

สมบัติและเสถียรภาพของพอลิ(ไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลต)เลเทกซ์ดัดแปรด้วยคาร์บอกซิล  
และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์



นางสาวปิยะบุตรี ทองสุข

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2557  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PROPERTIES AND STABILITY OF MODIFIED POLY(VINYL ACETATE-CO-  
ALKYL ACRYLATE) LATEX WITH CARBOXYL AND HYDROXY MONOMERS

Miss Piyabutree Thongsook



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer Science

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

สมบัติและเสถียรภาพของพอลิ(ไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลต)เลเทกซ์ดัดแปรด้วยคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์

โดย

นางสาวปิยะบุตรี ทองสุข

สาขาวิชา

ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรณ ประศาสน์สารกิจ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล)

.....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิณชีระนันท์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.โสภี สงวนนทีกุล)

ปิยะบุตรี ทองสุข : สมบัติและเสถียรภาพของพอลิ(ไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลต)เลเทกซ์ดัดแปรด้วยคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ (PROPERTIES AND STABILITY OF MODIFIED POLY(VINYL ACETATE-CO-ALKYL ACRYLATE) LATEX WITH CARBOXYL AND HYDROXY MONOMERS) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล, 117 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปัจจัยของการเติมหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติการยึดติดและความเสถียรของกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA) ที่อยู่ในรูปเลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลต โดยสังเคราะห์ด้วยกระบวนการมินิอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันแบบ semi-continuous ใช้มอนอเมอร์ตัวหลัก คือ ไวนิลอะซิเตตมอนอเมอร์ (10%wt) และเอทิลเฮกซิลอะคริเลตมอนอเมอร์ (90%wt) และปรับปรุงสมบัติการยึดติดและความเสถียรด้วยการเติมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภทคาร์บอกซิลิกมอนอเมอร์ (-COOH) คือ beta-carboxyethyl acrylate, methacrylic acid และ acrylic acid, หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์ (-O-CO-) คือ methyl methacrylate และหมู่ฟังก์ชันประเภทไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ (-OH) คือ 2-hydroxyl ethyl acrylate และ 2-hydroxy ethyl methacrylate ในอัตราส่วน 0-1.25%wt โดยเติมเพียง 1 หมู่ฟังก์ชันและมากกว่า 1 หมู่ฟังก์ชัน หลังจากได้อนุภาคเลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลต นำไปเตรียมชิ้นงานที่ความหนาของฟิล์มพอลิเมอร์ 20 mm สำหรับทดสอบสมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์บนวัสดุประเภท stainless-steel พบว่าสมบัติทางกายภาพของเลเทกซ์ที่มีความเสถียรมีค่าประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ (zeta potential) -30 ถึง -36 mV และ ค่าการนำไฟฟ้า (conductivity)  $1.45 \times 10^{-3}$  ถึง  $3.13 \times 10^{-2}$  mS/cm เลเทกซ์ที่ดัดแปลงด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกมอนอเมอร์และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์สามารถจัดเก็บที่อุณหภูมิห้องนาน 6 เดือน สมบัติของฟิล์มพอลิเมอร์ การทนต่อการลอกออก (peel adhesion) > 0.7 kg/in และ ความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาวสามารถทนต่อแรงถ่วงของตุ้ม > 24 ชั่วโมง คาดว่าจะได้กาวประเภทที่ไวต่อแรงกด (Pressure sensitive adhesive, PSA) ชนิดใหม่ที่มีการปรับปรุงสมบัติการยึดติดและความเสถียรดีขึ้นกว่าเลเทกซ์ที่ไม่ได้เติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์

สาขาวิชา ปีโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2557

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

# # 5472404523 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: EMULSION POLYMERIZATION / PRESSURE SENSITIVE ADHESIVE / FUNCTIONAL MONOMER

PIYABUTREE THONGSOOK: PROPERTIES AND STABILITY OF MODIFIED POLY(VINYL ACETATE-CO-ALKYL ACRYLATE) LATEX WITH CARBOXYL AND HYDROXY MONOMERS.  
ADVISOR: ASST. PROF. VARAWUT TANGPASUTHADOL, Ph.D., 117 pp.

The aim of this work was to study the effect of functional group types on the adhesion property and stability of pressure sensitive adhesive (PSA) based on poly(vinyl acetate-co-alkyl acrylate) latex. The latex was synthesized by the miniemulsion polymerization in semi-continuous process having vinyl acetate (10%wt) and 2-ethyl hexyl acrylate (90%wt) as major ingredients. The modification was carried out by adding 0-1.25%wt of one or more monomer types that contained -COOH, i.e. beta-carboxyethyl acrylate, methacrylic acid and acrylic acid, -O-CO- , i.e. methyl methacrylate, and -OH group, i.e. 2-hydroxyl ethyl acrylate and 2-hydroxy ethyl methacrylate. Each final adhesive was tested on stainless-steel substrate with adhesive film thickness of 20 mm. The synthesized copolymer latexes with high stability have the zeta potential values of -30 to -36 mV and, conductivity of  $1.45 \times 10^{-3}$  to  $3.13 \times 10^{-2}$  mS/cm. The modified poly(vinyl acetate-co-alkyl acrylate) latex could be stored for as long as 6 months at room temperature. Adhesion properties of the synthesized copolymer had the peel strength of > 0.7 kg/in and cohesion time of > 24 hr. These results indicated that the improved PSAs gave stronger adhesive bond and were more stable than the copolymers without an addition of -COOH monomer.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Field of Study: Petrochemistry and Polymer Science      Student's Signature .....

Science      Advisor's Signature .....

Academic Year: 2014

## กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้คำแนะนำ ตลอดจนให้ความเห็นเพื่อปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี รวมทั้งคณาจารย์ทุกท่านในหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

ขอกราบขอบพระคุณศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพิตา หิญาชีระนันท์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ ดร.โสภี สงวนดีกุล กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจากภายนอก ที่กรุณาให้ความรู้ ความคิดเห็น รวมถึงคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้มีความสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณบริษัทอีเทอนัลเรซิน จำกัด สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือ, สารเคมี และอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย รวมถึงหลักสูตรปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และผู้อยู่เบื้องหลังที่ได้ให้กำลังใจ ให้คำแนะนำ ความช่วยเหลือและให้การสนับสนุนเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูปภาพ.....	ญ
สารบัญตาราง.....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย .....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย .....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	4
2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์.....	4
2.1.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์ .....	4
2.1.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย .....	4
2.1.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย .....	5
2.1.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน.....	6
2.1.5 การประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแบบอิมัลชัน .....	11
2.2 คอลลอยด์.....	12
2.2.1 ความเสถียรของคอลลอยด์ .....	13
2.2.2 ประเภทความเสถียรของอนุภาค.....	14
2.2.3 ศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta Potential ; $\zeta$ ) .....	16
2.3 การกระจายตัวของอนุภาค.....	18

2.3.1 การปรับค่า pH ของสารแขวนลอย.....	18
2.3.2 การเติมสารกระจายตัว.....	18
2.3.3 การเติมสารพอลิเมอร์โมเลกุลต่ำ.....	18
2.4 กาว (adhesive).....	19
2.4.1 กาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA).....	20
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	24
3.1 สารเคมี.....	24
3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องมือ.....	24
3.3 การทดลอง.....	25
3.3.1 การทำให้มอนอเมอร์บริสุทธิ์.....	25
3.3.2 การสังเคราะห์เลเทกซ์ที่ดัดแปรด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์.....	26
3.4 ตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเลเทกซ์.....	31
3.4.1 ความหนืด (viscosity).....	31
3.4.2 ความเป็นกรด - เบส (pH).....	31
3.4.3 Non-volatile content (%).....	31
3.4.4 การหาขนาดของอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์.....	32
3.4.5 หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR).....	32
3.4.6 สมบัติเชิงความร้อนด้วย differential scanning calorimetry (DSC).....	32
3.5 การตรวจสอบคุณลักษณะความเหมาะสมในการนำไปใช้งานของสมบัติของฟิล์ม.....	32
3.5.1 การทดสอบการยึดติดแบบ Rolling ball tack.....	33
3.5.2 การทดสอบการยึดติดแบบ Loop tack (Loop tack test).....	33
3.5.3 การทดสอบลอกออกที่มุม 180° ตามแนวแรงดึง (180° peel adhesion).....	34



3.5.4 การทดสอบลอกออกที่มุม 90° ตามแนวแรงดึง (90° peel adhesion).....	35
3.5.5 การทดสอบความแข็งแรงภายในโมเลกุลกาว (Shear test).....	35
3.6 การทดสอบความเสถียรระหว่างการจัดเก็บเลเทกซ์ (storage stability) .....	36
3.6.1 การทดสอบความเสถียรในสภาวะอุณหภูมิห้อง.....	36
3.6.2 การทดสอบความเสถียรแบบเร่ง (accelerate test) .....	36
3.6.3 การทดสอบความเสถียรโดยการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบสูง (mechanical stability test).....	37
3.6.4 การทดสอบความเสถียรโดยการจัดเก็บเลเทกซ์ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ (freeze thaw stability test).....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง .....	38
4.1 การสังเคราะห์เลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลต.....	38
4.2 การตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์.....	40
4.2.1 ขนาดอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ .....	40
4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วย FT-IR.....	45
4.2.3 สมบัติเชิงความร้อนด้วย differential scanning calorimetry (DSC).....	47
4.3 การทดสอบการนำไปใช้งานสำหรับกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA) [16] .....	50
4.4 การทดสอบความเสถียรของเลเทกซ์ระหว่างการจัดเก็บ (storage stability).....	63
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ .....	68
5.1 สรุปผลการทดลอง .....	68
รายการอ้างอิง .....	72
ภาคผนวก.....	75
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	117

## สารบัญรูปภาพ

รูปภาพที่	หน้า
รูปภาพที่ 2.1 แผนภาพจำลองระบบของการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแวนลอย	5
รูปภาพที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน	8
รูปภาพที่ 2.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและแรงตึงผิวกับการแปรผันของมอนอเมอร์ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน	10
รูปภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะการเกิดประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน	12
รูปภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะการเกิดประจุบนผิวแบบ Ion dissolution ของ AgI	13
รูปภาพที่ 2.6 โครงสร้างอิเล็กทรอนิกส์คอลลด์แบบเบิลเยอร์	15
รูปภาพที่ 2.7 ศักย์ของอนุภาคที่มีโครงสร้างแบบอิเล็กทรอนิกส์คอลลด์แบบเบิลเยอร์	15
รูปภาพที่ 2.8 แสดงลักษณะการกระจายของอนุภาคคอลลอยด์แบบ Electrolyten behavior และ Dispersant effect	19
รูปภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะการกระจายของอนุภาคคอลลอยด์แบบ Low molecular polymeric effect	19
รูปภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะการยึดติด	20
รูปภาพที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์เลเทกซ์	25
รูปภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมเลเทกซ์	28
รูปภาพที่ 3.3 แสดงขั้นตอนการเตรียมพรีมิกซ์มอนอเมอร์	29
รูปภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมเลเทกซ์	30
รูปภาพที่ 3.5 ลักษณะของเซลล์สำหรับหาขนาดของอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์	32
รูปภาพที่ 3.6 แสดงลักษณะของ Rolling ball test	33
รูปภาพที่ 3.7 แสดงลักษณะของ Loop tack test	34

รูปภาพที่ 3.8 แสดงลักษณะของ 180° peel adhesion.....	34
รูปภาพที่ 3.9 แสดงลักษณะของ 90° peel adhesion.....	35
รูปภาพที่ 3.10 แสดงลักษณะของ Shear test.....	36
รูปภาพที่ 4.1 ขนาดอนุภาคคอลลอยด์ของ PSA-0 ถึง PSA-20.....	41
รูปภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของ 2-HEM และ 2HEMA.....	44
รูปภาพที่ 4.3 IR สเปกตรัมของ PSA-0, PSA-1, PSA-6, PSA-9, PSA-17 และ PSA-19.....	46
รูปภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการยึดติดแบบ Loop tack ของ PSA-0 ถึง PSA-20.....	51
รูปภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบการยึดติดแบบ Rolling ball tack ของ PSA-0 ถึง PSA-20.....	51
รูปภาพที่ 4.6 การทดสอบลอกออกที่มุม 90° ตามแนวแรงดึง (90° peel adhesion) ของ PSA-0 ถึง PSA-20.....	52
รูปภาพที่ 4.7 การทดสอบลอกออกที่มุม 180° ตามแนวแรงดึง (180° peel adhesion) ของ PSA-0 ถึง PSA-20.....	52
รูปภาพที่ 4.8 ผลการทดสอบความแข็งแรงภายในโมเลกุลกาว (cohesion, hr) ของ PSA-0 ถึง PSA-20.....	53
รูปภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะการฟอร์มฟิล์มที่ไม่ดีและการฟอร์มฟิล์มที่ดี.....	59

## สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างสูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์ Styrene-butadiene copolymer (SBR) โดยวิธีอิมัลชัน.....	7
ตารางที่ 2.2 การทดสอบที่บ่งบอกความสามารถในการยึดติด .....	21
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	24
ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของมอนอเมอร์ตัวหลักและหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....	26
ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของฟังก์ชันัลมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง .....	27
ตารางที่ 3.4 แสดงช่วงเวลาและการทดสอบความเสถียรในสภาวะการจัดเก็บที่อุณหภูมิห้อง .....	36
ตารางที่ 3.5 แสดงช่วงเวลาและการทดสอบความเสถียรแบบเร่ง .....	36
ตารางที่ 3.6 แสดงช่วงเวลาและการทดสอบความเสถียรในสภาวะอุณหภูมิต่ำ .....	37
ตารางที่ 4.1 แสดงผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมเลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่ผสมฟังก์ชันัลมอนอเมอร์ชนิดต่าง ๆ .....	39
ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเสถียรของคอลลอยด์ .....	41
ตารางที่ 4.3 แสดงผลขนาดของอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ .....	42
ตารางที่ 4.4 แสดงความถี่และแถบการดูดกลืนของเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ได้ .....	46
ตารางที่ 4.5 แสดงผล Tg ของ PSA-0 ถึง PSA-20.....	47
ตารางที่ 4.6 ชนิดของกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด (Pressure sensitive adhesive, PSA) โดยแบ่งตามการทดสอบการลอกออกที่มุม 180° .....	54
ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความเสถียรของเลเทกซ์ในสภาวะต่างๆ.....	64
ตารางที่ 5.1 แสดงวิธีการปรับปรุงสมบัติความเหนียว (tackiness) ของฟิล์มพอลิเมอร์ .....	70
ตารางที่ 5.2 แสดงวิธีการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงในการยึดเกาะกับวัสดุอื่น (adhesion) ของฟิล์มพอลิเมอร์ .....	70

ตารางที่ 5.3 แสดงวิธีการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงภายในโมเลกุล (cohesion) ของฟิล์มพอลิ เมอร์.....	70
---	----



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในภาคอุตสาหกรรมการใช้สารเคมีถือเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ แต่การใช้สารเคมีอย่างปลอดภัยโดยพยายามลดและหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีที่มีระดับความอันตรายมาก มาใช้สารเคมีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม การเลือกใช้อัดติดประเภทเลเทกซ์จึงเป็นทางเลือกหนึ่ง ซึ่งสารอัดติด (adhesive) คือ สารที่ใช้ยึดเหนี่ยวผิวหน้าของวัสดุสองชิ้นให้สามารถติดกันอย่างแข็งแรง สารอัดติดที่ใช้ในงานในอุตสาหกรรมเป็นสารประเภทเลเทกซ์ที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยวิธีอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน (Emulsion polymerization) ของมอนอเมอร์ เช่น ไวนิลอะซิเตต สไตรีน อะคริเลต เป็นต้น สมบัติของพอลิเมอร์ที่ได้จากมอนอเมอร์แต่ละชนิดเหมาะสมในการใช้งานที่แตกต่างกัน ในงานนี้สนใจสารอัดติดประเภทไวนิลอะซิเตต-อัลคิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ซึ่งเหมาะสำหรับใช้เป็นกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA) นอกจากนี้องค์ประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่งที่ต้องพิจารณาสำหรับการปรับปรุงสมบัติการอัดติด คือ โคพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันประเภทคาร์บอกซิลิก, เอสเทอร์ หรือไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ ซึ่งสามารถเกิดแรงดึงดูดกันแบบพันธะเคมี หรือการอัดติดแบบเชิงกลทำให้อนุภาคพอลิเมอร์ในเลเทกซ์เชื่อมติดกับวัสดุได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้สนใจสังเคราะห์เลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลต ชนิดที่เป็นเอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่เติมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ โดยจะศึกษาปัจจัยของชนิดของหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวว่าจะมีผลอย่างไรต่อการอัดติด สมบัติเชิงคอลลอยด์ สมบัติเชิงความร้อน และการนำไปใช้งาน ผลที่คาดว่าจะได้รับ คือ กาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA) ชนิดใหม่ที่มีการปรับปรุงสมบัติการอัดติดและความเสถียรดีขึ้นกว่าโคพอลิเมอร์ที่ไม่มีการเติมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์

### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เตรียมอนุภาคพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตเลเทกซ์ด้วยวิธีอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน (Emulsion polymerization) แบบ semi-continuous

2. ศึกษาผลของอัตราส่วนของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกมอนอเมอร์, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์
3. ศึกษาสมบัติทางกายภาพ, คุณลักษณะความเหมาะสมในการนำไปใช้งานของสมบัติฟิล์มและสมบัติความเสถียรระหว่างการจัดเก็บเลเทกซ์

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ค้นคว้ารวบรวมเอกสารอ้างอิงที่เกี่ยวข้องและจัดเตรียมอุปกรณ์และสารเคมี
2. สังเคราะห์เลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตท-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตเลเทกซ์ด้วยกระบวนการมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไรเซชันแบบ semi-continuous มีวิธีขั้นตอนการทดลองดังนี้
  - 2.1 เตรียมอุปกรณ์โดยตั้งชุดรีฟลักซ์ที่สามารถควบคุมความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C
  - 2.2 เตรียมพรีมิกซ์มอนอเมอร์
  - 2.3 เติมน้ำละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตลงในชุดรีฟลักซ์และให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 °C
  - 2.4 ที่อุณหภูมิ 75 °C เติมพรีมิกซ์มอนอเมอร์ 6%wt ของพรีมิกซ์มอนอเมอร์ที่เตรียมได้ทั้งหมดภายในเวลา 15 นาที
  - 2.5 หลังจากนั้นอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นและรอให้ปฏิกิริยาเกิดอย่างสมบูรณ์นาน 30 นาที
  - 2.6 เติมพรีมิกซ์มอนอเมอร์และสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตที่เหลือ นำมา feed อย่างต่อเนื่องนาน 4 ชั่วโมง 30 นาที ที่อุณหภูมิ 85 °C โดยอัตราเร็วของการเติมน้ำลงในชุดรีฟลักซ์ต้องสม่ำเสมอตลอดเวลา
3. ตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเลเทกซ์รายละเอียดดังนี้
  - 3.1 ขนาดและประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ด้วยเครื่องมือ Zetasizer nano series
  - 3.2 ความหนืดโดยใช้ Brookfield viscometer
  - 3.3 หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR)
  - 3.4 สมบัติเชิงความร้อนด้วย Differential scanning calorimetry (DSC)
4. ตรวจสอบคุณลักษณะความเหมาะสมในการนำไปใช้งานของสมบัติฟิล์ม
  - 4.1 การทดสอบการนำไปใช้งานสำหรับกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA)
    - 4.1.1 Rolling ball tack test (PSTC 6)
    - 4.1.2 Loop tack test (FINAT 9)
    - 4.1.3 180° Peel adhesion (PSTC 1 หรือ FINAT 1)
    - 4.1.4 90° Peel adhesion (FINAT 2)

4.1.5 Shear test (PSTC 7)

4.2 การทดสอบความเสถียรระหว่างการจัดเก็บเลเทกซ์ (storage stability)

4.2.1 Accelerate test

4.2.2 Mechanical stability test

4.2.3 Freeze thaw

5. วิเคราะห์ข้อมูล สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์





## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์

กรรมวิธีในการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยกลไกแบบลูกโซ่ผ่านตัวกลางอนุมูลอิสระสามารถจำแนกได้ 4 วิธีดังนี้ [1]

1. การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์ (Bulk Polymerization)
2. การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย (Solution Polymerization)
3. การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย (Suspension Polymerization)
4. การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน (Emulsion Polymerization)

โดยวิธีที่ 1-2 เกิดจากปฏิกิริยาแบบเนื้อเดียว (homogenous phase) ลักษณะของสารที่ได้เป็นสารละลายเนื้อเดียว และวิธีที่ 3-4 เป็นระบบเนื้อผสม (heterogeneous phase) หมายถึงสารละลายประกอบด้วยเฟสของสารอินทรีย์และเฟสของน้ำ

##### 2.1.1 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์

วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบบัลค์เป็นวิธีที่ง่ายที่สุด เนื่องจากสารตั้งต้นประกอบด้วยมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่สามารถละลายได้ในมอนอเมอร์ แต่วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีนี้มีข้อเสีย คือ การคายความร้อนออกมาจากปฏิกิริยาอย่างรุนแรง ส่งผลให้เกิดการระเหยของสารตั้งต้นออกมาจนถึงปฏิกิริยาหรือถึงปฏิกิริยาอาจจะระเบิดออกได้ ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงต้องมีวิธีการควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นให้ได้ โดยแนวทางที่สำคัญที่ใช้ในการควบคุมความร้อนจากปฏิกิริยาแบบบัลค์ คือ การลดอัตราการเกิดปฏิกิริยา, การลดอุณหภูมิในการสังเคราะห์ หรือลดความเข้มข้นของตัวริเริ่มปฏิกิริยา

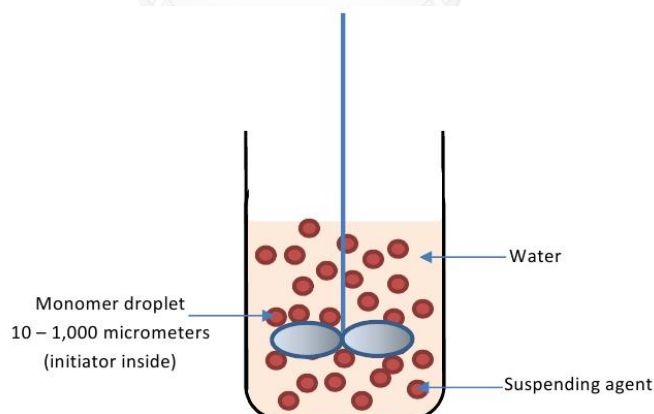
##### 2.1.2 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลาย

กระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบสารละลายแตกต่างจากกระบวนการแบบบัลค์ คือ การเติมตัวทำละลายอินทรีย์ เพื่อช่วยระบายความร้อนและลดความหนืดของสารละลายในขณะทำปฏิกิริยา การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยวิธีนี้มีข้อเสีย คือ ตัวทำละลายมีความเป็นพิษและสารไวไฟสูง

เช่น โทลูอิน, เบนซีน และไซโคลเฮกเซน ซึ่งเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน นอกจากนั้นในทางปฏิบัติ ต้องมีการเพิ่มขึ้นขั้นตอนของการแยกผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ออกจากตัวทำละลายและมอนอเมอร์ที่ยังหลงเหลืออยู่จากปฏิกิริยา ถือว่าเป็นการเพิ่มขึ้นขั้นตอนและค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นในโรงงานอุตสาหกรรม นอกจากนั้นตัวทำละลายอินทรีย์บางตัว เช่น โทลูอิน ในระหว่างพอลิเมอร์กำลังโต นอกจากทำหน้าที่เป็นตัวทำละลายแล้ว ยังทำหน้าที่โยกย้ายสายโซ่ (chain transferring agent) ซึ่งมีผลทำให้ขนาดน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์มีขนาดเล็กกว่าเดิมได้

### 2.1.3 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย

การหลีกเลี่ยงปัญหาจากการใช้ตัวทำละลายในข้อ 2.1.2 ได้มีการพัฒนาวิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์โดยใช้น้ำเป็นตัวกลาง (medium) ในการทำปฏิกิริยาโดยทั่วไปใช้น้ำประมาณ 2 ถึง 4 เท่าของมอนอเมอร์โดยปริมาตร การทำปฏิกิริยาต้องกวนสารละลาย หรือของผสมระหว่างมอนอเมอร์กับน้ำ เพื่อให้เกิดการแตกตัวของหยดมอนอเมอร์ ช่วยให้มอนอเมอร์มีพื้นที่ผิวมากขึ้นและมีการระบายความร้อนที่ดีขึ้น โดยทั่วไปแล้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดมอนอเมอร์ที่เกิดขึ้นจะอยู่ในช่วงประมาณ 10 – 1,000 ไมครอน ( $\mu\text{m}$ ) ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบในการกวน



รูปภาพที่ 2.1 แผนภาพจำลองระบบของการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบแขวนลอย

จาก รูปภาพที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบนี้สามารถละลายได้ในเฟสของมอนอเมอร์ (เช่น สารประกอบเปอร์ออกไซด์ และ AIBN เป็นต้น) นอกจากนั้นการทำปฏิกิริยาการเติมสาร

ช่วยในการแขวนลอย (suspending agent) เช่น พอลิเมอร์ร่วมของพอลิไวนิลอะซิเตตและพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ลงไปด้วยเพื่อช่วยป้องกันการรวมตัวเป็นก้อน (agglomeration) ของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น (โดยพอลิเมอร์ร่วมดังกล่าวจะหันด้านที่มีขั้ว (หมู่ไฮดรอกซิล -OH) เข้าหาน้ำและหันเอาด้านที่มีขั้วน้อยกว่าคือหมู่อะซิเตตเข้าหาอนุภาคพอลิเมอร์) ดังนั้นเมื่อยุติปฏิกิริยาแล้วพอลิเมอร์ที่ได้จะอยู่ในรูปของเม็ดเล็กๆ (granular bead) สามารถแยกออกจากสารละลายที่อยู่ในภาชนะได้โดยการกรอง

#### 2.1.4 การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน

การสังเคราะห์พอลิเมอร์ด้วยกระบวนการแบบอิมัลชัน มีลักษณะคล้ายกระบวนการแบบแขวนลอย คือ ใช้น้ำเป็นตัวกลาง ปฏิกิริยาแบบอิมัลชันมีลักษณะที่แตกต่างจากแบบปฏิกิริยาแบบแขวนลอย 5 ประเด็นหลัก คือ

1. ประเภทของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้
2. ขนาดของหยดมอนอเมอร์ตอนเริ่มต้น
3. ตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยา
4. ลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ได้
5. จลนศาสตร์ (kinetic) ของปฏิกิริยา

ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในการสังเคราะห์แบบอิมัลชันเป็นสารที่ละลายในเฟสของน้ำ เช่น potassium persulfate หรือของผสมระหว่าง cumene hydroperoxide กับ  $\text{FeSO}_4$  เป็นต้น ในขณะที่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในระบบแขวนลอยสามารถละลายได้ในมอนอเมอร์หรือสารอินทรีย์ ดังนั้นปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันจึงมีโอกาสสูงที่จะไม่ได้เกิดในเฟสของหยดมอนอเมอร์ นอกจากนี้ในการทำปฏิกิริยาแบบอิมัลชันการเติมสารลดแรงตึงผิว (surfactant หรือ emulsifier หรือ soap) ลงไปด้วย เช่น potassium laurate เพื่อช่วยลดแรงตึงผิวของหยดมอนอเมอร์ และช่วยทำให้ขนาดของอนุภาคของหยดมอนอเมอร์ที่เกิดขึ้นในระบบอิมัลชันมีขนาดเล็กกว่าของระบบแขวนลอย โดยในกรณีแรกมีขนาดของหยดมอนอเมอร์ประมาณ 1 – 10  $\mu\text{m}$  (ขึ้นอยู่กับอัตราการกวนด้วย) ถ้ามีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับขนาดของหยดมอนอเมอร์ประมาณ 10 – 1,000  $\mu\text{m}$  ที่เกิดขึ้นในกรณีของกระบวนการแบบแขวนลอย ยิ่งไปกว่านั้นการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปในปริมาณที่มากพอจนกระทั่งเลยจุดความเข้มข้นวิกฤตที่จะเริ่มเกิดไมเซลล์ (critical micelle concentration, CMC)

ทำให้มีการรวมตัวของโมเลกุลสารลดแรงตึงผิวเกิดไมเซลล์ เป็นตำแหน่งที่มีความสำคัญสำหรับการเกิดปฏิกิริยา

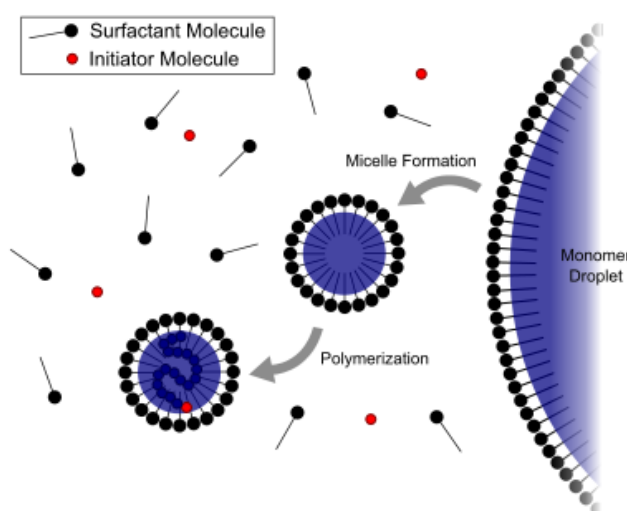
**ตารางที่ 2.1** แสดงตัวอย่างสูตรที่ใช้ในการสังเคราะห์ Styrene-butadiene copolymer (SBR) โดยวิธีอิมัลชัน

สารเคมี	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2
Water	190	180
Butadiene	70	75
Styrene	30	25
Soap	5	5
Potassium persulfate	0.3	-
Cumene hydroperoxide	-	0.17
FeSO <sub>4</sub>	-	0.017
n-Dodecyl mercaptan	0.5	0.5
Sodium pyrophosphate	-	1.5

จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นได้ว่าการเติมน้ำลงไปประมาณเกือบ 2 เท่าของปริมาตรมอนอเมอร์ทั้งหมด และใช้สารลดแรงตึงผิวประมาณร้อยละ 5 โดยมวลเทียบกับมอนอเมอร์ และใช้สัดส่วนโดยน้ำหนักระหว่างตัวริเริ่มปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ประมาณ 3/1,000 หรือ 1.7/1,000 ในทางปฏิบัติอาจมีการปรับตัวเลขของปริมาณสารลดแรงตึงผิวและตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้มากขึ้นหรือน้อยลงได้เพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลและปริมาณผลิตภัณฑ์ สำหรับสาร sodium pyrophosphate นั้นจะเติมลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ (buffer) ช่วยควบคุมค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) ระหว่างการทำปฏิกิริยาให้คงที่เป็นการช่วยรักษาความเสถียรของอนุภาคพอลิเมอร์ที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ อีกทั้งยังช่วยลดโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวโดยน้ำ (hydrolysis) ของมอนอเมอร์บางตัว เช่น ไวนิลอะซิเตต (vinyl acetate) นอกจากนั้นในการทำปฏิกิริยาแบบอิมัลชันยังอาจจะมีการเติมสารประกอบเมอร์แคปตัน (mercaptan) ลงไปเพื่อทำหน้าที่เป็นตัวโยกย้ายสายโซ่ (chain transfer agent) เพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไม่ให้สูงเกินไปเมื่อพิจารณาจากไกในการเกิดปฏิกิริยาแล้วจะพบว่ากระบวนการแบบอิมัลชันมีลักษณะที่แตกต่างจากกระบวนการอื่นๆ เช่น แบบบัลค์ แบบสารละลายและแบบแขวนลอย เป็นอย่างมาก โดยเมื่อพิจารณาใน **Error! Reference**

source not found. จะเห็นว่ากระบวนการแบบอิมัลชันประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่สำคัญ 3 ส่วน คือ

1. หยดมอนอเมอร์ที่มีโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิว (surfactant / emulsifier) ห้อมล้อมอยู่
2. เฟสของน้ำซึ่งเป็นตัวกลาง (medium) ในการทำปฏิกิริยา
3. ไมเซลล์มีความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่เติมมากเกินไปเกินค่าความเข้มข้นวิกฤต (CMC)



รูปภาพที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน [2]

โดยอุดมคติ (Ideal case) แล้วปฏิกิริยาอาจจะเกิดขึ้นที่ส่วนใดส่วนหนึ่งใน 3 องค์ประกอบที่กล่าวถึงข้างต้น แต่เมื่อพิจารณาในความเป็นจริงจะเป็นพบว่าโอกาสในการเกิดปฏิกิริยาในหยดมอนอเมอร์จะน้อยหรือมาก เนื่องจากหยดมอนอเมอร์จะมีขนาดใหญ่มาก เมื่อเทียบกับขนาดของไมเซลล์ (1 – 10  $\mu\text{m}$  และ 2 – 10 nm ตามลำดับ) ดังนั้นพื้นที่ผิวของไมเซลล์มากกว่าของหยดมอนอเมอร์หลายเท่า ถ้าเมื่อพิจารณาในด้านของจำนวนหยดมอนอเมอร์ และจำนวนหยดไมเซลล์ พบว่ามีความแตกต่างกันมาก สารละลาย 1 มิลลิลิตร มีไมเซลล์ประมาณ  $1,0^{17}$  –  $1,0^{18}$  หน่วย และมีหยดมอนอเมอร์ประมาณ  $1,0^{10}$  –  $1,0^{11}$  หยด ดังนั้นความน่าจะเป็นที่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะแพร่เข้าไปในหยดมอนอเมอร์น้อยกว่าความน่าจะเป็นหรือโอกาสที่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะแพร่เข้าไปในไมเซลล์ ส่วนการเกิดปฏิกิริยาในเฟสของน้ำนั้นสามารถเกิดขึ้นได้เช่นกัน แต่ถือว่ามีส่วนน้อยมากเนื่องจากจะมีความเข้มข้นของมอนอเมอร์ที่ละลายอยู่ในเฟสของน้ำน้อยมาก สำหรับสายโซ่พอลิเมอร์ที่กำลังเกิดปฏิกิริยา (propagating chain) เกิดขึ้นในเฟสของน้ำจะตกตะกอนทันทีที่มีขนาดโมเลกุลยาวขึ้นเพียงเล็กน้อย

(ในระดับ oligomer) ดังนั้นตำแหน่งที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์ในระบบอิมัลชัน จึงเหลือเพียงไนโมเซลล์ ซึ่งเปรียบเทียบกับว่าไนโมเซลล์เป็นจุดนัดพบระหว่างมอนอเมอร์กับตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่จะแพร่มาเจอกันและทำปฏิกิริยากัน ส่วนขั้นตอนในการเกิดปฏิกิริยาแบบอิมัลชันนั้นยังสามารถแบ่งย่อยได้ 3 ขั้นตอน (Stages) ดังนี้

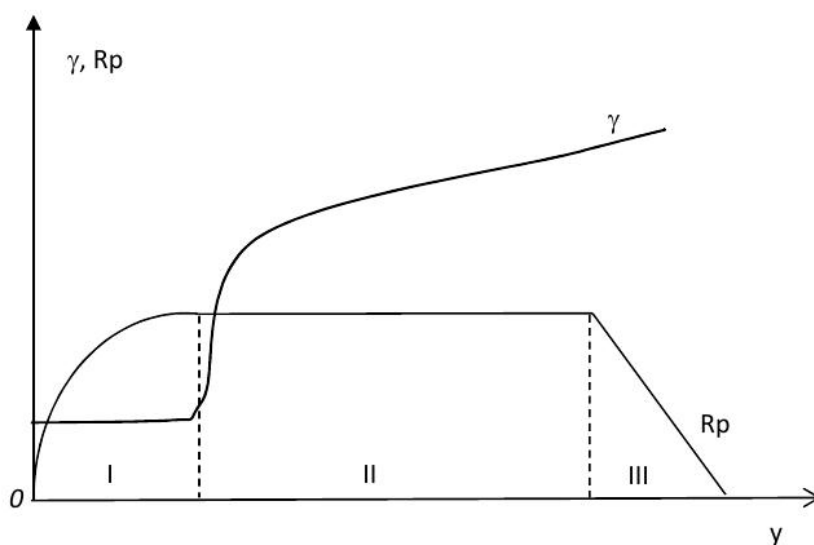
### **Stage 1**

ในขั้นตอนที่ 1 (Stage 1) เป็นขั้นที่ตัวริเริ่มปฏิกิริยาทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ในไนโมเซลล์ ทำให้เกิดสายโซ่พอลิเมอร์และการแพร่ของตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวใหม่จากเฟสของน้ำ และการแพร่ของมอนอเมอร์จากหยดมอนอเมอร์และ/หรือจากไนโมเซลล์อื่นๆ ที่ยังไม่ได้เกิดปฏิกิริยา เข้าไปยังไนโมเซลล์ที่มีโมเลกุลพอลิเมอร์ ที่กำลังโตทำให้ขนาดของไนโมเซลล์ดังกล่าวโตขึ้นเรื่อยๆ ตามจำนวนและความยาวของสายโซ่พอลิเมอร์ที่เกิดขึ้น จนกระทั่งกลายเป็นอนุภาคพอลิเมอร์ เรียกว่าเลเทกซ์ ในขณะที่เดียวกันโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวจะถูกดูดซับเข้าไปยังบริเวณรอบๆ อนุภาคพอลิเมอร์ เพื่อรักษาความเสถียรของอนุภาคพอลิเมอร์ไว้ ดังนั้นปฏิกิริยาในขั้นตอนนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่าขั้นตอนการเริ่มเกิดอนุภาคพอลิเมอร์ (particle nucleation) ซึ่งจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามเวลาหรือค่าการแปรผันของมอนอเมอร์ (monomer conversion) ดังแสดงในรูปภาพที่ 2.3 จนกระทั่งเมื่อโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวที่แพร่จากหยดมอนอเมอร์ หรือจากไนโมเซลล์ที่ไม่ได้เกิดปฏิกิริยาไปยังอนุภาคพอลิเมอร์หมดไป จะมีผลทำให้หยดมอนอเมอร์ไม่เสถียร และค่าแรงตึงผิวของสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เป็นการบอกให้ทราบถึงการสิ้นสุดของปฏิกิริยาอิมัลชันในขั้นตอนที่ 1 ช่วงดังกล่าวจะตรงกับค่าการแปรผันของมอนอเมอร์ประมาณร้อยละ 2-15 ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพผิวและความสามารถในการละลายในน้ำของมอนอเมอร์

