่กระทำ) ของแผ่นที่ถูกแขวนบางส่วนในของเหลว มีหน่วยเป็น N
	$W_{\text{plate}}$	คือ น้ำหนักของแผ่นเมื่อแขวนอยู่ในของเหลว B มีหน่วยเป็น N
	$L$	คือ ความกว้างของแผ่น มีหน่วยเป็น m
	$t$	คือ ความหนาของแผ่น มีหน่วยเป็น m
	$h$	คือ ความลึกในการจุ่มแผ่นลงไปของเหลว มีหน่วยเป็น m
	$g$	คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีหน่วยเป็น $m/s^2$
	$\rho_A$	คือ ความหนาแน่นของของเหลว A มีหน่วยเป็น $kg/m^3$

ข้อได้เปรียบของวิธีการวัดวิธีแบบแผ่นของวิลเฮล์ม วัดแรงตึงผิวแบบต่อเนื่องได้เหมาะสำหรับการวัดแรงตึงผิวแบบ real-time และมีความแม่นยำสูงในกรณีของเหลวที่มีความหนืดต่ำถึงปานกลาง ใช้ได้กับของเหลวหลายประเภท เหมาะกับการวัดของเหลวที่เป็นเนื้อเดียวกัน เช่น น้ำ ข้อจำกัดของวิธีการวัดวิธีแบบแผ่นของวิลเฮล์ม ต้องการปริมาณของเหลวมาก เนื่องจากต้องให้แผ่นสัมผัสของเหลวอย่างเต็มที่ อาจเกิดข้อผิดพลาดในกรณีที่วางตำแหน่งแผ่นไม่ถูกต้อง ความแม่นยำในการตั้งค่าเป็นปัจจัยสำคัญต้องใช้อุปกรณ์ที่มีความแม่นยำสูงมีราคาแพง (Richter & Vollhardt, 2006)

#### วิธีแบบวงแหวนของดูนอยด์ (Du nouy Ring method)

การวัดค่าแรงตึงผิวด้วยวิธีแบบวงแหวนของดูนอยด์ ค้นคิดโดย Lecomte Du Nouy ในปี 1919 เป็นวิธีที่ใช้ในการวัดทั้งแรงตึงผิวและแรงตึงผิวระหว่างผิวหน้าของของเหลว ทำได้โดยนำวงแหวนที่ทำจากโลหะผสมระหว่างแพลทินัมและอริเดียมจุ่มในของเหลวที่ต้องการวัดแรงตึงผิวในระดับที่ต่ำกว่าพื้นผิวเล็กน้อย โดยวงแหวนถูกเชื่อมติดอยู่กับรอกหมุนที่สามารถดึงวงแหวนขึ้นได้และอ่านค่าแรงตึงจากหน้าปัดได้ โดยสามารถคำนวณแรงตึงผิวได้โดยพิจารณาแรงที่เกี่ยวข้องในการที่วงแหวนจะหลุดออกจากพื้นผิวหน้าของของเหลวได้จะต้องเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลวได้ในการที่วงแหวนจะหลุดออกจากพื้นผิวหน้าของของเหลวได้จะต้องเอาชนะแรงตึงผิวของของเหลวได้ดังภาพที่ 13 แสดงให้เห็นช่วงขณะที่วงแหวนกำลังจะหลุดออกจากผิวหน้า



ภาพที่ 13 วงแหวนคูนอยส์ที่แสดงสมบัติของวงแหวนและการกระทำของ F กับวงแหวนในระหว่างการวัดในโหมดการแยกตัว

(Korenko & Šimko, 2010)

แรงที่เกี่ยวข้องมีทั้งแรงในทิศทางขึ้นและแรงในทิศทางลง โดยแรงในทิศทางขึ้นคือแรงที่ใช้ดึงวงแหวนขึ้น (F) สามารถอ่านได้จากหน้าปัดของเครื่องมือ ส่วนแรงในทิศทางขีกลง ณ จุดใดๆ บนเส้นรอบวงของวงแหวน มีค่าเท่ากับแรงตึงผิว ( $\gamma$ ) คำนวณได้จากเส้นรอบวง  $p$  ของเส้นสัมผัสสามเฟสจะเท่ากับสองเท่าของเส้นรอบวงของแหวน  $p=4\pi(R+r)$  ดังสมการ

$$\gamma = \frac{F}{4\pi(R+r)} \quad (5)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ แรงตึงผิวของของเหลว มีหน่วยเป็น N/m

F คือ แรงที่ใช้ดึงวงแหวนหลุดออกจากพื้นผิว มีหน่วยเป็น N

$\pi$  คือ เส้นรอบวงของวงแหวน

R คือ รัศมีรอบนอกของแหวน มีหน่วยเป็น m

r คือ รัศมีรอบในของแหวน มีหน่วยเป็น m

การวัดที่แม่นยำสูงโดยวิธีแบบวงแหวนของคูนอยด์ต้องให้แน่ใจว่าแนวระนาบของแหวนยังคงขนานกับผิวสัมผัส ข้อผิดพลาดหลักในเทคนิคนี้มาจากการเสียรูปของแหวนซึ่งเป็นโพรบที่ขอบบางและอาจเสียรูปได้ง่ายระหว่างการจับและการทำความสะอาด นอกจากนี้ยังสำคัญที่จะต้องรักษาการเปียกที่สมบูรณ์ของผิวแหวนโดยของเหลวที่มีความหนาแน่นมากกว่า ( $\theta = 0$ ) หากไม่ได้รับการเปียกที่สมบูรณ์จะต้องมีการแก้ไขการอ่านค่าเพิ่มเติม ในกรณีของการวัดพิเศษที่ต้องใช้แหวนที่ทำเอง ควรหลีกเลี่ยงแหวนขนาดใหญ่เพื่อหลีกเลี่ยงค่าปัจจัยการแก้ไขที่ต่ำ

ข้อได้เปรียบเป็นวิธีมาตรฐานและใช้งานง่าย ใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไปมานาน และสามารถวัดแรงตึงผิวได้อย่างแม่นยำเหมาะสมกับของเหลวที่มีแรงตึงผิวต่ำ เช่น แอลกอฮอล์และน้ำมัน ข้อจำกัดการวัดค่าแรงตึงผิวด้วยวิธีวงแหวนของคูนอยต์ต้องใช้ปริมาณตัวอย่างมาก เนื่องจากต้องให้วงแหวนสัมผัสของเหลวอย่างเต็มที่ความไม่แม่นยำในกรณีของเหลวที่มีแรงตึงผิวสูงมาก ต้องใช้การแก้ไขค่าเพิ่มเติม ซึ่งอาจทำให้เกิดข้อผิดพลาดได้ง่ายเหมาะสมกับวัดสารบริสุทธิ์ เนื่องจากการวัดสารละลายที่มีสารลดแรงตึงผิวการกระจายบนผิวของเหลวอาจจะไม่เท่ากัน ถ้าพื้นผิวใหม่ถูกสร้างขึ้นขณะทำการวัดค่าแรงตึงผิว เช่น เมื่อวงแหวนยกตัวขึ้นทำให้ไม่รู้พื้นผิวอย่างแน่นอน และค่าแรงตึงผิวที่วัดได้ก็เปลี่ยนไป

### วิธีหยดของเหลว (Pendant Drop method)

การวัดแรงตึงผิวโดยวิธีหยดของเหลวมุ่งเน้นการใช้รูปร่างของหยดของเหลวที่แขวนอยู่จากเข็มในการวัดแรงตึงระหว่างผิวหรือแรงตึงผิวของของเหลว เมื่อหยดอยู่ในสภาวะสมดุลรูปร่างของหยดจะถูกกำหนดโดยสมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงที่ดึงของเหลวลงด้านล่างและแรงตึงระหว่างผิวที่ช่วยยึดรูปร่างของหยดไว้ ความสมดุลนี้อธิบายโดยสมการ Young-Laplace ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของความดันที่ผ่านผิวหยดกับความโค้งของผิวและแรงตึงระหว่างผิว ซึ่งการวัดแรงตึงผิวโดยวิธีหยดของเหลวมีการปรับประยุกต์ในการคำนวณเพื่อความสะดวกในการวัดได้หลายรูปแบบ ดังนี้

#### 1) สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสามมิติ

สมการ Young-Laplace แบบดั้งเดิมใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความแตกต่างของแรงดันที่เกิดขึ้นบนผิวระหว่างสองเฟส (เช่น น้ำ-อากาศ หรือ น้ำมัน-น้ำ) และความโค้งของผิวของของเหลว สมการมีรูปแบบดังนี้ (Miller, 2008)

$$\Delta P = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (6)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ แรงตึงผิวของของเหลว มีหน่วยเป็น N/m

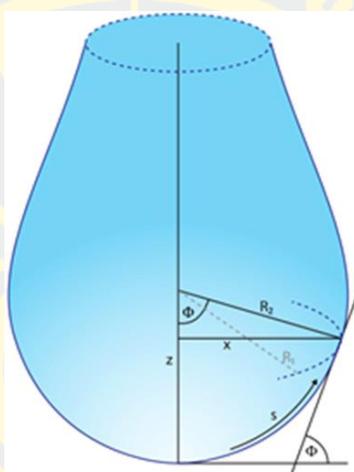
$\Delta P$  คือความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกของหยด มีหน่วยเป็น N/m<sup>2</sup>

$R_1$  และ  $R_2$  คือรัศมีของความโค้งในสองทิศทางหลักที่ตั้งฉากกันบนผิวของหยด มีหน่วยเป็น m

สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสามมิติ การวัดรัศมีความโค้ง ( $R_1, R_2$ ) ต้องใช้เครื่องมือและวิธีที่มีความละเอียดสูง เพราะค่าที่ผิดพลาดจะส่งผลกระทบต่อผลลัพธ์ของแรงตึงผิว

## 2) สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสองมิติโดยใช้ Bond Number

ในปี 1883 นักวิจัย Bashforth และ Adams ได้ทำการคำนวณและสร้างตารางโปรไฟล์ (Profile Tables) ของหยดโดยใช้สมการ Young-Laplace เพื่ออธิบายรูปร่างของหยดที่แขวนอยู่จากเข็มหรือปลายท่อ ตารางนี้จะบันทึกโปรไฟล์หยดตาม Bond Number และสามารถใช้เทียบกับรูปร่างของหยดในการทดลองจริงได้ สมการนี้ใช้ในการคำนวณ Bond number ซึ่งเป็นปริมาณไร้มิติที่แสดงถึงอัตราส่วนของแรงโน้มถ่วงต่อแรงตึงผิวเป็นตัวบ่งชี้ถึงผลกระทบของแรงโน้มถ่วงต่อรูปร่างของหยดของเหลว (Bashforth, 1883)



ภาพที่ 14 หยดของเหลวที่ห้อยอยู่ได้เข็มในสภาวะที่มีแรงโน้มถ่วงทำให้เกิดรูปทรงหยดน้ำ (Ahmed, 2022)

จากภาพที่ 14 ภาพแสดงตัวแปรที่เกี่ยวข้องซึ่งถูกใช้ในกระบวนการคำนวณเพื่อหาค่า Bond number และตั้งนั้นจึงใช้ในการหาค่าแรงตึงผิวระหว่างเฟส ซึ่งสามารถคำนวณได้ ดังสมการ (Drelich, 2002)

$$\Delta P = \Delta P_0 - \Delta \rho g z = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (7)$$

โดยที่

$R_1$  และ  $R_2$  เป็นรัศมีของความโค้งหลักสองตัว

$\Delta P = P_{in} - P_{out}$  คือความดัน Laplace ที่เกิดขึ้นบนอินเตอร์เฟซ

$\Delta \rho = \rho_d - \rho$  คือ ความหนาแน่นของเฟสที่เป็นของเหลว - ความหนาแน่นของเฟสที่เป็นก๊าซ มีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$

สมการนี้ยังสามารถเขียนใหม่ในรูปของความดันอ้างอิง  $\Delta P_0$  เมื่อ  $z = 0$  และความดันไฮโดรสแตติก  $\Delta p_{gz}$  โดยอาศัยความสัมพันธ์ของแกน สมการนี้จึงสามารถแสดงในพิกัดทรงกระบอก ( $r$  และ  $z$ ) ร่วมกับมุมสัมผัส  $\theta$  ดังแสดงในภาพที่ 14 ทำให้สมการ Young-Laplace สามารถจัดรูปเป็นชุดของสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่มีมิติที่ขึ้นอยู่กับความยาวส่วนโค้ง  $s$  วัดจากยอดของหยดน้ำ  $\Delta P$

$$\frac{d\theta}{ds} = 2-B_0\bar{z} - \frac{\sin\theta}{r} \quad (8)$$

$$\frac{d\bar{r}}{ds} = \cos\theta \quad (9)$$

$$\frac{d\bar{z}}{ds} = \sin\theta \quad (10)$$

การใช้สมการ Young-Laplace ในการวิเคราะห์หยดของเหลวเพื่อหาแรงตึงผิวระหว่างเฟส โดยใช้ปริมาณไร้มิติที่เรียกว่า Bond number ( $B_0$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11

$$\gamma = \frac{\Delta p g R_0^2}{B_0} \quad (11)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ ความตึงผิวของเหลว มีหน่วยเป็น N/m

$B_0$  คือ Bond number แสดงถึงอัตราส่วนของแรงโน้มถ่วงต่อแรงตึงผิว

$\Delta p$  คือ ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่างเฟส มีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$

$g$  คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก มีค่าเป็น  $9.81 \text{ m/s}^2$

$R_0$  คือ รัศมีของความโค้งที่ยอดของหยดน้ำ มีหน่วยเป็น m

จากนั้นจึงกล่าวถึงเงื่อนไขขอบเขต (boundary conditions) ที่สัมพันธ์กับสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่มีมิติที่ใช้ในการคำนวณ ซึ่งระบุว่าที่จุดยอดของหยด ( $s=0$ ) มีเงื่อนไขดังนี้

$$\bar{r}=0, \bar{z}=0, \theta=0 \text{ ที่ } \bar{s}=0 \quad (12)$$

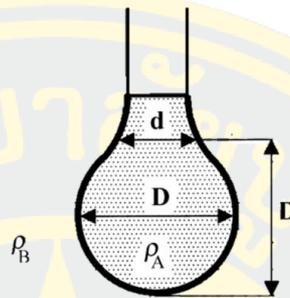
รูปทรงของหยดน้ำขึ้นอยู่กับ Bond number ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 11 หากทราบ Bond number ของหยดน้ำพร้อมกับรัศมี  $R_0$  ที่ยอดหยดน้ำ แรงตึงผิวระหว่างเฟส ( $\gamma$ ) สามารถคำนวณได้

การใช้สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสองมิติโดยใช้ Bond Number มีความแม่นยำสูงในระบบที่ Bond Number อยู่ในช่วงที่ตารางครอบคลุม มีความแม่นยำสูงในเชิงคณิตศาสตร์ มักใช้ในการพัฒนาวิธีการคำนวณในโปรแกรมคอมพิวเตอร์

### 3) สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสองมิติใช้ค่าคงที่เชิงประจักษ์

การคำนวณแรงตึงผิวในวิธี Pendant Drop method พัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยดั้งเดิมของ Bashforth และ Adams (1883) ที่สร้างตารางโปรไฟล์ของหยดเพื่อใช้วัดแรงตึงผิวในระบบของเหลว การใช้ค่าคงที่เชิงประจักษ์เพื่อคำนวณแรงตึงผิว และการใช้อัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลาง  $d$

และ  $D$  นั้นเป็นการพัฒนาโดย Andreas (1938) ทำให้กระบวนการคำนวณแรงตึงผิวง่ายและรวดเร็วขึ้นโดยใช้ค่าประจักษ์และสมการเชิงประจักษ์ การคำนวณแรงตึงผิวต้องใช้ข้อมูลของเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดที่ตำแหน่งต่าง ๆ และความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยรูปทรง  $S$  กับค่าคงที่  $B_i$  ที่ใช้ในการคำนวณค่า  $H$



ภาพที่ 15 ภาพหยดของเหลว  
(Ahmed, 2022)

สมการ Young-Laplace ที่มีการปรับเพื่อสามารถคำนวณได้ผ่านการวิเคราะห์รูปทรงของผิวโค้งหรือโดยการแก้สมการเชิงตัวเลข ดังนี้

$$\gamma = \frac{\Delta \rho g D^2}{H} \quad (13)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ ความตึงผิวของเหลว มีหน่วยเป็น N/m

$\Delta \rho$  คือ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างของเหลวและอากาศ

( $\Delta \rho = \rho_{\text{ภายในหยด}} - \rho_{\text{ของเหลวโดยรอบ}}$ ) มีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$

$g$  คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น  $\text{m/s}^2$

$D$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุดของหยดของเหลว มีหน่วยเป็น m

$H$  คือ ปัจจัยที่ขึ้นกับตัวแปรรูปทรง  $S = \frac{d}{D}$

โดยที่  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของหยด ณ ระยะห่าง  $D$  จากจุดบนสุดของหยด พารามิเตอร์  $H$  ขึ้นอยู่กับรูปร่างของหยดและค่าของ shape factor  $S$  ซึ่งค่า  $H$  นี้จะต้องถูกคำนวณจากตารางค่าหรือสมการเชิงประจักษ์ที่สอดคล้องกับค่าของ  $S$  ที่ได้จากการวัด

ค่าของ  $\frac{1}{H}$  สามารถหาค่าได้จากความสัมพันธ์เชิงประจักษ์ที่แสดงโดยสมการ

$$\frac{1}{H} = B_4 S^4 + B_3 S^3 - B_2 S^2 + B_1 S - B_0 \quad (14)$$

โดยที่  $B_0, B_1, B_2, B_3, B_4$  และ  $a$  เป็นค่าคงที่เชิงประจักษ์ที่ใช้ในการคำนวณตามช่วงค่าของปัจจัยรูปทรง  $S$  ตามตารางที่กำหนด การวัดรูปร่างของหยดต้องแม่นยำการถ่ายภาพหยดและการวิเคราะห์ภาพเป็นวิธีที่ใช้ในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลาง  $D$  และ  $d$  และต้องควบคุมปัจจัยภายนอก เช่น

อุณหภูมิ ความสะอาดของอุปกรณ์ และความเสถียรของหยด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่แม่นยำ การใช้สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสองมิติใช้ค่าคงที่เชิงประจักษ์ เหมาะกับการคำนวณที่ต้องการความแม่นยำสูง โดยใช้ค่าประจักษ์จากการทดลองและตารางที่มีการกำหนดไว้ ทำให้ได้ค่าที่แม่นยำและเชื่อถือได้ ใช้การคำนวณเชิงตัวเลขและสร้าง เพื่อเปรียบเทียบกับรูปร่างหยดในสถานการณ์จริง มีความยุ่งยากเนื่องจากต้องวัดรูปร่างหยดในหลายจุดและเปรียบเทียบกับตารางโปรไฟล์

4) สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสองมิติตัวแปรการประมาณค่า โดยใช้สมการแบบง่าย

$$\gamma = \frac{\Delta \rho g D_E^2}{H} \quad (15)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ ความตึงผิวของเหลว มีหน่วยเป็น N/m

$\Delta \rho$  คือ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างของเหลวและอากาศ

( $\Delta \rho = \rho$  ภายในหยด -  $\rho$  ของเหลวโดยรอบ) มีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$

$g$  คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น  $\text{m/s}^2$

$D_E$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุดของหยดของเหลว มีหน่วยเป็น m

ฟังก์ชัน  $\frac{1}{H} = f\left(\frac{D_S}{D_E}\right)$  แสดงถึงความสัมพันธ์แบบไร้มิติที่ค้ำึงถึงรูปร่างของหยดน้ำภายใต้แรงโน้มถ่วง โดยที่  $D_S$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ระยะทางหนึ่งจากจุดล่างสุดของหยดน้ำ ฟังก์ชันนี้ช่วยปรับค่าเพื่อแก้ไขการเสียรูปที่เกิดจากแรงโน้มถ่วง เนื่องจากหยดน้ำจะมีรูปร่างเป็นทรงกลมถ้าไม่มีผลของแรงโน้มถ่วง เป็นที่ทราบกันโดยทั่วไปว่า  $\frac{1}{H}$  สามารถประมาณได้ด้วยสูตรเชิงวิเคราะห์ดังนี้

$$\frac{1}{H} = a \left(\frac{D_S}{D_E}\right)^b \quad (16)$$

ค่าคงที่  $a$  และ  $b$  ในการคำนวณความตึงผิวโดยใช้วิธีหยดน้ำที่ห้อยอยู่ ได้มาจากการประมาณเชิงประจักษ์ที่ได้จากการทดลองและวิเคราะห์เชิงตัวเลข ซึ่งทำให้สามารถกำหนดรูปร่างของหยดน้ำที่ถูกยึดออกจากแรงโน้มถ่วงได้อย่างแม่นยำ ค่าของ  $a \approx 0.345$  และ  $b \approx -2.5$  มาจากการศึกษาทางทฤษฎีและการวัดค่าในเอกสารวิชาการต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการวัดความตึงผิวด้วยเทคนิคหยดของเหลว

การใช้สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสองมิติตัวแปรการประมาณค่า โดยใช้สมการแบบง่าย เหมาะกับการคำนวณที่ต้องการความรวดเร็วและสะดวก โดยใช้สมการแบบง่ายและค่าคงที่ที่สามารถประมาณได้จากการทดลอง

### 5) สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสองมิติโดยใช้สมการความโค้งของของเหลว

การพัฒนาด้านการเก็บข้อมูลและการวิเคราะห์ภาพทำให้วิธีหยดของเหลวมีความแม่นยำและรวดเร็วยิ่งขึ้น ภาพของหยดน้ำที่แขวนจะถูกแปลงเป็นดิจิทัลและวิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์เพื่อหาค่าความตึงผิวของของเหลว ในการศึกษาซอฟต์แวร์ ImageJ จะถูกใช้ในการวิเคราะห์ภาพที่ถ่ายจากหยดน้ำ โดยใช้ปลั๊กอินชื่อ Pendent Drop ซึ่งพัฒนาโดย A. Daerr et al. (2016) เพื่อตรวจวัดความตึงผิวตามโปรไฟล์ของภาพ การตั้งค่ามาตรฐานสำหรับวิธีหยดน้ำแขวนโดยใช้ซอฟต์แวร์

สมการ Young-Laplace แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิว ความโค้งเฉลี่ยของผิว ( $\bar{\kappa}$ ) และความแตกต่างของความดัน ( $\Delta p$ )

$$\Delta p = \gamma \bar{\kappa} \quad (17)$$

โดยที่  $\Delta p$  คือ ความแตกต่างของความดันระหว่างภายในและภายนอกหยดน้ำ มีหน่วยเป็น ( $N/m^2$ )

$\bar{\kappa}$  คือ ความโค้งเฉลี่ยของผิวหยดน้ำ

$\gamma$  คือ ความตึงผิวของเหลว มีหน่วยเป็น  $N/m$

ในการวิเคราะห์หยดของเหลวที่ห้อยอยู่ แรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิวทำให้รูปทรงของหยดสมดุลกับความแตกต่างของความดันในของเหลว โดยความดันที่ความสูง  $z$  สามารถเขียนได้ว่า

$$\Delta p(z) = \Delta p_0 - \Delta \rho g z \quad (18)$$

โดยที่  $\Delta p$  คือ ค่าความดันที่ปลายหยด (tip pressure) มีหน่วยเป็น ( $N/m^2$ )

$\Delta \rho$  คือ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างของเหลวและอากาศ มีหน่วยเป็น  $kg/m^3$

$g$  คือ ความเร่งโน้มถ่วงของโลก มีหน่วยเป็น  $m/s^2$

$z$  คือ พิกัดแนวตั้งที่ใช้ในการคำนวณความดันในหยดของเหลว

จากนั้น สมการนี้ถูกนำมาพัฒนาต่อในรูปแบบพารามิเตอร์ของพื้นผิวของหยด ( $R(s), Z(s)$ )

โดยใช้ระยะทางโค้ง  $s$  และมุม  $\psi$  ระหว่างพื้นผิวกับแกนนอน สมการที่ได้โดย

$$-\frac{1}{l_c^2} \sin \psi = \frac{d}{ds} \left( \frac{d\psi}{ds} + \frac{\sin \psi}{R} \right) \quad (19)$$

โดยที่  $l_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\Delta \rho g}}$  เรียกว่า ความยาวแคปิลลารี (capillary length) ซึ่งสัมพันธ์กับความตึงผิว  $\gamma$

$s$  คือ ระยะตามเส้นโค้งจากปลายหยด มีหน่วยเป็น  $m$

$\psi$  คือ มุมระหว่างระนาบสัมผัสกับพื้นผิวและแนวนอน

R คือ รัศมีของพื้นผิวในแนวตั้งฉากกับเส้นสัมผัส

ในเชิงปฏิบัติ รูปทรงของหยดถูกนำมาคำนวณด้วยการปรับพารามิเตอร์ เช่น ความโค้งที่ปลายหยด ( $r_0$ ) และตำแหน่งเริ่มต้น เพื่อให้ค่าที่ได้จากสมการเข้ากันได้ดีกับภาพถ่ายของหยดเทคนิคนี้ช่วยให้คำนวณค่า  $\gamma$  ได้จาก

$$\gamma = \Delta\rho g l_c^2 \quad (20)$$

สมการ Young-Laplace สำหรับรูปทรงหยดของเหลวสองมิติโดยใช้สมการความโค้งของเหลวให้ความแม่นยำสูง ใช้การแก้สมการทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง เหมาะกับการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ในการช่วยคำนวณ

ข้อได้เปรียบของวิธีหยดของเหลว ใช้ปริมาณตัวอย่างน้อยและวิเคราะห์ภายใต้สภาวะที่แตกต่างกันได้ การวิเคราะห์รูปร่างของหยดมีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการวัดที่มีความแม่นยำสูง แต่ต้องมีการวิเคราะห์ภาพที่ซับซ้อน สามารถวัดแรงตึงผิวและแรงยึดเกาะระหว่างของเหลวได้ ทำให้สามารถใช้ได้ในกรณีที่ต้องวัดแรงยึดเกาะระหว่างสองของเหลว เช่น น้ำมันและน้ำ เหมาะกับของเหลวที่มีความหนืดสูง (Shuqian, 2007) ข้อจำกัดของวิธีหยดของเหลวความแม่นยำขึ้นอยู่กับค่ากล้องและการวิเคราะห์ภาพ ต้องอาศัยการตั้งค่ากล้องและการประมวลผลภาพที่ดี ไม่เหมาะกับของเหลวที่มีความหนืดต่ำหรือมีแรงตึงผิวต่ำมาก เนื่องจากรูปทรงหยดอาจไม่ได้รับการเปลี่ยนแปลงอย่างชัดเจน (Rulison C, 2021)

### เครื่องมือวัดค่าแรงตึงผิวของของเหลวทางพาณิชย์

เครื่องมือวัดแรงตึงผิวของของเหลว (Tensiometer) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดแรงตึงผิวและแรงตึงระหว่างผิวของของเหลว ซึ่งมีความสำคัญในหลายอุตสาหกรรม เช่น เคมี ปิโตรเลียม อาหาร และเครื่องสำอาง ปัจจุบันมีเครื่องมือวัดแรงตึงผิวหลากหลายรุ่น โดยมีคุณสมบัติและวิธีในการวัดแรงตึงผิวที่ต่างกัน ตัวอย่างเช่น

**เทนซิโอมิเตอร์ KRÜSS K6**



ภาพที่ 16 เครื่องวัดแรงตึงผิว (Tensiometers) KRÜSS K6 Tensiometer

(KRÜSS, 2016)

เทนซิโอมิเตอร์แบบใช้มือรุ่นนี้ได้รับการออกแบบมาเพื่อวัดแรงตึงผิวและส่วนต่อประสานโดยใช้วิธีวงแหวนคูนอยส์ เป็นเครื่องมือที่ทนทานและเชื่อถือได้สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการทั่วไป ราคาของ KRÜSS K6 อยู่ที่ประมาณ 4,000 - 6,000 ดอลลาร์สหรัฐ ผลิตโดยบริษัท KRÜSS ผลิตโดยประเทศเยอรมนี

#### เทนซิโอมิเตอร์ Sigma 700/701 ของ Biolin Scientific



ภาพที่ 17 เครื่องเทนซิโอมิเตอร์ Sigma 700/701 ของ Biolin Scientific (Scientific, 2015)

เทนซิโอมิเตอร์ความแม่นยำสูงซึ่งให้การทำงานอัตโนมัติเต็มรูปแบบและใช้สำหรับการวัดที่ซับซ้อน เช่น แรงตึงผิว แรงตึงส่วนต่อประสาน ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ และมุมสัมผัสแบบไดนามิก วัดแรงตึงผิวได้ทั้งวิธีแบบวงแหวนของคูนอยด์ แบบแผ่นเฮลมี ราคาสำหรับ Sigma 700/701 มักจะอยู่ในช่วง 25,000-35,000 ดอลลาร์สหรัฐ ขึ้นอยู่กับอุปกรณ์เสริมเพิ่มเติม เช่น โมดูลควบคุมอุณหภูมิหรือการวัดความหนาแน่น ผลิตโดยบริษัท Biolin Scientific จากประเทศสวีเดน

#### Attension Theta Series จาก Biolin Scientific



ภาพที่ 18 เครื่อง Attension Theta Series จาก Biolin Scientific (Scientific, 2021)

เครื่องมือวัดแรงตึงผิว Theta เหมาะสำหรับการศึกษาและการควบคุมคุณภาพ มีการทำงานที่ยืดหยุ่นและปรับแต่งได้ รุ่น Theta Flex เหมาะสำหรับวัดแรงตึงผิวและมุมสัมผัสแบบไดนามิกผ่านวิธีหยดแขวน วิธีการวัดแบบหยดแขวนและหยดนอนเป็นหลักในการวัดโดยใช้กล้องความละเอียด

สูงเพื่อการวิเคราะห์ภาพที่แม่นยำ ราคาอยู่ระหว่าง ประมาณ 20,000 - 60,000 ดอลลาร์สหรัฐ ขึ้นอยู่กับรุ่นและอุปกรณ์เสริม การวัดแรงดึงผิวโดยวิธีต่าง ๆ มีข้อเหมือนและต่างกัน ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความแม่นยำและความเหมาะสมของเทคนิคคลาสสิกที่ใช้ในการวัดแรงดึงผิว

วิธีการ	ความแม่นยำ [mN/m]	เหมาะสมสำหรับสารลดแรงดึงผิว	เหมาะสมสำหรับของเหลว	เหมาะสมสำหรับของเหลวหนืด	ตัวอย่างอุปกรณ์เชิงพาณิชย์	ราคา
วิธีแบบวงแหวนดูนอยส์	~0.1	จำกัด	ความแม่นยำลดลง	ไม่แนะนำ	KRÜSS K6 Sigma 700/701	4,000- 35,000
วิธีแบบแผ่นวิลเฮลมี	~0.1	จำกัด	ดี	ดีมาก	Sigma 700/701	25,000- 35,000
วิธีแบบหยดของเหลว	~0.1	ดีมาก	ดีมาก	ไม่แนะนำ	Attension Theta Series	20,000- 60,000

(Drelich, 2002)

จากตารางที่ 2 และการศึกษาข้อได้เปรียบและข้อจำกัดของวิธีการวัดแรงดึงผิวทั้ง 3 วิธี พบว่า เทคนิคส่วนใหญ่มีความแม่นยำประมาณ 0.1 mN/m ความแม่นยำระดับนี้เพียงพอสำหรับการวัดแรงดึงผิวในระบบของเหลว-อากาศและของเหลว-ของเหลวในสถานะที่เป็นมาตรฐาน และมีการใช้งานและมีจำหน่ายในเชิงพาณิชย์แต่ราคาค่อนข้างสูง ข้อแตกต่างวิธีหยดมีความเหมาะสมมากสำหรับการใช้กับสารลดแรงดึงผิว แต่วิธีแผ่นเฮลมีและวิธีวงแหวนดูนอยส์ มีข้อจำกัดในการใช้งานกับสารลดแรงดึงผิวเนื่องจากแรงที่วัดอาจได้รับผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของสมบัติการเปียก ความเหมาะสมสำหรับระบบของเหลว ของเหลวไม่เหมาะกับวิธีวงแหวนดูนอยส์ มีความแม่นยำที่ลดลงเมื่อต้องใช้กับระบบสองของเหลวเทคนิคต่าง ๆ มีจุดเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับประเภทของของเหลวและการใช้งาน เช่น ระบบของเหลวสองชนิด ของเหลวหนืด หรือโลหะหลอมเหลว การเลือกเทคนิคที่เหมาะสมต้องพิจารณาความแม่นยำและข้อจำกัดทางเทคนิคของแต่ละวิธี

เมื่อศึกษาคุณภาพของเครื่องมือที่ใช้ในการวัดทั้ง 3 วิธี ผู้วิจัยมีความสนใจวิธีการหาแรงดึงผิวโดยวิธีหยดของเหลว เนื่องจากเหมาะกับของเหลวและสารละลาย มีความแม่นยำ ใช้สารในปริมาณที่น้อย งานวิจัยนี้จึงเลือกการหาค่าแรงดึงผิวของเหลว โดยใช้วิธีหยดของเหลว และใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน เนื่องจากเป็นวิธีการที่สะดวกและสามารถประยุกต์ใช้อุปกรณ์ที่ราคาประหยัด เข้าถึงง่าย

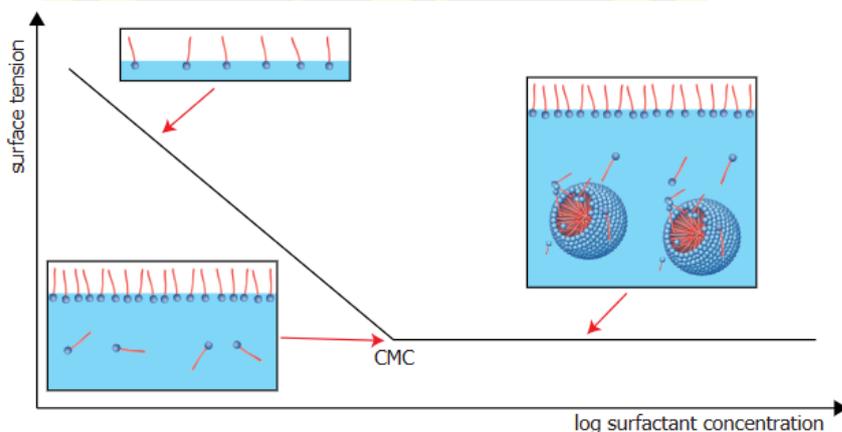
## วิธีการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์สามารถทำได้หลายวิธี โดยส่วนใหญ่จะใช้วิธีการวัดสมบัติทางกายภาพของสารละลายสารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ แล้วสังเกตการเปลี่ยนแปลงในช่วงที่เกิดการสร้างไมเซลล์ โดยพบว่าที่ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์จะทำให้สมบัติทางกายภาพของสารละลายเปลี่ยนไปจากเดิมมากจนเห็นได้ชัดเจน เช่น แรงตึงผิว, ความดันออสโมติก, ความหนืด, ความสามารถในการละลาย, ความหนืด, สมบัติการนำไฟฟ้า, สมบัติการหักเหแสง, สมบัติการวาวแสง และสมบัติการดูดกลืนแสง เป็นต้น โดยวิธีการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่นิยมใช้ดังนี้

