

หัวข้อการค้นคว้าอิสระ	อิทธิพลของกระแสไฟฟ้าและเวลาต่อมุมสัมผัสของอะลูมิเนียมไนไตรด์
นักศึกษา	นางสาวศศิชา ตรงชูเกียรติ
รหัสประจำตัว	63601159
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอาหารและเกษตรอัจฉริยะ
พ.ศ.	2567
อาจารย์ที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เจษฎา ชัยโฉม

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีการนำอะลูมิเนียมมาใช้เป็นวัสดุสัมผัสอาหารมากขึ้นเนื่องจากอะลูมิเนียมนำความร้อนได้ดี น้ำหนักเบา และมีราคาถูก ทำให้เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย แต่อุปกรณ์ที่ใช้ประกอบอาหารหรือเก็บอาหารที่ทำจากอะลูมิเนียมนั้นมักมีปัญหาเรื่องการเกิดคราบอาหารติดภาชนะ ล้างทำความสะอาดได้ยากแต่ด้วยยุคสมัยใหม่เรามีเทคโนโลยีที่สามารถพัฒนาอุปกรณ์ต่างๆได้ ไม่ว่าจะเป็น อุปกรณ์ในครัวเรือนที่เคลือบด้วยเทฟลอน ที่อาจจะช่วยในการทำอาหารให้สะดวกมากขึ้นและทำความสะอาดได้ง่ายด้วยคุณสมบัติของเทฟลอน จะมีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำ แต่อุปกรณ์ที่เคลือบด้วยเทฟลอนก็มีข้อจำกัดในการใช้ คือไม่สามารถใช้งานในกระบวนการผลิตอาหารที่อุณหภูมิสูงได้และในการทำสะอาดอุปกรณ์ที่เคลือบด้วยเทฟลอนนั้นหากใช้วัสดุอุปกรณ์ในการทำสะอาดที่ไม่เหมาะสม อาจทำให้เกิดรอยและเป็นรูพรุนของอุปกรณ์ ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดการปนเปื้อนในอาหาร เพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้เราจึงศึกษาอะลูมิเนียมที่ต้องผ่านกระบวนการไนไตรด์ เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้กับอะลูมิเนียมและปรับปรุงพื้นผิวของอะลูมิเนียมให้มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำซึ่งจะทำให้การทำความสะอาดง่ายขึ้น โดยจะศึกษาปัจจัยต่างๆในการทำไนไตรด์ ที่คาดว่าส่งผลต่อค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ได้แก่ กระแสไฟฟ้าและระยะเวลา โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า (Electroplating Metal Coating Machine) ในการชุบไนไตรด์ ใช้กระแสไฟฟ้าที่ 13, 15, 17, 19 และ 21 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 5, 10, และ 15 นาที และวัดค่ามุมสัมผัส (Contact angle) โดยเครื่องวัดมุมสัมผัส จากการทดลองพบว่า กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการชุบมีผลต่อค่ามุมสัมผัสของพื้นผิวที่ได้ และมีมุมสัมผัสสูงสุดเท่ากับ  $89.98^\circ$  ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้า 19 แอมแปร์ เป็นเวลา 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Independent Study</b>	THE EFFECT OF CURRENT AND PROCESSING TIME ON CONTACT ANGLE OF ANODIZED ALUMINIUM
<b>Student</b>	Miss Sasicha Trongchookiat
<b>Student ID</b>	63601159
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Food and Agricultural Intelligence Engineering
<b>Year</b>	2024
<b>Independent Study Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Jedsada chaishome

## ABSTRACT

Aluminum is becoming more popular as a food contact material due to its high heat conductivity, lightweight, and inexpensive cost. As a result, it is commonly employed. Aluminium cooking and storage equipment has a problem with soil remained on food contact surface, which are difficult to clean. However, in the modern era we have technology that can develop various equipment such as household equipment coated with Teflon, which may help make cooking more convenient and easy to clean. At the same time, Teflon-coated equipment cannot be used at high-temperature processes and when cleaning Teflon-coated equipment if improper cleaning materials are used, it may cause scratches and holes in the equipment, which is one cause of food contamination. To address these issues, anodized aluminium enhances the surface of the aluminium to be more hydrophobic behaviour. This procedure is intended to assist less food fouling deposited to the metal surface, making cleaning easier. This research focuses on two anodizing parameters likely to affect contact angle: current and process time. An electroplating machine was used in anodizing process. Using electricity at 13, 15, 17, 19, and 21 A, plating times of 5, 10, and 15 minutes, and a contact angle was determined. The experiment revealed that the electric current and plating duration affect the surface's contact angle, with the maximum contact angle being  $89.98^\circ$  at a current of 19 A for 5 minutes.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ผศ. ดร. เจษฎา ชัยโฉม ที่ให้ความอนุเคราะห์รับเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ให้คำปรึกษา แนะนำ และให้การช่วยเหลือในการทำ การค้นคว้าอิสระ รวมถึงสอนวิธีการทำงานที่ดีที่สุดทำให้ผู้วิจัยรู้จักพัฒนาตนเองในด้านการงานให้ดียิ่งขึ้น

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบการค้นคว้าอิสระที่ให้คำแนะนำและแนวทางในการปรับปรุงรายงาน การค้นคว้าให้มีความสมบูรณ์มากขึ้น ขอขอบคุณคณาจารย์คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่าน ที่สั่งสอนวิชาความรู้ถ่ายทอดประสบการณ์ต่าง ๆ และนำความรู้เหล่านั้น มาใช้ในการทำวิจัยนี้ ตลอดจนข้อชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อการทำวิจัยกระทั่งการค้นคว้าอิสระสำเร็จลุล่วง

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมอาหาร สำหรับคุณประโยชน์และคุณงามความดีอันใดที่เกิดจาก การค้นคว้าอิสระฉบับนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้อาจารย์ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้ามาตลอดจนถึงทุกวันนี้

สุดท้ายนี้ขออน้อมรำลึกถึงคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่สนับสนุนการศึกษาเล่าเรียนและให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศศิชา ตรงชูเกียรติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 ขอบเขตการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1.1 อลูมิเนียม.....	3
2.1.2 คุณสมบัติอะลูมิเนียม.....	3
2.1.3 ชนิดของอะลูมิเนียม.....	4
2.1.4 ประโยชน์ของอะลูมิเนียม.....	4
2.1.5 การเคลือบผิวของอะลูมิเนียม.....	5
2.2 กระบวนการอโนไดซ์.....	5
2.2.1 โลหะที่สามารถนำมาเคลือบผิวโดยวิธีการอโนไดซ์.....	5
2.2.2 กระบวนการชุบผิวอโนไดซ์อะลูมิเนียม.....	5
2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำอโนไดซ์.....	6
2.2.4 ประเภทของวิธีการอโนไดซ์ (Anodizing techniques).....	7
2.2.5 วัตถุประสงค์ของการอโนไดซ์อะลูมิเนียม.....	8
2.2.6 การย้อมสีอโนไดซ์อะลูมิเนียม.....	8
2.2.7 กระบวนการปิดผิว ( Sealing ).....	8
2.3 มุมสัมผัส (Contact angle).....	8
2.3.1 สภาพชอบน้ำ (Hydrophilic) และสภาพไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) .....	9
2.3.2 ปรากฏการณ์ไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic).....	10
2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย .....	13
3.1 วัตถุประสงค์และอุปกรณ์.....	13
3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	13
3.3 การวัดค่ามุมสัมผัสพื้นผิวอลูมิเนียม.....	16
3.4 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
3.5 ปัจจัยที่ศึกษา.....	17
บทที่ 4 ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	18
4.1 ผลของการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิว.....	18
4.2 ผลการทดสอบทางสถิติ.....	21
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง .....	22
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	22
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	22
บรรณานุกรม.....	23
ภาคผนวก ก .....	25
ประวัติผู้เขียน.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่มีอิทธิพลต่อมุมสัมผัส .....21



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 รูปแสดงส่วนประกอบในขั้นตอนการชุบอโนไดซ์.....	6
3.1 กระบวนการอโนไดซ์.....	13
3.2 กระบวนการการทดลอง.....	14
3.3 รูปแสดงส่วนประกอบในขั้นตอนการชุบอโนไดซ์.....	15
3.3 ปริมาตรของหยดน้ำและมุมของสัมผัส.....	15
3.4 หน้าจอแสดงผลและตารางเก็บข้อมูล.....	16
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับมุมสัมผัสที่ระยะเวลา 5 นาที.....	17
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับมุมสัมผัสที่ระยะเวลา 10 นาที.....	18
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับมุมสัมผัสที่ระยะเวลา 15 นาที.....	18
4.4 ค่า Contact angle ( $\gamma$ ) ของแผ่นอะลูมิเนียมอโนไดซ์ แผ่นอะลูมิเนียมอโนไดซ์ ที่ระยะเวลาการทำอโนไดซ์ที่ 1-15 นาที และที่กระแส 19 แอมแปร์	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ในอดีตจนถึงปัจจุบันเรามีการทำอาหารเพื่อเป็นการดำรงชีพในชีวิตประจำวันมาโดยตลอด ซึ่งในการทำอาหารมีองค์ประกอบไปด้วยวัตถุดิบอาหาร และอุปกรณ์ภาชนะในการทำอาหาร ในอดีตอาจจะมีอุปกรณ์ภาชนะที่ยังไม่ทันสมัยมากนักและในการทำอาหารในอดีตอาจใช้เวลานาน แต่ในปัจจุบันมีเครื่องครัวที่ทันสมัยมาพร้อมเทคโนโลยีต่างๆ ทำให้การทำอาหารเป็นเรื่องง่ายและรวดเร็วขึ้นอีกทั้งยังสามารถเพิ่มรสชาติอาหารได้ดีขึ้นอีกระดับและด้วยเทคโนโลยีนวัตกรรมในปัจจุบันนั้นทำให้การชำระล้างเครื่องครัวเป็นเรื่องง่าย เช่น การนำวัสดุที่ทำอาหารมาทำการเคลือบผิวให้มีคุณสมบัติที่ไม่ติดภาชนะจะช่วยให้การทำความสะดวกง่ายขึ้น ที่เห็นในชีวิตประจำวันทั่วไปอย่าง

โลหะอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่มันวาวและอ่อนดัดง่าย ในธรรมชาติอะลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซต์เป็นหลัก และมีคุณสมบัติเด่น คือ ต่อด้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี แข็งแรง และน้ำหนักเบา มีการใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และอะลูมิเนียมสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกอย่างมาก ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผลิตจากอะลูมิเนียมสำคัญต่ออุตสาหกรรมอากาศยาน และสำคัญในด้านอื่น ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น อะลูมิเนียมเป็นที่นิยมนำมาใช้ทำภาชนะสำหรับประกอบอาหารและทำเป็นภาชนะหีบห่ออาหารสามารถพบเห็นได้ทั่วไปในชีวิตประจำวัน ข้อดีคือ มีน้ำหนักเบา นำความร้อนได้ดี มีจุดหลอมละลาย ที่ 660 องศาเซลเซียส ราคาถูก ทำให้เป็นที่นิยมใช้กัน อย่างแพร่หลาย ปัญหาอย่างหนึ่งของการใช้ภาชนะอะลูมิเนียมในการสัมผัสอาหาร คือ ปัญหาอาหารติดอุปกรณ์ภาชนะ ทำความสะอาดได้ยาก ซึ่งในปัจจุบันเราสามารถนำนวัตกรรมเทคโนโลยีมาช่วยทำให้ภาชนะที่ทำความสะอาดได้ยาก ให้เป็นเรื่องง่ายและสะดวก รวดเร็ว โดยการใช้เทฟลอนในการเคลือบภาชนะที่ใช้ทำอาหารเพื่อให้การทำอาหารสะดวกและรวดเร็วมมากขึ้น เทฟลอนสามารถช่วยลดปริมาณไขมันในการประกอบอาหารลงได้ และยังทำความสะอาดได้ง่ายอีกด้วย

เทฟลอน (Teflon) หรือ พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (อังกฤษ: Polytetrafluoroethylene; PTFE) เป็นฟลูออโรพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งเป็นสารประกอบคาร์บอนและฟลูออรีนที่มีมวลโมเลกุลสูง มีคุณสมบัติเป็นของแข็งชนิดไฮโดรโฟบิก มีคุณสมบัติเด่นคือเป็นสารที่มีความลื่นมาก ผู้ผลิตจึงใช้สารนี้เป็นส่วนผสมหรือเคลือบลงบนผลิตภัณฑ์หลายประเภท โดยเฉพาะใช้เคลือบพื้นผิวภาชนะเครื่องครัวให้หมดปัญหาเรื่องอาหารติดภาชนะเวลาทอด ช่วยลดปริมาณไขมันในการประกอบอาหาร ลงได้ มีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 327 องศาเซลเซียส และยังทำความสะอาดได้ง่าย ดังนั้น เพื่อความปลอดภัย จึงควรใช้ภาชนะที่ความร้อนระดับต่ำจนถึงปานกลางเท่านั้น (Twoseadj. 2552)

แต่เทฟลอนก็มีข้อควรระวัง คือ การใช้ภาชนะเทฟลอนให้ถูกวิธี ควรใช้ตะหลิวหรือทัพพีที่เป็นไม้หรือพลาสติกกับภาชนะที่เคลือบเทฟลอน การใช้ตะหลิวหรือทัพพีที่ทำจากโลหะที่มีความคมหรือมีขอบไม่เรียบ จะทำให้เกิดรอยขีดข่วนซึ่งทำให้เทฟลอนหลุดลอกได้ หรือการใช้ฝอยขัดทำความสะอาด แม้กระทั่งการเทน้ำราดลงไปก็ภาชนะเคลือบที่ขณะที่ยังร้อนอยู่ ก็สามารถลดอายุการใช้งานของเทฟลอนได้เช่นกัน

เนื่องจากอะลูมิเนียมมีประสิทธิภาพที่ดีจึงมักมีการพัฒนา พื้นผิวให้มีความไม่ชอบน้ำ ซึ่งสามารถยับยั้งการกัดกร่อนและการเกิดออกไซด์ขึ้นได้ตามวิธีการเตรียมพื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำยิ่งยวด เพราะปกติแล้วอะลูมิเนียมจะมีพื้นผิวไม่วาวกรันใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ชอบน้ำ จึงมีการใช้วิธีการต่าง ๆ มากมาย เช่น การชุบผิวด้วยอินโดซ์ การชุบด้วยไฟฟ้าหรือการชุบด้วยสารเคมี เป็นต้น วิธีการเหล่านี้ถูกนำมาใช้เพื่อให้พื้นผิวมีความไม่ชอบน้ำมากขึ้น (Wenyong Liu et al, 2012)