### **Stage 2**

ปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2 (Stage 2) จะไม่มีอนุภาคพอลิเมอร์ใหม่เกิดขึ้นเนื่องจาก emulsifier ถูกใช้หมดไปแล้ว แต่ปฏิกิริยาในอนุภาคพอลิเมอร์เดิมยังคงเกิดต่อไปอย่างต่อเนื่องตามเวลา หรือค่าการแปรผันของมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้นด้วยอัตราที่คงที่ (เนื่องจากอัตราการเกิดปฏิกิริยาจะขึ้นอยู่กับจำนวนไนโมเซลล์) โดยในขั้นตอนนี้จะมีการแพร่ของมอนอเมอร์จากหยดมอนอเมอร์ไปยังอนุภาคพอลิเมอร์ที่กำลังมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นข้างใน (เพื่อแทนที่มอนอเมอร์ที่ถูกใช้ไปในการเกิดปฏิกิริยา) ดังนั้นขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์จึงโตขึ้นเรื่อยๆ ในขณะที่ขนาดของหยดมอนอเมอร์จะเล็กลง ปฏิกิริยาจะดำเนิน

ต่อไปจนกระทั่งมอนอเมอร์จากหดยมอนอเมอร์ถูกใช้หมดไป ซึ่งถือเป็นการสิ้นสุดปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 2



**รูปภาพที่ 2.3** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเกิดปฏิกิริยาและแรงตึงผิวกับการแปรผันของมอนอเมอร์ในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชัน [3]

โดยช่วงรอยต่อของการเปลี่ยนแปลงจาก stage 2 ไปสู่ stage 3 นี้จะเกิดขึ้นที่ช่วงเวลาหรือค่าการแปรผันของมอนอเมอร์ที่แตกต่างกัน, สภาพขั้ว (polar) และความสามารถในการละลายน้ำของมอนอเมอร์ตัวอย่างเช่น ไวนิลคลอไรด์เกิดการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวที่ค่าการแปรผันในช่วงประมาณ 80% ในขณะที่สไตรีน และบิวตะไดอีน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงที่ค่าการแปรผันในช่วงประมาณ 50% ส่วนเมธิลเมธาคริเลตและไวนิลอะซิเตต จะเกิดที่ประมาณ 25 และ 15% ตามลำดับ

### Stage 3

ในขั้นตอนสุดท้าย ปฏิกิริยายังคงดำเนินต่อไปในอนุภาคพอลิเมอร์ โดยไม่มีการแพร่ของมอนอเมอร์จากข้างนอกมาแทนที่มอนอเมอร์ที่ถูกใช้ไปในปฏิกิริยา ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลงตามเวลาหรือการแปรผันของมอนอเมอร์ที่เพิ่มขึ้น ปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปจนกระทั่งมอนอเมอร์ถูกใช้หมดไป (100% conversion) เป็นที่น่าสังเกตว่าปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันมีแนวโน้มที่จะได้ผลิตภัณฑ์หรือพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เนื่องจากโอกาสที่สายโซ่พอลิเมอร์กำลังโตจะมาเจอ

กันเองในอนุภาคเดียวกันและเกิดปฏิกิริยาขั้นยุดิแบบ bimolecular termination นั้นมีน้อยมาก ซึ่งอาจจะเนื่องมาจากลักษณะของกลไกปฏิกิริยาที่มอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะไม่ได้เจอกันทีเดียวทั้งหมด แต่ต่างฝ่ายต่างแพร่มาเจอกันยัง จุดนัดพบ หรือไมเซลล์ (กล่าวคือมอนอเมอร์มาจากหยดและตัวริเริ่มปฏิกิริยามาจากเฟสของตัวกลางน้ำ) ดังนั้นเมื่ออนุภาคนิวเคลียสของตัวริเริ่มปฏิกิริยาโมเลกุลแรกแพร่เข้ามาเจอมอนอเมอร์ในไมเซลล์ เกิดปฏิกิริยาขั้นเริ่มต้นและขั้นแผ่ขยายได้สายโซ่พอลิเมอร์ที่กำลังโต จากนั้นเมื่ออนุภาคนิวเคลียสของตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 2 แพร่เข้ามายังไมเซลล์เกิดปฏิกิริยาขั้นยุดิกับสายโซ่พอลิเมอร์ดังกล่าวในแบบ primary radical termination ทำให้ได้โมเลกุลพอลิเมอร์ที่สูญเสียความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (หรืออาจจะเรียกว่าพอลิเมอร์ที่ตายแล้ว) จนกระทั่งอนุภาคนิวเคลียสของตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 3 แพร่เข้ามายังอนุภาคพอลิเมอร์ดังกล่าวและมาเจอกับมอนอเมอร์ที่อยู่ในอนุภาคจะเริ่มเกิดปฏิกิริยาได้สายโซ่พอลิเมอร์โมเลกุลที่ 2 ซึ่งจะโตขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งอนุภาคนิวเคลียสของตัวริเริ่มปฏิกิริยาตัวที่ 4 แพร่เข้ามาเกิดปฏิกิริยาขั้นยุดิทำให้ได้โมเลกุลพอลิเมอร์ตัวที่ 2 และปฏิกิริยาจะดำเนินต่อไปเรื่อยๆ ในลักษณะดังกล่าวจนกระทั่งมอนอเมอร์ถูกใช้หมดไป ดังนั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันนิยมเติมสารโยกย้ายสารโซ่ (chain transfer agent) ลงไปเพื่อควบคุมน้ำหนักโมเลกุลของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ไม่ให้สูงเกินไปจนทำให้มีความหนืดสูงและผ่านกระบวนการขึ้นรูปได้ยาก

### 2.1.5 การประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์จากปฏิกิริยาแบบอิมัลชัน

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันนี้มีลักษณะเป็นของเหลวเรียกว่าเลเทกซ์ (latex) โดยมีอนุภาคพอลิเมอร์ขนาดประมาณ 50 ถึง 100 ไมโครเมตร แขนงลอยอยู่ในน้ำ (สังเกตว่าขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์จะอยู่ในช่วงระหว่างขนาดของไมเซลล์กับขนาดของหยดมอนอเมอร์) เลเทกซ์ที่ได้อาจจะนำไปใช้งานโดยมีการเติมสารเติมแต่งเล็กน้อย เช่น สีน้ำอะคริลิกที่เป็นอิมัลชันจะมีการเติมผงสีหรือ pigment และสารต้านทานการเสื่อมสภาพลงไป นอกจากนั้นเลเทกซ์ที่ได้อาจจะถูกทำให้ตกตะกอนหรือจับตัวเป็นก้อนออกมาเป็นพอลิเมอร์ในสภาพของแข็ง เช่น โดยการตกตะกอนในเมธานอล หรือโดยการเติมกรดลงไปเพื่อเร่งให้อนุภาคพอลิเมอร์จับตัวกันเป็นก้อน ก่อนจะนำไปทำให้แห้งและใช้งานต่อไป ตัวอย่างของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จากกรรมวิธีแบบอิมัลชัน สามารถนำไปใช้งานในสถานะของแข็ง ได้แก่ ยางเอสปีอาร์ (SBR)



## 2.2 คอลลอยด์

คอลลอยด์ (colloid)[4] เป็นสารผสมที่เกิดจากการรวมตัวกันทางกายภาพของสารตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป มีลักษณะมัวหรือขุ่น ไม่ตกตะกอนขนาดของอนุภาคมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ  $10^{-7}$  ถึง  $10^{-4}$  เซนติเมตร สามารถลอดผ่านกระดาษกรองได้ แต่ไม่สามารถลอดผ่านกระดาษเซลโลเฟนได้ เมื่อผ่านลำแสงเล็กๆ เข้าไปในคอลลอยด์เกิดการกระเจิงของแสงทำให้มองเห็นลำแสงได้อย่างชัดเจน เรียกว่าปรากฏการณ์ทินดอลล์ (Tyndall effect) ค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวไอร์แลนด์ ชื่อ จอห์น ทินดอลล์ เมื่อปี พ.ศ. 2412 คอลลอยด์สามารถแบ่งได้ 3 ชนิดตามลักษณะการเกิด คือ

1. Simple colloid เห็นได้ด้วยตาเปล่าแยกออกเป็น 2 phase เช่น O/W หรือ W/O
2. Multiple colloid มองเห็นมากกว่า 2 phase (3 steps) เช่น O/W/O
3. Network colloid ลักษณะเป็นรูปร่างตาข่าย เช่น polymer matrix

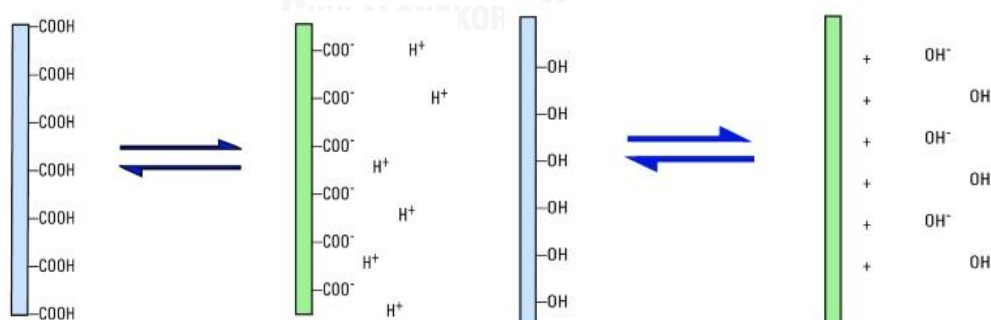
### หมายเหตุ

Oil : O (solute)

Water : W (solvent)

อนุภาคของคอลลอยด์จะสามารถคงความเสถียรได้นั้นขึ้นอยู่กับ surface charge ในส่วนของของเหลว มีลักษณะการเกิด 3 แบบดังนี้

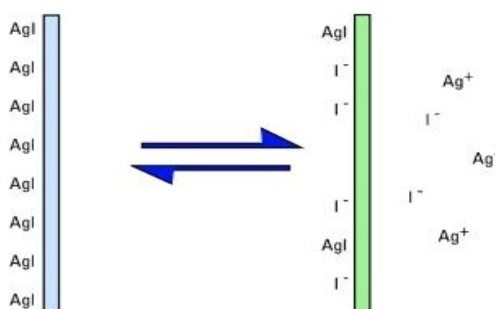
1. Ionization of surface group การแตกตัวของโปรตรอน (proton) บนผิวของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลหรือไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ทำให้เกิดประจุบนผิวแสดงดังรูปภาพที่ 2.4



รูปภาพที่ 2.4 แสดงลักษณะการเกิดประจุบนผิวของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน

2. Adsorption (binding) เป็นการยึดติดเกาะของไอออนจากสารละลาย ซึ่งสามารถทำให้เกิดประจุที่ผิวที่มีประจุตรงกันข้ามกันได้ เช่น การยึดเกาะบนผิวของ Ca<sup>2+</sup> ไปยัง COO<sup>-</sup> มีการเปลี่ยนประจุจากลบเป็นประจุบวก (Ca<sup>2+</sup> + COO<sup>-</sup> ---> (COO)<sub>2</sub>Ca ---> COONa หรือ COOH)

3. Ion dissolution ความเข้มข้นและความสามารถในการละลาย เช่น AgI ซึ่งมี  $K_{sp} = 10^{-16}$  ในทางทฤษฎีความสามารถในการละลายของ  $Ag^+$  และ  $I^- = 10^{-8}$  แต่ในทางปฏิบัติพบว่า  $[Ag^+] = 10^{-5.5}$   $[I^-] = 10^{-10.5}$  หมายความว่า  $Ag^+$  มีความสามารถในการละลายดีกว่า  $I^-$  เนื่องจากขนาดมีเล็กกว่าจึงไปละลายอยู่ในน้ำได้ดีกว่า ดังนั้น  $I^-$  จะยึดเกาะที่ผิว solid partical มากกว่า  $Ag^+$  ทำให้ partical กลายเป็น “Negative charge particle”



รูปภาพที่ 2.5 แสดงลักษณะการเกิดประจุบนผิวแบบ Ion dissolution ของ AgI

### 2.2.1 ความเสถียรของคอลลอยด์

ระบบคอลลอยด์ (colloidal system) หมายถึง ระบบที่มีอนุภาคขนาดเล็กของวัสดุชนิดหนึ่ง เรียกว่า disperse หรือ discontinuous phase กระจายและแขวงลอยอย่างเสถียรในตัวกลาง เรียกว่า dispersion ความเสถียร (stability) ของอนุภาคคอลลอยด์ คือ ความสามารถที่อนุภาคจะอยู่ได้ในน้ำโดนไม่เสียสภาพเป็นเวลานาน เมื่อมีการรบกวนทางฟิสิกส์หรือเคมี ความเสถียรของอนุภาคมีความสำคัญในกระบวนการผลิตและการประยุกต์คอลลอยด์ ซึ่งแต่ละระบบต้องมีความเสถียรแตกต่างกันไป ในการพิจารณาความเสถียรของระบบคอลลอยด์ การคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของอนุภาคคอลลอยด์ ความเสถียรขึ้นกับลักษณะที่ผิวของอนุภาค ซึ่งย่อมขึ้นอยู่กับวิธีการเตรียมคอลลอยด์ โดยทั่วไปหมู่ฟังก์ชันที่ปรากฏบนผิวของอนุภาคมาจากตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้สารลดแรงดึงผิวที่ดูดซับหรือกราฟท์ (graft) ที่ผิวของหมู่ฟังก์ชันจากสารโพลิเมอร์ นอกจากนี้ความเสถียรยังขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของคอลลอยด์ ความเข้มข้นหรือปริมาณส่วนที่เป็นของคอลลอยด์ และส่วนประกอบที่ใช้เมื่อพิจารณาอนุภาคที่เป็นทรงกลมสามารถแบ่งโครงสร้างที่ผิวออกเป็น 3 ประเภท คือ

1. อนุภาคที่มีผิวเรียบและมีประจุ (smooth charged surface) เช่น อนุภาคที่มีสารลดแรงดึงผิวประเภทที่มีประจุลบอยู่ที่ผิว

2. อนุภาคที่มีผิวคล้ายเส้นขนและไม่ประจุ (hairy uncharged surface) เช่น อนุภาคที่มีสารลดแรงตึงผิวประเภทที่ไม่มีประจุหรือสายโซ่พอลิเมอร์อยู่ผิว
3. อนุภาคที่มีผิวคล้ายเส้นขนและมีประจุ (hairy charged surface) เช่น กรณีที่มีพอลิอิเล็กโทรไลต์ (polyelectrolyte) บนผิวอนุภาค

## 2.2.2 ประเภทความเสถียรของอนุภาค

ความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ความเสถียรแบบอิลเล็กโทรสถิติก (electrostatic stabilization) และความเสถียรแบบสเตอริก (steric stabilization)

**1. ความเสถียรแบบอิลเล็กโทรสถิติก (electrostatic stabilization)** ความเสถียรประเภทนี้เกิดเมื่อมีประจุที่ผิวอนุภาคในน้ำ เนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออน (ionization) การดูดซับไอออน (ion absorption) หรือละลายของไอออน (ion dissolution) เมื่อทำการไตเตรทแบบ potentiometric หรือ conductimetric จะได้ค่าความหนาแน่นของประจุที่ผิวอนุภาค (surface charge density ;  $\sigma_0$ )

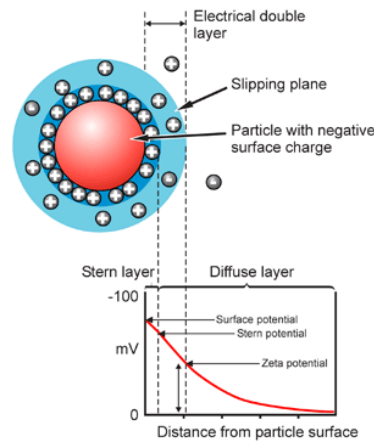
$$\sigma_0 = N_s e v \quad (2.1)$$

เมื่อ  $N_s$  : จำนวนประจุต่อ 1 หน่วยพื้นที่

$e$  : วาเลนซี (valency)

$v$  : Fundamental charge ของอิเล็กตรอน

นอกจาก  $\sigma_0$  แล้วยังสามารถบอกประจุที่ผิวได้ในเทอมของศักย์ที่ผิว (surface potential ;  $\Psi_0$ ) ประจุที่ผิวอนุภาคมีผลต่อการกระจายตัวของไอออนบริเวณที่อนุภาคเชื่อมติดกับตัวกลางด้วย โดยไอออนที่อยู่ใกล้ผิวอนุภาคดึงดูดกับไอออนที่มีประจุตรงกันข้ามกับประจุที่ผิว เรียกว่าเคาเตอร์ไอออน (counter-ion) และผลักไอออนที่มีประจุเหมือนกับประจุที่อยู่บนผิวเรียกว่าโคไอออน (co-ion) การกระจายของไอออนที่อยู่ใกล้ผิวของอนุภาคจึงมีลักษณะที่เรียกว่าอิลเล็กทริกคอลลด์บิลเลเยอร์ (electrical double layer) กล่าวคือ แบ่งได้เป็น 2 ชั้น ดังรูปภาพที่ 2.6

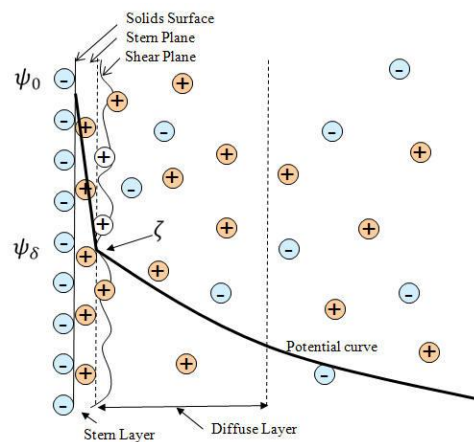


รูปภาพที่ 2.6 โครงสร้างอิเล็กทริกคอลลด์เบลเยอร์

**ขั้นที่ 1** Stern layer หรือชั้นใน (inner layer) ประกอบด้วยไอออนที่ผิวอนุภาคและเคาเตอร์ไอออน (counter-ion) รวมทั้งไอออน (counter-ion) อื่นๆ ที่อยู่ห่างจากผิวอนุภาคประมาณเท่ากับรัศมีของไอออนที่มีน้ำล้อมรอบ (hydrated radius;  $\delta$ ) มีระยะห่างประมาณ 0.5 nm จากผิวอนุภาค

**ขั้นที่ 2** Gouy layer หรือชั้นนอก (outer layer) หรือดิฟฟิวส์เลเยอร์ (diffuse layer) ประกอบด้วยไอออนชนิดที่มีประจุตรงกันข้ามกับไอออนที่ Stern plane กระจายอยู่ในตัวกลางที่มีขั้วสมการ Poisson-Boltzmann ซึ่งระยะความกว้างของชั้นนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอิเล็กโทรไลต์ อิเล็กทริกคอลลด์เบลเยอร์มีความสำคัญ เนื่องจากแรงกระทำระหว่างอนุภาคที่มีประจุเป็นไปไม่ได้เมื่อมีการซ้อนทับของดิฟฟิวส์เลเยอร์ ดังนั้น ค่าของศักย์ที่ดิฟฟิวส์เลเยอร์จะเป็นค่าที่ควบคุมความเสถียรของคอลลอยด์ในหลายระบบ เช่น เมื่อทำให้อนุภาคของแข็งที่อยู่ในน้ำเคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าดังรูปภาพที่

2.7



รูปภาพที่ 2.7 ศักย์ของอนุภาคที่มีโครงสร้างแบบอิเล็กทริกคอลลด์เบลเยอร์

เมื่อประจุที่อนุภาคและไอออนที่อยู่ใน Stern layer จะเคลื่อนไปด้วยโดยมีจลนศาสตร์เหมือนกัน การเคลื่อนที่ดังกล่าวทำให้เกิดระนาบของการแยกเรียกว่า shear plane ความแตกต่างระหว่างศักย์ ของสารละลายและศักย์ของ shear plane เรียกว่า electrokinetic potential หรือ zeta potential ( $\zeta$ ) ซึ่งสามารถวัดได้และจะใช้แทนค่า stern potential ( $\Psi_s$ ,  $\Psi_d$  หรือ  $\Psi_s$ ) ที่ไม่สามารถวัดได้โดยตรงจากการทดลอง

### 2.2.3 ศักย์ไฟฟ้าซีต้า (Zeta Potential ; $\zeta$ )

ศักย์ไฟฟ้าซีต้า คือ ศักย์ไฟฟ้าในอิเล็กโทรลิตคอลด์เบิลเลเยอร์ที่ระนาบเฉือนปรากฏการณ์จลนศาสตร์ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษาระบบของสารแขวงลอยมากที่สุด คือ อิเล็กโทรริซิส (electrophoresis) ซึ่งอิเล็กโทรริซิสจากการป้องกันศักย์ไฟฟ้าให้กับอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ในกรณีของอนุภาคที่กระจายตัวอยู่ในน้ำโดยมีประจุที่ผิวเป็นลบ เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าเข้าไปจะทำให้ประจุในอิเล็กโทรลิตคอลด์เบิลเลเยอร์เคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทดที่มีประจุเป็นบวก ส่วนเคาเตอร์ไอออนจะเคลื่อนที่สู่ขั้วแอโนดที่เป็นประจุลบ การวัดจลนศาสตร์ไฟฟ้า ณ ตำแหน่งระหว่างพื้นที่ผิวของอนุภาค และอิเล็กโทรลิตคอลด์เบิลเลเยอร์ชั้นนอก เรียกว่า ระนาบเฉือน ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าซีต้าของอนุภาค คือ ศักย์ไฟฟ้าที่ระนาบเฉือนนั่นเอง การหาค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า วัดจากความเร็วของอนุภาค ( $v$ ) ในสนามไฟฟ้า  $E$  จะแสดงในสมการของ Smoluchowski แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของอนุภาคสนามไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.2

$$v = \frac{E \epsilon_r \epsilon_0 \zeta}{\eta_l} \quad (2.2)$$

และการเคลื่อนที่ของอิเล็กโทรริติก  $\mu_c$  ดังแสดงในสมการที่ 2.3

$$\mu_c = \frac{E \epsilon_r \epsilon_0 \zeta}{\eta_l} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $\epsilon_r$  คือ ค่าคงที่ของไฟฟ้าสารตัวกลาง (dielectric constant of the medium)

$\epsilon_0$  คือ ค่าคงที่ของไฟฟ้าของช่องว่าง (dielectric constant of the free space)

$\zeta$  คือ ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้า (zeta potential)

$\eta_l$  คือ ค่าความหนืดของของเหลว (liquid viscosity)

นอกจากนี้ยังมีสมการของ Henry ที่ใช้หาค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าด้วยการวัดจากความเร็วของอนุภาคในสนามไฟฟ้า ดังแสดงในสมการที่ 2.4

$$U_E = \eta = \tau / \gamma \quad (2.4)$$

เมื่อ  $f(ka)$  คือ Henry function

ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้าที่วัดได้ของอนุภาคจะบอกถึงความเสถียรหรือความไม่เสถียรของอนุภาคเมื่อกระจายตัวในน้ำ ถ้าศักย์ไฟฟ้าซีต้ามีค่าเป็นบวกหรือลบ แสดงว่าอนุภาคเกิดการกระจายตัวได้ดี แต่ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต้ามีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าอนุภาคที่กระจายตัวในน้ำมีความไม่เสถียร เกิดการรวมกันของอนุภาค กับจุดที่มีประจุเป็นศูนย์ (point of zero charge) หรือจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) นอกจากนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าซีต่ายังสามารถบอกให้ทราบถึงชนิดของประจุที่ผิวของอนุภาคได้

**2. ความเสถียรแบบสเตอริก (steric stabilization)** ความเสถียรแบบสเตอริกเกิดขึ้นในกรณีที่มีสารลดแรงดึงผิวชนิดไม่มีประจุหรือสายโซ่พอลิเมอร์อยู่บนผิวของอนุภาคอย่างมีนัยสำคัญและเกาะกันอย่างเพียงพอ ทำให้มีการผลักกันแบบสเตอริก (steric repulsion) ระหว่างอนุภาคเป็นผลทำให้ระบบมีความเสถียร ซึ่งกลไกของความเสถียรภาพแบบสเตอริก อธิบายได้ด้วย 2 กลไก คือ

1. ทฤษฎีออสโมติก (Osmotic theory) ถ้าชั้นนอกของ 2 อนุภาค สามารถสอดประสาน (Interpenetrate) กันได้เมื่ออนุภาคเข้าใกล้กัน ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ที่มีน้ำแทรกอยู่ซึ่งบริเวณที่มีการสอดประสานหรือทับซ้อนจะเพิ่มขึ้น แรงดันออสโมติกของน้ำในบริเวณนี้ต่างจากในตัวกลาง น้ำจากบริเวณอื่นจึงแพร่เข้ามาในบริเวณนี้เพื่อทำให้แรงดันออสโมติกเท่ากัน

2. ทฤษฎีเอนโทรปีหรืออีลาสติก (Entropic or elastic theory) กรณีนี้ชั้นนอกสุดของอนุภาคสามารถเกิดการสอดประสานได้เมื่อเข้าใกล้กัน แต่จะเกิดการบีบอัดของสายโซ่พอลิเมอร์บริเวณผิวระหว่าง 2 อนุภาค ที่เข้ามาใกล้กัน ทำให้ลดองศาความเป็นอิสระ (degree of liberty) และลดจำนวนคอนฟอร์เมชัน (conformation) ของสายโซ่พอลิเมอร์ ซึ่งเป็นการลดเอนโทรปีของระบบ ดังนั้น ระบบจึงปรับตัวให้มีจำนวนองศาความเป็นอิสระมากขึ้นเพื่อเพิ่มเอนโทรปีทำให้ระบบมีความเสถียรทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยอนุภาคจะผลักออกจากกันแบบอีลาสติก (elastic effect)

## 2.3 การกระจายตัวของอนุภาค

อนุภาคคอลลอยด์ที่กระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอย สามารถเกิดการกระจายตัวของอนุภาคแบบอิล็กโทรสถิติก (electrostatic) และแบบสเตอริก (steric) ซึ่งการกระจายตัวของอนุภาคสามารถจำแนกได้หลายวิธี เช่น

### 2.3.1 การปรับค่า pH ของสารแขวนลอย

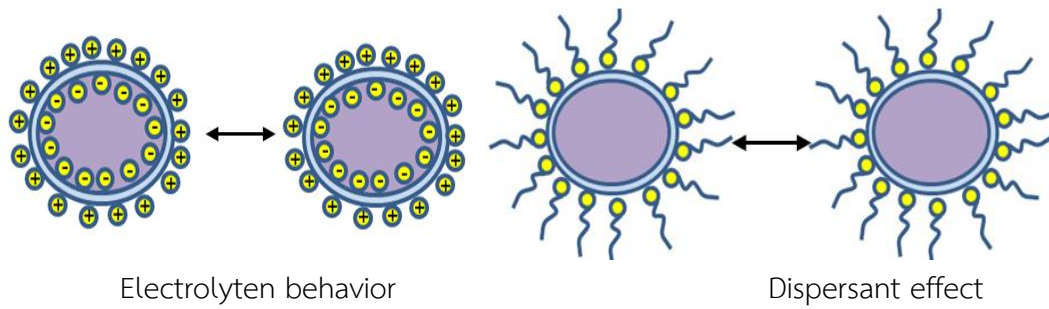
การปรับสภาพของประจุที่ผิวอนุภาคให้มีความแรงของประจุเพิ่มขึ้นจนมีค่าเป็นบวกหรือลบ ทำให้อนุภาคเกิดการผลักกันด้วยความแรงของประจุที่เหมือนกัน ในสภาวะความเป็นกรด ไฮโดรเจนไอออนจะดูดซับบนผิวอนุภาค ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงประจุของอนุภาคประจุบวก ทำให้ที่ผิวอนุภาคมีความแรงของประจุบวกเพิ่มมากขึ้น จึงเกิดการแรงผลักทำให้อนุภาคกระจายตัวดีขึ้น

### 2.3.2 การเติมสารกระจายตัว

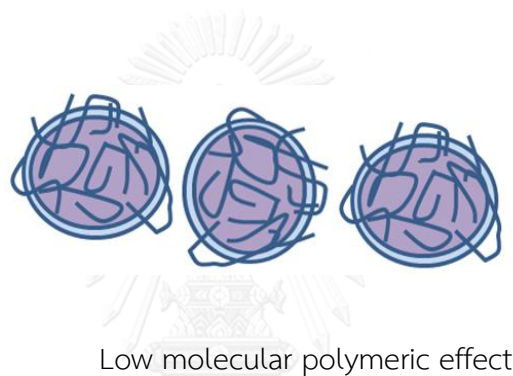
สารช่วยกระจายตัวมีบทบาทต่อกระบวนการเตรียมสารแขวนลอยมาก ช่วยทำให้อนุภาคที่เกาะตัวกันเป็นกลุ่มก้อนเกิดการกระจายตัว โดยมีการดูดซับไว้บนพื้นผิวของอนุภาคทำให้เกิดประจุไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดแรงผลักระหว่างอนุภาคทำให้อนุภาคเกิดการกระจายตัวอยู่ในสารแขวนลอย ใช้หลักการที่ว่าเมื่อเกิดประจุไฟฟ้าเหมือนกันจะเกิดแรงผลักกัน

### 2.3.3 การเติมสารพอลิเมอร์โมเลกุลต่ำ

การเติมสารพอลิเมอร์โมเลกุลต่ำ จะทำงานโดยการใช้สายโซ่พอลิเมอร์เกาะบนผิวของอนุภาคที่มีประจุซึ่งจะส่งผลต่อการกระจายของเคาเตอร์ไอออน (counter-ion) กล่าวคือ จะทำให้เคาเตอร์ไอออนอยู่ห่างออกไปจาก Stern plane มากขึ้น จึงทำให้ขอบเขตของดิฟฟิวส์เลเยอร์ (diffuse layer) อยู่ไกลจากผิวของอนุภาคเพิ่มขึ้น จึงทำให้การผลักกันระหว่างอนุภาคเพิ่มขึ้น ในการทำให้อนุภาคมีความเสถียรและกระจายตัวดีแบบสเตอริกนั้น สายโซ่ของโมเลกุลพอลิเมอร์ที่ปกคลุมและเกาะบนผิวอนุภาค จะทำให้โมเลกุลของสารลดแรงดึงผิวที่มีอยู่เดิมหลุดออก (desorption) หรือเคลื่อนย้ายไปในแนวด้านข้าง (lateral migration) โดยที่ชั้นของสารที่ทำให้เกิดความเสถียรต้องมีความหนาแน่นพอที่จะทำให้ผลของแรงดึงดูดประเภทแวนเดอร์วาลส์ (van der waals) มีค่าต่ำสุด ซึ่งขนาดอนุภาคจะมีผลต่อความเสถียรด้วย โดยแรงดึงดูดจะมีค่ามากเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่



รูปภาพที่ 2.8 แสดงลักษณะการกระจายของอนุภาคคอลลอยด์แบบ Electrolyten behavior และ Dispersant effect

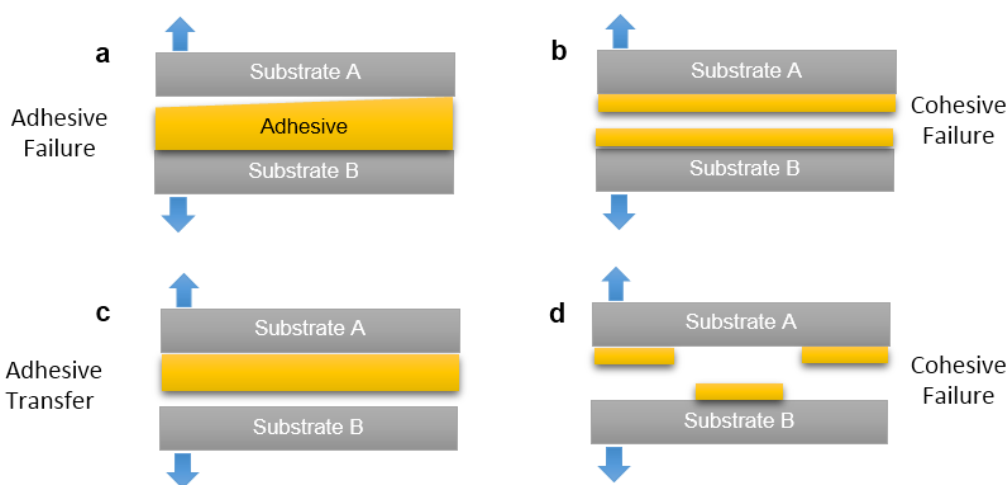


รูปภาพที่ 2.9 แสดงลักษณะการกระจายของอนุภาคคอลลอยด์แบบ Low molecular polymeric effect

#### 2.4 กาว (adhesive)

การติดประสาน (adhesive) เป็นวัสดุที่ทำหน้าที่เชื่อมวัสดุที่เป็นของแข็งติดกันด้วยวัสดุเชื่อมติด ซึ่งจะเป็นแผ่นบางต่อเนื่อง ในการติดกาวส่วนใหญ่ต้องเตรียมผิวให้สะอาดและขรุขระ หรือเรียบเสมอกัน ความแข็งแรงของกาวนั้นอาจต้องใช้เวลา ความร้อน แรงกด หรือการแนบของวัสดุทั้ง 2 ชั้นเข้าด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของงานและชนิดของกาว การเชื่อมติดด้วยกาวมีทั้งแบบถาวรซึ่งกาวจะใช้ได้ครั้งเดียว และจะเสียไปเมื่อถูกลอกหรือหักออก และแบบไม่ถาวรซึ่งใช้ซ้ำได้ วัสดุติดกาวหลุดออกจากกันได้ใน 3 ลักษณะ คือ กาวหลุดออกจากวัสดุที่เชื่อมติด (adhesive failure (a)), เนื้อกาวแยกหลุดออกจากกัน (cohesive failure (b,d)) และเนื้อกาวย้ายออกจากวัสดุเดิมไปบนวัสดุอีกชั้นที่นำมาปะกบ (adhesive transfer (c)) แสดงดังรูปภาพที่ 2.10





รูปภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะการยึดติด

#### 2.4.1 กาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA)

นิยามของกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA) โดย Pressure Sensitive Adhesive Council (PSTC) [5] คือ มีความสามารถในการติดที่แข็งแรงมาก แต่ดึงออกได้อย่างรวดเร็ว, การติดไม่ต้องใช้แรงมากเพียงปลายนิ้วกด, ไม่ต้องการกระตุ้นจากแหล่งพลังงานอื่นๆ, มีความสามารถมากพอที่จะยึดติดกับพื้นผิววัสดุได้ และมีแรงยึดเกาะภายในโมเลกุลที่มากพอ เมื่อดึงออกแล้วพื้นผิววัสดุสะอาด ไม่มีทั้งคราบกาว สมบัติที่สำคัญของผลิตภัณฑ์ประเภท PSA ประกอบด้วยลักษณะการยึดติด 3 แบบ