### วิธีการหาค่าแรงตึงผิว

ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์คือความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวถึงระดับหนึ่งโมเลกุลของสารจะเริ่มรวมตัวกันเป็นโครงสร้างไมเซลล์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงตึงผิวอย่างชัดเจน การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์เป็นขั้นตอนสำคัญในการศึกษาสมบัติของสารลดแรงตึงผิว เนื่องจากสามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้ประสิทธิภาพของสารชนิดนั้นได้ การวัดค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์สามารถทำได้โดยการใช้เครื่องวัดแรงตึงผิว ซึ่งจะทำการวัดค่าแรงตึงผิวของสารละลายสารลดแรงตึงผิวในช่วงความเข้มข้นต่าง ๆ โดยทั่วไปแรงตึงผิวจะลดลงตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อถึงจุดความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ค่าแรงตึงผิวจะคงที่

การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์สามารถทำได้โดยการวาดกราฟเชิงลอการิทึม กราฟเชิงลอการิทึมจะแบ่งออกเป็นสองช่วง ได้แก่ ช่วงที่แรงตึงผิวหรือแรงตึงระหว่างเฟสลดลงก่อนถึงความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์และช่วงที่แรงตึงผิวหรือแรงตึงระหว่างเฟสคงที่หลังจากที่ถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์แล้ว ดังภาพที่ 19 ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์สามารถอ่านได้จากจุดตัดของเส้นถดถอยที่สอดคล้องกัน



ภาพที่ 19 แรงตึงผิวขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เมื่อถึงความเข้มข้นวิกฤตสำหรับการเกิดไมเซลล์ แรงตึงผิวจะคงที่เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวเพิ่มเติม

เมื่อต้องการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ด้วยวิธีการวัดแรงตึงผิวจะได้กราฟการเปลี่ยนแปลงค่าแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเป็นแบบเส้นโค้งคล้ายตัวเอส (sigmoidal curve) ที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง ดังแสดงตามภาพที่ 19 คือ

ช่วงที่ 1 คือ ช่วงที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าน้อยกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ( $[\text{surfactant}] < \text{CMC}$ ) การจัดเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวจะเป็นแบบกระจายตัวอย่างไม่เป็นระเบียบในสารละลาย

ช่วงที่ 2 คือ ช่วงที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่าเท่ากับค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ( $[\text{surfactant}] = \text{CMC}$ ) การจัดเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวมีความเป็นระเบียบอย่างมากในสารละลาย โดยสมมุติฐานส่วนใหญ่จะจัดเรียงตัวกันเป็นทรงกลม (spherical) การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้จะมีผลทำให้สมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ของสารละลายเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด

ช่วงที่ 3 คือ ช่วงที่ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวมีค่ามากกว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ( $[\text{surfactant}] > \text{CMC}$ ) การจัดเรียงตัวของสารลดแรงตึงผิวอาจจะมีการเปลี่ยนการจัดเรียงตัวจากทรงกลม (spherical) ไปเป็นแบบทรงกระบอก (cylinder) หรือมีการเพิ่มจำนวนไมเซลล์มากขึ้น แต่การเปลี่ยนแปลงเช่นนี้จะมีผลทำให้แรงตึงผิวของสารละลายเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

ข้อได้เปรียบเป็นการวัดโดยตรง แรงตึงผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพฤติกรรมของสารลดแรงตึงผิวที่พื้นผิว ทำให้วิธีนี้มีความน่าเชื่อถือและเข้าใจง่ายสำหรับการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ การประยุกต์ใช้ที่กว้างขวาง เหมาะสมกับสารลดแรงตึงผิวหลากหลายชนิด ทั้งแบบไอออนิกและนอน ไอออนิก ข้อจำกัดต้องการเครื่องมือที่แม่นยำ จำเป็นต้องมี tensiometer ที่ได้รับการปรับเทียบและแม่นยำใช้เวลานาน จำเป็นต้องวัดหลายครั้งในความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อวาดกราฟแรงตึงผิวอย่างแม่นยำ

### วิธีการวัดค่าการนำไฟฟ้า

การวัดค่าการนำไฟฟ้าจะพิจารณาจากพฤติกรรมของไอออนของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายก็เพิ่มขึ้นตามเนื่องจากมีไอออนที่สามารถเคลื่อนที่ได้ เมื่อความเข้มข้นถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะเริ่มรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ ทำให้การเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าช้าลง เนื่องจากมีจำนวนไอออนอิสระในสารละลายน้อยลง การวาดกราฟค่าการนำไฟฟ้าเทียบกับความเข้มข้นจะแสดงจุดเปลี่ยนซึ่งแสดงถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

สภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายมักถูกวัดเป็นค่าสภาพการนำไฟฟ้าเฉพาะ (Specific Conductivity,  $\kappa$ ) ซึ่งวัดเป็นซีเมนส์ต่อเซนติเมตร (S/cm) โดยคำนึงถึงพื้นที่หน้าตัดและระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ค่าสภาพการนำไฟฟ้าของสารละลายยังสามารถแสดงเป็น สภาพการนำไฟฟ้าเชิงโมล (Molar Conductivity,  $\Lambda_m$ ) ซึ่งคำนวณจากสมการ

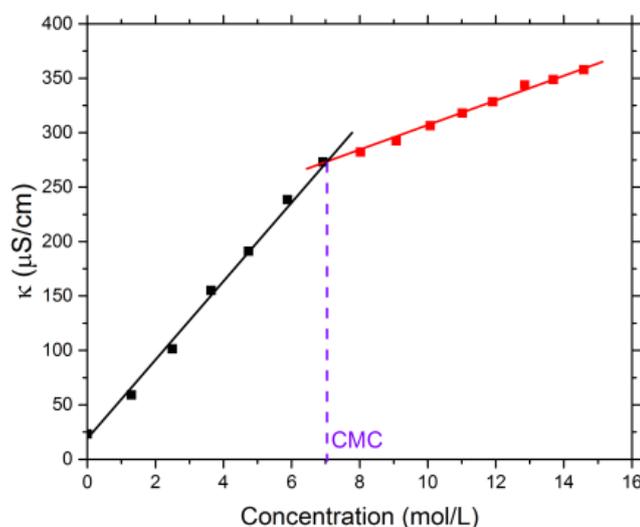
$$\Lambda_m = \frac{\kappa}{C} \quad (21)$$

โดยที่  $\Lambda_m$  คือ สภาพการนำไฟฟ้าเชิงโมล มีหน่วยเป็น S·cm<sup>2</sup>/mol

$\kappa$  คือ สภาพการนำไฟฟ้าเฉพาะ มีหน่วยเป็น S/cm

$C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลาย มีหน่วยเป็น mol/L

การใช้สภาพการนำไฟฟ้าในการศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว สามารถทำได้โดยการวัดสภาพการนำไฟฟ้าที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารลดแรงตึงผิว เมื่อความเข้มข้นถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ไอออนของสารลดแรงตึงผิวจะเริ่มก่อตัวเป็นไมเซลล์ ทำให้การเพิ่มขึ้นของสภาพการนำไฟฟ้าช้าลง การวาดกราฟของสภาพการนำไฟฟ้าเทียบกับความเข้มข้นจะมีจุดเปลี่ยนที่ชัดเจนซึ่งแสดงถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์



ภาพที่ 20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลาย SDS

(Hutin, A. ,2021)

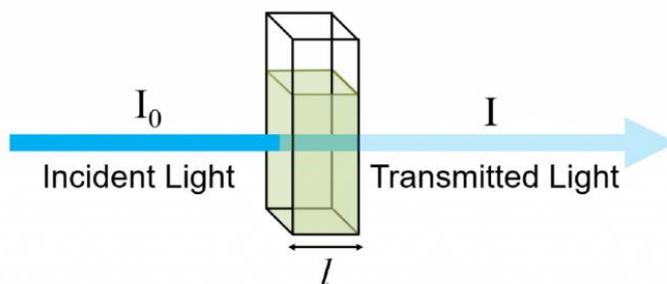
เมื่อพล็อตกราฟการนำไฟฟ้าเฉพาะ ( $\kappa$ ) เทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต จะเห็นการเปลี่ยนแปลงในรูปแบบของเส้นตรงสองช่วง ช่วงก่อนค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่มีความเข้มข้นสูง และช่วงหลังค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของไอออนและการก่อตัวของไมเซลล์ในสารละลาย

### วิธีการวัดการดูดกลืนแสง ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรี

การวัดการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตเมทรี (UV-Visible Spectrophotometry) นิยมในการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว โดยวิธีนี้อาศัยหลักการดูดกลืนแสงของสารลดแรงตึงผิวหรือสีย้อมในสารละลาย เมื่อสารลดแรงตึงผิวมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้นถึงระดับที่เกิดไมเซลล์ จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในการดูดกลืนแสงอย่างชัดเจน วิธีนี้จะตรวจจับไมเซลล์โดยตรงโดยใช้สีย้อม ซึ่งต่างจากวิธีการวัดแรงตึงผิวและการนำไฟฟ้าเฉพาะที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงอย่างฉับพลันในความเข้มข้นของโมโนเมอร์ของสารลดแรงตึงผิว ค่าความเข้มข้นวิกฤตโมเลกุลโดยใช้เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรีขึ้นอยู่กับสมบัติของสีย้อม

เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรีอาศัยหลักการที่ว่าสารแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเฉพาะตัว ซึ่งจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางโมเลกุลและความเข้มข้นของสารนั้น ๆ โดยเทคนิคนี้ใช้ในการวิเคราะห์การดูดกลืนแสงของสารที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) และช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible) ครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นประมาณ 180-780 นาโนเมตร สารส่วนใหญ่ที่ใช้เทคนิคนี้เป็นสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างเชิงซ้อน ทั้งชนิดที่มีสีและไม่มีสี เมื่อโมเลกุลของสารได้รับพลังงานจากคลื่นแสงในช่วงยูวี-วิสิเบิล จะทำให้อิเล็กตรอนในโมเลกุลนั้นถูกกระตุ้นและย้ายไปยังสถานะพลังงานที่สูงขึ้น (excited state) ซึ่งสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของสาร เช่น ความเข้มข้นของสารในตัวอย่าง

เมื่อโมเลกุลของสารได้รับพลังงานในช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสม ซึ่งตรงกับการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเลื่อนไปจากสถานะพื้น (ground state) ไปยังสถานะกระตุ้น (excited state) โดยการดูดกลืนพลังงานในช่วงแสงยูวี-วิสิเบิล การดูดกลืนพลังงานนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต (Beer-Lambert's law) ซึ่งกล่าวว่า “ปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสารที่มีสมบัติในการดูดกลืนแสง และระยะทางที่แสงผ่านในสารนั้น”



ภาพที่ 21 จำลองความเข้มแสงที่ลดลง เมื่อแสงเดินทางผ่านสารละลายตัวอย่าง

โดยที่  $I_0$  คือ ความเข้มของแสงก่อนส่องผ่านสารละลาย

$I$  คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านออกจากสารละลาย

$l$  คือ ความกว้างของเซลล์หรือระยะทางที่แสงผ่านในสารละลายในหน่วย cm

จากภาพที่ 21 แสดงให้เห็นว่าเมื่อสารที่ต้องการวิเคราะห์สามารถดูดกลืนพลังงานแสงได้ ความเข้มของแสงที่ผ่านสารละลายจะลดลง เนื่องจากสารได้ดูดกลืนพลังงานแสงบางส่วนไป ซึ่งพลังงานแสงที่ลดลงนี้สามารถนำมาวิเคราะห์ได้ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ เทคนิคนี้ให้ความแม่นยำและความไวสูง จึงเป็นที่นิยมใช้ในงานวิเคราะห์ต่าง ๆ โดยใช้ความสัมพันธ์ตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ต ซึ่งอธิบายด้วยสมการ

$$A = \epsilon cl \quad (22)$$

โดยที่  $A$  คือ ค่าการดูดกลืนแสง

$\epsilon$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารที่ความยาวคลื่นนั้น มีหน่วยเป็น L/mol-cm

$c$  คือ ความเข้มข้นของสารในสารละลาย mol/L

$l$  คือ ระยะทางที่แสงผ่านสาร มีหน่วยเป็น cm

สมการนี้แสดงให้เห็นว่าการดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเข้มข้นของสาร ทำให้สามารถใช้เทคนิคนี้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารละลายได้อย่างแม่นยำ ในทางปฏิบัติการวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยสารที่ต้องการวิเคราะห์จะทำโดยการเปรียบเทียบกับปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืนโดยสารละลายเบส (blank solution) ซึ่งสารละลายนี้ประกอบด้วยทุกองค์ประกอบที่เหมือนกันกับสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์ ยกเว้นสารที่ต้องการวิเคราะห์จริง ๆ แสงที่ผ่านออกจากสารละลายเบสจะถูกตั้งค่าให้เท่ากับ 1 หรือ 100% การส่องผ่าน (transmittance) ของสารที่ต้องการวิเคราะห์จะแสดงในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาณแสงที่ผ่านสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์กับปริมาณแสงที่ผ่านสารละลายเบส ตามสมการ

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (23)$$

โดยที่  $T$  คือ ค่า transmittance

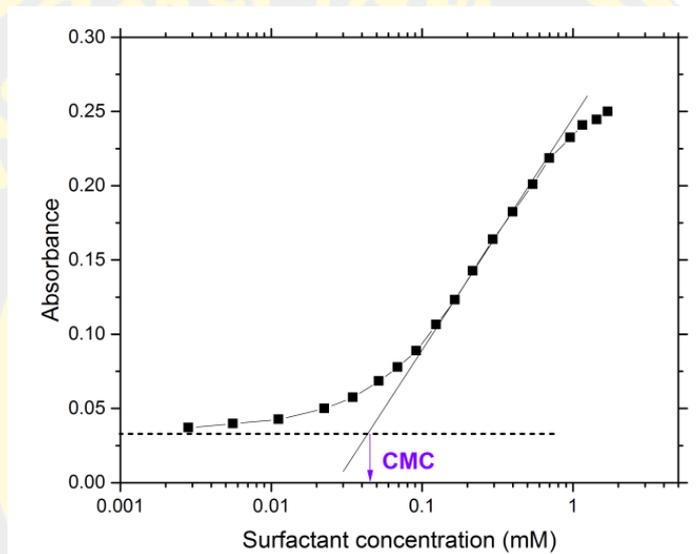
$I$  คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านสารละลายที่ต้องการวิเคราะห์

$I_0$  คือ ความเข้มของแสงที่ผ่านสารละลายเบส

การแปลงค่า transmittance เป็นค่า absorbance ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสารตามกฎของเบียร์และแลมเบิร์ตสามารถทำได้โดยใช้สมการ

$$A = -\log(T) \quad (24)$$

การดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตเมทรีสามารถใช้หาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวได้ โดยวัดการเปลี่ยนแปลงในการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ เมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้นการก่อตัวของไมเซลล์ที่ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์จะส่งผลต่อการดูดกลืนแสง เนื่องจากสภาพแวดล้อมของโครโมฟอร์หรือสารย้อมสีที่เพิ่มเข้าไปมีการเปลี่ยนแปลง การวาดกราฟการดูดกลืนแสงเทียบกับความเข้มข้นจะแสดงการเปลี่ยนแปลงของความชัน ณ จุดที่แสดงถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ดังภาพที่ 22



ภาพที่ 22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการดูดกลืนแสงและความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (Hutin, A., 2021)

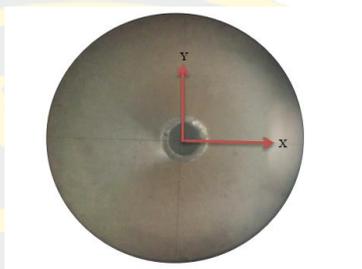
## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### งานวิจัยการหาค่าแรงตึงผิว

พิชญภัค สมปัญญา (2558) ศึกษาเพื่อหาค่าความตึงผิวของของเหลวโดยใช้กฎของเทต (Tate's Law) ร่วมกับกล้องจุลทรรศน์แบบเวอร์เนียร์ในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของเข็มฉีดยา โดยเปรียบเทียบค่าความตึงผิวของของเหลวที่ได้จากการทดลองกับค่ามาตรฐาน การทดลองใช้ตัวอย่างของเหลว 3 ชนิด ได้แก่ น้ำกลั่น กลีเซอริน และน้ำมันมะกอก ในการทดลองนี้จะวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของเข็มฉีดยาทั้งในแนวที่ตั้งฉากกันที่มุม 90 องศา เพื่อหาค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางตามตัวอย่างที่แสดงในภาพที่ 23 จากนั้นทำการหยดของเหลวลงในปีกเกอร์และวัดช่วงมวลของของเหลว 50 หยดด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล เพื่อนำมาคำนวณหามวลต่อ 1 หยด แล้วนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาค่าความตึงผิวโดยใช้สมการแรงตึงผิวตามกฎของเทต

$$\gamma = \frac{mg}{2\pi r} \quad (25)$$

- โดยที่  $\gamma$  คือ แรงตึงผิว มีหน่วยเป็น N/m  
 $m$  คือ มวลของหยดที่ตกออกมา มีหน่วยเป็น kg  
 $g$  คือ ค่าเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีหน่วยเป็น  $9.81 \text{ m/s}^2$   
 $r$  คือ รัศมีของท่อที่ใช้ปล่อยหยด มีหน่วยเป็น m



ภาพที่ 23 ขยายของปลายเข็มฉีดยาผ่านเลนส์ของกล้องจุลทรรศน์ชนิดเวอร์เนียร์  
 (พิชญภัค สมปัญญา, 2558)

จากภาพที่ 23 จะเห็นบริเวณขอบเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกของเข็มฉีดยาได้ชัดเจนและสามารถวัดค่าโดยการอ่านจากสเกลเวอร์เนียร์ของกล้องจุลทรรศน์แบบเวอร์เนียร์บันทึกค่าที่ได้ลงในตารางบันทึกผล



(ก)



(ข)



(ค)

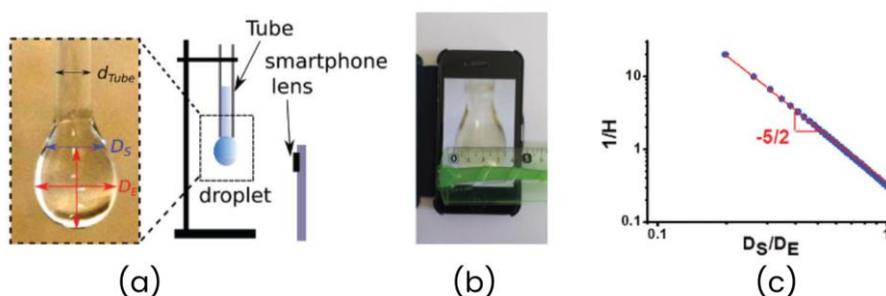
ภาพที่ 24 ของเหลวขณะกำลังจะหลุดออกจากปลายเข็มฉีดยา (ก) น้ำกลั่น (ข) กลีเซอริน และ (ค) น้ำมันมะกอก

ผลการวิจัยพบว่าวัดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเข็มฉีดยาจะได้เท่ากับ  $0.06 \text{ mm}$  และ  $0.08 \text{ mm}$  ตามลำดับ ค่าความตึงผิวของน้ำกลั่น กลีเซอริน และน้ำมันมะกอก คำนวณโดยใช้เส้นรอบวงภายในมีค่าความตึงผิวเท่ากับ  $72.69 \text{ mN/m}$   $63.35 \text{ mN/m}$  และ  $32.62 \text{ mN/m}$  คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน  $0.15 \%$ ,  $0.39 \%$  และ  $1.94\%$  ตามลำดับ ซึ่งความคลาดเคลื่อนอาจเกิดจากอุณหภูมิที่ต่างกันกับค่าความตึงผิวมาตรฐานและคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการคำนวณโดยใช้เส้น

รอบวงภายนอกและคำนวณด้วยความยาวเส้นรอบวงภายในรวมกับภายนอก สรุปได้ว่าการหยดของเหลวจะเกิดขึ้นที่เส้นรอบวงด้านในของปลายเข็มฉีดยา ข้อเสนอแนะที่ได้การหยดของเหลวแต่ละหยด ควรออกแรงกดให้มีขนาดเท่ากันมากที่สุดไม่กดกระบอกฉีดยาอย่างรวดเร็ว เพื่อให้ได้ขนาดของหยดของเหลวเท่ากันและการทดลองหยดซ้ำหลาย ๆ ครั้งเพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยมวล 1 หยดที่ถูกต้อง

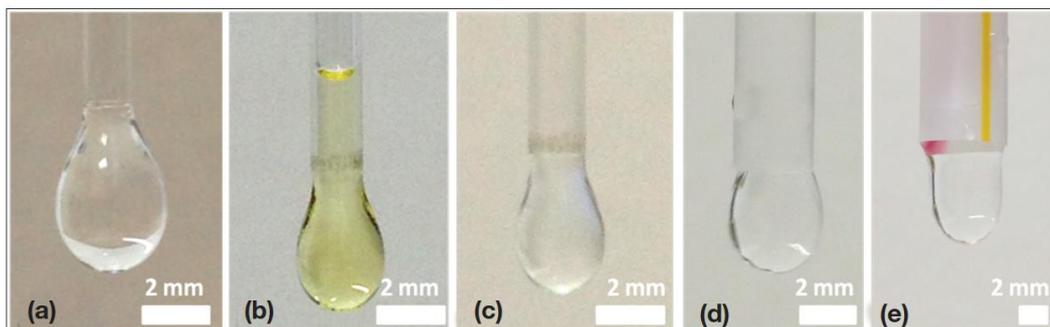
### งานวิจัยการหาค่าแรงตึงผิวโดยวิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน

Goy et al. (2017) ศึกษาการออกแบบการวัดแรงตึงผิวด้วยสมาร์ทโฟน โดยผู้วิจัยมีแนวคิดในการวัดแรงตึงผิวของสารต่าง ๆ เนื่องจากการวัดแรงตึงผิวในปัจจุบันโดยทั่วไปมักใช้วิธีแบบแผ่นของวิลเฮลมี ซึ่งเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและใช้อุปกรณ์ที่มีราคาสูง ทำให้ผู้เรียนอาจขาดความเข้าใจอย่างแท้จริงในเรื่องแรงตึงผิว ผู้วิจัยจึงสนใจวิธีการที่เรียบง่ายและเข้าถึงได้มากขึ้น โดยใช้หลักการว่าเมื่อหยดของเหลวถูกแขวนไว้ที่ปลายด้านล่างของหลอด รูปทรงของหยดนั้นจะถูกควบคุมโดยสมดุลระหว่างแรงตึงผิวและน้ำหนักของหยดตามสมการยัง-ลาปลาซ การทดลองนี้ถ่ายภาพของหยดของเหลวด้วยชุดอุปกรณ์ซึ่งประกอบด้วยปิเปตที่ติดตั้งกับขาตั้งและสมาร์ทโฟน จากนั้นนำภาพที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ เพื่อคำนวณหาแรงตึงผิวได้อย่างแม่นยำ โดยใช้ตัวอย่างทดสอบที่เป็นน้ำเปล่า น้ำมัน และสารละลายที่มีผงซักฟอก การวิเคราะห์นี้อาศัยการคำนวณจากรูปทรงของหยดที่ได้จากภาพถ่าย ซึ่งสามารถประเมินค่าแรงตึงผิวได้ โดยสามารถประมาณแรงตึงผิวได้โดยใช้สมการ  $\gamma = (\Delta\rho g D_E^2)/H$  และฟังก์ชันอัตราส่วนระหว่าง  $D_S$  และ  $D_E$  ดังนี้  $1/H = a(D_S/D_E)^b$  โดย  $a, b$  มีค่าประมาณเท่ากับ 0.345 และ -2.5 ตามลำดับ



ภาพที่ 25 (a) การออกแบบการทดลองถ่ายภาพของเหลวโดยสมาร์ทโฟน (b) การวัดขนาดหยดของเหลวจากหน้าจอสมาร์ทโฟน (c) กราฟระหว่าง  $1/H$  และฟังก์ชันของอัตราส่วน  $D_S/D_E$

ในงานวิจัยนี้ใช้สมาร์ทโฟน iPhone 4s (กล้องความละเอียด 8 ล้านพิกเซล, หน้าจอ 3.5 นิ้ว) ฟังก์ชันกล้องมาตรฐานของสมาร์ทโฟน พร้อมฟังก์ชันซูมดิจิทัล (ขยายสูงสุด x5) ไม่บรรทัดมาตรฐานในการวัดขนาดหยดน้ำบนหน้าจอสมาร์ทโฟน เปรียบเทียบค่าแรงตึงผิวของน้ำโดยใช้ตัวอย่างของเหลว 3 ชนิด ได้แก่ หลอดทดลองพลาสติก ใสบากกา และหลอดแมกโดนัลด์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4, 2.9 และ 5.9 mm ตามลำดับ



ภาพที่ 26 หยดของเหลวของน้ำเปล่า น้ำมัน เอทานอลจากปลายปิเปต น้ำเปล่าจากปลาย pen tube และน้ำเปล่าจากปลายหลอดตามลำดับ

ผลการวิจัยที่ได้จากการวัดแรงตึงผิวด้วยสมาร์ตโฟนให้ที่มีความแม่นยำค่อนข้างสูงกับค่ามาตรฐานจากการทดลองทางวิทยาศาสตร์ โดยเฉพาะในกรณีของน้ำและน้ำมันมะกอก การทดลองยังแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างของแรงตึงผิวระหว่างน้ำ น้ำมันมะกอก และเอทานอล ซึ่งสะท้อนถึงโครงสร้างโมเลกุลและพลังงานที่เกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลของของเหลวแต่ละชนิด ค่าที่ได้จากหลอดขนาดใหญ่เช่น หลอดแมคโดนัลด์มีความแม่นยำน้อยกว่า เนื่องจากเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดมีขนาดใหญ่เกินไปเมื่อเทียบกับความยาวแคปิลลารี การวิเคราะห์แรงตึงผิวของสารละลายต่าง ๆ ด้วยการถ่ายภาพหยดของเหลวจากสมาร์ตโฟนสามารถให้ค่าที่แม่นยำ ทำให้สมาร์ตโฟนกลายเป็นเครื่องมือที่เข้าถึงได้ง่ายสะดวกและต้นทุนต่ำ ซึ่งเหมาะสำหรับการใช้ในทางการศึกษา วิธีนี้ยังคงให้ค่าที่สมเหตุสมผลและช่วยให้นักเรียนเข้าใจแรงตึงผิวได้ง่ายขึ้นผ่านการทดลอง กล้องสมาร์ตโฟนในปัจจุบันมีความคมชัดสูงพอที่จะถ่ายภาพหยดของเหลวเพื่อการวิเคราะห์ได้ สมาร์ตโฟนสามารถถ่ายภาพ จัดเก็บ และนำไฟล์ภาพมาใช้ได้อย่างรวดเร็ว สำหรับการวัดความยาวหรือขนาดต่าง ๆ ของหยดของเหลว สามารถใช้ไม้บรรทัดวัดโดยตรงจากหน้าจอได้ แต่เพื่อเพิ่มความแม่นยำ ควรใช้โปรแกรมวิเคราะห์ภาพ เช่น ImageJ ซึ่งช่วยให้การคำนวณขนาดและรูปร่างของหยดน้ำจากภาพถ่ายมีความละเอียดและแม่นยำมากขึ้น

#### งานวิจัยการหาค่าแรงตึงผิวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ตโฟนและแอปพลิเคชัน CapCam

Yue and Katabi (2019) นำเสนอการใช้สมาร์ตโฟนเป็นเครื่องมือในการวัดแรงตึงผิวของของเหลว ซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญในการตรวจสอบคุณภาพของของเหลว เช่น การตรวจหาการปนเปื้อนในน้ำ วัดความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ และตรวจหาปริมาณโปรตีนในปัสสาวะเพื่อวินิจฉัยโรคไต งานวิจัยได้พัฒนาแอปพลิเคชันที่ชื่อว่า “CapCam” ที่ใช้กล้องและแฟลชของสมาร์ตโฟนร่วมกับมอเตอร์สั่นในการสร้างคลื่นเล็กๆ บนผิวของของเหลว และใช้ภาพการสะท้อนที่ได้มาคำนวณแรงตึงผิวผ่านอัลกอริธึมที่พัฒนาโดยนักวิจัยแอปพลิเคชัน CapCam ช่วยให้การวัดแรงตึงผิวซึ่งแต่เดิมจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ที่มีราคาแพงและซับซ้อน สามารถทำได้ด้วยสมาร์ตโฟนที่มีอยู่ทั่วไป

กระบวนการทำงานเริ่มจากการวางสมาร์ทโฟนบนภาชนะที่บรรจุของเหลว จากนั้นมอเตอร์สั่นของโทรศัพท์จะสร้างคลื่นบนผิวของเหลว และแสงแฟลชของสมาร์ทโฟนจะสะท้อนผ่านคลื่นเหล่านี้ ฉายกล้องของสมาร์ทโฟนจะจับภาพรูปแบบของแสงสว่างและเงา ซึ่งจากรูปแบบนี้เราสามารถคำนวณแรงตึงผิวของของเหลวได้ ตามภาพที่ 27



ภาพที่ 27 การติดตั้ง CapCam

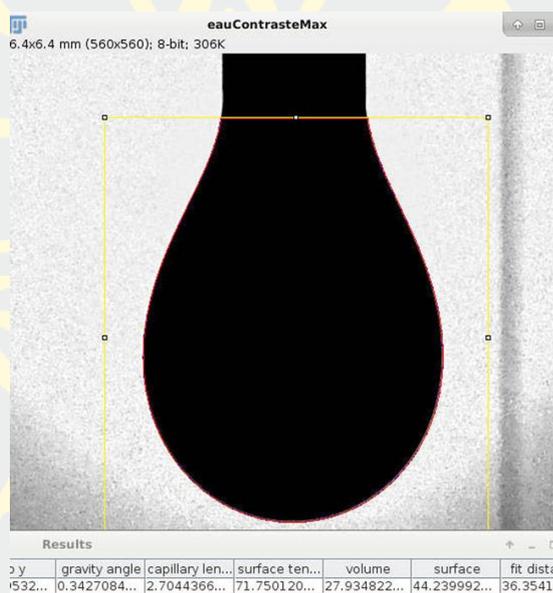
สมาร์ทโฟนถูกวางบนถ้วยกระดาษ คลื่นแคปิลลารีถูกสร้างขึ้นโดยมอเตอร์สั่นภายในสมาร์ทโฟน จากนั้นด้วยการใช้ไฟฉาย กล้องของสมาร์ทโฟนจะจับภาพรูปแบบของแสงสว่างและเงา ซึ่งจากรูปแบบนี้เราสามารถคำนวณแรงตึงผิวของของเหลวได้ ผลการวิจัย CapCam ถูกทดสอบบน iPhone X และเปรียบเทียบกับเครื่องวัดแรงตึงผิวในห้องปฏิบัติการ พบว่าแอปสามารถวัดแรงตึงผิวของของเหลวได้อย่างแม่นยำ ค่าความคลาดเคลื่อน  $0.75 \text{ mN/m}$  สามารถแยกของเหลวที่แตกต่างกัน เช่น ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่ต่างกัน และตรวจจับการปนเปื้อนในน้ำและระดับโปรตีนในปัสสาวะได้อย่างมีประสิทธิภาพ แอปนี้ได้รับการทดสอบและสามารถตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ได้ถึง  $0.5\%$  และตรวจพบสารปนเปื้อนในน้ำได้อย่างแม่นยำ อีกทั้งยังมีศักยภาพในการตรวจหาความเข้มข้นของโปรตีนในปัสสาวะ ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากสำหรับผู้ป่วยที่ต้องการตรวจสอบภาวะไตเสื่อมจากโรคเบาหวานที่บ้าน CapCam นำเสนอวิธีการวัดแรงตึงผิวของของเหลวที่เข้าถึงได้ง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำโดยใช้สมาร์ทโฟน วิธีการนี้สามารถเปิดโอกาสใหม่ในการทดสอบของเหลวในสถานที่ต่าง ๆ โดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาห้องปฏิบัติการ

### งานวิจัยการหาค่าแรงตึงผิวที่วิเคราะห์โดยซอฟต์แวร์ Pendant Drop

Daerr and Mogne (2016) ได้ทำการวิจัย "Pendent Drop: An ImageJ Plugin to Measure the Surface Tension from an Image of a Pendent Drop" ได้อธิบายเครื่องมือซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นเป็นส่วนเสริมสำหรับโปรแกรม ImageJ ซึ่งออกแบบมาเพื่อวัดแรงตึงผิวจากภาพของหยดน้ำที่ห้อยอยู่ โดยวิธีการวิเคราะห์หยดน้ำแบบหยด (Pendent Drop method) เป็นการวิเคราะห์รูปทรงของหยดน้ำที่มีสมมาตรแกน ซึ่งห้อยอยู่จากท่อแคปิลลารีเพื่อประเมินแรงตึงผิว โดยอาศัยสมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงยึดเหนี่ยวในโมเลกุลของของเหลว ซอฟต์แวร์ Pendant

Drop ที่พัฒนาเป็นปลั๊กอินสำหรับ ImageJ ถูกออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์รูปร่างของหยดน้ำแบบเพนเดนท์ เพื่อคำนวณแรงตึงผิวโดยกระบวนการทำงานและอัลกอริทึมที่ใช้ในซอฟต์แวร์นี้สามารถสรุปได้ดังนี้

ซอฟต์แวร์จะเริ่มต้นจากการนำเข้าภาพของหยดน้ำที่ห้อยอยู่จากท่อแคปิลลารี จากนั้นจะตรวจจับขอบเขตของหยดน้ำโดยใช้การวิเคราะห์ภาพใน ImageJ เพื่อกำหนดรูปร่างของหยดน้ำจากเส้นขอบที่ได้จากภาพ เมื่อได้เส้นขอบของหยดน้ำแล้ว ซอฟต์แวร์จะทำการจับคู่เส้นขอบนี้กับโปรไฟล์ตามทฤษฎีของหยดน้ำ โดยโปรไฟล์นี้ถูกกำหนดจากสมการเชิงอนุพันธ์ที่อธิบายถึงสมดุลระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิวในหยดน้ำ การปรับแต่งโปรไฟล์จะเกิดขึ้นแบบอัตโนมัติเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เส้นขอบของหยดน้ำจริงใกล้เคียงกับโปรไฟล์ทฤษฎีมากที่สุด เมื่อโปรไฟล์ทฤษฎีที่ตรงกับหยดน้ำถูกกำหนดแล้ว ซอฟต์แวร์จะคำนวณแรงตึงผิวจากพารามิเตอร์เหล่านี้ โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิวที่กำหนดในสมการ แสดงผลตามภาพที่ 28