การชุบอินโดซ์ เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อเพิ่มความทนทานต่อการกัดกร่อน เพิ่มสีสน้ำแก่ชิ้นงาน เพิ่มความหล่อลื่น โดยการสร้างฟิล์มออกไซด์ไอโซที่มีความหนาและแข็งบนผิวของ อลูมิเนียม กระบวนการชุบอินโดซ์ถูกพัฒนาเพื่อเพิ่มคุณสมบัติของ อลูมิเนียมในด้านต่างๆ เช่น สีสน้ำหลากหลายผิวสัมผัสอลูมิเนียมอินโดซ์ที่สวยงาม ความเงา ความแข็ง ตลอดจนป้องกันการสึกกร่อนขูดขีด และเปลี่ยนสถานะเป็นการไม่นำไฟฟ้า โดยการชุบอินโดซ์เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้สร้างชั้นออกไซด์ที่พื้นผิวของโลหะ (องค์การพิพิธภัณฑสถานแห่งชาติ, 2564) โดยแผ่นโลหะจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์เกิดการก่อตัวของออกไซด์ที่ผิวของแผ่นโลหะจนเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กบนชั้นออกไซด์ เมื่อเวลาผ่านไปรูพรุนนี้จะเพิ่มความลึกมากขึ้นและเปลี่ยนโครงสร้างจนมีลักษณะคล้ายท่อขนาดเล็กที่เรียงตัวกันเหมือนทรงหกเหลี่ยมปลายเปิด (อดิพล สว่างอารมณ์, 2557 : 9) จึงทำให้มีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) ที่เกิดจากการมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลนั้นมากกว่าแรงที่ผิววัตถุอื่นๆ ทำให้เกิดแรงยึดติดระหว่างโมเลกุลของสารนั้นมากกว่าเมื่อทำการทดสอบคุณสมบัติการชะล้างด้วยตัวเองของผิวโลหะที่ถูกเคลือบด้วยสารเคลือบแล้ว ปรากฏว่าหยดน้ำนั้นกลิ้งไปบนผิวโลหะและสามารถดึงสิ่งสกปรกบนผิวโลหะออกไปหมดได้ ซึ่งเป็นสมบัติที่ต้องการในสำหรับการใช้ทำเครื่องครัว ถ้าหากเทียบกับผิวโลหะที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบผิวแล้ว เมื่อหยดน้ำลงไปบนพื้นผิวหยดน้ำจะไม่สามารถกลิ้งได้ (สมาคมพอลิเมอร์ไทย, 2563)

ด้วยเหตุนี้ทางผู้วิจัยได้วิเคราะห์ถึงปัญหาจึงได้นำวิธีการอินโดซ์มาประยุกต์ใช้เพื่อปรับปรุงผิวของอะลูมิเนียมเพื่อลดปัญหาอาหารติดภาชนะ และเพื่อใช้งานในอุณหภูมิสูง ๆ แทน ภาชนะที่เคลือบด้วยเทฟลอน โดยจะศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่คาดว่าจะส่งผลต่อค่า Contact angle ได้แก่ กระแสไฟฟ้า และระยะเวลาในการชุบ

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 เพื่อศึกษามุมสัมผัสที่ได้จากการอินโดซ์อลูมิเนียม ด้วยกระบวนการอินโดซ์

## 1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 ศึกษากระบวนการอินโดซ์ของอลูมิเนียม

1.3.2 ทำการอินโดซ์ด้วยเครื่องเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้าที่กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาต่างกันดังนี้

กระแสไฟฟ้า 13, 15, 17, 19 และ 21 แอมแปร์ และระยะเวลา 5, 10, 15 นาที

1.3.3 ตรวจสอบคุณสมบัติด้านกายภาพ ได้แก่ ค่ามุมสัมผัส (Contact angle)

## 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับผู้ที่จะศึกษาเรื่องการอินโดซ์

1.4.2 เป็นข้อมูลและแนวทางการตัดสินใจในการเลือกใช้งาน ภาชนะจากอะลูมิเนียมอินโดซ์

เนื่องจากภาชนะสแตนเลสและเทฟลอนมีราคาที่สูงกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

# ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

#### 2.1.1 อะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม (Aluminium หรือ Aluminum) เป็นโลหะที่มันวาวและอ่อนดัดง่าย ในธรรมชาติอะลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซต์เป็นหลัก และมีคุณสมบัติเด่น คือ ต่อด้านปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ดี และน้ำหนักเบา มีการใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมหลายประเภท เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย และอะลูมิเนียมสำคัญต่อเศรษฐกิจโลกอย่างมาก ชิ้นส่วนโครงสร้างที่ผลิตจากอะลูมิเนียมสำคัญต่ออุตสาหกรรมอากาศยาน และสำคัญในด้านอื่น ๆ ของการขนส่งและการสร้างอาคารซึ่งต้องการน้ำหนักเบา ความทนทาน และความแข็งแรง

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันชั้นบาง ๆ ที่เกิดขึ้นเร็วเมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์มีแรงต้านการดึงประมาณ 49 ล้านปาสกาล (MPa) และ 400 MPa ถ้าทำเป็นโลหะผสม อะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้าและทองแดง อ่อน สามารถดัดได้ง่าย สามารถกลึงและหล่อแบบได้ง่าย และมีความสามารถต่อต้านการกร่อนและความทนเนื่องจากชั้นออกไซด์ที่ป้องกัน พื้นหน้ากระจกเงาที่เป็นอะลูมิเนียมมีการสะท้อนแสงมากกว่าโลหะอื่น ๆ ในช่วงความยาวคลื่น 200-400 nm (UV) และ 3000-10000 nm (IR ไกล) ส่วนในช่วงที่มองเห็นได้ คือ 400-700 nm โลหะเงินสะท้อนแสงได้ดีกว่าเล็กน้อย และในช่วง 700-3000 (IR ใกล้) โลหะเงิน ทองคำ และทองแดง สะท้อนแสงได้ดีกว่า อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ดัดได้ง่ายเป็นอันดับ 2 (รองจากทองคำ) และอ่อนเป็นอันดับที่ 6 อะลูมิเนียมสามารถนำความร้อนได้ดี จึงเหมาะสมที่จะทำหม้อหุงต้มอาหาร

เนื่องจากอะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ไวต่อการรวมตัวกับออกซิเจนมาก แร่อะลูมิเนียมจึงมีอะลูมิเนียมในรูปออกไซด์ทั้งสิ้นทำให้การถลุงอะลูมิเนียมไม่สามารถใช้เตาต่าง ๆ ที่ใช้ถลุงเหล็ก หรือทองแดงหรือโลหะอื่นได้ เพราะอะลูมิเนียมเมื่อถลุงออกมาได้จะกลายเป็นออกไซด์ทันที อะลูมิเนียมปนอยู่ทั่วไปบนผิวโลกในรูปของดินเหนียว แร่ที่ใช้ผลิตอะลูมิเนียมคือ แร่บอกไซต์ สูตรทางเคมีคือ  $Al_2O_3 \cdot X(H_2O)$  โดยปนอยู่กับออกไซด์ของเหล็ก ซิลิกอน และไทเทเนียม (titanium) ออกไซด์ของอะลูมิเนียมมีชื่อเรียกว่า อะลูมินา (alumina) แร่อะลูมิเนียมจึงเป็นแร่ที่มีราคาถูกเพราะหาได้ง่าย การผลิตอะลูมิเนียมแบ่งออกเป็น ๒ ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการแยกให้ได้ออกไซด์อะลูมิเนียมอย่างเดียว (pure  $Al_2O_3$ ) จากแร่บอกไซต์ ขั้นตอนที่สองผลิตอะลูมิเนียมโดยการแยกอะลูมิเนียมที่หลอมละลายด้วยไฟฟ้า การแยกอะลูมิเนียมจากแร่ใช้กรรมวิธีของไบเยอร์ (Bayer process) คือ ล้างแร่บอกไซต์ให้สะอาด ตากแห้ง บดละเอียด ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ ( $NaOH$ ) ในตู้อบ ได้สารละลายโซเดียมอะลูมิเนต (sodium aluminate;  $NaAlO_2$ ) สารที่เจือปนในแร่บอกไซต์ เช่น เหล็ก ซิลิกาจะไม่ทำปฏิกิริยากับโซดาไฟ และตกเป็นตะกอนสีแดง (red mud) กรองสารละลายออกแล้วทิ้งสารละลายไว้จนเกิดตะกอนของอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (aluminium hydroxide;  $Al(OH)_3$ ) กรองเอาตะกอนอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ออก แล้วนำไปเผากับหินปูนในเตาเผาแบบหมุนชนิดเดียวกับที่ใช้เผาซีเมนต์ (rotary kiln) จะได้

ออกไซด์อะลูมิเนียมที่บริสุทธิ์ ทรัพยากรใช้ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 คุณสมบัติอะลูมิเนียม

อะลูมิเนียม มีจุดหลอมละลายที่ 660 องศาเซลเซียส มีลักษณะมันวาว เป็นโลหะที่มีความหนาแน่นน้อย น้ำหนักเบา รับภาระน้ำหนักได้สูง สามารถขึ้นรูปได้ง่าย ไม่เสียดรดยาว และการแตกหัก ไม่เป็นสนิม ทนต่อการกัดกร่อน และไม่เป็นพิษต่อมนุษย์ โดยเฉพาะการนำมาผสมกับโลหะอื่น ๆ แล้วจะทำให้คุณสมบัติต่าง ๆ เพิ่มมากขึ้น เช่น จุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมผสม จะอยู่ที่ 1,140 – 1,205 องศาเซลเซียส จึงนิยมนำมาผลิตเป็นชิ้นส่วนต่าง ๆ รวมถึงวัสดุ หรือภาชนะที่เกี่ยวข้องกับอาหาร นอกจากนี้ยังมีคุณสมบัติทางเคมีของอะลูมิเนียมในลักษณะต่าง ๆ คือ เมื่อทำปฏิกิริยากับออกซิเจน จะทำให้เกิดชั้นฟิล์มบาง ๆ เรียกว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ เคลือบบนชั้นผิวอะลูมิเนียม ป้องกันการเกิดปฏิกิริยาอื่น ๆ ได้ดี

### 2.1.3 ชนิดของอะลูมิเนียม

แบ่งตามการผลิต อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ เป็นอะลูมิเนียมที่ได้จากการถลุงแร่ หรือการหลอมให้มีความบริสุทธิ์ 99.00% และมีธาตุอื่นเจือปนเพียง 1% เท่านั้น เป็นอะลูมิเนียมที่มีความเหนียวสูง สามารถขึ้นรูปได้ดี อะลูมิเนียมผสม เป็นอะลูมิเนียมที่ได้จากการหลอมร่วมกับโลหะชนิดอื่นตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไป ได้แก่ ทองแดง แมกนีเซียม แมงกานีส โครเมียม ซิลิกอน นิกเกิล ดีบุก สังกะสี เป็นต้น เพื่อเป็นโลหะผสมให้มีคุณสมบัติทนต่อแรงดึงสูง

แบ่งตามเกรดอะลูมิเนียม การแบ่งเกรดอะลูมิเนียม มีการแบ่งเกรดจากสมาคมอะลูมิเนียมแห่งสหรัฐอเมริกา โดยใช้หลักเกณฑ์ของส่วนผสมเป็นเกณฑ์ด้วยเลข 4 หลัก สำหรับใช้แทนเป็นสัญลักษณ์ เกรดอะลูมิเนียมขึ้นรูปโดยสัญลักษณ์แสดงกลุ่มอะลูมิเนียมขึ้นรูป มีดังนี้

- 1xxx คือ อะลูมิเนียมที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่า 99.00%
- 2xxx คือ ทองแดง (Copper, Cu)
- 3xxx คือ แมงกานีส (Manganese, Mn)
- 4xxx คือ ซิลิกอน (Silicon, Si)
- 5xxx คือ แมกนีเซียม (Magnesium, Mg)
- 6xxx คือ แมกนีเซียม (Magnesium, Mg) และซิลิกอน (Silicon, Si)
- 7xxx คือ สังกะสี (Zinc, Zn)
- 8xxx คือ ธาตุอื่น ๆ เช่น นิกเกิล (Nickel, Ni), ไททาเนียม (Titanium, Ti), โครเมียม (Chromium, Cr), บิสมัท (Bismuth, Bi) และตะกั่ว (Lead, Pb)
- 9xxx คือ ยังไม่มีใช้

หลักที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์ที่สำคัญที่สุด ในการแสดงหมวดหมู่ของโลหะผสมใน 8 กลุ่ม เช่น 1xxx แทนหมวดโลหะอะลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ไม่น้อยกว่าร้อยละ 99.00 โดยน้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักที่สอง เป็นตัวเลขที่ใช้กำกับโลหะอะลูมิเนียม ที่มีการผสมโลหะอื่นให้มีปริมาณที่เปลี่ยนแปลงไป จากเดิม เช่น 2024 ที่ประกอบด้วย 4.5Cu, 1.5Mg, 0.5Si และ 0.1Cr เมื่อเปลี่ยนเป็น 2218 จะประกอบด้วย 4.0Cu, 2.0Ni, 1.5Mg และ 0.2Si ซึ่งเป็นการผสม Ni แทน Cr

หลักที่สาม และสี่ เป็นตัวเลขที่แสดงชนิดย่อยของโลหะผสม ที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่แสดงส่วนผสมที่ แตกต่างกัน เช่น 2014 ที่ประกอบด้วย 4.4Cu, 0.8Si, 0.8Mn และ 0.4Mg เมื่อเปลี่ยนเป็น 2017 จะ ประกอบด้วย 4.0Cu, 0.8Si, 0.5Mn และ 0.1Cr

#### 2.1.4 ประโยชน์ของอะลูมิเนียม

ด้านการก่อสร้าง มักใช้เป็นโครงสร้าง และวัสดุตกแต่งในงานต่าง ๆ โครงสร้างเสา, กอบประตู , หน้าต่าง, รั้ว, ราวกัน, บันได เนื่องจากมีคุณสมบัติคงทน น้ำหนักเบา และอื่น ๆ ซึ่งสามารถทดแทนไม้ และเหล็กได้เป็นอย่างดี

ด้านการขนส่ง มักใช้เป็นวัสดุโครงสร้างในอุตสาหกรรมรถยนต์ เนื่องจากมีน้ำหนักเบา ไม่เป็น สนิมมีอายุการใช้งานมากกว่าวัสดุอื่น ๆ และสามารถรับแรงกด แรงกระแทกได้มาก จึงนิยมนำมาใช้ เป็นชิ้นส่วนรถยนต์ เครื่องบิน รถไฟ และยานพาหนะอื่น ๆ

ด้านบรรจุภัณฑ์ อะลูมิเนียมนิยมนำมาผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับบรรจุอาหาร และเป็น ภาชนะสำหรับประกอบอาหาร เช่น ฟอยล์ครอบอาหาร, กระจ่างบรรจุอาหาร, จาน, ชาม หม้อ, กระทะ เป็นต้น เนื่องจากเป็นโลหะที่ไม่ทำปฏิกิริยากับอาหาร หรือสารเคมีอื่นง่าย ไม่เกิดสนิม และทน ต่อความร้อน การกัดกร่อนได้ดี

อุตสาหกรรมไฟฟ้า มักใช้อะลูมิเนียมเป็นส่วนประกอบของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ สายไฟฟ้า เนื่องจากเป็นสื่อนำไฟฟ้าได้ดี มีน้ำหนักเบา มีความคงทน และไม่เกิดสนิม