1. Tackiness หมายถึง แรงที่ใช้ในการดึงผิวหน้าของเนื้อกาวออกจากผิวของแผ่นชิ้นงาน มาตรฐานที่กำหนด (Initial bonding strength) เมื่อผิวหน้าเนื้อกาวมีการสัมผัสกับผิวชิ้นงานมาตรฐานในระยะเวลาสั้น ๆ
2. Adhesion หมายถึง แรงที่ใช้ในการดึงเนื้อกาวออกจากพื้นผิววัสดุโดยมีเงื่อนไขของเวลาและแรงที่ใช้ในการติดลงบนแผ่นชิ้นงานมาตรฐานที่กำหนด
3. Cohesion หมายถึง ระยะเวลาที่ทำให้วัสดุที่เคลือบกาวเกิดการเคลื่อนตัวออกห่างจากเส้นที่กำหนดโดยมีน้ำหนักถ่วงไว้ หรือ เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงภายในของพันธะที่มีอยู่ในเนื้อกาว

กาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA) จะแสดงพฤติกรรมอยู่ระหว่างเป็นของแข็งและของเหลว เราจึงนิยามว่าเป็นวัสดุประเภท วิสโคอีลาสติก (Viscoelastic) คือ การที่

วัสดุที่มีสมบัติทั้งเหนียวหนืด(vicous) เหมือนของเหลว และยืดหยุ่น (elastic) เหมือนของแข็งในเวลาเดียวกัน ซึ่งเป็นสมบัติที่มีอยู่ในวัสดุพอลิเมอร์ ตัวอย่างเช่น Blobber ซึ่งเป็นของเล่นชนิดหนึ่งมีลักษณะแป้นกอนนุ่มๆ ที่สามารถแป้นรูปต่างๆ ได้คล้ายดินน้ำมัน เมื่อโยนลงพื้นจะกระเด็นขึ้นมาได้เหมือนลูกบอลหรือสามารถดึงให้ยาวได้เหมือนยางรัดของการศึกษาพฤติกรรมของแข็งอีลาสติกของเหลวหนืด และพอลิเมอร์ที่เป็นวัสดุวิสโคอีลาสติกนั้นสามารถแสดงให้เห็นได้ง่ายโดยอาศัยการเปรียบเทียบกับพฤติกรรมของสปริง

พฤติกรรมของกาวประเภทที่อ่อนไวต่อแรงกดจะแบ่งส่วนที่เป็นของแข็งกับของเหลวออกจากกันโดยใช้ช่วงเวลาในการพิจารณา จะพิจารณาจากการแผ่กระจายของกาวซึ่งใช้เวลานาน (เปรียบเสมือนสมบัติของของเหลว) และการลอกออก (peel) ใช้เวลาที่สั้น (เปรียบเสมือนสมบัติของของแข็ง) ในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน พฤติกรรมของ PSA นั้นจะไม่ติดบนพื้นผิวอย่างรวดเร็วเนื่องจากเนื้อวัสดุจะเสมือนเป็นของเหลว คือจะสามารถเปลี่ยนสภาพหรือไหลได้บนพื้นผิวที่เรียบโดยจะใช้เวลาเป็นวินาทีหรือมากกว่า นอกจาก PSA ยังจะแสดงความต้านทานการไหลซึ่งเป็นพฤติกรรมเสมือนของแข็ง โดยใช้เวลาเป็นวินาทีหรือน้อยกว่า สำหรับการใช้งานของ PSA แต่สำหรับข้อเสียของ PSA คือ ความแข็งแรงของสมบัติการลอกออก (peel) และความแข็งแรงการเฉือน (shear strength) ค่อนข้างต่ำ การทดสอบสมบัติของ PSA เป็นขั้นตอนสุดท้ายจากการเตรียมเลเทกซ์เพื่อให้ได้สมบัติที่เหมาะสมในการใช้งาน ซึ่งมีการกำหนดมาตรฐานในการทดสอบรายละเอียดตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การทดสอบที่บ่งบอกความสามารถในการยึดติด

ลักษณะการยึดติด	วิธีการทดสอบ	มาตรฐานการทดสอบ
Tackiness	Loop tack	FINAT-9, ASTM D6195-03
	Rolling ball tack	PSTC-6, ASTM D3121-06
	J. Dow method	JIS Z0237
Adhesion	180° Peel adhesion	PSTC-1, FINAT1, ASTM D3330/D3330M-04, JIS Z0237
	90° Peel adhesion	FINAT2, ASTM D3330/D3330M-04, JIS Z0237
Cohesion	Shear	PSTC-7, ASTM D3654/D3654M-06, JIS Z0237

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มีรายงานการศึกษาอนุภาคเลเทกซ์ของไวนิลอะซิเตตและอะครีเลตโคพอลิเมอร์ในปี ค.ศ. 2009 โดย Tigci และคณะ [6] ที่ศึกษาอัตราส่วนประกอบของสารลดแรงตึงผิว, สารลดแรงตึงผิวผสมของแอนไอออนิกและนอนไอออนิกและชนิดสารริเริ่มปฏิกิริยา ซึ่งอัตราส่วนของสารเหล่านี้มีผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพ, แรงตึงผิวและลักษณะของฟิล์ม และพบว่าสารลดแรงตึงผิวแบบไม่มีประจุที่มีหมู่เอทิลีนออกไซด์จำนวนมากทำให้ขนาดอนุภาคเลเทกซ์และอุณหภูมิเปลี่ยนสภาพแก้วลดลง ส่วนความหนืดและแรงตึงผิวมากขึ้น ส่วนชนิดสารริเริ่มปฏิกิริยา คือ แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตไม่มีผลต่อขนาดอนุภาคเลเทกซ์และความหนืดแต่มีผลต่อแรงตึงผิวคือแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตมีส่วนที่ขบ่น้ำมากกว่าโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต การศึกษาอัตราส่วนต่างๆสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการเคลือบผิววัสดุได้ ในส่วนของอิทธิพลของคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ในไวนิลอะซิเตตและบิวทิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาและความเสถียรของคอลลอยด์ มีการศึกษาโดย Araujo และคณะ [7] ในปี ค.ศ. 2006 โดยเตรียมพอลิเมอร์ด้วยวิธีอิมัลชันพอลิเมโรโรเซชันแบบ semi-continuous โดยคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ที่ใช้ คือ อะคริลิกแอซิดและเมทิลอะคริลิกแอซิด ความเข้มข้น 1-3% โดยน้ำหนักของปริมาณมอนอเมอร์ทั้งหมด โดยรายงานว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์ให้สูงขึ้น เลเทกซ์กลับมีเสถียรภาพที่ต่ำลงเนื่องจากอนุภาครวมตัวมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอกซิลมอนอเมอร์จะทำให้อัตราการพอลิเมโรโรเซชันกลับลดลง สุดท้ายพบว่ามอนอเมอร์ชนิดอะคริลิก แอซิดจะอยู่ ณ บริเวณผิวของอนุภาคพอลิเมอร์ในเลเทกซ์ได้มาก ทำให้ช่วยเพิ่มเสถียรภาพของอนุภาคได้มีประสิทธิภาพกว่าเมื่อใช้เมทิลอะคริลิกแอซิด

ปี ค.ศ. 2005 Sarac และคณะ [8] สังเคราะห์ไวนิลอะซิเตตเอทิลเฮกซิลอะครีเลตโคพอลิเมอร์ด้วยวิธีอิมัลชันพอลิเมโรโรเซชันโดยใช้เครื่องมือในการสังเคราะห์ชนิด loop reactor ศึกษาผลของชนิดสารริเริ่มปฏิกิริยาและขนาดโมเลกุลของสารลดแรงตึงผิวต่อค่าความหนืดและแรงตึงผิวของอิมัลชัน เมื่อใช้สารริเริ่มชนิดแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต ร่วมกับสารลดแรงตึงผิวที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น พบว่าความหนืดและแรงตึงผิวของอนุภาคลาเทกซ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

ปี ค.ศ. 2004 Staicu และคณะ [9] ศึกษาเกี่ยวกับความเสถียรของพอลิบิวทิลอะครีเลต-โค-ไวนิลอะซิเตต-โค-อะคริลิกแอซิด และพอลิเอทิลเฮกซิลอะครีเลต-โค-ไวนิลอะซิเตต-โค-อะคริลิกแอซิด เตรียมด้วยวิธีอิมัลชันพอลิเมโรโรเซชันแบบ semi-continuous โดยปัจจัยที่งานวิจัยนี้สนใจ คือ ความเข้มข้นต่ำสุดของสารลดแรงตึงผิวในการเกิดเป็นไมเซลล์ (critical micelle concentration, CMC) ของสารลดแรงตึงผิว 2 ชนิด คือ ชนิดไม่มีประจุและชนิดแอนไอออนิก พบว่าเมื่อปริมาณของสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ CMC ลดลง ทดสอบความเสถียรของอิมัลชันด้วย

การตรวจวัดปริมาณตะกอนที่เกิดขึ้น พบว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวชนิดไม่มีประจุในปริมาณมากทำให้เกิดตะกอนจำนวนมากแสดงว่าอายุการจัดเก็บสั้น นอกจากนี้อีมีลชันมีพฤติกรรมการไหลแบบ pseudoplastic เมื่อเติมอะคริลิกแอซิด ส่งผลให้การยึดติดแบบภายในวัสดุ (cohesive) และระหว่างวัสดุ (adhesion) สูงขึ้น

Sarac และคณะ [10] ศึกษาการสังเคราะห์ไวโนลอะซีเตต บิวทิลอะคริเลตโคพอลิเมอร์ (ใช้อัตราส่วน 85:15) ด้วยวิธีอีมีลชันพอลิเมอร์ไรเซชันแบบ semi-continuous โดยใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่ม และใช้ nonylphenol ethoxylate เป็นสารลดแรงตึงผิวที่มีขนาดแตกต่างกันที่อุณหภูมิ 70 °C ซึ่งปัจจัยที่สนใจศึกษา คือ ความหนืด ขนาดโมเลกุลของอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาคโคพอลิเมอร์ และแรงตึงผิว พบว่าโคพอลิเมอร์ที่ได้จากใช้แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต และโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารริเริ่มมีความหนืด ขนาดโมเลกุลของอนุภาค การกระจายตัวของอนุภาคโคพอลิเมอร์และแรงตึงผิวเพิ่มมากขึ้น ตามขนาดที่เพิ่มของสารลดแรงตึงผิว



### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

##### 3.1 สารเคมี

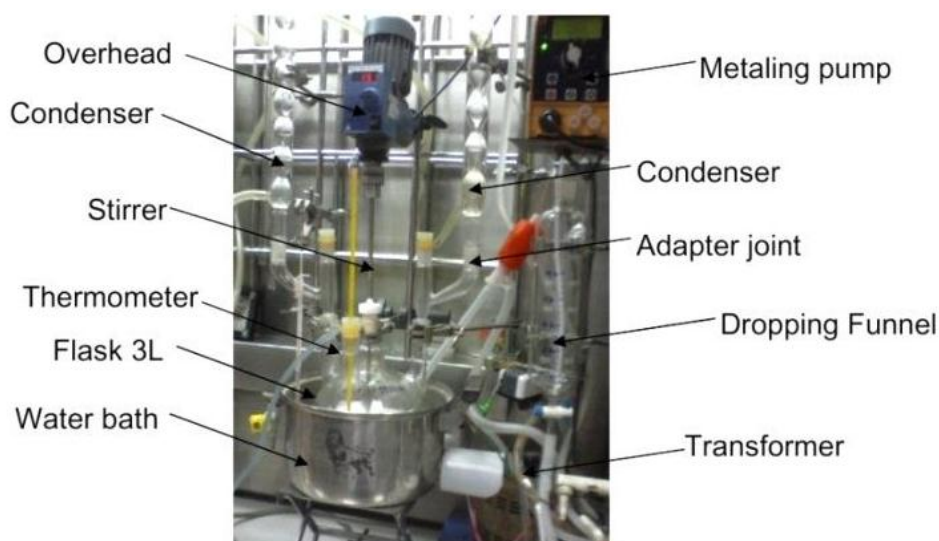
ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

No.	ชื่อสารเคมี	อักษรย่อ	บริษัทผู้ผลิต
1	น้ำกลั่น	DW	Eternal resin Co.,Ltd, Thailand
2	โซเดียมไฮดรอกไซด์	NaOH	The essential chemical industry, Thailand
3	Vinyl acetate monomer	VA	Helm, Saudi Arabia
5	2-Ethyl hexyl acrylate monomer	2-EHA	BASF petronas chemicals, Malaysia
6	Butyl acrylate monomer	BA	Formaso plastic Corporation, Taiwan
7	Sodium dodacylbenzene sulfonate	SDS	PT. rhodia manyar, Indonesia
8	Nonyl phenol ethylene oxide	NP12	Huntsmas Corporation, Australia
9	Ammonium persulfate	AP	Degussa-AJ (Shanghai) Initiators
10	Tertiary butyl hydroperoxide	TBHP	Chinasun specialty products, China
11	Sodium formaldehyde sulfoxylate	SFS	Transpek-silox industry limited
12	Sodium bicarbonate	NaHCO <sub>3</sub>	Tianjin bohai chemical, China
13	Bata-carboxyethyl acrylate	BETA-C	Rhodia chemical, USA
14	Methacrylic acid	MAA	Thai MMA Co.,Ltd, Thailand
15	Acrylic acid	AA	Arkema, France
16	Methyl methacrylate	MMA	Thai MMA Co.,Ltd, Thailand
17	2-Hydroxy ethyl acrylate	2-HEA	Osaka organic chemical Ltd, Japan
18	2-Hydroxy ethyl methacrylate	2-HEMA	Mitsubishi rayon Co.,Ltd, Japan
19	N-Dodecyl mercaptan	NDDM	KAO Corporation, Japan
20	Mergal K9N	K9N	Troysiam Co.Ltd Thailand
21	Aerosol OT 75	OT 75	Stan chem international Ltd., England
22	Foamstar A-10	A-10	BASF Corporation, USA
23	Ammoniam	AM	Brenntag ingredient, Thailand

##### 3.2 วัสดุอุปกรณ์และเครื่องแก้ว

1. Overhead stirrer
2. Water bath
3. Beaker 50,100, 250, 600 , 1,000 mL
4. Round bottom flask 3 L

3. Homogenizer
4. Weight balance digital
5. Metaling pump
6. Spatula
13. Dropping funnel 1000 ml
14. ชุดอุปกรณ์รีฟลักซ์สำหรับการสังเคราะห์เลเทกซ์ที่ตัดแปรด้วยด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์แสดงดังรูปภาพที่ 3.1



รูปภาพที่ 3.1 การติดตั้งอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์เลเทกซ์

CHULALONGKORN UNIVERSITY

### 3.3 การทดลอง

#### 3.3.1 การทำให้มอนอเมอร์บริสุทธิ์

การทำให้มอนอเมอร์บริสุทธิ์เพื่อกำจัดน้ำและตัวยับยั้ง (inhibitor) โดยนำมอนอเมอร์ล้างด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10%, 3 ครั้ง และกลั่นภายใต้สภาวะสุญญากาศหลังจากนั้นนำมอนอเมอร์ที่ได้เก็บในภาชนะที่ปิดมิดที่บรรจุผงแคลเซียมคลอไรด์

### 3.3.2 การสังเคราะห์เลเทกซ์ที่ดัดแปรด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์

การเตรียมเลเทกซ์ที่ดัดแปรด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ ด้วยกระบวนการมินิอิมัลชันพอลิเมอไรเซชัน (miniemulsion polymerization) แบบ semi-continuous มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้

3.3.2.1 เตรียมพรีมิกซ์มอนอเมอร์หรือหยดของมอนอเมอร์ (premix monomer or monomer droplet) เป็นคอลลอยด์ของมอนอเมอร์และสารลดแรงตึงผิวที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนของสารลดแรงตึงผิว คือ SDS 1.30 %wt, NP 12 0.29 %wt และส่วนของมอนอเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ตัวหลัก, สารถ่ายโอนโซ่ (chain transfer agent) 0.02%wt และมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ได้แสดงปริมาณมอนอเมอร์ที่ใช้ในงานนี้ใน ตารางที่ 3.2 และ ตารางที่ 3.3

#### ตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนของมอนอเมอร์ตัวหลักและหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

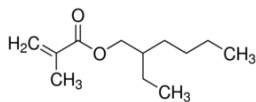
กลุ่มที่	มอนอเมอร์ตัวหลัก 2-EHA/VA	หมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ (%wt)			การทดลอง
		หมู่คาร์บอกซิล	หมู่เอสเทอร์	หมู่ไฮดรอกซิล	
0	90/10	-	-	-	PSA-0
1	90/10	1.25	-	-	PSA-1 ถึง PSA-3
2	90/10	-	1.25	-	PSA-4
3	90/10	0.94	0.31	-	PSA-5
4	90/10	-	-	1.25	PSA-6 ถึง PSA-8
5	90/10	0.84	-	0.41	PSA-9 ถึง PSA-11 และ PSA-13 ถึง PSA-15
6	90/10	-	0.84	0.41	PSA-12 และ PSA-16
7	90/10	0.93	-	0.32	PSA-17 ถึง PSA-18
8	90/10	0.90	0.30	0.05	PSA-19 ถึง PSA-20

ตารางที่ 3.3 อัตราส่วนของฟังก์ชันมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทดลอง

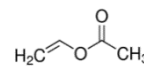
การทดลอง	หมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ (%wt)					
	BETA-C	MAA	AA	MMA	2-HEA	2-HEMA
PSA-0	-	-	-	-	-	-
PSA-1	1.25	-	-	-	-	-
PSA-2	-	1.25	-	-	-	-
PSA-3	-	-	1.25	-	-	-
PSA-4	-	-	-	1.25	-	-
PSA-5	0.31	0.31	0.31	0.31	-	-
PSA-6	-	-	-	-	1.25	-
PSA-7	-	-	-	-	-	1.25
PSA-8	-	-	-	-	0.63	0.63
PSA-9	0.84	-	-	-	0.41	-
PSA-10	-	0.84	-	-	0.41	-
PSA-11	-	-	0.84	-	0.41	-
PSA-12	-	-	-	0.84	0.41	-
PSA-13	0.84	-	-	-	-	0.41
PSA-14	-	0.84	-	-	-	0.41
PSA-15	-	-	0.84	-	-	0.41
PSA-16	-	-	-	0.84	-	0.41
PSA-17	-	-	0.93	-	0.32	-
PSA-18	-	-	0.93	-	-	0.32
PSA-19	0.30	0.30	0.30	0.30	0.05	-
PSA-20	0.30	0.30	0.30	0.30	-	0.05



### Main Monomer

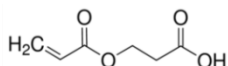


2-ethyl hexyl acrylate (2-EHA)

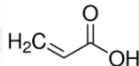


Vinyl acetate (VA)

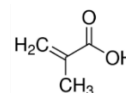
### Carboxyl Functional Monomer



Beta-carboxyethyl acrylate (BETA-C)

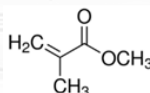


Acrylic acid (AA)



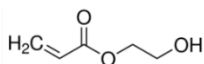
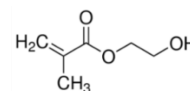
Methacrylic acid (MAA)

### Ester Functional Monomer



Methyl methacrylate (MMA)

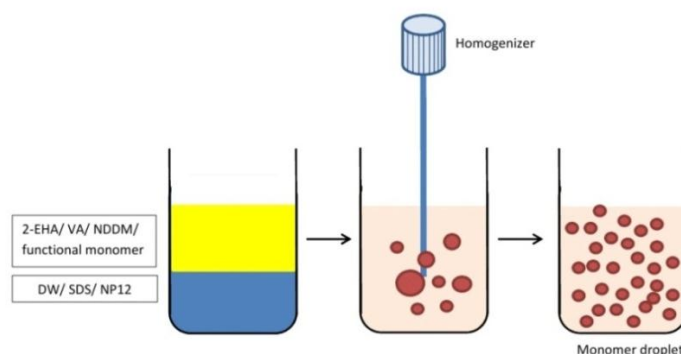
### Hydroxyl Functional Monomer

2-Hydroxy ethyl acrylate  
(2-HEA)2-Hydroxy ethyl methacrylate  
(2-HEMA)

รูปภาพที่ 3.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการเตรียมเลเทกซ์

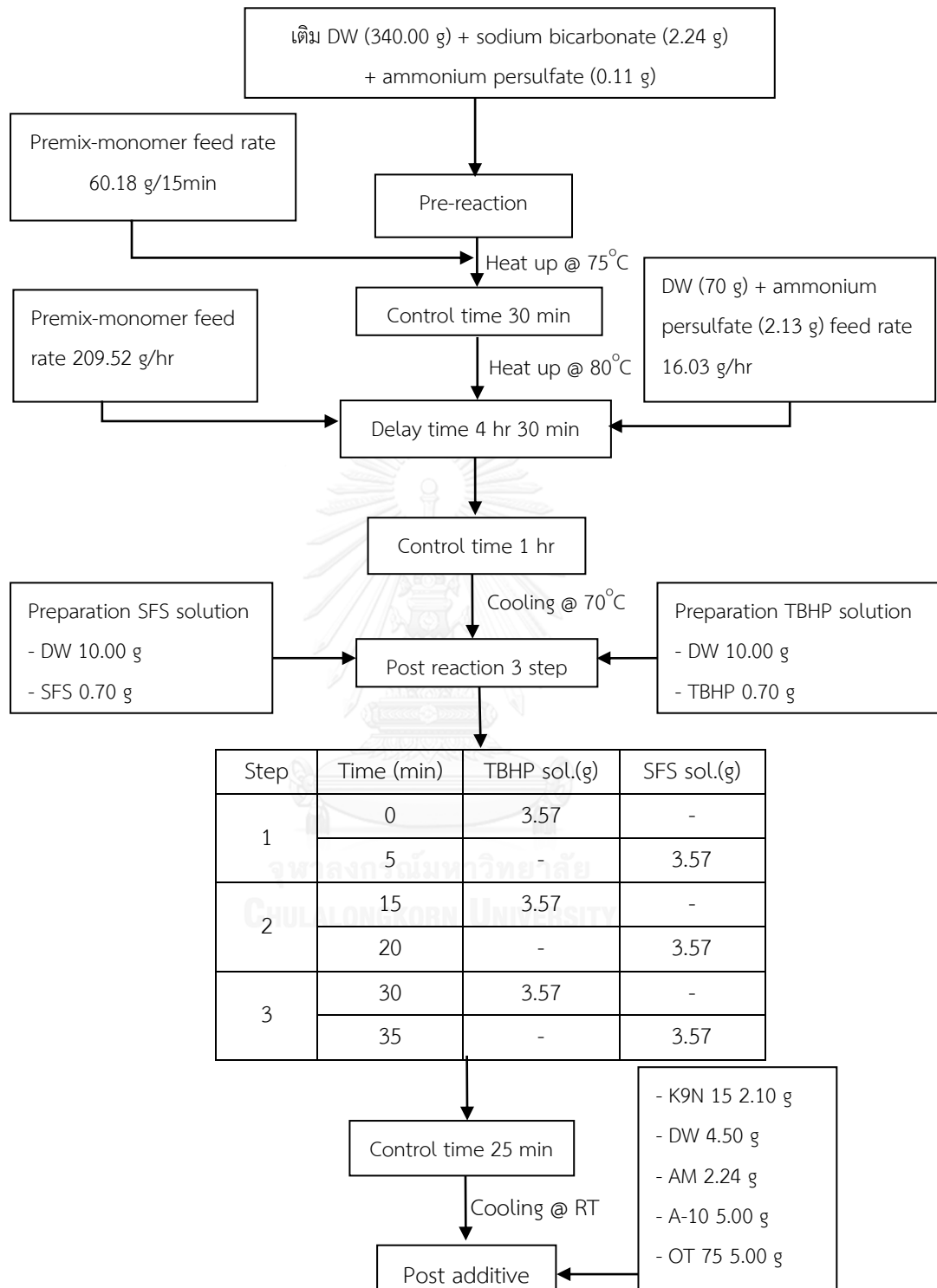
นำ 2 ส่วนมาผสมกัน และปั่นด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูง (Homogenizer) ความเร็วรอบ 1,400 rpm เป็นเวลา 30 นาที รายละเอียดแสดงดัง

**รูปภาพที่ 3.3** ลักษณะของพรีมิคซ์มอนอเมอร์ที่ได้เป็นของเหลวข้นสีขาวคล้ายน้ำนม มีค่าความหนืด (Brookfield model RV, No.2, 100 rpm) เท่ากับ 90-160 cps, pH เท่ากับ 3.0 - 4.5 และขนาดอนุภาคพรีมิคซ์มอนอเมอร์ ( $d_p$ ) เท่ากับ 200 -300 nm



**รูปภาพที่ 3.3** แสดงขั้นตอนการเตรียมพรีมิคซ์มอนอเมอร์

3.3.2.2 ขั้นตอนการเตรียมเลเทกซ์ทำการทดลองในขวดก้นกลมสีคอปขนาด 3 ลิตรภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน มีขั้นตอนการดำเนินการดังนี้รายละเอียดตามรูปภาพที่ 3.4



รูปภาพที่ 3.4 ขั้นตอนการเตรียมเลเทกซ์

### 3.4 ตรวจสอบวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของเลเทกซ์

#### 3.4.1 ความหนืด (viscosity)

ใช้ Brookfield viscometer model RV ที่อุณหภูมิ 30°C, spindle No.2 และความเร็วรอบ 100 rpm มีหน่วยเป็น cps (centipoise second, psi) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D 2196

#### 3.4.2 ความเป็นกรด - เบส (pH)

ใช้ TOA pH meter model HM-20S อ้างอิงตามมาตรฐาน ISO 1148

#### 3.4.3 Non-volatile content (%)

Non-volatile content (%) เป็นปริมาณของพอลิเมอร์ที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ มีขั้นตอนการดำเนินการ ดังนี้

1. เตรียมกระถง aluminum foil ขนาด 3 x 3 inch (กว้าง x ยาว) ทำให้เป็นทรงกลมแบนด้วยก้นปิ๊กเกอร์ขนาด 50 ml จำนวน 3 อัน
2. นำกระถงที่ได้จากข้อที่ 1. ไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งตวงตวง 4 ตำแหน่งในหน่วยกรัมบนตีกน้ำหนักกระถง
3. ปรับให้เครื่องชั่งน้ำหนักเป็นศูนย์ แล้วชั่งน้ำหนักกาวในกระถง และค่าน้ำหนักที่ได้ต้องอยู่ในช่วง 1.2000 – 1.8000 กรัม บนตีกน้ำหนักที่ได้ และทำซ้ำอีก 2 ครั้ง ให้ครบ 3 กระถงสำหรับ 1 ตัวอย่าง
4. นำทั้ง 3 กระถงพร้อมตัวอย่างกาวที่เตรียมได้ใส่ในตู้อบที่อุณหภูมิ 160 °C นาน 40 นาที

**สูตรการคำนวณ Non-volatile content**

$$\%NV = (W_2 - W_0) / W_1 \times 100 \quad (3.1)$$

เมื่อ NV = Non-volatile content (%)

$W_0$  = น้ำหนักกระถง (กรัม)

$W_1$  = น้ำหนักตัวอย่างกาว (กรัม)

$W_2$  = น้ำหนักกระถงพร้อมตัวอย่างกาวหลังอบ (กรัม)

### 3.4.4 การหาขนาดของอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์

วิเคราะห์ด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง (Light scattering) โดยใช้ Malvern instrument zeta-sizer version 6.01 serial no. MAL1021381 ทำการเจือจางตัวอย่างเลเทกซ์ 0.02 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น 1 มิลลิลิตร สำหรับน้ำกลั่นก่อนนำมาใช้เตรียมตัวอย่าง ต้องกรองฝุ่นละอองที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำกลั่นออกก่อน



### รูปภาพที่ 3.5 ลักษณะของเซลล์สำหรับหาขนาดของอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์

### 3.4.5 หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง PERKIN ELMER FTIR 1600 ที่ความยาวคลื่น 600 ถึง 4,000  $\text{cm}^{-1}$  โดยเตรียมตัวอย่างเป็นฟิล์มแห้งความหนา 20 ไมครอน

### 3.4.6 สมบัติเชิงความร้อนด้วย differential scanning calorimetry (DSC)

วิเคราะห์ด้วยเครื่อง NETZSCH DSC 204 F1 Phoenix 240 สภาวะในการทดสอบ คือ ช่วงอุณหภูมิ -120 ถึง 50°C และอัตราการร้อน 10°C/นาที

## 3.5 การตรวจสอบคุณลักษณะความเหมาะสมในการนำไปใช้งานของสมบัติของฟิล์ม

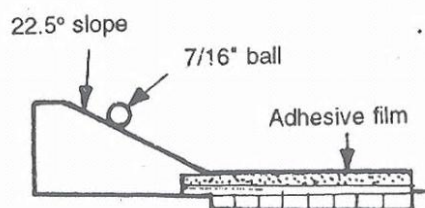
การเตรียมชิ้นงานสำหรับทดสอบการนำไปใช้งานของกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด (Pressure sensitive adhesive, PSA) มีวิธีการดังนี้ [5]

1. ตัดแผ่น OPP film (Oriented polypropylene film) และกระดาษซิลิโคนที่จะใช้เคลือบเลเทกซ์ ให้มีขนาดประมาณ 9 นิ้ว x 13 นิ้ว จำนวน 2-3 แผ่น
2. เคลือบเลเทกซ์บน OPP film ที่ความหนา 20 ไมครอน (ฟิล์มแห้ง) ระเหยน้ำออกด้วยการนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C นาน 3 นาที นำแผ่น OPP film ที่มีฟิล์มพอลิเมอร์แห้งเคลือบอยู่มาประกบกับกระดาษซิลิโคนและใช้ลูกกลิ้ง ขนาด 4½ lb กลิ้งทับกระดาษซิลิโคนให้ทั่วทั้งแผ่นพักชิ้นงาน (aging time) ไว้นาน 1 วัน

### 3.5.1 การทดสอบการยึดติดแบบ Rolling ball tack

การทดสอบนี้บ่งบอกความเหนียว (tackiness) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยใช้ลูกบอลเหล็กมาตรฐานเคลื่อนที่ผ่านผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์ในระยะเวลาสั้นๆ ฟิล์มพอลิเมอร์มีความเหนียว (tackiness) มากลูกบอลเหล็กเคลื่อนที่ได้ระยะทางสั้นๆ อ้างอิงตามมาตรฐาน PSTC 6 มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาด 50 มิลลิเมตร x 250 มิลลิเมตร จำนวน 3-5 แผ่น
2. วางแผ่นตัวอย่างชิ้นงานลงบนบริเวณพื้นระนาบที่ถัดจากเครื่อง Rolling ball test โดยวางแผ่นตัวอย่างให้แนบกับพื้นและหยาด้านที่เคลือบฟิล์มพอลิเมอร์ขึ้น จากนั้นลอกกระดาษซิลิโคนที่ประกบแผ่นตัวอย่างออกแสดงดัง **รูปภาพที่ 3.6**
3. วางลูกบอลเหล็กมาตรฐานที่ทำความสะอาดแล้ว ลงบนจุดเริ่มต้นหลังจากนั้นปล่อยลูกบอลเหล็กมาตรฐานให้กลิ้งลงมาตามพื้นเอียง วัดระยะที่ลูกบอลกลิ้งบนชิ้นงานที่เคลือบกาวมีหน่วยเป็นเซนติเมตรทำซ้ำ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยของระยะทาง

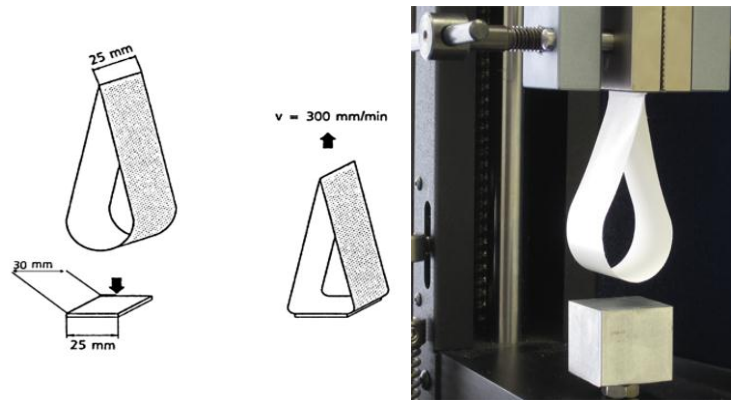


**รูปภาพที่ 3.6** แสดงลักษณะของ Rolling ball test

### 3.5.2 การทดสอบการยึดติดแบบ Loop tack (Loop tack test)

การทดสอบนี้บ่งบอกความเหนียว (tackiness) ของฟิล์มพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ โดยให้ผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์สัมผัสกับพื้นผิววัสดุขนาด 1 นิ้ว x 1 นิ้ว เพื่อให้เกิดแรงยึดติดในระยะเวลาสั้น ๆ ซึ่งจะวัดแรงที่ใช้ดึงผิวหน้าของฟิล์มเลเทกซ์ออกจากผิวหน้าของแผ่นวัสดุต่อพื้นที่ อ้างอิงตามมาตรฐาน FINAT 9 มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาด 1 นิ้ว x 5 นิ้ว จำนวน 3-5 แผ่น
2. ยึดปลาย 2 ข้างของชิ้นงานตัวอย่างเป็น loop
3. นำชิ้นงานตัวอย่างที่เป็น loop ไปยึดกับเครื่องทดสอบ loop tack ให้เครื่องทำงาน ชิ้นงานปลาย loop จะสัมผัสกับแผ่นทดสอบมาตรฐานขนาดพื้นที่ 1 นิ้ว x 1 นิ้ว แสดงดัง **รูปภาพที่ 3.7** ทำการทดสอบซ้ำอีก 3 ครั้ง โดยหน่วยในการทดสอบ คือ ปอนด์/ตารางนิ้ว และหาค่าเฉลี่ยของผลการทดสอบที่ได้



รูปภาพที่ 3.7 แสดงลักษณะของ Loop tack test

### 3.5.3 การทดสอบลอกออกที่มุม $180^\circ$ ตามแนวแรงดึง ( $180^\circ$ peel adhesion)

แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มพอลิเมอร์ออกจากพื้นผิววัสดุทำมุม  $180^\circ$  ตามแนวแรงดึง โดยมีเงื่อนไขของเวลาและแรงที่ใช้ในการติดลงบนแผ่นชิ้นงานมาตรฐานที่กำหนด อ้างอิงตามมาตรฐาน PSTC 1 หรือ FINAT 1 มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาด 1 นิ้ว x 12 นิ้ว จำนวน 3-5 แผ่น
2. ติดแผ่นตัวอย่างบนแผ่นทดสอบโดยวัสดุที่เลือกใช้เป็น stainless steel ใช้ลูกกลิ้งขนาด 4½ ปอนด์ กลิ้งทับแผ่นตัวอย่างชิ้นงานที่ติดอยู่บนแผ่นทดสอบไป-กลับ 1 รอบ โดยห้ามออกแรงกด ลูกกลิ้งทิ้งไว้ 20 นาที
3. หลังจากนั้นนำแผ่นทดสอบยึดเข้ากับตัวยึดแผ่นทดสอบ ลักษณะการหลุดลอกจะทำมุม  $180^\circ$  ตามแนวแรงที่ใช้ดึงแสดงดังรูปภาพที่ 3.8 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง Tinius Olsen model H5K-T
4. ค่าของแรงที่ลอกแผ่นตัวอย่างออกจากแผ่นทดสอบมีหน่วยเป็น กิโลกรัม/นิ้ว หรือ กิโลกรัม/25 มิลลิเมตร

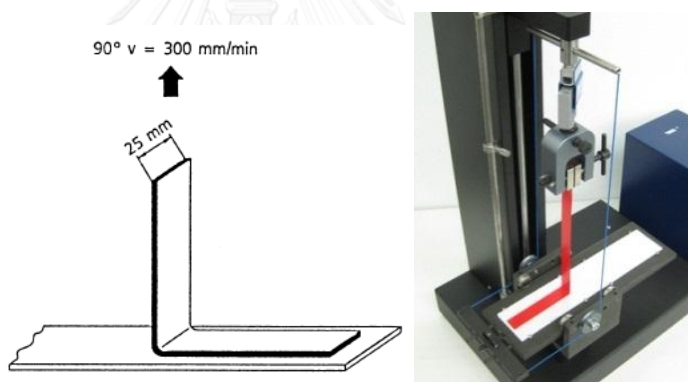


รูปภาพที่ 3.8 แสดงลักษณะของ  $180^\circ$  peel adhesion

### 3.5.4 การทดสอบลอกออกที่มุม $90^\circ$ ตามแนวแรงดึง ( $90^\circ$ peel adhesion)

แรงที่ใช้ในการดึงฟิล์มพอลิเมอร์ออกจากพื้นผิววัสดุทำมุม  $90^\circ$  ตามแนวแรงดึง โดยมีเงื่อนไขของเวลาและแรงที่ใช้ในการติดลงบนแผ่นชิ้นงานมาตรฐานที่กำหนด อ้างอิงตามมาตรฐาน FINAT 2 มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาด 1 นิ้ว  $\times$  12 นิ้ว จำนวน 3-5 แผ่น
2. ติดแผ่นตัวอย่างบนแผ่นทดสอบโดยวัสดุที่เลือกใช้เป็น stainless steel ใช้ลูกกลิ้งขนาด 4½ ปอนด์ กลิ้งทับแผ่นตัวอย่างชิ้นงานที่ติดอยู่บนแผ่นทดสอบไป-กลับ 1 รอบ โดยห้ามออกแรงกด ลูกกลิ้งทิ้งไว้ 20 นาที
3. หลังจากนั้นนำแผ่นทดสอบยึดเข้ากับตัวยึดแผ่นทดสอบ ลักษณะการหลุดลอกจะทำมุม  $90^\circ$  ตามแนวแรงที่ใช้ดึงแสดงดังรูปภาพที่ 3.9 ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่อง Tinius Olsen model H5K-T
4. ค่าของแรงที่ลอกแผ่นตัวอย่างออกจากแผ่นทดสอบมีหน่วยเป็น กิโลกรัม/นิ้ว หรือ กิโลกรัม/25 มิลลิเมตร