ภาพที่ 28 หยดน้ำถูกวิเคราะห์โดย Pendant Drop หลังจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของรูปร่างหยดน้ำโดยอัตโนมัติเส้นขอบที่คำนวณได้จะเข้ากันกับภาพอย่างดี พารามิเตอร์ต่าง ๆ และสมบัติของหยดน้ำจะถูกรวบรวมไว้ในตารางผลลัพธ์ที่แสดงอยู่ด้านล่าง

จากภาพที่ 28 การใช้ Pendant Drop เพื่อวัดแรงตึงผิวของหยดน้ำที่แขวนจากท่อแคปิลลารี โดยการตีกรอบรอบขนาดหยดน้ำที่ต้องการวิเคราะห์ แล้วซอฟต์แวร์จะทำการหลังจากการวิเคราะห์รูปร่างหยดน้ำ และปรับรูปร่างของหยดน้ำโดยอัตโนมัติ คำนวณรูปร่างของหยดน้ำและสร้างเส้นโครงตามข้อมูลทางทฤษฎี (เส้นสีแดงที่ล้อมรอบหยดน้ำ) ซึ่งสามารถเห็นได้ว่าตรงกับรูปร่างของหยดน้ำในภาพจริง (สีดำ) อย่างแม่นยำ ปลั๊กอิน Pendant Drop ใช้ภาพถ่ายหยดน้ำร่วมกับสมการทางทฤษฎี

และอัลกอริธึมการหาค่าเหมาะสมเพื่อคำนวณแรงตึงผิวของของเหลว การประมวลผลภาพและคำนวณนี้ช่วยให้ได้ค่าที่แม่นยำในการศึกษาสมบัติของของเหลวที่ห้อยเป็นหยดในสถานการณ์ต่าง ๆ

อัลกอริทึม Runge-Kutta ขั้นที่ 4 ถูกใช้ในการแก้สมการเชิงอนุพันธ์ของรูปทรงหยดน้ำ ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายแรงสมดุลระหว่างแรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วง ถูกใช้เพราะเป็นวิธีเชิงตัวเลขที่มีความแม่นยำสูงและสามารถจัดการกับสมการที่ไม่สามารถแก้ได้ทางตรง โดยในบริเวณที่หยดน้ำมีความโค้งมาก เช่น ใกล้ปลายหยดน้ำ อัลกอริทึมนี้จะใช้วิธีแก้สมการเชิงอนุพันธ์โดยตรงเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้น หลังจากแก้สมการเชิงอนุพันธ์เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างของหยดน้ำกับแรงตึงผิว ซอฟต์แวร์จะใช้วิธีการค้นหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (optimization) โดยการลดความคลาดเคลื่อน (mean square error) ระหว่างเส้นขอบที่ตรวจพบจากภาพและโปรไฟล์ทฤษฎี อัลกอริทึม Powell ถูกใช้ในการค้นหาค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงมากที่สุด ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ต้องคำนวณอนุพันธ์ (derivative-free method) และมีประสิทธิภาพสูงในการหาค่าที่เหมาะสมในปัญหาที่มีหลายตัวแปร

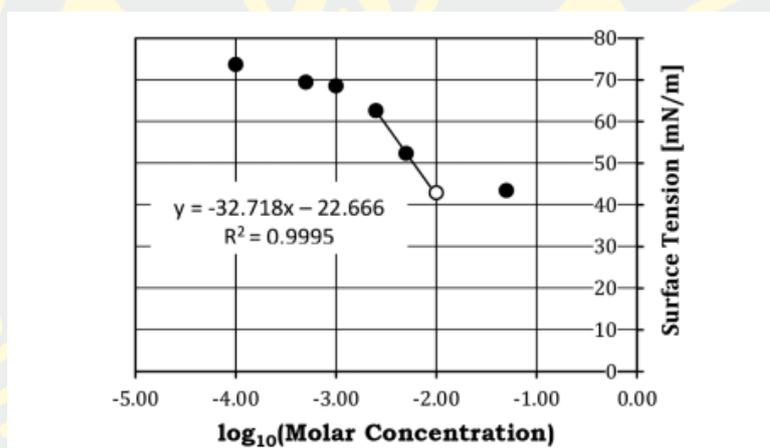
สมการที่ใช้ในการคำนวณสมการ Young-Laplace สมการนี้ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและแรงดันที่ทำให้เกิดความโค้งในหยดน้ำ โดยสมการนี้เป็นพื้นฐานในการคำนวณแรงตึงผิวของหยดน้ำ (Pendent Drop) สมการเชิงอนุพันธ์อธิบายถึงรูปร่างของหยดน้ำในสถานะสมดุล โดยสมการนี้คำนวณจากการสมดุลของแรงต่าง ๆ ภายในหยดน้ำและใช้ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับรูปร่างของหยดน้ำที่ตรวจพบจากภาพ โดยสรุป ซอฟต์แวร์ Pendent Drop ใช้อัลกอริทึม Runge-Kutta เพื่อแก้สมการเชิงอนุพันธ์สำหรับรูปทรงหยดน้ำและอัลกอริทึม Powell ในการปรับพารามิเตอร์เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในการคำนวณแรงตึงผิวจากภาพ

งานวิจัยได้เปรียบเทียบซอฟต์แวร์ Pendent Drop กับเครื่องมืออื่น ๆ เช่น LBADSA (Low-Bond Axisymmetric Drop Shape Analysis) และ DROPFIT โดยอภิปรายถึงความแม่นยำและประสิทธิภาพในการคำนวณ ในด้านความน่าเชื่อถือ งานวิจัยนี้ได้รับการเผยแพร่ใน Journal of Open Research Software ซึ่งเป็นวารสารวิชาการที่ผ่านการตรวจสอบจากผู้ทรงคุณวุฒิ ทำให้งานวิจัยมีความน่าเชื่อถือสูง นอกจากนี้ผลการทดลองที่ระบุว่าค่าความตึงผิวที่ได้จากปลั๊กอินนี้สอดคล้องกับค่าที่วัดได้จากอุปกรณ์เชิงพาณิชย์ ยิ่งช่วยเสริมความมั่นใจในความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของซอฟต์แวร์ ทางผู้วิจัยจึงเลือกใช้การวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิวโดยใช้ปลั๊กอิน Pendent Drop สำหรับโปรแกรม imageJ ในการเปรียบเทียบความแม่นยำของวิธีการวัดค่าแรงตึงผิว

#### งานวิจัยการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์โดยใช้วิธีการวัดน้ำหนักระเหย

Gascon et al. (2019) อธิบายการทดลองระดับปริญญาตรีที่มุ่งสอนแนวคิดสำคัญในวิทยาศาสตร์พื้นผิว โดยเฉพาะการดูดซับของสารลดแรงตึงผิวที่ขอบเขตระหว่างของเหลว-อากาศ การทดลองนี้แนะนำให้นักศึกษาเรียนรู้การวัดแรงตึงผิวและศึกษาแรงตึงผิวตามความเข้มข้นของ

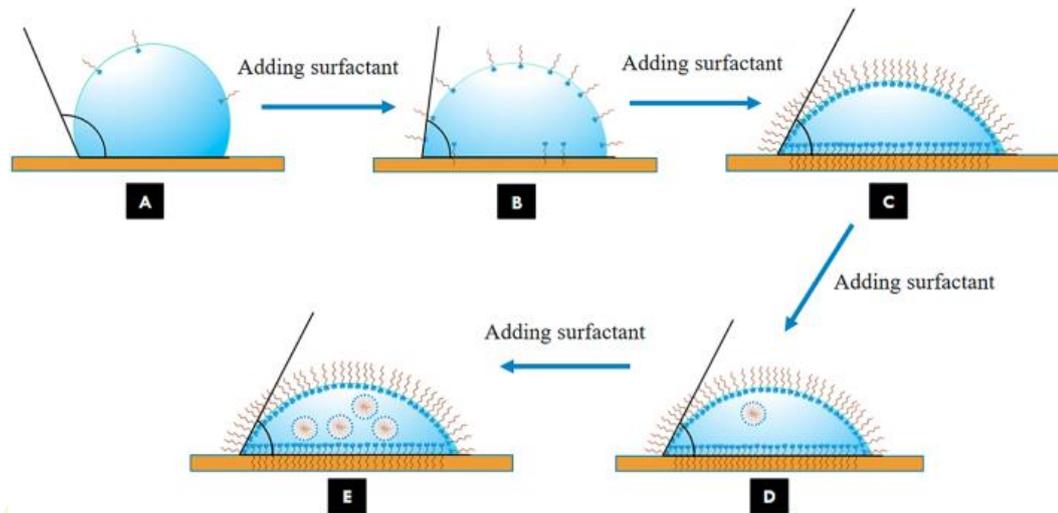
สารลดแรงตึงผิวโดยใช้โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ในการทดลองนักศึกษาจะทำการวัดแรงตึงผิวของสารละลาย โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่างกันโดยใช้วิธีการวัดน้ำหนักหยด (Drop-weight method) ซึ่งเป็นวิธีที่ช่วยให้คำนวณแรงตึงผิวได้จากมวลของหยดน้ำที่หยดออกจากปิเปต และการศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวตามความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต นักศึกษาสามารถประเมินค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ซึ่งเป็นจุดที่โมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวเริ่มก่อตัวเป็นไมเซลล์ ทำให้แรงตึงผิวมีค่าเริ่มคงที่สมการในการคำนวณการทดลองนี้ใช้สมการการดูดซับของกิบส์ (Gibbs adsorption equation) เพื่อคำนวณค่า surface excess ของ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ขอบเขตระหว่างของเหลว-อากาศ ค่า surface excess บ่งบอกถึงปริมาณของสารลดแรงตึงผิวที่สะสมที่ขอบเขตเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายทั้งหมด นักศึกษาจะได้คำนวณพื้นที่ต่อโมเลกุลของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ขอบเขต ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญที่ช่วยอธิบายว่าสารลดแรงตึงผิวช่วยลดแรงตึงผิว



ภาพที่ 29 กราฟแสดงค่าแรงตึงผิวกับความเข้มข้นสารละลาย โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ที่นักศึกษาได้จากทดลอง

ผลการทดลองในงานวิจัยนี้มีดังนี้ แรงตึงผิวลดลงเมื่อความเข้มข้นของ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงจุดหนึ่งที่แรงตึงผิวเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นจุดที่บ่งบอกถึงการก่อตัวของไมเซลล์ (micelles) ที่ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ กราฟแรงตึงผิวเทียบกับความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต นักศึกษาสามารถประเมินค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ซึ่งเป็นจุดที่การก่อตัวของไมเซลล์เริ่มต้นได้อย่างชัดเจน โดยค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่คำนวณได้สอดคล้องกับค่าที่มีรายงานไว้ในวรรณกรรม จากภาพที่ 29 กราฟแสดงค่าแรงตึงผิวกับความเข้มข้นสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ที่นักศึกษาได้จากทดลองสัญลักษณ์วงกลมเปิดแสดงการประเมินค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ที่ความเข้มข้น  $10^{-2}$  M เส้นทึบในรูปแสดงเส้นที่ดีที่สุดที่พาดผ่านจุดข้อมูลสามจุด ซึ่งมีค่าความชัน  $-32.718$  mN/m ซึ่งใช้ในการคำนวณค่า Surface Excess นักศึกษาใช้สมการการดูดซับของกิบส์ เพื่อคำนวณค่า surface excess หรือปริมาณของ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่สะสมอยู่ที่ผิวของของเหลว ผลการ



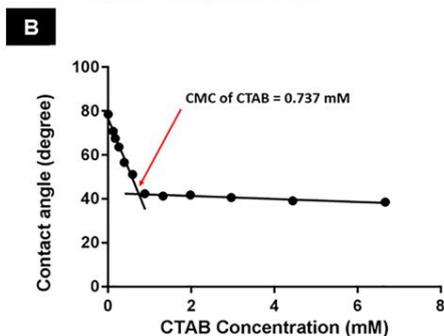
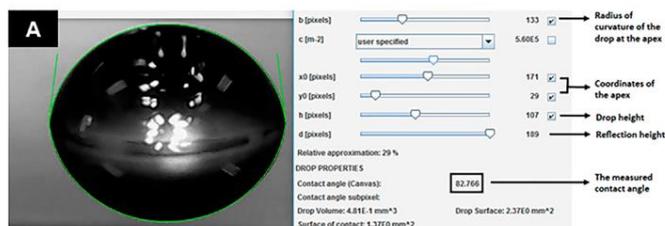


ภาพที่ 30 แสดงการแพร่กระจายของหยดของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง และการลดลงของมุมสัมผัสเมื่อมีการเติมสารลดแรงตึงผิว

วิธีการทดลองเตรียมสารละลายสารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ใช้ เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ หยดสารละลายเหล่านี้บนพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำลงในจานเพาะเชื้อและใช้กล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล USB เพื่อถ่ายภาพหยดสารวัดมุมสัมผัสของหยดสารโดยใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ ตั้งภาพที่ 31 สร้างกราฟความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเทียบกับมุมสัมผัส และหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์จากจุดที่มุมสัมผัสคงที่แสดงให้เห็นถึงการก่อตัวของไมเซลล์



ภาพที่ 31 (A) มุมมองจากด้านบนของจานเพาะเชื้อที่มีการหยดสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (10 ไมโครลิตรต่อหยด) ซึ่งมีความเข้มข้นเพิ่มขึ้น (B) การตั้งค่าการถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ USB ที่มีต้นทุนต่ำ แสดงให้เห็นการจัดตำแหน่งของเลนส์กับหยดสารที่ถูกนำมาใช้



ภาพที่ 32 การวัดมุมสัมผัสของหยดสารที่ถูกถ่ายภาพโดยใช้โปรแกรม ImageJ

ลูกศรแสดงถึงพารามิเตอร์ของซอฟต์แวร์ (B) การหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้กราฟความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เทียบกับมุมสัมผัส กราฟนี้เป็นตัวอย่างจากรายงานของนักศึกษา

จากภาพที่ 32 แสดงการวัดมุมสัมผัสของหยดสารที่ถูกถ่ายภาพโดยใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ ลูกศรแสดงถึงพารามิเตอร์ของซอฟต์แวร์ร่วมกับ Drop Analysis LB-ADSA ซึ่งเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดมุมสัมผัสของหยดสาร โดยปลั๊กอินนี้จะช่วยให้สามารถระบุขอบเขตของหยดน้ำได้อย่างแม่นยำ ผลการศึกษาพบว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์เฉลี่ยของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่ได้จากการทดลองคือ  $0.79 \pm 0.13$  mM ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่ทราบ  $0.92$  mM วิธีนี้เชื่อถือได้ปลอดภัยและประหยัดต้นทุน จึงเหมาะสำหรับการใช้ในห้องปฏิบัติการของนักศึกษาระดับปริญญาตรี ผลการประเมินจากนักศึกษาให้ความเห็นว่า การทดลองนี้น่าสนใจและช่วยให้เข้าใจปรากฏการณ์ทางพื้นผิวได้ดีขึ้น และจากการประเมินผลรูปแบบต่าง ๆ ยืนยันได้ว่าเป้าหมายการเรียนรู้ (ILOs) ของการทดลองนี้สำเร็จ การตั้งค่าในห้องปฏิบัติการมีความเรียบง่ายและมีลักษณะการเรียนรู้ที่โต้ตอบได้ ทำให้เป็นเครื่องมือทางการศึกษาที่มีประสิทธิภาพ การทดลองนี้ช่วยให้นักศึกษาได้เรียนรู้เชิงปฏิบัติเกี่ยวกับการทำงานของสารลดแรงตึงผิวในการลดแรงตึงผิว การส่งเสริมการเปียก และการก่อตัวของไมเซลล์ ซึ่งเป็นแนวคิดที่สำคัญในสาขาเคมีเชิงฟิสิกส์และวิทยาศาสตร์พื้นผิว

Perinelli et al. (2020) งานวิจัยนี้มุ่งเน้นการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ สำหรับสารลดแรงตึงผิว ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่บอกถึงความเข้มข้นที่สารลดแรงตึงผิวเริ่มสร้างไมเซลล์ในน้ำ โดยอธิบายถึงวิธีการทดลองต่าง ๆ เช่น การวัดแรงตึงผิว, การนำไฟฟ้า, สเปกโทรสโกปีการเรืองแสง, การวัดความหนาแน่น, และสเปกโทรสโกปีคลื่นเสียงความละเอียดสูง ที่ใช้ในการหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ งานวิจัยนี้ยังได้แนะนำวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลแบบอนุพันธ์อันดับสอง (second-

derivative approach) เพื่อการคำนวณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่แม่นยำและไม่ขึ้นอยู่กับผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนี้ยังมีการเปรียบเทียบวิธีนี้กับวิธีการทั่วไปที่ใช้อยู่ เช่น การถดถอยเชิงเส้นแบบแบ่งช่วง (segmental linear regression) และการถดถอยแบบโบลต์ซมันน์ (Boltzmann regression) รวมถึงจุดแข็งและข้อจำกัดของแต่ละเทคนิค วิธีการอนุพันธ์อันดับสองถูกนำมาใช้กับสารลดแรงตึงผิว 5 ชนิด แบ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (Anionic Surfactants) ได้แก่ โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS), โซเดียมดีออกซิโคเลต (NaDC) และโซเดียมเอ็น-ลอโรอิลซาร์โคซิเนต (SDDS) สารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ ได้แก่ โพลีเอทิลีนไกลคอล(8)โมโนสเตียเรต (PEG8-S) และ โพลีเอทิลีนไกลคอล(8)โมโนลอเรต (PEG8-L)

ผลการทดลองการวัดแรงตึงผิวการเปลี่ยนแปลงของแรงตึงผิวเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแสดงให้เห็นถึงจุดที่ไมเซลล์เริ่มก่อตัว ซึ่งสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ได้ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า สารลดแรงตึงผิวทุกชนิดสามารถวัดค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ได้ชัดเจนโดยวิธีนี้ การวัดการนำไฟฟ้าเทคนิคนี้สามารถใช้ได้กับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ (SDS, NaDC, SDDS) เนื่องจากสามารถนำไฟฟ้าได้ ส่วนสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุ (PEG8-L และ PEG8-S) ไม่สามารถตรวจวัดค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ได้ด้วยวิธีนี้ เนื่องจากไม่มีผลกระทบต่อ การนำไฟฟ้าของสารละลาย สเปกโทรสโกปีการเรืองแสง เทคนิคนี้แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงในสถานะแวดล้อมรอบๆ สารเรืองแสงไพรีนเมื่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวเพิ่มขึ้น โดยค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ถูกคำนวณจากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของการเรืองแสงที่แตกต่างกัน ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่ได้จากเทคนิคนี้ค่อนข้างสูงกว่าค่าที่คำนวณได้จากวิธีอื่น ๆ การวัดความหนาแน่น

การเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของสารละลายแสดงให้เห็นถึงการเกิดไมเซลล์เมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์สามารถคำนวณได้อย่างแม่นยำสำหรับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ และสเปกโทรสโกปีคลื่นเสียงความละเอียดสูง (High-resolution Ultrasound Spectroscopy) การวัดความเร็วเสียงและการลดทอนของเสียงในสารละลายแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อไมเซลล์เริ่มก่อตัว เทคนิคนี้ใช้ได้กับสารลดแรงตึงผิวชนิดประจุลบ โดยค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ สามารถคำนวณได้จากการเปลี่ยนแปลงของเสียง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการวัดแต่ละแบบสามารถคำนวณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่มีข้อจำกัดที่แตกต่างกัน โดยวิธีอนุพันธ์อันดับสองที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลสามารถนำไปใช้ได้กับทุกเทคนิค และให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำและเชื่อถือได้

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการศึกษาแรงดึงผิวของของเหลว เพื่อออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงดึงผิวของเหลว โดยใช้วิธีหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน และศึกษาผลของแรงดึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิว เพื่อคำนวณหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ สามารถดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

#### อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี

##### อุปกรณ์

1. เข็มฉีดยายี่ห้อนิโปร (Nipro hypodermic needle) เข็มเบอร์ 18 G x 1 นิ้ว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm เข็มฉีดยาผลิตจาก Stainless steel ชนิดใช้ครั้งเดียว
2. บิวเรตต์ ยี่ห้อ Witeg ผลิตจากประเทศเยอรมัน พร้อมก๊อกปิดทำจาก PTFE ความเที่ยงตรงระดับ Class A
3. ชุดขาตั้งและที่จับบิวเรตต์
4. โคมไฟและหลอดไฟ LED ขนาด 15 วัตต์
5. ไมโครปิเปต ยี่ห้อ Four E's scientific ประเทศจีน
6. อุปกรณ์เครื่องแก้วที่ใช้เตรียมสารละลาย ได้แก่ ขวดวัดปริมาตร, ปิเปต, บีกเกอร์และกระบอกตวง
7. คิวเวท เนื้อพลาสติก polystyrene (PS) ยี่ห้อ VWR ขนาด 2.5-4.0 mL

##### เครื่องมือ

1. สมาร์ทโฟน (Smartphone) ยี่ห้อ iPhone 13 กล้องความละเอียด 12 MP รูรับแสงขนาด  $f/1.6$  บันทึกวิดีโอระดับ 4K ที่ 60 fps
2. สมาร์ทโฟน (Smartphone) ยี่ห้อ iPhone 15 Pro Max กล้องความละเอียด 48 MP รูรับแสงขนาด  $f/1.78$  บันทึกวิดีโอระดับ 4K ที่ 60 fps
3. เลนส์มาโครสำหรับสมาร์ทโฟน (Macro lens) ยี่ห้อ Ulanzi Super ความยาวโฟกัส 75 mm โฟกัสใกล้สุด 1.5 cm กำลังขยายสูงสุด 10 เท่า ระยะโฟกัสสามารถถ่ายได้ในระยะ 1.57–2.95 inch จากวัตถุเคลื่อนด้วยสารลดการสะท้อนแสง รองรับการถ่ายภาพวัตถุขนาดเล็กในระดับไมโครเมตร
4. เครื่องวัดการดูดกลืนแสงของสาร UV-Vis Spectrophotometer รุ่น Agilent Cary 3500
5. เครื่องวัดการนำไฟฟ้า LabQuest Data Collector และ Conductivity Probe เป็นเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมาโดย Vernier
6. เครื่องกวนสาร (Magnetic stirrer hotplate) ยี่ห้อ heidolph

7. เครื่อง Sonicator รุ่น GT Sonic VGT-1613T
8. ไมโครมิเตอร์ (Micrometer) ยี่ห้อ INSIZE รุ่น 3203-25A

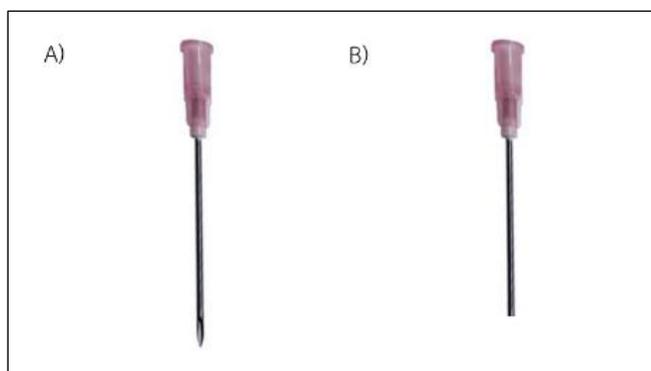
### สารเคมี

1. น้ำบริสุทธิ์ (Ultra-Pure System) คุณภาพน้ำระดับ Type I ยี่ห้อ Merck รุ่น Milli-Q ค่าความต้านทานไฟฟ้า 18.2 MΩ.cm ที่ 25 °C ค่าการนำไฟฟ้า < 2000 μs/cm
2. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (Sodium dodecyl sulfate, SDS) สูตรโมเลกุล C<sub>12</sub>H<sub>25</sub>NaO<sub>4</sub>S และมวลโมเลกุล 288.4 g/mol เป็นสารเคมีงานวิเคราะห์ ความบริสุทธิ์ 99% มีลักษณะเป็นผงสีขาว ผลิตจากบริษัท ซิกมา เคมีคอล จำกัด, ประเทศอเมริกา
3. เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (Cetyl trimethyl ammonium bromide, CTAB) สูตรโมเลกุล คือ C<sub>19</sub>H<sub>42</sub>BrN และมวลโมเลกุล 364.46 g/mol ความบริสุทธิ์ 98% ผลิตจากบริษัท ทีซีไอ จำกัด, ประเทศญี่ปุ่น
4. คริสตัลไวโอเลต (Crystal violet, CV) สูตรโมเลกุล คือ C<sub>25</sub>H<sub>30</sub>ClN<sub>3</sub> และมวลโมเลกุล 407.99 g/mol
5. เคอร์คูมิน (Curcumin) มีสูตรโมเลกุลเป็น C<sub>21</sub>H<sub>20</sub>O<sub>6</sub> มีมวลโมเลกุล 368.39 g/mol ผลิตจากบริษัท ทีซีไอ จำกัด, ประเทศญี่ปุ่น

### การเตรียมอุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมี

#### การเตรียมเข็มฉีดยาปลายทู่

เข็มปลายทู่เหมาะในการวัดแรงตึงผิวด้วยวิธีหยดของเหลว เนื่องจากให้หยดที่สม่ำเสมอและควบคุมได้ง่ายกว่าช่วยลดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง ดังนั้นจึงนำเข็มฉีดยาเบอร์ 18 g x1 inch ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.2 mm ตัดปลายแหลมออกด้วยคีม แล้วใช้กระดาษทรายเบอร์ 0 ขัดปลายเข็มฉีดยาโดยวางเข็มฉีดยาตั้งฉากกับกระดาษทราย จนปลายเข็มฉีดยาเป็นปลายทู่หน้าตัดเป็นเข็มฉีดยาเป็นวงกลม ดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 (A) เข็มฉีดยาปลายแหลมและ (B) เข็มฉีดยาปลายทู่ที่ใช้ในการทดลอง

### การเตรียมสารละลายเพื่อศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

ในการศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ มีการเตรียมสารละลายที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ดังนี้

การเตรียมสารละลายสต็อกโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 M โดยชั่งสารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต 1.19 g ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลายและปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL

การเตรียมสารละลายสต็อกเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.01 M โดยชั่งสารเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ 0.90 g ใช้น้ำบริสุทธิ์เป็นตัวทำละลาย และปรับปริมาตรในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 mL

### รายละเอียดสมาร์ตโฟนที่ใช้ในการถ่ายภาพ

การทดลองในวิจัยนี้ใช้สมาร์ตโฟน 3 แบบ ได้แก่ สมาร์ตโฟน L (Low) ใช้ iPhone 13, สมาร์ตโฟน LM (Low+Macro) ใช้ iPhone 13 ร่วมกับเลนส์ Ulanzi Super Macro Lens 75 mm และสมาร์ตโฟน H ที่ใช้ iPhone 15 Pro Max เพื่อเปรียบเทียบสมบัติสมาร์ตโฟนที่เหมาะสมในการหาค่าแรงตึงผิว โดยใช้วิธีหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ตโฟน ดังนี้

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติของสมาร์ตโฟนทั้ง 3 แบบ (L, LM และ H)

เซนเซอร์ กล้อง	สมาร์ต โฟน	กล้อง	การซูม(เท่า)	วิดีโอ (pixel)
L (Low)	iPhone 13	กล้องหลัก: 12MP, $f/1.6$ กล้องอัลตราไวด์ 12MP, $f/2.4$	0.5x, 1x, Optical 5x digital	3,840x2,160 (4K) ที่ 60 fps
LM (Low+Macro)	macro lens	เลนส์ Ulanzi Super Macro Lens 75 mm	10x	-
H (High)	iPhone 15 pro max	กล้องหลัก: 48MP, $f/1.78$ กล้องอัลตราไวด์ 12MP, $f/2.2$ กล้องเทเลโฟโต้ 12MP, $f/2.8$	0.5x, 1x, 2x, 5x optical 25x digital	3,840x2,160 (4K) ที่ 60 fps

จากการเปรียบเทียบสมบัติของสมาร์ตโฟนทั้ง 3 รุ่น (L, LM, และ H) ในการทดลองหาค่าแรงตึงผิวโดยใช้การถ่ายภาพหยดของเหลว พบว่าสมาร์ตโฟนทั้ง 3 รุ่นสามารถบันทึกวิดีโอในความ

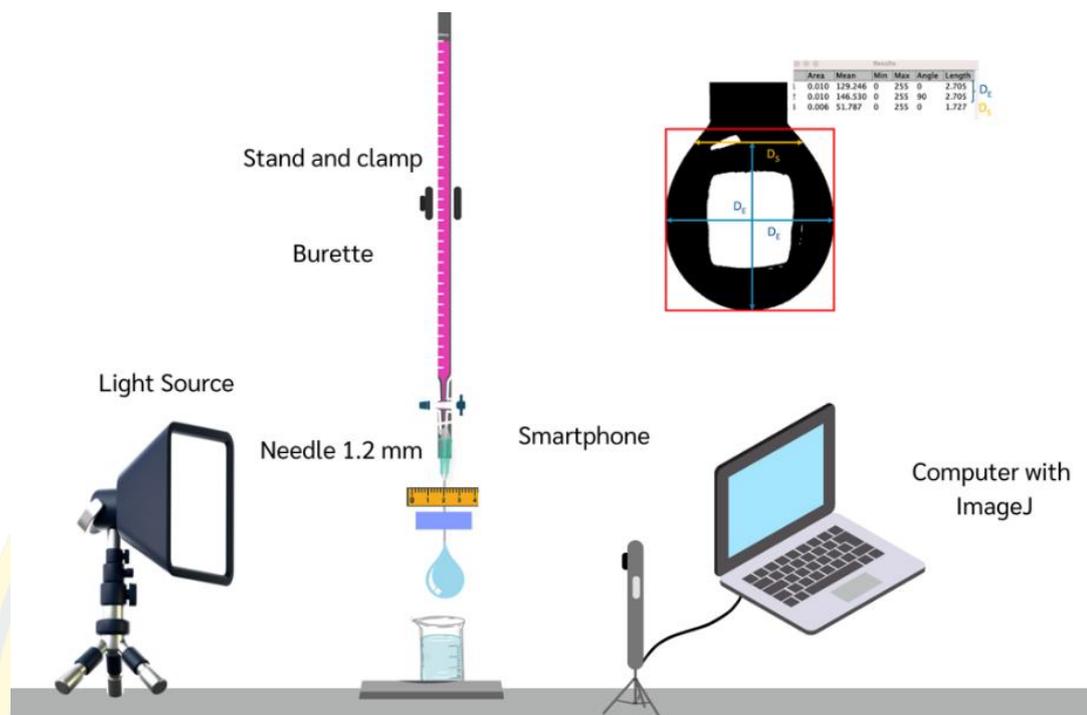
ละเอียด 3,840x2,160 pixel (4K) ที่ 60 เฟรมต่อวินาที ซึ่งถือเป็นมาตรฐานเดียวกัน แตกต่างที่ เซนเซอร์กล้องและความสามารถในการซูม สำหรับสมาร์ทโฟน L ซึ่งใช้ iPhone 13 มีกล้องหลักความละเอียด 12 MP และกล้องอัลตราไวด์ 12 MP โดยสามารถซูมแบบออปติคัลได้เพียง 1 เท่าซึ่งหมายความว่าวัตถุจะถูกขยายได้เพียงเล็กน้อยโดยไม่สูญเสียความคมชัด ในทางกลับกันสมาร์ทโฟน H ที่ใช้ iPhone 15 Pro Max มีกล้องหลักความละเอียดสูงถึง 48 MP และมีกล้องอัลตราไวด์และ เทเลโฟโต้ รวมถึงสามารถซูมแบบออปติคัลได้ถึง 5 เท่า และสมาร์ทโฟน LM ใช้ iPhone 13 ร่วมกับ เลนส์มาโครซึ่งช่วยให้สามารถถ่ายภาพในระยะใกล้ได้มากขึ้นถึง 10 เท่า

### **การออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิวหน้า โดยวิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วย สมาร์ทโฟน**

#### **1) การเทียบมาตรฐานกับวัตถุอ้างอิงขนาดไม้บรรทัด, กระดาษและขนาดเข็มฉีดยา**

##### **1. การติดตั้งชุดการทดลอง**

ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง บิวเรตต์ที่ติดตั้งกับชุดขาตั้งและที่จับบิวเรตต์ โดยติดตั้งเข็มฉีดยาขนาด 1.2 mm ที่ปลายบิวเรตต์เพื่อใช้เป็นหัวจ่ายของเหลว ติดปลายเข็มฉีดยาด้วยไม้บรรทัดและกระดาษเพื่อเป็นวัตถุอ้างอิงในการเทียบมาตรฐานวางสมาร์ทโฟนในตำแหน่งที่เหมาะสมกับการบันทึกภาพ โดยกล้องของสมาร์ทโฟน (L, LM และ H) อยู่ในระดับเดียวกับปลายของเข็มฉีดยา ดังภาพที่ 34



ภาพที่ 34 การติดตั้งชุดการทดลอง

2. บันทึกข้อมูลและทำการบันทึกวิดีโอการหยดของของเหลว

ทำการบันทึกอุณหภูมิของน้ำก่อนเริ่มการทดลอง ตั้งค่าอัตราการหยดของของเหลวเป็น 2 วินาทีต่อหยด ปรับไฟสก็อตให้ภาพคมชัดเพื่อให้สามารถมองเห็นขอบของหยดน้ำอย่างชัดเจน จากนั้นบันทึกวิดีโอต่อเนื่องจำนวน 5 หยด โดยไม่นับหยดแรกเพราะอาจเกิดความคลาดเคลื่อน

3. กำหนดร้อยละของเวลาต่อหยด

นำบันทึกวิดีโอการหยดของของเหลว มาใช้ในการกำหนดร้อยละของเวลาต่อหยด ซึ่งกำหนดให้ 0% หมายถึง เวลาที่หยดน้ำหยดเต็มกำลังจะหลุดออกจากเข็ม และ 100% หมายถึง เวลาที่หยดน้ำกำลังจะหลุดออกจากปลายเข็ม สำหรับการวัดร้อยละของเวลาต่อหยดที่  $n$  % สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการต่อไปนี้

$$\text{ร้อยละของเวลาต่อหยดที่ } n\% = \frac{(t_m - t_{m-1}) \times n}{100} \quad (42)$$