#### 2.1.5 การเคลือบผิวของอะลูมิเนียม

การเคลือบสีอะลูมิเนียมในเมืองไทยมี 3 แบบ ได้แก่ Anodised Aluminium, Powder Coated Aluminium และ Fluorocarbon Aluminium สำหรับงานอาคารสูงจะใช้ Powder Coated Aluminium เป็นมาตรฐาน (ทำความเข้าใจกับอะลูมิเนียม. 2564)

## 2.2 กระบวนการอโนไดซ์

กระบวนการทางไฟฟ้าเคมีเพื่อเพิ่มความหนาของชั้นออกไซด์ ( oxide layer ) บนพื้นผิวโลหะ ซึ่ง กระบวนการนี้เรียกว่า “อโนไดซ์” หรือ “Anodizing” เนื่องจากชิ้นงานจะถูกเปลี่ยนเป็นด้านแอโนดใน กระบวนการชุบ ทำให้เกิดชั้นผิวออกไซด์เคลือบผิวชิ้นงานเพื่อให้เกิดความทนทานต่อการกัดกร่อนและการสึก หรอ และยังสามารถย้อมสีชิ้นงานลงบนชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นได้อีกด้วย

การชุบอโนไดซ์สามารถประยุกต์ใช้ได้หลากหลายวัสดุ เช่น ไทเทเนียม สังกะสี แมกนีเซียม นีโอเบียม เซอร์โคเนียม แทนทาลัม หรือแม้แต่ เหล็กคาร์บอน แต่ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย คือ การชุบอโนไดซ์อะลูมิเนียม เพื่อเคลือบสี ซึ่งใช้ในหลากหลายอุตสาหกรรม เช่น อุปกรณ์ตกแต่งรถยนต์และรถจักรยานยนต์ บรรจุภัณฑ์ เอกเครื่องสำอาง เป็นต้น งานวิศวกรรมไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.1 โลหะที่สามารถนำมาเคลือบผิวโดยวิธีการอโนไดซ์

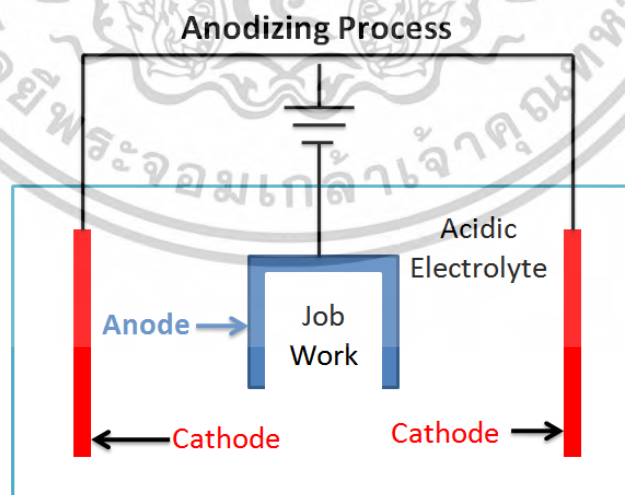
โดยทั่วไปนิยมชุบอโนไดซ์กับอลูมิเนียม ซึ่งทำให้เกิดประโยชน์ต่อชิ้นงานหลากหลายประเภท ในอุตสาหกรรมใช้วิธีอโนไดซ์ซึ่งเป็นวิธีการทำให้พื้นผิวของโลหะเกิดออกไซด์อย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นโลหะที่นิยมนำมาทำอโนไดซ์ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) เงิน (Ag) ไทเทเนียม (Ti) โครเมียม (Cr) ดีบุก (Sn) สังกะสี (Zn) เป็นต้น

## 2.2.2 กระบวนการชุบผิวอโนไดซ์อะลูมิเนียม

การเกิดชั้นผิวอโนไดซ์ของอลูมิเนียมเกิดขึ้นโดยการผ่านไฟฟ้ากระแสตรงระหว่างขั้วแอโนด (ขั้วบวก) ซึ่งจับชิ้นงานที่ต้องการชุบและขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ซึ่งโดยส่วนมากใช้ แอโนดชนิดตะกั่ว-ดีบุก โดยมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์เป็นสื่อไฟฟ้า ซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนที่ขั้วแคโทด และแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนด ก่อให้เกิดชั้นผิวอลูมิเนียมออกไซด์ โดยส่วนมากความต่างศักย์ของไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้จะมีค่าอยู่ประมาณ 15-21 โวลต์ ซึ่งความต่างศักย์มากขึ้นจะช่วยเพิ่มความหนาของชั้นผิวอโนไดซ์มากขึ้น โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าใช้อยู่ระหว่าง 30-300 แอมแปร์ต่อตารางเมตรขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่ผิวของชิ้นงานอลูมิเนียม

กระบวนการอโนไดซ์อลูมิเนียม จะใช้สารละลายอิเล็กโทรไลต์ซึ่งเป็นกรด ได้แก่ กรดโครมิก (Chromic acide) และ กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acide) ทำให้เกิดชั้นผิวอลูมิเนียมออกไซด์อย่างช้าๆ โดยชั้นผิวจะมีรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10-150 นาโนเมตร ชั้นผิวนี้สามารถเก็บสีย้อม (dyeing) หรือสารเพิ่มคุณสมบัติบางประการ เช่น เพิ่มความแข็ง เพิ่มความเป็นฉนวนได้ ซึ่งชั้นผิวอโนไดซ์มีความหนาขึ้นเรื่อยๆจนกว่าจะมีการปิดผิวด้วยนิเกิลอะซิเตต (nickel acetate)

การควบคุมความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ อุณหภูมิ กระแสไฟฟ้า มีผลต่อการเกิดชั้นผิวอโนไดซ์ ทั้งในเรื่องความหนาและความแข็งของชั้นผิว ชั้นผิวที่หนามากจะเกิดขึ้นในเงื่อนไขที่ความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์มาก อุณหภูมิต่ำ โดยใช้ความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าสูงๆ

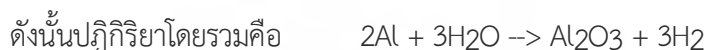
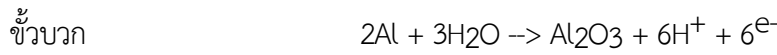


รูปที่ 2.1 รูปแสดงส่วนประกอบในขั้นตอนการชุบอโนไดซ์

<https://www.smlease.com/entries/finish-operations/what-is-anodizing/>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการชุบอโนไดซ์เราใช้กระแสไฟฟ้าตรงผ่านไปยังอะลูมิเนียมชิ้นงานและแผ่นอะลูมิเนียมที่แช่อยู่ในสารละลายสำหรับชุบกระแสไฟฟ้าจะปล่อยไฮโดรเจนออกที่ขั้วลบและเริ่มสร้างอะลูมิเนียม ออกไซด์ที่ผิว โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีดังสมการ



### 2.2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำอโนไดซ์

การเกิดปฏิกิริยาขณะทำการอโนไดซ์ มีปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

แรงเคลื่อนไฟฟ้ามีผลต่อความหนาของเยื่อชั้นและผนังเซลล์ถ้าใช้แรงเคลื่อนไฟฟ้ามากจะทำให้ความหนาของเยื่อชั้นและผนังเซลล์มากขึ้นในทางกลับกันถ้าให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าน้อยความหนาของเยื่อชั้นและผนังเซลล์จะน้อยลง

ความเข้มข้นของน้ำยามีผลต่อขนาดของรูพรุนและเซลล์ถ้าความเข้มข้นน้ำยามากจะทำให้ขนาดของรูพรุนและเซลล์มากขึ้นด้วย

ความหนาแน่นของกระแสตกอยู่บนชิ้นงานบริเวณที่มีความหนาแน่นของกระแสมากจะมีการกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยามากกว่าบริเวณที่มีความหนาแน่นของกระแสน้อย ดังนั้นในการอโนไดซ์หากมีความหนาแน่นของกระแสมากหรือน้อยเกินไปอาจทำให้ได้สมบัติของรูพรุนไม่ตรงตามที่ ต้องการ

อุณหภูมิในการทำอโนไดซ์ต้องอาศัยอุณหภูมิที่เหมาะสมจึงจะได้ขนาดของรูพรุนและเซลล์ตรงตามที่ต้องการซึ่งอุณหภูมิจะแตกต่างกันไปตามชนิดของสารละลายกรดที่ใช้ในการอโนไดซ์

### 2.2.4 ประเภทของวิธีการอโนไดซ์ (Anodizing techniques)

การทำอโนไดซ์ด้วยกรดโครมิก (Chromic acid anodizing) “Type I” เป็นกระบวนการชุบอโนไดซ์ที่ทำให้เกิดชั้นผิวบางที่สุดในทุกวิธี ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.5 – 18 ไมครอน แต่มีคุณสมบัติป้องกันการกัดกร่อนได้ดี เหมือนกับการทำผิวด้วยวิธีอื่นๆที่มีความหนามากกว่า เนื่องด้วยวิธีนี้ก่อให้เกิดชั้นผิวที่บางจึงไม่สามารถชุบสีได้ดีมากนักจึงเป็นข้อจำกัดของการชุบอโนไดซ์ด้วยวิธีนี้ ซึ่งวิธีนี้สามารถชุบดำเพื่อใช้ในชิ้นงานที่ไม่ต้องการการสะท้อนแสงได้

ข้อดีของการทำอโนไดซ์ด้วยกรดโครมิก

1. ขนาดของชิ้นงานไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก เหมาะสมกับชิ้นงานที่ต้องการการประกอบ
2. ไม่นำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่เหมาะสมการชุบด้วยกรดโครมิก ได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรที่ต้องประกอบ ชิ้นส่วนอากาศยาน ชิ้นส่วนที่มีการเชื่อมและประกอบ

การทำอโนไดซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก ( Sulfuric acide anodizing ) “Type II”

วิธีนี้นิยมใช้กันมากที่สุดในปัจจุบัน มีความหนาของชั้นผิวตั้งแต่ 1.8-25 ไมครอน โดย 67% ของชั้นผิวอโนไดซ์จะกินลึกเข้าไปในเนื้อชิ้นงาน และ 33% ของชั้นผิวอโนไดซ์จะงอกออกไปนอกผิวงานทำให้ชิ้นงานมีความหนามากขึ้น

การชุบอโนไดซ์ด้วยกรดซัลฟิวริกเหมาะสมสำหรับชิ้นงานที่ต้องการความแข็งและป้องกันการกัดกร่อน นอกจากนี้รูพรุนที่เกิดขึ้นในชั้นผิวยังสามารถดูดซับสีได้มากจึงนิยมใช้มากในการทำสีลูมิเนียม แต่ชั้นสีเหล่านี้ไม่ทนต่อรังสียูวีในแสงอาทิตย์ ซึ่งจะทำให้ชั้นสีค่อยจางเมื่อเวลาผ่านไป

ข้อดีของการทำอโนไดซ์ด้วยกรดซัลฟิวริก

1. ค่าใช้จ่ายถูกกว่าแบบอื่น ในความหนาของชั้นผิวเท่ากัน
2. สามารถชุบลูมิเนียมได้หลายเกรด
3. ผิวแข็งกว่าการชุบด้วยกรดโครมิก
4. สามารถชุบสีได้หลากหลายสี
5. การบำบัดน้ำเสียทำได้ง่ายกว่ากรดโครมิก ซึ่งช่วยลดต้นทุนได้

ชิ้นงานที่เหมาะสมกับการชุบด้วยกรดซัลฟิวริก ได้แก่ ชิ้นส่วนเครื่องจักรและอิเล็กทรอนิกส์ วาล์วไฮดรอลิก ชิ้นส่วนคอมพิวเตอรื

การทำฮาร์ดโคตอโนไดซ์ ( Hardcoat Anodize ) “Type III”

ฮาร์ดอโนไดซ์ เป็นกระบวนการทำให้เกิดชั้นผิวอโนไดซ์บนลูมิเนียม โดยใช้กรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิต่ำใกล้ 0 องศาเซลเซียส ด้วยความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า 24-36 แอมป์ต่อตารางฟุต และความต่างศักย์ไฟฟ้า 100 โวลต์ กระบวนการนี้ก่อให้เกิดชั้นผิวที่แข็ง หนา และทนต่อการกัดกร่อนได้ดีมาก ความหนาของชั้นผิวตั้งแต่ 12.7-76.2 ไมครอน

สีของการทำฮาร์ดอโนไดซ์จะทำให้สีของลูมิเนียมเปลี่ยนตามส่วนผสมของโลหะ รวมถึงความหนาของสารเคลือบผิว

ลูมิเนียมซีรีย์ 6xxx ส่วนใหญ่จะมีสีเทาดำ ส่วนลูมิเนียมซีรีย์ 7xxx และ 2xxx จะให้สีเทาและบรอน

การชุบอโนไดซ์ด้วย ฮาร์ดอโนไดซ์ จะมีทำให้ขนาดของชิ้นงานโตขึ้นเล็กน้อย ประมาณ 1/2 เท่าของความหนาที่ชุบ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดสำหรับการประกอบกับชิ้นงานอื่นด้วย

ข้อดีของการทำฮาร์ดอโนไดซ์

- เพิ่มความต้านทานการสึกหรอจากการเสียดสี
- ไม่นำไฟฟ้า
- สามารถใช้ซ่อมแซมการสึกหรอของผิวลูมิเนียมได้

ชิ้นงานที่เหมาะสมกับการทำฮาร์ดอโนไดซ์ ได้แก่ ชิ้นส่วนวาล์ว กระจบอกลูบ ชิ้นส่วนที่มีการเสียดสี ข้อต่อ เกียร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2.5 วัตถุประสงค์ของการโนโตซ์อะลูมิเนียม

ช่วยเพิ่มความต้านทานในการกัดกร่อน, เพิ่มความทนทานของผิวอะลูมิเนียม, เพิ่มประสิทธิภาพในการเคลือบสี

## 2.2.6 การย้อมสีโนโตซ์อะลูมิเนียม

กระบวนการชุบโนโตซ์อะลูมิเนียม นั้น ทำให้เกิดโครงสร้างแบบรูพรุนบนพื้นผิวซึ่งง่ายต่อการย้อมสี ซึ่งสามารถย้อมสีได้หลากหลายสี อย่างไรก็ตามสีที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมได้แก่ สีเหลือง สีเขียว สีน้ำเงิน สีดำ สี ส้ม สีม่วง และ สีแดง เนื่องจากสามารถย้อมสีได้ง่ายและมาราคาไม่สูง

การย้อมสีอะลูมิเนียมมีจุดที่ต้องคำนึงคือ การจางของสีเมื่อถูกแสงแดด โดยเฉพาะสีดำและสีทองซึ่ง ส่วนใหญ่เป็น สารประกอบอินอแกนิก ( inorganic compound ) ที่ไวต่อการถูกแสงมากกว่าสีอื่น วิธีแก้คือ การปิดผิว ( Sealing ) ช่วยลดปัญหาการจางของสีได้มาก

2.2.7 กระบวนการปิดผิว ( Sealing ) คือ กระบวนการสุดท้ายของการชุบโนโตซ์ โดยรูพรุนที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการทำโนโตซ์จะไม่มี ความทนต่อการสึกกร่อนมากนักเมื่อยังไม่ผ่านกระบวนการปิดผิว