รูปภาพที่ 3.9 แสดงลักษณะของ  $90^\circ$  peel adhesion

### 3.5.5 การทดสอบความแข็งแรงภายในโมเลกุลยาว (Shear test)

ระยะเวลาที่ทำให้วัสดุที่เคลือบกาวเกิดการเคลื่อนตัวออกจากเส้นที่กำหนดโดยมีน้ำหนักถ่วงไว้ หรือ เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของพันธะที่มีอยู่ในฟิล์มพอลิเมอร์อ้างอิงตามมาตรฐาน PSTC 7 มีวิธีการทดสอบดังนี้

1. เตรียมชิ้นงานขนาด 1 นิ้ว  $\times$  6 นิ้ว จำนวน 1-2 แผ่น
2. ติดแผ่นตัวอย่างบนแผ่นทดสอบโดยวัสดุที่เลือกใช้เป็น stainless steel ใช้ลูกกลิ้งขนาด 4½ ปอนด์ กลิ้งทับแผ่นตัวอย่างชิ้นงานที่ติดอยู่บนแผ่นทดสอบไป-กลับ 1 รอบ โดยห้ามออกแรงกด



ลูกกิ้งกิ้งไว้ 20 นาที

3. นำแผ่นทดสอบยึดเข้ากับตัวยึดแผ่นทดสอบและถ่วงด้วยลูกตุ้ม 1 kg **รูปภาพที่ 3.10**

4. หน่วยที่ใช้ในการทดสอบเป็นเวลา โดยเวลานับตั้งแต่เริ่มแขวงลูกตุ้มจนกระทั่งแผ่นเทปกาวหลุดออกจากแผ่นทดสอบ



**รูปภาพที่ 3.10** แสดงลักษณะของ Shear test

### 3.6 การทดสอบความเสถียรระหว่างการจัดเก็บเลเทกซ์ (storage stability)

#### 3.6.1 การทดสอบความเสถียรในสภาวะอุณหภูมิห้อง

จัดเก็บเลเทกซ์ในสภาวะอุณหภูมิห้องเพื่อทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV, mechanical stability test และสมบัติของฟิล์ม เดือนละ 1 ครั้ง นาน 6 เดือน รายละเอียดในการทดสอบดังตารางที่ 3.4

**ตารางที่ 3.4** แสดงช่วงเวลาและการทดสอบความเสถียรในสภาวะการจัดเก็บที่อุณหภูมิห้อง

ช่วงเวลา	สภาวะในการทดสอบ	การทดสอบ
0-6 เดือน	อุณหภูมิห้อง	ลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV, mechanical stability test และสมบัติของฟิล์ม

#### 3.6.2 การทดสอบความเสถียรแบบเร่ง (accelerate test)

จัดเก็บเลเทกซ์ในสภาวะ 60 °C เพื่อทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV และสมบัติของฟิล์มสัปดาห์ละ 1 ครั้ง นาน 4 สัปดาห์ รายละเอียดในการทดสอบดังตารางที่ 3.5

**ตารางที่ 3.5** แสดงช่วงเวลาและการทดสอบความเสถียรแบบเร่ง

ช่วงเวลา	สภาวะในการทดสอบ	การทดสอบ
0-4 สัปดาห์	60°C	ลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV และสมบัติของฟิล์ม

### 3.6.3 การทดสอบความเสถียรโดยการปั่นกวนด้วยความเร็วรอบสูง (mechanical stability test)

การทดสอบความเสถียรของเลเทกซ์ต่อแรงเฉือนด้วยเครื่องปั่นความเร็วรอบสูง 14,000 rpm นาน 20 นาที ซึ่งการทดสอบนี้จำเป็นต้องทดสอบ เนื่องจากการนำ PSA ไปใช้งานโดยส่วนใหญ่จะใช้เครื่องจักรในการเคลือบกาว ดังนั้นเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ต้องทนต่อแรงเฉือน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากการเปลี่ยนแปลงของลักษณะเนื้อต้องคงสภาพเดิมไม่จับตัวเป็นก้อน

### 3.6.4 การทดสอบความเสถียรโดยการจัดเก็บเลเทกซ์ในสภาวะอุณหภูมิต่ำ (freeze thaw stability test)

จัดเก็บเลเทกซ์ในสภาวะ  $-20^{\circ}\text{C}$  นาน 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิห้อง 6 ชั่วโมง เพื่อทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH และ %NV วันละ 1 ครั้ง นาน 15 วัน รายละเอียดในการทดสอบดังตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 แสดงช่วงเวลาและการทดสอบความเสถียรในสภาวะอุณหภูมิต่ำ

ช่วงเวลา	สภาวะในการทดสอบ	การทดสอบ
1 - 15 วัน	$-20^{\circ}\text{C}$ 24 ชั่วโมง และ อุณหภูมิห้อง 6 ชั่วโมง	ลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้เตรียมเลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลตที่เติมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิล เพื่อศึกษาปัจจัยของชนิดของหมู่ฟังก์ชันดังกล่าวว่าจะมีผลอย่างไรต่อการยึดติด, สมบัติเชิงคอลลอยด์, สมบัติเชิงความร้อน และสมบัติการนำไปใช้งาน ผู้วิจัยคาดว่าจะได้รับกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด (Pressure sensitive adhesive, PSA) ชนิดใหม่ที่มีการปรับปรุงสมบัติการยึดติดและความเสถียรดีขึ้นกว่าเลเทกซ์ที่ไม่ได้เติมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน รายละเอียดของผลการทดลองแสดงดังนี้

#### 4.1 การสังเคราะห์เลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลต

ในช่วงแรกของการเริ่มต้นสังเคราะห์เลเทกซ์ได้เลือกใช้มอนอเมอร์ตัวหลัก 2 รายการ คือ VA และ BA พบว่าลักษณะของฟิล์มพอลิเมอร์บริเวณผิวหน้ามีลักษณะแข็งเกินไป ไม่มีลักษณะเหนียว (tackiness) จึงเปลี่ยนมอนอเมอร์ตัวหลักชนิดซอฟท์มอนอเมอร์ (soft monomer) จาก BA เป็น 2-EHA ซึ่งพิจารณาจากค่า Tg เนื่องจาก Tg ของ polyBA มีค่ามากกว่า poly(2-EHA) (Tg PBA = -54°C และ Tg poly(2-EHA) = -85°C) เพื่อปรับให้ฟิล์มพอลิเมอร์บริเวณผิวหน้าเหนียว (tackiness) มากขึ้น จึงเลือกใช้ซอฟท์มอนอเมอร์ที่มี Tg ต่ำ และผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมเลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตแสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่าการเตรียมเลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตสามารถเตรียมได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งพิจารณาจากค่า %conversion และ %yield มากกว่า 95 ส่วน %residue น้อยกว่า 3 ซึ่งทั้ง 3 ค่าได้มาจากคำนวณดังสมการที่ 4.1-4.3

$$\%Conversion = \frac{\%NV \text{ ที่ได้จากการทดลอง}}{\%NV \text{ ที่ได้จากการคำนวณ}} \times 100 \quad (4.1)$$

$$\%Yield = \frac{\text{น้ำหนักที่ได้จากการเตรียมเลเทกซ์}}{\text{น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้เตรียมเลเทกซ์}} \times 100 \quad (4.2)$$

$$\%Residue = \frac{\text{น้ำหนักกากที่ได้จากการเตรียมเลเทกซ์}}{\text{น้ำหนักของวัตถุดิบที่ใช้เตรียมเลเทกซ์}} \times 100 \quad (4.3)$$

**ตารางที่ 4.1** แสดงผลการทดลองที่ได้จากการเตรียมเลเทกซ์ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่ผสมฟังก์ชันนัลมอนอเมอร์ชนิดต่าง ๆ ตามข้อมูลสูตรการสังเคราะห์ในตารางที่ 3.3

การทดลอง	ผลการทดลอง					
	%conversion	%yield	%residue	Viscosity (cps)	pH	%NV
PSA-0	99.18	99.51	0.51	50.14	5.15	50.18
PSA-1	98.57	98.62	0.91	69.0	4.53	51.85
PSA-2	96.92	97.03	0.31	64.2	4.72	50.98
PSA-3	97.39	98.15	0.42	66.1	4.64	51.23
PSA-4	97.81	99.02	0.78	80.1	4.82	51.45
PSA-5	98.01	99.57	0.87	87.5	4.56	51.55
PSA-6	97.58	98.16	0.94	89.2	4.70	51.33
PSA-7	96.75	98.76	0.57	83.5	4.69	50.89
PSA-8	98.38	99.33	0.73	81.1	4.80	51.75
PSA-9	96.54	100.91	0.75	71.5	4.86	50.78
PSA-10	98.48	99.45	0.45	71.1	4.50	51.80
PSA-11	98.03	100.10	1.02	70.0	4.50	51.56
PSA-12	97.19	96.18	0.41	70.3	4.68	51.12
PSA-13	98.15	100.54	0.35	66.8	5.14	51.63
PSA-14	99.15	100.48	0.56	66.5	5.11	52.15
PSA-15	98.47	100.98	0.98	73.0	5.17	51.80
PSA-16	98.15	99.45	0.47	79.0	5.10	51.63
PSA-17	96.40	99.34	1.05	79.5	5.11	50.71
PSA-18	97.88	100.48	0.96	78.1	5.11	51.48
PSA-19	98.17	99.47	0.98	71.0	4.95	51.64
PSA-20	99.45	99.11	0.72	60.9	5.10	52.31

%conversion แสดงปริมาณการเปลี่ยนแปลงของมอนอเมอร์กลายเป็นพอลิเมอร์เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์, %yield แสดงปริมาณน้ำหนักที่ได้จากการเตรียมเลเทกซ์เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ซึ่งในการทดลอง PSA-9, PSA-11, PSA-13, PSA-14, PSA-15 และ PSA-18 เกิดความคลาดเคลื่อนในการชั่งน้ำหนักจึงทำให้ค่าที่ได้มากกว่า 100% และ %residue แสดงปริมาณกากที่เกิดจากการเตรียมเลเทกซ์เทียบเป็นเปอร์เซ็นต์ นอกจากนั้นเลเทกซ์ที่เตรียมได้มีค่าความหนืด (viscosity) = 50-85 cps, pH = 4.50-5.50 และ %NV 50-53 แสดงว่าทั้ง 21 ตัวอย่างที่เตรียมได้มีสมบัติเบื้องต้นใกล้เคียงกัน และสามารถนำไปทดสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติของฟิล์มได้ นอกจากนี้ค่าความหนืด (viscosity)[11] ยังสามารถบอกขนาดโมเลกุลของเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ได้หายๆ คือ ถ้าค่า viscosity

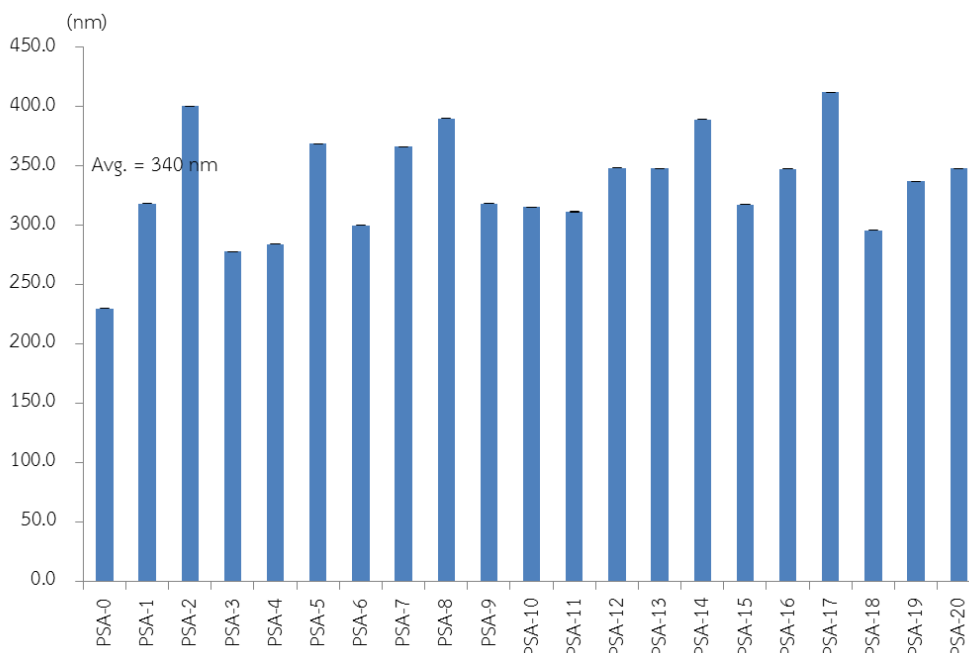
มีค่าน้อยแสดงว่ามีขนาดโมเลกุลของเลเทกซ์ที่สังเคราะห์มีขนาดเล็ก แต่ถ้าค่า viscosity มีค่ามาก แสดงว่ามีขนาดโมเลกุลของเลเทกซ์ที่สังเคราะห์มีขนาดใหญ่ นอกจากนี้ ค่า pH และ viscosity ยังสามารถบ่งบอกความเสถียรของคอลลอยด์ได้ ถ้าคอลลอยด์อยู่ในระบบสารแขวนลอยที่เสถียร ค่า pH และ viscosity จะเปลี่ยนแปลงอย่างช้าๆ เมื่อจัดเก็บเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ได้ไว้นาน

ปัจจัยสำคัญของการเตรียมพอลิไวนิลอะซิเตท-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตเลเทกซ์ด้วยกระบวนการมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไร้เซชันแบบ semi-continuous คือ ความเสถียรของเลเทกซ์ที่ได้มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำนม และไม่แยกชั้น ซึ่งเกิดจากการเลือกใช้ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่เหมาะสม[12]

## 4.2 การตรวจวิเคราะห์คุณลักษณะและสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์

### 4.2.1 ขนาดอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์

จากเลเทกซ์ที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการมินิอิมัลชันพอลิเมอร์ไร้เซชันแบบ semi-continuous พบว่าอนุภาคคอลลอยด์มีขนาด 200-400 nm แสดงดัง **รูปภาพที่ 4.1** เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับระหว่างเลเทกซ์ที่มีและไม่มีการเติมหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ พบว่าขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ที่มีการเติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์, เอสเทอร์มอนอเมอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นมากกว่าอนุภาคคอลลอยด์ที่ไม่มีการเติมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชัน (PSA-0) และยังพบว่าสูตรต่อไปนี้ ได้แก่ การทดลอง PSA-2 (MAA 1.25%wt), PSA-5 (BETA-C 0.31%wt, MAA 0.31%wt, AA 0.31%wt และ MMA 0.31%wt), PSA-7 (2-HEMA 1.25%wt), PSA-8 (2-HEA 0.63%wt, 2-HEMA 0.63%wt), PSA-14 (MAA 0.84%wt และ 2-HEMA 0.41%wt) และ PSA-17 (AA 0.93%wt และ 2-HEA 0.32%wt) มีขนาดของอนุภาคคอลลอยด์ที่ได้มีขนาดใหญ่ขึ้นมากค่อนข้างมาก



รูปภาพที่ 4.1 ขนาดอนุภาคคอลลอยด์ของ PSA-0 ถึง PSA-20

การทดสอบหาประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์วัดได้บอกถึงความเสถียรหรือความไม่เสถียรของอนุภาคคอลลอยด์เมื่อกระจายตัวในน้ำ ถ้าค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์มีค่าเป็นบวกหรือลบ แสดงว่าอนุภาคเกิดการกระจายตัวหรือมีความเสถียรดี แสดงดังตารางที่ 4.2 แต่ค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์มีค่าเป็นศูนย์ แสดงว่าอนุภาคของคอลลอยด์ที่กระจายตัวในน้ำมีความไม่เสถียร เกิดการรวมกันของอนุภาคกับจุดที่มีประจุเป็นศูนย์ (point of zero charge) หรือจุดไอโซอิเล็กทริก (isoelectric point) นอกจากนี้ค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ยังสามารถบอกให้ทราบถึงชนิดของประจุที่ผิวของอนุภาคได้

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความเสถียรของคอลลอยด์ [18,19]

Zeta potential (mV)	พฤติกรรมความเสถียรของ
0 ถึง $\pm 5$	เกิดการแยกชั้นอย่างรวดเร็ว
$\pm 10$ ถึง $\pm 30$	ความเสถียรไม่ดี
$\pm 30$ ถึง $\pm 40$	ความเสถียรระดับปานกลาง
$\pm 40$ ถึง $\pm 60$	ความเสถียรระดับดี
มากกว่า $\pm 60$	ความเสถียรระดับดีมาก

จากการทดลองพบว่าขนาดอนุภาคคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่ไม่มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ (zeta potential) และพบว่ามามีค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ที่เตรียมได้อยู่ในช่วง -36 ถึง 4 mV รายละเอียดดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงผลขนาดของอนุภาคและประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์

การทดลอง	ค่าเฉลี่ยขนาดอนุภาคของคอลลอยด์ (nm)	ค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ (mV)	Polydispersity Index
PSA-0	230.0 ± 0.06	0.1	0.019
PSA-1	318.5 ± 0.15	0.9	0.002
PSA-2	400.3 ± 0.10	2.4	0.004
PSA-3	277.8 ± 0.15	-35.0	0.022
PSA-4	284.0 ± 0.05	-35.3	0.173
PSA-5	368.8 ± 0.06	4.3	0.040
PSA-6	300.0 ± 0.03	1.7	0.033
PSA-7	366.2 ± 0.10	-31.2	0.068
PSA-8	390.1 ± 0.06	0.6	0.028
PSA-9	318.5 ± 0.29	1.4	0.025
PSA-10	315.2 ± 0.06	1.8	0.546
PSA-11	311.4 ± 0.06	-33.5	0.039
PSA-12	348.4 ± 0.17	-32.4	0.015
PSA-13	347.7 ± 0.06	0.8	0.025
PSA-14	389.1 ± 0.06	2.7	0.055
PSA-15	317.5 ± 0.06	-19.8	0.053
PSA-16	347.4 ± 0.06	-35.4	0.154
PSA-17	412.0 ± 0.03	-10.2	0.051
PSA-18	295.7 ± 0.10	-20.4	0.100
PSA-19	337.0 ± 0.06	-34.0	0.056
PSA-20	347.8 ± 0.06	-36.2	0.015

จากผลการทดลองแบ่งการวิเคราะห์เป็นกลุ่มมอนอเมอร์ ดังนี้

1. กลุ่มที่ 1 (การทดลอง PSA-1 ถึง PSA-3) หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์
2. กลุ่มที่ 2 (การทดลอง PSA-4) หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์
3. กลุ่มที่ 3 (PSA-6 ถึง PSA-8) หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์
4. กลุ่มที่ 4 (การทดลอง PSA-5) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและเอสเทอร์มอนอเมอร์
5. กลุ่มที่ 5 (PSA-9 ถึง PSA-11 และ PSA-13 ถึง PSA-15) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮ

ดรอกลิลมอนอเมอร์

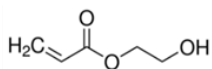
6. กลุ่มที่ 6 (PSA-12 และ PSA-16) การผสมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์
7. กลุ่มที่ 7 (PSA-17 ถึง PSA-18) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์แต่เพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์มากขึ้นกว่าในกลุ่มที่ 5
8. กลุ่มที่ 8 (PSA-19 ถึง PSA-20) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ โดยลดปริมาณไฮดรอกซิลมอนอเมอร์เหลือเพียง 0.05 %wt

กลุ่มที่ 1 (การทดลอง PSA-1 ถึง PSA-3) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ในการทดลอง **PSA-3 (AA 1.25%wt)** แสดงประจวบนิวอนุภาคของคอลลอยด์ได้ชัดเจน ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ที่มีอิทธิพลต่อค่าประจวบนิวอนุภาคของคอลลอยด์ คือ AA เนื่องจากโครงสร้างของ AA ที่มีความเป็นขั้วสูงกว่า BETA-C และ MAA จึงแสดงประจวบนิวของอนุภาคคอลลอยด์ได้

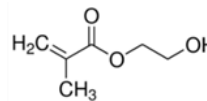
กลุ่มที่ 2 (การทดลอง PSA-4) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ในการทดลอง **PSA-4 (MMA 1.25%wt)** แสดงประจวบนิวอนุภาคของคอลลอยด์ได้ชัดเจน แสดงว่าการเติมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มีอิทธิพลต่อค่าประจวบนิวอนุภาคของคอลลอยด์

กลุ่มที่ 3 (PSA-6 ถึง PSA-8) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ในการทดลอง **PSA-7 (2-HEMA 1.25%wt)** มีค่าประจวบนิวอนุภาคของคอลลอยด์เป็นลบต่ำที่สุด นั่นคือมีความเสถียรมากที่สุดในกลุ่มที่ 3 ถ้าพิจารณาจากโครงสร้างของมอนอเมอร์เทียบกันระหว่าง 2-HEA และ 2-HEMA (รูปภาพที่ 4.2) เป็นไปได้ว่า 2-HEMA มีโครงสร้างที่เกะกะ (steric) มากกว่า 2-HEA แต่โครงสร้างที่เกะกะของ 2-HEMA นี้ไม่น่าจะมีผลต่อค่าประจวบ ดังนั้นคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากประสิทธิภาพในการเข้าทำปฏิกิริยา (Reactivity ratio) ระหว่าง VA / 2-HEA และ VA / 2-HEMA คือ  $r_{VA} = 1.67 / r_{2-HEA} = 0.43$  [13] และ  $r_{VA} = 0.90 / r_{2-HEMA} = 1.65$  [14] แสดงว่า 2-HEMA มีความว่องไวในการเกิดโคพอลิเมอร์กับ VA ได้เร็วกว่า 2-HEA ทำให้ 2-HEA อาจจะไม่จะได้เป็นส่วนหนึ่งของสายโซ่พอลิเมอร์ (backbone copolymer) **PSA-7 (2-HEMA 1.25%wt)** มีค่าประจวบนิวอนุภาคของคอลลอยด์เป็นลบต่ำที่สุด





2-Hydroxy ethyl acrylate(-HEM)



2-Hydroxy ethyl methacrylate (2-HEMA)

#### รูปภาพที่ 4.2 แสดงลักษณะโครงสร้างของ 2-HEM และ 2HEMA

กลุ่มที่ 4 (การทดลอง PSA-5) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและเอสเทอร์มอนอเมอร์ ไม่สามารถเพิ่มประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ได้

กลุ่มที่ 5 (PSA-9 ถึง PSA-11 และ PSA-13 ถึง PSA-15) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ในอัตราส่วน 0.84 : 0.41 จะสามารถเพิ่มประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ได้ พบว่า **PSA-11** ( AA 0.84%wt, 2-HEA 0.41%wt) ค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์มีความเสถียรมากที่สุดในกลุ่มที่ 5 ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของกลุ่มที่ 1, 3 และ 4 คือ ประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์มีค่ามากต้องประกอบด้วย AA และ 2-HEMA

กลุ่มที่ 6 (PSA-12 และ PSA-16) การผสมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ในอัตราส่วน 0.84 : 0.41 จะสามารถเพิ่มประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ได้ พบว่า **PSA-12** (MMA 0.84%wt, 2-HEA 0.41%wt) และ **PSA-16** (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) ค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์มีความเสถียรมาก ซึ่งจากผลการทดลองของกลุ่มที่ 6 สอดคล้องกับการทดลองของกลุ่มที่ 1, 3, 4 และ 5 คือ การเพิ่มประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ต้องประกอบด้วย MMA และ 2-HEMA

กลุ่มที่ 7 (PSA-17 ถึง PSA-18) การเพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ในอัตราส่วน 0.93 : 0.32 จากผลการทดลองค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์มีความเสถียรปานกลาง

กลุ่มที่ 8 (PSA-19 ถึง PSA-20) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ในอัตราส่วน 0.90 : 0.30 : 0.05 พบว่า **PSA-19** (BETA-C 0.30%wt, MAA 0.30%wt, AA 0.30%wt, MMA 0.30%wt, 2-HEA 0.05%wt) และ **PSA-20** (BETA-C 0.30%wt, MAA 0.30%wt, AA 0.30%wt, MMA 0.30%wt, 2-HEMA 0.05%wt) ค่ามีความเสถียรมากกว่ากลุ่มอื่นๆ เนื่องจากประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ในอัตราส่วนที่มากกว่ากลุ่มอื่นๆ จึงทำให้ค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์มีค่ามาก

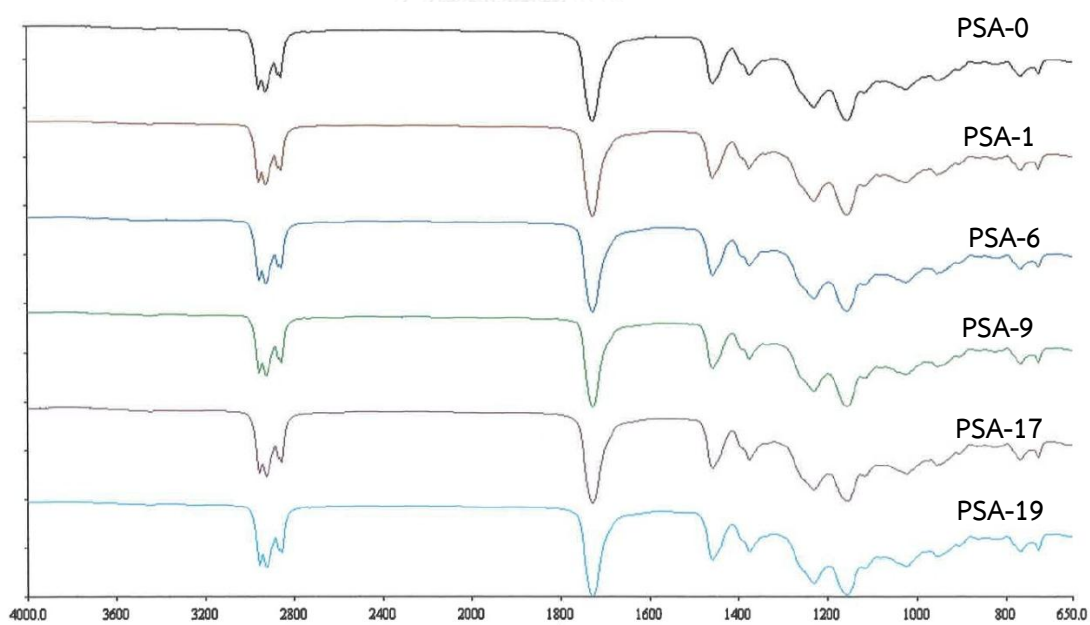
จากผลการทดลองค่าประจุบนผิวอนุภาคของคอลลอยด์ทั้ง 8 กลุ่ม สามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ คือ **AA**, หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ **MMA** และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ **2-HEMA** มีอิทธิพลต่อความเสถียรของเลเทกซ์ที่อยู่ในรูปคอลลอยด์ได้ดี ส่วน Polydispersity index (การกระจายอนุภาคคอลลอยด์) ของ PSA-0 - PSA-20 ค่าที่ได้น้อยกว่า 1 แสดงว่าคอลลอยด์ที่เตรียมได้มีอนุภาคนขนาดเท่ากันอย่างสม่ำเสมอ

#### 4.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ได้ด้วย FT-IR

จากผลการทดสอบที่ได้พบว่าลักษณะของสเปกตรัมของ PSA-0 – PSA-20 ซึ่งมีลักษณะสัญญาณเหมือนกันทั้งหมด เนื่องจากชนิดและปริมาณของมอนอเมอร์ตัวหลักที่ใช้ในการสังเคราะห์เหมือนกัน และได้เติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์เพียงเล็กน้อย และมีหมู่ฟังก์ชันที่ซ้ำกันกับมอนอเมอร์หลักสองชนิด จึงทำให้ไม่สามารถเห็นความแตกต่างของสัญญาณ IR ของแต่ละตัวอย่างได้จาก **ตารางที่ 4.4** แสดงความถี่และแถบการดูดกลืนของเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 4.4 แสดงความถี่และแถบการดูดกลืนของเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ได้

Frequency	Assignment
3,446	O-H stretching carboxyl and hydroxyl group
2,957	-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub> bending
2,928	C-H bending
2,872	-CH <sub>2</sub> , -CH <sub>3</sub> bending
2,860	-OCH <sub>3</sub>
1,730	C=O stretching carboxyl group
1,459	carboxylate group stretching of acrylate
1,378	C-O stretching carboxyl group
1,232	C-O stretching hydroxyl group (primary alcohol)
1,158	C-O stretching hydroxyl group
955	O-H bending carboxyl group



รูปภาพที่ 4.3 IR สเปกตรัมของ PSA-0, PSA-1, PSA-6, PSA-9, PSA-17 และ PSA-19

#### 4.2.3 สมบัติเชิงความร้อนด้วย differential scanning calorimetry (DSC)

โดยส่วนใหญ่ค่า  $T_g$  ของเลเทกซ์ที่นำไปใช้ในงานประเภท PSA อยู่ในช่วง  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  เนื่องจากองค์ประกอบของมอนอเมอร์ตัวหลักเป็นซอพท์มอนอเมอร์มากกว่า 80%wt จึงทำให้  $T_g$  มีค่าติดลบ ส่งผลให้ลักษณะฟิล์มพอลิเมอร์ของ PSA มีสมบัติเฉพาะที่สภาวะอุณหภูมิห้อง คือ เมื่อใช้มือสัมผัสบริเวณผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์จะมีลักษณะเหนียว (tackiness) โดยลักษณะเฉพาะนี้ทำให้เกิดแรงยึดติดบนวัสดุได้ง่าย โดยใช้แรงกดเพียงเล็กน้อยก็สามารถยึดติดกับวัสดุได้ [2] สำหรับเลเทกซ์ที่มีการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันหมู่คาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ ทำให้ค่า  $T_g$  ลดลงอยู่ในช่วง  $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$  ถึง  $-56\text{ }^{\circ}\text{C}$  รายละเอียดดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงผล  $T_g$  ของ PSA-0 ถึง PSA-20

การทดลอง	หมู่ฟังก์ชัน						$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ on set)
	BETA-C	MAA	AA	MMA	2-HEA	2-HEMA	
PSA-0	-	-	-	-	-	-	-46.1
PSA-1	1.25	-	-	-	-	-	-49.8
PSA-2	-	1.25	-	-	-	-	-51.8
PSA-3	-	-	1.25	-	-	-	-51.3
PSA-4	-	-	-	1.25	-	-	-52.9
PSA-5	0.31	0.31	0.31	0.31	-	-	-52.8
PSA-6	-	-	-	-	1.25	-	-52.4
PSA-7	-	-	-	-	-	1.25	-51.5
PSA-8	-	-	-	-	0.63	0.63	-56.2
PSA-9	0.84	-	-	-	0.41	-	-55.1
PSA-10	-	0.84	-	-	0.41	-	-55.4
PSA-11	-	-	0.84	-	0.41	-	-55.0
PSA-12	-	-	-	0.84	0.41	-	-55.7
PSA-13	0.84	-	-	-	-	0.41	-50.9
PSA-14	-	0.84	-	-	-	0.41	-50.4
PSA-15	-	-	0.84	-	-	0.41	-50.3
PSA-16	-	-	-	0.84	-	0.41	-50.9
PSA-17	-	-	0.93	-	0.32	-	-54.4
PSA-18	-	-	0.93	-	-	0.32	-50.8
PSA-19	0.30	0.30	0.30	0.30	0.05	-	-51.5
PSA-20	0.30	0.30	0.30	0.30	-	0.05	-51.4

สำหรับค่า Tg ที่เพิ่มเมื่อมีการเติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คาดว่าเกิดจากหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ที่เติมซึ่งการทดลองแต่ละกลุ่มมีผลการทดลองดังนี้

กลุ่มที่ 1 (การทดลอง PSA-1 ถึง PSA-3) พบว่าการเติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ คือ BETA-C, MAA และ AA สามารถปรับให้ Tg ลดได้ จาก  $-46^{\circ}\text{C}$  (PSA-0) เป็น  $-51^{\circ}\text{C}$  (PSA-1, PSA-3)

กลุ่มที่ 2 (การทดลอง PSA-4) พบว่าการเติมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ MMA สามารถปรับให้ Tg ลดได้ จาก  $-46^{\circ}\text{C}$  (PSA-0) เป็น  $-52^{\circ}\text{C}$  (PSA-4)

กลุ่มที่ 3 (การทดลอง PSA-6 ถึง PSA-8) เมื่อเปรียบเทียบกันในกลุ่มของมอนอเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิล พบว่าเมื่อเติมทั้งมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิล 2 ชนิด คือ 2-HEA และ 2-HEMA สามารถปรับให้ Tg ลดได้ จาก  $-46^{\circ}\text{C}$  (PSA-0) เป็น  $-56^{\circ}\text{C}$  (PSA-8)

กลุ่มที่ 4 (การทดลอง PSA-5) พบว่าการเติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล และเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ BETA-C, MAA, AA และ MMA ในอัตราส่วน 0.94 : 0.31 สามารถปรับให้ Tg ลดได้ จาก  $-46^{\circ}\text{C}$  (PSA-0) เป็น  $-52^{\circ}\text{C}$  (PSA-5)

กลุ่มที่ 5 (การทดลอง PSA-9 ถึง PSA-11 และ PSA-13 ถึง PSA-15) พบว่าการเติมมอนอเมอร์ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลจาก 2-HEA ผสมกับมอนอเมอร์ที่มีหมู่คาร์บอกซิลิก (PSA-9, PSA-10 และ PSA-11) สามารถลด Tg ให้ได้ต่ำถึง  $-55^{\circ}\text{C}$  แต่ในกรณี 2-HEMA กลับพบว่าค่า Tg ลดลงถึงเพียง  $-50$  ถึง  $-51^{\circ}\text{C}$  น่าจะเป็นเพราะหมู่ methyl บนสายโซ่หลักของ 2-HEMA ขัดขวางการเคลื่อนผ่านกันของสายโซ่ ทำให้ต้องใช้พลังงานสูงขึ้นกว่ากรณีที่เติม 2-HEA

กลุ่มที่ 6 (การทดลอง PSA-12 และ PSA-16) พบว่าการผสมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ สามารถปรับให้ Tg ลดได้ จาก  $-46^{\circ}\text{C}$  (PSA-0) เป็น  $-55^{\circ}\text{C}$  (PSA-12) ซึ่งคาดว่า Tg ลดลงเกิดจาก 2-HEA ที่เติมเข้าไป 0.41%wt

กลุ่มที่ 7 (การทดลอง PSA-17 ถึง PSA-18) พบว่าการผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ แต่เพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมากขึ้นกว่าในกลุ่มที่ 5 สามารถปรับให้ Tg ลดได้ จาก  $-46^{\circ}\text{C}$  (PSA-0) เป็น  $-54^{\circ}\text{C}$  (PSA-17) ซึ่งคาดว่า Tg ลดลงเกิดจาก 2-HEA 0.32%wt

กลุ่มที่ 8 (การทดลอง PSA-19 ถึง PSA-20) พบว่าการผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์มอนอเมอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ โดยลดปริมาณไฮดรอกซิลมอนอเมอร์เหลือเพียง 0.05 %wt สามารถปรับให้ Tg ลดได้ จาก  $-46^{\circ}\text{C}$  (PSA-0) เป็น  $-51^{\circ}\text{C}$  (PSA-19) ซึ่งคาดว่า Tg ลดลงเกิดจาก 2-HEA 0.05%wt

จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่มีผลต่อค่า Tg คือ การเติมหมู่ฟังก์ชันหมู่คาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ จากศึกษาของ Medina และคณะ[15] ระบุว่าค่า Tg ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเคมีและลักษณะโครงสร้างโดยมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งหมด 3 ปัจจัย