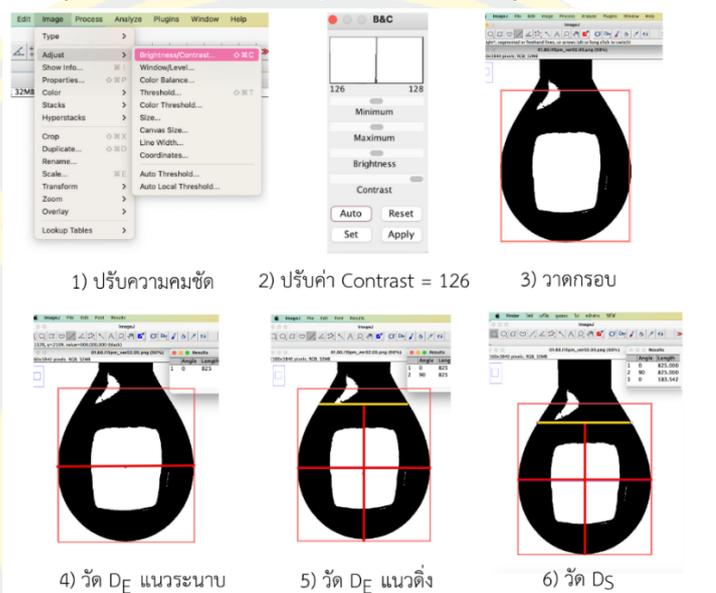
โดยที่  $n$  คือ ขนาดเป็นร้อยละของเวลาต่อหยด

$t_m$  คือ เวลาที่หยดน้ำหยดที่  $m$  กำลังจะหลุดออกจากปลายเข็ม

$t_{m-1}$  คือ เวลาเริ่มต้นเมื่อหยดน้ำหยดที่  $m-1$  กำลังจะหลุดออกจากปลายเข็ม

4. บันทึกขนาด  $D_E$  และ  $D_S$  ของหยดน้ำ

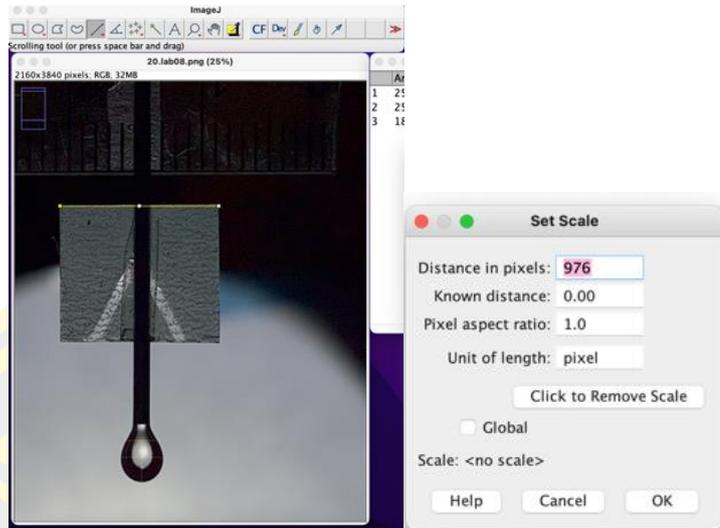
นำภาพหยดน้ำเข้าโปรแกรม ImageJ โดยเลือกไฟล์ภาพที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นปรับความคมชัดของภาพโดยเลือกเมนู Image > Adjust > Brightness/Contrast และปรับค่า Contrast = 126 จากนั้นวาดกรอบรอบหยดน้ำด้วยเครื่องมือ Rectangle เพื่อกำหนดขอบเขตหยดน้ำ และทำการวัดขนาดหยดน้ำด้วยเครื่องมือ Straight และทำการวัดระยะทาง  $D_E$  เส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุด และ  $D_S$  เส้นผ่านศูนย์กลางที่ตำแหน่งต่ำสุดของหยดน้ำที่อยู่ห่างเป็นระยะเท่ากับ  $D_E$



ภาพที่ 35 วิธีการวิเคราะห์ภาพโดยใช้โปรแกรม ImageJ

#### 5. การแปลงค่าจากพิกเซลเป็นมิลลิเมตรโดยการเทียบมาตราส่วนกับวัตถุอ้างอิง

นำข้อมูลระยะทาง  $D_E$  และ  $D_S$  ที่ได้จากการวัดในหน่วยพิกเซลแปลงเป็นหน่วยมิลลิเมตร ทำการตั้งค่ามาตราส่วนโดยหาอัตราส่วนระหว่างขนาดวัตถุ/ขนาดภาพ (pixel/mm) ของวัตถุอ้างอิง ได้แก่ ไม้บรรทัด, กระดาษ และขนาดเข็มฉีดยา วัดโดยใช้ไมโครมิเตอร์ 5 ครั้งแล้วหาค่าเฉลี่ย จากนั้นวัดขนาดภาพ ด้วยโปรแกรม ImageJ โดยเลือกที่ไอคอน Straight วัดความยาวของวัตถุอ้างอิงที่ต้องการเทียบ เลือกกดไอคอน Analyze แล้วเลือก Measure ดังภาพที่ 36



ภาพที่ 36 การเทียบมาตรฐานของโปรแกรม ImageJ

#### 6. การคำนวณค่าแรงตึงผิว ( $\gamma$ )

เมื่อได้ข้อมูล  $D_E$  และ  $D_S$  ในหน่วยมิลลิเมตร แล้วจึงนำมาใช้คำนวณค่าแรงตึงผิวของน้ำโดยใช้สมการ Young-Laplace ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับแรงโน้มถ่วง โดยคำนวณค่าแรงตึงผิวจากสมการ

$$\gamma = \frac{\Delta \rho g D_E^2}{H} \quad (43)$$

โดยที่  $\gamma$  คือ แรงตึงผิว มีหน่วยเป็น N/m

$\Delta \rho$  คือ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำและอากาศ มีหน่วยเป็น  $\text{kg/m}^3$

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง มีหน่วยเป็น  $9.81 \text{ m/s}^2$

$H$  คือ ฟังก์ชันของอัตราส่วน  $D_S/D_E$

$D_E$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุดของหยดน้ำ มีหน่วยเป็น mm

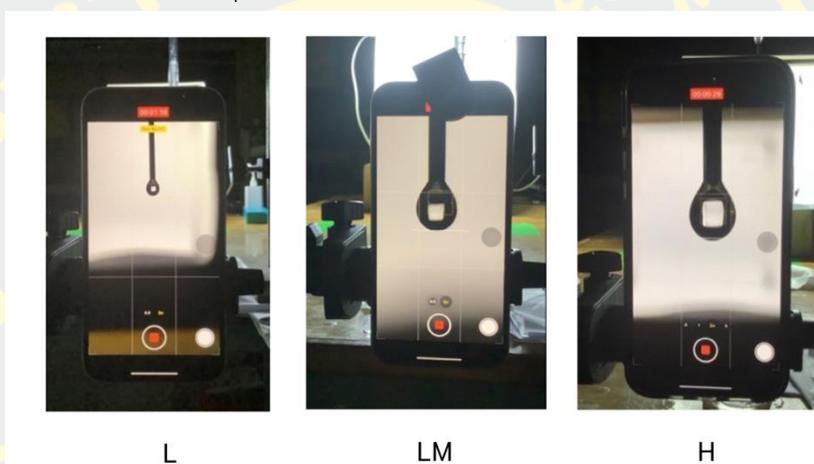
$D_S$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ตำแหน่งต่ำสุดของหยดน้ำที่อยู่ห่างเป็นระยะเท่ากับ  $D_E$  มีหน่วยเป็น mm

$$\frac{1}{H} = a \left( \frac{D_S}{D_E} \right)^b \quad (44)$$

โดยที่ค่าคงที่  $a$  และ  $b$  เริ่มต้นที่ 0.345 และ -2.54 ตามงานวิจัยของ Goy et al. (2017) จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองมาแทนค่าในสมการเพื่อคำนวณหาค่าแรงตึงผิวของน้ำ เปรียบเทียบค่าแรงตึงผิวที่ได้จากการเทียบมาตรฐานกับวัตถุอ้างอิงทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ไม้บรรทัด, กระดาษและเข็มกับค่าแรงตึงผิวของน้ำจากทฤษฎี

## 2) เปรียบเทียบสมาร์ทโฟนที่เหมาะสมในการหาค่าแรงตึงผิว

ในการทดลองนี้ มีการเปรียบเทียบสมาร์ทโฟนที่เหมาะสมในการใช้หาค่าแรงตึงผิวของเหลว โดยใช้สมาร์ทโฟน 3 รุ่น ได้แก่ L, LM และ H เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพและความแม่นยำของกล้องในแต่ละรุ่นในการวัดค่าแรงตึงผิวด้วยวิธีหยดของเหลว การทดลองนี้จะดำเนินการตามขั้นตอนเดียวกับการทดลองในหัวข้อการเลือกเทียบมาตราส่วนกับวัตถุอ้างอิง แต่ทำการเปลี่ยนกล้องสมาร์ทโฟนเป็นรุ่นที่ระบุไว้ (L, LM และ H) เพื่อติดตั้งและบันทึกวิดีโอสำหรับการวัดขนาดและรูปร่างของหยดน้ำอย่างละเอียด ทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากสมาร์ทโฟนแต่ละรุ่นเพื่อตรวจสอบสมาร์ทโฟนให้ค่าที่แม่นยำและคมชัดที่สุดในการคำนวณแรงตึงผิว



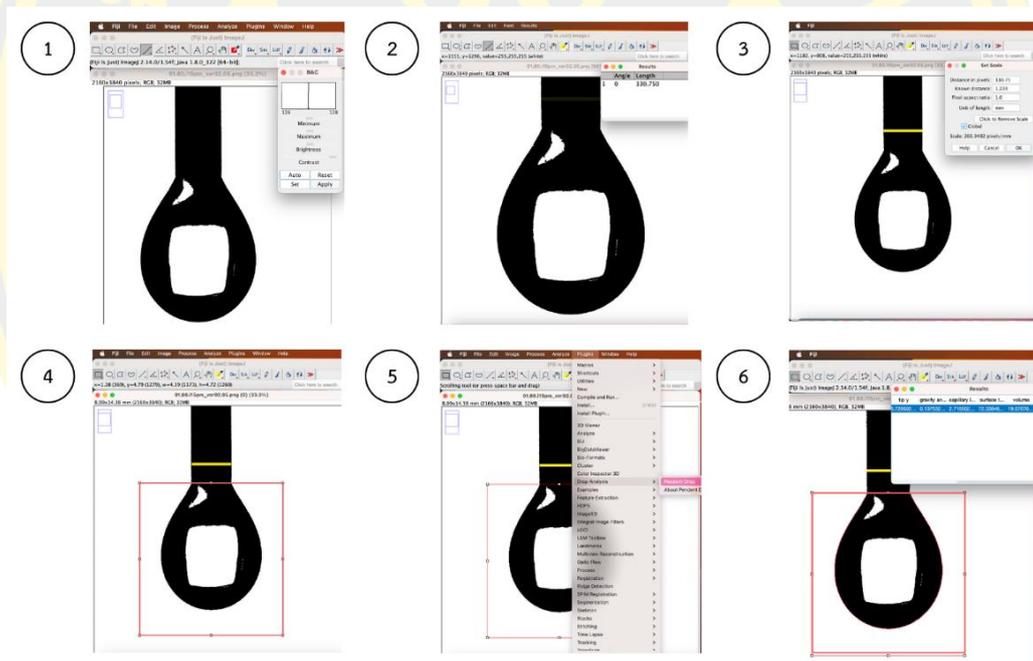
ภาพที่ 37 แสดงการตั้งค่าการติดตั้งกล้องของสมาร์ทโฟน 3 แบบ (L, LM, และ H)

จากภาพที่ 37 การติดตั้งกล้องสมาร์ทโฟนทั้ง 3 รุ่น (L, LM และ H) สำหรับการถ่ายภาพวิดีโอของหยดน้ำเพื่อวัดแรงตึงผิว โดยแสดงรายละเอียดการจัดวางกล้องเพื่อให้ได้มุมมองที่คมชัดและเหมาะสมที่สุดในการบันทึกภาพหยดน้ำ พร้อมทั้งปรับตำแหน่งของกล้องให้สามารถบันทึกวิดีโอหยดน้ำที่เกิดจากปลายเข็มได้อย่างชัดเจนเพื่อการวิเคราะห์ที่แม่นยำ

เปรียบเทียบค่าแรงตึงผิวที่ได้จากสมาร์ทโฟนทั้ง 3 รุ่น กับค่าแรงตึงผิวที่วิเคราะห์โดยใช้ซอฟต์แวร์ ImageJ ร่วมกับปลั๊กอิน Pendant Drop ซึ่งพัฒนาโดย A. Daerr et al. (2016) เพื่อตรวจวัดความตึงผิวตามโปรไฟล์ของภาพ ซึ่งในงานวิจัยนี้เรียกวิธีนี้ว่า วิธี A.D. เมื่อได้ถ่ายภาพหยดน้ำที่แล้ว ภาพนั้นจะถูกป้อนเข้าไปในซอฟต์แวร์ ImageJ เพื่อทำการวิเคราะห์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. เปิดภาพที่ถ่ายไว้ ปรับความคมชัดของภาพ เลือกเมนู Image > Adjust > Brightness/Contrast และปรับค่า Contrast = 126
2. เลือกเครื่องมือ Straight วัดขนาดของเข็มฉีดยา

3. เทียบสเกลจากพิกเซลเป็นมิลลิเมตร โดยใช้ความกว้างของเส้นผ่านศูนย์กลางเข็มที่วัดด้วยไมโครมิเตอร์ใช้เป็นขนาดอ้างอิง เลือก Analyze → Set Scale
4. วาดกรอบรอบหยดน้ำด้วยเครื่องมือ Rectangle เพื่อกำหนดขอบเขตหยดน้ำ เพื่อลดพื้นที่ในการคำนวณควรเลือกเฉพาะหยดน้ำไม่ให้มีส่วนของเข็มติดมาด้วย
5. คลิกที่เมนู Plugin → Drop Analysis → Pendent Drop เมื่อหน้าต่างปรากฏขึ้นมาในช่อง Density contrast times g ให้ใส่ค่า 9.81 โปรไฟล์ของหยดน้ำในสีแดงจะแสดงตามพารามิเตอร์ที่ระบุในหน้าต่าง และทำหน้าที่เป็นการตั้งค่าเริ่มต้นสำหรับอัลกอริทึม ส่วนโปรไฟล์ในสีน้ำเงินจะถูกตรวจจับโดยซอฟต์แวร์
6. คลิก OK เมื่อเสร็จสิ้น โปรไฟล์สีแดงจะตรงกับโปรไฟล์จริงของหยดน้ำ และจะแสดงผลพร้อมที่แสดงในรูปด้านล่าง



ภาพที่ 38 วิธีการวัดแรงตึงผิวด้วยการใช้โปรแกรม ImageJ ปลั๊กอิน Pendent Drop

### 3) การหาร้อยละของเวลาต่อหยดที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูลหาค่าแรงตึงผิว

ทำการคำนวณค่าแรงตึงผิวจากภาพถ่ายที่แสดงรูปร่างของหยดน้ำในช่วงเวลาต่าง ๆ และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างรูปร่างหยดน้ำแต่ละช่วงเวลาในการหยดและค่าแรงตึงผิว จากนั้นเลือกรูปร่างหยดน้ำในแต่ละช่วงเวลาในการหยดที่ให้ค่าแรงตึงผิวใกล้เคียงกับค่าจริงที่สุด และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่แม่นยำและเชื่อถือได้

#### 4) ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความพรำมัวของภาพ (Pixelation)

เนื่องจากการคำนวณค่าแรงดึงผิวจากภาพถ่ายของหยดน้ำ อาจเกิดการพรำมัวหรือภาพไม่คมชัด จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาผลกระทบของความพรำมัวต่อการวัดระยะ  $D_E$  และ  $D_S$  ซึ่งสามารถดำเนินการดังนี้

การศึกษาความคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะ  $D_E$  เลือกภาพที่ทำการวัดระยะ  $D_E$  และระยะ  $D_S$  เป็นค่ามาตรฐาน จากนั้นทำการทดสอบผลกระทบจากการปรับระยะ  $D_E$  โดยเพิ่มทีละ 1 pixel และบันทึกค่า  $D_S$  ที่เปลี่ยนแปลงไป ทำการทดลองซ้ำโดยปรับระยะ  $D_E$  เพิ่มขึ้นและลดลง 1-4 pixel จากค่ามาตรฐาน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาแรงดึงผิวใหม่ และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

การศึกษาความคลาดเคลื่อนจากการวัดระยะ  $D_S$  ทำการเลือกภาพที่มีการวัดระยะ  $D_E$  และระยะ  $D_S$  เป็นค่ามาตรฐาน จากนั้นทำการทดสอบโดยปรับค่าระยะ  $D_S$  เพิ่มขึ้นและลดลงทีละ 1 - 4 pixel จากค่ามาตรฐาน จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณหาแรงดึงผิวใหม่และวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้น

#### ศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงดึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

##### 1) ศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์จากวิธีการหาค่าแรงดึงผิว โดยใช้วิธีหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน

1. เตรียมสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ในช่วงความเข้มข้นตั้งแต่ 1.0 - 8.0 mM ปริมาตร 25 mL โดยเพิ่มความเข้มข้นทีละ 1.0 mM

2. ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับทดลองหาค่าแรงดึงผิว โดยใช้วิธีหยดของเหลวและถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟนตามที่แสดงในภาพที่ 34 การติดตั้งชุดการทดลอง

3. ปรับความเร็วในการหยดของสารละลายให้เป็นอัตรา 2 วินาทีต่อหยด เพื่อให้สารลดแรงดึงผิวมีเวลาในการดูดซับได้เต็มที่

4. ปรับความคมชัดของการถ่ายวิดีโอในสมาร์ทโฟนให้ชัดเจน เพื่อให้เห็นขอบของหยดน้ำอย่างชัดเจน บันทึกวิดีโอการหยดน้ำ 5 หยด แต่ไม่รวมการบันทึกหยดแรกเพราะอาจมีความคลาดเคลื่อน

5. นำวิดีโอที่บันทึกมาและบันทึกเวลาที่หยดน้ำเริ่มหยดและสิ้นสุด เลือกช่วงขนาดหยดน้ำที่เหมาะสมจากการศึกษาในการทดลองข้างต้น เพื่อบันทึกภาพของหยดน้ำ 5 หยดต่อหนึ่งความเข้มข้น

6. ใช้โปรแกรม ImageJ เปิดภาพที่บันทึกและปรับความคมชัด โดยไปที่ Brightness/Contrast และตั้งค่า Contrast เป็น 126 จากนั้นใช้เครื่องมือ Rectangle วาดกรอบรอบหยดน้ำเพื่อกำหนดขอบเขต แล้วใช้เครื่องมือ Straight วัดระยะ  $D_E$  และ  $D_S$  ของหยดน้ำ

7. แปลงค่าที่ได้จากการวัดในหน่วยพิกเซลเป็นมิลลิเมตร โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มฉีดยา 5 ครั้ง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ย จากนั้นวัดขนาดเข็มในภาพด้วยโปรแกรม ImageJ เทียบมาตราส่วน โดยเปรียบเทียบขนาดเข็มจากการวัดจริงกับภาพในหน่วยพิกเซล

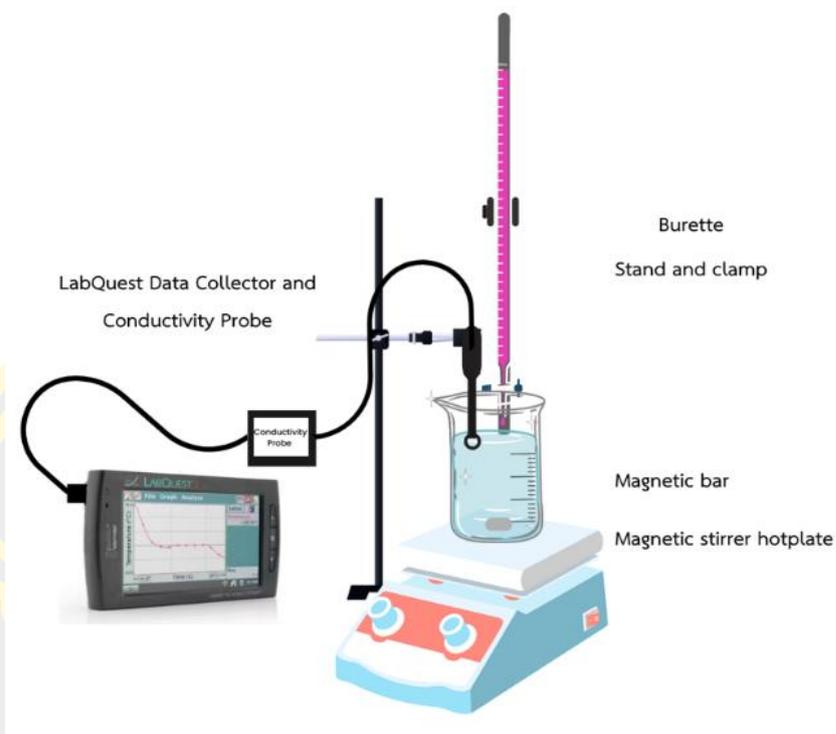
8. ใช้ข้อมูล  $D_E$  และ  $D_S$  ที่ได้แปลงเป็นมิลลิเมตร เพื่อคำนวณแรงตึงผิวของน้ำโดยใช้สมการ Young-Laplace ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วง

9. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโอดีเตลซัลเฟตในแต่ละระดับความเข้มข้น เพื่อหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

10. ทำซ้ำขั้นตอนที่ 1-9 โดยใช้สารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.1 - 2.0 mM โดยเพิ่มความเข้มข้นครั้งละ 0.1 mM และบันทึกผลการเปลี่ยนแปลงในแต่ละความเข้มข้น

## 2) ศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้วิธีการหาค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity)

1. เตรียมสารละลายโซเดียมโอดีเตลซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mM ปริมาตร 100 mL
2. เตรียมเครื่องวัดการนำไฟฟ้า LabQuest Data Collector และ Conductivity Probe
3. ติดตั้งอุปกรณ์การทดลอง ติดตั้งบิวเรตต์เข้ากับชุดขาตั้งและที่จับบิวเรตต์ สำหรับใช้เติมสารละลายโซเดียมโอดีเตลซัลเฟต เตรียมน้ำกลั่นปริมาตร 50 mL ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 400 mL พร้อมใส่แท่งแม่เหล็กกวนสาร จากนั้นวางบีกเกอร์บนเครื่องกวนสารและเปิดเครื่องให้แท่งแม่เหล็กทำงานอย่างสม่ำเสมอ ติดตั้งเครื่อง LabQuest Data Collector และ Conductivity Probe เพื่อวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 อุปกรณ์การทดลองการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายลดแรงดึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ

4. ทำการวัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายตัวอย่างโดยการหมุนก๊อกบิวเรตต์เทสารละลายลงในบีกเกอร์ครึ่งละ 0.5 mL เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายทีละน้อย จากนั้นใช้ Conductivity Probe วัดค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายแต่ละความเข้มข้น บันทึกค่าการนำไฟฟ้าในแต่ละจุด

5. นำค่าการนำไฟฟ้าที่วัดได้ในแต่ละความเข้มข้นมาพล็อตกราฟ โดยแกน X แสดงความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิว และแกน Y แสดงค่าการนำไฟฟ้า

6. หาจุดที่กราฟมีการเปลี่ยนแปลงจากการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของการนำไฟฟ้าเป็นการเพิ่มขึ้นที่ช้าลง ซึ่งจุดนี้คือตำแหน่งที่เกิดการรวมตัวของไมเซลล์

7. ทำการทดลองซ้ำตามขั้นตอนที่ 1-6 โดยเปลี่ยนเป็นสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

3) ศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

#### สารละลายโซเดียมโตนเดซิลซัลเฟต

1. การวิเคราะห์หาค่าดูดกลืนแสงของสารละลายสีย้อมคริสตัลไวโอเลต (CV) ซึ่งสีย้อมคริสตัลไวโอเลต จำนวน 0.0050 g ละลาย ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL จะได้สารละลายคริสตัลไวโอเลตที่มีความเข้มข้นเท่ากับ  $2.45 \times 10^{-4}$  M จากนั้นทำการเจือจางลงใน

ขวดวัดปริมาตร 10 mL และปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำกลั่น นำสารละลายสีข้อมคริสตัลไวโอเล็ต ทั้ง 5 ความเข้มข้น ดังนี้ 2.45  $\mu\text{M}$ , 4.90  $\mu\text{M}$ , 7.35  $\mu\text{M}$ , 9.80  $\mu\text{M}$  และ 12.5  $\mu\text{M}$  ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 nm ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

2. การศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ย้อมด้วยคริสตัลไวโอเล็ตโดยใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เจือจางสารละลายสต็อกโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 0.05 M ที่ปริมาตร 0.5-8.0 mL โดยเพิ่มทีละ 0.5 mL และสารละลายสีข้อมคริสตัลไวโอเล็ตความเข้มข้น 59  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 5.00 mL ผสมลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL และทำการปรับปริมาตรสารละลายผสมด้วยน้ำบริสุทธิ์ ปริมาตรของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและสารละลายสีข้อมคริสตัลไวโอเล็ตที่ปิเปต ทั้ง 16 ขวด ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 nm ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและค่าการดูดกลืนแสง หาจุดตัดระหว่างสองส่วนของกราฟและสรุปค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่ได้จากการทดลอง

#### สารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

1. การวิเคราะห์หาค่าดูดกลืนแสงของสารละลายสีข้อมเคอร์คูมิน (Curcumin) ซึ่งสีข้อมเคอร์คูมิน จำนวน 0.0012 g ละลาย ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 mL จะได้สารละลายเคอร์คูมินที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 13 mM จากนั้นทำการเจือจาง ลงในขวดวัดปริมาตร 10 mL และปรับปริมาตรสารละลายด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายเคอร์คูมินที่มีความเข้มข้นเท่ากับ 2.45  $\mu\text{M}$ , 4.90  $\mu\text{M}$ , 7.35  $\mu\text{M}$ , 9.80  $\mu\text{M}$  และ 12.5  $\mu\text{M}$  นำสารละลายสีข้อมเคอร์คูมินทั้ง 5 ความเข้มข้นไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 nm ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์และวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสง

2. การศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่ย้อมด้วยเคอร์คูมินโดยใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์เจือจางสารละลายสต็อกเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ความเข้มข้น 0.05 M ที่ปริมาตร 0.5-8 mL โดยเพิ่มทีละ 0.5 mL และสารละลายสีข้อมเคอร์คูมินความเข้มข้น 59  $\mu\text{M}$  ปริมาตร 5.00 mL คงที่ ผสมลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 25 mL และทำการปรับปริมาตรสารละลายผสมด้วยน้ำบริสุทธิ์ ปริมาตรของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ และสารละลายสีข้อมเคอร์คูมินที่ปิเปตทั้ง 12 ขวด ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 300-800 nm ด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์และค่าการดูดกลืนแสง หาจุดตัดระหว่างสองส่วนของกราฟและสรุปค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่ได้จากการทดลอง

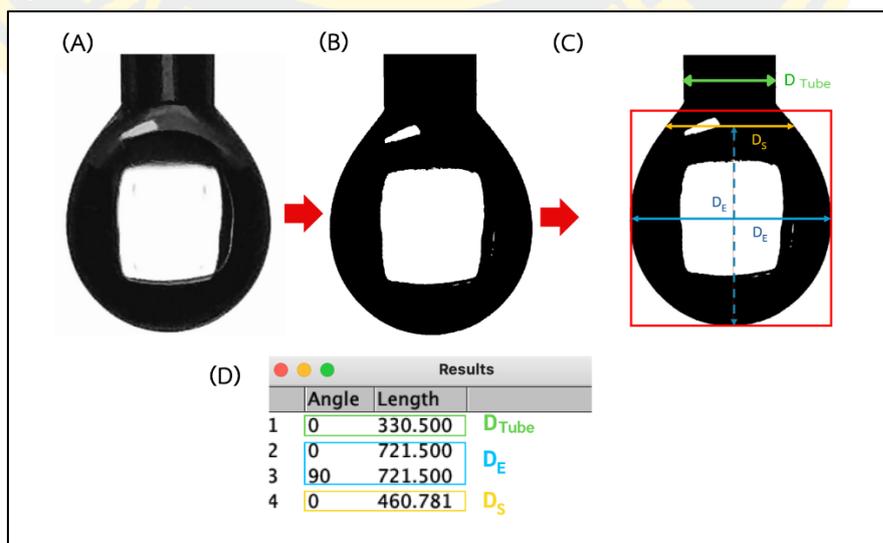
## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปราย

ในการศึกษาแรงตึงผิวของเหลวและความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว เพื่อ ออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิวของเหลว โดยใช้วิธีหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน และเพื่อศึกษาผลของแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และคำนวณหาค่าความเข้มข้น วิกฤตไมเซลล์ ผลการศึกษาดังนี้

#### การประมวลผลภาพถ่ายหยดน้ำ และการคำนวณค่าแรงตึงผิว

การศึกษาแรงตึงผิวของของเหลวด้วยวิธีการหยดของเหลว (Pendant Drop method) โดยใช้สมาร์ทโฟน 3 แบบ ได้แก่ ได้แก่ สมาร์ทโฟน L (Low) ใช้ iPhone 13, สมาร์ทโฟน LM (Low+Macro) ใช้ iPhone 13 ร่วมกับเลนส์มาโครและสมาร์ทโฟน H ใช้ iPhone 15 Pro Max ในการถ่ายวิดีโอรูปร่างหยดน้ำแล้วนำมาบันทึกภาพ เพื่อคำนวณค่าแรงตึงผิวตามสมการ Young-Laplace โดยหลักการคำนวณความสมมาตรของของเหลว โดยถ่ายวิดีโอแล้วบันทึกภาพหยดน้ำแต่ละ ช่วงเวลา จากนั้นนำมาวัดขนาดของรูปร่างหยดน้ำด้วยโปรแกรม ImageJ หรือ Microsoft Paint กำหนดนิยามให้  $D_E$  และ  $D_S$  ดังนี้  $D_E$  หมายถึงระยะที่กว้างที่สุดของขนาดหยดน้ำและ  $D_S$  หมายถึง ระยะความกว้างของหยดน้ำที่วัดจากระดับความสูงของกันหยดถึงระยะ  $D_E$  บันทึกข้อมูลในหน่วย pixel ต้องระวังเรื่องมุมในการวัดระยะ  $D_E$  และ  $D_S$  เนื่องจากมุมที่คลาดเคลื่อนส่งผลต่อระยะ  $D_E$  และ  $D_S$  โดยกำหนดให้  $D_E$  และ  $D_S$  แนวระดับวัดค่ามุมเท่ากับ  $0^\circ$  และระยะความกว้างของหยดน้ำที่วัดจากระดับความสูงของกันหยดถึงระยะ  $D_E$  วัดค่ามุม เท่ากับ  $90^\circ$



ภาพที่ 40 ตัวอย่างหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดยสมาร์ทโฟน H (A) ภาพก่อนปรับคอนทราสต์ (B) ภาพหลังปรับคอนทราสต์ (C) การวัดระยะ  $D_{Tube}$ ,  $D_E$  และ  $D_S$  (D) ตัวอย่างผลการวัดมุมและระยะ

เพื่อวิเคราะห์ภาพหยดน้ำที่ถูกบันทึกจากวิดีโอที่ถ่ายด้วยสมาร์ทโฟน H จากภาพที่ 40 แสดงตัวอย่างหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดยสมาร์ทโฟน H ภาพ 40(A) ภาพที่ได้จากการบันทึกคลิปวิดีโอ โดยยังก่อนปรับคอนทราสต์จะสังเกตเห็นว่าภาพจะไม่คมชัดเห็นขอบหยดน้ำไม่ชัดเจน (B) ภาพหลังปรับคอนทราสต์ภาพจะคมชัดและเห็นขอบหยดน้ำชัดเจนขึ้น (C) การวัดระยะ  $D_{\text{Tube}}$ ,  $D_E$  และ  $D_S$  (D) ตัวอย่างผลการวัดมุมและระยะ  $D_{\text{Tube}}$ ,  $D_E$  และ  $D_S$  ด้วยใช้โปรแกรม ImageJ การวัดนี้เป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการคำนวณค่าแรงตึงผิวของหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดยสมาร์ทโฟน H โดยข้อมูลที่ได้จากการวัดขนาดหยดน้ำจะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์แรงตึงผิว โดยการคำนวณและความกว้างของหยดน้ำ การใช้เทคโนโลยีการถ่ายภาพร่วมกับโปรแกรมวิเคราะห์ภาพ ImageJ สามารถเพิ่มความแม่นยำในการคำนวณแรงตึงผิวของของเหลว

จากภาพที่ 40 ตัวอย่างการวัดระยะ  $D_{\text{Tube}} = 330.50$  pixel,  $D_E = 721.50$  pixel และ  $D_S = 460.78$  pixel ของหยดน้ำขนาด 50% ถ่ายวิดีโอโดยสมาร์ทโฟน ค่าคำนวณแรงตึงผิวของของเหลว ดังนี้

- 1) คำนวณมาตราส่วนโดยใช้เข็มเป็นวัตถุอ้างอิง ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{มาตราส่วน} &= \frac{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาพเข็ม (pixel)}}{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มที่วัดจริง (mm)}} \\ &= \frac{330.5 \text{ pixel}}{1.239 \text{ mm}} \\ &= 266.75 \text{ pixel/mm} \end{aligned}$$

- 2) แปลงระยะ  $D_E = 721.50$  pixel และ  $D_S = 460.78$  pixel ของหยดน้ำหน่วย pixel เป็น mm โดยใช้มาตราส่วน ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ระยะ } D_E &= \frac{\text{ระยะ } D_E \text{ (pixel)}}{\text{มาตราส่วน (pixel/mm)}} \\ &= \frac{721.50 \text{ pixel}}{266.75 \text{ pixel/mm}} \\ &= 2.705 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะ } D_S &= \frac{\text{ระยะ } D_S \text{ (pixel)}}{\text{มาตราส่วน (pixel/mm)}} \\ &= \frac{460.78 \text{ pixel}}{266.75 \text{ pixel/mm}} \\ &= 1.727 \text{ mm} \end{aligned}$$

จากตัวอย่างการวัดระยะ  $D_E = 2.705 \text{ mm}$  และ  $D_S = 1.727 \text{ mm}$  ของหยดน้ำขนาด 50% ถ่ายวิดีโอโดยสมาร์ทโฟน H สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\frac{1}{H} = a \left( \frac{D_S}{D_E} \right)^b$$

$$\frac{1}{H} = 0.345 \left( \frac{1.727 \text{ mm}}{2.705 \text{ mm}} \right)^{-2.5}$$

$$\frac{1}{H} = 1.059$$

จากสมการ Young Laplace  $\gamma = \frac{\Delta p g D_E^2}{H}$

แทนค่า  $\gamma = \frac{(998.708 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) \times (9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \times (2.705 \text{ mm})^2}{1.059}$

$$\gamma = 0.075917 \text{ N/m หรือ } 75.917 \text{ mN/m}$$

จากตัวอย่างระยะ  $D_E = 2.705 \text{ mm}$  และ  $D_S = 1.727 \text{ mm}$  ของหยดน้ำขนาด 50% ถ่ายวิดีโอโดยสมาร์ทโฟน H นำมาคำนวณโดยใช้สมการ Young-Laplace ได้ค่าแรงตึงผิวของน้ำเท่ากับ 75.917 mN/m