กระบวนการปิดผิวมีวิธีการอยู่ 3 แบบ

1. การต้มในน้ำร้อน 96-100 องศาเซลเซียส ด้วยฮีตเตอร์ เพื่อช่วยเปลี่ยนออกไซด์บนผิวไปเป็น รูปแบบไฮดรอกไซด์ที่มีส่วนประกอบของโมเลกุลของน้ำ ทำให้รูพรุนบนผิวลดลง แม้วิธีนี้จะเป็ นวิธีที่ ง่ายและราคาถูก แต่ช่วยลดการสึกกร่อนได้เพียง 20% เท่านั้น
2. การต้มในสารละลายเติมแต่ง 60-90 องศาเซลเซียส ด้วยฮีตเตอร์ ซึ่งส่วนมากเป็นสารอแกนิกซ์ และสารประกอบโลหะ แต่มีข้อเสียคือ การปิดผิววิธีนี้อาจชะล้างสีของอโนโตซ์ออกไปบ้าง
3. การปิดผิวเย็น เป็นการจุ่มชิ้นงานลงในสารปิดผิวที่อุณหภูมิห้อง

## 2.3 มุมสัมผัส (Contact angle)

เมื่อเทของเหลวลงในภาชนะและของเหลวนั้นอยู่นิ่ง สังเกตผิวของเหลวจะพบว่าผิวของเหลว ตรงบริเวณที่สัมผัสผิวภาชนะมีลักษณะโค้ง ปราบกฎการณ์นี้เรียกว่า การโค้งของผิวของเหลว (Meniscus effect) ซึ่งเกิดจากแรงระหว่างโมเลกุล (Intermolecular force) สองชนิด คือแรงเชื่อม แน่น (Cohesive force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลชนิดเดียวกัน และแรงยึดติด (Adhesive force) ซึ่งเป็นแรงระหว่างโมเลกุลต่างชนิดกัน

จากปรากฏการณ์การโค้งของผิวของเหลวจะเห็นว่า ผิวของเหลวกับผิวของแข็งจะทำมุมกัน สำหรับของเหลวและของแข็งคู่หนึ่ง ๆ มุมระหว่างผิวทั้งสองมีค่าต่างกัน มุมระหว่างผิวของเหลวกับผิว ของแข็ง ณ จุดสัมผัส เรียกว่า มุมสัมผัส (Contact angle) ซึ่งมีค่าตั้งแต่  $0^{\circ}$ - $180^{\circ}$

มุมสัมผัสจะบอกให้ทราบว่า เมื่อของเหลวอยู่บนพื้น ผิวของเหลวนั้นจะอยู่ในสภาพเป็นหยด (ไม่ทำให้ พื้นผิวเปียก) หรือแผ่กระจาย (ทำให้พื้นผิวเปียก) โดยพิจารณาดังนี้ มุมสัมผัส ที่มีค่าระหว่าง  $0^{\circ}$ - $90^{\circ}$

ของเหลวจะแผ่กระจายและเปียกพื้น มุมสัมผัส ที่มีค่าระหว่าง  $90^{\circ}$ - $180^{\circ}$  ของเหลวจะเป็นก้อน และไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปียกพื้น ในการออกแบบสินค้า เช่น ร่ม เต็นท์ เสื้อผ้าที่กันน้ำได้ ผู้ผลิตได้ใช้ผ้าที่เคลือบด้วยสารบางอย่างทำให้มุมสัมผัสมีค่ามากกว่า  $90^\circ$  เมื่อผ้าถูกน้ำหรือน้ำฝน น้ำจะอยู่ในสภาพเป็นหยดน้ำบนผ้า แทนที่จะแตกกระจายและซึมผ่านเนื้อผ้าเข้าไป

### 2.3.1 สภาพชอบน้ำ (Hydrophilic) และสภาพไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic)

วัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นด้านสภาพไม่ชอบน้ำ จะสามารถต้านทานต่อการยึดเกาะของน้ำได้ เนื่องจากมีแรงตึงผิวต่ำ (Low surface tension) กว่าน้ำ จึงทำให้น้ำสามารถรักษาสภาพทรงกลมในลักษณะของหยดน้ำไว้ได้ และในขณะเดียวกันก็จะไม่กระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของวัสดุนั้น แต่สำหรับวัสดุที่มีคุณสมบัติเด่นด้านสภาพชอบน้ำ จะมีค่าแรงตึงผิวสูง (High surface tension) กว่าน้ำจึงทำให้น้ำสามารถกระจายตัวอยู่บนพื้นผิวของวัสดุนั้นจนทำให้อุณหภูมิอยู่ในสภาพเปียกซึ่งการศึกษาสภาพชอบน้ำ จะศึกษาค่ามุมสัมผัสระหว่างหยดน้ำกับวัสดุรองรับ ซึ่งสามารถแบ่ง ได้เป็นลักษณะต่าง ๆ ดังนี้

- มุมสัมผัสเท่ากับ  $0^\circ$  คือการเปียกอย่างสมบูรณ์ซึ่งเป็นกรณีที่แรงยึดติดมีค่ามากกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ เมื่อของเหลวถูกหยดลงบนผิวของเหลวจะกระจายไปตามผิวของของแข็งจนกลายเป็นชั้นของของเหลวบาง ๆ ครอบคลุมพื้นผิวของของแข็งเป็นบริเวณกว้างที่สุด
- มุมสัมผัสมีค่าระหว่าง  $0^\circ$  ถึง  $90^\circ$  คือการเปียกได้ดี ของเหลวจะกระจายไปบนผิวได้เป็นบริเวณกว้าง แต่ก็ยังคงเกาะกันเป็นหยดขนาดเล็กน้อยกว่าผิวของแข็ง
- มุมสัมผัสมีค่าตั้งแต่  $90^\circ$  แต่ไม่ถึง  $180^\circ$  เรียกว่าผิวเปียกยากคือของเหลวจะรวมกันเป็นหยดรูปทรงค่อนข้างกลม จะมีบริเวณเล็ก ๆ ที่ฐานของหยดของเหลวยังคงสัมผัสกับผิวของของแข็ง
- มุมสัมผัสมีค่าเท่ากับ  $180^\circ$  เรียกว่า ผิวไม่เปียกเกิดขึ้นเมื่อแรงยึดติดมีค่าน้อยกว่าแรงเชื่อมแน่นมาก ๆ ดังนั้นของเหลวจะรวมกันเป็นหยดทรงกลม บริเวณที่ของเหลวสัมผัสกับผิวของ ของแข็ง จะอยู่ที่ฐานของทรงกลมซึ่งเล็กมากจนแทบจะเป็นจุดเมื่อเป็นแบบนี้ของเหลวสามารถกลิ้งไปมาบนผิวได้อิสระเหมือนลูกบอลกลิ้งบนพื้นเรียบ

ถ้ามุมสัมผัสของหยดน้ำมีค่าน้อยกว่า  $5^\circ$  จะเรียกว่า สภาพชอบน้ำยิ่งยวด (Super hydrophilic) และถ้ามุมสัมผัสของหยดน้ำ มีค่ามากกว่า  $150^\circ$  จะเรียกว่า สภาพไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3.2 ปรากฏการณ์ไม่ชอบน้ำยิ่งยวด (Superhydrophobic)

แรงยึดติดระหว่างของเหลวและของแข็งจะทำให้ของเหลวกระจายตัวไปทั่วพื้นผิวส่วนแรงเชื่อมแน่นภายในของเหลวเองจะทำให้ของเหลวเกาะกันเป็นทรงกลมและไม่สัมผัสกับพื้นผิวของของแข็ง

มุมสัมผัสนี้จะบอกแนวโน้มที่หยดของเหลวกระจายตัวในพื้นผิวเรียบของของแข็ง โดยมุมสัมผัสจะแปรผกผันกับความสามารถในการกระจายตัวของของเหลวมุมสัมผัสที่น้อยกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะ หมายถึงภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับดีมาก และของเหลวจะกระจายออกไปเป็นบริเวณกว้าง มุมสัมผัสที่มากกว่า  $90^\circ$  โดยทั่วไปจะหมายถึง ภาวะการเปียกของพื้นผิวอยู่ในระดับไม่ดี และ ของเหลวจะสัมผัสกับพื้นผิวของแข็งเพียงเล็กน้อยและจะก่อตัวเป็นทรงหยดน้ำค้าง สำหรับกรณีถ้า ของเหลวนั้นเป็นน้ำพื้นผิวที่มีการกระจายตัวได้ดีจะถูกเรียกว่า Hydrophilic และพื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีจะถูกเรียกว่า Hydrophobic พื้นผิวที่มีการกระจายตัวไม่ดีอย่างยิ่งยวดจะให้มุมสัมผัส ที่มากกว่า  $150^\circ$  ทำให้มีหน้าสัมผัสระหว่างของเหลวและของแข็งน้อยมาก ๆ ซึ่งกรณีนี้บางครั้งถูก เรียกว่า "Lotus effect" หรือ "ปรากฏการณ์ใบบัว" (จันทิมา ชั่งสิริพร และคณะ. 2560)

## 2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

กิริชวรรณ เกี้ยวชายสงค์ (2561) ทำการศึกษาการปรับปรุงสมบัติทางด้านการสึกหรอโดย กระบวนการไอพ่นพลาสมาไนโททาเนียมออกไซด์บริเวณผิวชิ้นงาน และศึกษาผลของเวลาในการไอพ่นที่ส่งผลต่อสมบัติทางโทรโพลีของอะลูมิเนียมจากการวิจัยพบว่า เวลาในการทำไอพ่นและปริมาณของไทเทเนียมออกไซด์มีผลอย่างมากต่อการปรับปรุงสมบัติทางโทรโพลีของอะลูมิเนียม

ว่าที่ร้อยตรีรุ่งโรจน์ ยิ่งสง่า (2561) ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการไอพ่นบนชิ้นงานโลหะเงินและโลหะเงินสเตอร์ริง ที่กำลังไฟฟ้า เวลาและความเข้มข้นสารละลายซิลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างกัน จากการทดลองพบว่า ผิวของชิ้นงานเกิดการเคลือบสีและมีอนุภาคการเรียงตัวสีแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นสารละลาย เวลาและกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการทำไอพ่นสภาวะอะไอพ่นที่เหมาะสมสำหรับการทำเคลือบสีบนผิวชิ้นงานโลหะเงินและโลหะเงินสเตอร์ริงด้วยกระบวนการไอพ่น คือ การไอพ่นในซิลเฟอร์และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีความเข้มข้นใน อัตราส่วนที่ 1:1 เวลา 15 วินาที กำลังไฟฟ้า 3 โวลต์

ศศิธร หอมดำรงวงศ์ และคณะ(2558) ได้ศึกษากาวิเคราะห์ปริมาณตะกั่ว แคดเมียมและอลูมิเนียม ที่ละลายออกมาจากภาชนะหุงต้ม ทดสอบโดยใช้สารละลาย กรดอะซีติก ร้อยละ 4 โดยปริมาตร ต้มให้เดือด 2 ชั่วโมง แล้วจึงวัดปริมาณตะกั่วและแคดเมียมโดยใช้เครื่อง Flame-AAS วัด ปริมาณ ส่วนอลูมิเนียมจะวัดด้วยเครื่อง GF-AAS ที่ความยาวคลื่น 257.4 นาโนเมตร ซึ่งจากการ ทดสอบความถูกต้องของวิธีพบว่าความเป็นเส้นตรงของช่วงการวัดระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน

ตะกั่วแคดเมียม และอลูมิเนียม ในช่วงความเข้มข้น 0-3.00, 0-0.8 และ 0-0.200 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r) ของตะกั่ว แคดเมียมและอลูมิเนียมเท่ากับ 0.9999, 0.9993 และจากผล พบ 0.9995 ของตะกั่ว แคดเมียม และอลูมิเนียม เท่ากับ 0.05, 0.001 และ 0.004 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ขีดจำกัดของการวัดเชิงปริมาณ (LOQ) ของตะกั่ว แคดเมียม และอลูมิเนียม เท่ากับ 0.1, 0.01 และ 0.010 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ทดสอบความแม่นยำและความเที่ยงของวิธีวิเคราะห์ โดยการเติม สารละลายมาตรฐานตะกั่ว แคดเมียม และอลูมิเนียมลงในสารละลายตัวอย่างให้มีความเข้มข้น 3 ระดับ พบว่า % recovery ของตะกั่ว แคดเมียม และอลูมิเนียมอยู่ในช่วง 92-99, 101-103 และ 98-108 ตามลำดับ และค่า % RSD ของ ตะกั่ว แคดเมียม และอลูมิเนียม อยู่ในช่วง 5.5-7.5, 2.3-3.3 และ 2.8-5.9 ตามลำดับ จากการสำรวจปริมาณตะกั่ว แคดเมียม และอลูมิเนียมในภาชนะหุงต้มราคาถูกที่วางขายในตลาดกรุงเทพฯ และปริมาณมลพิษจำนวน 32 ตัวอย่าง โดยใช้วิธีวิเคราะห์นี้ ตรวจพบตะกั่ว ร้อยละ 56 ปริมาณที่พบน้อยกว่า 0.1-3.35 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าภาชนะที่ทำด้วยอลูมิเนียมมีตะกั่วละลายออกมามากกว่าวัสดุอื่นทั้งปริมาณ และจำนวนตัวอย่างและตรวจพบว่าภาชนะหุงต้มทุกตัวอย่างมีอลูมิเนียมละลายออกมาโดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 232 มิลลิกรัมต่อลิตร แม้ปัจจุบันประเทศไทยจะยังไม่มีข้อกำหนดของอลูมิเนียมในภาชนะหุงต้ม แต่อลูมิเนียมเป็นโลหะที่อันตรายเพราะอาจก่อให้เกิดโรคเกี่ยวกับระบบประสาทได้ ทาง Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA) จึงได้ กำหนดค่าสูงสุดที่รับได้ต่อสัปดาห์ (PTWI) ไว้ไม่เกิน 7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักตัว

Josephus *et al.* (2013) ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะโครงสร้างและการเปื่อยของพื้นผิว อะลูมิเนียมออกไซด์ พบว่า การทำการอโนไดซ์ด้วยกรดฟอสฟอริก ได้ค่ามุมสัมผัสสูงสุด ประมาณ  $128^\circ$  ทำอโนไดซ์ด้วยกรดคลอริก จะได้ค่ามุมสัมผัสสูงขึ้น  $5^\circ-30^\circ$

L. Torrisi *et al.* (2014) ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของพื้นผิวอะลูมิเนียม โดยการใช้นาโนเทคโนโลยีที่แตกต่างกันซึ่งส่งผลต่อการทำให้ผิวอยู่ในสภาพชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ

N. B. Ekwe *et al.* (2013) ทำการศึกษาผลของเวลาและแรงดันไฟฟ้าในการอโนไดซ์ของอลูมิเนียม โดยใช้กรดซัลฟิวริก เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ปริมาณกระแสไฟฟ้า 2.22 แอมแปร์ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเวลาผ่านไปเมื่อแรงดันไฟฟ้าเพิ่มความหนา ของผิวเคลือบอะลูมิเนียมจะเพิ่มขึ้น

