

# อภินันทนาการ



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

ผลของวัสดุเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกล การดูดซึมน้ำ และสมบัติไดนามิกส์  
วิสโคอีลาสติก ของวัสดุฟันเทียมพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิต  
The effect of reinforce materials on mechanical properties, water sorption and  
dynamic visco-elastic properties of PMMA dental composite

โดย

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
วันลงทะเบียน..... 21 ส.ค. 2558
เลขทะเบียน..... 1682030X
เลขเรียกหนังสือ.....

ดร.นพวรรณ ไม้ทอง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ดร. แก้วเรีธ ไม้เคลิรอส อุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือตอนล่าง

มหาวิทยาลัยนครสวรรค์

มีนาคม 2558

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

ผลของวัสดุเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกล การดูดซึมน้ำ และสมบัติไดนามิกส์

วิสโคอีลาสติก ของวัสดุฟันเทียมพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิต

The effect of reinforce materials on mechanical properties, water sorption and  
dynamic visco-elastic properties of PMMA dental composite

โดย

ดร.นพวรรณ ไม้ทอง ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์

ดร. แก้วเรีธ ไมเคิลรอส อุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือตอนล่าง

มหาวิทยาลัยนเรศวร

สนับสนุนโดยกองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยนเรศวร

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติเชิงกลของซีเมนต์เทียมอะคริลิกที่มีการเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรง คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ รวมทั้งศึกษาขนาดของวัสดุเสริมแรงของซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 15 นาโนเมตร และ 40 ไมโครเมตร ที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลและเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเสริมแรงที่ไม่ได้ปรับสภาพผิวกับวัสดุเสริมแรงที่ปรับสภาพผิวด้วยไซเลน

การเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงในเรซินอะคริลิกจะแบ่งเป็นซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 15 นาโนเมตรและไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยจะใช้ปริมาณในการเติมที่ร้อยละ 1 2.5 และ 5 โดยน้ำหนัก ในส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 40 ไมโครเมตร และอลูมิเนียมออกไซด์ใช้ปริมาณการเติมร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนัก ข้อมูลถูกวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ ANOVA ด้วยเลขนัยสำคัญ 0.05 จากผลการทดสอบสมบัติแรงยึดติดเดือน พบว่าเมื่อเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงชนิดอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 1 %wt/v ให้ค่าสมบัติแรงยึดติดเดือนเฉลี่ยสูงสุด การทดสอบการต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่าการเติมวัสดุเสริมแรงอลูมิเนียมออกไซด์ที่ 1 %wt/v ให้ค่าแรงดัดโค้งเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 101.59 MPa แต่เมื่อมีการปรับสภาพผิววัสดุเสริมแรงด้วยไซเลนจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลง ยกเว้นที่การเติมวัสดุเสริมแรงด้วยซิลิกอนไดออกไซด์ที่ทำให้ค่าสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นทุกร้อยละการเติม ส่วนการทดสอบความแข็งผิววิกเกอร์ พบว่าที่การเติมวัสดุเสริมแรงอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ 1 %wt/v จะให้ค่าความแข็งผิวเฉลี่ยสูงสุด โดยที่การปรับสภาพผิวด้วยไซเลนช่วยเพิ่มสมบัติความแข็งผิวของเรซินอะคริลิกที่เสริมแรงด้วยซิลิกอนไดออกไซด์เท่านั้น แต่จะไม่มีผลกับวัสดุเสริมแรงชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ผลจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงเกิดได้ดีที่ความเข้มข้นของสารต่ำ

หลังจากผ่านการจำลองการใช้งานและการแช่ชิ้นงานทดสอบในน้ำเป็นเวลา 3 เดือน สมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบลดต่ำลงและสมบัติวิสโคอิลาสติกมีค่าเปลี่ยนไปเกิดจากการดูดซึมน้ำเข้าไปในชิ้นงานทำให้เกิดช่องว่างภายในซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงที่ต่ำลง อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงหลังจากผ่านการใช้งานไปแล้ว 3 เดือนถึงแม้จะมีค่าลดลงแต่ยังคงผ่านมาตรฐานการใช้งานของฟันเทียม

## Abstract

The purpose of this research was to investigate the effect of filler type (containing  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiO}_2$ ), ratios of fillers and particle sizes, as well as surface treatment by silane on mechanical properties (Surface Hardness, Flexural Strength, Shear Bond Strength)

Experimental composites were divided into 25 groups according to their filler type, ratios (1 %, 2.5 %, 5 % and 10 %wt/v), particle sizes (15 nm and 40 micron). Data were analyzed using one-way and two way ANOVA ( $P < 0.05$ ). The study revealed that the shear bond strength of the specimens with 1 %wt/v of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  was highest. The mechanical properties of the resin composite increased with the addition of fillers. However, when the mass fraction of modified filler was greater, the mechanical properties of the composite started to decline. The results shown that the flexural strength significantly highest when adding 1 %wt/v of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , nevertheless the flexural strength all of silaned fillers were significantly decreased except for 40  $\mu\text{m}$   $\text{SiO}_2$ . The important concern was the bond between the silane and the polymer matrix. The surface microhardness of the 1 %wt/v  $\text{Al}_2\text{O}_3$  was higher than that of specimens with other concentrations. SEM images showed that the particles had better dispersion, and their clusters were small enough to create a homogeneous surface on dental resin-based composites.

After 3 months in water, the mechanical properties were decreased. The visco-elastic behaviors from dynamic mechanical analysis were change. Water by itself may cause hydrolytic breakdown of the filler surface. Although all mechanical properties maybe generally lower than those of untreated specimens, but the dental composite still provide acceptable properties that exceed the mechanical requirements of dentures materials.