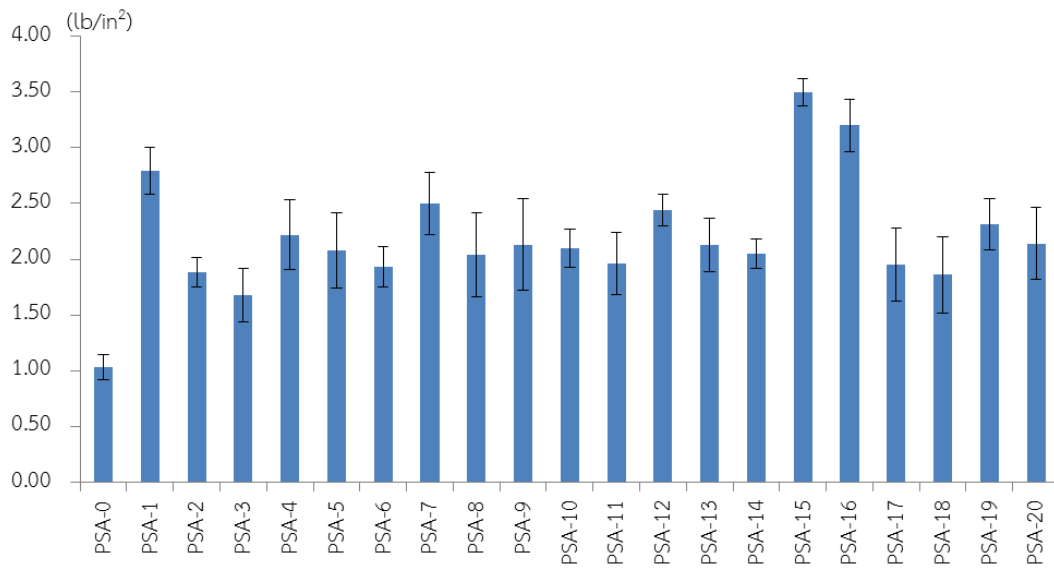
1. ลักษณะความยืดหยุ่นของพอลิเมอร์สายโซ่หลัก (flexible main chain) ซึ่งเกิดการเลือกซอพท์มอนอเมอร์อย่างเหมาะสมเพื่อเพิ่มแรงสำหรับการยึดติด (polar force) ส่งผลให้ Tg ลดลง ทำให้สมบัติของพอลิเมอร์เปลี่ยนแปลงดังนี้ ความเหนียวของฟิล์ม (tackiness) เพิ่มขึ้น, ความแข็ง (hardness) ลดลง, ความทนทานต่อแรงดึง (tensile strength) ลดลง และ ความสามารถในการยืดตัว (elongation at break) เพิ่มขึ้น
2. ขั้วของมอนอเมอร์ (polar monomer) สามารถเพิ่มความแข็งแรงภายในโมเลกุล (cohesion) และความแข็งแรงในการยึดเกาะวัสดุอื่น (adhesion) เนื่องจากมีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (dipole interaction) หรือพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น ส่งผลกระทบต่อค่า Tg เพิ่มขึ้น
3. ผลกระทบจากลักษณะโครงสร้างร่างแห การเพิ่มความกะกะของพอลิเมอร์ทำให้ลักษณะโครงสร้างร่างแหลดลงทำให้ค่า Tg เพิ่มขึ้น

ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ที่มีผลต่อค่า  $T_g$  ที่ลดลง คือ หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ 2-HEA และ 2-HEMA พิจารณาจากการทดลอง PSA-8 (2-HEA 0.63%wt, 2-HEMA 0.63%wt) สามารถปรับให้  $T_g$  ลด จาก  $-46^{\circ}\text{C}$  (PSA-0) เป็น  $-56^{\circ}\text{C}$  (PSA-8) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ 2-HEA และ 2-HEMA มีความยืดหยุ่นกว่ากรณีที่เติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล หรือเอสเทอร์มอนอเมอร์

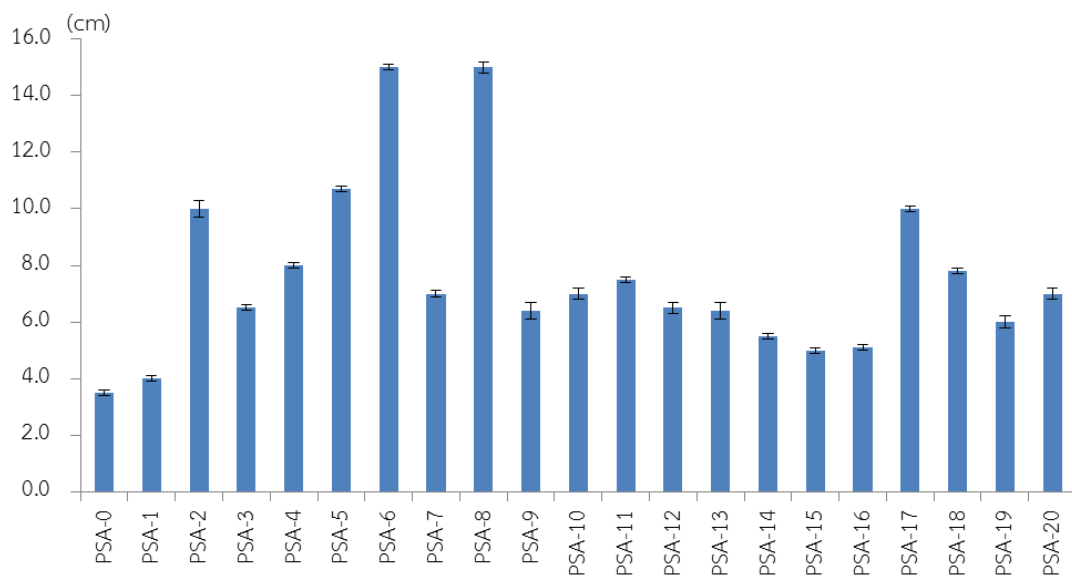
#### 4.3 การทดสอบการนำไปใช้งานสำหรับกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด (pressure sensitive adhesive, PSA) [16]

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบการยึดติดของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่มีอิทธิพลจากการเติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ ซึ่งส่งผลต่อการปรับปรุงสมบัติการยึดติด คือ ความเหนียวของฟิล์มกาว (tackiness), ความแข็งแรงในการยึดติดวัสดุอื่นๆ (adhesion) และความแข็งแรงภายในโมเลกุล (cohesion) รายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กลุ่มที่ 1 (การทดลอง PSA-1 ถึง PSA-3) หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์
2. กลุ่มที่ 2 (การทดลอง PSA-4) หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์
3. กลุ่มที่ 3 (PSA-6 ถึง PSA-8) หมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์
4. กลุ่มที่ 4 (การทดลอง PSA-5) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและเอสเทอร์มอนอเมอร์
5. กลุ่มที่ 5 (PSA-9 ถึง PSA-11 และ PSA-13 ถึง PSA-15) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์
6. กลุ่มที่ 6 (PSA-12 และ PSA-16) การผสมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์
7. กลุ่มที่ 7 (PSA-17 ถึง PSA-18) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์แต่เพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์มากขึ้นกว่าในกลุ่มที่ 5
8. กลุ่มที่ 8 (PSA-19 ถึง PSA-20) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์โดยลดปริมาณไฮดรอกซิลมอนอเมอร์เหลือเพียง 0.05 %wt

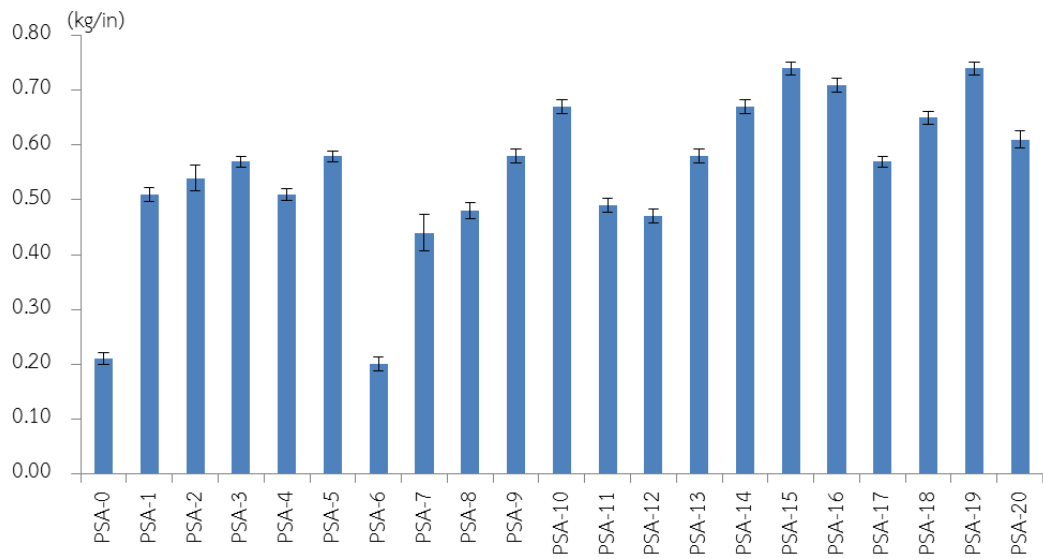


รูปภาพที่ 4.4 ผลการทดสอบการยึดติดแบบ Loop tack ของ PSA-0 ถึง PSA-20

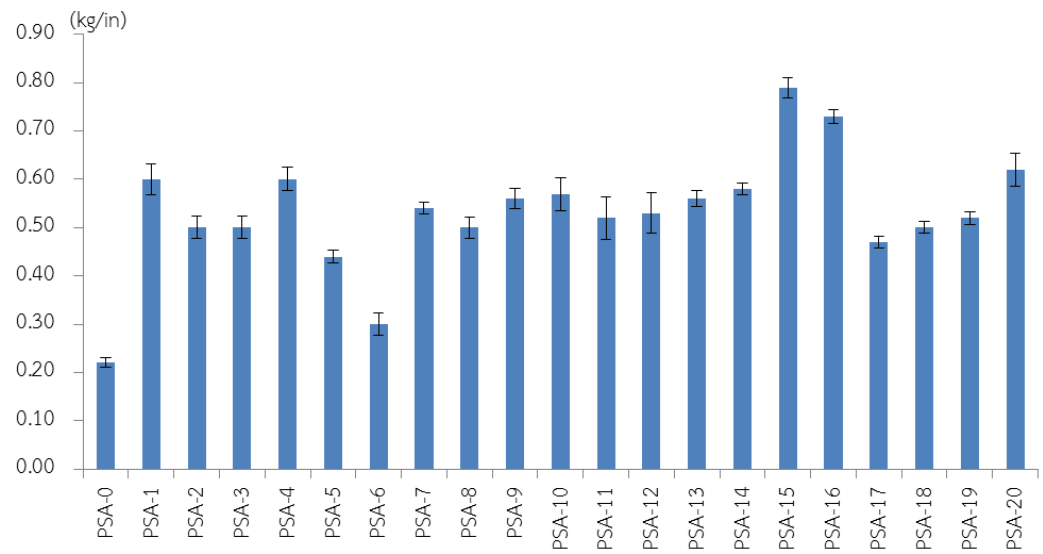


รูปภาพที่ 4.5 ผลการทดสอบการยึดติดแบบ Rolling ball tack ของ PSA-0 ถึง PSA-20

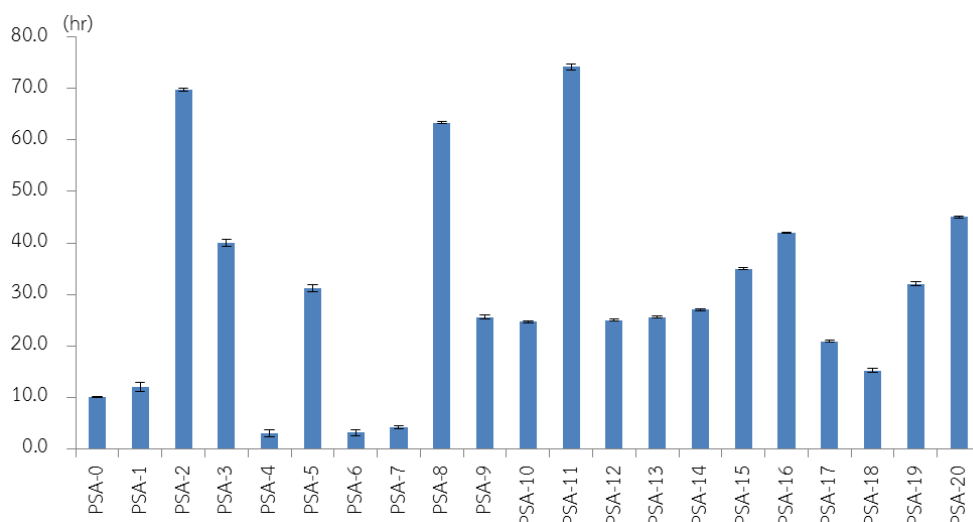




รูปภาพที่ 4.6 การทดสอบลอกออกที่มุม  $90^{\circ}$  ตามแนวแรงดึง ( $90^{\circ}$  peel adhesion) ของ PSA-0 ถึง PSA-20



รูปภาพที่ 4.7 การทดสอบลอกออกที่มุม  $180^{\circ}$  ตามแนวแรงดึง ( $180^{\circ}$  peel adhesion) ของ PSA-0 ถึง PSA-20



**รูปภาพที่ 4.8** ผลการทดสอบความแข็งแรงภายในโมเลกุลกาว (cohesion, hr) ของ PSA-0 ถึง PSA-20

จากรูปภาพที่ 4.4 และ รูปภาพที่ 4.5 แสดงผลการทดสอบพฤติกรรมการยึดติดบริเวณผิวหน้าของวัสดุพบว่า การทดสอบแบบ loop tack และ rolling ball tack มีความสอดคล้องกัน เมื่อฟิล์มบริเวณผิวหน้าของพอลิเมอร์มีความเหนียว (tackiness) มาก ส่งผลทำให้แรงเริ่มต้นของการยึดติด (initial bonding strength force) มีค่ามาก ซึ่งการทดสอบการยึดติดโดย loop tack และ rolling ball tack ลักษณะของการทดสอบทั้ง 2 แบบ ออกแบบมาเพื่อทำให้ผิวหน้าเนื้อกาวมีการสัมผัสกับผิวชิ้นงานมาตรฐานในระยะเวลาสั้นๆ (quick stick test) ถ้าผลการทดสอบแบบ loop tack มีค่ามาก แต่ผลการทดสอบแบบ rolling ball tack มีค่าน้อย แสดงว่าฟิล์มพอลิเมอร์บริเวณผิวหน้ามีความเหนียวมาก ส่วนจากรูปภาพที่ 4.6 และ รูปภาพที่ 4.7 แสดงการทดสอบการลอกออกที่มุม 90° และ 180° ตามแนวแรงดึงเป็นแรงที่ใช้ในการดึงเนื้อกาวออกจากพื้นผิววัสดุโดยมีเงื่อนไขของเวลาและแรงที่ใช้ในการติดลงบนแผ่นชิ้นงานมาตรฐานที่กำหนด ในการแบ่งชนิดของกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกดสามารถพิจารณาได้จากผลการทดสอบการทดสอบการลอกออกที่มุม 180° รายละเอียดตามตารางที่ 4.6 ค่าการลอกออกที่มุม 180° ที่นำไปใช้งานประเภท OPP tape, sticker และ label เป็นกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกดชนิด semi-removable ค่าการลอกออกที่มุม 180° ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.6 – 0.8kg/in

**ตารางที่ 4.6** ชนิดของกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด (Pressure sensitive adhesive, PSA) โดยแบ่งตามการทดสอบการลอกออกที่มุม  $180^\circ$  [16]

PSA grade	$180^\circ$ peel adhesion (kg/in)
Excellent permanent	>1.4
Permanent	1.0 – 1.4
Semi-removable	0.6 – 0.8
Removeable and repositionable	0.2 – 0.4
Excellent removable	<0.1

และจากรูปภาพที่ 4.8 การทดสอบความแข็งแรงภายในโมเลกุล โดยระยะเวลาที่ทำให้วัสดุที่เคลือบกาวเกิดการเคลื่อนตัวออกจากเส้นที่กำหนดโดยมีน้ำหนักถ่วงไว้ เป็นค่าที่แสดงถึงความแข็งแรงของพันธะเคมีหรือการยึดติดเชิงกลที่มีอยู่ในเนื้อกาวของการทดลองแต่ละกลุ่มสามารถอธิบายได้ดังนี้

กลุ่มที่ 1 (การทดลอง PSA-1 ถึง PSA-3) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ของการทดลอง PSA-1 (BETA-C 1.25%wt), PSA-2 (MAA 1.25%wt) และ PSA-3 (AA 1.25%wt) พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ คือ **BETA-C** และ **MAA** สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์อื่นๆ ในการทดลองกลุ่มที่ 1 รายละเอียดดังนี้

1. Tackiness พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ของการทดลอง **PSA-1** ซึ่งประกอบด้วย BETA-C 1.25%wt มีอิทธิพลต่อความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ BETA-C มีลักษณะโครงสร้างที่ pendent chain ยื่นออกมา จึงมีสมบัติความยืดหยุ่นทำให้ฟิล์มของพอลิเมอร์มีความเหนียวหรือสามารถสร้างแรงยึดเกาะกับวัสดุได้มากกว่าหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ อื่นๆ

2. Peel adhesion

2.1 การทนต่อการลอกออกที่มุม  $90^\circ$  พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ ผลการทดสอบที่ได้ไม่มีนัยสำคัญที่แตกต่างกัน

2.2 การทนต่อการลอกออกที่มุม  $180^\circ$  พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ คือ **PSA-2** (MAA 1.25%wt) สามารถเพิ่มความทนต่อการลอกออกที่มุม  $180^\circ$  ได้ เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนของ

-COOH ทำให้เกิดการสร้างแรงยึดระหว่างผิวของฟิล์มพอลิเมอร์และแผ่น stainless steel ได้ดีกว่า หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ อื่นๆ

3. ความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาว พบว่าการทดลอง PSA-2 (MAA 1.25%wt) สามารถปรับ ปรุบความแข็งแรงภายในโมเลกุลได้ เนื่องจาก MAA มีลักษณะโครงสร้างที่แข็งแรงจากตำแหน่ง C=O ยึดกันด้วยแรงแบบ dipole-dipole จึงทนต่อการถ่วงตู่มน้ำหนักได้มากกว่าหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์อื่น ๆ

กลุ่มที่ 2 (การทดลอง PSA-4) เพิ่มหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ของการทดลอง PSA-4 (MMA 1.25%wt) พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ MMA ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้ รายละเอียดดังนี้

1. Tackiness การทดลอง PSA-4 พบว่าความเหนียวของฟิล์มในการทดลองนี้ไม่ได้มีค่าสูงอย่างชัดเจน เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ MMA ไม่เกาะเกาะ เหมือนกับ BETA-C จึงทำให้ลักษณะฟิล์มพอลิเมอร์ที่ได้มีลักษณะยึดหยุ่นไม่มากพอ

2. Peel adhesion

2.1 การทนต่อการลอกออกที่มุม 90° พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ไม่มีนัยสำคัญที่แตกต่างจากการทดลองอื่นๆ

2.2 การทนต่อการลอกออกที่มุม 180° พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ PSA-4 (MMA 1.25%) สามารถเพิ่มความทนต่อการลอกออกที่มุม 180° ได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ MMA มีความเป็นขั้วสูง (polar monomer) จึงทำให้เกิดการสร้างแรงยึดระหว่างผิวของฟิล์มพอลิเมอร์และแผ่น stainless steel ได้

3. ความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาวจากการทดลอง PSA-4 (MMA 1.25%wt) พบว่า มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลน้อย เนื่องจากแรงภายในโมเลกุลแบบ dipole-dipole น้อยกว่าหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์

กลุ่มที่ 3 (การทดลอง PSA-6 ถึง PSA-8) เพิ่มหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ของการทดลอง PSA-6 (2-HEA 1.25%wt), PSA-7 (2-HEMA 1.25%wt) และ PSA-8 (2-HEA 0.63%wt, 2-HEMA 0.63%wt) พบว่าไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้ รายละเอียดดังนี้

1. Tackiness จากการทดลองพบว่า PSA-7 ซึ่งประกอบด้วย 2-HEMA 1.25%wt สามารถเพิ่มความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ 2-HEMA มีความเกะกะ (steric) ของ methyl group จึงมีสมบัติความยืดหยุ่นมากกว่า 2-HEA ซึ่งผลการทดสอบที่ได้น้อยกว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์
2. Peel adhesion จากการทดลองการทนต่อลอกออกที่มุม 90° และ มุม 180° พบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ 2-HEA และ 2-HEMA ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการทนต่อการลอกออกที่มุม 90° และ 180° ได้ เนื่องจากการสร้างแรงยึดติด (bonding) ในกรณีหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ เป็นการสร้างพันธะไฮโดรเจนของกาวบววัสดุไม่ความแข็งแรงมากพอในการยึดติดวัสดุ
3. สมบัติความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาว พบว่าการทดลอง PSA-8 (2-HEA 0.63%wt, 2-HEMA 0.63%wt) สามารถปรับปรุงความแข็งแรงภายในโมเลกุลได้ แต่ค่าที่ได้จากการทดสอบยังไม่มากพอ เมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ 2-HEA และ 2-HEMA ความแข็งแรงภายในโมเลกุลน้อยกว่าหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์

การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์เพียง **1 หมู่** คือ หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ในการทดลองกลุ่มที่ 1 – 3 พบว่าการทดลองกลุ่มที่ 1 คือ การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้ดีที่สุด ในการทดลอง PSA-1 (BETA-C 1.25%wt) และ PSA-2 (MAA 1.25%wt) หากสามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดให้ดีขึ้นอีกกว่าการเติมหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 1 หมู่ จึงสนใจนำหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 2 หมู่ โดยได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเป็นการทดลองกลุ่มที่ 4 – 6

กลุ่มที่ 4 (การทดลอง PSA-5) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและเอสเทอร์มอนอเมอร์ของการทดลอง PSA-5 ประกอบด้วย BETA-C 0.315%wt, MAA 0.31%wt, AA 0.31%wt และ MMA 0.31%wt พบว่าไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้ รายละเอียดดังนี้

1. Tackiness จากผลการทดลอง PSA-5 พบว่าความเหนียวของฟิล์มในการทดลองนี้ไม่ได้มีค่าสูงอย่างชัดเจน ซึ่งผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับการทดลองกลุ่มที่ 1 เนื่องจากในการทดลองกลุ่มที่ 1 มีองค์ประกอบของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล คือ BETA-C 1.25%wt ซึ่งมีเพียงหมู่เดียวก็สามารถปรับปรุงสมบัติความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ แต่สำหรับในการทดลอง PAS-5 ปริมาณของ BETA-C 0.31%wt ซึ่งปริมาณน้อยกว่า ถึงแม้ว่าจะเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์รายการอื่น คือ MAA 0.31%wt, AA 0.31%wt และหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ MMA 0.31%wt ก็ไม่สามารถปรับปรุงความเหนียวของฟิล์ม (tackiness) ได้

2. Peel adhesion จากการทดลองพบว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและเอสเทอร์มอนอเมอร์สามารถปรับปรุงสมบัติการทนต่อการลอกออกที่มุม 90° และ 180° ได้เนื่องจากการสร้างแรงยึดติด (bonding) คือการสร้างพันธะไฮโดรเจนของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ -COOH ระหว่างกาว และวัสดุความแข็งแรงมากพอในการยึดติดวัสดุ

3. การปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาว จากการทดลองพบว่า PSA-5 (BETA-C 0.31%wt, MAA 0.31%wt, AA 0.31%wt และ MMA 0.31%wt) มีความแข็งแรงภายในโมเลกุลน้อย เมื่อเทียบกับการทดลอง PSA-2 ซึ่งประกอบด้วย MAA 1.25%wt

กลุ่มที่ 5 (การทดลอง PSA-9 ถึง PSA-11 และ PSA-13 ถึง PSA-15) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ พบว่าการทดลอง **PSA-15** ประกอบด้วย AA 0.84%wt และ 2-HEMA 0.41%wt สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้ เมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์อื่นๆ รายละเอียดดังนี้

1. Tackiness พบว่าการทดลอง **PSA-15** (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถเพิ่มความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ เนื่องจากการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ 2-HEMA สามารถปรับปรุงความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้

## 2. Peel adhesion

2.1 การทนต่อการลอกออกที่มุม 90° พบว่าเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ **PSA-15** (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถเพิ่มความทนต่อการลอกออกที่มุม 90° ได้

2.2 การทนต่อการลอกออกที่มุม 180° พบว่าเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ **PSA-15** (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถเพิ่มความทนต่อการลอกออกที่มุม 180° ได้ สามารถนำ **PSA-15** มาใช้ทาประเภท OPP tape, sticker และ label เป็นกาประเภทที่ว่องไวต่อแรงกดชนิด semi-removable ดังตารางที่ 4.6 เนื่องจากผลการทดสอบการลอกออกที่มุม 180° มากกว่า 0.6 kg/in

3. ความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาว พบว่าทดลอง **PSA-11** (AA 0.84%wt, 2-HEA 0.41%wt) สามารถปรับปรุงความแข็งแรงภายในโมเลกุลได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ AA มีความแข็งแรงและอัตราส่วนที่ใช้มีปริมาณมากกว่า 2-HEA

กลุ่มที่ 6 (การทดลอง PSA-12 และ PSA-16) การผสมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ พบว่าการทดลอง **PSA-16** ประกอบด้วย MMA 0.84%wt และ 2-HEMA 0.41%wt สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดที่ดี เมื่อเทียบกับหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์อื่นๆ รายละเอียดดังนี้

1. Tackiness พบว่า **PSA-16** (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถเพิ่มความความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้มากที่สุด คือ การเพิ่มหมู่ฟังก์ชัน 2-HEMA สามารถปรับปรุงความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้

## 2. Peel adhesion

2.1 การทนต่อการลอกออกที่มุม 90° พบว่าเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ **PSA-16** (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถเพิ่มความทนต่อการลอกออกที่มุม 90° ได้

2.2 การทนต่อการลอกออกที่มุม 180° พบว่าเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ **PSA-16** (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถเพิ่มความทนต่อการลอกออกที่มุม 180° ได้

เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ MMA มีความเป็นขั้วสูง (polar monomer) จึงทำให้เกิดการสร้างแรงยึดระหว่างผิวของฟิล์มพอลิเมอร์และแผ่น stainless steel ได้ ซึ่ง PSA-16 สามารถนำมาใช้งานประเภท OPP tape, sticker และ label เป็นกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกดชนิด semi-removable ดังตารางที่ 4.6 โดยผลการทดสอบการลอกออกที่มุม  $180^\circ$  มากกว่า 0.6 kg/in

3. ความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาวจากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

กลุ่มที่ 7 (การทดลอง PSA-17 ถึง PSA-18) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์แต่เพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์มากขึ้นกว่าในกลุ่มที่ 5 พบว่าการทดลองไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้รายละเอียดดังนี้

1. Tackiness จากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณ AA มากขึ้น คือ 0.93%wt คาดว่าเนื่องจากลักษณะการฟอร์มฟิล์มของเลเทกซ์ ขณะเตรียมชิ้นงานเคลือบกาวไม่ดี เกิดลักษณะ dewet แสดงดังรูปภาพที่ 4.9 ทำให้ผลการทดสอบความเหนียวฟิล์มพอลิเมอร์น้อยกว่ากลุ่มอื่นๆ ลักษณะฟิล์มเลเทกซ์ dewet สามารถได้แก้ไขได้ด้วยการเติม Aerosol OT 75 ซึ่งทำหน้าที่เป็น wetting agent เพื่อปรับให้เลเทกซ์แผ่กระจายบนวัสดุเคลือบกาวได้ดีขึ้น แต่การเติมวัตถุดิบรายการนี้หากเติมปริมาณมากไป จะมีผลต่อสมบัติของฟิล์ม เนื่องจากขณะฟิล์มฟอร์มตัววัตถุดิบดังกล่าวจะอยู่บริเวณผิวหน้าของฟิล์มพอลิเมอร์จึงทำให้ความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ลดลง



รูปภาพที่ 4.9 แสดงลักษณะการฟอร์มฟิล์มที่ไม่ดี (ซ้าย) และการฟอร์มฟิล์มที่ดี (ขวา)



2. Peel adhesion จากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าจะเพิ่มปริมาณ AA มากขึ้น คือ 0.93%wt

3. ความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาว จากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ **2 หมู่** คือ หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและเอสเทอร์มอนอเมอร์, หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์, หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ ในการทดลองกลุ่มที่ 4 – 6 พบว่าการทดลองกลุ่มที่ 5 และ 6 คือ การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ในการทดลอง PSA-15 (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) และหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ในการทดลอง PSA-16 (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้ดีกว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ **1 หมู่** เนื่องจาก การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 2 หมู่ มีโอกาสการเกิดตำแหน่งที่สามารถปรับปรุงการยึดติดดีกว่า 1 หมู่ ดังนั้นจึงสนใจให้นำหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 3 หมู่มาผสมกันเพื่อปรับปรุงสมบัติการยึดติดให้ดีขึ้นอีก ได้ทำการทดลองเพิ่มเติมเป็นการทดลองกลุ่มที่ 8

กลุ่มที่ 8 (การทดลอง PSA-19 ถึง PSA-20) การผสมหมู่ฟังก์ชันทั้ง 3 ชนิด คือ คาร์บอกซิลมอนอเมอร์, เอสเทอร์มอนอเมอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ โดยลดปริมาณไฮดรอกซิลมอนอเมอร์เหลือเพียง 0.05 %wt พบว่าไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้รายละเอียดดังนี้

1. Tackiness จะสามารถเพิ่มความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ได้ แต่จากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ถึงแม้ว่าเพิ่มชนิดของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ คาดว่าเนื่องจากลักษณะการฟอร์มฟิล์มของเลเทกซ์

2. Peel adhesion จากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

3. ความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาว แต่จากผลการทดลองไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ **3 หมู่** คือ หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ โดยลดปริมาณไฮดรอกซิลมอนอเมอร์เหลือเพียง 0.05 %wt ในการทดลองกลุ่มที่ 8

พบว่าไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้เลย เมื่อเทียบกับการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ **1 และ 2 หมู่** เนื่องจากปริมาณหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ที่ลดลง

จากผลการทดลองทั้ง 8 กลุ่มแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสมบัติการยึดติดต้องเลือกใช้หมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์มากกว่า 1 หมู่ ในการทดลอง **PSA-15** (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) และ **PSA-16** (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) พบว่าฟิล์มพอลิเมอร์มีความเหนียว (tackiness) มากกว่าการทดลองอื่นๆ เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ของ AA มีพันธะไฮโดรเจนสามารถช่วยเพิ่มแรงต้านของการดึงผิวหน้าฟิล์มพอลิเมอร์ออกจากพื้นผิววัสดุประเภท stainless steel ได้ นอกจากนี้ 2-HEMA มีลักษณะโครงสร้างที่มี pendent group ยื่นยาวออกมา ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์มพอลิเมอร์ โดยสมบัติทั้ง 2 ประการนี้มีความสำคัญต่อการปรับปรุงสมบัติการให้ความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ ส่วนการเติมหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ในอัตราส่วนอื่นๆ ผลการทดสอบที่ได้ไม่มีนัยสำคัญที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ความเหนียวของฟิล์มขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยคือ

1. พื้นที่ผิวสัมผัส (contact area) ชนิดของวัสดุที่นำมาเคลือบกาวมีความเหมาะสม ทำให้กาวฟอร์มตัวในลักษณะมุมสัมผัสน้อยกว่า  $90^\circ$  ความสามารถในการฟอร์มฟิล์มบนผิวของ backing ถ้าสามารถฟอร์มฟิล์มได้ดีสมบัติของพอลิเมอร์จะแสดงให้เห็นชัดเจน
2. ขนาดโมเลกุลของพอลิเมอร์ (molecular weight) Krecenski และคณะ [17] พบว่าขนาดโมเลกุลขนาดเล็ก จะช่วยสามารถปรับปรุงให้ความเหนียว (tackiness) ของฟิล์มพอลิเมอร์มากขึ้นได้

สำหรับสมบัติ peel adhesion  $90^\circ$  และ  $180^\circ$  ของการทดลองทั้ง 8 กลุ่ม สามารถสรุปได้ว่าการทนต่อการลอกออกที่มุม  $90^\circ$  และ  $180^\circ$  ต้องประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์คือ AA หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์คือ MMA และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์คือ 2-HEMA ในอัตราส่วน 0.84 : 0.41 ของการทดลอง **PSA-15** (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) และ **PSA-16** (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถทนต่อการลอกออกได้ดีที่สุด ถึงแม้ว่า PSA-6 จะมีสมบัติการทนต่อการลอกออกน้อยกว่าการทดลองอื่นๆ เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชัน 2-HEA เพียงหมู่เดียว แสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสมบัติการทนลอกออก ต้องประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์มีปริมาณมากกว่าหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ 1-2 เท่า

ส่วนสมบัติความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาว ในการทดลอง **PSA-11** (AA 0.84%wt, 2-HEA 0.41%wt), **PSA-15** (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) และ **PSA-16** (MMA 0.84%wt, 2-HEMA) สามารถปรับปรุงความแข็งแรงภายในโมเลกุลได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของ AA มีความแข็งแรงและอัตราส่วนที่ใช้มีปริมาณมากกว่า 2-HEA นอกจากนี้ยังสามารถปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงภายในโมเลกุลของกาวได้อีกหลายแนวทางเช่น

1. การเพิ่มอัตราส่วนของฮาร์ดมอนอเมอร์ (hard monomer) [18] ทำให้ความแข็งแรงภายในโมเลกุลมากขึ้น
2. การเพิ่มความหนาของฟิล์มกาว [19] เนื่องจากปริมาณฟิล์มกาวหนาขึ้น ทำให้ปริมาณความแข็งแรงภายใน โมเลกุลมากขึ้น เป็นต้น

ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันที่มีอิทธิพลต่อสมบัติการยึดติดมากกว่าที่สุด คือ

หมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ **1 หมู่** : หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิคมอนอเมอร์ คือ **BETA-C** และ **MAA**

หมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ **2 หมู่** : หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิคและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ **AA, 2-HEMA**  
และหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ **MMA, 2-HEMA**

หมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ **3 หมู่** : ไม่สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดได้

#### 4.4 การทดสอบความเสถียรของเลเทกซ์ระหว่างการจัดเก็บ (storage stability)

ในส่วนนี้จะเป็นการทดสอบความเสถียรของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-เอทิลเฮกซิลอะคริเลตที่มีอิทธิพลจากการเติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ หรือไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงความเสถียรโดยทำการทดสอบทั้งหมด 3 สภาวะ คือ

**1. สภาวะอุณหภูมิห้อง** เป็นการจัดเก็บเลเทกซ์ในสภาวะอุณหภูมิห้อง เพื่อทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV, mechanical stability test และสมบัติของฟิล์ม เดือนละ 1 ครั้ง นาน 6 เดือน

ผลการทดลองผ่าน คือ เก็บตัวอย่างทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV, mechanical stability test และสมบัติของฟิล์ม โดยพิจารณาลักษณะเนื้อกาวเป็นสำคัญ คือ เป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำมันไม่แยกชั้น ถ้าลักษณะเนื้อกาวแยกชั้นจะไม่ทำการทดสอบอื่นๆ กับตัวอย่างนั้น

ผลการทดลองไม่ผ่าน คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

**2. สภาวะแบบเร่ง (accelerate test)** เป็นการจัดเก็บเลเทกซ์ในสภาวะ 60 °C เพื่อทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV และสมบัติของฟิล์มสัปดาห์ละ 1 ครั้ง นาน 4 สัปดาห์

ผลการทดลองผ่าน คือ เก็บตัวอย่างทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH, %NV และสมบัติของฟิล์ม โดยพิจารณาลักษณะเนื้อกาวเป็นสำคัญ คือ เป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำมันไม่แยกชั้น ถ้าลักษณะเนื้อกาวแยกชั้นแล้ว จะไม่ทำการทดสอบอื่นๆ กับตัวอย่างนั้น

ผลการทดลองไม่ผ่าน คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

**3. สภาวะอุณหภูมิต่ำ (freeze thaw stability test)** เป็นการจัดเก็บเลเทกซ์ในสภาวะ -20 °C นาน 24 ชั่วโมง และอุณหภูมิห้อง 6 ชั่วโมงเดือน เพื่อทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH และ %NV วันละ 1 ครั้ง นาน 15 วัน

ผลการทดลองผ่าน คือ เก็บตัวอย่างทำการทดสอบลักษณะของเลเทกซ์, pH และ %NV โดยพิจารณาลักษณะเนื้อกาวเป็นสำคัญ คือ เป็นของเหลวสีขาวคล้ายน้ำมันไม่แยกชั้น ถ้าลักษณะเนื้อกาวแยกชั้นแล้ว จะไม่ทำการทดสอบอื่นๆ กับตัวอย่างนั้น