Twoseadj. 2552 “ภาชนะเคลือบเทฟลอน อันตรายหรือไม่” [Online]. Available <https://consumersouth.org/paper/40>

Chanyoung Jeong และ Chang-Hwan Choi (2011) ในการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า พาราเมเตอร์อโนไดซ์สามารถออกแบบโครงสร้างนาโนไฮบริดแบบเสาบนรูพรุน (POP) ได้โดยตรงใน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการไอโนดซ์แบบชั้นตอนเดียวเพื่อให้พื้นผิวที่ไม่ชอบน้ำโดยการปรับแรงดันไฟฟ้าและ ระยะเวลาของไอโนดซ์ทำให้สามารถสร้างโครงสร้างนาโนชนิดไฮบริดที่มีลักษณะเป็นเสาต้านบนชั้นที่มีรูพรุน โดยโครงสร้างนาโนแบบไฮบริดของชั้นออกไซด์ของโลหะไอโนดซ์จะช่วยเพิ่มความสามารถในการชอบน้ำของพื้นผิวอย่างมีนัยสำคัญอย่างไรก็ตามหลังจากการชุบแบบชั้นเดียวซึ่งกระบวนการชุบไอโนดซ์ที่ได้รับการควบคุมอย่างดีแสดงให้เห็นว่าการชุบไอโนดซ์เคมีไฟฟ้าสามารถเพิ่มคุณสมบัติที่ดีและประสิทธิภาพเพื่อให้พื้นผิวโลหะต่างๆ มีคุณสมบัติที่ไม่ชอบน้ำมากโดยสร้างโครงสร้างคล้ายเสาต้านบนขอบรูพรุนที่ทำได้เองโดยตรงผ่านขั้นตอนการทำงานง่ายๆเพียงชั้นตอนเดียว ซึ่งกระบวนการชุบไอโนดซ์เคมีไฟฟ้าแบบเดิมมักจะสร้างโครงสร้างรูพรุนระดับนาโนที่เป็นเนื้อเดียวกัน โครงสร้างจะเป็นแบบระนาบ 2 มิติและมีรูพรุนขนาดเล็กโดยทั่วไปจะส่งผลให้มุมสัมผัสต่ำกว่าและฮิสเทรีซิสของมุมสัมผัสใหญ่กว่าโครงสร้างแบบเสา 3 มิติที่ปลายไม่ได้เชื่อมต่อกัน และด้วยเหตุนี้จึงแสดงประสิทธิภาพที่ไม่ชอบน้ำยิ่งยวดที่ด้อยกว่า

Li, Lan, *et al.* (2024) อลูมิเนียมอัลลอยด์บริสุทธิ์ชนิด 1100 มีคุณสมบัติที่สามารถนำไฟฟ้าและนำความร้อนได้ดี มีความสามารถในการขึ้นรูปได้ง่าย และต้นทุนต่ำ ซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ดีและมีศักยภาพในการที่จะทำให้อลูมิเนียมอัลลอยด์ (แผ่นโพลาร์เชื่อมต่อกับพื้นผิวทั้งหมดของแคโทดหนึ่งตัว (ขั้วบวก) และพื้นผิวทั้งหมดของแอโนดหนึ่งตัว (ขั้วลบ) ของเซลล์ถัดไป) มีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นและประหยัดเมื่อเปรียบเทียบกับแผ่นโพลาร์ที่ทำจากสแตนเลสสตีล ในปัจจุบันเซลล์เชื้อเพลิงมีเมมเบรนสำหรับการแลกเปลี่ยนโปรตอนของแบบจำลองส่วนประกอบที่ดีมีคุณภาพถือเป็นสิ่งสำคัญในการพัฒนาและปรับพารามิเตอร์และการประมวลผลให้เหมาะสม และสามารถควบคุมกระบวนการขึ้นรูปของแผ่นโพลาร์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ วัตถุประสงค์ของงานนี้คือเพื่อพัฒนาแบบจำลองเซลล์เชื้อเพลิงที่จะมีส่วนประกอบเป็น อลูมิเนียม 1100 ที่สามารถจำลองเซลล์เพื่อหาความสัมพันธ์ของความเค้น-ความเครียดและสามารถทำนายการเกิดความเค้น-เครียดที่เกิดจากการแตกหักเพื่อหลีกเลี่ยงความล้มเหลวในการขึ้นรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 3.1.1 แผ่นอะลูมิเนียม 1100 ขนาด 1 นิ้ว x 3 นิ้ว จำนวน 100 แผ่น
- 3.1.2 กรดซัลฟิวริก 98% ปริมาตร 2.5 ลิตร จำนวน 2 ขวด
- 3.1.3 คีมคีบ จำนวน 1 อัน
- 3.1.4 ปีกเกอร์ ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 2 ใบ
- 3.1.5 ปีกเกอร์ ปริมาตร 2,000 มิลลิลิตร จำนวน 2 ใบ
- 3.1.6 โซดาไฟ จำนวน 1 ถัง
- 3.1.7 เครื่องเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า 1 เครื่อง
- 3.1.8 ถังมือยาง จำนวน 1 ถัง
- 3.1.9 เครื่องวัดมุมสัมผัส (DMe-210)

#### 3.2 วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.2.1 การเตรียมน้ำยาอโนไดซ์

เตรียมน้ำเปล่าใส่ปีกเกอร์ไว้ 2,200 มิลลิลิตร จากนั้นนำกรดซัลฟิวริกเทใส่ลงไปจนน้ำเปล่าที่เตรียมไว้ 220 มิลลิลิตร (10%) เมื่อผสมกรดลงไปแล้วน้ำยาจะมีอุณหภูมิสูงขึ้น ดังนั้นต้องทิ้งไว้ให้เย็นตัวลงก่อน

##### 3.2.2 การเตรียมพื้นผิวอะลูมิเนียม

นำแผ่นอะลูมิเนียมแช่ลงในโซดาไฟอัตราส่วน 50 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร เป็นเวลา 10 นาที

##### 3.2.3 การทำอโนไดซ์

กรณีที่ 1 กระแสไฟฟ้าที่ 13 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 5, 10 และ 15 นาที

กรณีที่ 2 กระแสไฟฟ้าที่ 15 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 5, 10 และ 15 นาที

กรณีที่ 3 กระแสไฟฟ้าที่ 17 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 5, 10 และ 15 นาที

กรณีที่ 4 กระแสไฟฟ้าที่ 19 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 5, 10 และ 15 นาที

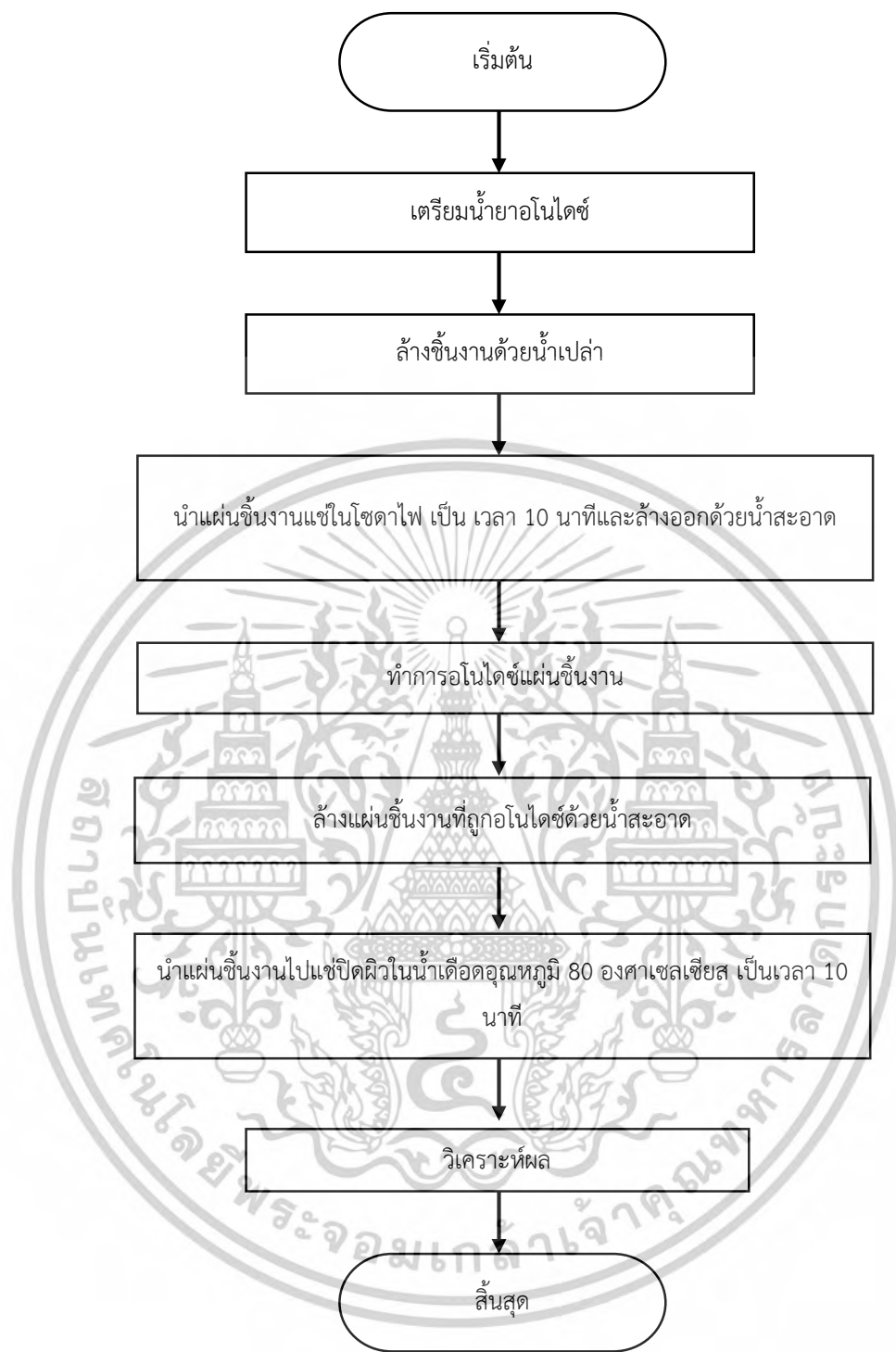
กรณีที่ 5 กระแสไฟฟ้าที่ 21 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 5, 10 และ 15 นาที

หลังจากทราบผลการทดลองจึงตัดสินใจทำต่อในกรณีที่ 6 เพื่อดูแนวโน้มของกราฟ

กรณีที่ 6 กระแสไฟฟ้าที่ 19 แอมแปร์ระยะเวลาในการชุบ 1-15 นาที

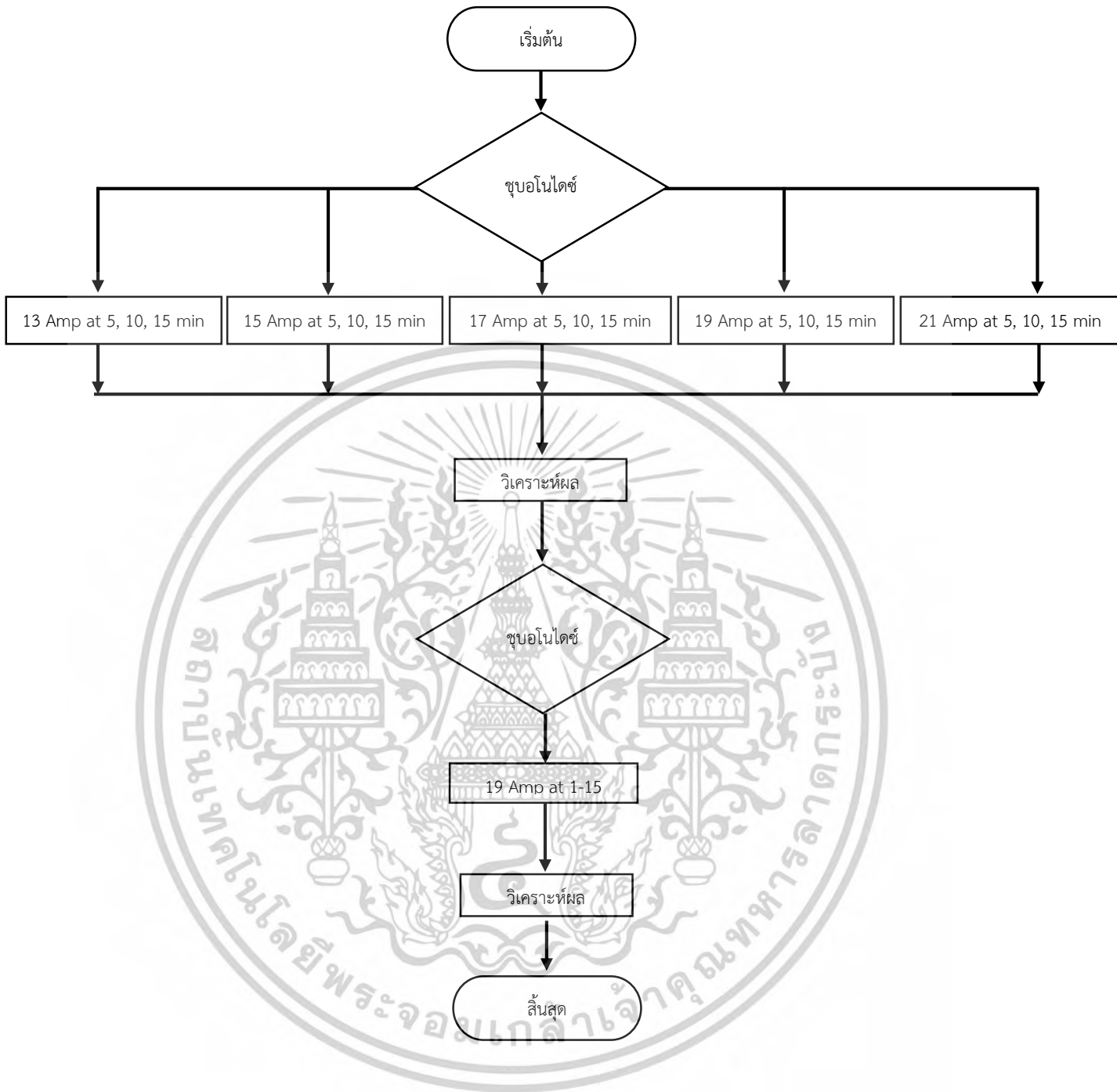
##### 3.2.4 การปิดผิว

นำแผ่นอะลูมิเนียมที่ผ่านการชุบไปแช่ในเค็มน้ำเกลือ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 กระบวนการโอโซน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 กระบวนการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 การวัดค่ามุมสัมผัสพื้นผิวอะลูมิเนียม