## Executive Summary

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) ผลของวัสดุเสริมแรงที่มีต่อสมบัติทางกล การดูดซึมน้ำ และสมบัติไดนามิกวิสโคอีลาสติกของ วัสดุฟันเทียมพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิต  
(ภาษาอังกฤษ) The effect of reinforce materials on mechanical properties, water sorption and dynamic visco-elastic properties of PMMA dental composite

### 1. ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปัจจุบันความต้องการใช้ฟันเทียมเพื่อบูรณะการบดเคี้ยวและเพื่อความสวยงามมีสูงอย่างต่อเนื่อง เป็นสาเหตุให้ความจำเป็นในการใช้ฟันเทียม เป็นจำนวนมาก แต่ในปัจจุบันฟันเทียมสำเร็จรูปยังคงเป็นผลิตภัณฑ์นำเข้าจากต่างประเทศเป็นหลัก วัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลท (poly(methyl methacrylate); PMMA) เป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการประดิษฐ์ฟันเทียมและฐานฟันเทียมเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ คือ มีความสวยงาม มีน้ำหนักเบา ดูดซึมน้ำน้อย สามารถรื้อแต่งและขัดเป็นเงาง่าย เหมาะสมกับการใช้งานในช่องปากและซ่อมแซมได้ง่ายราคาไม่แพง [1,2] ฯลฯ อย่างไรก็ตาม วัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลท ยังมีข้อด้อยเรื่องความแข็งแรงของผิว และปัญหาการสีกร่อน เมื่อเทียบกับฟันธรรมชาติ และแตกหักง่ายเมื่อได้รับแรงบดเคี้ยวต่อเนื่องซ้ำๆ [3,4] เนื่องจากเกิดเป็นรอยร้าวในบริเวณศูนย์รวมความเค้น (stress concentration) รอยร้าวจะกลายเป็นรอยแตกและขยายตัวต่อไปจนทำให้เกิดการแตกหัก ได้มีความพยายามคัดเลือกวัสดุอื่นมาใช้แทนพอลิเมทิลเมทาคริเลท เช่น พอลิเอไมด์ พอลิโพรพิลีน [5,6] แต่พบว่าวัสดุเหล่านี้มีการดูดซึมน้ำ (water sorption) สูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมิติ (dimensional change) ส่งผลต่อการใช้งานและไม่มีสมบัติเหนือกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลทได้

วัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิตจึงได้รับการวิจัยและพัฒนาขึ้นเพื่อแก้ปัญหาการแตกหักและการสีกร่อนง่ายของฟันเทียม วัสดุคอมโพสิตได้ถูกพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยวิธีการต่างๆ เช่น การเสริมแรงในส่วนของพอลิเมอร์เมทริกซ์ (polymer matrix) ด้วยการเติมวัสดุอัดแทรกอนินทรีย์ (inorganic fillers) ชนิดเส้นใยและชนิดอนุภาค [7-34] การเสริมแรงวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลทด้วยเส้นใย มีการเลือกใช้เส้นใยหลายชนิด โดยเส้นใยที่เลือกใช้จะมีค่ามอดูลัสของความยืดหยุ่นสูงกว่าพอลิเมทิลเมทาคริเลท ซึ่งเส้นใยที่นิยมนำมาศึกษานั้นได้แก่ เส้นใยคาร์บอน เส้นใยแก้ว และเส้นใยอะรามิด [7-25] ส่วนการศึกษาการเติมวัสดุอัดแทรกอนินทรีย์ชนิดอนุภาคพบว่าสมบัติของวัสดุคอมโพสิต มีความเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของอนุภาค [26-29] แต่โดยส่วนใหญ่แล้ววัสดุคอมโพสิตที่เติมวัสดุอัดแทรกอนินทรีย์ จะให้ค่าความแข็งแรงที่ดีกว่าวัสดุพอลิเมอร์พื้นฐาน

ดังนั้นการเลือกวัสดุอัดแทรกอนินทรีย์ที่เหมาะสม รวมทั้งการปรับสภาพผิวเพื่อช่วยการยึดติดระหว่างวัสดุอัดแทรกและพอลิเมอร์เมทริกซ์ จะมีผลต่อความแข็งแรงในการใช้งานของวัสดุคอมโพสิตอย่างแน่นอน นอกเหนือจากสมบัติด้านความแข็งแรงทางกลแล้วสมบัติด้านไดนามิกวิสโคอีลาสติกก็มีความสำคัญเช่นกัน [12, 34] เนื่องจากพอลิเมอร์มีสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก ดังนั้นการทดสอบวัสดุฟันเทียมคอมโพสิตโดยคำนึงถึงสมบัติด้านนี้โดยมีตัวแปรเป็นอุณหภูมิ เวลา และความถี่ ของการรับแรงทดสอบจะทำให้สามารถคาดเดาพฤติกรรมของวัสดุคอมโพสิตนี้เมื่อนำไปใช้งานได้ อีกประเด็นการศึกษาที่น่าสนใจคืองานวิจัยที่พบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมวัสดุอัดแทรกของวัสดุคอมโพสิตทำให้สมบัติทางกลมีค่าต่ำลง [32]

งานวิจัยนี้มีความพยายามที่จะพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของวัสดุฟันเทียมพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิตโดยการเปรียบเทียบผลของการใช้วัสดุอัดแทรก โดยงานวิจัยนี้สามารถแบ่งการศึกษาได้เป็นสองประเด็นหลักด้วยกันคือ เบื้องต้น จะทำการศึกษาคัดส่วนการใช้งานที่เหมาะสมของวัสดุอัดแทรกทั้ง โดยวัสดุทั้งหมดจะถูกทำการปรับสภาพผิวก่อนด้วยสารคู่ควบกลุ่มไฮลีนเพื่อเพิ่มการยึดติดกับพอลิเมทิลเมทาคริเลทเมทริกซ์ จากนั้นวัสดุคอมโพสิตที่ได้จะถูกนำไปศึกษาเปรียบเทียบ

สมบัติทางกล การดูดซึมน้ำ และสมบัติทางไดนามิกส์ วิสโคอีลาสติก (dynamic visco-elastic properties) เพื่อเป็นแนวทางการปรับปรุงสมบัติ ลดข้อจำกัดและพัฒนาศักยภาพในการผลิตซีพินเทียมเพื่อประยุกต์ใช้ในงานทันตกรรมภายในประเทศต่อไป

## 2. วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิต
2. เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของวัสดุอัด ที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปวัสดุพินเทียมพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิต
3. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกล การดูดซึมน้ำ และสมบัติทางไดนามิกส์ วิสโคอีลาสติก ของวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิตที่เติมวัสดุอัด