ผลการทดลองไม่ผ่าน คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

โดยผลการทดลองแต่ละกลุ่มรายละเอียดดังตารางที่ 4.7 และสามารถอธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดสอบความเสถียรของเลเทกซ์ในสภาวะต่างๆ

No.	BETA-C	MAA	AA	MMA	2-HEA	2-HEMA	สภาวะการทดสอบความเสถียร		
							สภาวะ อุณหภูมิห้อง	สภาวะ เร่ง	สภาวะ อุณหภูมิต่ำ
PSA-0	-	-	-	-	-	-	X	X	X
PSA-1	1.25	-	-	-	-	-	X	X	X
PSA-2	-	1.25	-	-	-	-	X	X	X
PSA-3	-	-	1.25	-	-	-	✓	✓	✓
PSA-4	-	-	-	1.25	-	-	✓	✓	✓
PSA-5	0.31	0.31	0.31	0.31	-	-	X	X	X
PSA-6	-	-	-	-	1.25	-	X	X	X
PSA-7	-	-	-	-	-	1.25	✓	✓	✓
PSA-8	-	-	-	-	0.63	0.63	X	X	X
PSA-9	0.84	-	-	-	0.41	-	X	X	X
PSA-10	-	0.84	-	-	0.41	-	X	X	X
PSA-11	-	-	0.84	-	0.41	-	✓	✓	✓
PSA-12	-	-	-	0.84	0.41	-	✓	✓	✓
PSA-13	0.84	-	-	-	-	0.41	X	X	X
PSA-14	-	0.84	-	-	-	0.41	X	X	X
PSA-15	-	-	0.84	-	-	0.41	✓	✓	✓
PSA-16	-	-	-	0.84	-	0.41	✓	✓	✓
PSA-17	-	-	0.93	-	0.32	-	X	X	X
PSA-18	-	-	0.93	-	-	0.32	X	X	X
PSA-19	0.30	0.30	0.30	0.30	0.05	-	✓	✓	✓
PSA-20	0.30	0.30	0.30	0.30	-	0.05	✓	✓	✓

หมายเหตุ X : ผลการทดลองไม่ผ่าน, ✓ : ผลการทดลองผ่าน

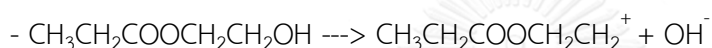
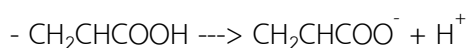
กลุ่มที่ 1 (การทดลอง PSA-1 ถึง PSA-3) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์เฉพาะที่เป็น PSA-3 (AA 1.25%wt) จะทำให้ได้เลเทกซ์ที่เสถียรทั้ง 3 สภาวะ แต่ PSA-1 (BETA-C 1.25%wt) และ PSA-2 (MAA 1.25%wt) ไม่สามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ได้

กลุ่มที่ 2 (การทดลอง PSA-4) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ MMA (1.25%wt) ใน PSA-4) สามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ได้ทั้ง 3 สภาวะ

กลุ่มที่ 3 (การทดลอง PSA-6 ถึง PSA-8) การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์เฉพาะ PSA-7 (2-

HEMA 1.25%wt) ) สามารถเพิ่มความเสถียรของคอลลอยด์ได้ทั้ง 3 สภาวะ แต่ 2-HEA ไม่สามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ได้

การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 1 หมู่ พบว่าหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ คือ AA (1.25%wt ใน PSA-3), หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ MMA (1.25%wt ใน PSA-4) และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ 2-HEMA (1.25%wt ใน PSA-7) ทั้ง 3 การทดลองสามารถพบว่าจะสามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ทั้ง 3 สภาวะ เนื่องจาก AA และ 2-HEMA สามารถแตกตัวให้ประจุบวกและลบได้อย่างชัดเจน คือ



หากต้องการปรับปรุงความเสถียร ให้ดีขึ้นอีก โดยนำหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ผสมกันจำนวน 2 หมู่ คาดว่าจะสามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ดีกว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 1 หมู่ จึงมาทำการทดลองเพิ่มเติมเป็นการทดลองกลุ่มที่ 4 – 6

กลุ่มที่ 4 (การทดลอง PSA-5) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ BETA-C, MAA, AA และ MMA เข้าด้วยกัน ในการทดลอง PSA-5 (BETA-C 0.31%wt, MAA 0.31%wt, AA 0.31%wt และ MMA 0.31%wt) นั้นไม่สามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ได้

กลุ่มที่ 5 (การทดลอง PSA-9 ถึง PSA-11 และ PSA-13 ถึง PSA-15) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ PSA-11 (AA 0.84%wt, 2-HEA 0.41%wt) และ PSA-15 (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถเพิ่มความเสถียรของคอลลอยด์ได้ทั้ง 3 สภาวะ

กลุ่มที่ 6 (การทดลอง PSA-12 และ PSA-16) การผสมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ จะสามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ได้ พบว่าการทดลอง PSA-12 (MMA 0.84%wt, 2-HEA

0.41%wt) และ PSA-16 (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) สามารถเพิ่มความเสถียรของคอลลอยด์ได้ทั้ง 3 สภาวะ

กลุ่มที่ 7 (การทดลอง PSA-17 ถึง PSA-18) การผสมทั้งหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ แต่เพิ่มปริมาณหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมากขึ้นกว่าในกลุ่มที่ 5 ในการทดลอง PSA-17 (AA 0.93%wt, 2-HEA 0.32%wt) และ PSA-17 (AA 0.93%wt, 2-HEMA 0.32%wt) ไม่สามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ได้

การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 2 หมู่ พบว่าการผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ **PSA-11** (AA 0.84%wt, 2-HEA 0.41%wt) และ **PSA-15** (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt), การผสมหมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ PSA-12 (MMA 0.84%wt, 2-HEA 0.41%wt) และ **PSA-16** (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) ทั้ง 4 การทดลองสามารถพบว่าจะสามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ทั้ง 3 สภาวะ แสดงว่าเพิ่มชนิดของหมู่ฟังก์ชัน 2 ชนิด สามารถเพิ่มความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ได้ เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ คือ AA สามารถแตกตัวให้ประจุทำให้คอลลอยด์คงความเสถียรไว้ได้ ส่วน MMA, 2-HEA และ 2-HEMA ถ้าพิจารณาจากค่า reactivity ratio โอกาสการเกิดโคพอลิเมอร์กับสายโซ่พอลิเมอร์สายหลักมีมากกว่า BETA-C, MAA ในการทดลองอื่นๆ จึงทำให้โคพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วย MMA, 2-HEA และ 2-HEMA มีความเสถียรมากกว่า[4] หากต้องการปรับปรุงสมบัติความเสถียรให้ดีขึ้นอีก โดยนำหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 3 หมู่ คาดว่าจะสามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์กว่าการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ 2 หมู่ จึงมาทำการทดลองเพิ่มเติมเป็นการทดลองกลุ่มที่ 8

กลุ่มที่ 8 (การทดลอง PSA-19 ถึง PSA-20) การผสมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์, เอสเทอร์มอนอเมอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ โดยลดปริมาณไฮดรอกซิลมอนอเมอร์เหลือเพียง 0.05 wt% พบว่า PSA-19 (BETA-C 0.30%wt, MAA 0.30%wt, AA 0.30%wt, MMA 0.30%wt, 2-HEA 0.05%wt) และ PSA-20 (BETA-C 0.30%wt, MAA 0.30%wt, AA 0.30%wt, MMA 0.30%wt, 2-HEMA 0.05%wt) สามารถเพิ่มความเสถียรของคอลลอยด์ได้ทั้ง 3 สภาวะ

การเพิ่มหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ **3 หมู่** คือ **PSA-19** (BETA-C 0.30%wt, MAA 0.30%wt, AA 0.30%wt, MMA 0.30%wt, 2-HEA 0.05%wt) และ **PSA-20** (BETA-C 0.30%wt, MAA 0.30%wt, AA 0.30%wt, MMA 0.30%wt, 2-HEMA 0.05%wt) ทั้ง 2 การทดลองสามารถปรับปรุงความเสถียรของเลเทกซ์ได้ทั้ง 3 สถานะ แสดงว่าเพิ่มชนิดของหมู่ฟังก์ชัน 3 ชนิด สามารถเพิ่มความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ได้ เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์ที่หลากหลายลักษณะโครงสร้างของพอลิเมอร์ที่ได้มีความเกะกะ (steric) และการเกิดประจุผิวของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ส่งผลให้เลเทกซ์ที่ได้มีความเสถียร [20]

ดังนั้นหมู่ฟังก์ชันที่มีอิทธิพลต่อความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์ คือ หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมอนอเมอร์ คือ AA, หมู่ฟังก์ชันเอสเทอร์มอนอเมอร์ คือ MMA และหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ คือ 2-HEMA หรือหากนำทั้ง 3 หมู่ฟังก์ชันมาผสมกันยังมีโอกาสเพิ่มความเสถียรของอนุภาคคอลลอยด์มากขึ้น ถึงแม้ว่าจะไม่ได้เลือกใช้ AA, MMA หรือ 2-HEMA



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการทดลอง

ในการวิจัยนี้ ในการผลิตกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด (Pressure sensitive adhesive, PSA) ของพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลต พบว่าการเติมหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ต่างก็มีผลต่อสมบัติการยึดติดและความเสถียรของอนุภาคเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ได้

เมื่อพิจารณาการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของฟิล์ม (tackiness) และการทนต่อการลอกออกที่มุม  $90^{\circ}$  และ  $180^{\circ}$  ต้องประกอบด้วยฟังก์ชันมอนอเมอร์มากกว่า 1 หมู่ โดยหมู่ฟังก์ชันที่มีอิทธิพลต่อสมบัติความเหนียวของฟิล์ม (tackiness) และการทนต่อการลอกออกที่มุม  $90^{\circ}$  และ  $180^{\circ}$  มากที่สุด คือ หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและไฮดรอกซิล (ตัวอย่าง PSA-15 ซึ่งมี AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt), หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลและเอสเทอร์ของการทดลอง PSA-16 (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลมีแรงดึงดูดแบบพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรงโดยเฉพาะ AA ในกรณีของหมู่ไฮดรอกซิลนั้นจะเกิดแรงดึงดูดแบบพันธะไฮโดรเจนได้เช่นเดียวกัน และผนวกกับโครงสร้างของ 2-HEMA ที่มีหมู่ pendent ยาวออกมา ทำให้สามารถช่วยเพิ่มความยึดหยุ่นของพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้ ซึ่งมีผลต่อการปรับปรุงสมบัติความเหนียวของฟิล์มพอลิเมอร์ (tackiness) ได้

ส่วนค่า cohesion ของ PSA-15 (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) และ PSA-16 (MMA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) ถึงว่าจะมีค่าน้อยกว่าการทดลอง PSA-11 (AA 0.84%wt, 2-HEMA 0.41%wt) แต่ในการนำไปใช้งานสำหรับงานประเภท OPP tape, sticker และ label ค่า cohesion ของ PSA-15 และ PSA-16 อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประเภทว่องไวต่อแรงกดชนิด Semi-removable คือ มากกว่า 20 ชั่วโมง [21]

ส่วนพอลิไวนิลอะซิเตต-โค-อัลคิลอะคริเลตที่มีความเสถียรที่ดี และสอดคล้องกับการทดลองที่มีสมบัติการยึดติดที่ดีที่สุด คือ PSA-15 และ PSA-16 ต้องประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน 3 หมู่ฟังก์ชัน คือ หมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล, เอสเทอร์ และไฮดรอกซิลมอนอเมอร์ ซึ่งพิจารณาจากค่า zeta potential จะสอดคล้องกับผลการทดสอบความเสถียรในสภาวะต่าง ๆ ของการทดลอง PSA-15 และ PSA-16 สามารถจัดเก็บไว้ที่สภาวะอุณหภูมิห้องนาน 6 เดือน, สภาวะแบบเร่ง (60 °C) นาน 4 สัปดาห์ และสภาวะอุณหภูมิต่ำ (-20 °C) 15 วัน โดยที่สมบัติทางกายภาพและสมบัติของฟิล์มเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการนำไปใช้งานสำหรับการทดลอง PSA-1, PSA-3, PSA-4, PSA-19, และ PSA-20 เหมาะสำหรับการนำไปใช้งานเป็นกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกด เช่น เทป, ฉลาก และสติ๊กเกอร์ ที่ต้องสมบัติการยึดติดเพียงเล็กน้อย ส่วนการทดลอง PSA-6 และ PSA-7 สามารถนำไปใช้ในงานประเภท protective tape (เทปสำหรับป้องกันรอยขีดข่วน หรือการกระแทก)

5.2.2 สำหรับการทดลอง PSA-1 - PSA-20 สามารถปรับปรุงสมบัติการยึดติดให้ดีขึ้นอีก มีวิธีการดังนี้โดยขอแยกตามลักษณะการยึดติด

### 5.2.2.1 การปรับปรุงสมบัติการยึดติดจากขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์

การปรับปรุงสมบัติความเหนียว (tackiness) ของฟิล์มกาว โดยการลดขนาดโมเลกุล (molecular weight) ของพอลิเมอร์ให้เล็กลง หรือ ปรับให้ค่า Tg มีวิธีการตามของสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องการ **ตารางที่ 5.1** ส่วนการปรับปรุงความแข็งแรงในการยึดเกาะวัสดุอื่น (adhesion) โดยการเติมหมู่ฟังก์ชันมอนอเมอร์มีวิธีการตาม **ตารางที่ 5.2** นอกจากนี้การปรับปรุงความแข็งแรงภายในโมเลกุล (cohesion) โดยการเพิ่มขนาดโมเลกุล (molecular weight) ของพอลิเมอร์ให้ใหญ่ขึ้น หรือ เพิ่ม Tg มีวิธีการตาม **ตารางที่ 5.3** ทั้งนี้ในการเลือกใช้ต้องขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของสมบัติฟิล์มพอลิเมอร์ที่ต้องการ

ตารางที่ 5.1 แสดงวิธีการปรับปรุงสมบัติความเหนียว (tackiness) ของฟิล์มพอลิเมอร์

วัตถุประสงค์	การปรับปรุงสมบัติความเหนียว (tackiness)
ลดขนาดโมเลกุล (molecular weight) ของพอลิเมอร์ให้เล็กลง	1. เพิ่มปริมาณวัตถุดิบประเภท Initiator
	2. เพิ่มปริมาณวัตถุดิบประเภท Chaintransfer agent
	3. เพิ่มปริมาณ premix-monomer ในขั้นตอน Pre-reaction
	4. เพิ่มช่วงเวลา Delay time
ลด Tg ของพอลิเมอร์	1. เพิ่มอัตราส่วนของ Soft monomer

ตารางที่ 5.2 แสดงวิธีการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงในการยึดเกาะกับวัสดุอื่น (adhesion) ของฟิล์มพอลิเมอร์

วัตถุประสงค์	การปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงในการยึดเกาะกับวัสดุอื่น (adhesion)
เพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้ตรงกับชนิดของวัสดุของการนำกาวไปใช้งาน	1. วัสดุประเภทที่มีพื้นผิวประเภท Polar (โลหะ) เพิ่มหมู่ฟังก์ชัน acylic , methacrylic acid และ hydroxy ethyl acrylate
	2. วัสดุประเภทที่มีพื้นผิวประเภท Non-polar (พลาสติก) เพิ่มหมู่ฟังก์ชัน t-butyl acrylate, t-butyl methacrylate, isobornyl acrylate และ isoborny methacarlate

ตารางที่ 5.3 แสดงวิธีการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงภายในโมเลกุล (cohesion) ของฟิล์มพอลิเมอร์

วัตถุประสงค์	การปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงภายในโมเลกุล (cohesion)
เพิ่มขนาดโมเลกุล (molecular weight) ของพอลิเมอร์ให้ใหญ่ขึ้น	1. ลดปริมาณวัตถุดิบประเภท Initiator
	2. ลดปริมาณวัตถุดิบประเภท Chaintansfer agent
	3. ลดปริมาณ premix-monomer ในขั้นตอน Pre-reaction
	4. ลดช่วงเวลา Delay time
เพิ่ม Tg ของพอลิเมอร์	1. เพิ่มอัตราส่วนของ Hard monomer

#### 5.2.2.2 การปรับปรุงสมบัติการยึดติดจากการเติมสารประเภท additive ตัวอย่างดังนี้

- การปรับปรุงสมบัติความเหนียว (tackiness) ของฟิล์มกาว : Tackifier
- การปรับปรุงความแข็งแรงในการยึดเกาะวัสดุอื่น (adhesion) : Adhesion promoter (type emulsion)
- การปรับปรุงความแข็งแรงภายในโมเลกุล (cohesion) : Hardener และ Crosslinking agent

5.2.3 สำหรับการทดลอง PSA-1 - PSA-20 สามารถปรับปรุงความเสถียรของคอลลอยด์ให้ดีขึ้น โดยการเพิ่มปริมาณสารลดแรงตึงผิว ซึ่งปริมาณที่เพิ่มต้องไม่มากเกินไป หากใช้ในปริมาณที่มากเกินไปจะมีผลกระทบต่อสมบัติการยึดติดลดลง และขนาดของอนุภาคเลเทกซ์ที่สังเคราะห์ คือ มีขนาดเล็ก

5.2.4 ในปัจจุบันสามารถเตรียมพอลิเมอร์ด้วยกระบวนการ Polymerization โดยใช้ตัวกลาง 2 แบบ คือ water based และ solvent based ซึ่งสมบัติที่ได้สามารถใช้แทนกันได้ แต่หากผู้ใช้งานเลือกสารยึดติดประเภทที่ใช้น้ำเป็นตัวกลางจะเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่า solvent based



## รายการอ้างอิง

- [1] Odian, G. Principles of Polymerization. 4 ed. New York, U.S.A.: A John Wiley & Son, Inc, Publication, 2004.
- [2] Benedek, I. Pressure-Sensitive Adhesives and Applications. 2 ed. New York, U.S.A.: Marcel Dekker, Inc., 2004.
- [3] Braun D., C.H., Kern W. Partical Molecular Organic Chemistry. London: Harwood Academic Publishers, 1984.
- [4] Tadros, T.F. Emulsion science and technology. 1 ed. United Kingdom, 2009.
- [5] Jack, A. Finat Technical HandBook 6ed., 2001.
- [6] Tigci Y., S.A. Investigation of water-based emulsion:surface and film-forming properties. Macromolecular Symposia 281 (2009): 206-212.
- [7] Araújo, P.H.H., Sayer, C., Caldas, E., Santos, A.F., and Fortuny, M. Investigation of Stabilization and Kinetics in the Semi-Continuous Emulsion Copolymerization of Vinyl Acetate and Butyl Acrylate using Carboxylic Monomers. Macromolecular Symposia 245-246(1) (2006): 61-67.
- [8] Sarac A., K.M., Yildiz O., Yildirim H. Emulsion copolymerization of vinyl acetate and 2-ethyl hexyl acrylate using nonionic emulsifier in loop reactor applied polymer Science 98 (2005): 1380-1384.
- [9] Staicu, T., Micutz, M., and Leca, M. Electrostatically and electrosterically stabilized latices of acrylic copolymers used as pressure-sensitive adhesives. Progress in Organic Coatings 53(1) (2005): 56-62.
- [10] A., S. Semicontinuous emulsion copolymer of vinyl acetate and butyl acrylate using different initiators and different chain length emulsion. Macromolecular Symposia 217 (2004): 161-167.
- [11] Mortimer, P.W.T.a.G.A. Polymer Science Part A 9 (1965).
- [12] Ovando-Medina, V.M., Diaz-Flores, P.E., Peralta, R.D., Mendizábal, E., and Cortez-Mazatan, G.Y. Semicontinuous heterophase copolymerization of vinyl acetate and butyl acrylate. Journal of Applied Polymer Science 127(4) (2013): 2458-2464.

- [13] Jianying, H., Jiayan, C., Jiaming, Z., Yihong, C., Lizong, D., and Yousi, Z. Some monomer reactivity ratios of styrene and (meth)acrylates in the presence of TEMPO. Journal of Applied Polymer Science 100(5) (2006): 3531-3535.
- [14] Ma, X. Free Radical Polymerization in Room Temperature Ionic Liquids. 2006: Tennessee University
- [15] Ovando-Medina, V.M., Martínez-Gutiérrez, H., Mendizábal, E., Corona, M.A., and Peralta, R.D. Reactivity ratios and monomer partitioning in the microemulsion copolymerization of vinyl acetate and butyl acrylate. Journal of Applied Polymer Science 111(1) (2009): 329-337.
- [16] Benedek, I. Pressure-Sensitive Design, Theoretical Aspects. 2 ed. Vol. 1. Netherlands: Koninklijke Brill NV Leiden, 2006.
- [17] Kaboorani, A. and Riedl, B. Effects of adding nano-clay on performance of polyvinyl acetate (PVA) as a wood adhesive. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 42(8) (2011): 1031-1039.
- [18] Mallikarjunan, V., Pushpavanam, S., and David Immanuel, C. Parameter estimation strategies in batch emulsion polymerization. Chemical Engineering Science 65(17) (2010): 4967-4982.
- [19] Lee, S.Y. and Gan, S.N. The adhesion properties of natural rubber pressure-sensitive adhesives using palm kernel oil-based alkyd resins as a tackifier. Composite Interfaces 20(3) (2013): 177-188.
- [20] Mori, H. and Müller, A.H.E. New polymeric architectures with (meth)acrylic acid segments. Progress in Polymer Science 28(10) (2003): 1403-1439.
- [21] Peykova, Y., Lebedeva, O.V., Diethert, A., Müller-Buschbaum, P., and Willenbacher, N. Adhesive properties of acrylate copolymers: Effect of the nature of the substrate and copolymer functionality. International Journal of Adhesion and Adhesives 34 (2012): 107-116.
- [22] วุฒิกนกกาญจน์, จ. การสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วม. in 10/06/2015. 2015: <http://www.seem.kmutt.ac.th/research/pentec/download/Chapter%203%20Polymerization%20method.pdf>.
- [23] D.Braun, H.C., W. Kern. Practical Molecular Organic Chemistry. London: Harwood Academic Publishers, 1984.

- [24] Ross, M.F.a.S.D. polymer Science 5 (1950): 259.
- [25] Tudos, T.K.a.F. Macromolecular Science A9 (1975).
- [26] Braun, D. European Polymer Journal 9 (1973).
- [27] Erbil, H.Y. Introduction. in Vinyl Acetate Emulsion Polymerization and Copolymerization with Acrylic Monomers, p. 180: CRC Press, 2000.
- [28] Packham, D.E. Handbook of Adhesive. 2 ed. England: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
- [29] Skeist, I. Handbook Adhesive. 3 ed. New York: Van Nostrand Reinhold, 1999.
- [30] แจ็งซัด, อ. พอลิเมอร์คอมโพสิต. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY



## ภาคผนวก ก

ข้อมูลดิบจากการทดลองต่างๆ



ตารางที่ 1 แสดงผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อขาวและ Mechanical stability test ที่สถานะ อุณหภูมิห้อง นาน 6 เดือน ของ PSA-0 ถึง PSA-20

No.	Months						
	0	1	2	3	4	5	6
PSA-0	✓						
PSA-1	✓	✓					
PSA-2	✓	✓					
PSA-3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-5	✓	✓					
PSA-6	✓	✓					
PSA-7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-8	✓	✓					
PSA-9	✓	✓					
PSA-10	✓	✓					
PSA-11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-13	✓	✓					
PSA-14	✓	✓					
PSA-15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-17	✓	✓	✓	✓			
PSA-18	✓	✓	✓	✓	✓		
PSA-19	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ ✓ : ผลการทดลองผ่าน และ แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อขาวเจล

ตารางที่ 2 แสดงผลการทดสอบค่าความหนืด (viscosity, cps) และ pH ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง นาน 6 เดือนของการทดลอง ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

No.	Months													
	0		1		2		3		4		5		6	
	Vis.	pH	Vis.	pH	Vis.	pH	Vis.	pH	Vis.	pH	Vis.	pH	Vis.	pH
PSA-0	50.14	5.15												
PSA-1	69.00	4.53	71.00	4.57										
PSA-2	64.20	4.72	66.30	4.74	64.00	4.73								
PSA-3	66.10	4.64	67.20	4.65	65.40	4.63	64.30	4.64	65.00	4.75	70.00	4.70	69.00	4.71
PSA-4	80.10	4.82	80.10	4.79	80.00	4.75	79.50	4.74	83.00	4.76	84.00	4.75	83.00	4.77
PSA-5	87.50	4.56	90.60	4.57	95.00	4.65								
PSA-6	89.20	4.70	90.30	4.71	94.00	4.70								
PSA-7	83.50	4.69	84.51	4.75	83.00	4.74	82.00	4.73	84.30	4.59	85.50	4.58	84.00	4.62
PSA-8	81.10	4.80	82.10	4.81	82.00	4.82								
PSA-9	71.50	4.86	72.30	4.87	73.00	4.85								
PSA-10	71.10	4.50	72.60	4.51	74.00	4.50								
PSA-11	70.00	4.50	72.30	4.52	75.00	4.50	74.30	4.45	76.30	4.56	77.40	4.44	76.00	4.51
PSA-12	70.30	4.68	70.60	4.69	74.00	4.70	73.20	4.65	78.20	4.55	79.30	4.51	79.00	4.56
PSA-13	66.80	5.14	56.10	5.14	70.00	5.11								
PSA-14	66.50	5.11	64.10	5.12	70.00	5.13								
PSA-15	73.00	5.17	73.00	5.16	73.00	5.16	74.20	5.15	75.00	5.10	74.50	5.12	73.00	5.24
PSA-16	79.00	5.10	80.00	5.18	80.00	5.17	79.40	5.14	82.00	5.34	83.00	5.34	85.00	5.44
PSA-17	79.50	5.11	82.00	5.15	91.00	5.10	90.32	5.11						
PSA-18	78.10	5.11	79.10	5.17	80.00	5.17	79.12	5.14	84.00	5.25				
PSA-19	71.00	4.95	70.20	4.99	76.00	5.00	74.33	4.99	76.00	5.00	76.40	4.98	77.00	5.02
PSA-20	60.90	5.10	60.50	5.11	63.00	5.10	64.32	5.12	65.00	5.10	69.20	5.11	82.00	5.16

ตารางที่ 3 แสดงผลการทดสอบการยึดติดแบบ loop tack( $\text{lb/in}^2$ ) ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง นาน 6 เดือน ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวยืด

No.	Months													
	0		1		2		3		4		5		6	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	1.03	0.11												
PSA-1	2.79	0.21	2.65	0.12										
PSA-2	1.88	0.13	1.85	0.20	1.84	0.20								
PSA-3	1.68	0.24	1.63	0.33	1.66	0.33	1.58	0.32	1.57	0.32	1.55	0.30	1.53	0.25
PSA-4	2.22	0.31	2.21	0.12	2.21	0.12	2.20	0.11	2.10	0.11	1.98	0.12	1.97	0.11
PSA-5	2.08	0.34	2.05	0.33	2.07	0.33								
PSA-6	1.93	0.18	1.90	0.67	1.81	0.67								
PSA-7	2.50	0.28	2.44	0.27	2.44	0.27	2.40	0.25	2.30	0.25	2.20	0.24	2.18	0.23
PSA-8	2.04	0.37	1.99	0.36	1.96	0.36								
PSA-9	2.13	0.41	2.09	0.40	2.11	0.40								
PSA-10	2.10	0.17	2.02	0.16	2.05	0.16								
PSA-11	1.96	0.28	1.94	0.27	1.95	0.27	1.90	0.22	1.75	0.22	1.74	0.21	1.73	0.29
PSA-12	2.44	0.14	2.42	0.13	2.43	0.13	2.42	0.12	2.40	0.12	2.30	0.11	2.25	0.10
PSA-13	2.13	0.24	2.12	0.23	2.13	0.23								
PSA-14	2.05	0.13	2.04	0.12	2.05	0.12								
PSA-15	3.50	0.12	3.44	0.12	3.45	0.12	3.46	0.11	3.40	0.11	3.35	0.14	3.34	0.15
PSA-16	3.20	0.23	3.14	0.22	3.15	0.22	3.10	0.25	3.05	0.25	3.00	0.22	2.99	0.23
PSA-17	1.95	0.33	1.79	0.31	1.90	0.31	1.85	0.34						
PSA-18	1.86	0.34	1.77	0.34	1.75	0.34	1.70	0.27	1.68	0.27				
PSA-19	2.31	0.23	2.13	0.24	2.14	0.24	2.10	0.34	2.11	0.34	2.08	0.35	2.05	0.36
PSA-20	2.14	0.32	2.11	0.32	2.11	0.32	2.08	0.36	2.09	0.36	2.06	0.35	2.03	0.34

ตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบการยึดติดแบบ Initial ball tack (cm) ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง นาน 6 เดือน ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาเวล

No.	Months													
	0		1		2		3		4		5		6	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	3.50	0.10												
PSA-1	4.00	0.10	3.90	0.11										
PSA-2	10.00	0.30	9.00	0.34	9.00	0.34								
PSA-3	6.50	0.10	6.00	0.11	6.00	0.11	5.90	0.11	5.80	0.11	5.75	0.11	5.74	0.10
PSA-4	8.00	0.10	7.50	0.14	8.00	0.14	7.90	0.14	7.80	0.14	6.50	0.14	6.41	0.12
PSA-5	10.70	0.10	10.70	0.15	10.70	0.15								
PSA-6	15.00	0.10	15.00	0.16	15.00	0.16								
PSA-7	7.00	0.10	6.50	0.17	7.00	0.17	5.90	0.17	5.80	0.17	5.70	0.17	5.71	0.16
PSA-8	15.00	0.20	15.00	0.44	15.00	0.44								
PSA-9	6.40	0.30	6.00	0.52	7.00	0.52								
PSA-10	7.00	0.20	7.00	0.20	7.00	0.20								
PSA-11	7.50	0.10	7.00	0.23	7.50	0.23	7.40	0.23	7.30	0.23	7.00	0.22	6.85	0.20
PSA-12	6.50	0.20	6.50	0.53	6.50	0.53	6.00	0.53	5.90	0.53	5.90	0.53	5.81	0.52
PSA-13	6.40	0.30	7.00	0.53	7.00	0.53								
PSA-14	5.50	0.10	5.00	0.26	5.50	0.26								
PSA-15	5.00	0.10	5.00	0.24	5.00	0.24	5.10	0.24	4.90	0.24	5.00	0.24	4.95	0.23
PSA-16	5.10	0.10	5.00	0.43	5.00	0.43	4.80	0.43	4.70	0.43	4.70	0.34	4.65	0.33
PSA-17	10.00	0.10	9.50	0.20	10.00	0.20	9.50	0.20						
PSA-18	7.80	0.10	7.80	0.12	7.80	0.12	7.50	0.16	7.40	0.16				
PSA-19	6.00	0.20	6.80	0.54	7.00	0.54	7.00	0.53	6.80	0.53	6.90	0.53	6.70	0.52
PSA-20	7.00	0.20	7.00	0.25	7.00	0.25	7.00	0.22	6.80	0.22	7.00	0.23	6.95	0.22

ตารางที่ 5 แสดงผลการทดสอบ Peel adhesion 90° (kg/in) ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง นาน 6 เดือน ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

No.	Months													
	0		1		2		3		4		5		6	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	0.21	0.01												
PSA-1	0.51	0.01	0.60	0.12										
PSA-2	0.54	0.02	0.50	0.22	0.50	0.22								
PSA-3	0.57	0.01	0.57	0.11	0.57	0.11	0.56	0.13	0.55	0.13	0.54	0.13	0.53	0.12
PSA-4	0.51	0.01	0.51	0.33	0.57	0.33	0.55	0.34	0.54	0.34	0.53	0.34	0.52	0.33
PSA-5	0.58	0.01	0.52	0.42	0.52	0.42								
PSA-6	0.20	0.01	0.48	0.11	0.48	0.11								
PSA-7	0.44	0.03	0.40	0.12	0.40	0.12	0.38	0.13	0.39	0.13	0.38	0.13	0.37	0.12
PSA-8	0.48	0.01	0.49	0.13	0.49	0.13								
PSA-9	0.58	0.01	0.60	0.12	0.60	0.12								
PSA-10	0.67	0.01	0.68	0.11	0.68	0.11								
PSA-11	0.49	0.01	0.50	0.14	0.50	0.14	0.48	0.18	0.47	0.18	0.46	0.28	0.44	0.27
PSA-12	0.47	0.01	0.43	0.15	0.47	0.15	0.45	0.15	0.44	0.15	0.43	0.35	0.40	0.34
PSA-13	0.58	0.01	0.60	0.11	0.60	0.11								
PSA-14	0.67	0.01	0.75	0.43	0.70	0.43								
PSA-15	0.74	0.01	0.80	0.42	0.80	0.42	0.75	0.42	0.73	0.42	0.72	0.22	0.72	0.21
PSA-16	0.71	0.01	0.90	0.12	0.90	0.12	0.85	0.12	0.83	0.12	0.82	0.32	0.81	0.33
PSA-17	0.57	0.01	0.60	0.10	0.65	0.10	0.64	0.10						
PSA-18	0.65	0.01	0.65	0.12	0.65	0.12	0.64	0.12	0.63	0.12				
PSA-19	0.74	0.01	0.74	0.42	0.74	0.42	0.70	0.42	0.69	0.42	0.68	0.32	0.67	0.30
PSA-20	0.61	0.02	0.61	0.16	0.61	0.16	0.59	0.16	0.57	0.16	0.55	0.18	0.54	0.19

ตารางที่ 6 แสดงผลการทดสอบ Peel adhesion 180° (kg/in) ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง นาน 6 เดือน ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

No.	Months													
	0		1		2		3		4		5		6	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	0.22	0.01												
PSA-1	0.60	0.03	0.60	0.32										
PSA-2	0.50	0.02	0.45	0.23	0.50	0.23								
PSA-3	0.50	0.02	0.55	0.23	0.67	0.23	0.67	0.23	0.66	0.23	0.65	0.23	0.64	0.22
PSA-4	0.60	0.02	0.62	0.24	0.60	0.24	0.60	0.24	0.59	0.24	0.58	0.24	0.57	0.25
PSA-5	0.44	0.01	0.42	0.13	0.44	0.13								
PSA-6	0.30	0.02	0.36	0.23	0.30	0.23								
PSA-7	0.54	0.01	0.66	0.12	0.54	0.12	0.54	0.12	0.53	0.12	0.52	0.12	0.51	0.11
PSA-8	0.50	0.02	0.53	0.21	0.50	0.21								
PSA-9	0.56	0.02	0.54	0.21	0.56	0.21								
PSA-10	0.57	0.03	0.55	0.34	0.55	0.34								
PSA-11	0.52	0.04	0.55	0.44	0.66	0.44	0.66	0.44	0.64	0.44	0.63	0.44	0.62	0.43
PSA-12	0.53	0.04	0.53	0.42	0.53	0.42	0.53	0.42	0.53	0.42	0.52	0.42	0.51	0.41
PSA-13	0.56	0.02	0.56	0.16	0.54	0.16								
PSA-14	0.58	0.01	0.58	0.12	0.58	0.12								
PSA-15	0.79	0.02	0.75	0.21	0.80	0.21	0.80	0.21	0.75	0.21	0.74	0.21	0.73	0.20
PSA-16	0.73	0.01	0.70	0.13	0.73	0.13	0.73	0.13	0.72	0.13	0.71	0.13	0.70	0.11
PSA-17	0.47	0.01	0.47	0.12	0.57	0.12	0.57	0.12						
PSA-18	0.50	0.01	0.50	0.12	0.60	0.12	0.60	0.12	0.59	0.12				
PSA-19	0.52	0.01	0.55	0.13	0.55	0.13	0.55	0.13	0.54	0.13	0.53	0.13	0.52	0.12
PSA-20	0.62	0.03	0.62	0.34	0.62	0.34	0.62	0.34	0.63	0.34	0.62	0.34	0.61	0.33

ตารางที่ 7 แสดงผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อขาว ที่สภาวะแบบเร่ง นาน 4 สัปดาห์ ของ PSA-0 ถึง PSA-20

No.	Weeks				
	0	1	2	3	4
PSA-0	✓				
PSA-1	✓				
PSA-2	✓				
PSA-3	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-4	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-5	✓	✓			
PSA-6	✓	✓			
PSA-7	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-8	✓	✓			
PSA-9	✓	✓			
PSA-10	✓	✓			
PSA-11	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-12	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-13	✓	✓			
PSA-14	✓	✓			
PSA-15	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-16	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-17	✓	✓			
PSA-18	✓	✓			
PSA-19	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-20	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ ✓ : ผลการทดลองผ่าน และ แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อขาวเจล



ตารางที่ 8 แสดงผลการทดสอบค่าความหนืด (viscosity, cps) และ pH ที่สภาวะแบบเร่ง นาน 4 สัปดาห์ ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แอบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