#### 3.3.1 เครื่องวัดมุมสัมผัส (DMe-210)

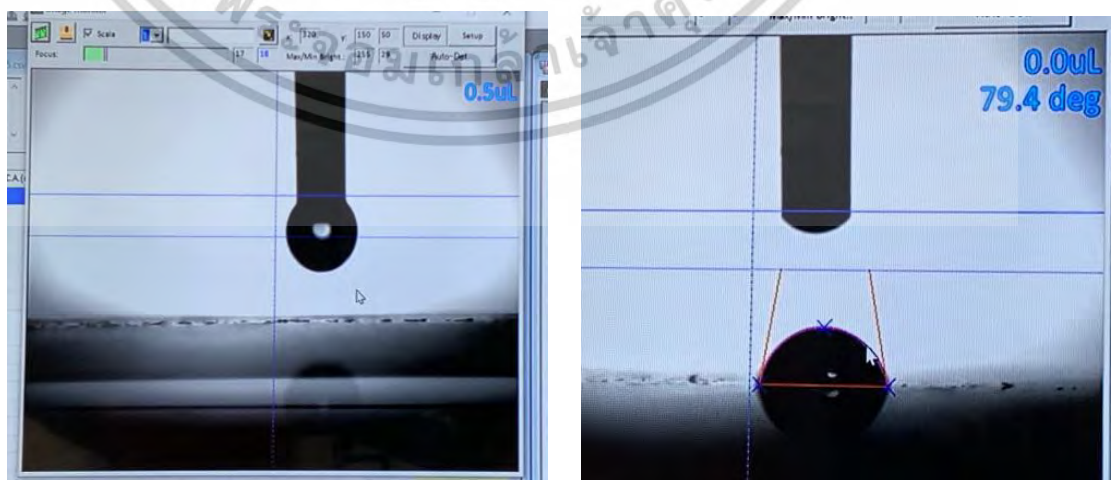
หลักการทางานของเครื่อง Wetting angle measurement คือใช้หลักการของ Young equation เพื่อใช้ในการอธิบายเกี่ยวกับแรงตึงผิวของวัสดุโดยวัดได้จากมุมของของเหลวที่กระทบกับของแข็งที่เป็นระนาบอ้างอิงโดยพบว่าหากมุมของของเหลวที่วัดได้เมื่อเทียบกับระนาบอ้างอิงมีมุมที่กว้างแสดงว่าของเหลวที่ทำการวัดนั้นมีแรงตึงผิวสูงและในทางกลับกันหากมุมที่วัดได้เป็นมุมที่แคบแสดงว่าจะมีแรงตึงผิวน้อย (Materials Innovation Center (MIC). 2012)



รูปที่ 3.3 รูปแสดงส่วนประกอบในขั้นตอนการชูปโนโตซ์

<https://www.lr-test.com/th/product-category/contact-angle-tester-goniometer/>

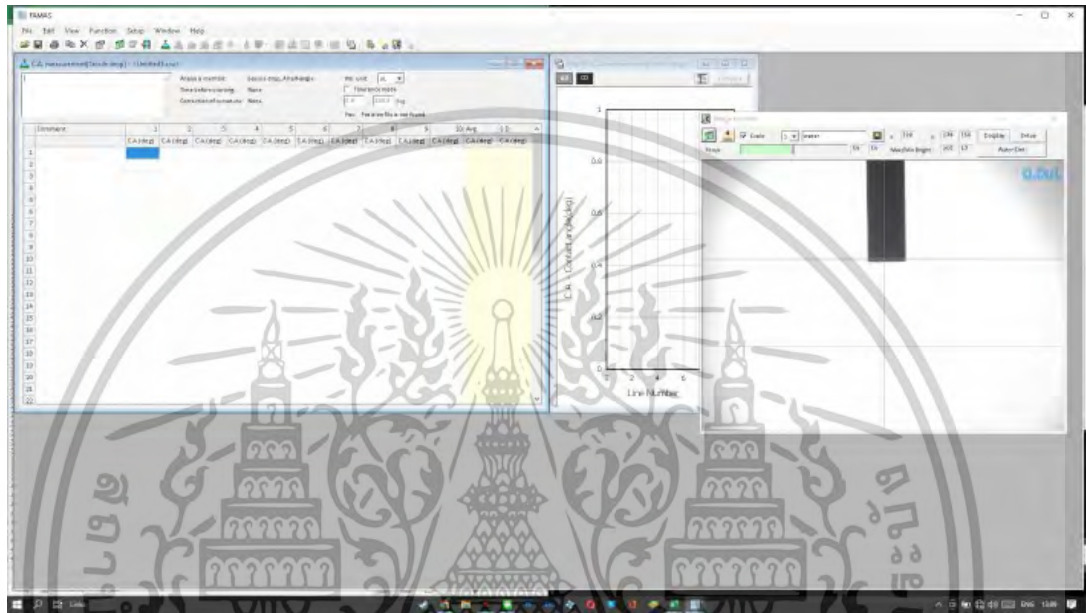
เครื่องวัดมุมสัมผัสต้องเริ่มจากการเซตเครื่องโดยใช้สายเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์และปรับความเอียงของตัวเครื่องโดยใช้ที่วัดระดับน้ำ หมุนเกลียวขาตั้งให้ฟองอากาศอยู่กึ่งกลางของตัววัด ระดับ ตั้งค่าแสงและปลายเข็มหยดน้ำให้ตรงกับเส้นที่ตั้งค่าไว้ในคอมพิวเตอร์ จากนั้นนำแผ่นอะคริลิก ที่มากับตัวเครื่องเป็นตัวคาร์ริเบรท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ **รูปที่ 3.4 ปริมาตรของหยดน้ำและมุมของสัมผัส** ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัดค่ามุมสัมผัสจากเครื่องวัดมุมสัมผัส (DMe-210) โดยวางแผ่นอะลูมิเนียมตรงฐานวาง วาง เรียบเสมอไปกับฐาน จากนั้นหมุนปลายเกลียวควบคุมปริมาณหยดน้ำให้ได้ 0.5  $\mu\text{L}$  จากนั้นหมุนแทน วางให้พื้นผิวอะลูมิเนียมไปสัมผัสกับหยดน้ำที่กำหนดไว้แล้วจึงหมุนแทนวางลงมาให้อยู่ในระดับที่ กล้องสามารถวัดมุมของหยดน้ำได้

ในการทดสอบแผ่นชิ้นงาน 1 ชิ้น จะใช้หยดน้ำขนาด 0.5  $\mu\text{L}$  และหยดน้ำทดสอบมุมสัมผัสทั้งหมด 10 ตำแหน่งกระจายทั่วแผ่นชิ้นงาน จากนั้นทำการวัดมุมด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่าเฉลี่ยและบันทึกผล



รูปที่ 3.2 หน้าจอแสดงผลและตารางเก็บข้อมูล

### 3.4 ขอบเขตการวิจัย

กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ อลูมิเนียมเกรด 1100 หนา 2 มิลลิเมตร โดยมีตัวแปรต้น คือ กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาในการชุบ ตัวแปรตาม คือ ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) ตัวแปรควบคุม คือ แผ่นอลูมิเนียม

### 3.5 ปัจจัยที่ศึกษา

3.5.1 กระแสไฟฟ้า ที่มี 5 ระดับ คือ 13, 15, 17, 19 และ 21 แอมแปร์

3.5.2 ระยะเวลา 3 เวลา คือ 5, 10, 15 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

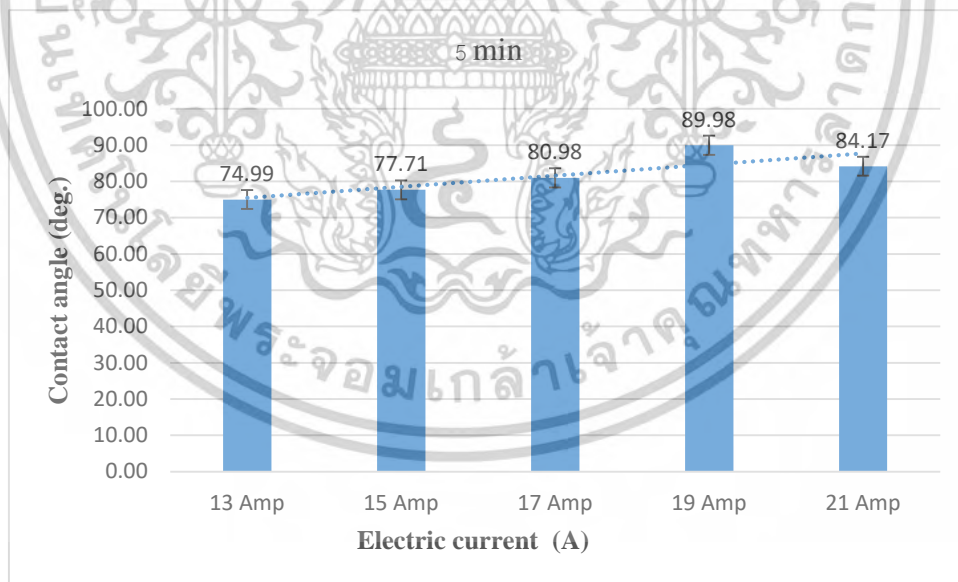
### ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการการศึกษาอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์เพื่อใช้เป็นวัสดุสัมผัสอาหาร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษามุมสัมผัสที่ได้จากการไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส การทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตรากระแสของมุมสัมผัสที่ได้จากการไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิส ทำการทดลองโดยวัดค่ามุมสัมผัสจากเครื่องวัดมุมสัมผัส (DMe-210) โดยวางแผนอะลูมิเนียมตรงฐานวาง เรียบเสมอไปกับฐาน จากนั้นหมุนปลายเกลียวควบคุมปริมาณหยดน้ำให้ได้ 0.5  $\mu\text{L}$  จากนั้นหมุนแท่น วางให้พื้นผิวอะลูมิเนียมไปสัมผัสกับหยดน้ำที่กำหนดไว้แล้วจึงหมุนแท่นวางลงมาให้อยู่ในระดับที่ กล้องสามารถวัดมุมของหยดน้ำได้ ในการทดสอบแผ่นชิ้นงาน 1 ชิ้น จะใช้หยดน้ำขนาด 0.5  $\mu\text{L}$  และหยดน้ำทดสอบมุมสัมผัสทั้งหมด 10 ตำแหน่งกระจายทั่วแผ่นชิ้นงาน จากนั้นทำการวัดมุมด้วยโปรแกรมเพื่อหาค่าเฉลี่ยและบันทึกผล

#### 4.1 ผลของการวัดมุมสัมผัสบนพื้นผิว

การวิเคราะห์มุมสัมผัสบนพื้นผิวบนแผ่นอะลูมิเนียมที่กระแส 13, 15, 17, 19 และ 21 แอมแปร์ ที่ระยะเวลา 5-15 นาที ได้ผลลัพธ์ ออกมาดังนี้

##### 4.1.1 ผลของกระแสต่อมุมสัมผัสบนพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม ณ เวลา 5 นาที

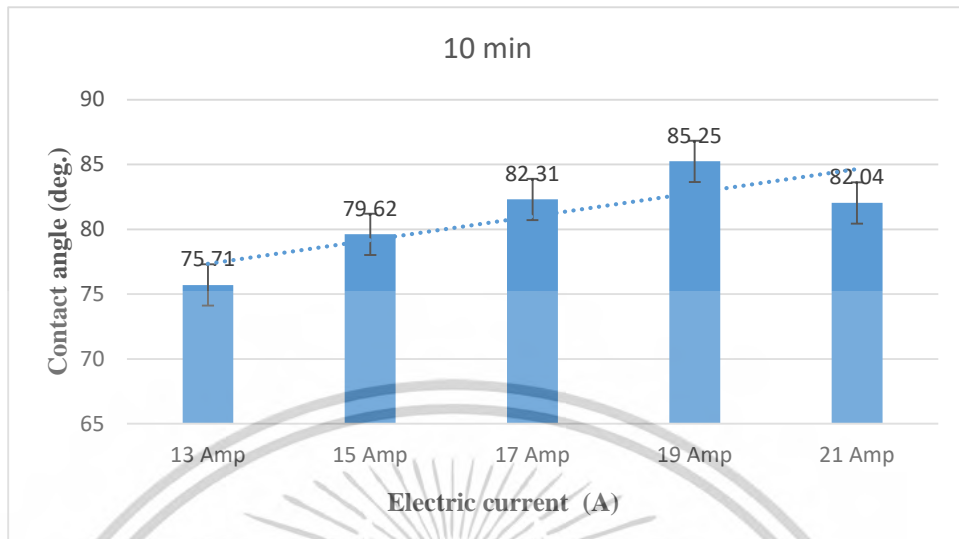


รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับมุมสัมผัสที่ระยะเวลา 5 นาที

รูปที่ 4.1 แสดงมุมสัมผัส (Contact angle) ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำการไฮโดรไลซิสที่ 13, 15, 17, 19 และ 21 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 5 นาที จะเห็นได้ในเวลา 5 นาที ที่ปริมาณกระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นค่ามุมสัมผัสจะเพิ่มขึ้นด้วยจนถึงจุดที่ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้และลดลงอย่างเห็นได้ชัด และค่ามุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ 89.98° ที่กระแสไฟฟ้า 19 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

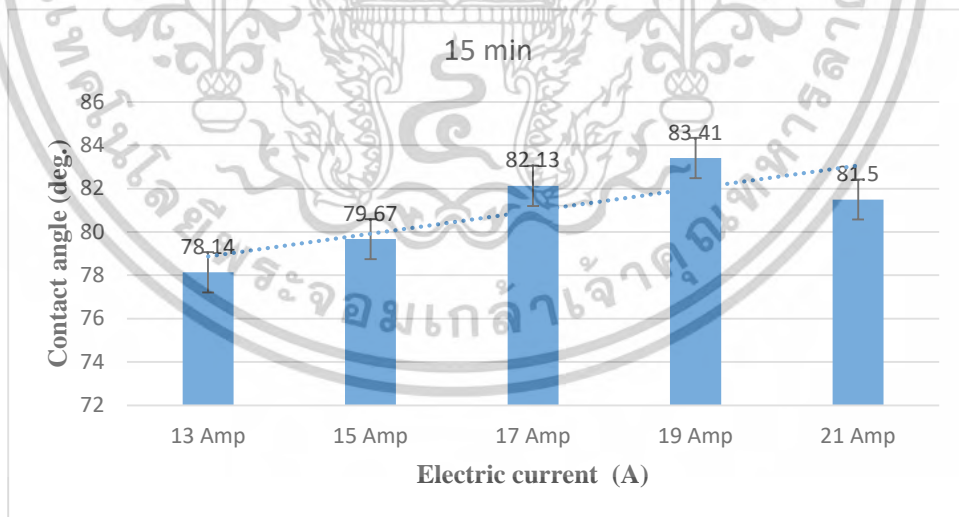
#### 4.1.2 ผลของกระแสต่อมุมสัมผัสบนพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม ณ เวลา 10 นาที



รูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับมุมสัมผัสที่ระยะเวลา 10 นาที

รูปที่ 4.2 แสดงมุมสัมผัส (Contact angle) ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำการไอโคโนดซ์ที่ 13, 15, 17, 19 และ 21 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 10 นาที จากรูปจะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อมุมสัมผัสโดยมุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $85.25^{\circ}$  ที่กระแสไฟฟ้า 19 แอมแปร์