## 3. กรอบแนวความคิด การทบทวนวรรณกรรม และกระบวนการวิจัย

จากการที่วัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลทเป็นวัสดุที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในการประดิษฐ์พินเทียมและฐานพินเทียม แต่ยังคงมีข้อด้อยในการใช้งานบางประการ จึงมีผู้พยายามปรับปรุงสมบัติด้านต่างๆของวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลท จากเอกสารงานวิจัยจำนวนหนึ่งพบว่าได้มีความพยายามคัดเลือกวัสดุอื่นมาใช้แทนพอลิเมทิลเมทาคริเลทแต่พบว่าวัสดุเหล่านี้มีการดูดซึมน้ำสูงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมิติส่งผลต่อการใช้งาน [5,6] หรือมีการเติมวัฏภาคของยางพิวตาไดอินสไตรีนเข้าไปในองค์ประกอบของพอลิเมอร์เพื่อให้เกิดเป็นพอลิเมอร์แบบกึ่งและสามารถรับแรงกระแทกได้ดีขึ้น [7]

ในขณะที่มีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งซึ่งศึกษาการเสริมแรงในพอลิเมอร์เมทริกซ์ด้วยการเติมวัสดุอัดแทรกอนินทรีย์แบบอนุภาคพบว่าสมบัติของวัสดุคอมโพสิต มีความเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของอนุภาค ยกตัวอย่างงานวิจัยที่น่าสนใจเช่น Xia Y. และคณะ[27]ใช้อนุภาค  $\text{TiO}_2$  ร่วมกับสารกลุ่มไซเลนเพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตพินเทียม ผลการศึกษาพบว่าอนุภาคของ  $\text{TiO}_2$  กระจายตัวได้ดีในชิ้นงานทดสอบและที่ความเข้มข้นของอนุภาค  $\text{TiO}_2$  เพียง 0.5wt% สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตพินเทียมได้อย่างมีนัยสำคัญ

Wang H. และคณะ[29]ได้ทำการศึกษาผลการกระจายตัวและสมบัติทางกลจากการเติมอนุภาคนาโนซิลิกาและ diatomite ชนิดรูพรุนเป็นวัสดุอัดแทรกก่อนทำการผสมวัสดุอัดแทรกทั้งสองชนิดจะถูกทำการปรับผิวด้วยสารไซเลนเพื่อช่วยการยึดเกาะจากผลการศึกษาพบว่า การปรับผิวด้วยสารไซเลนช่วยในการยึดเกาะระหว่างวัสดุอัดแทรกและวัสดุเนื้อหลัก ยืนยันผลด้วยสมบัติทางกลที่เพิ่มขึ้นอย่างมาก อย่างไรก็ตามที่ความเข้มข้นของ diatomite เกินกว่า 21% สมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตจะมีค่าลดลง Vuorinen A.M. และคณะ[31]ทำการศึกษาสมบัติทางกลของวัสดุคอมโพสิตพินเทียมที่เติมวัสดุอัดแทรกที่มีลักษณะเป็นแท่ง (rigid rod polymer filler) พบว่าสมบัติด้านความแข็งแรงและมอดูลัสการดัดโค้งมีค่าเพิ่มขึ้นในขณะที่ความสามารถในการดูดซึมน้ำลดลง แต่การเติมวัสดุอัดแทรกชนิดนี้ไม่ส่งผลต่อสมบัติการละลายของวัสดุหลัก

ถึงแม้ว่าความแข็งแรงของวัสดุคอมโพสิตเป็นปัญหาหลักที่นักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจแต่มีงานวิจัยอีกจำนวนหนึ่งซึ่งพบวิธีการทดสอบและควบคุมสมบัติบางประการที่ส่งผลต่อสมบัติการใช้งานของวัสดุคอมโพสิตด้วยเช่นกัน เช่น Asaoka K. และคณะ[32] ได้ศึกษาผลการดูดซึมน้ำของวัสดุคอมโพสิตที่เติมวัสดุอัดแทรกในรูปของการตรวจวัดค่า diffusion coefficient โดยชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีความหนาต่างกัน เนื่องจากการดูดซึมน้ำของวัสดุจะส่งผลต่อความคงที่ของขนาดและสมบัติทางกลของชิ้นงานคอมโพสิต ผลการทดสอบเป็นไปตามทฤษฎี Fick's second law นอกจากนั้น Mesquita R.V. และคณะ[34] ได้ศึกษาผลของการเปรียบเทียบสมบัติด้านวิสโคอีลาสติกของวัสดุคอมโพสิตทันตกรรมทางการค้าสองชนิด โดยทำการทดสอบชิ้นงานหลังจากเก็บไว้ที่แห้งและแช่ชิ้นงานไว้ในน้ำกลั่นเป็นเวลา 1 วัน 7 วัน และ 3 เดือน ค่าข้อมูลการทดลองที่ได้ถูกวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมทางสถิติ ANOVA พบว่าค่า elastic modulus มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิและความถี่เพิ่มขึ้น และ

ได้รับผลกระทบจากความชื้นมากกว่าค่า viscous modulus นอกจากนั้น Abdul S. และคณะ[12] ศึกษาสมบัติทางวิสโคอิลาสติกของวัสดุคอมโพสิตเช่นกัน โดยได้ศึกษาเปรียบเทียบผลของการนำเส้นใยแก้วไปแช่ในสารไซเลนและ dimethacrylate resin ก่อนการพอลิเมอไรซ์ คอมโพสิตที่ได้ให้ผลทางวิสโคอิลาสติกที่แสดงว่าการนำเส้นใยแก้วไปแช่ในสารไซเลนและ dimethacrylate resin ก่อนทำให้คอมโพสิตที่ได้มีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้น

จากข้อมูลทางทฤษฎีและผลงานวิจัยที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยได้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้ของการพัฒนาสมบัติของวัสดุฟันเทียมพอลิเมทาคริลิคคอมโพสิตโดยการเลือกใช้วัสดุหลัก วัสดุอัดแทรก รวมถึงกระบวนการเตรียมที่เหมาะสมเพื่อให้ได้วัสดุฟันเทียมพอลิเมทาคริลิคคอมโพสิตที่มีสมบัติใกล้เคียงกับฟันจริง โดยจะมีการทดสอบสมบัติที่จำเป็นต่างๆหลังการทดลองขึ้นรูปเพื่อยืนยันสมบัติของวัสดุฟันเทียมพอลิเมทาคริลิคคอมโพสิตที่ได้