No.	Weeks									
	0		1		2		3		4	
	Vis.	pH	Vis.	pH	Vis.	pH	Vis.	pH	Vis.	pH
PSA-0	50.14	5.15								
PSA-1	69.00	4.53								
PSA-2	64.20	4.72								
PSA-3	66.10	4.64	74.20	4.55	85.00	4.64	96.00	4.25	95.00	4.23
PSA-4	80.10	4.82	85.50	4.64	97.30	4.76	85.20	4.55	84.00	4.54
PSA-5	87.50	4.56	95.40	4.67						
PSA-6	89.20	4.70	95.40	4.73						
PSA-7	83.50	4.69	90.00	4.74	95.00	4.73	95.00	4.74	90.00	4.73
PSA-8	81.10	4.80	85.30	4.80						
PSA-9	71.50	4.86	78.40	4.77						
PSA-10	71.10	4.50	75.90	4.54						
PSA-11	70.00	4.50	75.20	4.54	80.00	4.51	75.00	4.44	72.00	4.40
PSA-12	70.30	4.68	79.40	4.70	78.00	4.75	80.00	4.35	75.00	4.33
PSA-13	66.80	5.14	72.50	5.10						
PSA-14	66.50	5.11	72.00	5.10						
PSA-15	73.00	5.17	83.00	5.14	74.00	5.20	80.30	5.25	80.00	5.22
PSA-16	79.00	5.10	83.00	5.12	85.00	5.18	80.20	5.10	80.00	5.11
PSA-17	79.50	5.11	85.00	5.10						
PSA-18	78.10	5.11	90.40	5.13						
PSA-19	71.00	4.95	72.50	4.75	79.00	4.96	76.54	5.00	75.00	5.11
PSA-20	60.90	5.10	64.50	5.12	65.00	5.05	66.00	4.95	65.00	4.85

ตารางที่ 9 แสดงผลการทดสอบการยึดติดแบบ loop tack( $\text{lb}/\text{in}^2$ ) ที่สถานะแบบเร่ง นาน 4 สัปดาห์ ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

No.	Weeks									
	0		1		2		3		4	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	1.03	0.11								
PSA-1	2.69	0.12								
PSA-2	1.87	0.21								
PSA-3	1.65	0.32	1.60	0.31	1.65	0.28	1.55	0.30	1.54	0.29
PSA-4	2.21	0.13	2.15	0.13	2.20	0.10	2.00	0.12	1.90	0.11
PSA-5	2.06	0.34	1.50	0.28						
PSA-6	1.91	0.68	1.75	0.29						
PSA-7	2.45	0.28	2.11	0.21	2.43	0.24	2.30	0.24	2.20	0.23
PSA-8	2.00	0.37	1.54	0.42						
PSA-9	2.10	0.41	2.03	0.35						
PSA-10	2.06	0.17	1.98	0.15						
PSA-11	1.95	0.28	1.95	0.25	1.64	0.28	1.80	0.23	1.70	0.22
PSA-12	2.43	0.14	2.34	0.12	2.40	0.15	2.32	0.10	2.31	0.11
PSA-13	2.13	0.24	2.10	0.24						
PSA-14	2.05	0.13	2.00	0.11						
PSA-15	3.45	0.12	3.00	0.15	3.35	0.14	3.40	0.12	3.35	0.10
PSA-16	3.15	0.23	3.15	0.26	3.10	0.21	2.90	0.24	2.85	0.22
PSA-17	1.80	0.33	1.56	0.34						
PSA-18	1.80	0.34	1.60	0.36						
PSA-19	2.14	0.23	2.00	0.25	2.12	0.22	2.00	0.33	1.95	0.31
PSA-20	2.10	0.32	2.05	0.30	2.05	0.30	2.00	0.34	1.97	0.35

ตารางที่ 10 แสดงผลการทดสอบการยึดติดแบบ Initial ball tack (cm) ที่สภาวะแบบเร่ง นาน 4 สัปดาห์ ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

No.	Weeks									
	0		1		2		3		4	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	3.50	0.10								
PSA-1	4.00	0.10								
PSA-2	9.00	0.30								
PSA-3	6.00	0.10	5.0	0.12	7.00	0.10	5.80	0.11	5.70	0.10
PSA-4	8.00	0.10	3.0	0.16	9.00	0.13	7.70	0.12	7.60	0.10
PSA-5	10.70	0.10	11.0	0.17						
PSA-6	15.00	0.10	16.0	0.15						
PSA-7	7.00	0.10	7.0	0.16	8.00	0.15	5.80	0.14	5.70	0.13
PSA-8	15.00	0.20	16.0	0.43						
PSA-9	7.00	0.30	7.0	0.51						
PSA-10	7.00	0.20	8.0	0.22						
PSA-11	7.50	0.10	7.5	0.24	8.00	0.20	7.50	0.22	7.50	0.20
PSA-12	6.50	0.20	7.0	0.53	7.00	0.53	5.00	0.54	4.00	0.55
PSA-13	7.00	0.30	7.0	0.54						
PSA-14	5.50	0.10	6.0	0.24						
PSA-15	5.00	0.10	6.0	0.25	6.00	0.25	5.00	0.25	4.00	0.20
PSA-16	5.00	0.10	6.0	0.43	6.50	0.44	4.70	0.43	4.40	0.42
PSA-17	10.00	0.10	12.4	0.21						
PSA-18	7.80	0.10	9.5	0.13						
PSA-19	7.00	0.20	7.5	0.55	8.30	0.55	6.00	0.54	5.00	0.44
PSA-20	7.00	0.20	7.6	0.26	7.90	0.26	5.00	0.20	4.00	0.10

ตารางที่ 11 แสดงผลการทดสอบการยึดติดแบบ Peel adhesion 90° (kg/in) ที่สภาวะแบบเร่ง  
นาน 4 สัปดาห์ ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แอปสียูเอ คือ ลักษณะเนื้อกาเวล

No.	Weeks									
	0		1		2		3		4	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	0.21	0.01								
PSA-1	0.60	0.12								
PSA-2	0.50	0.23								
PSA-3	0.57	0.10	0.55	0.20	0.55	0.12	0.55	0.12	0.54	0.12
PSA-4	0.51	0.30	0.50	0.23	0.54	0.22	0.54	0.33	0.53	0.33
PSA-5	0.52	0.40	0.50	0.32						
PSA-6	0.48	0.12	0.45	0.10						
PSA-7	0.40	0.13	0.39	0.11	0.35	0.11	0.35	0.12	0.34	0.12
PSA-8	0.49	0.14	0.45	0.12						
PSA-9	0.60	0.13	0.55	0.10						
PSA-10	0.68	0.12	0.66	0.10						
PSA-11	0.50	0.13	0.45	0.13	0.45	0.15	0.45	0.15	0.44	0.15
PSA-12	0.43	0.12	0.42	0.14	0.43	0.16	0.44	0.14	0.43	0.14
PSA-13	0.60	0.12	0.55	0.15						
PSA-14	0.70	0.12	0.70	0.44						
PSA-15	0.80	0.42	0.75	0.45	0.75	0.43	0.76	0.40	0.75	0.40
PSA-16	0.90	0.12	0.80	0.11	0.80	0.16	0.84	0.11	0.83	0.11
PSA-17	0.60	0.10	0.55	0.14						
PSA-18	0.65	0.12	0.55	0.13						
PSA-19	0.74	0.42	0.65	0.45	0.70	0.42	0.65	0.40	0.64	0.40
PSA-20	0.61	0.16	0.55	0.16	0.55	0.11	0.55	0.12	0.54	0.12

ตารางที่ 12 แสดงผลการทดสอบการยึดติดแบบ Peel adhesion 180° (kg/in) ที่สภาวะแบบเร่ง  
นาน 4 สัปดาห์ ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แอปสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาเวล

No.	Weeks									
	0		1		2		3		4	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	0.22	0.01								
PSA-1	0.60	0.32								
PSA-2	0.50	0.23								
PSA-3	0.50	0.23	0.53	0.22	0.65	0.22	0.57	0.22	0.57	0.22
PSA-4	0.60	0.24	0.60	0.22	0.63	0.25	0.55	0.21	0.55	0.21
PSA-5	0.44	0.13	0.30	0.15						
PSA-6	0.30	0.23	0.30	0.25						
PSA-7	0.54	0.12	0.51	0.14	0.54	0.11	0.53	0.11	0.53	0.11
PSA-8	0.50	0.21	0.52	0.22						
PSA-9	0.56	0.21	0.53	0.25						
PSA-10	0.57	0.34	0.54	0.33						
PSA-11	0.52	0.44	0.56	0.89	0.67	0.45	0.65	0.42	0.65	0.42
PSA-12	0.53	0.42	0.52	0.45	0.54	0.46	0.52	0.41	0.52	0.41
PSA-13	0.56	0.16	0.54	0.17						
PSA-14	0.58	0.12	0.55	0.18						
PSA-15	0.79	0.21	0.65	0.22	0.79	0.11	0.75	0.20	0.75	0.20
PSA-16	0.73	0.13	0.66	0.14	0.72	0.12	0.70	0.11	0.70	0.11
PSA-17	0.47	0.12	0.43	0.15						
PSA-18	0.50	0.12	0.45	0.13						
PSA-19	0.52	0.13	0.50	0.14	0.54	0.14	0.45	0.11	0.45	0.11
PSA-20	0.62	0.34	0.50	0.35	0.63	0.36	0.60	0.35	0.60	0.35

ตารางที่ 13 แสดงผลการทดสอบการยึดติดแบบ Shear (hr) ที่สภาวะแบบเร่ง นาน 4 สัปดาห์ ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

No.	Weeks									
	0		1		2		3		4	
	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD	Avg	SD
PSA-0	10.00	0.10								
PSA-1	13.00	0.85								
PSA-2	70.00	0.35								
PSA-3	43.00	0.71	45.00	0.65	39.00	0.70	43.00	0.71	44.00	0.71
PSA-4	5.00	0.64	7.00	0.54	6.00	0.63	5.00	0.64	4.00	0.64
PSA-5	30.00	0.61	26.00	0.65						
PSA-6	4.00	0.66	4.00	0.46						
PSA-7	5.00	0.25	7.00	0.56	4.00	0.20	4.00	0.25	3.00	0.25
PSA-8	66.00	0.25	70.00	0.15						
PSA-9	26.00	0.49	29.00	0.15						
PSA-10	24.00	0.22	25.00	0.29						
PSA-11	73.00	0.56	83.00	0.23	70.00	0.57	67.00	0.56	65.00	0.56
PSA-12	25.00	0.16	35.00	0.18	26.00	0.16	25.00	0.16	20.00	0.16
PSA-13	25.60	0.26	35.00	0.16						
PSA-14	27.00	0.16	34.00	0.15						
PSA-15	35.00	0.19	38.00	0.20	36.00	0.19	35.00	0.19	30.00	0.19
PSA-16	42.00	0.15	40.00	0.14	44.00	0.15	45.00	0.15	40.00	0.15
PSA-17	20.90	0.18	20.00	0.13						
PSA-18	16.40	0.42	16.00	0.49						
PSA-19	32.00	0.42	30.00	0.45	33.00	0.43	34.00	0.42	30.00	0.42
PSA-20	46.00	0.19	45.00	0.29	50.00	0.20	50.00	0.19	45.00	0.19

ตารางที่ 14 แสดงผลการตรวจสอบลักษณะเนื้อกาวที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ นาน 15 วัน ของ PSA-0 ถึง PSA-20

No.	Days														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
PSA-0	✓														
PSA-1	✓														
PSA-2	✓														
PSA-3	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-4	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-5	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-6	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-8	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-9	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-10	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-11	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-13	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-14	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-15	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-17	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-18	✓	✓	✓	✓	✓										
PSA-19	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PSA-20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

หมายเหตุ ✓ : ผลการทดลองผ่าน และ แถบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

ตารางที่ 15 แสดงผลการทดสอบค่าความหนืด (viscosity, cps) และ pH ที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ นาน 15 วัน ของ PSA-0 ถึง PSA-20, แอบสีเทา คือ ลักษณะเนื้อกาวเจล

(ทั้งหมด 3 ตาราง)

No.	Days					
	1	2	3	4	5	6
	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH
PSA-0	200.0 / 5.25					
PSA-1	1,160.0 / 6.12					
PSA-2	180.1 / 6.11					
PSA-3	60.2 / 4.45	61.2 / 4.55	65.5 / 4.55	70.5 / 4.56	80.5 / 4.66	80.7 / 4.67
PSA-4	79.2 / 4.80	89.2 / 4.71	89.5 / 4.75	90.5 / 4.71	95.5 / 4.74	95.6 / 4.75
PSA-5	100.5 / 5.16	1,500 / 6.16	1,600 / 6.16	1,800 / 6.16	3,800 / 6.16	
PSA-6	220.2 / 5.71	2,020 / 6.71	2,420 / 6.61	2,620 / 6.71	4,620 / 6.71	
PSA-7	85.0 / 4.80	95.0 / 4.81	96.0 / 4.81	98.0 / 4.81	98.2 / 4.81	108.9 / 4.99
PSA-8	150.1 / 5.11	1,650 / 6.11	1,850 / 6.15	2,250 / 6.11	5,250 / 6.11	
PSA-9	570.0 / 6.56	4,570 / 7.51	5,570 / 7.51	5,570 / 7.51	7,570 / 7.51	
PSA-10	450.0 / 6.74	3,450 / 7.11	3,850 / 7.11	3,850 / 7.15	5,850 / 7.15	
PSA-11	75.3 / 4.53	76.3 / 4.63	80.3 / 4.63	95.3 / 4.68	95.3 / 4.68	106.4 / 4.88
PSA-12	72.5 / 4.70	75.4 / 4.81	74.4 / 4.80	74.4 / 4.81	74.4 / 4.81	85.3 / 5.09
PSA-13	1,300 / 6.57	2,400 / 7.81	2,600 / 7.81	2,800 / 7.81	42,800 / 7.81	
PSA-14	64.5 / 5.12	64.5 / 5.12	65.5 / 5.12	67.5 / 5.12	67.5 / 5.12	
PSA-15	94.0 / 5.22	95.0 / 5.27	100.0 / 5.29	130.5 / 5.27	130.5 / 5.27	145.4 / 5.34
PSA-16	79.9 / 5.14	80.2 / 5.15	85.2 / 5.15	87.2 / 5.15	87.2 / 5.15	90.5 / 5.35
PSA-17	190.0 / 6.14	2,190 / 7.14	2,290 / 7.14	2,290 / 7.14	5,290 / 7.14	
PSA-18	790.4 / 6.17	1,750 / 7.17	1,850 / 7.17	1,950 / 7.17	5,950 / 7.54	
PSA-19	71.1 / 4.99	72.1 / 5.00	77.1 / 5.02	77.1 / 5.00	77.1 / 5.00	82.87 / 5.11
PSA-20	70.5 / 5.21	71.3 / 5.23	74.8 / 5.24	74.8 / 5.23	74.8 / 5.23	77.4 / 5.47



No.	Days					
	7	8	9	10	11	12
	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH
PSA-0						
PSA-1						
PSA-2						
PSA-3	80.4 / 4.67	90.5 / 4.69	90.25 / 4.02	91.5 / 4.75	90.5 / 4.66	100.5 / 4.66
PSA-4	100.5 / 5.74	107.6 / 4.74	100.45 / 4.74	120.4 / 4.75	129.5 / 4.79	135.5 / 4.74
PSA-5						
PSA-6						
PSA-7	126.0 / 5.30	126.4 / 5.45	145.0 / 5.20	190.4 / 4.81	195.4 / 5.34	210.5 / 5.34
PSA-8						
PSA-9						
PSA-10						
PSA-11	176.3 / 4.63	189.6 / 4.55	185.6 / 4.56	186.0 / 4.58	250.5 / 4.65	265.4 / 4.75
PSA-12	126.0 / 5.30	126.5 / 5.44	144.0 / 5.13	195.4 / 4.83	195.3 / 5.33	210.3 / 5.35
PSA-13						
PSA-14						
PSA-15	155.0 / 5.29	195.0 / 5.27	220.0 / 5.23	231.7 / 5.27	245.6 / 5.67	255.4 / 5.66
PSA-16	95.2 / 5.45	98.2 / 5.14	99.2 / 5.15	104.2 / 5.14	106.7 / 5.16	108.9 / 5.14
PSA-17						
PSA-18						
PSA-19	90.1 / 5.00	112.1 / 5.23	122.1 / 5.21	132.1 / 5.45	145.11 / 5.44	145.32 / 5.35
PSA-20	77.2 / 5.23	77.3 / 5.23	79.3 / 5.24	79.4 / 5.22	79.5 / 5.22	80.4 / 5.31

No.	Days		
	13	14	15
	Vis., pH	Vis., pH	Vis., pH
PSA-0			
PSA-1			
PSA-2			
PSA-3	104.5 / 4.66	105.5 / 4.66	120.5 / 4.66
PSA-4	140.5 / 4.73	159.5 / 4.74	160.5 / 4.79
PSA-5			
PSA-6			
PSA-7	222.1 / 5.21	225.6 / 5.31	250.5 / 5.31
PSA-8			
PSA-9			
PSA-10			
PSA-11	276.4 / 4.89	278.5 / 5.46	245.7 / 5.88
PSA-12	223.1 / 5.22	225.6 / 5.31	254.5 / 5.32
PSA-13			
PSA-14			
PSA-15	260.5 / 5.64	265.7 / 5.62	275.4 / 5.67
PSA-16	110.6 / 5.14	120.2 / 5.16	160.2 / 5.16
PSA-17			
PSA-18			
PSA-19	154.2 / 5.15	162.1 / 5.12	172.1 / 5.45
PSA-20	84.3 / 5.34	85.3 / 5.43	90.4 / 5.54

ภาคผนวก ข

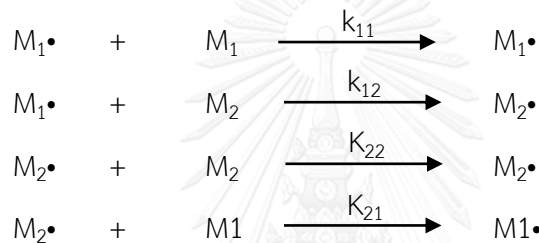
ทฤษฎีการเกิดโคพอลิเมอร์



## อัตราส่วนความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ (Monomer Reactivity Ratio)[22]

### 1. สมการของพอลิเมอร์รวม

ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์รวม (copolymer) จากมอนอเมอร์ 2 ชนิด ( $M_1$  และ  $M_2$ ) โดยใช้อนุมูลอิสระเป็นตัวเริ่มปฏิกิริยา เมื่อปฏิกิริยาเริ่มดำเนินไปจะมีสายโซ่อนุมูลอิสระของพอลิเมอร์ที่กำลังโต (propagating chain) เกิดขึ้น 2 แบบ ตามลักษณะของหน่วยย่อยที่ปลาย ซึ่งได้แก่  $M_1 \cdot$  และ  $M_2 \cdot$  และเมื่อพิจารณาารูปแบบของปฏิกิริยาในขั้นแผ่ขยายที่เกิดขึ้นกับสายโซ่แต่ละชนิด จะพบว่าเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ การทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน (self-propagation) และการทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ต่างชนิดกัน (cross-propagation) ลักษณะปฏิกิริยาขั้นแผ่ขยายที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์พอลิเมอร์รวม



ถ้าตั้งสมมติฐานว่าความเข้มข้นของอนุมูลอิสระแต่ละชนิดที่อยู่ในระบบมีค่าคงที่ (ใช้หลัก steady state assumption) จะได้ว่าอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุมูลอิสระชนิดที่ 1 (เปลี่ยนจาก  $M_1 \cdot$  เป็น  $M_2 \cdot$ ) จะเท่ากับอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของอนุมูลอิสระชนิดที่ 2 (โดยเปลี่ยนจาก  $M_2 \cdot$  เป็น  $M_1 \cdot$ )

$$k_{12}[M_1 \cdot][M_2] = k_{21}[M_2 \cdot][M_1] \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาอัตราการหายไป (rate of disappearance) ของมอนอเมอร์แต่ละชนิด ( $M_1$  และ  $M_2$ ) จะได้ว่า

$$-d[M_1]/dt = k_{11}[M_1 \cdot][M_1] + k_{21}[M_2 \cdot][M_1] \quad (2)$$

$$-d[M_2]/dt = k_{12}[M_1 \cdot][M_2] + k_{22}[M_2 \cdot][M_2] \quad (3)$$

ซึ่งเมื่อนำสมการที่ (6) มาหารด้วยสมการ (7) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} -d[M_1]/dt &= \frac{k_{11}[M_1 \cdot][M_1] + k_{21}[M_2 \cdot][M_1]}{k_{12}[M_1 \cdot][M_2] + k_{22}[M_2 \cdot][M_2]} \\ -d[M_2]/dt &= \end{aligned}$$

หรือจัดรูปใหม่ได้เป็น

$$d[M_1]/d[M_2] = \frac{[M_1] (k_{11}[M_1 \cdot] + k_{21}[M_2 \cdot])}{[M_2] (k_{12}[M_1 \cdot] + k_{22}[M_2 \cdot])} \quad (4)$$

และถ้านิยามให้ค่า reactivity ratio ( $r$ ) มีค่าเท่ากับสัดส่วนระหว่างค่าคงที่อัตราที่เกิดปฏิกิริยา

$$k_{11}/k_{12} = r_1 \quad (5)$$

$$k_{22}/k_{21} = r_2 \quad (6)$$

จากนั้นเมื่อรวมสมการที่ (1), (4), (5) และ (6) เข้าด้วยกัน และจัดรูปใหม่จะได้สมการที่ (7) ซึ่งเรียกว่าสมการพอลิเมอร์ร่วม (copolymer equation) ดังนี้

$$d[M_1]/d[M_2] = \frac{[M_1] (r_1 [M_1] + [M_2])}{[M_2] ([M_1] + r_2 [M_2])} \quad (7)$$

โดยที่ค่า  $r_1$  และ  $r_2$  ในสมการดังกล่าว เรียกว่า reactivity ratio ซึ่งหมายถึงสัดส่วนของแนวโน้มนหรือโอกาสที่สายโซ่ที่กำลังโตชนิดหนึ่งๆ จะเข้าทำปฏิกิริยาขึ้นแผ่ขยายกับมอนอเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบเดียวกัน (เรียกว่าเกิดปฏิกิริยาในลักษณะ self-propagation) เทียบกับการที่สายโซ่ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยาในลักษณะ cross-propagation (หรือการเกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง) สำหรับค่า  $d[M_1]/d[M_2]$  ในสมการที่ (7) จะหมายถึงอัตราส่วนโดยโมลระหว่างหน่วยซ้ำ (repeating unit) ทั้งสองชนิด ที่อยู่ในสายโซ่โมเลกุลของพอลิเมอร์ร่วม และค่า  $[M_1]/[M_2]$  ในสมการหมายถึงอัตราส่วนระหว่างมอนอเมอร์ทั้งสองที่เติมลงไปตอนเริ่มทำปฏิกิริยา (feed ratio)

จากสมการพอลิเมอร์ร่วม สมการที่ (7) จะเห็นได้ว่า เมื่อทราบค่า  $r_1$  และ  $r_2$  จะสามารถออกแบบ การทดลองเพื่อควบคุมให้ผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้มีสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างหน่วยซ้ำในสายโซ่เป็นไปตามที่ต้องการ โดยการกำหนดสัดส่วนโมล หรือสัดส่วนความเข้มข้น

นอกจากนี้การพิจารณาค่า  $r_1$  และ  $r_2$  ของมอนอเมอร์แต่ละคู่ (ตารางที่ 1) จะช่วยให้สามารถทำนายได้ว่าพอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะโครงสร้างการเรียงตัวของหน่วยซ้ำเป็นเช่นไร

ตารางที่ 1 Reactivity ratio ของมอนอเมอร์ชนิดต่างๆ

Monomer 1	Monomer 2	$r_1$	$r_2$	Temperature ( $^{\circ}$ C)
Styrene	MMA	0.52	0.46	60
Styrene	Acrylonitrile	0.40	0.04	60
Styrene	Vinyl acetate	55	0.01	60
Styrene	Maleic anhydride	0.041	0.01	60
Styrene	Vinyl chloride	17	0.02	60
Styrene	1,3 Butadiene	0.58	1.35	50
Styrene	Isoprene	0.54	1.92	80
MMA	Vinyl acetate	20	0.015	60
MMA	Acrylonitrile	1.20	0.15	60
MMA	1,3 Butadiene	0.25	0.75	90
Ethylene	Tetrafluoroethylene	0.38	0.1	25
Ethylene	Acrylonitrile	0	7	20
Ethylene	Vinyl acetate	0.97	1.02	130

กล่าวคือถ้าค่า  $r$  มีค่ามากกว่า 1 มอนอเมอร์ดังกล่าวจะมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาแบบ self-propagation แต่ถ้าค่า  $r$  มีค่าน้อยกว่า 1 มอนอเมอร์ดังกล่าวจะมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาแบบ cross-propagation ส่วนกรณีที่  $r$  มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่ามอนอเมอร์ดังกล่าวเกิดปฏิกิริยาทั้ง 2 แบบได้ดีพอๆ กัน

**ตัวอย่างเช่น** ในการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมจากสไตรีนและไวนิลอะซิเตตพบว่า มีแนวโน้มที่จะได้ไฮโมพอลิเมอร์ของพอลิสไตรีน เนื่องจากสไตรีนมีค่า  $r_1$  เท่ากับ 55 ซึ่งหมายถึง ชอบที่จะเกิดปฏิกิริยาแบบ self-propagation กับสไตรีนด้วยตัวเอง ในขณะที่ไวนิลอะซิเตตมีค่า  $r_1$  เท่ากับ 0.01 ซึ่งแสดงว่าอนุมูลอิสระของไวนิลอะซิเตต ชอบที่จะเกิดปฏิกิริยาแบบ cross-propagation กับสไตรีนมากกว่า ในทำนองเดียวกันเมื่อนำเอธิลีนมาทำปฏิกิริยาร่วมกับอะครีโลไนไตรล์ จะพบว่าอนุมูลอิสระของเอธิลีน ( $r_1 = 0$ ) ไม่ชอบที่จะทำปฏิกิริยาแบบ self-propagation กับเอธิลีนด้วยตัวเอง ส่วนอะครีโลไน

ไตรลส์ชอบที่จะเกิดปฏิกิริยาในแบบ self-propagation มากกว่า ดังนั้นผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงน่าจะเป็นโฮโมพอลิเมอร์ของ อะครีโลไนไตรล์เป็นส่วนใหญ่ ทั้งสองกรณีที่ยกตัวอย่างข้างต้น จะทำให้เกิดผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ที่ไม่ใช่พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (random copolymer) ที่แท้จริงเนื่องจากหน่วยย่อยทั้งสองชนิดที่เกิดขึ้นในสายโซ่พอลิเมอร์ไม่ได้เรียงตัวกันในลักษณะลักษณะแบบคละกันไป การที่จะได้พอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่มที่แท้จริงนั้น นั้น ค่า  $r_1$  และ  $r_2$  ควรจะเข้าใกล้ 1 หรือกล่าวได้ว่ามอนอเมอร์ทั้งสองมีโอกาสในการเกิด self-propagation และ cross-propagation ได้พอๆ กันทั้งคู่ นอกจากนี้ในกรณีที่ค่า  $r_1$  และ  $r_2$  มีค่าน้อยกว่า 1 และเข้าใกล้ 0 ทั้งคู่ จะมีโอกาสได้พอลิเมอร์ร่วมที่มีโครงสร้างแบบสลับ (alternating copolymer) เนื่องจากมอนอเมอร์แต่ละชนิดชอบเกิด cross-propagation ทั้งคู่ นอกจากนี้ **สมการที่ (7)** แสดงข้างต้นแล้ว สมการพอลิเมอร์ร่วมอาจจะเขียนได้อีกลักษณะหนึ่ง ในรูปของสัดส่วนโมลของมอนอเมอร์แต่ละชนิดในสารตั้งต้นที่เติมลงไป (feed ratio) เช่น ถ้ากำหนดให้  $f_1$  คือสัดส่วนโมลของมอนอเมอร์  $M_1$  และ  $f_2$  คือสัดส่วนโมลของมอนอเมอร์  $M_2$  จะได้ว่า

$$f_1 = 1 - f_2 = \frac{[M_1]}{[M_1] + [M_2]} \quad (8)$$

และถ้ากำหนดให้  $F$  คือ สัดส่วนโมลของหน่วยซ้ำแต่ละชนิดในโมเลกุลพอลิเมอร์ร่วม จะได้ว่า

$$F_1 = (1 - F_2) = \frac{d[M_1]}{d[M_1] + d[M_2]}$$

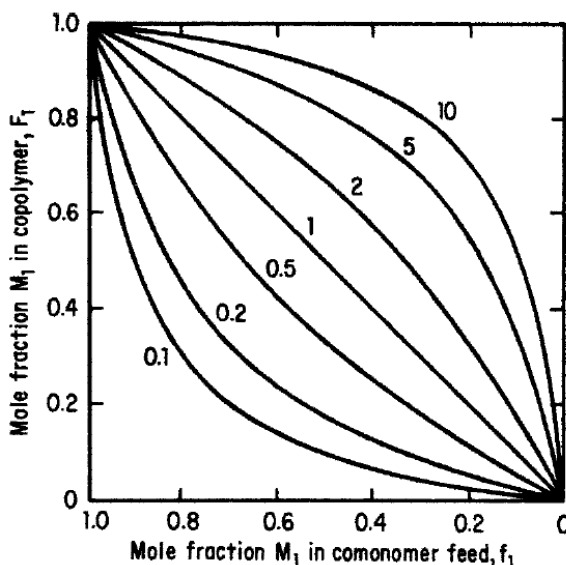
หรือเขียนอีกรูปแบบหนึ่งได้ดังนี้

$$F_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (9)$$

ในที่สุดจะเขียนสมการของพอลิเมอร์ร่วม (copolymer equation) อีกรูปแบบหนึ่งได้ดัง **สมการที่ (10)**

$$F_1 = \frac{(r_1 f_1^2 + f_1 f_2)}{(r_1 f_1^2 + 2f_1 f_2 + r_2 f_2^2)} \quad (10)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณา**สมการที่ (10)** ในสถานะการณ์ต่างๆ (ค่า  $r$  ต่างๆ) แล้วทำการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $F_1$  กับ  $f_1$  จะทำให้ได้เส้นกราฟที่มีลักษณะรูปแบบต่างๆ ตามแต่ละสถานการณ์ ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปภาพที่ 2 ในกรณีของการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมจากสไตรีนและเมธิลเมทาคริเลต



**รูปภาพที่ 1** ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโมลของมอนอเมอร์ในสารตั้งต้น ( $[M_1]/[M_1] + [M_2]$ ) กับองค์ประกอบในผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ร่วม ( $m_1/m_1+m_2$ ) ที่ได้จากปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมจากสไตรีน กับเมธิล เมทาคริเลต ในกรณีต่างๆ; (I) ปฏิกิริยาแบบอนุมูลอิสระ  $r_1 = 0.52$ ,  $r_2 = 0.46$ ; (II) ปฏิกิริยาแบบไอออนบวก  $r_1 = 10.5$ ,  $r_2 = 0.1$ ; (III) ปฏิกิริยาแบบไอออนลบ  $r_1 = 0.12$ ,  $r_2 = 6.4$ . [23]

จากรูปภาพที่ 1 จะเห็นได้ว่า ในกรณีที่  $r_1$  และ  $r_2$  มีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 (เช่นการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากสไตรีนร่วมกับเมธิลเมทาคริเลต ซึ่งมีค่า  $r_1 = 0.52$  และค่า  $r_2 = 0.46$ ) มอนอเมอร์จะมีโอกาสที่จะเกิด cross-propagation มากกว่า self-propagation เป็น 2 เท่า และผลิตภัณฑ์ที่ได้มีแนวโน้มอยู่ระหว่างเส้นของพอลิเมอร์ร่วมแบบสลับกับเส้นของพอลิเมอร์ร่วมแบบสุ่ม (กราฟเส้นที่ 1) ซึ่งจุดที่เส้นกราฟดังกล่าวตัดกับเส้นทแยงมุม (diagonal) ของกราฟจะเป็นจุดที่สัดส่วนโมลระหว่างมอนอเมอร์ในสารตั้งต้นและองค์ประกอบในพอลิเมอร์ร่วมยังคงไม่เปลี่ยนแปลงไปจากตอนเริ่มต้น แม้ว่าปฏิกิริยาจะดำเนินไปจนเกิดค่าการแปลงผันของมอนอเมอร์สูง ก็ตาม ซึ่งจะเรียกกรณีนี้ว่า **azeotropic polymerization** (จะเกิดเฉพาะที่สัดส่วนโมลเดียวเท่านั้น)

ในกรณีที่ค่า  $r_1 = r_2 = 0$  จะพบว่า self-propagation เกิดได้ยากมากและมีแนวโน้มจะได้พอลิเมอร์ร่วม แบบสลับ (alternating copolymer) ซึ่งในกรณีนี้ค่า  $F_1$  จะเท่ากับ 0.5 ตัวอย่างกรณีนี้ได้แก่การสังเคราะห์ พอลิเมอร์จากสไตรีนร่วมกับมาเลอิกแอนไฮไดรด์

ในกรณีที่ค่า  $r_1 = r_2 = 1.0$  (หรือเรียกว่า **truly random copolymerization**) จะได้ว่าค่า  $F_1 = f_1$  ดังนั้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $F_1$  กับ  $f_1$  จะแสดงค่าองค์ประกอบ (composition) ที่



เท่ากันทั้งในสารตั้งต้น และในผลิตภัณฑ์พอลิเมอร์ร่วมที่สังเคราะห์ได้ (ตัวอย่างเช่นการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากเอธิลีนร่วมกับไวนิล อะซิเตต) และเรียกปฏิกิริยานี้ว่า **Azeotropic copolymerization**

โดยส่วนมากแล้วปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมมักจะไม่ใช้กรณีที่  $r_1 = r_2 = 1$  กล่าวคือ มอนอเมอร์ชนิดหนึ่งอาจจะเกิดปฏิกิริยาหรือถูกใช้ไปได้มากกว่ามอนอเมอร์อีกชนิดหนึ่ง ดังนั้นสัดส่วนความเข้มข้นของมอนอเมอร์ในสารตั้งต้นจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาในการทำปฏิกิริยา (เรียกว่าเกิด composition drift ซึ่งจะมีผลรบกวนต่อการทดลองหาค่า  $r_1$  และ  $r_2$  ด้วย) ดังนั้นเพื่อที่จะรักษาให้สมการของพอลิเมอร์ร่วมยังคงใช้ได้อยู่ในช่วงของการแปลงผันสูงๆ จึงอาจจะต้องทำการเติมมอนอเมอร์ลงไปชดเชยในสัดส่วน ที่เหมาะสม

ในกรณีที่  $r_1 \gg 1$  และ  $r_2 \ll 1$  เช่นการสังเคราะห์พอลิเมอร์จากสารตั้งต้นสไตรีนร่วมกับไวนิลอะซิเตต ( $r_1 = 55$ ,  $r_2 = 0.01$ ) จะได้กราฟในลักษณะที่คล้ายกับการเกิดโฮโมพอลิเมอร์ กล่าวคือค่า  $F_1$  เข้าใกล้ 1.0 ได้ง่าย แม้ว่า  $f_1$  จะน้อยกว่า 0.5 ก็ตาม

ในกรณีที่ค่า  $r_1 \neq r_2$  แต่  $r_1 \times r_2 = 1$  เช่น การสังเคราะห์โดยใช้เมธิลเมธาคริเลตร่วมกับไวนิลคลอไรด์ ( $r_1 = 10$ ,  $r_2 = 0.1$ ) จะได้กราฟที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกราฟของกรณีที่  $r_1 \gg 1$ ,  $r_2 \ll 1$  ในตัวอย่างที่ผ่านมา แต่ลักษณะพิเศษของปฏิกิริยาระบบนี้คือ  $k_{11}/k_{12} = 1/(k_{22}/k_{21})$  หรือ  $k_{11}/k_{12} = k_{21}/k_{22}$  ซึ่งหมายความว่า ไม่ว่าลักษณะที่ปลายสายโซ่ที่กำลังโตจะเป็นโครงสร้างของมอนอเมอร์ชนิดใดก็ตามมอนอเมอร์ดังกล่าวชอบที่จะเกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันทั้งคู่และเราเรียกปฏิกิริยาแบบนี้ว่า ideal copolymerization โดยที่ตำแหน่งของเส้นกราฟจะอยู่ระหว่างกราฟของ  $r_1 \gg 1$ ,  $r_2 \ll 1$  และกราฟของ  $r_1 = r_2 = 1$  โดยอาจจะขยับ เข้าใกล้กราฟแบบแรกมากถ้าหากว่าค่า  $r_1$  และ  $r_2$  เบี่ยงเบนห่างออกจากค่าตัวเลข 1 มากทั้งคู่ (เช่นในกรณีนี้ ค่า  $r_1$  ของสไตรีนซึ่งเท่ากับ 10 และค่า  $r_2$  ของไวนิลคลอไรด์ซึ่งเท่ากับ 0.1