#### 4.1.3 ผลของกระแสต่อมุมสัมผัสบนพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียม ณ เวลา 15 นาที



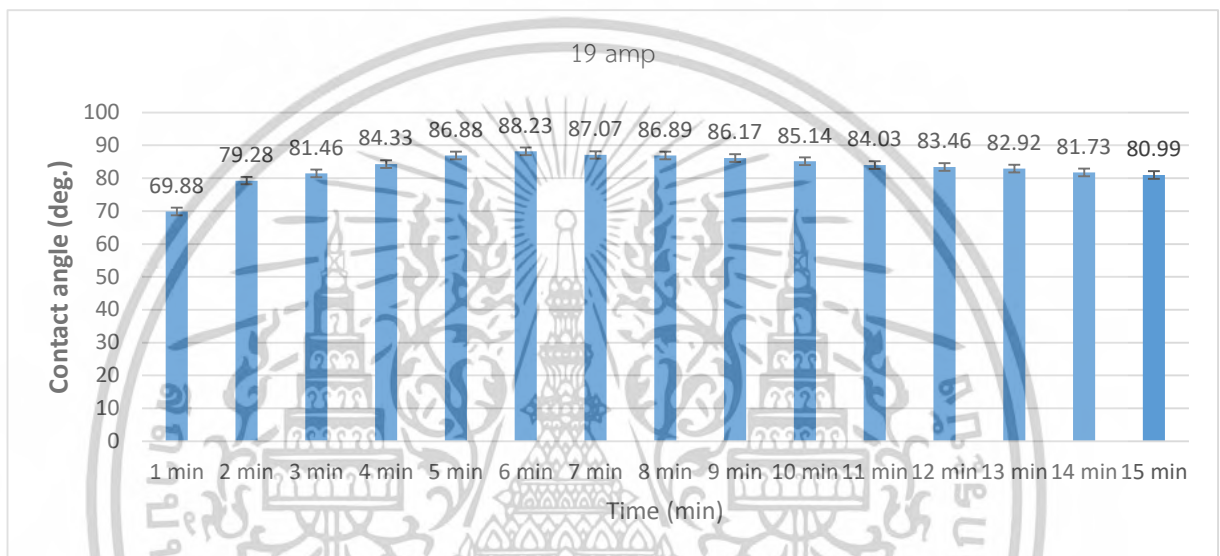
รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับมุมสัมผัสที่ระยะเวลา 15 นาที

รูปที่ 4.3 แสดงมุมสัมผัส (Contact angle) ของแผ่นอะลูมิเนียมที่ทำการไอโคโนดซ์ที่ 13, 15, 17, 19 และ 21 แอมแปร์ ระยะเวลาในการชุบ 15 นาที จากรูปจะเห็นได้ว่าปริมาณกระแสไฟฟ้าที่มีผลต่อมุมสัมผัสโดยมุมสัมผัสที่มีค่าสูงสุดเท่ากับ  $83.41^{\circ}$  ที่กระแสไฟฟ้า 19 แอมแปร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ของค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ จากภาพที่ 4.1 - 4.3 พบว่ากระแสไฟฟ้าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ จากการทดสอบกระแสไฟฟ้าข้างต้น กระแสไฟฟ้าที่ 19 แอมแปร์นั้นเป็นที่น่าสนใจเพราะมีค่ามุมสัมผัสสูงสุดของทุกช่วงเวลา จึงทำการทดลองต่อในกระแสไฟฟ้าที่ 19 แอมแปร์ เพื่อดูแนวโน้มของกราฟกับช่วงระยะเวลา ณ เวลา 5 - 15 นาที

#### 4.1.3 ผลของเวลาต่อมุมสัมผัสบนพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่กระแสไฟฟ้า 19 แอมแปร์ ณ เวลา 1 - 15 นาที



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับมุมสัมผัสที่กระแสไฟฟ้า 19 แอมแปร์ ณ เวลา 5 - 15 นาที

จากรูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาที่มุมสัมผัสที่กระแสไฟฟ้า 19 แอมแปร์ ณ เวลา 5 - 15 นาที แสดงให้เห็นว่า ระยะเวลาที่มากขึ้นก็ส่งผลต่อมุมสัมผัสบนพื้นผิวแผ่นอะลูมิเนียมที่ถูกออกไซด์ จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 - 5 นาทีนั้น ค่าของมุมสัมผัสค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนสูงสุด ณ เวลา 5 นาที มีค่าเท่ากับ 86.88° และจนเวลาผ่านไป ค่ามุมสัมผัสค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง

จากการวิเคราะห์ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ จากภาพที่ 4.1 - 4.4 แสดงให้เห็นว่า เมื่อเวลาผ่านไปช่วงระยะเวลาหนึ่งจะทำให้มุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมที่ถูกออกไซด์จะไปถึงจุดที่ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีกหลังจากนั้นจึงจะค่อย ๆ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ที่ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้ เนื่องจากไม่สามารถสร้างชั้นฟิล์มที่อลูมิเนียมได้อีก จึงโดนสารละลายในการชุบกัดกร่อน เลยเป็นสาเหตุที่ทำให้ค่ามุมสัมผัสค่อยๆ ลดลง

ค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมออกไซด์ มีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 69.88° และค่ามากที่สุดเท่ากับ 89.98°

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ผลของการทดสอบทางสถิติ

การทำวิเคราะห์ทดสอบทางสถิติเพื่อให้เห็นว่า กระแสไฟฟ้ากับระยะเวลาที่มีอิทธิพลต่อค่ามุมสัมพันธ์ตาม การทดสอบทางสถิติ พบว่า

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่มีอิทธิพลต่อมุมสัมพันธ์

แหล่งของความแปรปรวน	Sum of Squares	df	Mean Square	F - Value	Sig.
Corrected Model	4550.484 <sup>a</sup>	14	325.035	4.431	0.000
Intercept	975856.945	1	975856.945	13302.302	0.000
Amp	2586.035	4	646.509	8.813	0.000
Time	668.142	2	334.071	4.554	0.012
Amp * Time	1296.307	8	162.038	2.209	0.030
Error	9903.601	135	73.360		
Total	990311.030	150			

a. R Squared = .315 (Adjusted R Squared = .244)

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวนของกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่มีอิทธิพลต่อมุมสัมพันธ์

ในการศึกษา อิทธิพลของกระแสไฟฟ้า (Amp) พบว่า  $df = 4$ ,  $F\text{-Test} = 8.813$  และ  $Sig. = 0.000$  (ค่า  $Sig.$  น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ใช้ทดสอบ) แสดงว่า กระแสไฟฟ้าและมีอิทธิพลต่อมุมสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ

ในการศึกษาอิทธิพลของระยะเวลา (Time) พบว่า  $df = 2$ ,  $F\text{-Test} = 4.554$  และ  $Sig. = 0.012$  (ค่า  $Sig.$  น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ใช้ทดสอบ) แสดงว่า เวลาและมีอิทธิพลต่อมุมสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ

ในการศึกษาอิทธิพลร่วมกันของกระแสไฟฟ้ากับเวลา (Amp\*Time) พบว่า  $df = 8$ ,  $F\text{-Test} = 2.209$  และ  $Sig. = 0.030$  (ค่า  $Sig.$  น้อยกว่าระดับนัยสำคัญที่ใช้ทดสอบ) แสดงว่า กระแสไฟฟ้ากับเวลาที่มีอิทธิพลต่อมุมสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น จึงสรุปผลได้ว่า กระแสไฟฟ้าและระยะเวลามีอิทธิพลต่อมุมสัมพันธ์ที่ได้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับ 0.05

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาพบว่าค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมไนไตรด์จะพบว่ากระแสและระยะเวลาส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมไนไตรด์เมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่งจะทำให้มุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมไนไตรด์ไปถึงจุดที่ไม่สามารถเพิ่มขึ้นได้อีก หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากไม่สามารถสร้างชั้นฟิล์มไนไตรด์ต่อได้แล้ว ซึ่งโดนสารละลายในการชุบกัดกร่อน จึงทำให้มุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมไนไตรด์ลดลง กระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่เหมาะสมที่สุดจากการศึกษาครั้งนี้คือ กระแส 19 แอมแปร์ และระยะเวลา 5 นาที มีค่าเท่ากับ  $89.98^\circ$  จะพบว่าค่ามุมสัมผัสบนพื้นผิวของแผ่นอะลูมิเนียมไนไตรด์เป็นจุดสูงสุดเมื่อเทียบกับกระแสและระยะเวลาอื่นๆ และจากการทดสอบทางสถิติเพื่อวิเคราะห์ว่าระยะเวลาและกระแสไฟฟ้ามีผลต่อค่ามุมสัมผัสนั้นพบว่า ระยะเวลาและกระแสไฟฟ้ามีอิทธิพลต่อกันจึงทำให้มีผลต่อค่ามุมสัมผัสอย่างมีนัยสำคัญ

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

เพื่อให้การศึกษาอะลูมิเนียมไนไตรด์เพื่อใช้เป็นวัสดุสัมผัสอาหาร มีความสมบูรณ์เพิ่มขึ้นควรมีการศึกษาเพิ่มเติม ดังนี้

5.2.1 ควรทำการศึกษาปัจจัยด้านอื่น ๆ ที่อาจส่งผลต่อกระบวนการไนไตรด์เพิ่มเติม เช่น อุณหภูมิ การเปิดผิว ขั้วไฟฟ้าที่ใช้วัสดุขั้วแคโทดและแอโนด เป็นต้น เนื่องจากอาจมีปัจจัยอื่นที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของการไนไตรด์

## เอกสารอ้างอิง

- Josephus G. Buijsters, Rui Zhong, Natalia Tsyntsaru, and Jean-Pierre Celis. 2013. "Surface Wettability of Macroporous Anodized Aluminum Oxide." *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 5, 8: 3224-3233.
- L. Torrisi and C. Scolaro. 2015. "Treatment Techniques on Aluminum to Modify the Surface Wetting Properties." *ACTA PHYSICA POLONICA* 128: 48-53
- Materials Innovation Center (MIC), 2012, "Wetting angle measurement." [Online]. Available : [http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id\\_sub=26&id=143.](http://mic.eng.ku.ac.th/facilities-detail.php?id_sub=26&id=143.)
- N. B. Ekwe and D. F. Aloko. 2013. "Anodization of Aluminum." *International Journal of Scientific and Research Publications*. Volume 3, Issue 3, ISSN 2250-3153.
- Twotheadj. 2552 "ภาชนะเคลือบเทฟลอน อันตรายหรือไม่" [Online]. Available : <https://consumersouth.org/paper/405>.
- AIC. 2564. "ทำความรู้จักกับอลูมิเนียม คุณสมบัติ และการใช้งาน." [Online]. Available : [http://www.dojogarden.com/index.php?id\\_product=61&controller=product](http://www.dojogarden.com/index.php?id_product=61&controller=product)
- B. Wielage, G. Alisch, Th. Lampke, and D. Nickel. 2008. "Anodizing – a key for surface treatment of aluminium." *Key Engineering Materials*. Vol. 384: 263-281.
- กริชวรรณ เกี้ยวชายสงค์. 2561. การปรับปรุงสมบัติทางโพลีโบลีย์ของผิวอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการอโนไดซ์เสริมนาโนไททาเนียมไดออกไซด์. ปรินญาณิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวัสดุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- จันทิมา ชั่งสิริพร, พรศิริ แก้วประดิษฐ์ และพุดกระย้า พงศ์ยี่หล้า. 2560. การเคลือบผิวกระจกโซลาร์เซลล์ ให้สามารถทำความสะอาดตัวเองได้. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี. คณะวิศวกรรมศาสตร์
- ชูจิต สารภาค , อรุณ นาคชาติ และ Chad White. 2018. สมบัติของทรายนาโนไม่เปียกน้ำ. *Koch Cha Sam Journal of Science*. Vol.40, No.1.
- ธิดารัตน์ เพรศแก้ว. 2555. ผลของตัวแปรในกระบวนการโซลเจลต่อสมบัติของฟิล์ม TEOS-SiO<sub>2</sub>-PDMS. ปรินญาณิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- นันทน์ริฎุ พิสิฐรัชต์. 2560. ผลของมุมสัมผัสหยกน้ำบนกระจกสไลด์ที่ปรับสภาพด้วยพลาสมาเจ็ท ระบบความดันบรรยากาศ. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ ศึกษา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- นฤทธิ ฝ้ายบุตร และ ดร.วิทยา อมรกิจบำรุง. 2013. “ผลของความขรุขระเชิงผิวต่อความสามารถในการเปียกน้ำของฟิล์มบางคาร์บอนคล้ายเพชร.” *วารสารวิจัย มช.* (บศ.) 13 (2).
- บริษัท ไทยเจริญเทค จำกัด. 2564. “เจาะลึก อลูมิเนียม โลหะสีขาวคล้ายกับเงิน น้ำหนักเบา แต่ แข็งแรง.” [Online]. Available : <https://www.chi.co.th/article/article-858/>
- มูลนิธิโครงการสารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. 2564. “อะลูมิเนียม.” [Online]. Available:[https://www.saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=2&chap=5&page=t\\_2-5-infodetail09.html](https://www.saranukromthai.or.th/sub/book/book.php?book=2&chap=5&page=t_2-5-infodetail09.html)
- รัชนิวรรณ ศิริ. 2561. การสังเคราะห์พื้นผิวไม่ชอบน้ำอย่างยิ่งยวดที่มีความใสด้วยเทคนิคการจัดเรียงตัวเองที่ละชั้นโดยอาศัยการพ่นสเปรย์.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- รุ่งโรจน์ ยิ่งสง่า. 2561. โครงการ การปรับปรุงสภาพผิวของโลหะเงินให้เกิดสีโดยวิธีการอะโนไดซ์. โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) มหาวิทยาลัยบูรพา.
- Li Lan, Smith, Christopher B, and Ross, Kenneth A. 2024. “Constitutive model development of aluminum alloy 1100 for elevated temperature forming process.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. Jul 2024, Vol. 133 Issue 3/4, p1201-1216. 16p.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบ

ก.1 ผลการทดลองแผ่นก่อนการทำไนโดซ์

ก.2 ผลการทดลองที่กระแส 13 แอมแปร์

ก.3 ผลการทดลองที่กระแส 15 แอมแปร์

ก.4 ผลการทดลองที่กระแส 17 แอมแปร์

ก.5 ผลการทดลองที่กระแส 19 แอมแปร์

ก.6 ผลการทดลองที่กระแส 21 แอมแปร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ก.1

ผลการทดลองแผ่นก่อนการทำไอโซซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.1.1 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมก่อนการทำไอโดซ์

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.R(de)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
plain aluminium	78.8	79	75.4	78.4	79.8	71.7	69.5	73.8	60	73.7	74	6
plain aluminium	78.2	78	77.6	80.4	74.5	85.6	82.9	84.6	81.5	80.9	80.42	3.43
plain aluminium	75.9	79.8	81.8	78.1	69.94	75.72	84.46	85	86.1	78.7	79.5	5
plain aluminium	76.6	76.1	90.2	83.7	64.7	81.4	106.1	80	106.2	48.7	82.5	18.3
plain aluminium	97.4	91.9	93.7	100.1	82.1	78.9	80.6	88.9	73	80.1	85.6	9
plain aluminium	87.4	91.4	93.7	78	82.1	74	86	82.4	73.7	85	84.3	10.1
plain aluminium	89.3	78.7	79.1	96	89.8	89.3	82.5	79	85.8	79.3	84.9	6.1
plain aluminium	82.8	83.8	76.4	84.6	82.4	77.8	90.3	61.1	62.4	90.4	79.2	10.2
plain aluminium	80.3	81	79.6	78.5	75.2	74.3	78.9	75.4	82.6	80.5	78.6	2.78
plain aluminium	79.9	78.5	74.6	79.8	81.3	80.2	75.2	74	76.8	81.6	78.2	2.83
Avg											80.72	