#### 4.สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยพบว่าการเติมวัสดุเสริมแรงช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งได้ด้วยปริมาณการเติมที่เหมาะสม ซึ่งอนุภาคของวัสดุเสริมจะช่วยในเรื่องของการเปลี่ยนเฟสที่เรียกว่าทรานสฟอร์มเมชันที่ฟเฟนนิ่ง แต่ว่าการเติมวัสดุเสริมแรงในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลง เนื่องจากปริมาณของอนุภาคที่มากเกินไปนั้น จะก่อให้เกิดรอยต่อระหว่างพื้นผิวที่มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้นทนต่อแรงดัดโค้งได้ต่ำลง ขนาดอนุภาควัสดุเสริมแรงมีผลที่ชัดเจนต่อการต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่าที่ปริมาณวัสดุเสริมแรง 1%wt/ขนาดนาโนเมตรมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเฉลี่ยมากกว่าขนาดไมโครเมตร เนื่องจากขนาดนาโนเมตรมีความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดีกว่าขนาดไมโครเมตร จึงมีการรับแรงได้ดีกว่าขนาดไมโครเมตร แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติม 5%wt/ขนาดไมโครเมตรมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งดีกว่าขนาดนาโนเมตร เนื่องจากเหตุผลในด้านปริมาณการเติมที่เหมาะสม ซึ่งได้กล่าวไว้ข้างต้น

ส่วนการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงด้วยไซเลนต่อสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งนั้นพบว่าเมื่อปรับผิวด้วยไซเลนทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งขัดกับหลายๆงานวิจัยเช่น R. L. Bowen[23] กับ S. C. Bayne[24] ที่รายงานไว้ว่าเมื่อมีการปรับผิวด้วยไซเลนจะทำให้อนุภาคซึ่งเข้ากับพอลิเมอร์ได้ไม่ดี ให้เข้ากันได้ด้วยพันธะทางเคมี ซึ่งจะทำให้สมบัติทางกลของวัสดุดีขึ้น แต่จากผลการทดลองในงานนี้พบว่าสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งด้อยลง อาจเป็นเพราะหมู่ OR ของไซเลนที่ควรจะจับกับหมู่ซิลานอลของอนุภาควัสดุเสริมแรงกลับจับกับไซเลนกันเองทำให้อนุภาควัสดุเสริมแรงเข้ากับพอลิเมอร์ได้ไม่ดีและเกิดข้อบกพร่องในส่วนที่ไซเลนจับกันเอง การกระจายตัวของอนุภาคจึงกระจายได้ไม่ดีส่งผลให้สมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งด้อยลง

การเติมวัสดุเสริมแรงมีผลช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวของชิ้นงานทดสอบได้เมื่อเทียบกับซี่ฟันเทียมอะคริลิกที่ไม่มีการเติมวัสดุเสริมแรง อย่างไรก็ตามชนิดของวัสดุเสริมแรงให้ผลที่ไม่ต่างกันอย่างไร้ความสำคัญโดยพบว่าลูมินีเยมออกไซด์มีค่าความแข็งแรงผิวเฉลี่ยมากที่สุดและหลังจากผ่านการจำลองการใช้งานและการแช่ชิ้นงานทดสอบในน้ำเป็นเวลา 3 เดือน สมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบลดต่ำลงและสมบัติวิสโคอิลาสติกมีค่าเปลี่ยนไปเกิดจากการดูดซึมน้ำเข้าไปในชิ้นงานทำให้เกิดช่องว่างภายในซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงที่ต่ำลง อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงหลังจากการใช้งานไปแล้ว 3 เดือนถึงแม้จะมีค่าลดลงแต่ยังคงผ่านมาตรฐานการใช้งานของฟันเทียม

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ข
Executive Summary.....	ค
สารบัญ.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 ทฤษฎีเบื้องต้น.....	6
บทที่ 3 การทดสอบการใช้งาน.....	17
3.1 การทดสอบสมบัติความแข็งผิววิกเกอร์.....	17
3.2 การทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง.....	18
3.3 การทดสอบสมบัติแรงยึดเฉือน.....	19
3.4 การทดสอบสมบัติvisco-elastic.....	19
3.5 Scanning Electron Microscopy.....	20
3.6 Water sorption.....	20
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์.....	21
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	35
เอกสารอ้างอิง.....	37



## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงการวิจัย

ปัจจุบันในประเทศไทยได้มีจำนวนผู้ป่วยที่ต้องการการใส่ฟันเทียม (Denture Teeth) เพิ่มขึ้นอยู่มาก ซึ่งหากสามารถผลิตฟันเทียมขึ้นภายในประเทศไทยได้ จะสามารถลดจำนวนการนำเข้าจากต่างประเทศได้มาก การนำเอาเรซินอะคริลิก (Acrylic Resin) ซึ่งเป็นวัสดุทางพอลิเมอร์มาใช้ในทางทันตกรรมได้มีการแนะนำให้รู้จักกับตลาดทางการค้าในปีค.ศ. 1937 ตั้งแต่นั้นมาก็ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่ายไม่ซับซ้อนและต้นทุนในการผลิตต่ำ แม้สมบัติของวัสดุผลิตฟันเทียมชนิดอะคริลิกจะมีข้อดีน้อยกว่าวัสดุชนิดอื่นๆ แต่ก็ยังคงเป็นทางเลือกที่นิยมมากที่สุดในปัจจุบัน [1]

ซี่ฟันเทียมชนิดเรซินอะคริลิก (Acrylic Denture Teeth) ได้รับความนิยมในการนำมาใช้ทดแทนฟันธรรมชาติที่สูญเสียไปของผู้ป่วย เนื่องจากสีสันทันเหมือนฟันธรรมชาติ ราคาที่ไม่แพงจนเกินไป สามารถยึดติดกับฐานฟันปลอมได้ดี กรอแต่งได้ง่ายโดยไม่แตกหัก เมื่อพิจารณาความแข็งแรงของซี่ฟันเทียมอะคริลิกจะพบว่ามี ความแข็งแรงน้อยกว่าชนิดอื่นๆ จึงไม่ทนต่อการสึกหรอที่เกิดจากการขัดสี ไม่ว่าจะจากการบดเคี้ยวอาหารและจากการแปรงฟันทำความสะอาด เป็นเหตุให้ซี่ฟันปลอมสึกเร็วขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพในการบดเคี้ยวอาหารลดลง

ปัญหาหลักของวัสดุผลิตซี่ฟันเทียมอะคริลิกในปัจจุบัน คือ วัสดุที่ได้มักมีความแข็งแรงที่ต่ำกว่าฟันเทียมในท้องตลาดและมีการต้านทานแรงดัดโค้งด้อยกว่า จึงเป็นปัญหาหลักๆ ของซี่ฟันประเภทนี้ การนำวัสดุเสริมแรงมาใช้ในการเพิ่มสมบัติทางกลของซี่ฟันเทียมอะคริลิกนั้น เป็นอีกทางเลือกของการปรับปรุงสมบัติของซี่ฟันเทียมอะคริลิกให้มีความแข็งแรงและการต้านทานแรงดัดโค้งใกล้เคียงกับฟันเทียมตามท้องตลาดให้มากที่สุด

ปัญหาเหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการปรับปรุงสมบัติทางกลของวัสดุ โดยในปัจจุบันมีนักวิจัยได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการหาวัสดุเสริมแรงมาช่วยเพิ่มสมบัติของวัสดุผลิตซี่ฟันเทียมให้มีความแข็งแรงมากขึ้น [2] โดยวัสดุเสริมแรงที่นิยมใช้เพื่อเพิ่มสมบัติเชิงกลให้แก่วัสดุทางทันตกรรมนั้น จะเป็นสารจำพวกซิลิกา อลูมินา เซอร์โคเนียมออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ เป็นต้น

วัสดุเสริมแรงที่เลือกใช้สำหรับเสริมแรงในงานวิจัยนี้ ทางผู้จัดทำจะเลือกใช้ทั้งหมด 3 ชนิด ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ เพื่อให้ตรงกับจุดประสงค์ของงานวิจัย ที่ทำการศึกษาถึงความแข็งแรง การต้านทานแรงดัดโค้ง เนื่องจากสาร 3 ชนิดนี้ มีสมบัติเด่น [3] คือ เมื่อนำมาใช้กับพลาสติกจะช่วยเสริมความแข็งแรงให้กับพลาสติก ช่วยเพิ่มเสถียรภาพทางรูปร่างที่อุณหภูมิสูง ช่วยลดการหลุดตัวการเกิดรอยแตกและช่วยเพิ่มความทนทานต่อการขีดข่วน (Scratch Resistance) และเป็นสารที่ใช้กัน

แพร่หลายในอุตสาหกรรม หาซื้อได้ง่าย ความเหมาะสมของราคาจึงเป็นข้อดีที่เลือกใช้ซิลิกา อลูมินา และไทเทเนียมออกไซด์เป็นวัสดุเสริมแรง

เพื่อให้ซิลิกา อลูมินา และไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถกระจายตัวได้ดีในพอลิเมอร์ จะต้องปรับแต่งพื้นผิวของวัสดุเสริมแรงด้วยไซเลนเสียก่อนและเพื่อเพิ่มความสามารถในการยึดติดกับฐานพื้นเทียมให้ดียิ่งขึ้น ซึ่งไซเลนที่เหมาะสมสำหรับซิลิกาที่ใช้กับอีพอกซีเรซินได้แก่ อะมิโนหรืออีพอกซีไซเลน ส่วนไซเลนที่เหมาะสมสำหรับซิลิกาที่ใช้กับไนลอนและเทอร์โมพลาสติกพอลิเอสเทอร์คือ อะมิโนไซเลน ในที่นี้ ไซเลนที่เราเลือกใช้เป็นสารคู่ควบชนิด 3-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตรเมทอกซีไซเลน

ดังนั้นการศึกษาคุนสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง ความแข็งผิว และแรงยึดติดเฉือนจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจ งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการต้านทานแรงดัดโค้ง ความแข็งผิว และแรงยึดติดเฉือนของเรซินอะคริลิกที่ใช้ทำซีพินเทียม เมื่อเสริมวัสดุเสริมแรงชนิดต่างๆลงไป อย่างไรก็ตามสัดส่วนในการเติมวัสดุเสริมแรงอาจมีผลต่อคุณสมบัติดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาปริมาณในการเติมวัสดุเสริมแรงและการปรับสภาพผิววัสดุเสริมแรงรวมทั้งเปรียบเทียบคุณสมบัติดังกล่าวกับเรซินอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อนที่นิยมใช้ในทางทันตกรรม การศึกษาเปรียบเทียบทั้งหมดนี้ก็เพื่อเป็นแนวทางในการเลือกใช้ซีพินเทียมให้เหมาะสมกับผู้ป่วยต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อปรับปรุงสมบัติของวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิต
2. เพื่อศึกษาผลของชนิดและความเข้มข้นของวัสดุอัด ที่มีผลต่อความสามารถในการขึ้นรูปวัสดุพินเทียมพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิต
3. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติทางกล การดูดซึมน้ำ และสมบัติทางไดนามิกส์ วิสโคอีลาสติก ของวัสดุพอลิเมทิลเมทาคริเลทคอมโพสิตที่เติมวัสดุอัด

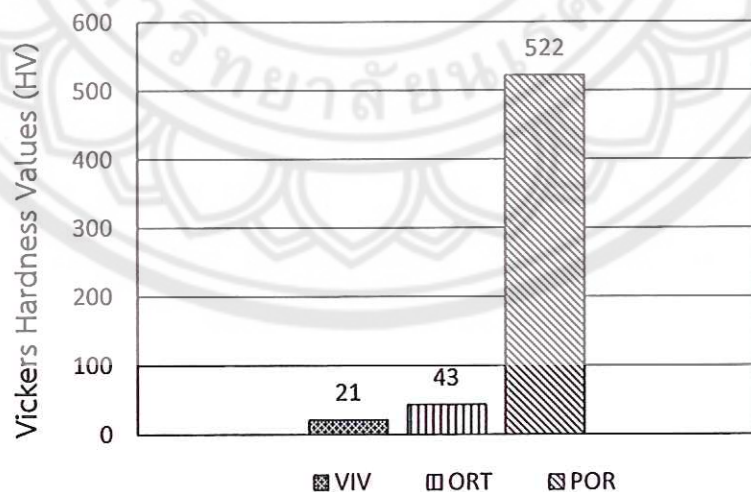
## บทที่ 2

### ทฤษฎีเบื้องต้นและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ความแข็งผิว (Surface Hardness) การต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) และแรงยึดเหนี่ยวติดกับฐานฟันเทียม คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของซี่ฟันเทียม (Denture Teeth) ซึ่งชนิดของซี่ฟันเทียมมีค่าความแข็งผิว ค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง และแรงยึดติดที่แตกต่างกันรวมทั้งกระบวนการผลิตก็มีผลต่อสมบัติดังกล่าว ปัจจุบันมีผู้ผลิตและจำหน่ายซี่ฟันเทียมให้ทันต-แพทย์ได้เลือกใช้อยู่หลากหลายยี่ห้อ จึงมีผู้วิจัยหลายท่านได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับเรื่องนี้