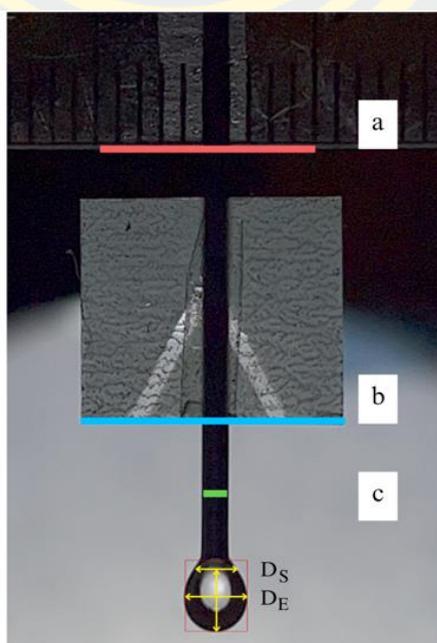
การศึกษาแรงตึงผิวของของเหลวด้วยวิธีการหยดของเหลว โดยใช้ภาพถ่ายจากสมาร์ทโฟน โดยวิธีนี้อาศัยการถ่ายภาพของหยดของเหลวที่ห้อยจากเข็ม จากนั้นนำรูปทรงของหยดไปเปรียบเทียบกับสมการ Young-Laplace ซึ่งสมดุลแรงระหว่างแรงโน้มถ่วงและแรงตึงผิวของหยดน้ำ วิธีนี้จะใช้อุปกรณ์ที่ค่อนข้างเรียบง่าย (เข็ม, กล้องสมาร์ทโฟน, และแหล่งกำเนิดแสง) แต่ต้องมีการควบคุมปัจจัยต่าง ๆ เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพสูง เช่น แหล่งกำเนิดแสงต้องถูกกระจายให้ทั่วเพื่อลดการสะท้อนแสงจากพื้นผิวหยด และต้องควบคุมให้เข็มตั้งตรงเพื่อความสมมาตรของหยด ใช้เข็มหรือท่อปลายทื่อ เพื่อให้ของเหลวหยดอย่างสม่ำเสมอ แหล่งกำเนิดแสงต้องมีการกระจายแสงอย่างทั่วถึงเพื่อลดการสะท้อนแสงที่พื้นผิวหยดน้ำ ซึ่งอาจทำให้ภาพมีความผิดเพี้ยนและทำให้การวิเคราะห์ขอบเขตหยดน้ำยากขึ้น นอกจากนี้ต้องระมัดระวังการสะท้อนแสงจากแสงอื่น ๆ ในบริเวณใกล้เคียงที่อาจทำให้เกิดภาพเงาหรือการสะท้อนที่ผิดปกติ การโฟกัสภาพต้องมีความแม่นยำเพื่อให้เห็นรายละเอียดของหยดน้ำได้ชัดเจน หากภาพเบลอหรือไม่ได้โฟกัสอย่างถูกต้อง ขอบหยดน้ำจะไม่ชัดเจนและทำให้การคำนวณสมการ Young-Laplace มีความผิดพลาด (Berry et al., 2015) นอกจากนี้ควรมีการปรับภาพก่อนการวิเคราะห์ โดยแนะนำให้ปรับคอนทราสต์ของภาพ เพื่อให้เห็นขอบของ

หยดน้ำมีความชัดเจน สามารถประมวลผลรูปร่างและวัฏระยะของหยดน้ำได้อย่างถูกต้อง (Daerr et al., 2016) ในการประมวลผลภาพถ่ายหยดน้ำต้องควบคุมมุมของกล้องให้ตรงกับหยดน้ำและมุมในการวัดเป็นปัจจัยสำคัญในการหาค่า  $D_E$  และ  $D_S$  อย่างแม่นยำ เนื่องจากมุมที่คลาดเคลื่อนแม้เพียงเล็กน้อยสามารถทำให้ค่าที่วัดได้ผิดเพี้ยน ส่งผลให้การคำนวณแรงตึงผิวมีความคลาดเคลื่อน การทดลองในวิจัยนี้ใช้สมาร์ทโฟนที่ติดตั้งและปรับมุมอย่างระมัดระวังเพื่อให้แน่ใจว่ามุม  $D_E$  และ  $D_S$  ในแนวระนาบเท่ากับ  $0^\circ$  และมุม  $D_E$  ในแนวตั้งเท่ากับ  $90^\circ$  ช่วยลดข้อผิดพลาดในการวัดและนำข้อมูลมาคำนวณด้วยสมการ Young-Laplace ใช้อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับรูปร่างของหยดของเหลว โดยฟังก์ชัน  $H$  ซึ่งเป็นการพิจารณาอัตราส่วน  $D_S/D_E$  เพื่อคำนวณค่าของ  $H$  ซึ่งในตัวอย่างนี้ค่าที่คำนวณได้  $1/H = 1.059$  แสดงถึงความสอดคล้องกับฟังก์ชันที่คำนวณได้ (Goy et al., 2017)

### ผลการออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิว โดยวิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน

#### 1) ผลการหาค่าแรงตึงผิวของเหลวจากการเทียบมาตรส่วนกับวัตถุอ้างอิง

การวิเคราะห์แรงตึงผิวด้วยวิธีหยดของเหลวจะต้องใช้พารามิเตอร์การวัด เช่น ระยะ  $D_E$  และ  $D_S$  ซึ่งมักจะบันทึกในหน่วยพิกเซล เพื่อแปลงค่าพิกเซลเหล่านี้ให้เป็นหน่วยเมตริก จะต้องใช้เทียบมาตรส่วนกับวัตถุอ้างอิงในภาพ จากนั้นจึงคำนวณค่าแรงตึงผิวโดยใช้สมการ Young-Laplace ที่ถูกแปลงเป็นหน่วยที่เหมาะสม



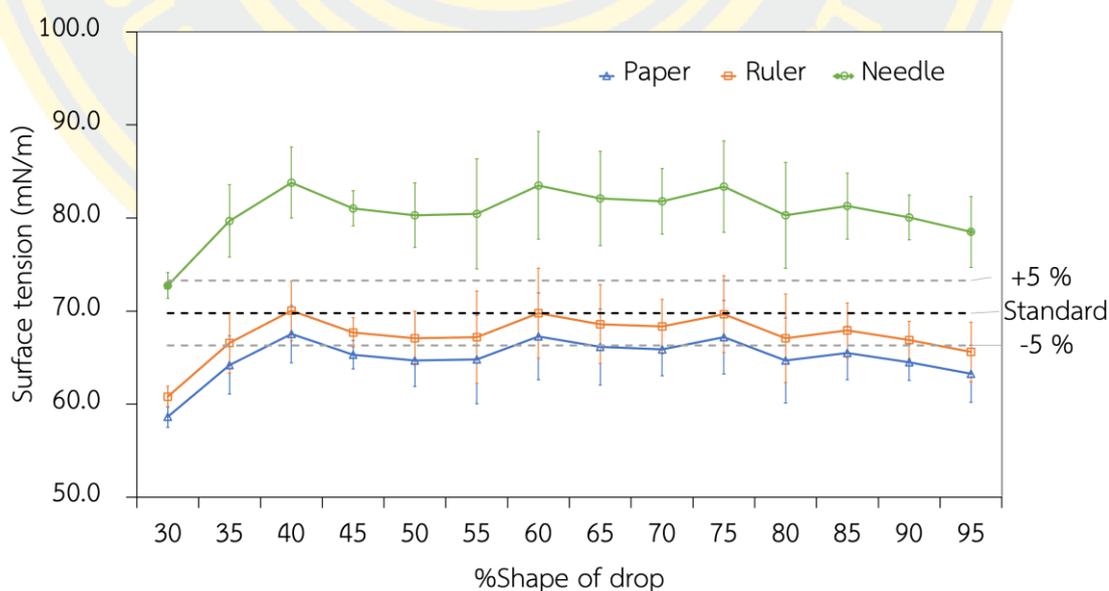
ภาพที่ 41 การเทียบมาตรส่วน pixel/mm ของวัตถุอ้างอิง (a) ไม้บรรทัด, (b) กระดาษ และ (c) ขนาดเข็มฉีดยา

จากภาพที่ 41 การเทียบมาตรฐานกับวัตถุอ้างอิงสำหรับการแปลงขนาดหยดน้ำ  $D_E$  และ  $D_S$  จากหน่วยพิกเซลเป็นมิลลิเมตร ส่งผลต่อความแม่นยำในการคำนวณแรงตึงผิว ผู้วิจัยได้ทำการเทียบมาตรฐานกับวัตถุอ้างอิง ผลเป็นดังนี้

ตารางที่ 4 เปรียบเทียบขนาดมาตรฐานกับวัตถุอ้างอิงที่ใช้ในการแปลงหน่วย

วัตถุอ้างอิง	ขนาดภาพ(pixel)	ขนาดวัตถุ (mm)	มาตรฐาน (pixel/mm)
กระดาษ	960	11.360	84.520
ไม้บรรทัด	830	10.000	83.000
เข็ม	94	1.239	75.871

จากตารางที่ 4 เปรียบเทียบขนาดมาตรฐานกับวัตถุอ้างอิงใช้ในการเทียบมาตรฐาน ได้แก่ ไม้บรรทัด กระดาษ และเข็มฉีดยาผลการเปรียบเทียบพบว่าไม้บรรทัดและกระดาษมีขนาดที่ใหญ่กว่าเข็มฉีดยา โดยมีอัตราส่วนระหว่างขนาดวัตถุอ้างอิงกับความกว้างของภาพเท่ากับ 0.41, 0.44 และ 0.05 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่าอัตรา pixel/mm ของไม้บรรทัดและกระดาษอยู่ที่ 83.000 และ 84.522 pixel/mm ซึ่งสูงกว่าเข็มฉีดยาที่มีค่าเพียง 75.871 pixel/mm นำอัตรา pixel/mm ของวัตถุอ้างอิงสามประเภท ได้แก่ ไม้บรรทัด กระดาษ และเข็มฉีดยา ไปเทียบมาตรฐานคำนวณค่าแรงตึงผิวได้ผลตามภาพที่ 42



ภาพที่ 42 กราฟแสดงผลการเปรียบเทียบค่าแรงตึงผิวกับขนาดหยดน้ำโดยเทียบกับมาตรฐานอ้างอิง

จากการศึกษาผลการเปรียบเทียบค่าแรงตึงผิวที่คำนวณผ่านสมการ Young-Laplace โดยใช้ขนาดอ้างอิง ได้แก่ ไม้บรรทัด กระดาษ และเข็มฉีดยา ในการแปลงขนาดหยดน้ำจากหน่วยพิกเซลเป็นมิลลิเมตร พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากเครื่องวัดแรงตึงผิวเชิงพาณิชย์ Sigma 700 ซึ่งใช้แผ่นเพลตวิลเฮลมี ค่าแรงตึงผิวที่วัดได้จากเครื่องเชิงพาณิชย์คือ 69.79 mN/m การศึกษาพบว่าในแรงตึงผิวที่ได้จากใช้เข็มฉีดยาเป็นขนาดวัตถุอ้างอิงเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดมีค่าประมาณ 12-20% ในขณะที่การใช้ไม้บรรทัดหรือกระดาษมีความผิดพลาดที่ต่ำกว่า อยู่ในช่วง 2-9% ผลลัพธ์นี้ชี้ให้เห็นว่าการแปลงหน่วยพิกเซลเป็นหน่วยเมตรริกที่แม่นยำมากขึ้นสามารถทำได้โดยใช้มาตราส่วนที่มีความละเอียดสูงกว่า ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่างขนาดวัตถุอ้างอิงกับความกว้างของภาพที่สูงกว่าและค่าอัตรา pixel/mm ที่มากกว่าการใช้มาตราส่วนดังกล่าวจึงให้ความแม่นยำในการคำนวณค่าแรงตึงผิวมากกว่าวัตถุอ้างอิงที่มีขนาดเล็กและมีความละเอียดของภาพน้อยกว่า

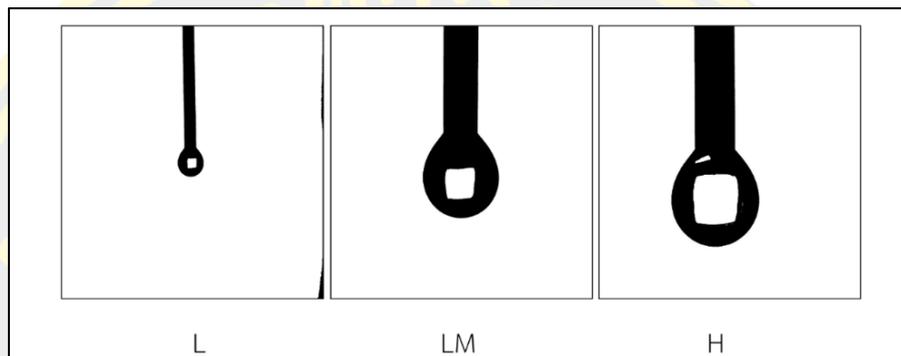
ดังนั้นในงานวิจัยนี้เพื่อประสิทธิภาพในการหาค่าแรงตึงผิวโดยใช้วิธีหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ตโฟนจึงควรปรับการถ่ายภาพให้ได้ขนาดหยดน้ำและวัตถุอ้างอิงให้มีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่า 1/4 ของภาพถ่าย และมีความคมชัดอัตรา pixel/mm ที่มากยิ่งขึ้น จะทำให้วิธีหาค่าแรงตึงผิวของงานวิจัยนี้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัย (Arashiro & Demarquette, 1999) การวางตำแหน่งมาตราส่วนที่ถูกต้องและมีขนาดใหญ่เพียงพอ ช่วยลดข้อผิดพลาดในการเปรียบเทียบรูปทรงระหว่างโปรไฟล์ที่ทฤษฎีคำนวณและโปรไฟล์ที่ทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความแม่นยำนี้มีความสำคัญในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับโพลีเมอร์ ซึ่งความเบี่ยงเบนเพียงเล็กน้อยในการวัดอาจส่งผลต่อความถูกต้องของค่าความตึงผิวที่สรุปได้อย่างมีนัยสำคัญ

## 2) เปรียบเทียบสมาร์ตโฟนที่เหมาะสมในการหาค่าแรงตึงผิว

จากเรื่องการเปรียบเทียบสมาร์ตโฟนที่เหมาะสมในการหาค่าแรงตึงผิวแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของค่าแรงตึงผิวกับคุณภาพกล้องและอุปกรณ์เสริมในการวัดแรงตึงผิวของหยดน้ำ การเลือกอุปกรณ์กล้องที่ใช้มีผลต่อความแม่นยำของการวัดเป็นอย่างมาก โดยรายละเอียดมีดังนี้ ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบสมาร์ตโฟน 3 รุ่น ได้แก่ สมาร์ตโฟน L (Low) ซึ่งใช้ iPhone 13, สมาร์ตโฟน LM (Low+Macro) ซึ่งใช้ iPhone 13 เสริมด้วยเลนส์มาโคร และสมาร์ตโฟน H (High) ซึ่งใช้ iPhone 15 Pro Max เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการถ่ายภาพและยกตัวอย่างหยดน้ำที่มีขนาด 50% ถ่ายด้วยกล้องสมาร์ตโฟนทั้ง 3 รุ่น โดยตามที่แสดงในภาพที่ 43

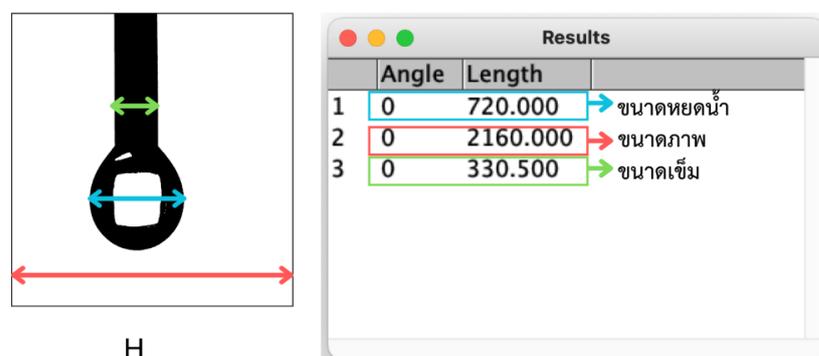
สมบัติของกล้องสมาร์ตโฟน L, LM, และ H มีความเหมือนและต่างกันดังนี้ กล้องสมาร์ตโฟนทั้ง 3 รุ่นสามารถบันทึกวิดีโอในความละเอียด 3,840x2,160 พิกเซล (4K) ที่ 60 เฟรมต่อวินาที (fps) ซึ่งถือเป็นมาตรฐานเดียวกัน แตกต่างที่เซนเซอร์กล้องและความสามารถในการซูม สำหรับสมาร์ตโฟน L (iPhone 13) มีกล้องหลักความละเอียด 12 MP และกล้องอัลตราไวด์ความละเอียด 12 MP

สามารถซูมแบบออปติคัล 1 เท่า และซูมแบบดิจิทัลได้ถึง 5 เท่า กล้องสมาร์ทโฟน LM (iPhone 13 + เลนส์มาโคร) ใช้ iPhone 13 ร่วมกับเลนส์ Ulanzi Super Macro Lens ซึ่งเพิ่มความสามารถในการถ่ายภาพระยะใกล้ได้มากขึ้นถึง 10 เท่า และกล้องสมาร์ทโฟน H (iPhone 15 Pro Max) มาพร้อมกับกล้องหลักที่มีความละเอียดสูงถึง 48 MP รวมถึงกล้องอัลตราไวด์และกล้องเทเลโฟโต้ที่สามารถถ่ายภาพระยะใกล้แบบมาโครได้ นอกจากนี้ยังรองรับการซูมแบบออปติคัลได้สูงสุดถึง 5 เท่า จากสมบัติของกล้องสมาร์ทโฟนและการซูมของสมาร์ทโฟนทั้ง 3 แบบ



ภาพที่ 43 ภาพถ่ายหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดย L, LM และ H

ภาพถ่ายหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดยสมาร์ทโฟน L, LM และ H พบว่าสมาร์ทโฟน L ให้ภาพที่มีขนาดหยดน้ำเล็กและความคมชัดต่ำที่สุด ในขณะที่สมาร์ทโฟน H สามารถถ่ายภาพที่มีขนาดหยดน้ำใหญ่ขึ้นและมีความคมชัดสูงที่สุด สำหรับสมาร์ทโฟน LM ซึ่งเป็นการใช้ iPhone 13 ร่วมกับเลนส์มาโครนั้น พบว่าภาพที่ได้มีขนาดหยดน้ำและความคมชัดใกล้เคียงกับสมาร์ทโฟน H ซึ่งบ่งชี้ว่าการเสริมเลนส์มาโครสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของการถ่ายภาพในการวัดค่าแรงตึงผิวได้ใกล้เคียงกับสมาร์ทโฟนที่มีคุณภาพสูงกว่า ซึ่งสามารถเปรียบเทียบข้อมูลจำเพาะของอุปกรณ์สมาร์ทโฟนที่ใช้ในงานวิจัยทั้ง 3 รุ่น จะเห็นได้ว่ากล้องแต่ละรุ่นสามารถถ่ายภาพให้ขนาดหยดน้ำที่ไม่เท่ากัน ตัวอย่างการวัดและคำนวณค่าขนาดหยดน้ำ/ขนาดภาพ แสดงดังตัวอย่างด้านล่าง



ภาพที่ 44 แสดงตัวอย่างการวัดขนาดหยดน้ำ, ขนาดภาพ และขนาดของเข็มที่ใช้เป็นสเกลของภาพถ่ายหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดย H

จากภาพที่ 44 แสดงตัวอย่างการวัดขนาดหยดน้ำ, ขนาดภาพ และขนาดของเข็มที่ใช้เป็นมาตรฐานของภาพถ่ายหยดน้ำ ซึ่งช่วยในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบสมบัติของกล้องสมาร์ทโฟนแต่ละรุ่นได้อย่างชัดเจน ตัวอย่างการคำนวณค่าขนาดหยดน้ำ/ขนาดภาพขนาด 50% และขนาดมาตรฐานเทียบวัตถุอ้างอิง ที่ถ่ายโดยสมาร์ทโฟน H โดยใช้สูตรในการคำนวณดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ขนาดหยดน้ำ/ขนาดภาพ} &= \frac{\text{ขนาดความกว้างหยดน้ำ (pixel)}}{\text{ขนาดความกว้างภาพ (pixel)}} \\ &= \frac{719 \text{ pixel}}{2,160 \text{ pixel}} \\ &= 0.33 \\ \text{ขนาดมาตรฐาน} &= \frac{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาพเข็ม (pixel)}}{\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มที่วัดจริง (mm)}} \\ &= \frac{330.5 \text{ pixel}}{1.239 \text{ mm}} \\ &= 265.13 \text{ mN/m} \end{aligned}$$

จากการคำนวณภาพถ่ายหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายโดย H จะได้ว่าขนาดหยดน้ำ/ขนาดภาพของหยดน้ำเท่ากับ 0.33 และขนาดมาตรฐานที่ใช้เข็มเป็นวัตถุอ้างอิงเท่ากับ 265.13 pixel/mm การคำนวณนี้ช่วยในการวิเคราะห์เปรียบเทียบประสิทธิภาพและความสามารถของกล้องสมาร์ทโฟนแต่ละรุ่นในการจับภาพหยดน้ำ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างในการจับขนาดหยดน้ำที่ชัดเจนตามความละเอียดของกล้องที่ใช้ในแต่ละรุ่น

ตารางที่ 5 ข้อมูลเปรียบเทียบการตั้งค่ากล้องและคุณภาพของวิดีโอที่ได้จากสมาร์ทโฟน 3 รุ่น

อุปกรณ์ สมาร์ทโฟน	ข้อมูลภาพ			
	การซูม (เท่า)	ระยะโฟกัส (cm)	ขนาดหยดน้ำ/ ขนาดภาพ	มาตรฐาน (pixel/mm)
L	3x digital	11.5	0.09	73.04
LM	2x digital + 10x	4.5	0.28	227.60
H	2x optical	2.5	0.33	265.13

จากตารางที่ 5 การเปรียบเทียบสมบัติของสมาร์ทโฟนในการหาค่าแรงตึงผิวโดยใช้การบันทึกภาพหยดน้ำ พบว่าเซนเซอร์กล้องและการตั้งค่าซูมมีผลต่อความคมชัดและร้อยละของเวลาต่อหยด ในภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยสรุปผลได้ดังนี้ สมาร์ทโฟน L ใช้การซูมแบบดิจิทัล 3 เท่า ระยะโฟกัส 11.5 cm ขนาดมาตรฐาน 73.04 pixel/mm และขนาดหยดน้ำต่อภาพเท่ากับ 0.09 ภาพที่

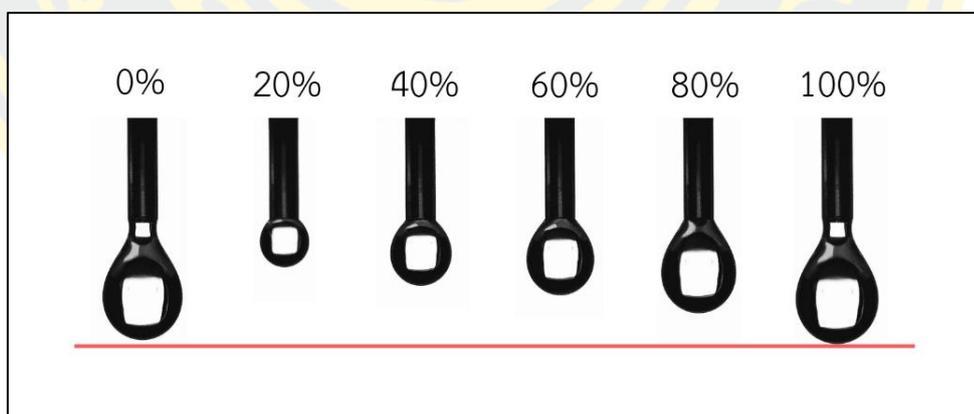
ได้จากสมาร์ทโฟนนี้มีขนาดมาตราส่วนและขนาดหยดน้ำต่ำสุด เนื่องจากการซูมแบบดิจิทัลเป็นการขยายภาพที่ตัดและขยาย ทำให้สูญเสียรายละเอียดและความชัดเจน สมาร์ทโฟน LM เป็นสมาร์ทโฟนรุ่นเดียวกับ L แต่เสริมเลนส์มาโคร 10 เท่า และใช้การซูมแบบดิจิทัล 2 เท่า ระยะโฟกัสลดลงเหลือ 4.5 cm ส่งผลให้ขนาดมาตราส่วนเพิ่มขึ้นเป็น 227.60 pixel/mm และขนาดหยดน้ำต่อภาพเท่ากับ 0.28 การใช้เลนส์มาโครช่วยให้สามารถถ่ายภาพวัตถุขนาดเล็กได้ชัดเจนขึ้นและเพิ่มความละเอียดในการบันทึกภาพหยดน้ำได้ใกล้เคียงกับสมาร์ทโฟน H ใช้การซูมแบบออปติคัล 2 เท่า ซึ่งเป็นการซูมโดยการขยายภาพผ่านเลนส์จริง ทำให้ภาพที่ได้มีความละเอียดและคมชัดสูงสุด ระยะโฟกัสสั้นที่สุดเพียง 2.5 cm ขนาดมาตราส่วนของภาพสูงถึง 265.13 pixel/mm และขนาดหยดน้ำต่อภาพอยู่ที่ 0.33 สมาร์ทโฟน H มีคุณภาพกล้องดีที่สุด โดยการซูมแบบออปติคัลช่วยให้ขยายภาพได้โดยไม่สูญเสียความละเอียด ทำให้สามารถเก็บภาพหยดน้ำที่มีรายละเอียดและความคมชัดมากที่สุดและสมาร์ทโฟน LM ซึ่งเสริมเลนส์มาโครช่วยให้ได้ภาพที่มีความคมชัดและขนาดหยดน้ำใกล้เคียงสมาร์ทโฟน H และดีกว่าสมาร์ทโฟน L ที่ใช้การซูมแบบดิจิทัล

สรุปได้ว่าทั้งสามรุ่นมีความสามารถในการบันทึกวิดีโอในระดับความละเอียดสูงเหมือนกัน แต่แตกต่างกันที่ความสามารถในการซูมและความละเอียดของกล้อง ซึ่งส่งผลต่อคุณภาพและความคมชัดของภาพเมื่อทำการขยายวัตถุ โดยเฉพาะในกรณีของการถ่ายภาพระยะใกล้และการสังเกตรายละเอียดของวัตถุอย่างชัดเจน สอดคล้องกับงานวิจัยของ Arashiro & Demarquette (1999) การใช้กล้องคุณภาพสูงมีส่วนสำคัญอย่างมากในการเพิ่มความแม่นยำของการวัดด้วยวิธี Pendant Drop กล้องที่มีความละเอียดสูงช่วยให้สามารถตรวจจับขอบเขตของหยดน้ำได้อย่างแม่นยำ ซึ่งมีความสำคัญต่อการคำนวณความตึงผิวโดยมีข้อผิดพลาดน้อยที่สุด คุณภาพของภาพที่ดีขึ้นช่วยให้ซอฟต์แวร์สามารถดึงข้อมูลโปรไฟล์ของหยดและรัศมีความโค้งได้อย่างแม่นยำ ส่งผลให้การวัดมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และเรื่องการใช้เทคโนโลยีซูมแบบดิจิทัลคือการขยายขนาดของพิกเซลในภาพโดยไม่เปลี่ยนแปลงระยะโฟกัสของเลนส์ ใช้กระบวนการครอบภาพ ทำให้ภาพสูญเสียความละเอียดและคุณภาพลดลงเมื่อทำการขยายมากขึ้น ข้อจำกัดของการซูมดิจิทัลคือเมื่อขยายภาพไปถึงระดับหนึ่ง ความละเอียดของภาพจะลดลงอย่างชัดเจนแตกต่างกับการใช้เทคโนโลยีซูมแบบออปติคัล ใช้กลไกของเลนส์เพื่อขยายวัตถุ (magnify) ซึ่งทำให้ภาพมีคุณภาพสูง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งของเลนส์ในการขยายภาพจริงโดยตรง และได้ภาพที่มีความละเอียดสูง (Yedid I., 2017) เหมาะสมสำหรับการศึกษาและการบันทึกภาพในงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ที่ต้องการความแม่นยำสูง และใช้เลนส์มาโครในสมาร์ทโฟนเพื่อวิเคราะห์หยดของเหลวและคำนวณแรงตึงผิวด้วยวิธีการหยดของเหลว เลนส์มาโครสามารถถ่ายภาพได้ชัดเจนและให้รายละเอียดสูงพอที่จะทำการวิเคราะห์รูปร่างของหยดน้ำได้ ทำให้นักวิจัยสามารถใช้สมาร์ทโฟนร่วมกับเลนส์มาโครเป็นอุปกรณ์ที่ง่ายและมีต้นทุนต่ำในการทดลองทางวิทยาศาสตร์ (Chen et al., 2017) ดังนั้นการเลือกใช้กล้องที่มีคุณภาพ สามารถซูมแบบ

ออปติคัลได้จะช่วยให้การศึกษารูปร่างหยดน้ำด้วยสมาร์ทโฟนมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามหากนักเรียนหรือผู้ศึกษาใช้สมาร์ทโฟนที่ไม่สามารถซูมแบบออปติคัลหรือมีเลนส์มาโคร สามารถปรับปรุงคุณภาพของกล้องได้โดยการใช้เลนส์มาโครเสริม ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมที่หาได้ง่ายและราคาประหยัด โดยเลนส์มาโครช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกล้องสมาร์ทโฟนให้สามารถถ่ายภาพที่มีคุณภาพสูงได้ใกล้เคียงกับสมาร์ทโฟนระดับสูงที่มีราคาสูง จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการศึกษาและการทดลองในลักษณะนี้

### 3) การหาร้อยละของเวลาต่อหยด ที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูลค่าแรงตึงผิว

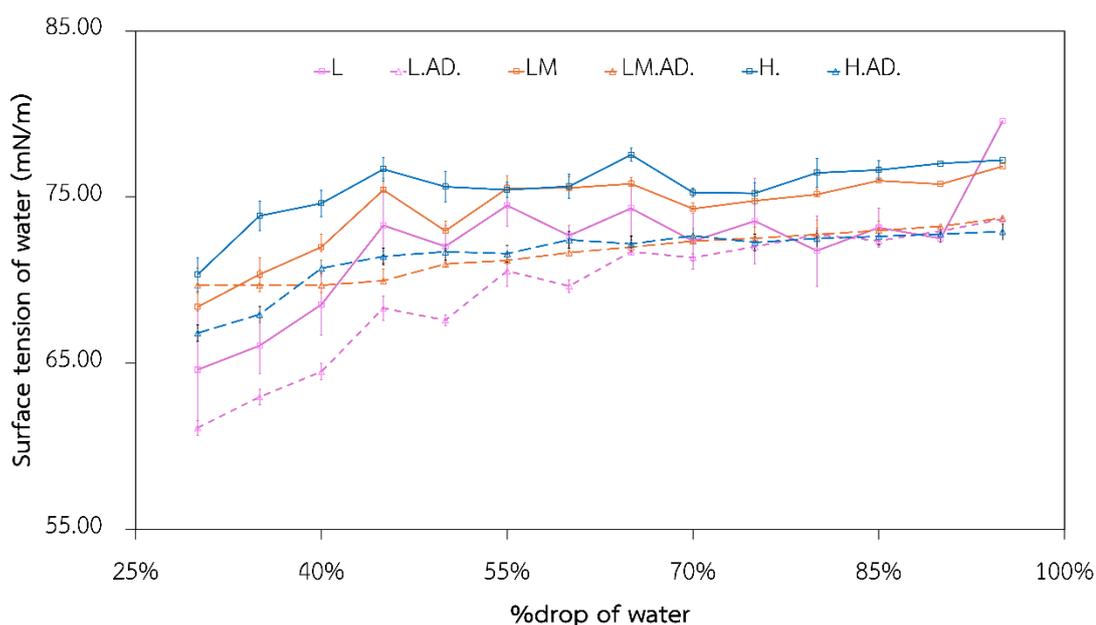
การศึกษาร้อยละของเวลาต่อหยดที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณค่าแรงตึงผิวโดยใช้วิธีหยดของเหลวเป็นสิ่งสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำและสามารถเปรียบเทียบได้อย่างถูกต้อง การทดลองนี้ใช้การบันทึกภาพจากคลิปวิดีโอของหยดน้ำ 5 หยด ที่ถ่ายด้วยความละเอียด 60 fps โดยหยดน้ำแต่ละหยดใช้เวลา 2s การบันทึกภาพของหยดน้ำจะถูกนำมาใช้ในการวัดขนาด  $D_E$  และ  $D_S$  โดยคำนวณร้อยละของเวลาต่อหยด ซึ่งกำหนดให้ 0% คือเวลาที่หยดน้ำยังไม่หลุดจากปลายเข็ม และ 100% คือเวลาที่หยดน้ำมีขนาดใหญ่ที่สุดก่อนจะหลุดออกมา จากข้อมูลที่ได้จะนำมาวิเคราะห์เพื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวและร้อยละของเวลาต่อหยด โดยพิจารณาช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการคำนวณแรงตึงผิว ซึ่งค่าที่ได้จากวิธีของผู้วิจัยจะถูกเปรียบเทียบกับค่าแรงตึงผิวที่วิเคราะห์จากภาพถ่ายหยดน้ำ โดยใช้ปลั๊กอิน Pendent Drop สำหรับซอฟต์แวร์ ImageJ



ภาพที่ 45 ตัวอย่างการบันทึกภาพร้อยละของเวลาต่อหยดโดยอุปกรณ์ H

จากการศึกษาในภาพที่ 45 ซึ่งแสดงตัวอย่างการบันทึกภาพร้อยละของเวลาต่อหยดถ่ายโดยสมาร์ทโฟน H พบว่าขนาดหยดน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ร้อยละ 0 ถึง 100 โดยบันทึกภาพในทุกช่วงร้อยละ 5 ของเวลาในการหยด ข้อมูลเหล่านี้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณค่าแรงตึงผิวของน้ำ และเพื่อเปรียบเทียบช่วงขนาดหยดน้ำที่เหมาะสมที่สุดในการวัดค่าแรงตึงผิว โดยมีการวิเคราะห์อุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายภาพ ได้แก่ สมาร์ทโฟน L, LM และ H ซึ่งแต่ละอุปกรณ์ให้ภาพหยดน้ำในช่วงขนาดที่แตกต่าง

กัน จากนั้นนำมาวิเคราะห์แรงดึงผิวด้วยสองวิธี คือ วิธีของผู้วิจัยและวิธี A.D. การวิเคราะห์นี้ใช้ปลั๊กอิน Pendent Drop ของโปรแกรม ImageJ ในการวิเคราะห์รูปร่างหยดน้ำและปรับรูปร่างของหยดน้ำโดยอัตโนมัติ คำนวณรูปร่างของหยดน้ำและสร้างเส้นโค้งตามข้อมูลทางทฤษฎีเทียบกับรูปทรงของหยดน้ำในภาพจริงอย่างแม่นยำ แล้วคำนวณโดยสมการเชิงอนุพันธ์ที่ใช้ในการอธิบายรูปร่างของหยดน้ำในการหาค่าที่เหมาะสมเพื่อคำนวณแรงดึงผิวของของเหลว การประมวลผลภาพและคำนวณนี้ช่วยให้ได้ค่าที่แม่นยำในการศึกษาและได้รับการยอมรับ



ภาพที่ 46 เปรียบเทียบค่าแรงดึงผิววิธีการของผู้วิจัยและวิธี A.D. โดยใช้สมาร์ทโฟน L, LM และ H

จากภาพที่ 46 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบค่าแรงดึงผิวของของเหลวที่วัดด้วยวิธีการของผู้วิจัยและวิธี A.D. ซึ่งใช้ปลั๊กอิน Pendent Drop ของโปรแกรม ImageJ ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน 3 รุ่น ได้แก่ L, LM, และ H ที่ร้อยละ 30 ถึง 100 ของเวลาต่อหยด เป็นค่าแรงดึงผิวมาตรฐานของน้ำ ซึ่งใช้เป็นเกณฑ์สำหรับการเปรียบเทียบการหาร้อยละของเวลาต่อหยดที่เหมาะสมในการคำนวณแรงดึงผิวและยืนยันข้อมูลเมื่อประสิทธิภาพสมาร์ทโฟนที่มีเหมาะสมได้

สมาร์ทโฟน H และ LM วิธีการของผู้วิจัยและวิธี A.D. ให้ค่าที่ใกล้เคียงมากที่สุด ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำสูง สมาร์ทโฟน L วิธีการของผู้วิจัยและวิธี A.D. มีความเบี่ยงเบนจากค่ามาตรฐานมากที่สุด โดยเฉพาะในช่วงต่ำกว่าร้อยละหยด 70 ของเวลาต่อหยด ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) ที่แสดงด้วยเส้นแนวตั้งบนจุดแต่ละจุดของกราฟมีค่าสูงสุดสำหรับสมาร์ทโฟน L มีความไม่สม่ำเสมอในการวัดค่าแรงดึงผิวแสดงถึงความสำคัญของการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีความละเอียดและความแม่นยำในการวัดค่าแรงดึงผิวในการหาค่าแรงดึงผิวของน้ำโดยใช้วิธีหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน L, LM

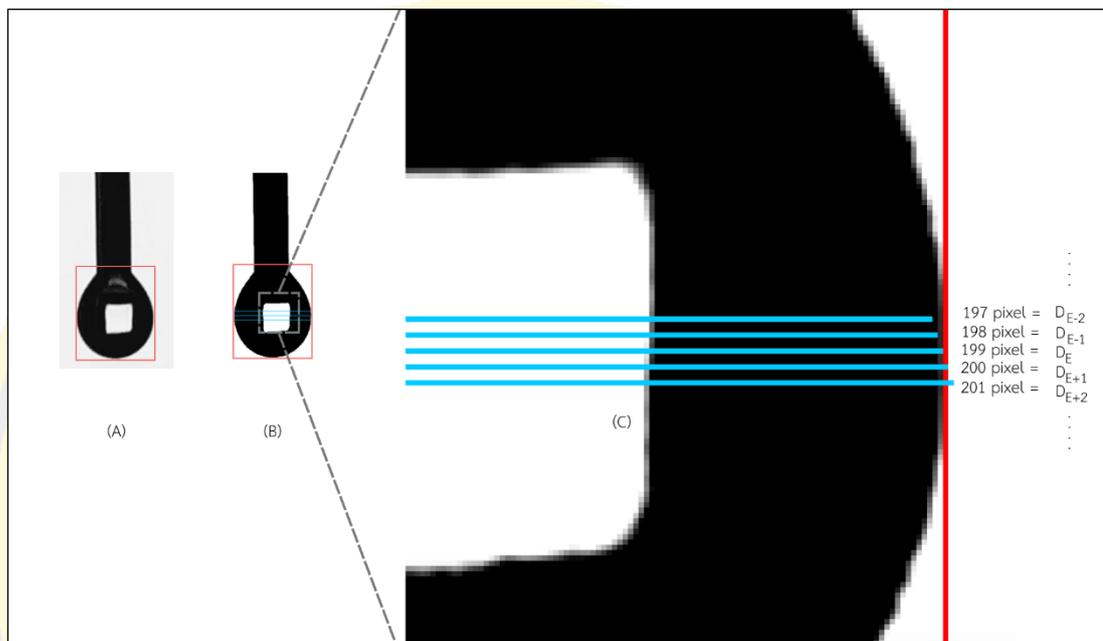
และ H พบว่าสมาร์ทโฟนทั้ง 3 ชนิด มีประสิทธิภาพในการถ่ายภาพสำหรับวิเคราะห์ค่าแรงดึงผิวของของเหลว เนื่องจากแนวโน้มค่าเฉลี่ยแรงดึงผิวด้วยวิธีการในงานวิจัยและวิธี A.D. สอดคล้องกันและเปรียบเทียบค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานทั้ง 3 ชนิดพบว่า สมาร์ทโฟน H และ LM มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่า 0.8 ในขณะที่สมาร์ทโฟน L มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงถึง 3.57 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าสมาร์ทโฟนทั้ง 3 ชนิดมีประสิทธิภาพในการทดลองแต่สมาร์ทโฟน H และ LM มีความแม่นยำมากกว่าสมาร์ทโฟน L

จากข้อมูลในภาพที่ 46 เปรียบเทียบค่าแรงดึงผิวของของเหลวด้วยวิธีการของผู้วิจัยและวิธี A.D. ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน L, LM และ H เมื่อนำข้อมูลหาค่าแรงดึงผิวและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าร้อยละ 0-30 ของเวลาต่อหยดหยด ไม่มีข้อมูลการวัดแรงดึงเนื่องจากหยดน้ำที่เกิดขึ้นใหม่มักมีรูปร่างค่อนข้างกลม แรงดึงผิวที่กระทำกับของเหลวที่หยดทำให้หยดพยายามคงรูปร่างให้มีพื้นที่ผิวทรงกลม ดังนั้นในช่วงแรกของการก่อตัวของหยดน้ำจึงไม่สามารถวัดระยะ  $D_5$  ได้ในร้อยละ 30-65 ของเวลาต่อหยด พบว่าค่าเฉลี่ยแรงดึงผิวที่วิเคราะห์ได้จากวิธีของผู้วิจัยและวิธี A.D. มีค่าแรงดึงผิวเฉลี่ยต่างกัน 3.68 ถึง 4.25 mN/m ในขณะที่ร้อยละ 70-95 ของเวลาต่อหยด มีค่าแรงดึงผิวเฉลี่ยต่างกัน 0.38 ถึง 3.58 mN/m ซึ่งสรุปได้ว่าช่วงร้อยละ 70-95 ของเวลาต่อหยด ค่าแรงดึงผิวของของเหลวที่ได้จากถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน L, LM และ H วิธีการถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟนและวิธี A.D. มีค่าใกล้เคียงกันเหมาะสมในการวิเคราะห์ผลให้ค่าที่แม่นยำที่สุดในงานวิจัยนี้เลือกใช้ร้อยละ 80 ของเวลาต่อหยด เนื่องจากให้ค่าที่แม่นยำและขนาดหยดน้ำเหมาะสมสะดวกในการนำมาคำนวณค่าแรงดึงผิว สอดคล้องกับงานวิจัย Sumitra Imraksa (2022) ที่ทดลองชุดการทดลองหาค่าความตึงผิวของของเหลวโดยวิธีหยดน้ำโดยสมาร์ทโฟน พบว่าภาพหยดน้ำที่ให้ค่าความตึงผิวใกล้เคียงกับค่าอ้างอิงมากที่สุด ควรเป็นภาพถ่ายหยดน้ำขณะที่หยดน้ำกำลังจะหลุดออกจากปลายหัวหยด ซึ่งเป็นจุดที่เกิดความสมดุลระหว่างแรงดึงผิวและแรงโน้มถ่วงที่กระทำกับตัวหยดน้ำ

#### 4) ความคลาดเคลื่อนเนื่องจากความพรำมัวของภาพ (Pixelation)

การวัดแรงดึงผิวของน้ำโดยการวิเคราะห์ภาพการเปลี่ยนแปลงของรูปทรงของหยดน้ำบนเพื่อคำนวณค่าแรงดึงผิวของน้ำ ความแม่นยำของการวัดสามารถได้รับผลกระทบจากข้อผิดพลาดของพิกเซล การหาขอบเขตของหยดน้ำในภาพอาจได้รับผลกระทบจากความพรำมัวของภาพ ซึ่งทำให้ขอบเขตหยดน้ำไม่ชัดเจน ส่งผลให้คำนวณรูปทรงหยดน้ำได้ไม่แม่นยำ และการใช้เทคนิคดิจิทัลเพื่อแก้ไขการวินิจฉัยและลดผลกระทบจาก pixel errors ซึ่งรวมถึงการใช้ฟิลเตอร์เพื่อเพิ่มความละเอียดและความชัดเจนของภาพ การตั้งค่าแต่งภาพวิดีโอและปรับค่าความคมชัดในภาพเพื่อลดความพรำมัวของภาพ

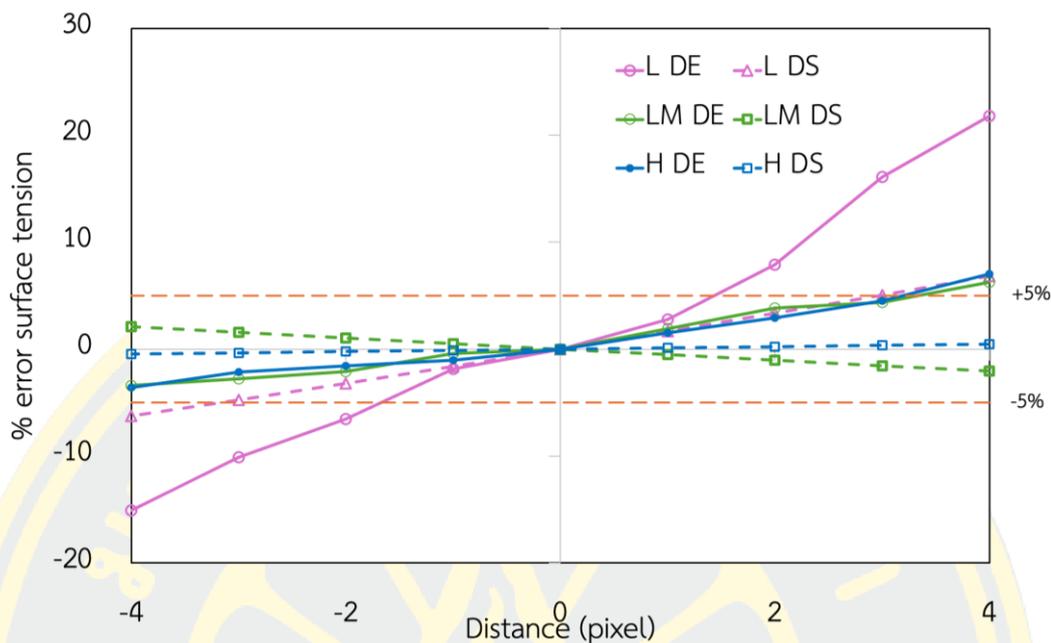
ความแม่นยำของการวัดระยะทาง  $D_E$  และ  $D_S$  โดยใช้โปรแกรม ImageJ หรือ Microsoft Paint สำหรับการวิเคราะห์ภาพหยดน้ำจากสมาร์ทโฟนทั้ง 3 รุ่น (L, M และ H) เพื่อคำนวณค่าแรงตึงผิวมีความสำคัญอย่างมาก การวัดระยะทาง  $D_E$  และ  $D_S$  ผิดพลาดอาจเกิดจากความละเอียดของภาพถ่ายที่ถ่ายสมาร์ทโฟนแต่ละรุ่น ส่งผลให้ค่าแรงตึงผิวที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าจริง



ภาพที่ 47 หยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายภาพโดยอุปกรณ์ L

- A) ภาพหยดน้ำก่อนปรับความคมชัด B) ภาพหยดน้ำหลังปรับความคมชัดและเลือกระยะ  $D_E$   
 C) ภาพขยายหยดน้ำในการเลือกวัดระยะ  $D_E$  และพิกเซลที่ต่างกันของการเลือกระยะ  $D_E$

จากภาพที่ 47 เป็นการแสดงตัวอย่างการวัดระยะทาง  $D_E$  และ  $D_S$  ของหยดน้ำขนาด 50% ที่ถ่ายภาพโดยอุปกรณ์ L โดยใช้โปรแกรม ImageJ ในการวิเคราะห์ภาพหยดน้ำ ภาพที่ 47 ก) ภาพหยดน้ำก่อนปรับความคมชัด ข) ภาพหยดน้ำหลังปรับความคมชัดและเลือกระยะ  $D_E$  ค) ภาพขยายหยดน้ำในการเลือกวัดระยะ  $D_E$  และพิกเซลที่ต่างกันของการเลือกระยะ  $D_E$  เมื่อค่าพิกเซลเปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อย  $\pm 1$  pixel แสดงถึงความแตกต่างของการวัดที่เกิดขึ้น สามารถส่งผลต่อความแม่นยำของการคำนวณค่าแรงตึงผิวได้ โดยการวัดระยะ  $D_E$  คลาดเคลื่อนจะส่งผลให้ค่า  $D_S$  และค่าแรงตึงผิวคลาดเคลื่อนด้วย จะเห็นได้ชัดว่าการเปลี่ยนแปลงของการวัดระยะ 1 pixel ก็สามารถส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อน โดยเฉพาะกรณีที่มีการใช้สมาร์ทโฟนในการถ่ายภาพ ซึ่งความละเอียดของภาพอาจมีผลต่อความถูกต้องของการวัด



ภาพที่ 48 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงตึงผิว และระยะการวัดขนาดของระยะ  $D_E$  และ  $D_S$

จากภาพที่ 48 กราฟที่แสดงประสิทธิภาพและความแม่นยำในการวัดค่าแรงตึงผิวโดยใช้อุปกรณ์สมาร์ทโฟน 3 รุ่น ได้แก่ L, LM, และ H โดยพิจารณาจากค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงตึงผิวและระยะการวัดขนาดของระยะ  $D_E$  และ  $D_S$  ผลการศึกษาเป็นดังนี้

สมาร์ทโฟน L แสดงถึงความแม่นยำน้อยที่สุดเมื่อวัดค่าแรงตึงผิว โดยค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนมากที่สุดทั้งในด้านบวกและลบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อระยะห่างของพิกเซลเพิ่มขึ้น ความผิดพลาดเพิ่มสูงมากขึ้น โดยระยะห่างของพิกเซลเพิ่มขึ้น 4 pixel ค่าความผิดพลาดเกินกว่า 20% แสดงให้เห็นว่าสมาร์ทโฟน L อาจมีข้อจำกัดในด้านคุณภาพของกล้องหรือการจับภาพที่ไม่เพียงพอสำหรับการวัดแรงตึงผิว สมาร์ทโฟน LM และสมาร์ทโฟน H มีการแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงตึงผิวอยู่ที่  $\pm 5\%$  จากการวัดผิดพลาด  $\pm 4$  pixel ซึ่งถือว่าความแม่นยำอยู่ในระดับที่ยอมรับได้

กราฟแสดงว่าอุปกรณ์ LM และ H มีความสอดคล้องและเชื่อถือได้มากที่สุดเมื่อพิจารณาจากความผิดพลาดในการวัดที่น้อยที่สุดและคงที่ สมาร์ทโฟน L มีการเปลี่ยนแปลงของค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงตึงผิวที่ผันผวนมาก ทำให้แสดงถึงความแม่นยำในการวัดน้อยกว่า ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของแรงตึงผิวอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ( $\pm 5\%$ ) จากการวัดผิดพลาดสำหรับสมาร์ทโฟน M และ H อยู่ที่  $\pm 4$  pixel แต่สำหรับสมาร์ทโฟน L อยู่ที่  $\pm 2$  pixel และในสมาร์ทโฟนทั้ง 3 รุ่นพบว่าการกำหนดระยะ  $D_E$  คลาดเคลื่อนจะส่งผลต่อค่าแรงตึงผิวมากกว่าการกำหนดระยะ  $D_S$  ยกอย่างเช่น

จากกราฟสมาร์ทโฟน H การกำหนดระยะ  $D_E$  มากกว่าค่า  $D_E$  มาตรฐาน 2 pixel จะส่งผลให้ค่าแรงดึงผิวคลาดเคลื่อน 2.94 % ในขณะที่การกำหนดระยะ  $D_S$  มากกว่าค่า  $D_S$  มาตรฐาน 2 pixel จะทำให้ค่าแรงดึงผิวคลาดเคลื่อนประมาณ 0.23% และการวัดระยะ  $D_E$  และ  $D_S$  ค่าความคลาดเคลื่อนทางบวก(วัดเกินค่าจริง) จะส่งผลกับค่าแรงดึงผิวมากกว่าค่าความคลาดเคลื่อนทางลบ(วัดน้อยกว่าค่าจริง) ตัวอย่างเช่นจากสมาร์ทโฟน H การกำหนดระยะ  $D_E$  คลาดเคลื่อน +2 pixel จะส่งผลให้ค่าแรงดึงผิวคลาดเคลื่อน 2.94 % ในขณะที่การกำหนดระยะ  $D_E$  คลาดเคลื่อน -2 pixel จะส่งผลให้ค่าแรงดึงผิวคลาดเคลื่อน 1.56 % สรุปได้ว่าการวัดระยะ  $D_E$  มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของค่าแรงดึงผิวมากกว่าการวัดระยะ  $D_S$  และการวัดระยะทางที่มีความคลาดเคลื่อนทางบวกมีผลต่อค่าแรงดึงผิวมากกว่าการวัดทางลบ ดังนั้นในการใช้โปรแกรม ImageJ หรือ Microsoft Paint เพื่อคำนวณค่าแรงดึงผิว ควรให้ความสำคัญกับความแม่นยำในการวัดระยะ  $D_E$  เป็นหลัก เนื่องจากส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์มากกว่าการวัดระยะ  $D_S$

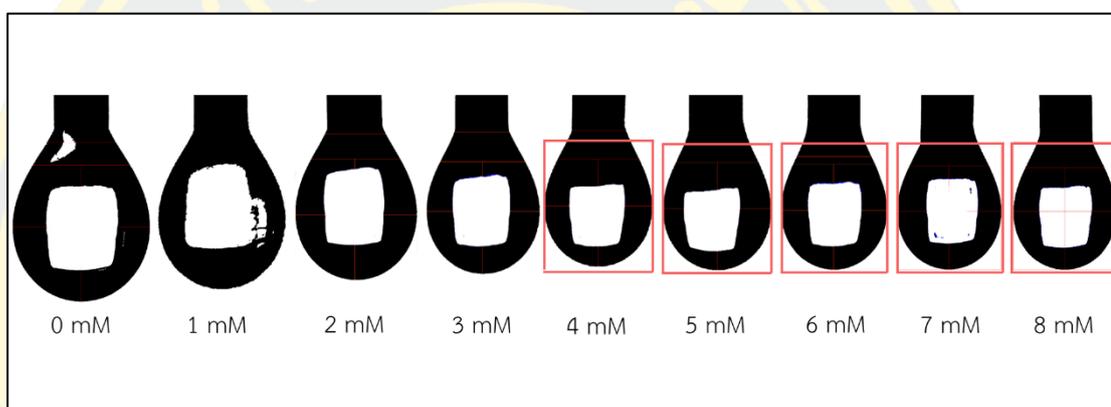
ผลการวัดค่าแรงดึงผิวจากสมาร์ทโฟน 3 รุ่น แสดงให้เห็นความแตกต่างในความแม่นยำและความเสถียรของการวัดตามที่แสดงในภาพที่ 48 ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Smith et al., 2020) ที่พบว่าการใช้สมาร์ทโฟนร่วมกับซอฟต์แวร์วิเคราะห์ภาพสามารถให้ผลการวัดที่อยู่ในช่วงความแม่นยำที่ยอมรับได้ ทั้งนี้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจากอุปกรณ์ L มากกว่าอุปกรณ์ H และ LM ที่แสดงถึงความเสถียรและความแม่นยำสูงสุด ความคลาดเคลื่อนของแรงดึงผิวที่อยู่ในช่วงต่ำกว่า  $\pm 5\%$  จากการศึกษาของ Johnson และ Lee (2019) พบว่าการใช้สมาร์ทโฟนที่มีกล้องคุณภาพสูงสามารถลดข้อผิดพลาดในการวัดได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งผลการศึกษาที่สอดคล้องกับการค้นพบว่า ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากความพร่ามัวของภาพ สามารถลดลงได้เมื่อใช้กล้องคุณภาพสูง ทั้งนี้ การใช้เลนส์มาโครเสริมกับกล้องสมาร์ทโฟนที่มีคุณภาพต่ำก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกล้องได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเลนส์มาโครเป็นเลนส์ที่ออกแบบมาเพื่อถ่ายภาพระยะใกล้ โดยสามารถหาซื้อได้ง่ายในราคาประหยัด และสามารถเพิ่มความสามารถของกล้องสมาร์ทโฟนที่มีคุณภาพต่ำ เช่น กล้อง L ให้มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับกล้องสมาร์ทโฟนที่มีคุณภาพสูงอย่างกล้อง H

### ผลการศึกษาหาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

#### 1) ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้วิธีการหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน

ในการวัดค่าแรงดึงผิวของสารลดแรงดึงผิวโดยใช้วิธีการหยดของเหลว ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาแรงดึงผิวที่แตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารลดแรงดึงผิวและคำนวณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยการเปรียบเทียบค่าแรงดึงผิวของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่อุณหภูมิ 25 °C

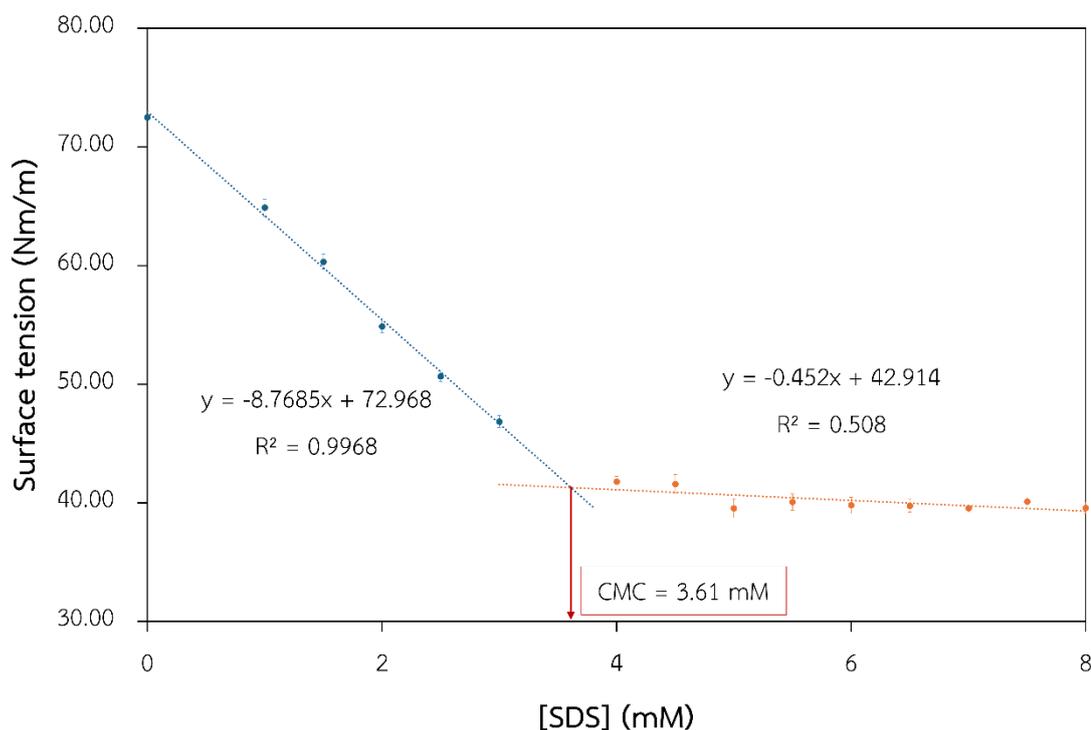
จากผลการทดลองเมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตลง พบว่าค่าแรงตึงผิวของน้ำลดลงตามการเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต จนถึงระดับความเข้มข้นที่เรียกว่า “ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์” เมื่อโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเริ่มรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ จะเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงตึงผิวที่ชัดเจน โดยค่าแรงตึงผิวลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นถึง ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ค่าแรงตึงผิวจะคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นต่อไป ดังภาพที่ 50 แสดงตัวอย่างหยดสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในช่วงความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 0-8 mM ซึ่งใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิวตามที่กล่าวข้างต้น



ภาพที่ 49 แสดงตัวอย่างหยดสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นระหว่าง 0 ถึง 8 mM

จากภาพที่ 49 แสดงตัวอย่างหยดสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นระหว่าง 0 mM ถึง 8 mM จากภาพจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ค่าแรงตึงผิวของน้ำจะลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากขนาดหยดน้ำที่มีขนาดเล็กลง เมื่อถึงความเข้มข้นระดับหนึ่งขนาดของหยดน้ำจะมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าในช่วงความเข้มข้น 0 mM ถึง 3 mM สารโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของน้ำโดยยังไม่เกิดการก่อตัวเป็นไมเซลล์ ทำให้ขนาดหยดน้ำเล็กลงเรื่อยๆ และแรงตึงผิวลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ช่วงความเข้มข้น 4 mM ถึง 8 mM ขนาดหยดน้ำจะคงที่ เนื่องจากโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเริ่มก่อตัวเป็นไมเซลล์ แล้วแสดงถึงการถึงจุดความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ซึ่งเป็นช่วงที่แรงตึงผิวไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อนำค่าแรงตึงผิวของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ไปพล็อตกราฟสามารถสังเกตแนวโน้มในการคำนวณการเกิดไมเซลล์ได้ดังนี้



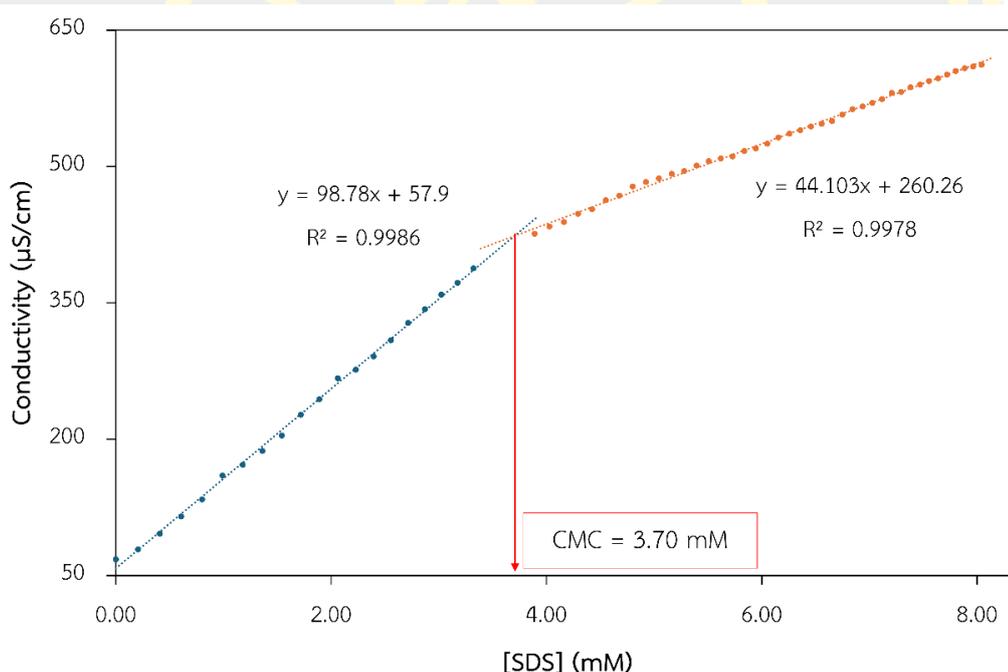
ภาพที่ 50 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต โดยใช้วิธีการหาแรงตึงผิวหยุดของของเหลว

จากภาพที่ 50 จะเห็นว่าเมื่อศึกษาแรงตึงผิวของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่ความเข้มข้นระหว่าง 0 mM ถึง 8 mM พบว่าการละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตในน้ำจะทำให้แรงตึงผิวของน้ำเปลี่ยนแปลง โดยเริ่มต้นที่ความเข้มข้น 0 mM แรงตึงผิวของน้ำมีค่า 72.50 mN/m และลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นจนถึง 3.5 mM ซึ่งแรงตึงผิวมีค่า 41.59 mN/m ในช่วงที่สองซึ่งเป็นความเข้มข้นระหว่าง 4 ถึง 8 mM แรงตึงผิวลดลงเล็กน้อยอยู่ในช่วง 41.78 ถึง 39.58 mN/m เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและแรงตึงผิว พบว่าได้เส้นกราฟเส้นตรงสองเส้น ช่วงแรกก่อนถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ มีสมการเส้นตรงคือ  $y = -8.7685x + 72.968$  และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด  $R^2 = 0.9968$  แสดงถึงการลดลงของแรงตึงผิวอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนในช่วงหลังค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ สมการเส้นตรงคือ  $y = -0.452x + 42.914$  การหาจุดตัดของเส้นกราฟทั้งสองเส้น ทำให้ทราบค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ซึ่งเท่ากับ 3.61 mM แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นนี้โมเลกุลของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตจะรวมตัวกันกลายเป็นไมเซลล์ การศึกษาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์จากภาพขนาดหยดน้ำในภาพที่ 49 พบว่าการวัดแรงตึงผิวโดยวิธีการถ่ายภาพสามารถประมาณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ได้ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและแรงตึงผิว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองการหาแรงตึงผิวด้วยวิธีหยุดของเหลว โดยใช้การถ่ายภาพด้วยสมาร์ตโฟนมีประสิทธิภาพและความแม่นยำ การทดลองนี้ยังทำได้

ง่ายและมีประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับการศึกษาในระดับมัธยมศึกษาและการทดลองในห้องปฏิบัติการทั่วไป

## 2) ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้วิธีการหาค่าการนำไฟฟ้า

การทดสอบค่าการนำไฟฟ้าโดยใช้สารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์ที่เข้มข้นและแยกตัวออกเป็นไอออน เมื่อความเข้มข้นของสารถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ สารจะรวมตัวกันเป็นไมเซลล์ ทำให้เกิดการแตกตัวของไอออนเพียงบางส่วน จากการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าเป็นเชิงเส้นจะสอดคล้องกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวจนถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ในช่วงหลังการก่อตัวของไมเซลล์ การเปลี่ยนแปลงของการนำไฟฟ้าจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับช่วงก่อนการก่อตัวของไมเซลล์ การหาจุดตัดของสมการเชิงเส้นในช่วงก่อนและหลังค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์นี้ ใช้เพื่อประมาณหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ได้อย่างแม่นยำ



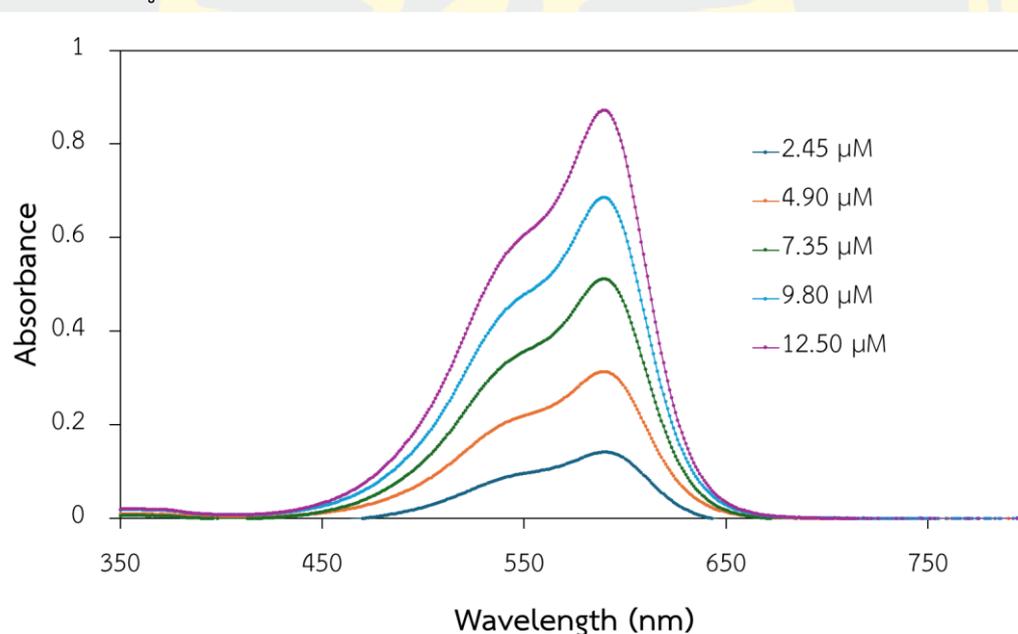
ภาพที่ 51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต

จากภาพที่ 51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต จากภาพพบว่าช่วงแรกค่าการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยมีสมการ  $y=98.78x+57.9$  และค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด  $R^2=0.9986$  แสดงถึงประสิทธิภาพการเพิ่มการนำไฟฟ้าของไอออนจากโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตอย่างชัดเจน หลังจากถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ อัตราการเพิ่มขึ้นของค่าการนำไฟฟ้าลดลง โดยมีสมการ  $y=44.103x+260.26$  และค่าสัมประสิทธิ์การ

กำหนด  $R^2=0.9978$  สะท้อนถึงการรวมตัวของโมเลกุลโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟตเป็นไมเซลล์ ซึ่งส่งผลให้จำนวนไอออนอิสระที่ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าลดลง การเปลี่ยนแปลงความชันที่ความเข้มข้น 3.70 mM แสดงให้เห็นว่า ณ จุดนี้ โมเลกุลของโซเดียมโตะเดซิลซัลเฟตเริ่มก่อตัวเป็นไมเซลล์ ซึ่งลดจำนวนไอออนอิสระ ทำให้การเพิ่มขึ้นของการนำไฟฟ้าช้าลงและมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