ภาคผนวก ก.2

ผลการทดลองแผ่นหลังการทำไอโนเดซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2.1 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 13 แอมแปร์

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
13amp 5min	41.9	43.1	41.9	38	52.7	57.6	63	54.5	55.1	59.2	50.7	8.7
13amp 5min	77.2	69.7	76.7	57.8	73.6	70.4	77.3	80.7	68.7	82	73.4	7.1
13amp 5min	70	70.3	63.9	41.3	54.9	38.3	42	44	53.5	40.7	45.5	6.7
13amp 5min	83.1	74.5	93.7	82.7	83.2	63.7	68.4	81.4	51	41.1	72.3	16.3
13amp 5min	77.8	80.4	86.9	78.2	77.5	58.8	72.2	82.9	85.3	83.2	78.3	8.1
13amp 10min	41.6	74.5	44.2	35.3	36.4	70.5	36.4	47.2	76.1	50	51.2	16.3
13amp 10min	122.3	105.2	85.3	116.6	86.4	103.3	83.6	86	88.3	85.9	96.3	14.4
13amp 10min	50.3	66.7	63.9	50.9	70.3	75.1	76.7	70.1	72.4	77.8	69.3	5.6
13amp 10min	75.3	79.1	75.8	75.9	74.2	72.9	76.7	76	73.4	77.8	75.7	1.90
13amp 15min	35.3	37.5	24.8	36.6	25	32.7	35.2	27.7	24.9	27.7	30.7	5.2
13amp 15min	72.6	68.2	76.2	68.9	83	77.4	72.8	85.7	88.8	76.7	77	6.9
13amp 15min	20.9	73.4	60.1	45.8	64.1	82.3	76	69.2	71.5	54.3	61.8	17.9
13amp 15min	52.4	57.8	72.5	44.6	51	49.5	68.9	63.9	71.2	45.5	57.7	10.7
13amp 15min	76.5	79.1	75.8	81.9	79.9	78.5	80.9	77.6	73.4	77.8	78.1	2.52

ตารางที่ ก.3.1 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 15 แอมแปร์

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
15amp 5min	54.9	43.8	46.6	44.8	51	50.5	85	67	47.7	69.6	56.1	13.5
15amp 5min	119.5	81.6	85.2	76.5	69.3	70.2	87.9	67.8	76.7	73.6	80.8	15.2
15amp 5min	57.3	55.9	60.1	69.1	55.9	72.6	71.8	58.1	67.6	55.5	62.4	7
15amp 5min	39.1	49.4	47.5	49.2	50.9	54.5	38.9	32.4	47.3	37.3	44.7	7.2
15amp 5min	56	26.1	43.9	47.4	36.4	43.9	46.4	42.7	31.4	44.9	41.9	8.5
15amp 10min	74.6	78.9	79.1	75.6	70.9	72.5	70.2	69.9	69.8	45.7	70.7	7
15amp 10min	91.4	78.8	84.8	100.8	77.4	101.3	103.1	87.2	64.5	71.9	86.1	13.2
15amp 10min	43.3	37.7	49	45.4	60.8	69.7	73.1	42.8	46.4	60.6	52.9	12.3
15amp 10min	79.9	85.8	65.1	60.4	66.3	59.2	87.3	75	66	70.3	71.5	10.1
15amp 10min	41	52.7	49.2	45	38.8	31.6	55	50.9	32.2	49.4	44.6	8.3
15amp 15min	71.2	53.8	83.1	76.2	61.2	87.4	62.9	43.5	63.7	51.6	65.5	14.1
15amp 15min	71.4	72.4	68.9	72.3	73.3	71.5	73.4	63.9	86.1	73.2	72.6	5.5
15amp 15min	43	45.1	44.1	39.9	39.8	41.1	41.9	52.7	48.8	43.2	44	6.1
15amp 15min	51.8	32.7	31.4	51.8	35.4	38.3	32.7	46	48.4	51.4	42	8.7
15amp 15min	86	85.4	86.1	87.8	85.5	86	88	76.8	89.8	76.4	84.8	4.5

ตารางที่ ก.4.1 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 17 แอมแปร์

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
17amp 5min	42.8	40.7	35.6	19.5	34.3	31.4	27	42.3	41.5	45.3	36	8.8
17amp 5min	52	88.4	84.5	86.9	79.2	64	77	56	75.1	66.5	73	12.8
17amp 5min	58.7	64.1	80.7	76.5	67.6	71.6	61.6	59.2	81.5	63	68.5	8.6
17amp 5min	75.2	66.1	78.6	68	77.4	78.5	57.9	57.5	40.7	64.6	66.5	12.1
17amp 5min	85.8	78	54.5	76.9	54.5	77.8	74.6	76.8	56.9	65.3	70.1	11.4
17amp 10min	11.1	11	19.5	22.7	20.2	35.5	24.1	33.6	37.2	20.9	23.6	9.3
17amp 10min	77.3	75.6	88.2	82.2	79.6	80.6	82	74.9	98	104.9	84.3	9.9
17amp 10min	48.1	79.9	79.6	40.6	47.3	53.5	35.5	57.4	21.2	72.2	53.5	19.3
17amp 10min	71.7	72.6	74.9	64.5	79.6	63.9	62.9	79.8	54.7	53.3	67.7	9
17amp 10min	45.7	53.7	26.4	67.2	23.6	27.5	42.7	51.2	49.1	50.8	43.8	14
17amp 15min	15.1	14.9	14.0	9.3	8.6	15.1	15.7	18.5	6.2	8.4	12.7	9.1

ตารางที่ ก.4.1 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 17 แอมแปร์ (ต่อ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
17amp 15min	65.4	86.9	85.7	81.4	72.3	49.6	65.6	74.2	81.2	84.9	74.7	11.9
17amp 15min	88.4	71.9	71	72.5	76	73.6	73	71	91.3	72.9	76.2	7.4
17amp 15min	15.3	26.8	36.6	15.4	20.1	31.3	9.6	15.6	32	25.1	22.8	8.9
17amp 15min	50.2	78.5	72.7	65.3	82.4	72.2	63.6	78.9	67.9	60.4	69.2	9.8
17amp 20min	42.4	30.8	23.8	23.3	22	13.3	11.1	12.3	4.8	7.4	19.1	11.6
17amp 40min	29	38.1	40.1	44.1	35.4	33.4	46.9	48.1	29.7	17.5	36.2	9.4
17amp 60min	14.3	11.4	13.6	23.3	30.7	34.2	26.9	16.6	34.9	44.7	25.1	11.1

ตารางที่ ก.5.1 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 19 แอมแปร์

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
19amp 1min	53.1	45.9	39.6	45.9	35.8	48.5	33.6	53.2	36.4	31.2	42.3	8
19amp 2min	56	50.9	40.9	50.8	34.6	45.8	51.7	42.9	35.1	39.6	44.8	7.4
19amp 3min	64.1	68	73.8	61.8	62.9	61.8	58.9	56.5	63.8	74.9	64.6	6
19amp 4min	56.3	51.4	70.5	71.1	74.3	61.3	67.4	62	82.7	62.8	66	9.1
19amp 5min	94.3	101.5	121.9	111.2	66.1	62.6	103.3	73.7	91.9	103.8	93	19.7
19amp 5min	88.8	79.1	80.1	74.5	73	87.3	75.4	92.3	104.7	93.8	84.9	10.2
19amp 5min	89.3	72.6	66.8	64.3	68.6	88.3	67.8	86.5	66.8	77.6	74.9	9.8
19amp 5min	67.6	45.2	42.3	41.6	45.5	46.6	68.5	59.7	47.3	61.5	52.6	10.6
19amp 5min	33.6	59.5	80.9	20.4	57	67.8	22.3	21.4	65.7	37.1	46.6	22.2

ตารางที่ ก.5.1 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 19 แอมแปร์ (ต่อ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
19amp 6min	52.2	61.1	61.4	75.2	72	66.7	47.3	84.2	68.3	88.8	67.7	13.1
19amp 7min	75.9	64.6	48.9	77.6	81	80.3	73.6	72.3	63.7	79.6	71.8	10.1
19amp 7min	69.9	70.2	60.6	74.6	66.9	58.9	73.3	74.8	57	82.6	68.9	8.1
19amp 8min	38.3	60.1	39.7	54.3	53.5	49.4	54.5	54.1	53	46.1	50.3	7
19amp 9min	29.5	37.9	50.7	43.3	22	34.9	24.6	27.2	21.9	24.5	31.7	9.8
19amp 10min	29.1	42.6	43.9	56.9	52.2	47.8	27.9	32.9	29.1	44.5	40.7	10.4
19amp 10min	83.2	87	89.8	86.2	92.2	89.8	96.1	80	85.9	86.1	87.6	4.6
19amp 10min	47.3	54.7	67.4	72.5	49.5	52.4	59.6	53.8	60.5	57.6	57.5	7.8
19amp 10min	27.7	10.8	42.9	9.7	5.4	39.7	10.8	26.1	37.5	46.3	25.7	15.5
19amp 10min	39.5	55.5	60.8	98.7	40.6	46.6	72.3	90.8	49.1	35.4	58.9	21.9

ตารางที่ ก.5.1 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 19 แอมแปร์ (ต่อ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
19amp 15min	9.3	6.8	9.2	14.4	14.3	31.4	57.9	88.7	70.7	86.3	38.9	33.6
19amp 15min	84.3	84.8	85.5	103.5	46.6	56.4	75.6	79.7	83.7	89.2	78.9	16.3
19amp 15min	26.4	19	25.5	17.4	20.1	41.2	11.7	15.2	19.6	19.2	21.1	19.1
19amp 15min	77.8	124.7	88.3	82.5	92.8	85.5	84.8	95.7	79.2	91.8	90.3	13.4
19amp 15min	75.7	70.9	83.1	73.7	77.2	80.2	85.6	81.4	86.6	89.9	80.4	8.9
19amp 20min	58	60.8	78.7	50.5	44.3	57.6	52.4	65.8	41.3	70.4	58	11.6
19amp 40min	65.1	65.4	60.2	36.6	50.6	48	34.5	49.5	45.5	50.5	50.6	10.6
19amp 60min	37.1	32.4	39.8	38.3	27.2	28.3	33.7	43.1	40.6	30	35.1	5.5

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 19 แอมแปร์ ระยะเวลา 1-15 นาที

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
19amp 1min	60.5	68.5	65.7	69.5	70.9	74.8	75.4	69.9	71.1	72.5	69.8	4.4
19amp 2min	70.5	74.4	75.8	78.6	80.1	81.8	80.9	82.6	84.4	83.7	79.2	4.5
19amp 3min	74.1	79.9	78.5	85.4	82.9	84.5	78.9	80.1	83.4	86.9	81.4	3.9
19amp 4min	80.3	80.7	81.7	82.6	85.9	89.1	85.8	82.9	87.7	86.6	84.33	3.1
19amp 5min	90.4	89.9	87.8	80.1	87.8	82.4	87.2	88.3	85.9	89	86.88	3.3
19amp 6min	88.9	86.9	90	90.2	89.9	86.7	87.6	85.2	87.5	89.4	88.23	1.7
19amp 7min	85.9	84.6	86.7	87.6	88.4	85.7	86.7	88.3	87.9	88.9	87.07	1.4
19amp 8min	87.4	89.9	83.4	89.2	89.6	84.5	87.7	85.6	82.6	89	86.89	2.7
19amp 9 min	88.1	86.4	87	82.9	86.4	89.6	82.7	85.9	84.8	87.9	86.17	2.2
19amp 10min	86.4	87.9	85.2	80.1	89.9	85.1	81	82.9	86.3	86.6	85.14	3.0
19amp 11min	89.3	82.6	86.7	87.9	81.9	88.3	81.9	84	79.7	78	84.3	3.9
19amp 12min	81.6	79.8	87.9	80.9	85.3	80.2	82.9	86.9	80.1	89	83.46	3.5

ตารางที่ ก.6 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 19 แอมแปร์ ระยะเวลา 1-15 นาที (ต่อ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
19amp 13min	88	82.7	83.6	80	81.4	79.9	89.5	80.3	81.7	82.1	82.92	3.3
19amp 14min	80.1	82.7	85.6	81.9	80.6	78.5	80.4	79.8	80.4	87.3	81.73	2.8
19amp 15min	78.9	80.9	83.6	84.3	82.4	79.5	84.1	80.6	78.8	76.8	80.99	2.6

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 21 แอมแปร์

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
21amp 5min	25.8	23.5	19.3	26.8	35.4	32.7	40.8	39.7	46.2	44.6	33.5	9.3
21amp 5min	84.9	70.3	84.8	76.9	96	97.6	77.1	71.1	78.6	79.9	81.7	9.3
21amp 5min	64.9	68.2	66.1	87.7	94.3	72.8	84.6	79.9	71.4	76.1	76.6	9.8
21amp 5min	55.9	70.8	79.5	68.5	50.6	69.8	72.5	73.2	68.4	62.5	67.2	8.6
21amp 10min	20.6	22.4	27.5	19.8	44.6	41.7	39.5	39.4	50.3	47	35.3	11.6
21amp 10min	69.3	68.3	68.2	63.6	47.2	48.6	67.6	49.1	71.2	74.1	62.7	10.3
21amp 10min	69.5	95.2	71.3	50.2	23.8	73.6	44.2	27.4	46.6	12.3	51.4	26
21amp 10min	71.4	87.8	84.6	91.8	83	72.9	70.7	67.4	71	68.6	76.9	8.9

ตารางที่ ก.7 ผลการทดลองแผ่นอลูมิเนียมไนไตรด์ ที่กระแส 21 แอมแปร์ (ต่อ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Avg.	S.D.
Comment	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)	C.A.(deg)
21amp 15min	35.1	15	13.4	26.2	32.1	34.1	24.5	10.8	14.8	22.2	22.8	9.1
21amp 15min	81.9	84.7	76.9	76.7	76.3	75.6	79.9	80.1	74.5	72.6	80.1	7.5
21amp 15min	74.8	65.6	67.6	74.8	60.6	79.4	83.7	67.8	65.5	81	72.1	7.7
21amp 15min	78.7	92.9	66.7	81	72.6	66.5	75.7	89.8	87.5	110.4	82.2	13.5

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นางสาวศศิชา ตรงชูเกียรติ  
วัน เดือน ปีเกิด 02 มิถุนายน 2538  
ที่อยู่ 314/653 มบ.มีนบุรีการ์เด้นโฮม ถนนราษฎร์อุทิศ48 ซ.8 เขตมีนบุรี  
แขวงแสนแสบ กรุงเทพมหานคร 10510  
ประวัติการศึกษา วิทยาศาสตร์บัณฑิต 2560 สาขาวิชาวิศวกรรมแปรรูปอาหาร  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้