F. Kawano และคณะ [4] ได้ทำการศึกษาค่าความแข็งผิววิกเกอร์ของซี่ฟันเทียมทางการค้าทั้งหมด 9 ยี่ห้อ P. Suwannaroop และคณะ [5] ศึกษาค่าการต้านทานการสึกหรอของซี่ฟันเทียมค่าความแข็งผิว และค่ามอดูลัสยืดหยุ่นของซี่ฟันปลอม 3 ชนิด X. Miao และคณะ [2] ศึกษาค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง ค่ามอดูลัสยืดหยุ่น และความแข็งวิกเกอร์ของซี่ฟันเทียม โดยเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด คือ ไดอะตอมซิลิกอนไดออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ S.A. Shahdad และคณะ [6] ได้ทดสอบความแข็งผิววิกเกอร์ (Vickers Hardness) ของซี่ฟันเทียม 3 ชนิดซึ่งชนิดของซี่ฟันเทียมทั้ง 3 ชนิด ที่คณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษานั้น ประกอบด้วยเรซินอะคริลิก (Acrylic Resin) เรซินอะคริลิกที่ปรับปรุงสมบัติ (Composite Material) และพอร์ซเลน (Porcelain) ดังแสดงในรูปที่ 2.1

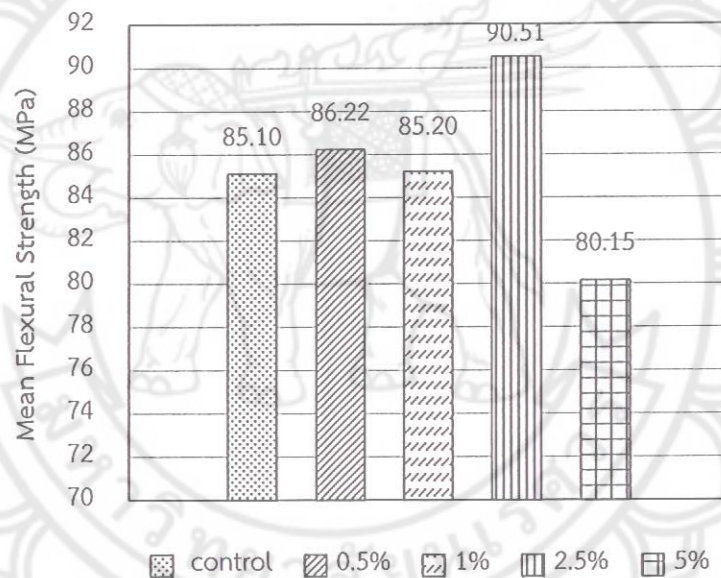


รูปที่ 2.1 แสดงค่าความแข็งวิกเกอร์ของซี่ฟันเทียมชนิดต่างๆ [6] (VIV = Acrylic Resin,

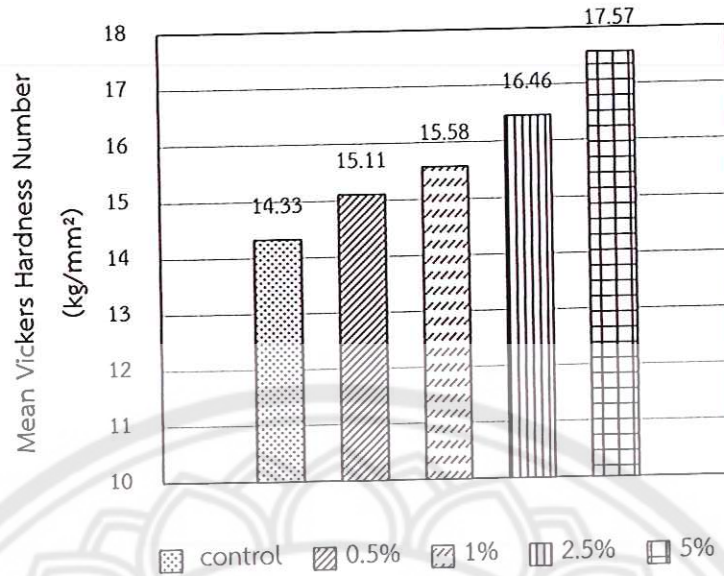
ORT = Composite Resin, POR = Porcelain)

จากงานวิจัยที่ศึกษา พบว่าซีฟีนเทียมชนิดที่มีความแข็งผิวมากที่สุดคือ พอร์ซเลนเรซินอะคริลิกที่ปรับปรุงสมบัติ และเรซินอะคริลิกตามลำดับ จากรายงานผลการวิจัยข้างต้น ผลการวิจัยจะเห็นว่าซีฟีนเทียมอะคริลิกที่ปรับปรุงสมบัติจะมีสมบัติที่ดีกว่าซีฟีนเทียมอะคริลิกที่ไม่ปรับปรุงคุณสมบัติ โดยปัจจุบันมีผู้วิจัยศึกษาเกี่ยวกับการปรับปรุงสมบัติของซีฟีนเทียมอะคริลิก เช่น การเติมวัสดุเสริมแรงหลากหลายชนิดดังนี้

M. Vojdani และคณะ [7] ศึกษาผลกระทบของการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Strength) และความแข็งผิว (Surface Hardness) เมื่อเติมอลูมิเนียมออกไซด์ ( $Al_2O_3$ ) ดังแสดงในรูปที่ 2.2-2.3F. Unalan และคณะ [8] ได้ศึกษาผลของการเติมไมก้า (Mica) และแก้ว (Glass) ต่อความแข็งผิว (Surface Hardness) ของซีฟีนเทียมอะคริลิก M.KSaritha และคณะ [9] ศึกษาผลการเติมอลูมิเนียมออกไซด์ต่อการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Strength)