### 3) ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

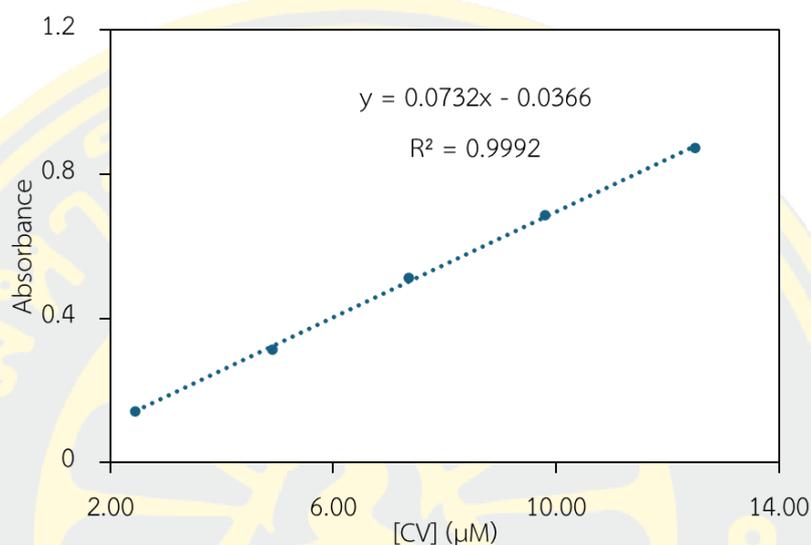
ในการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายคริสตัลไวโอเลตในน้ำ ได้ทำการศึกษาค่าการดูดกลืนแสงที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ 2.45  $\mu\text{M}$ , 4.90  $\mu\text{M}$ , 7.35  $\mu\text{M}$ , 9.80  $\mu\text{M}$  และ 12.25  $\mu\text{M}$  ในช่วงความยาวคลื่น 350-800 nm พบว่าค่าความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงสูงสุด ( $\lambda_{\text{max}}$ ) คือ 590 nm การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า ค่า  $\lambda_{\text{max}}$  ไม่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นของสารละลายคริสตัลไวโอเลตแสดงถึงความเสถียรของสีย้อมที่ความยาวคลื่นนี้และการที่สีย้อมไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่ออยู่ในสภาพสารละลาย



ภาพที่ 52 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายคริสตัลไวโอเลตในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ที่ช่วงความยาวคลื่น 350-800 nm

จากภาพที่ 52 ซึ่งแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายคริสตัลไวโอเลตในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จะเห็นว่าเส้นกราฟแสดงรูปแบบที่คล้ายคลึงกันในทุกความเข้มข้น โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 590 nm และค่าสเปกตรัมในช่วงอื่นมีการลดลงตามความยาวคลื่น ซึ่งสอดคล้องกับสมบัติการดูดกลืนแสงของสีย้อมคริสตัลไวโอเลตในช่วงความยาวคลื่นที่ศึกษา

กราฟมาตรฐานของสารละลายสี้อมคริสตัลไวโอเลตเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ ค่าความเข้มข้นของสารละลายคริสตัลไวโอเลตที่มีค่าความเข้มข้น 2.45  $\mu\text{M}$ , 4.90  $\mu\text{M}$ , 7.35  $\mu\text{M}$ , 9.80  $\mu\text{M}$  และ 12.25  $\mu\text{M}$  ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุด เท่ากับ 590 nm

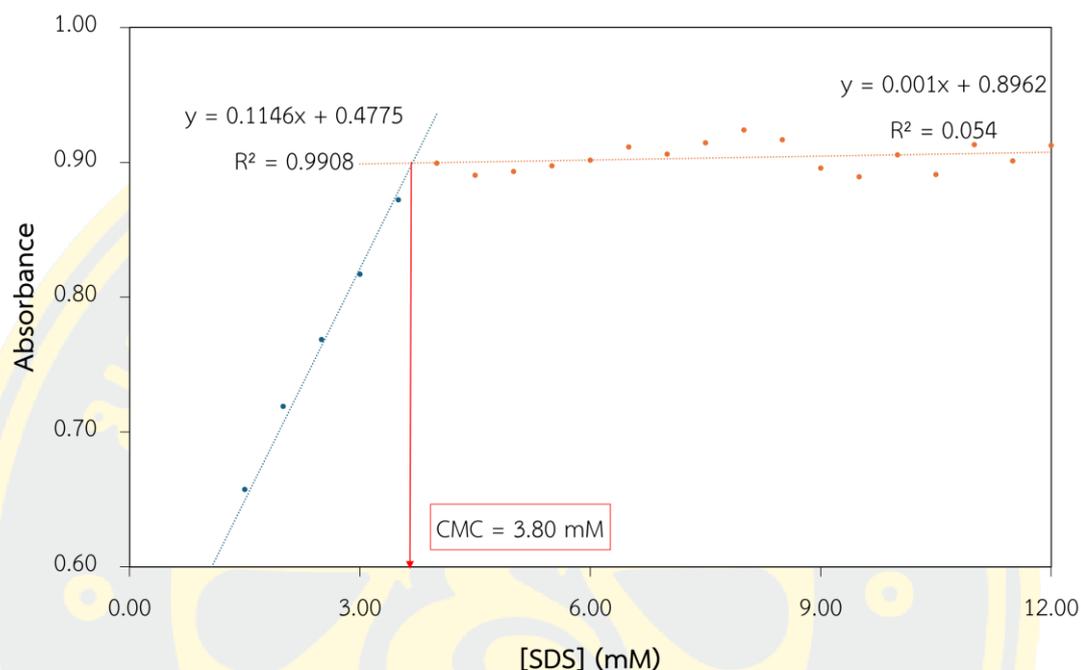


ภาพที่ 53 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายคริสตัลไวโอเลต และค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุด เท่ากับ 590 nm

จากภาพที่ 53 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของสารละลายคริสตัลไวโอเลต และค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 590 nm โดยค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย สมการของกราฟคือ  $y=0.0732x-0.0366$  ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9992 ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำของกราฟและแสดงว่าข้อมูลมีความสอดคล้องและเชื่อถือได้ เนื่องจาก  $R^2$  ใกล้เคียงกับค่า 1 มาก โดยรวมแล้วกราฟนี้มีความแม่นยำสูงและเป็นไปตามหลักการของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย

เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์ เป็นวิธีการที่ใช้ในการวิเคราะห์และตรวจวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารในสารละลาย โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารและค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ สเปคโตรโฟโตมิเตอร์จะทำงานโดยปล่อยแสงยูวีและแสงวิสิเบิลผ่านสารละลาย และตรวจวัดปริมาณแสงที่ถูกดูดกลืน โดยค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้จะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารตามกฎเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ซึ่งเป็นพื้นฐานในการหาค่าความเข้มข้นของสารที่ไม่ทราบค่า ในกรณีของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต การสร้างกราฟค่าการดูดกลืนแสงต่อความเข้มข้นของสารช่วยให้สามารถศึกษาและคำนวณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ได้ โดยเมื่อเพิ่ม

ความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต เข้าไปในสารละลาย ค่าการดูดกลืนแสงจะเปลี่ยนไปตามการรวมตัวของโมเลกุล โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต และการก่อตัวของไมเซลล์ ซึ่งทำให้กราฟมีความชันและรูปแบบที่ชัดเจน



ภาพที่ 54 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์

จากภาพที่ 54 การทดลองหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตมิเตอร์มีการเติมสีย้อมคริสตัลไวโอเลต เนื่องจากสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตเป็นสารลดแรงตึงผิว ไม่มีสี จึงต้องเติมสีย้อมคริสตัลไวโอเลต เพื่อติดตามการเกิดปฏิกิริยาได้ คริสตัลไวโอเลตจัดเป็นสีย้อมที่มีประจุบวกเข้าจับกับประจุลบของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต โดยศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของ CV/SDS ที่ความเข้มข้นของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตความเข้มข้น 1- 12 mM ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 590 nm เมื่อนำมาสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง [SDS] กับ Absorbance ที่ความยาวคลื่น 590 nm จะได้สมการเส้นตรงของข้อมูลในช่วงความเข้มข้นก่อนความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ คือ  $y = 0.1146x + 0.4775$  และสมการเส้นตรงของข้อมูลในช่วงความเข้มข้นหลังความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ คือ  $y = 0.001x + 0.8962$  ซึ่งจากการนำสมการก่อนและหลังมาหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต เท่ากับ 3.80 mM สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tanhaei (2012)

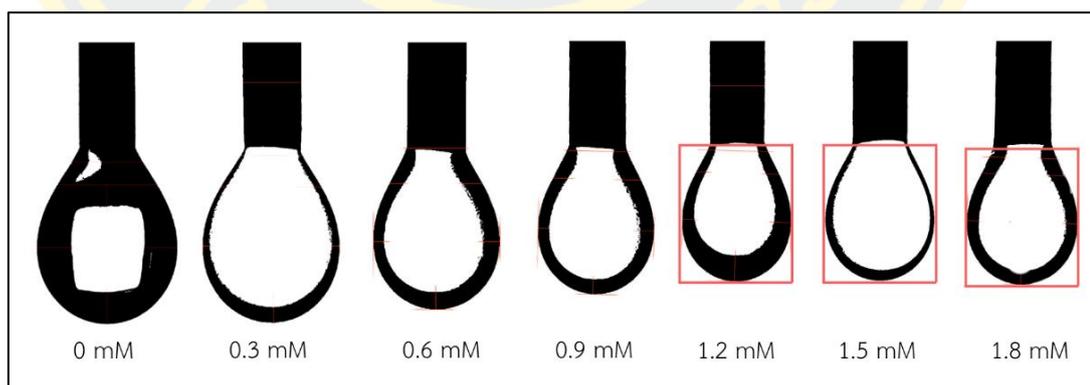
การทดลองหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต ด้วยวิธีหาค่าการดูดกลืนแสง เทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยใช้โพรินเป็นสีย้อม ได้ค่าเท่ากับ 3.46 mM

### ผลการศึกษาหาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์

#### 1) ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้วิธีการหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน

ในการวัดค่าแรงตึงผิวของสารลดแรงตึงผิวโดยใช้วิธีหยดของเหลว ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาระงัดผิวที่แตกต่างกันตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวและคำนวณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ที่อุณหภูมิ 25 °C

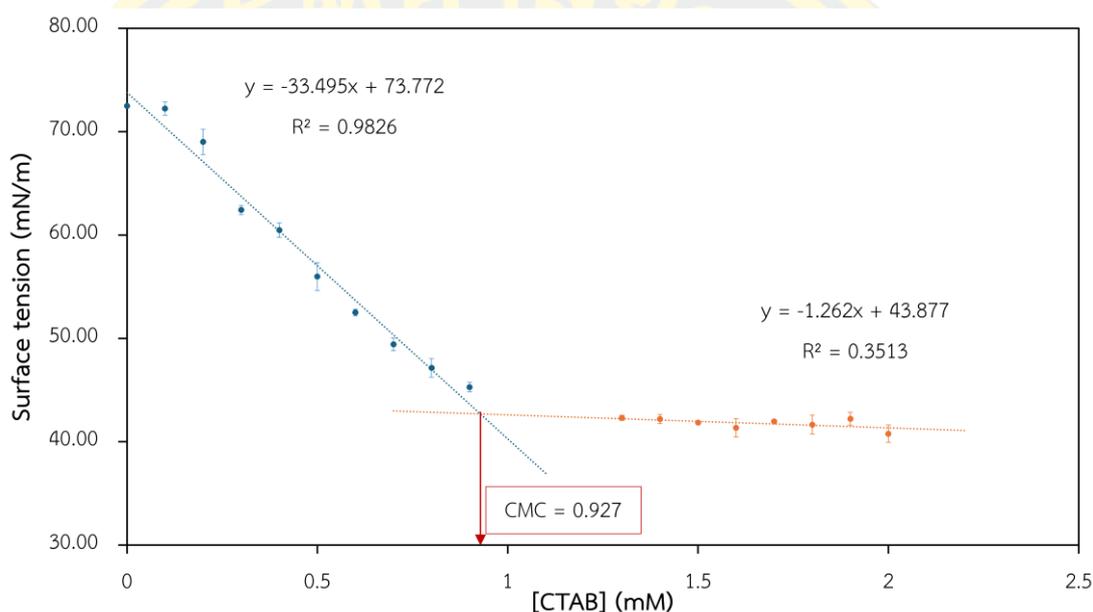
จากผลการทดลองเมื่อละลายสารลดแรงตึงผิวเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ลงในน้ำ พบว่าค่าแรงตึงผิวของน้ำลดลงตามการเพิ่มความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ จนถึงระดับความเข้มข้นที่เรียกว่า “ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์” เมื่อเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เริ่มรวมตัวกันเป็นไมเซลล์จะเห็นการเปลี่ยนแปลงค่าแรงตึงผิวที่ชัดเจน โดยค่าแรงตึงผิวลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกเมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ค่าแรงตึงผิวจะคงที่หรือเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย แม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นต่อไป ดังภาพที่ 55 แสดงตัวอย่างหยดสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ในช่วงความเข้มข้นต่าง ๆ ตั้งแต่ 0 mM ถึง 2 mM โดยศึกษาความเข้มข้นเพิ่มขึ้นครั้งละ 0.1 mM ซึ่งใช้ในการคำนวณและวิเคราะห์ค่าแรงตึงผิวตามที่กล่าวข้างต้น



ภาพที่ 55 แสดงตัวอย่างหยดสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0-2 mM

จากภาพที่ 55 แสดงตัวอย่างหยดสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0 mM ถึง 2 mM จากภาพจะเห็นได้ว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ค่าแรงตึงผิวของน้ำจะลดลง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากขนาดของหยดน้ำแต่

ละช่วงเวลาที่มึขนาดเล็กลง เมื่อถึงความเข้มข้นหนึ่งขนาดของหยดน้ำจะมีขนาดใกล้เคียงกันมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าในช่วงความเข้มข้น 0 mM ถึง 0.9 mM เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ทำหน้าที่ลดแรงตึงผิวของน้ำโดยยังไม่เกิดการก่อตัวเป็นไมเซลล์ ทำให้ขนาดหยดน้ำเล็กลงเรื่อยๆ ในขณะที่ช่วงความเข้มข้น 1.0 mM ถึง 2.0 mM ขนาดหยดน้ำจะคงที่ เนื่องจากเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เริ่มก่อตัวเป็นไมเซลล์แล้ว แสดงถึงการถึงจุดความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ซึ่งเป็นช่วงที่แรงตึงผิวไม่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญแม้ความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์จะเพิ่มขึ้น



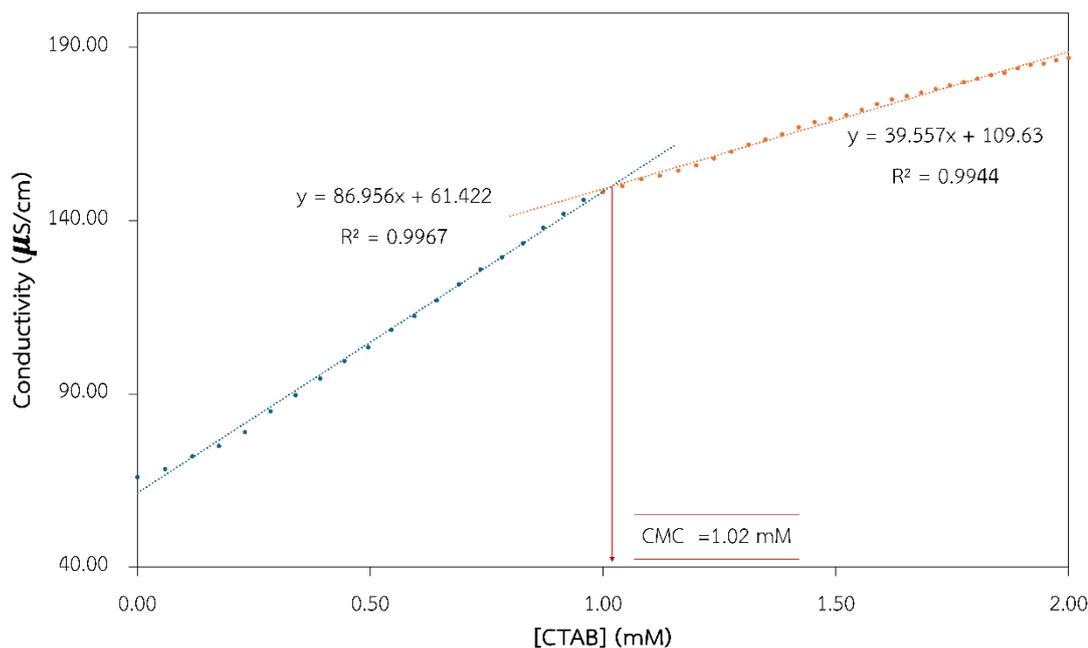
ภาพที่ 56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยใช้วิธีการหาแรงตึงผิวหยดของของเหลว

จากภาพที่ 56 แสดงค่าแรงตึงผิวของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้เทคนิคหยดของเหลว และถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน พบว่าแรงตึงผิวของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ลดลงอย่างรวดเร็วจาก 72.50 mN/m ที่ความเข้มข้น 0 mM จนถึง 47.15 mN/m ที่ความเข้มข้น 0.8 mM เมื่อถึงความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่ 0.927 mM ความชันของกราฟในช่วงนี้มีค่าสูงโดยมีสมการคือ  $y = -33.495x + 73.772$  และ  $R^2 = 0.9826$  แสดงถึงการลดลงของแรงตึงผิวอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโมโนเมอร์ที่อินเทอร์เฟซระหว่างอากาศและน้ำส่งผลให้แรงตึงผิวลดลงอย่างรวดเร็ว หลังจากถึงค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์แรงตึงผิวจะคงที่ตามที่แสดงในกราฟ โดยมีสมการ คือ  $y = -1.262x + 43.877$  การเปลี่ยนแปลงในช่วงหลังความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์นี้บ่งชี้ว่าโมเลกุลเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่เพิ่มขึ้นจะก่อตัวเป็นไมเซลล์แทนที่จะสะสมที่อินเทอร์เฟซ ทำให้แรงตึงผิวคงที่แม้ว่าความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับงานวิจัยของ

Fluksman, (2019) ได้ทำการศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยใช้วิธีการวัดแรงตึงผิวแบบวงแหวนคูนอยส์ ได้เท่ากับ 0.93 mM

## 2) ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้วิธีการหาค่าการนำไฟฟ้า

การทดสอบค่าการนำไฟฟ้าดำเนินการโดยใช้ความเข้มข้นต่าง ๆ ของสารลดแรงตึงผิวเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการนำไฟฟ้าและความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ทำหน้าที่เป็นอิเล็กโทรไลต์เข้มข้นและแยกตัวออกเป็นไอออนที่ก่อตัวนอกเหนือจากความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ เนื่องจากสารลดแรงตึงผิวรวมเป็นไมเซลล์ ซึ่งนำไปสู่การทำให้เกิดไอออนในซึ่บางส่วน การนำไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นเชิงเส้นที่สอดคล้องกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวสูงถึงความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ พบได้สำหรับสารลดแรงตึงผิวทั้งสอง โดยการไล่ระดับในพื้นที่หลังไมเซลล์ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับพื้นที่ก่อนไมเซลล์จุดตัดของสมการเชิงเส้นเหล่านี้ใช้การประมาณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์



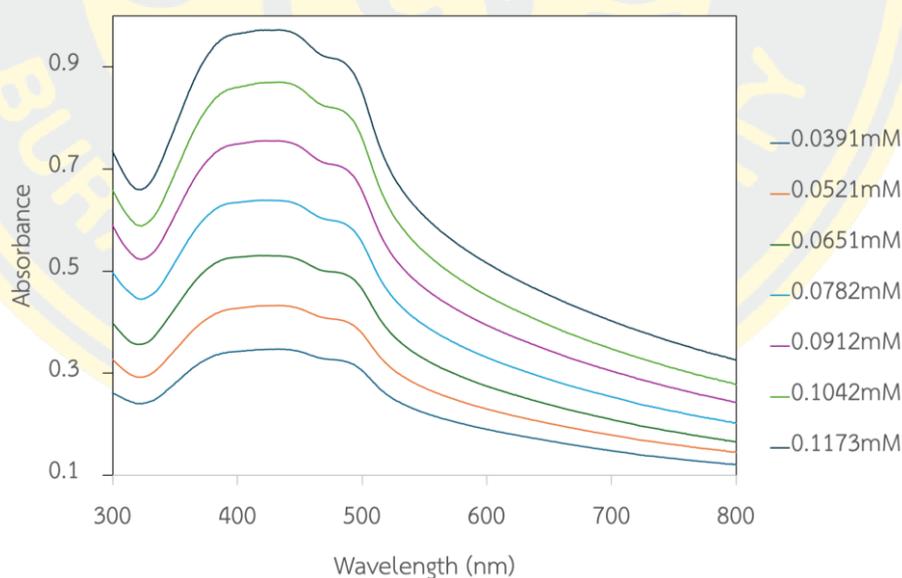
ภาพที่ 57 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการนำไฟฟ้ากับความเข้มข้นของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยวิธีการหาค่าการนำไฟฟ้า

จากภาพที่ 57 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงที่เห็นได้ชัดความชันของเส้นโค้ง ค่าการนำไฟฟ้าในช่วงแรก ค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ( $y = 86.956x + 61.422$ ,  $R^2 = 0.9967$ ) แสดงให้เห็นว่าเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ที่ละลาย

อยู่มีส่วนสำคัญต่อค่าการนำไฟฟ้า หลังจากความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์แล้วค่าการนำไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นช้ากว่ามาก ( $y = 39.557x + 109.63$ ,  $R^2 = 0.9944$ ) การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นที่ 1.02 mM ซึ่งบ่งชี้ถึงการก่อตัวของไมเซลล์ก็ใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Goronja et al. (2016) วัดค่าความเข้มข้นวิกฤต ไมเซลล์จากการนำไฟฟ้าโดยใช้เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้าแบบดิจิทัลของเซทิลไดรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เท่ากับ 0.907

### 3) ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ โดยใช้วิธีการดูดกลืนแสง ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

การวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเซทิลไดรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากการก่อตัวของไมเซลล์ในสารละลาย โดยใช้ข้อมูลจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นในการกำหนดจุดความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์การวิเคราะห์สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสีย้อมเคอร์คูมินในน้ำความเข้มข้น 0.0391 mM, 0.0521 mM, 0.0651mM, 0.0782 mM, 0.0912 mM, 0.1042 mM และ 0.1173 mM ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 300-800 nm แสดงในภาพที่ 58 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงและความยาวคลื่น



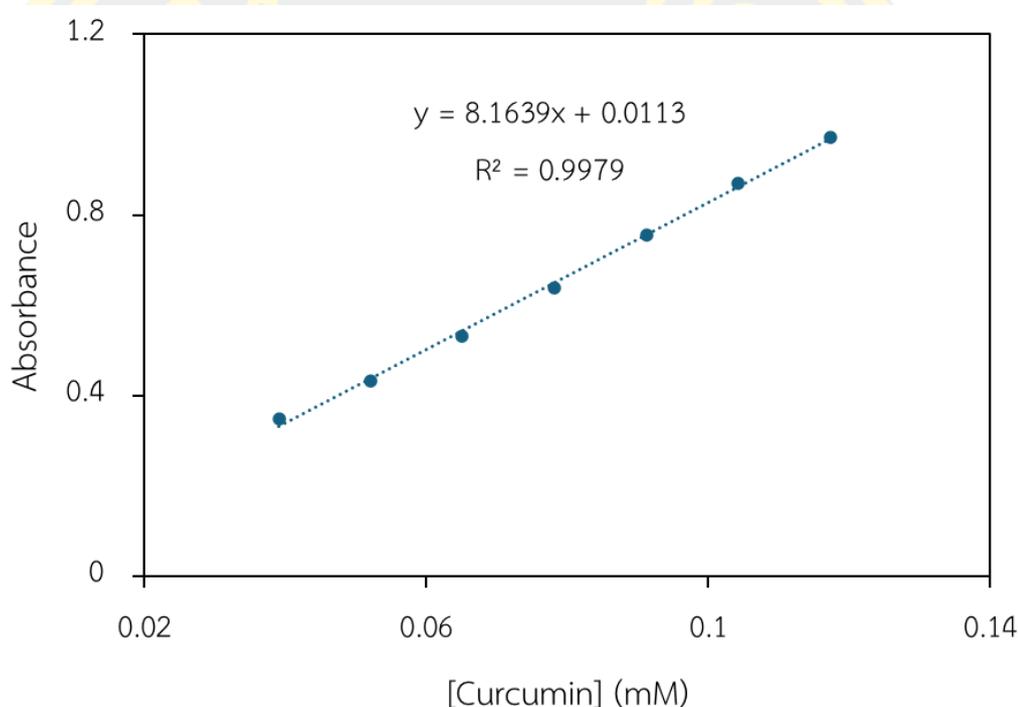
ภาพที่ 58 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเคอร์คูมินในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 300-800 nm

จากภาพที่ 58 ซึ่งแสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารละลายเคอร์คูมินในน้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ จะเห็นว่าเส้นกราฟแสดงรูปแบบที่คล้ายคลึงกันในทุกความเข้มข้น โดยมีค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ 433 nm และค่าสเปกตรัมในช่วงอื่นมีการลดลงตามความยาวคลื่น ซึ่งสอดคล้องกับ

สมบัติการดูดกลืนแสงของสีย้อมเคอร์คูมินในงานวิจัย Kadam et al. (2018) ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด ของเคอร์คูมินในน้ำมักอยู่ในช่วง 420 ถึง 430 nm ขึ้นอยู่กับค่า pH และสถานะของสารละลาย

#### การวิเคราะห์หากราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเคอร์คูมิน

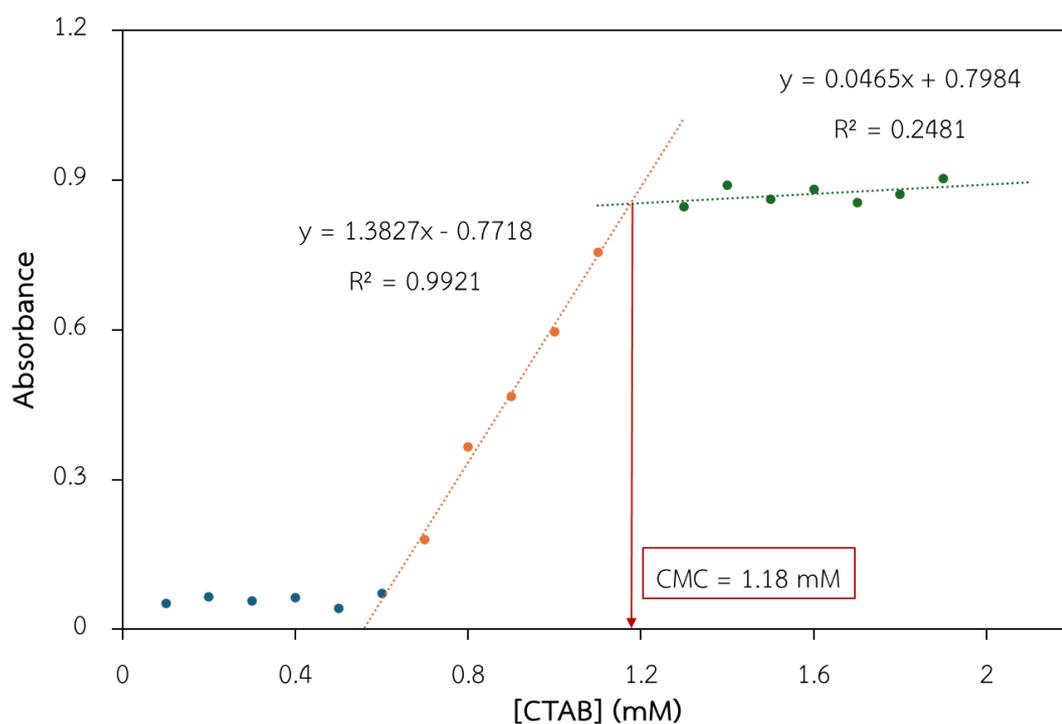
กราฟมาตรฐานของสารละลายสีย้อมเคอร์คูมินเป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายและค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ ค่าความเข้มข้นของสารละลายเคอร์คูมินที่มีค่าความเข้มข้น 0.0391 mM, 0.0521 mM, 0.0651mM, 0.0782 mM, 0.0912 mM, 0.1042 mM และ 0.1173 mM ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้ที่ความยาวคลื่นสูงสุด เท่ากับ 433 nm



ภาพที่ 59 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคอร์คูมิน และค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเท่ากับ 433 nm

จากภาพที่ 59 กราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเคอร์คูมิน และค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น เท่ากับ 433 nm โดยค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย สมการของกราฟคือ  $y = 8.1639x + 0.0113$  ค่าสัมประสิทธิ์การกำหนด ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.9979 ซึ่งบ่งชี้ถึงความแม่นยำของกราฟและแสดงว่าข้อมูลมีความสอดคล้องและเชื่อถือได้ เนื่องจาก  $R^2$  ใกล้เคียงกับค่า 1 มาก โดยรวมแล้วกราฟนี้มีความแม่นยำสูงและเป็นไปตามหลักการของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย

การสร้างกราฟค่าการดูดกลืนแสงต่อความเข้มข้นของสารช่วยให้สามารถศึกษาและคำนวณค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ได้ โดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว ค่าการดูดกลืนแสงจะเปลี่ยนไปตามการรวมตัวของโมเลกุลเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์และการก่อตัวของไมเซลล์ ซึ่งทำให้กราฟมีความชันและรูปแบบที่ชัดเจน



ภาพที่ 60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงต่อความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยใช้วิธีการด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตเมทรี

จากภาพที่ 60 การทดลองหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปคโตรโฟโตเมทรีมีการเติมสีย้อมเคอร์คูมิน เนื่องจากเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เป็นสารลดแรงตึงผิวไม่มีสี จึงต้องเติมเคอร์คูมินเพื่อติดตามการเกิดปฏิกิริยาได้ โดยศึกษาสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเคอร์คูมินที่ความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ที่ 0.1 - 1.8 mM ค่าความเข้มของการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่น 433 nm ความเข้มของการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ จนกระทั่งถึงความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ค่าการดูดกลืนแสงนี้จะลดลงหลังจากนั้นถึงค่าที่แน่นอนเนื่องจากการรวมตัวกันสูงสุดของเคอร์คูมินเข้าสู่ไมเซลล์ในน้ำ โดยเมื่อนำมาสร้างกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง [CTAB] กับ Absorbance ที่ความยาวคลื่น 433 nm จะได้สมการเส้นตรงของข้อมูลในช่วงความเข้มข้นก่อน ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ คือ

$y = 1.3827x - 0.7718$ ,  $R^2 = 0.9921$  และสมการเส้นตรงของข้อมูลในช่วงความเข้มข้นหลังความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์  $y = 0.0465x + 0.7984$  ซึ่งจากการนำสมการทั้งสองมาหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เท่ากับ 1.18 mM

### ผลการวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

การศึกษาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวมีความสำคัญในการทำความเข้าใจพฤติกรรมรวมตัวของโมเลกุลในสารละลาย และเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้สารลดแรงตึงผิวในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบชุดการทดลองในการหาค่าแรงตึงผิวของของเหลว โดยใช้วิธีการหยดของเหลว และการถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน แล้วเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีการนำไฟฟ้าและการดูดกลืนแสง เพื่อประเมินประสิทธิภาพและความถูกต้องของวิธีการนี้ว่ามีความน่าเชื่อถือและแม่นยำเพียงพอสำหรับการใช้งานของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ นอกจากนี้ยังได้นำค่าจากเอกสารงานวิจัยมาเปรียบเทียบเพื่อประเมินความถูกต้องและความสอดคล้องของผลลัพธ์จากการทดลองในครั้งนี้

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ โดยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน

Method	ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (mM)	
	SDS	CTAB
วิธีการวัดแรงตึงผิวด้วยการถ่ายภาพ	3.61	0.92
วิธีการวัดการนำไฟฟ้า	4.05±0.39	0.93±0.13
วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง	3.80	1.18

จากตารางที่ 6 ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต เท่ากับ 3.61 mM ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจากวิธีการวัดการนำไฟฟ้า เท่ากับ 4.05±0.39 mM และวิธีการวัดการดูดกลืนแสง เท่ากับ 3.80 mM ตามลำดับ และค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ เท่ากับ 0.92 mM ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกับค่าจากวิธีการวัดการนำไฟฟ้า เท่ากับ 0.93±0.13mM และวิธีการวัดการดูดกลืนแสง เท่ากับ 1.18 mM ตามลำดับ จากการวัดทั้งสามวิธีมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้จากปัจจัยหลายประการที่ช่วยลดความแปรปรวนระหว่างวิธีการทดลอง ดังนี้ การใช้สารเคมีชนิดเดียวกันจากขวดเดียวกันในแต่ละการทดลอง ทำให้สารมีความบริสุทธิ์และความเข้มข้นที่เหมือนกัน ลดความแตกต่างของคุณภาพหรือการปนเปื้อนของสาร การทดลองทั้งหมดดำเนินในสภาวะเดียวกัน น้ำที่ใช้มีคุณสมบัติและความบริสุทธิ์เหมือนกัน ช่วยลด

ผลกระทบจากสารปนเปื้อนหรือไอออนที่อาจเปลี่ยนแปลงแรงดึงผิวหรือความนำไฟฟ้าของสารละลาย และอุณหภูมิการทดลองดำเนินการที่อุณหภูมิห้องที่ควบคุมได้ที่ 25 °C ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงผิวและค่าการนำไฟฟ้าที่อาจเกิดจากผลกระทบของอุณหภูมิ

สรุปผลการทดลองเกี่ยวกับค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิล-ไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ จากการทดลองเปรียบเทียบวิธีการที่แตกต่างกัน ได้แก่ การวัดแรงดึงผิว ด้วยการถ่ายภาพ การวัดการนำไฟฟ้า และการวัดค่าการดูดกลืนแสง ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความแม่นยำของการทดลองเนื่องจากค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์จากทั้ง 3 วิธี ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกัน ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ที่ได้จากวิธีหยดของของเหลวด้วยสมาร์ทโฟนมีความแม่นยำใกล้เคียงกับวิธีการนำไฟฟ้าและวิธีการดูดกลืนแสง เหมาะสำหรับการนำไปใช้ในห้องปฏิบัติการที่มีงบประมาณจำกัด เช่น ในโรงเรียนหรือมหาวิทยาลัย

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิล-ไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ จากเอกสารงานวิจัยโดยใช้วิธีการที่แตกต่างกัน