## 1.2 การหาค่า reactivity ratio

ข้อควรระวังประการแรกในการหาค่า reactivity ratio คือเมื่อปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมดำเนินไประยะหนึ่ง (เช่นที่ค่าการแปลงผันมากกว่า 10%) จะพบว่าสัดส่วนของมอนอเมอร์  $M_1$  กับ  $M_2$  ที่เหลืออยู่ในสถานะทำปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงไปจากตอนเริ่มต้นและจะยิ่งเปลี่ยนแปลงไปมากขึ้นตามระยะเวลาในการดำเนินปฏิกิริยาหรือค่าการแปลงผันที่มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ร่วมส่วนใหญ่จะมีค่า  $r_1$  ไม่เท่ากับ  $r_2$  ดังนั้นการคำนวณค่า  $r_1$  และ  $r_2$  จากสมการของพอลิเมอร์ร่วม 2 สมการ โดยใช้ข้อมูลจาก พอลิเมอร์ร่วม 2 ชนิดที่ทราบสัดส่วนองค์ประกอบแน่นอน อาจเกิดความคลาดเคลื่อนในส่วนของค่า  $r_1$  และ  $r_2$  ที่คำนวณได้ เนื่องจากสัดส่วนโมลของมอนอเมอร์ได้มีการเปลี่ยนแปลงไป นอกจากวิธีการหาค่า reactivity ratios ในลักษณะดังที่กล่าว

ข้างต้นแล้ว วิธีการหาค่า reactivity ratios อีกแบบหนึ่งคือวิธีของ Fineman และ Ross [24] ซึ่งมี การจัดรูปสมการของพอลิเมอร์ร่วมใหม่ โดยจากสมการของพอลิเมอร์ร่วมแบบเดิม (สมการที่ 7)

$$d[M_1] / d[M_2] = m_1 / m_2 = [M_1] (r_1[M_1] + [M_2]) / [M_2]([M_1] + r_2[M_2])$$

จัดรูปใหม่เป็น

$$(F/f)(f-1) = (F^2/f) r_1 - r_2 \quad (11)$$

หรือ

$$(f-1)/F = - (f/F^2) r_2 + r_1 \quad (12)$$

เมื่อ

$F = [M_1] / [M_2]$  หรืออัตราส่วนการป้อนสารมอนอเมอร์ (feed ratio)

$f = m_1 / m_2$  หรือองค์ประกอบในพอลิเมอร์ร่วม

ในกรณีนี้ โปรดสังเกตนิยามของ  $F$  และ  $f$  ในสมการของ Fineman และ Ross (สมการที่ 12) จะมีความหมายตรงกันข้ามกับนิยามของค่า  $F$  และ  $f$  ในสมการของพอลิเมอร์ร่วม สมการที่ 10 ดังนั้นในการคำนวณต้องระวังและพิจารณานิยามของค่า  $F$  และ  $f$  ให้ดี จากสมการของพอลิเมอร์ร่วมที่พัฒนา มาข้างต้น (สมการที่ 11) เมื่อทำการเขียนกราฟระหว่าง  $(F/f)(f-1)$  เทียบกับ  $(F^2/f)$  จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ  $r_1$  และจุดตัดแกน  $Y$  เท่ากับ  $-r_2$  หรือในทางตรงกันข้ามเมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $(f-1)/F$  เทียบกับ  $(f/F^2)$  จะได้ความชันเท่ากับ  $-r_2$  และจุดตัดเท่ากับ  $r_1$  นอกจากนี้วิธีการดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีวิธีการคำนวณ reactivity ratios แบบอื่นๆอีก เช่นวิธีของ Kelen และ Tudos[25] วิธีของ Braun[26] และวิธีของ Tidwell และ Mortimer[11]

ตารางที่ 2 Reactivity ratio ของมอนอเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้

Monomer 1	Monomer 2	$r_1$	$r_2$	Temperature (° C)
VA	2-EHA	0.04	7.5	60[27]
VA	MAA	0.01	20	70[27]
VA	AA	0.01	10	70[27]
VA	MMA	0.015	20	60[27]
VA	2-HEA	1.67	0.43	50[13]
VA	2-HEMA	0.90	1.65	50[14]

สำหรับในงานวิจัยนี้การสังเคราะห์โคพอลิเมอร์สามารถทำนายลักษณะการจัดเรียงตัวของโคพอลิเมอร์ โดยพิจารณาจาก reactivity ratio ของมอนอเมอร์จาก **ตารางที่ 2** ในกรณีที่  $r_1 \ll 1$  และ  $r_2 \gg 1$  การสังเคราะห์พอลิเมอร์เกิดลักษณะที่คล้ายกับการเกิดโฮโมพอลิเมอร์  $r_2 \gg 1$  แสดงว่า Monomer 2 มีอัตราเร็วของ propagation species กับมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันได้มากกว่าโดยจะได้ Monomer 2 ตั้งแต่ช่วงแรกของการต่อสายพอลิเมอร์ คาดว่าลักษณะการต่อของโคพอลิเมอร์เป็นแบบ **block copolymer** ตัวอย่างเช่น การเกิดโคพอลิเมอร์ของ VA/2-EHA ค่า  $r_{VA} = 0.04$  และ  $r_{2-EHA} = 7.5$  แสดงว่า 2-EHA มีอัตราเร็วของ propagation species กับมอนอเมอร์ชนิดเดียวกันได้มากกว่า VA เนื่องจากค่า  $r_{2-EHA} [7.5] \gg r_{VA} [0.04]$  ในกรณีคู่พอลิเมอร์อื่น ๆ ได้แก่ VA/MAA, VA/AA, VA/MMA และ VA/2-HEA จะมีแนวโน้มเดียวกันหมด แต่ในกรณีของ VA/2-HEMA ค่า  $r_{VA} = 0.90$  และ  $r_{2-HEMA} = 1.65$  แสดงว่า VA มีอัตราเร็วของ propagation species ใกล้เคียงกันกับ 2-HEMA เนื่องจากค่า  $r_{VA} [0.90] \approx r_{2-HEMA} [1.65]$  คาดว่าลักษณะการต่อของโคพอลิเมอร์เป็นแบบ **alternative copolymer** มากกว่าแบบอื่น ๆ



ภาคผนวก ค

การทดสอบสมบัติของฟิล์ม

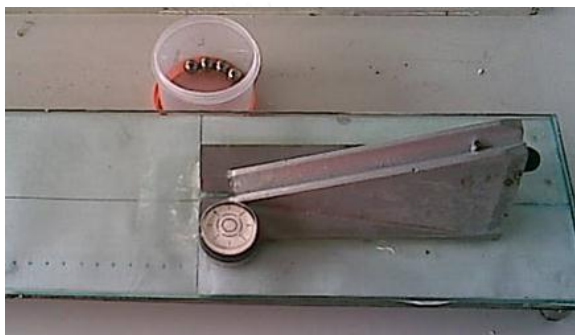


## การทดสอบสมบัติของฟิล์ม

### การทดสอบสมบัติการยึดติด (tackiness) แบ่งออกเป็น

#### 1. การทดสอบสมบัติการยึดติด (tack) แบบ Rolling ball

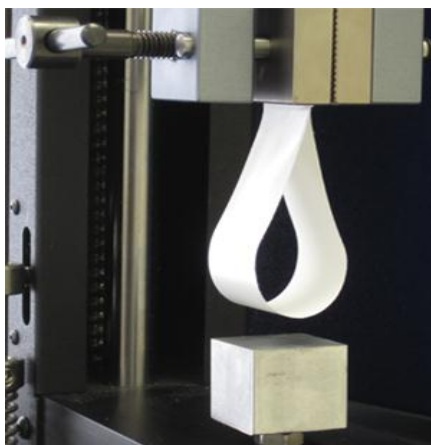
การใช้งานแบบ Rolling ball จะมีการทำทางลาดชันที่เป็นช่องทำมุม 20 องศา กับพื้นผิวแล้วปล่อยให้ลูกบอลกลิ้งลงมาตามร่องนั้นมาบนชิ้นงานที่อยู่ในทางเรียบซึ่งผิวของชิ้นงานนั้นเป็นกาว ระยะการกลิ้งของ rolling ball เทียบได้กับการวัดแบบ Quick stick โดยบอลที่ใช้ทำจากเหล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.11 เซนติเมตร ทางลาดชันนี้มีความสูงจากพื้นเท่ากับ 6.51 เซนติเมตรอ้างอิงตามมาตรฐาน PSTC 6



รูปภาพที่ 1 การทดสอบสมบัติการยึดติด (tackiness) แบบ Rolling ball

#### 2. การทดสอบสมบัติการยึดติด (tack) แบบ Quick stick หรือ loop tack

การทดสอบนี้จะไม่มีการใช้งาน load ทำได้โดยใช้หัวจับคิปลายทั้งสองข้างชันงานโดยหันด้านที่เป็นฟิล์มกาวออกด้านนอก จากนั้นที่คิปลายจะเคลื่อนที่ลงมาบนพื้นผิวที่จะทดสอบแล้วเครื่องจะดึงกลับและบันทึกแรงที่ใช้ในการดึงเทปออก เครื่องจับนี้อาจจะใช้เครื่อง Tensile .ในการทดสอบ ความเร็วของหัวจับจะมีค่าเท่ากับ 30.5 เซนติเมตร/นาที แรงที่ได้จะเป็นฟังก์ชันกับการวัดระดับของสมบัติการยึดติด (tack) อ้างอิงตามมาตรฐาน FINAT 9



รูปภาพที่ 2 การทดสอบสมบัติการยึดติด (tackiness) แบบ Quick stick หรือ loop tack

### 3. การทดสอบสมบัติดึงลอกออก (peel) แบ่งออกเป็น

#### 3.1 การดึงลอกในแนว 180 องศา

เป็นการวัดแรงในการลอกออกซึ่งใช้เครื่อง Tinius Olsen model H5K-ในการทดสอบ วิธีการทำได้โดยนำเอาชิ้นงานที่ต้องการทดสอบมาติดไว้บนผิวของชิ้นงานที่นำไปใช้ เช่น เหล็ก โครเมียมม หรือไม้ แล้วแต่การนำไปใช้งาน โดยเริ่มติดเทปกาวจากขอบล่างของชิ้นงานขึ้นไปแล้วปล่อยให้คลายที่เหลือห้อยลงมาในทิศทางตรงข้ามกับหัวจับที่ใช้จับชิ้นงาน ซึ่งปลายที่ห้อยลงมานี้จะถูกจับด้วยหัวจับอีกอัน จากนั้นทำการลอกเทปกาวออกในแนว 180 องศา เครื่องจะทำการวัดแรงที่ใช้ในการดึงออกความเร็วของหัวจับเท่ากับ 12 นิ้ว/นาที การทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน PSTC 1 หรือ FINAT 1

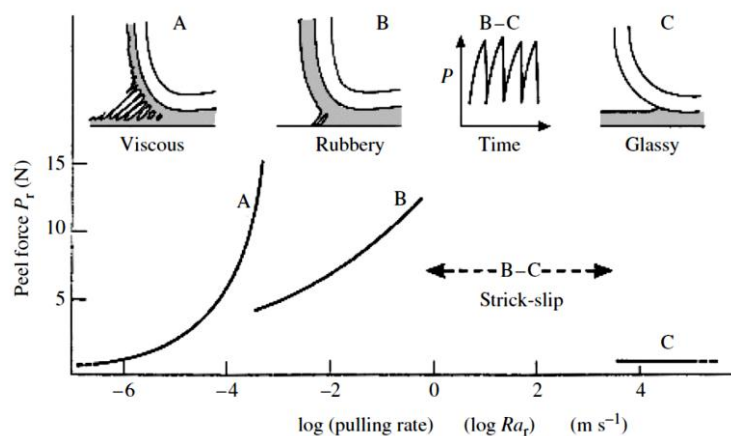
#### 3.2 การดึงลอกในแนว 90 องศา

ในการทดสอบนี้ต้องใช้เครื่อง Tinius Olsen model H5K-ซึ่งชุดอุปกรณ์การจับชิ้นงานเป็นละชุดกับการดึงลอกออกในแนว 90 องศา โดยต่อเข้ากับอุปกรณ์ที่บริเวณฐานรองสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ บริเวณแท่นรองเป็นพื้นผิวที่ต้องการนำไปใช้งาน เมื่อติดเทปกาวบนพื้นผิวที่ต้องการทดสอบแล้วปลายของชิ้นงานจะถูกจับด้วยหัวจับ ส่วนอีกด้านติดอยู่กับพื้นผิว เมื่อเดินเครื่องชิ้นงานจะถูกดึงลอกในแนว 90 องศา การทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน FINAT 2

การทดสอบสมบัติการลอกออก (peel) เป็นการดึงลอกจากแผ่นวัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ก่อนทำการทดสอบต้องทำความสะอาดพื้นผิวของวัสดุ เพื่อให้แรงที่ใช้ดึงลอกออกนั้นเป็นความแข็งแรงของพันธะระหว่างเทปกาวกับพื้นผิวเท่านั้น

การวัดสมบัติการลอกออก (peel) ของชิ้นงานนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและอัตราการดึงลอกออก จะพบการวัดสมบัติการลอกออก (peel) ที่เปลี่ยนแปลงอัตราการดึงเป็นฟังก์ชันกับสมบัติ

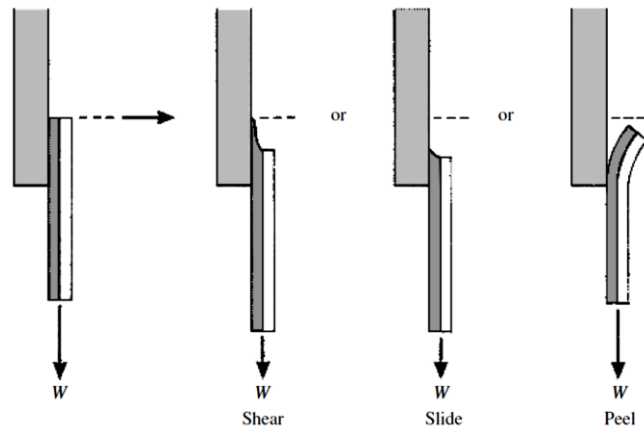
Viscoelastic สำหรับอัตราการดึงที่เปลี่ยนไปนั้น ทำให้มีการตอบสนองกับสมบัติ Viscoelastic ที่เปลี่ยนไปตามอัตราการดึงและอุณหภูมิ การศึกษาสมบัติการลอกออก จะแสดงพฤติกรรมความเป็น viscous, rubbery, glassy เมื่อให้อัตราการดึงที่ต่างกันดังรูปภาพที่ 3



**รูปภาพที่ 3** Master curve ของการดึงลอก (peel) ของ polybutyl acrylate บน polyester film ทดสอบด้วยการดึงลอกในแนว 90 องศา บนแก้ว หรือพฤติกรรมของ force-time (“stick-slip”)[28]

### 2.3 การทดสอบสมบัติความแข็งแรงภายในการเฉือน (shear)

การทดสอบสมบัติความแข็งแรงภายในการเฉือน (shear) ในอุตสาหกรรมของ กาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกดเรียกรทดสอบนี้ว่า shear adhesion หรือ holding power test การทดสอบนี้จะถ่วงด้วยตุ้มน้ำหนักขนาด 1 กิโลกรัม โดยชิ้นงานที่ต้องการทดสอบจะนำไปติดบนวัสดุประเภทเหล็ก หรือ stainless steel จะเริ่มจับเวลาจนกว่าชิ้นงานจะเลื่อนออกจากวัสดุที่นำไปติดชิ้นงาน (ให้ทำทดสอบภายใต้สภาวะการควบคุมอุณหภูมิที่ 25 °C) การทดสอบนี้อ้างอิงตามมาตรฐาน PSTC-7 ลักษณะ fail แสดงดังรูปภาพที่ 4



รูปภาพที่ 4 ลักษณะ fail ของ shear tester





ภาคผนวก ง

ชนิดของกาวยประเภทวอองไวต่อแรงกด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ชนิดของกาวเลเทกซ์ (latex adhesive)

สามารถแบ่งได้ตามลักษณะการนำไปใช้งานได้ 2 ชนิด ได้แก่ wet bonding และ dry bonding

- 1. Wet bonding** คือ กาวที่มีการใช้งานขณะยังเป็นของเหลวอยู่เมื่อระเหยน้ำออกไป แล้วจึงจะเกิดพันธะที่ทำให้การเชื่อมติดกันระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว ลักษณะที่สำคัญของกาวประเภทนี้ คือ องค์ประกอบเชิงกลในกระบวนการที่ทำให้เกิดการเชื่อมติดกัน เช่น คามอดูลัส : ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเนื้อกาว การเติม filler จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับกาว filler ที่เติมลงไปใต้น้ำอย่างมีราคาถูกจึงสามารถช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้ การปรับปรุงพันธะระหว่างกาวกับพื้นผิวนั้นเป็นเรื่องสำคัญ กาวประเภทนี้เหมาะกับสถานะพื้นผิวที่ขรุขระและชอบน้ำ เช่น กระดาษ, หนังสัตว์, คอนกรีต และผ้า เป็นต้น ตัวอย่างของกาวชนิดนี้ได้แก่ กาวที่ใช้เชื่อมกระเบื้อง, กาวสำหรับใช้ยึดพื้นพรม
- 2. Dry bonding** คือ กาวที่มีการใช้งานขณะที่แห้ง จะเกิดพันธะขึ้นเมื่อเราให้แรงกดทำให้พื้นผิวทั้งสองเกิดการยึดเกาะกัน จึงเรียกว่า กาวประเภทที่ไวต่อแรงกด หรือ pressure sensitive adhesive (PSA) นั่นเอง ตัวอย่างของกาวประเภทนี้ คือ ฟิล์มที่ระเหยน้ำออกแล้ว ซึ่งจะยึดติดเฉพาะกับตัวเอง ฉะนั้นพื้นผิวอีกด้านหนึ่งก็ต้องถูกเคลือบด้วยยางเหมือนกัน

## ชนิดของกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด[29]

### 1. Solvent based adhesive

ของการผลิตกาวประเภทที่ไวต่อแรงกด สามารถแบ่งองค์ประกอบหลักได้ 3 ส่วน คือ elastomers, tackifier resin และ ตัวกลางในการกระจายตัว ในการทำกาวประเภทที่ไวต่อแรงกดด้วยยางธรรมชาตินั้นต้องใช้ tackifier resin ประเภท wood resin และ zine oxide เพื่อเพิ่มเนื้อให้กับกาว แต่ zine oxide มีผลทำให้สมบัติการยึดติด (tackiness) ลดลง สำหรับ elastomers ที่ใช้ในการทำกาวประเภทที่ไวต่อแรงกดนั้นมีหลายชนิด เช่น butyl rubber, styrene-butadiene rubber (SBR), polyisoprene และ thermoplastic rubber เช่น blockcopolymer ของ styrene กับ butadiene หรือ isoprene เป็นต้น

Tackifier สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1. Tackifier resin ที่ได้จาก wood resin หรือเรียกว่า Gum rosin แต่เมื่อมันถูกความร้อนและการทำให้เสื่อมสภาพ (aging) ซึ่งเกิดจากการออกซิเดชัน ส่งผลให้สมบัติการยึดติด (tackiness) ลดลง เพื่อทำให้อนุพันธ์เกิดความเสถียรจึงได้ hydrogenation, esterification เพื่อทำให้ tackifier resin สามารถใช้งานในช่วงที่กว้างขึ้น
2. Tackifier resin ที่ได้จาก hydrocarbon resin ใช้กันอยู่ เช่น aliphatic, aromatic หรือ terpenes

สำหรับการใช้งานอาจจะใช้เพียงชนิดเดียว หรือนำทั้ง 2 ชนิดมาผสมแล้วแต่ความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน

## 2. Hot melt adhesive

ส่วนประกอบจะคล้ายกับ solvent based adhesive คือ elastomers กับ tackifier resin จะต้องมีความเหมาะสมกัน ส่วนสำคัญ คือ thermoplastic rubber สมบัติที่โดดเด่นของเฟสสองเฟสระหว่าง styrene end block ที่เชื่อมอยู่กับ butadiene หรือ isoprene ณ อุณหภูมิห้องทำให้ elastomer นี้ มีการเคลื่อนไหวอย่างเป็นอิสระในอุณหภูมิที่สูงหรือในสารละลาย โดยสมบัติเหล่านี้มีความคล้ายกับ vulcanized rubber ที่อุณหภูมิห้องยังมีพฤติกรรมเหมือนกับ thermoplastic คือ เมื่อให้ความร้อน หรือถูกละลายความแตกต่างกันระหว่าง hot-melt adhesive กับ solvent-based คือ hot-melt ไม่สามารถควบคุมความหนืดได้ด้วยตัวทำละลาย แต่มันจะถูกควบคุมโดยความร้อนแทน ดังนั้นในการเลือก ชนิดและปริมาณของ tackifier resin มีความจำเป็นต่อความหนืดที่ได้

## 3. Water based adhesive

มีการใช้งานกันมาอย่างยาวนานแล้ว การผลิตกาวประเภทที่ว่องไวต่อแรงกดโดยใช้น้ำเป็นตัวกลางเป็นที่นิยมกันมาก เนื่องจากประโยชน์ทางด้านสิ่งแวดล้อมและต้นทุนการผลิต เพราะใช้น้ำเป็นตัวกลาง แต่การผลิตกาวแบบนี้มีข้อจำกัดในเรื่องของการระเหยน้ำออกจากกาว ซึ่งจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในส่วนเครื่องจักรในการทำให้น้ำระเหยออก และจะเสียเวลามากกว่าเมื่อเทียบกับแบบ solvent based adhesive

ภาคผนวก จ

ทฤษฎีการยัดติตของกาว



## กลไกการยึดเกาะของ adhesion มี 5 แบบ [30]

### 1. การดูดซับและการแผ่กระจายบนวัสดุ (Adsorption and Wetting)

เมื่อพื้นผิวสองพื้นผิวที่ไม่มีประจุไฟฟ้าอยู่ใกล้กันมากพอจะเกิด “แรงดึงดูดเชิงกล” (Physical attraction) เช่น แผ่กระจายบนวัสดุ (Wetting) ของของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง ในกรณีของของแข็ง 2 ชนิดอยู่ใกล้ชิดกันมากถึงระดับจุลภาค (micron) หรือระดับอะตอม ความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวจะเป็นสิ่งขัดขวางไม่ให้เกิดการยึดเกาะหรือสัมผัส จะมีเพียงบางตำแหน่งเท่านั้นที่สามารถเกิดการสัมผัสกันได้ ในกรณีของเหลวบนของแข็งสามารถเกิดแผ่กระจายบนวัสดุได้ง่าย การแผ่กระจายบนวัสดุจะเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับมุมสัมผัส (Contact angle,  $\theta$ ) ถ้าของเหลวมีความสามารถในการแผ่กระจายบนวัสดุ (Wettability) บนพื้นผิวของแข็งดี ของเหลวชอบที่สัมผัสพื้นผิวของแข็งเกิดการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง ทำให้มีค่ามุมสัมผัส  $\theta$  น้อย ในทางตรงกันข้าม ถ้าวัสดุมีความสามารถในการแผ่กระจายต่ำของเหลวไม่ชอบสัมผัสกับพื้นผิวของแข็งเป็นผลทำให้มีค่ามุมสัมผัส  $\theta$  มาก สมบัติการการแผ่กระจายของเหลวบนพื้นผิวของแข็ง สามารถแสดงในรูปสมการ Dupre แสดงการยึดเกาะ ( $W_A$ ) ของของเหลวบนพื้นผิวของแข็งดังนี้

$$W_A = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_{12} \quad (1)$$

เมื่อ  $\gamma_1$  และ  $\gamma_2$  คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) ของของเหลวและของแข็งตามลำดับ ส่วน  $\gamma_{12}$  คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระระหว่างของเหลวและของแข็ง สมการนี้สามารถแสดงความสัมพันธ์กับกรณีของของเหลวบนพื้นผิวอิสระของอินเทอร์เฟซระหว่างของเหลวและของแข็งโดยใช้สมการของ Young equation ทำสมดุลของแรงกระทำที่จุด “A” ตามแนวระนาบ สามารถเขียนสมการในรูป

$$\gamma_{SA} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2)$$

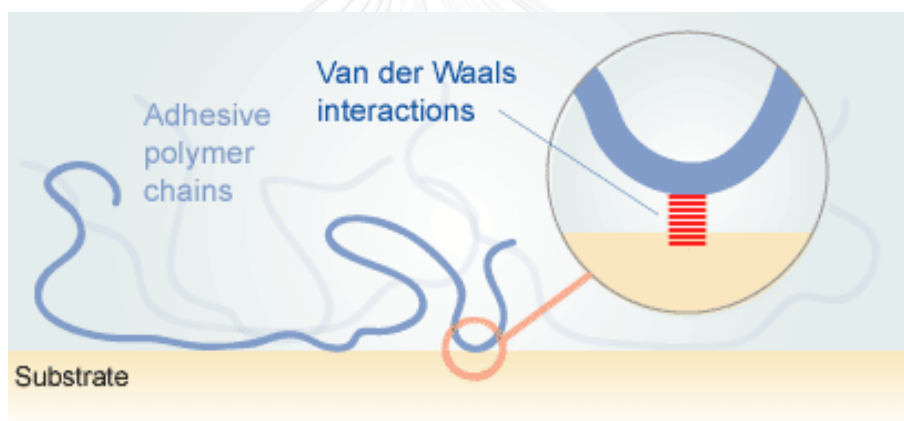
เมื่อ  $\gamma_{SA}$ ,  $\gamma_{SL}$  และ  $\gamma_{LV}$  คือ ค่าพลังงานพื้นผิวอิสระ (Surface free energy) หรือแรงตึงผิว (Surface tension) ของอินเทอร์เฟซ ระหว่างของแข็ง-ก๊าซ ของแข็ง-ของเหลว และของแข็ง-ก๊าซ ตามลำดับ และ  $\theta$  คือ ค่ามุมสัมผัส (Contact angle) พื้นของแข็งจะทำการวัดค่าแรงตึงผิวได้ยาก ในขณะที่เราสามารถทำการทดลองวัดค่าแรงตึงผิวของเหลวได้ง่าย การหาค่าแรงตึงพื้นผิวของของแข็งสามารถทำได้โดยการใช้ของเหลวที่ทราบค่าแรงตึงผิวของการแผ่กระจายบนผิวของแข็ง โดย

มีการนิยามค่า “แรงตึงผิววิกฤต” (Critical surface tension,  $\gamma_c$ ) กล่าวคือของเหลวที่มีค่าแรงตึงผิวน้อยกว่าแรงตึงผิววิกฤตของของแข็ง ( $\gamma_{LV} < \gamma_c$ ) เท่านั้นที่สามารถเกิดการแผ่กระจายทันทีทันใด นำ (1) และ (2) โดยให้  $\gamma_1 = \gamma_{sv}$ ,  $\gamma_2 = \gamma_{LV}$  และ  $\gamma_{12} = \gamma_{SL}$  ทำให้ได้สมการ

$$W_A = \gamma_{sv} + \gamma_{LV} - \gamma_{SL} \quad (3)$$

$$W_A = \gamma_{LV} + \gamma_{LV} \cos\theta \quad (4)$$

ค่างานของการยึดเกาะ ( $W_A$ ) แสดงถึงแรงหรือพันธะทางกายที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระจายระหว่างโมเลกุล (Intermolecular dispersion force) ที่สัมผัสและเกิดการแผ่กระจาย หรือการยึดเกาะ

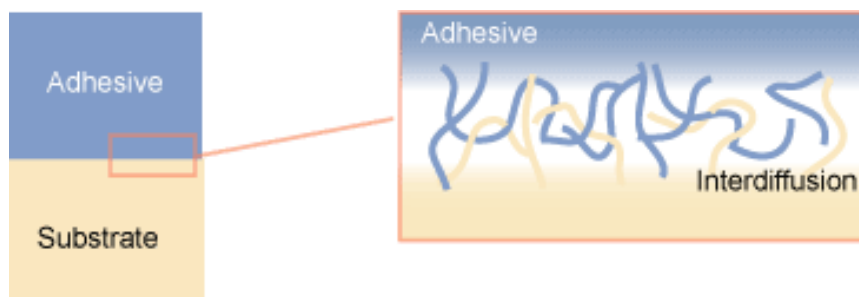


รูปภาพที่ 1 แสดงลักษณะการยึดติดด้วยแรงกระจายระหว่างโมเลกุลของกาวและวัสดุ

## 2. การแพร่เข้าหากัน (Interdiffusion)

การยึดเกาะของพื้นผิวพอลิเมอร์สองชนิดสามารถเกิดได้ ถ้าโมเลกุลพอลิเมอร์บริเวณพื้นผิวสัมผัสทั้งสองชนิดมีการแพร่ (Diffusion) เข้าหากันและกัน ความแข็งแรงของการยึดเกาะชนิดนี้จะขึ้นอยู่กับปริมาณการเกี่ยวพันกับของสายโซ่โมเลกุล (Molecular entanglement) ว่ามีมากหรือน้อย อีกทั้งขึ้นอยู่กับชนิดและจำนวนสายโซ่โมเลกุล เนื่องจากความสามารถในการแพร่และการพันกันของสายโซ่ขึ้นอยู่กับความสามารถในการเคลื่อนที่ของสายโซ่โมเลกุล (Molecular motion) ดังนั้นการยึดเกาะแบบอินเทอร์ดิฟิวชันสามารถเพิ่มโดยการใช้ตัวทำละลาย (Solvents) ทาที่พื้นผิว หรือการใช้สารเติม จำพวก plasticizers ทำให้สายโซ่โมเลกุลพอลิเมอร์สามารถเคลื่อนที่ได้ง่าย กลไกการยึด

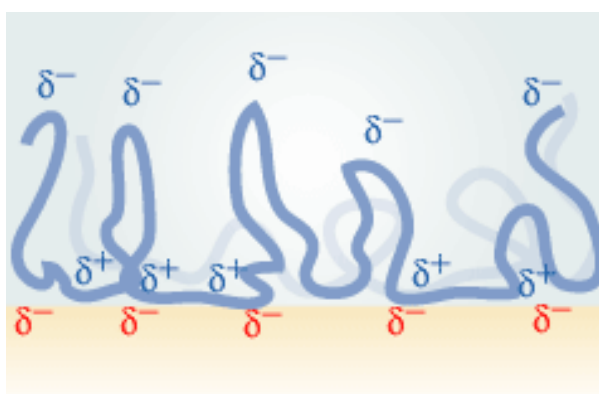
เกาะแบบนี้สามารถเกิดกับพื้นผิวที่มีการเคลือบพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงผิวก่อนแล้วจึงทำการเคลือบ  
กาวลงไป



รูปภาพที่ 2 แสดงการการยึดติดที่เกิดจากการแทรกผ่านรวมเข้ากันของโมเลกุล

### 3. แรงดึงดูดของประจุ (Electrostatic Attraction)

แรงดึงดูดจะเกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวทั้งสองที่มีประจุต่างกันมาอยู่ใกล้กัน นั่นคือถ้าพื้นผิวหนึ่งมี  
ประจุบวก (Net positive charge) และอีกพื้นผิวหนึ่งมีประจุรวมเป็นลบ (Net negative charge)  
ตัวอย่างเช่น อันตรกิริยาระหว่างกรด-เบส (Acid-base interaction) และพันธะไอออนิก (Ionic  
bonding) ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับความหนาแน่นประจุ (charge density)  
แรงดึงดูดระหว่างประจุหรือไฟฟ้าสถิตจะไม่ใช่แรงยึดเกาะหลักระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว แต่แรงดึงดูด  
ชนิดนี้มีส่วนร่วมกับกลไกการยึดเกาะชนิดอื่น ช่วยให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างสองพื้นผิวได้ดีขึ้น  
เช่น การยึดเกาะของสารคู่ควบประเภท Silane coupling agent ที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นประจุบวก  
(Cationic function groups) เป็นต้น



รูปภาพที่ 3 แสดงลักษณะแรงยึดติดด้วยแรงดึงดูดของประจุ

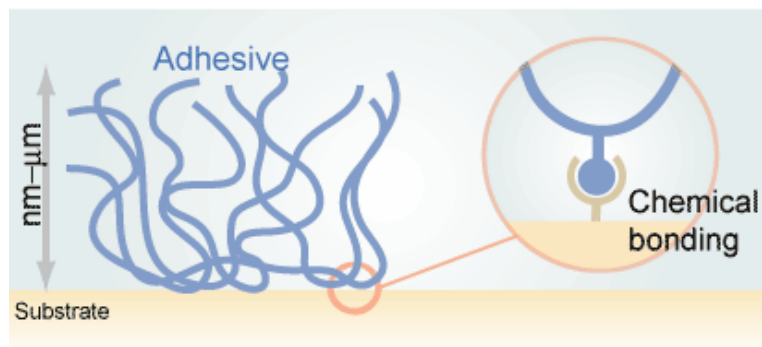
### 4. พันธะเคมี (Chemical Bonding)

เป็นกลไกการยึดเกาะที่สำคัญที่สุดชนิดหนึ่ง เกิดขึ้นเมื่อพื้นผิวหนึ่งหมู่ฟังก์ชันทางเคมี (Function groups) บนพื้นผิวและอีกพื้นผิวหนึ่งมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมี เกิดเป็นพันธะทางเคมีได้แก่ พันธะโควาเลนต์เชื่อมระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิว ซึ่งเป็นการยึดเกาะที่แข็งแรง ความแข็งแรงของกลไกการยึดเกาะชนิดนี้ขึ้นกับจำนวนและชนิดของพันธะที่เกิดขึ้น การเสถียรภาพของพื้นผิวระหว่างพื้นผิว จะเกี่ยวข้องกับการแตกหักของพันธะเคมีนั่นเอง ตัวอย่างการยึดเกาะด้วยพันธะทางเคมี ได้แก่ การเกิดพันธะโควาเลนต์ระหว่างสารคู่ควบ (Coupling agent) กับหมู่ฟังก์ชันบนพื้นทั้งสอง

ตารางที่ 1 พลังงานพันธะของพันธะเคมีชนิดต่างๆ

ชนิดของพันธะ	พลังงานพันธะ (กิโลจูล/ โมล)
<b>Primary bond</b>	
- Ionic	600 - 1,100
- Covalent	60 - 700
- Metallic	110 - 350
Donor-acceptor bonds	
- Bronsted acid-base interaction	> 1,000
- Lewis acid-base interaction	> 80
<b>Secondary bond</b>	
- Hydrogen bond	
Hydrogen bonds involving flourine	> 40
Hydrogen bonds excluding flourine	10 - 25
- Van der waal bonds	
Premanent dipole-dipole interaction	4 - 20
Dipole-induced dipole interaction	< 2
Dispersion (London) forec	0.08 - 40

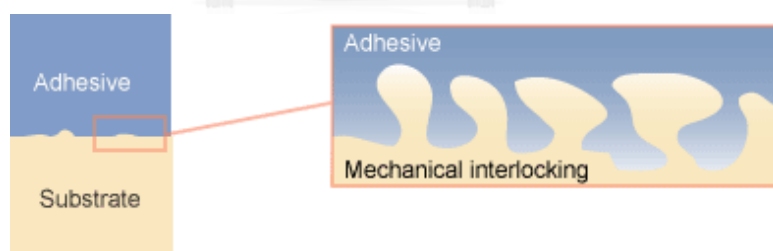




รูปภาพที่ 4 แสดงกสรยึดติดที่เกิดจากพันธะเคมี

### 5. การยึดติดแบบเชิงกล (Mechanical Adhesion, Mechanical Interlocking)

การยึดเกาะเชิงกลเกิดเมื่อกาวเปียกไปบนพื้นผิวที่เป็น backing ขณะเป็นของไหลสามารถแทรกตัวไปบนพื้นผิวที่ขรุขระของ backing รวมทั้งช่องว่างต่างๆ บนพื้นผิวเมื่อสารละลายระเหย ทำให้เกิดการ set ตัว เป็นเหตุเกิดการล็อคติดอยู่กับพื้นผิวของ backing ความแข็งแรงของการยึดเกาะนี้ขึ้นอยู่กับความขรุขระ (Roughness) ของพื้นผิวที่จะเกิดการสัมผัส ทำให้เกิดการแทรกตัวของกาว รวมทั้งปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อความสามารถของกาวซึมและแทรกตัวในพื้นที่จะยึดติด เช่น ความหนืดของกาวพื้นผิวที่มีความเรียบเกินไปจะเกิดการยึดเกาะเชิงกลน้อย หรือไม่มีเลย



รูปภาพที่ 5 แสดงลักษณะการยึดติดแบบเชิงกล

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวปิยะบุตรี ทองสุข เกิดเมื่อวันที่ 21 เดือนกันยายน พ.ศ. 2526 ที่ตำบลสามร้อยยอด อำเภอปราณบุรี จังหวัดประจวบคีรีขันธ์

สำเร็จการศึกษาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปี พ.ศ.2549

ปัจจุบันทำงานที่บริษัท Eternal resin Co.,Ltd. 29 หมู่ 5 ซ.ธรรมศิริ ถนนบางนา-ตราด กม. 25.5 ตำบลบางเสาธง อำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ