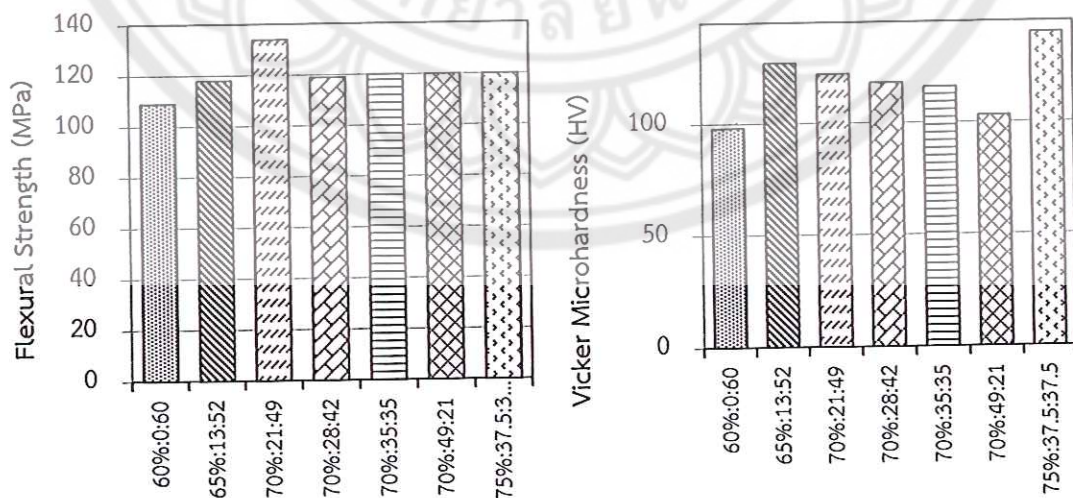
รูปที่ 2.2 แสดงการต้านทานแรงดัดโค้งของเรซินอะคริลิกที่เสริมแรงด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ [7]



รูปที่ 2.3 แสดงความแข็งวิกเกอร์ของเรซินอะคริลิกที่เสริมแรงด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ [7]

แต่ละท่านรายงานว่า การเติมวัสดุเสริมแรงทำให้สมบัติดังกล่าวให้ค่าสูงขึ้นได้ แต่อย่างไรก็ตามต้องเติมในสัดส่วนที่เหมาะสม ดังนั้นสัดส่วนของวัสดุเสริมแรงจึงมีผลต่อสมบัติทั้งสอง ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาสัดส่วนในการเติมวัสดุเสริมแรง

S.P. Samuel และคณะ [10] ผลของการเติมซิลิกาที่มีการรวมกันของซิลิกาที่มีรูพรุนและไม่มีรูพรุนในสัดส่วนต่างๆ ต่อสมบัติการต้านทานแรงกดและการต้านทานแรงดัดโค้ง H.Wang และคณะ [11] ศึกษาผลของการเติมซิลิกาที่มีการรวมกันของซิลิกา 2 ขนาด คือ 10 ไมโครเมตรและ 40 นาโนเมตร ในสัดส่วนต่างๆ ต่อการต้านทานแรงดัดโค้งความแข็งและการต้านทานแรงกด ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงค่าการต้านทานแรงดัดโค้งและความแข็งวิกเกอร์(10 μm: 40 nm) [11]

พบว่าการที่นำวัสดุเสริมแรงชนิดเดียวกันที่มีขนาดหรือลักษณะทางกายภาพต่างกันมารวมกันสามารถเพิ่มสมบัติได้ดีขึ้นในสัดส่วนการเติมที่เหมาะสม ดังนั้นขนาดของอนุภาคของวัสดุเสริมแรงจึงมีผลต่อสมบัติดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงสนใจในส่วนของการเติมวัสดุเสริมแรงในขนาดอนุภาค 2 ขนาด คืออนุภาคระดับนาโนเมตรและระดับไมโครเมตร

สมบัติแรงยึดเหนี่ยวติดเป็นอีกหนึ่งหัวข้อที่น่าสนใจในการศึกษาการเสริมแรงด้วยวัสดุเสริมแรงและการปรับสภาพพื้นผิวที่มีผลต่อสมบัติการยึดติดของซีฟันเทียมกับฐานฟันเทียม โดยมีนักวิจัยหลายท่านได้ทำการศึกษาถึงสมบัติการยึดติดเฉือน (Shear Bond Strength) ดังเช่น

Caeg และคณะ [12] ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการเตรียมพื้นผิวของโลหะผสม 3 ชนิดด้วยวิธีการกรดกัดด้วยไฟฟ้า การเคลือบผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน และวิธีการกรดกัดด้วยไฟฟ้าร่วมกับการเคลือบผิวด้วยสารคู่ควบไซเลน เพื่อเพิ่มแรงยึดติดให้กับเรซินซีเมนต์ 3 ชนิดพบว่า การเคลือบผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนให้แรงยึดสูงกว่าการใช้กรดกัดด้วยไฟฟ้าและไม่พบความแตกต่างในการยึดติดอยู่ระหว่างโลหะผสมที่ใช้ทั้ง 3 ชนิดกับเรซินซีเมนต์ทั้ง 3 ชนิด ส่วนวิธีการกรดกัดด้วยไฟฟ้าร่วมกับการเคลือบผิวด้วยสารคู่ควบไซเลนทำให้แรงยึดลดลง

May และคณะ [13] ทำการทดลองการปรับสภาพผิวของไทเทเนียม เพื่อเพิ่มการยึดกันอยู่ของพอลิเมทิลเมทาคริเลตพบว่า การเป่าทรายด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ 110 ไมโครเมตร เพียงอย่างเดียวไม่สามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพพื้นผิวและการเป่าทรายด้วยอลูมิเนียมไดออกไซด์ 110 ไมโครเมตร ส่วนการเคลือบด้วยไซเลนนั้นสามารถเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวให้กับพอลิเมทิลเมทาคริเลตได้มากกว่าร้อยละ 60

เกือบทั้งหมดของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้ ใช้สารคู่ควบไซเลนเป็นสารประสานกับวัสดุเสริมแรงซึ่งวัสดุเสริมแรงแต่ละชนิดต่างก็ใช้สารคู่ควบไซเลนที่ต่างกัน ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะใช้สารคู่ควบไซเลนเป็นสารประสานกับวัสดุเสริมแรงดังกล่าวนี้ด้วย

## 2.2 ทฤษฎีเบื้องต้น

ฟันเทียมนั้นประกอบด้วยฐานฟันเทียม (Denture Base) และซี่ฟันเทียม (Denture Teeth) ซึ่งซี่ฟันเทียมอะคริลิกจัดว่าเป็นวัสดุจำพวกพอลิเมอร์ชนิดพอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl Methacrylate) และมีการปรับปรุงคุณสมบัติด้วยการเติมวัสดุเสริมแรงหลากหลายชนิด ซึ่งซิลิกาและใยแก้วเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงมาก จึงเป็นวัสดุเสริมแรงที่มีความนิยมใช้ในการเสริมแรงอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมต่างๆ