Method	ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (mM)			
	SDS	Ref.	CTAB	Ref.
วิธีการวัดแรงดึงผิว	5.30	Dionisio (2000)	0.93±0.005	Fluksman and Benny (2019)
วิธีการวัดการนำไฟฟ้า	8.5±0.1	Scholz et al. (2018)	0.98	Shah et al. (2016)
วิธีการวัดค่าการดูดกลืนแสง	3.46	Tanhaei et al. (2012)	0.90	Morh (2007)

จากตารางที่ 7 ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตจากเอกสารงานวิจัยที่ศึกษาโดยวิธีการวัดแรงดึงผิว การวัดค่านำไฟฟ้า และการวัดค่าดูดกลืนแสง อยู่ในช่วง 3.46-8.5 mM ในขณะที่ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้พบว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต อยู่ในช่วง 3.61-4.05 mM ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลจากเอกสารงานวิจัยอื่น ๆ และแสดงถึงความสอดคล้องของผลลัพธ์ที่ครอบคลุมช่วงกว้างและมีความแตกต่างกันระหว่างวิธีการวัดเป็นผลมาจากปัจจัยที่ส่งผลต่อความไวของการวัด เช่น การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดึงผิว ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลในสารละลาย และอิทธิพลจากปัจจัยภายนอก เช่น ความบริสุทธิ์ของสารและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งอาจส่งผลต่อการก่อตัวของไมเซลล์ในแต่ละวิธีการวัด อย่างไรก็ตามผลการวิจัยนี้ยืนยันว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่วัดได้อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกับเอกสารงานวิจัยก่อนหน้า แสดงถึงความน่าเชื่อถือและความสอดคล้องของผลลัพธ์จากการทดลอง

ค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของเซทิล-ไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์จากเอกสารงานวิจัยที่ศึกษาโดยวิธีการวัดแรงดึงผิว การวัดค่านำไฟฟ้าและการวัดค่าดูดกลืนแสง อยู่ในช่วง 0.90-0.98 mM

แสดงถึงความสอดคล้องและน่าเชื่อถือของค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์แม้วิธีการวัดจะแตกต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลจากการวิจัยนี้ที่พบว่าค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ อยู่ในช่วง 0.92-1.18 mM แสดงให้เห็นว่าเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวประจุบวกมีโครงสร้างที่เสถียรลักษณะการก่อตัวไมเซลล์ในช่วงความเข้มข้นแคบ ทำให้ผลการวัดค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์มีความสอดคล้องกัน

สรุปผลการทดลองค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ที่วัดได้ในงานวิจัยนี้ มีความสอดคล้องกับข้อมูลในเอกสารงานวิจัยก่อนหน้านี้ แสดงถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ สำหรับโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์มีความแตกต่างระหว่างวิธีการวัดมากกว่าเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์เนื่องจากลักษณะของโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตที่มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลในสารละลายที่ซับซ้อนกว่า การวัดค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์โดยวิธีแรงตึงผิว การนำไฟฟ้า และการดูดกลืนแสงสามารถให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำได้ เมื่อมีการควบคุมตัวแปรการทดลองอย่างเหมาะสม ผลการทดลองนี้สนับสนุนว่าการวัดค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ด้วยวิธีที่หลากหลาย เช่น การวัดแรงตึงผิวด้วยสมาร์ตโฟน สามารถให้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือและใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาแรงตึงผิวของของเหลว เพื่อออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิวของเหลว โดยใช้วิธีหยดของเหลว ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน และศึกษาผลของแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว เพื่อคำนวณหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

#### สรุปผลการวิจัย

การออกแบบชุดการทดลองหาค่าแรงตึงผิวของของเหลว โดยใช้วิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน

1) การออกแบบชุดการทดลองและการถ่ายภาพหยดของเหลวด้วยสมาร์ทโฟน

การใช้สมาร์ทโฟนในการทดลองถ่ายภาพหยดของเหลวเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพเนื่องจากสมาร์ทโฟนในปัจจุบันมีความสามารถในการบันทึกภาพที่มีความละเอียดสูง ซึ่งเพียงพอต่อการวิเคราะห์รูปทรงหยดน้ำเพื่อคำนวณค่าแรงตึงผิว โดยในการถ่ายภาพควรให้ขนาดหยดน้ำมีขนาด 1/4 ของขนาดภาพขึ้นไป และเมื่อเปรียบเทียบกล้องสมาร์ทโฟนทั้ง 3 แบบพบว่าสามารถให้ภาพที่มีคุณภาพเหมาะสมกับการวิเคราะห์ได้ทั้งสามแบบ แต่ iPhone 15 Pro Max และ iPhone 13 ร่วมกับเลนส์มาโคร มีประสิทธิภาพในการบันทึกภาพหยดน้ำสูงสุด ช่วยให้ได้ภาพที่มีความคมชัดและรายละเอียดสูงให้ผลการวิเคราะห์ที่แม่นยำที่สุด เนื่องจากเซนเซอร์กล้องและการซูมที่ให้ภาพขนาดใหญ่และคมชัดกว่า จะเห็นได้ว่าถ้านักเรียนหรือผู้ทดลองมีสมาร์ทโฟนที่ประสิทธิภาพกล้องไม่สูงสามารถใช้เลนส์เสริมมาโครมาช่วยในการถ่ายภาพหยดน้ำมีความคมชัดมากขึ้น ผลการทดลองมีความแม่นยำมากขึ้น อย่างไรก็ตามหากนักเรียนหรือผู้ศึกษาใช้สมาร์ทโฟนที่มีความละเอียดของกล้องต่ำสามารถปรับปรุงคุณภาพของภาพได้โดยการใช้เลนส์มาโคร ซึ่งเป็นอุปกรณ์เสริมที่ทำได้ง่ายและราคาประหยัด โดยเลนส์มาโครช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกล้องสมาร์ทโฟนให้สามารถถ่ายภาพที่มีคุณภาพสูงได้ใกล้เคียงกับสมาร์ทโฟนระดับสูงที่มีราคาสูง จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการศึกษาและการทดลองในของนักเรียนและนักศึกษา

2) ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าแรงตึงผิว การศึกษาเปรียบเทียบร้อยละของเวลาต่อหยดที่ใช้ในการคำนวณค่าแรงตึงผิว พบว่าเวลาในการหยดที่เหมาะสมในการวิเคราะห์มีผลโดยตรงต่อความแม่นยำของผลลัพธ์ ร้อยละ 70-95 ของเวลาต่อหยด ให้ผลการคำนวณที่มีความแม่นยำ นอกจากนี้ความคมชัดของภาพจากการถ่ายภาพหยดน้ำด้วยสมาร์ทโฟนพบว่ามีผลต่อค่าแรงตึงผิว ควรปรับภาพให้มีความคมชัดมากขึ้น การปรับคอนทราสต์ของภาพช่วยลดความคลาดเคลื่อนได้ และการวัดขนาดหยดน้ำให้ระวางการวัดขนาด  $D_E$  เพราะจะส่งผลต่อค่า  $D_s$  ทำให้ค่าแรงตึงผิวมีความผิดพลาดมากกว่า 1.5%

## ผลของแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และคำนวณหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

การวัดค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวโซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ แสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีหยดของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟนสามารถความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวแสดงการลดลงของแรงตึงผิวอย่างชัดเจนเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นจนถึงจุดความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ใช้วิธีการนำไฟฟ้าและการดูดกลืนแสง การเปรียบเทียบวิธีการวัดค่าแรงตึงผิวโดยใช้สมาร์ทโฟนกับวิธีการวัดการนำไฟฟ้าและการดูดกลืนแสงพบว่าผลการวัดค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวทั้งสองชนิดที่ได้จากวิธีหยดของเหลวมีความสอดคล้องกับวิธีการวัดอื่น ๆ อย่างมาก ทำให้สามารถยืนยันได้ว่าวิธีหยดของเหลวที่ ใช้สมาร์ทโฟนมีความแม่นยำและน่าเชื่อถือ

วิจัยครั้งนี้ได้แสดงให้เห็นว่าชุดอุปกรณ์การหาค่าแรงตึงผิวของเหลวที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน ในการศึกษาค่าแรงตึงผิวและหาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิวมีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับการใช้งานในห้องปฏิบัติการของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาและนักศึกษาระดับปริญญาตรี โดยใช้อุปกรณ์ที่หาได้ง่าย มีความปลอดภัย และมีต้นทุนต่ำ

### ข้อเสนอแนะ

1) การพัฒนาเครื่องมือและเทคนิคการถ่ายภาพ แม้ว่าการใช้สมาร์ทโฟนในการถ่ายภาพหยดของเหลวจะมีประสิทธิภาพ แต่ควรมีการพัฒนาเลนส์เสริมที่สามารถปรับปรุงคุณภาพของภาพให้มีความคมชัดและลดปัญหาการเบลอของภาพ ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำในการวัดค่าแรงตึงผิวได้ดียิ่งขึ้น

2) การทดลองในสภาวะแวดล้อมที่ต่างกัน ควรมีการทดลองวัดแรงตึงผิวและความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ ในสภาวะแวดล้อมที่แตกต่างกัน เช่น อุณหภูมิหรือความดันต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาพแวดล้อมต่อค่าแรงตึงผิวและความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ของสารลดแรงตึงผิว

3) การประยุกต์ใช้ในสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น ในการวิจัยครั้งนี้ใช้สารลดแรงตึงผิวประจุลบและสารลดแรงตึงผิวประจุบวก เช่น โซเดียมโดเดซิลซัลเฟตและเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ ควรขยายการศึกษาในสารลดแรงตึงผิวประเภทอื่น ๆ เช่น สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุหรือสารลดแรงตึงผิวที่มีทั้งประจุบวกและประจุลบเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

## บรรณานุกรม

- ทวีชัย อมรศักดิ์ชัย และคณะ. (2560). *เคมี 1* (พิมพ์ครั้งที่ 12). กรุงเทพมหานคร : แมคกรอ-ฮิล.
- พิชญภัค สมปัญญา (2558). *การวัดค่าความตึงผิวด้วยวิธีการหยดของเหลวจากปลายเข็มฉีดยาตามกฎของเทต* (ปริญญาานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต). มหาวิทยาลัยบูรพา.
- อรรวรรณ ศิริโชติ. (2549). *เคมีเชิงฟิสิกส์เบื้องต้น*. สงขลา: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- Adamson, A. W. (1967). *Physical Chemistry of Surfaces* (2nd ed.). Interscience Publishers.
- Afolabi, O. A., Turup Pandurangan, M., & Kanny, K. (2024). Types of Biobased Nanomaterials. In S. Ahmed (Ed.), *Biobased Nanomaterials: Applications in Biomedicine, Food Industry, Agriculture, and Environmental Sustainability* (pp. 17-43). Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-0542-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-97-0542-9_2)
- Alkawareek, M. Y., Akkelah, B. M., Mansour, S. M., Amro, H. M., Abulateefeh, S. R., & Alkilany, A. M. (2018). Simple Experiment to Determine Surfactant Critical Micelle Concentrations Using Contact-Angle Measurements. *Journal of Chemical Education*, 95(12), 2227-2232. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00276>
- Andreas, J. M. H., E. A.; Tucker, W. B. (1938). Boundary Tension by Pendant Drops. *Journal of Physical Chemistry*, 42, 1001-1019.
- Bashforth, F. A., J. C. (1883). *An Attempt to Test the Theories of Capillary Action by Comparing the Theoretical and Measured Forms of Drops of Fluid*. Cambridge University Press.
- Berry, J. D., Neeson, M. J., Dagastine, R. R., Chan, D. Y., & Tabor, R. F. (2015, Sep 15). Measurement of surface and interfacial tension using pendant drop tensiometry. *J Colloid Interface Sci*, 454, 226-237. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.05.012>
- Bhushan, B., & Jung, Y. C. (2011). Natural and Biomimetic Artificial Surfaces for Superhydrophobicity, Self-Cleaning, Low Adhesion, and Drag Reduction. *Progress*

in *Materials Science*, 56(1), 1-108.

Chen, H., Muros-Cobos, J. L., Holgado-Terriza, J. A., & Amirfazli, A. (2017). Surface tension measurement with a smartphone using a pendant drop. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 533, 213-217.

<https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.08.019>

Chowdhury, S., Shrivastava, S., Kakati, A., & Sangwai, J. S. (2022, 2022/01/12). Comprehensive Review on the Role of Surfactants in the Chemical Enhanced Oil Recovery Process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 61(1), 21-64.

<https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c03301>

Daerr, A., & Mogne, A. (2016). Pendent\_Drop: An ImageJ Plugin to Measure the Surface Tension from an

Image of a Pendent Drop. *Journal of Open Research Software*, 4(1).

<https://doi.org/10.5334/jors.97>

Damson, A. W., & Gast, A. P. (1997). *Physical Chemistry of Surfaces*. Wiley.

Dionisio, M. S., João. (2000). A Surface Chemistry Experiment Using an Inexpensive Contact Angle Goniometer. *Journal of Chemical Education*, 77(1), 59-62.

Drelich, J., Fang, C., & White, C. (2002). Measurement of interfacial tension in Fluid-Fluid Systems. In (pp. 3152-3166).

Ebnesajjad, S. (2011). Surface Tension and Its Measurement. In *Handbook of Adhesives and Surface Preparation* (pp. 21-30). <https://doi.org/10.1016/b978-1-4377-4461-3.10003-3>

Fluksman, A., & Benny, O. (2019). A robust method for critical micelle concentration determination using coumarin-6 as a fluorescent probe. *Analytical Methods*, 11(30), 3810-3818. <https://doi.org/10.1039/c9ay00577c>

Gascon, K. N., Weinstein, S. J., & Antoniadis, M. G. (2019). Use of Simplified Surface Tension Measurements To Determine Surface Excess: An Undergraduate Experiment. *Journal of Chemical Education*, 96(2), 342-347.

<https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00667>

Gibbs, J. W. (1961). *The Scientific Papers of J. Willard Gibbs*. Dover Publications.

Goronja, J., Janosevic-Lezaic, A., Dimitrijevic, B., Malenovic, A., Stanisavljev, D., & Pejic, N. (2016). Determination of critical micelle concentration of cetyltrimethylammonium bromide: Different procedures for analysis of experimental data. *Hemijska industrija*, 70(4), 485-492.

<https://doi.org/10.2298/hemind150622055g>

Goy, N.-A., Denis, Z., Lavaud, M., Grolleau, A., Dufour, N., Deblais, A., & Delabre, U. (2017). Surface tension measurements with a smartphone. *The Physics Teacher*, 55(8), 498-499. <https://doi.org/10.1119/1.5008349>

Harkins, W. D., & Jordan, H. F. (1930). A method for the determination of surface and interfacial tension from the maximum pull on a ring. *Journal of the American Chemical Society*, 52(5), 1751-1772.

Israelachvili, J. N. (2011). *Intermolecular and surface forces*. Academic Press.

Kadam, P. V., Yadav, K. N., Bhingare, C. L., & Patil, M. J. (2018). Standardization and quantification of curcumin from *Curcuma longa* extract using UV visible spectroscopy and HPLC. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 7(5), 1913-1918.

Korenko, M., & Šimko, F. (2010). Measurement of Interfacial Tension in Liquid-Liquid High-Temperature Systems. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 55(11), 4561-4573. <https://doi.org/10.1021/je1004752>

KRÜSS. (2016). *Force tensiometer – K6*. <https://pdf.medicaexpo.com/pdf/kruess-gmbh/force-tensiometer-k6/123719-214907.htm>

Miller, C. A. a. N., P. (2008). *Interfacial phenomena: equilibrium and dynamic effects*. CRC Press/Taylor & Francis.

Nabi, A., Tasneem, S., Jesudason, C. G., Lee, V. S., & Zain, S. B. M. (2018). Study of interaction between cationic surfactant (CTAB) and paracetamol by electrical

conductivity, tensiometric and spectroscopic methods. *Journal of Molecular Liquids*, 256, 100-107.

Ninham, B. W., & Yaminsky, V. (1997). Ion binding and ion specificity: The Hofmeister effect and Onsager and Frank revisited. *Langmuir*, 13(7), 2097-2108.

Perinelli, D. R., Cespi, M., Lorusso, N., Palmieri, G. F., Bonacucina, G., & Blasi, P. (2020). Surfactant Self-Assembling and Critical Micelle Concentration: One Approach Fits All? *Langmuir*, 36(21), 5745-5753.

<https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c00420>

Rosen, M. J. (2004). *Surfactants and interfacial phenomena* (3rd ed.). Wiley-Interscience.

Rosen, M. J., & Kunjappu, J. T. (2012). *Surfactants and Interfacial Phenomena* (4th ed.). John Wiley & Sons.

Scholz, N., Behnke, T., & Resch-Genger, U. (2018, Jan). Determination of the Critical Micelle Concentration of Neutral and Ionic Surfactants with Fluorometry, Conductometry, and Surface Tension-A Method Comparison. *J Fluoresc*, 28(1), 465-476. <https://doi.org/10.1007/s10895-018-2209-4>

Scientific, B. (2015). Attension Sigma 700/701: Force tensiometers [Brochure].

<https://www.biolinscientific.com/hubfs/Pdf/Attension/Brochures/attension-sigma-range-force-tensiometers-brochure.pdf>

Scientific, B. (2021). Attension Theta range optical tensiometers [Brochure].

<https://www.biolinscientific.com/hubfs/Attension-Theta-Range-Optical-Tensiometers-Brochure-2024%20with%20new%20dispensers-web.pdf>

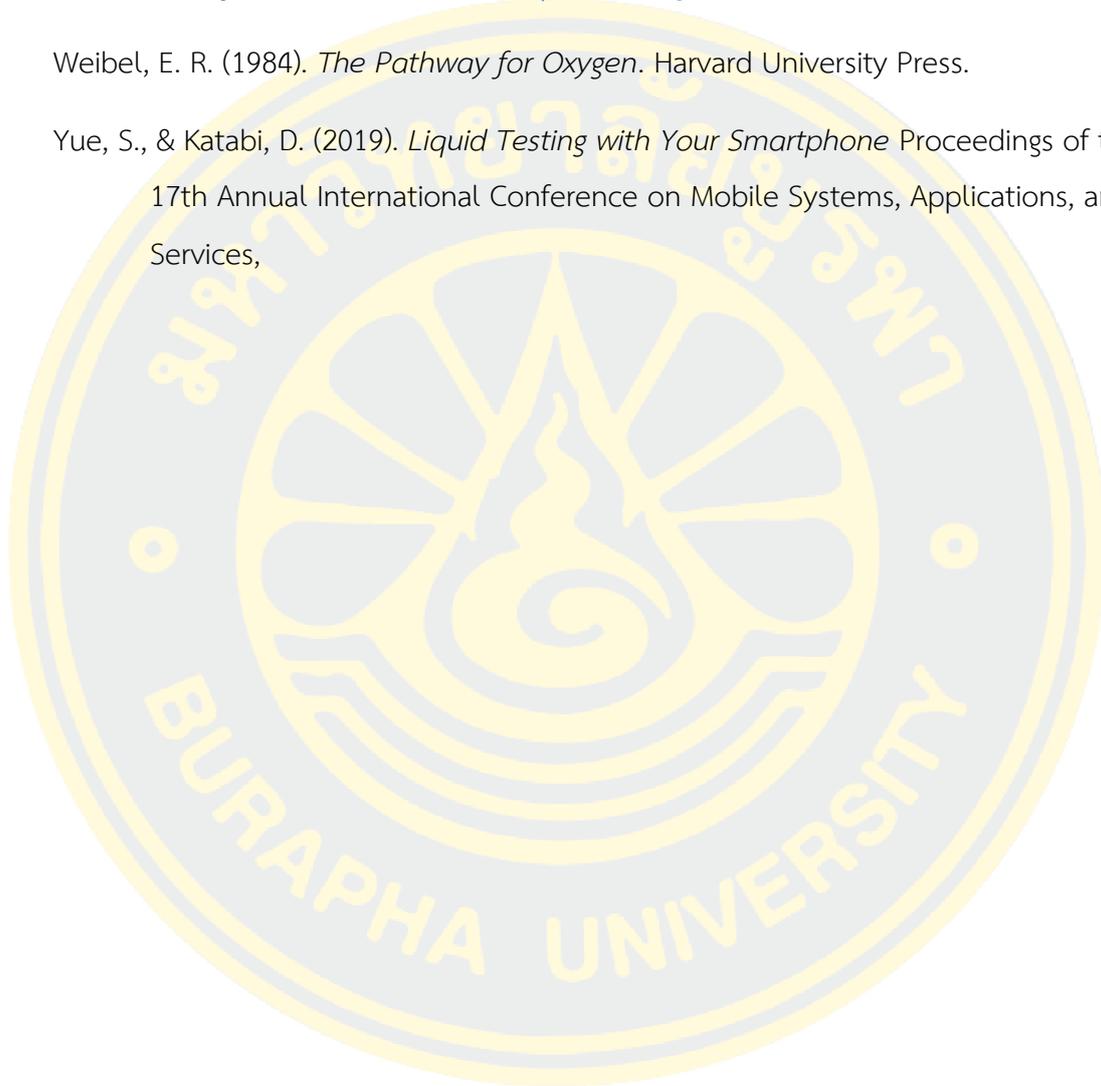
Shah, S. K., Chatterjee, S. K., & Bhattarai, A. (2016). Micellization of cationic surfactants in alcohol — water mixed solvent media. *Journal of Molecular Liquids*, 222, 906-914. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.07.098>

Sumitra Imraksa, C. K. (2022). Determination of Surface Tension by Pendant Drop Method: Effect of Tip's Diameters. *Burapha Science Journal*, 27(3), 1950-1962.

Tanhaei, B., Saghatoleslami, N., Chenar, M. P., Ayati, A., Hesampour, M., & Mänttari, M. (2012). Experimental Study of CMC Evaluation in Single and Mixed Surfactant Systems, Using the UV–Vis Spectroscopic Method. *Journal of Surfactants and Detergents*, 16(3), 357-362. <https://doi.org/10.1007/s11743-012-1403-7>

Weibel, E. R. (1984). *The Pathway for Oxygen*. Harvard University Press.

Yue, S., & Katabi, D. (2019). *Liquid Testing with Your Smartphone* Proceedings of the 17th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services,





ภาคผนวก

การทดลอง การวัดแรงตึงผิวของของเหลวและการหาความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์  
ของสารลดแรงตึงผิวโดยวิธีหยดของเหลว

จุดประสงค์การทดลอง

1. ทดลองและศึกษาการวัดค่าแรงตึงผิวของของเหลว โดยวิธีหยดของเหลว (Pendant drop method) ที่ถ่ายภาพด้วยสมาร์ทโฟน
2. ศึกษาผลของแรงตึงผิวต่อความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว และคำนวณหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์

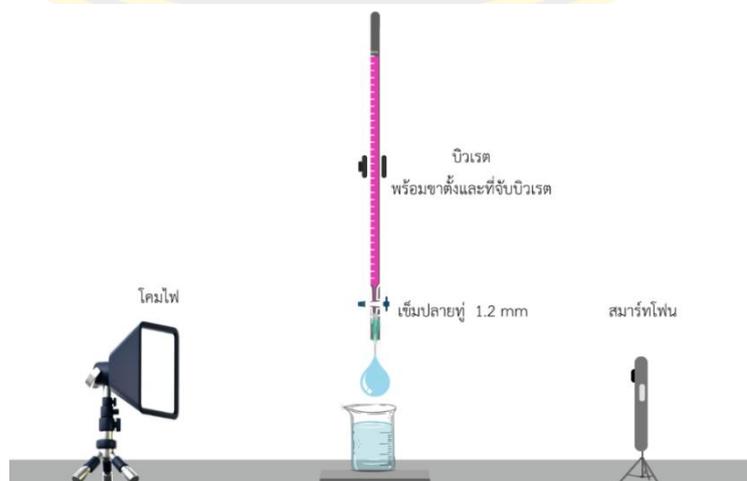
วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| 1. สมาร์ทโฟน พร้อมขาตั้งกล้อง          | 7. ปีกเกอร์ขนาด 100 และ 250 mL     |
| 2. โน้ตบุ๊ก พร้อมติดตั้งโปรแกรม ImageJ | 8. ขวดวัดปริมาตรขนาด 25 และ 100 mL |
| 3. โคมไฟ                               | 9. เทอร์โมมิเตอร์                  |
| 4. บิวเรต พร้อมขาตั้งและที่จับบิวเรต   | 10. โซเดียมโดเดซิลซัลเฟต           |
| 5. เข็มฉีดยาปลายทู่ ขนาด 1.2 mm        | 11. เซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ |
| 6. ปิเปต ขนาด 10 mL                    | 12. น้ำกลั่น                       |

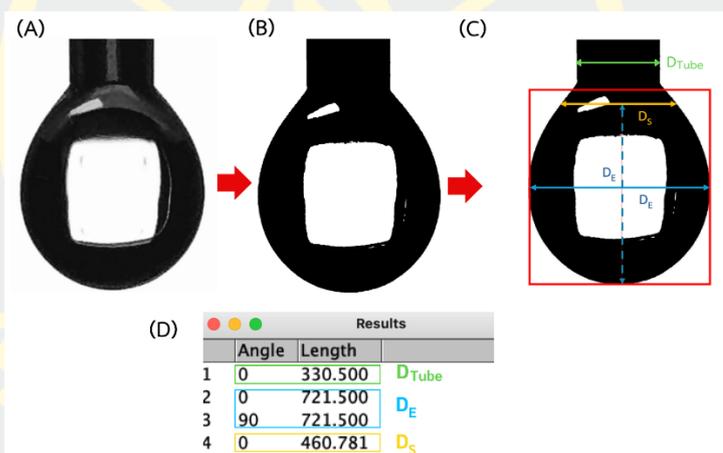
วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การวัดค่าแรงตึงผิวของน้ำ

1. ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งประกอบด้วยโคมไฟเป็นแหล่งกำเนิดแสง บิวเรตพร้อมขาตั้งและที่จับบิวเรต โดยติดตั้งเข็มฉีดยาขนาด 1.2 mm ที่ปลายบิวเรตเพื่อใช้เป็นหัวจ่ายของเหลว วางสมาร์ทโฟนในตำแหน่งที่เหมาะสมกับการบันทึกภาพ โดยกล้องของสมาร์ทโฟนอยู่ในระดับเดียวกับปลายของเข็มฉีดยา แสดงดังภาพ



2. ทำการวัดและบันทึกอุณหภูมิของน้ำก่อนเริ่มการทดลอง
3. ปรับอัตราการหยดของน้ำ 2 วินาทีต่อหยด และตั้งค่าการซูมและระยะโฟกัสของกล้องสมาร์ทโฟน เพื่อให้มองเห็นขอบหยดน้ำอย่างชัดเจน จากนั้นบันทึกวิดีโอการหยดของสารละลายอย่างน้อย 10 หยด
4. เลือกบันทึกภาพจากวิดีโอ โดยจับภาพในช่วงที่หยดน้ำประมาณ 80% ของเวลาในการหยด และบันทึกภาพ 5 หยดต่อความเข้มข้น (ยกเว้นหยดแรกเพราะอาจมีความคลาดเคลื่อน)
5. นำภาพหยดน้ำเข้าโปรแกรม ImageJ โดยเลือกไฟล์ภาพที่ต้องการวิเคราะห์ จากนั้นปรับความคมชัดของภาพโดยเลือกเมนู Image > Adjust > Brightness/Contrast และปรับค่า Contrast = 126 จากนั้นวาดกรอบรอบหยดน้ำด้วยเครื่องมือ Rectangle เพื่อกำหนดขอบเขตหยดน้ำ และทำการวัดขนาดหยดน้ำด้วยเครื่องมือ Straight และทำการวัดระยะทาง  $D_E$  (เส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุดของหยดน้ำ) และ  $D_S$  (เส้นผ่านศูนย์กลางที่ตำแหน่งต่ำสุดของหยดน้ำที่อยู่ห่างเป็นระยะเท่ากับ  $D_E$ )



6. แปลงค่าที่ได้จากการวัดในหน่วย pixel เป็น mm โดยใช้ไมโครมิเตอร์วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเข็มฉีดยา 5 ครั้ง แล้วคำนวณค่าเฉลี่ย จากนั้นวัดขนาดเข็มในภาพด้วยโปรแกรม ImageJ ตั้งค่ามาตราส่วน (Set Scale) โดยเปรียบเทียบขนาดเข็มจากการวัดจริงกับภาพ
7. นำระยะ  $D_E$  และ  $D_S$  ในหน่วย mm มาใช้คำนวณค่าแรงตึงผิวของน้ำโดยใช้สมการ Young-Laplace ซึ่งเป็นสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงตึงผิวกับแรงโน้มถ่วง โดยคำนวณค่าแรงตึงผิวดังสมการ

$$\gamma = \frac{\Delta\rho g D_E^2}{H} \quad (1)$$

เมื่อ  $\gamma$  คือ แรงตึงผิว (mN/m)

$\Delta\rho$  คือ ผลต่างของความหนาแน่นระหว่างน้ำและอากาศ ( $\text{kg/m}^3$ )

$g$  คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )

$H$  คือ ฟังก์ชันของอัตราส่วน  $D_s/D_E$  ค่าของ  $H$  คำนวณจากสมการ

$D_E$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่กว้างที่สุดของหยดน้ำ (mm)

$D_s$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางที่ตำแหน่งต่ำสุดของหยดน้ำที่อยู่ห่างเป็นระยะเท่ากับ  $D_E$  (mm)

$$\frac{1}{H} = a \left( \frac{D_s}{D_E} \right)^b \quad (2)$$

โดยที่ค่าคงที่  $a$  และ  $b$  เริ่มต้นที่ 0.345 และ -2.54 ตามงานวิจัยของ Goy et al. (2017) จากนั้นนำค่าที่ได้จากการทดลองมาแทนค่าในสมการเพื่อคำนวณหาค่าแรงตึงผิวของน้ำแล้วหาค่าเฉลี่ย

## ตอนที่ 2 ความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (CMC) ของสารลดแรงตึงผิว

### การเตรียมสารละลายของสารลดแรงตึงผิว

1. เตรียมสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต (SDS) ตั้งต้นที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.05 M ปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นเจือจางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายตั้งแต่ 1 mM ถึง 10 mM (เพิ่มขึ้นทีละ 1 mM)
2. เตรียมสารละลายเซทิลไตรเมทิลแอมโมเนียมโบรไมด์ (CTAB) ตั้งต้นที่ความเข้มข้นเท่ากับ 0.01 M ปริมาตรขนาด 100 mL จากนั้นเจือจางเพื่อให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายตั้งแต่ 0.2 mM ถึง 1.8 mM (เพิ่มขึ้นทีละ 0.2 mM)

### การติดตั้งชุดอุปกรณ์และการบันทึกภาพ

1. ติดตั้งอุปกรณ์การทดลองหาค่าแรงตึงผิวโดยใช้วิธีหยดของเหลวและถ่ายภาพด้วยสมาร์ตโฟน
2. ทำการวัดและบันทึกอุณหภูมิของสารละลายก่อนเริ่มการทดลอง
3. เทสารละลายสารลดแรงตึงผิวใส่ในบิวเรต ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 ข้อ 3-7
4. เปลี่ยนสารละลายสารลดแรงตึงผิวเป็นความเข้มข้นอื่นๆ
5. พล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงตึงผิวและความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมโดเดซิลซัลเฟต เพื่อหาค่าความเข้มข้นวิกฤตไมเซลล์ (CMC) โดยใช้สมการต่อไปนี้ (โดยที่  $x$  คือค่า CMC)

$$a_1x + b_1 = a_2x + b_2$$

$$\text{CMC} = x = \frac{b_2 - b_1}{a_1 - a_2}$$

$a_1$ : ความชันของเส้นแรก

$a_2$ : ความชันของเส้นที่สอง

$b_1$  : จุดตัดแกน  $y$  ของเส้นแรก

$b_2$  : จุดตัดแกน  $y$  ของเส้นที่สอง

### ข้อเสนอแนะ

- กล้องสมาร์ทโฟนที่ใช้ถ่ายภาพควรมีเลนส์ออปติคัลหรือโหมดถ่ายภาพแบบมาโคร เพื่อให้ได้ภาพหยดน้ำที่มีขนาดใหญ่กว่า  $\frac{1}{4}$  ของกรอบภาพ หรือมีความละเอียดมากกว่า 80 พิกเซล/มิลลิเมตร และภาพมีความคมชัดสูง หากกล้องสมาร์ทโฟนไม่สามารถซูมได้เพียงพอ ควรใช้เลนส์มาโครเสริมเพื่อเพิ่มขนาดและความคมชัดของภาพหยดน้ำ
- การวัดขนาดหยดน้ำ  $D_E$  และ  $D_S$  ต้องวัดอย่างระมัดระวัง โดยเฉพาะ  $D_E$  ที่ส่งผลต่อค่าแรงตึงผิวมากกว่า  $D_S$  ดังนั้นการตีกรอบความกว้างของหยดน้ำอย่างแม่นยำเพื่อป้องกันการวัดเกินขนาด ซึ่งอาจทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนสูง ควรเลือกวัดให้น้อยกว่าขอบรอบเล็กน้อยเพื่อความแม่นยำ
- ควรใช้แสงสว่างที่สม่ำเสมอและไม่มีแสงสะท้อนที่รบกวนภาพ
- ตั้งค่าให้สมาร์ทโฟนล็อกค่าการรับแสงอัตโนมัติ (AE/AF) ช่วยให้แสงสว่างของภาพถ่ายคงที่ แม้ว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงของแสงในสภาพแวดล้อม จะทำให้ภาพที่ถ่ายมีความสม่ำเสมอ และลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากการปรับค่าแสงอัตโนมัติของกล้อง
- หลีกเลี่ยงการเคลื่อนย้ายสมาร์ทโฟนขณะถ่ายภาพ เพื่อป้องกันการเกิดความคลาดเคลื่อน และให้ได้ภาพที่คมชัดตลอดการบันทึก

### เอกสารอ้างอิง

- Goy, N.-A., Denis, Z., Lavaud, M., Grolleau, A., Dufour, N., Deblais, A., & Delabre, U. (2017). Surface tension measurements with a smartphone. *The Physics Teacher*, 55(8), 498-499. <https://doi.org/10.1119/1.5008349>

## ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวปณณพร โอมมี
วัน เดือน ปี เกิด	8 มีนาคม 2537
สถานที่เกิด	จังหวัดสุราษฎร์ธานี
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	88 โรงเรียนสุราษฎร์ธานี ถนนดอนนก ตำบลตลาด อำเภอเมือง จังหวัดสุราษฎร์ธานี 84000
ตำแหน่งและประวัติการ ทำงาน	พ.ศ. 2560 ครู โรงเรียนไชยวิทยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี พ.ศ. 2560-ปัจจุบัน ครู โรงเรียนสุราษฎร์ธานี จังหวัดสุราษฎร์ธานี
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนสุราษฎร์พิทยา จังหวัดสุราษฎร์ธานี ศึกษาศาสตรบัณฑิต วิทยาศาสตร์ศึกษา เอกเดี่ยวเคมี มหาวิทยาลัยขอนแก่น