ความแข็งเป็นคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญอย่างหนึ่งของซีฟันเทียมอะคริลิก ความแข็งเป็นคุณสมบัติที่เกิดจากการวัดโดยใช้หัวกด กดลงไปบนผิวของวัสดุนั้น โดยวัสดุที่นำมาเป็นหัวกดจะมีความแข็งที่สูง เช่น เหล็กกล้าหรือเพชร จากนั้นวัดขนาดของรอยกดแล้วนำไปคำนวณค่าความแข็ง ตามสมการที่ 2.2 การทดสอบความแข็งมีการทดสอบหลายวิธี ซึ่งการทดสอบความแข็งของซีฟันเทียมนิยมใช้การทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์(Vickers Hardness Test)

การต้านทานแรงดัดโค้งก็เป็นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งซึ่งแสดงให้เห็นถึงการต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปของซีฟันเทียมเมื่อถูกให้แรง ซึ่งก็เปรียบเสมือนแรงบดเคี้ยวที่เกิดขึ้นในช่องปากและข้อกำหนดของซีฟันเทียมอะคริลิกจะเป็นไปตามตารางที่ 2.3

### 2.2.1 ซีฟันเทียม(Denture Teeth)

มีสมบัติตามอุดมคติคือ จะต้องมีรูปร่าง สีสันต่างจากฟันธรรมชาติ และควรเข้ากันได้กับฐานฟันเทียม (Denture Base) ได้ดี เพื่อป้องกันการหลุดออกจากกันของซีฟันเทียมกับฐานฟันเทียม ต้องมีความแข็งแรง ความเหนียวเพื่อต้านทานต่อการหัก และความแข็งผิว (Hardness) เพื่อป้องกันการสึกกร่อนที่เกิดในช่องปาก และการสึกที่เกิดจากการเคี้ยวอาหารที่มีความแข็งผิวมาก การสึกจากการทำความสะอาดฟันเทียม แต่อย่างไรก็ตามซีฟันเทียมไม่ควรมีความแข็งมากเกินไป เพราะจะเกิดเสียงเมื่อมีการกระทบกันของฟันและจะยากต่อการกรอแต่งของช่างทันตกรรม

วัสดุที่ใช้ทำซีฟันเทียมจะสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ คือ ซีฟันเทียมพอร์ซเลน (Porcelain) ซีฟันเทียมเรซินอะคริลิก(Acrylic Resin) และซีฟันเทียมเรซินอะคริลิกที่มีการปรับปรุงสมบัติ (Improved Resin)

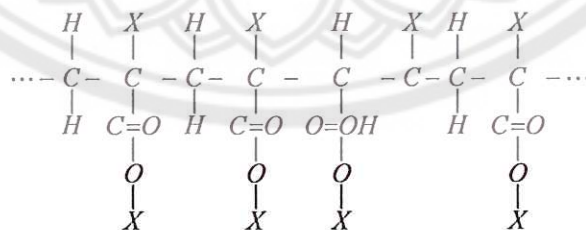
ซีฟันเทียมเรซินอะคริลิกมีความต้านทานต่อการอัดสูงกว่าซีฟันเทียมพอร์ซเลน ทำให้ไม่เกิดการกระทบกระเทือนต่อเนื้อเยื่อใต้ฐานฟันเทียม อีกทั้งยังมีความเหนียว ไม่แตกหักง่าย ยึดติดกับฐานฟันเทียมได้ดีด้วยพันธะเคมี สามารถกรอแต่งได้ง่าย แต่ก็มีข้อเสีย คือมีความแข็งผิวต่ำกว่าชนิดพอร์ซเลนและสามารถดูดซึ่มสารละลายได้ จึงอาจทำให้สีของซีฟันเทียมผิดไปจากเดิม อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีความพยายามที่จะปรับปรุงคุณภาพของซีฟันเทียมเรซินอะคริลิกให้มีสมบัติดีขึ้น

### 2.2.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต(Polymethyl Methacrylate; PMMA)

พอลิเมทิลเมทาคริเลตหรือที่เรียกง่าย ๆ ว่า PMMA จัดเป็นพอลิเมอร์ในกลุ่มของเทอร์โมพลาสติก (Thermoplastic) ซึ่งมีสูตรเคมีคือ  $C_5H_8O_2$  พอลิเมทิลเมทาคริเลตมีสมบัติโดดเด่นในเรื่องความเหนียว ความ

โพร่งใส สามารถขึ้นรูปได้ง่าย และมีความหนาแน่นต่ำ พลาสติกชนิดนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายอย่างเช่น กระจกใสบนเครื่องบิน ป้ายโฆษณา กระจกตู้ปลา วัสดุทางการแพทย์ เป็นต้นนอกจากนั้นแล้ว อะคริลิกพลาสติกยังเป็นที่ยิมนำมาขึ้นรูปใช้แทนแก้วในงานหลายอย่างได้อย่างมีประสิทธิภาพ อะคริลิกพลาสติกเป็นพลาสติกที่สามารถเตรียมได้จากการนำมอนอเมอร์ของเมทิลเมทาคริเลต (Methyl Methacrylate, MMA) มาทำปฏิกิริยากันแล้วเกิดเป็น PMMA การเกิดพอลิเมอร์(Polymerization) ในปี ค.ศ. 1880 นักเคมีชาวเยอรมัน 2 คน คือ ฟิททิจ(Fittig) และพอล (Paul) สามารถสังเคราะห์พอลิเมทิลเมทาคริเลต แต่ยังไม่สามารถพัฒนาวิธีผลิตให้ได้เป็นแผ่นอะคริลิกพลาสติกได้ ต่อมาเมื่อปี ค.ศ.1901อ็อทโท เรห์ม(Otto Rohm) นักเคมีชาวเยอรมัน ขอจดสิทธิบัตรวิธีผลิตแผ่นพลาสติกใสจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตในชื่อทางการค้า Plexiglas หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 1936 จึงมีการผลิตแผ่น Plexiglas ออกจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ เริ่มใช้ในช่วงสงครามโลกครั้งที่สอง นำมาใช้กับเรือดำน้ำ กระจกตู้ปลา และกระจกเครื่องบิน นอกจากนี้ยังมีพอลิเมทิลเมทาคริเลต ที่ใช้ภายใต้เครื่องหมายการค้าเช่น ชนิดแผ่น Perplex (ICI) Oroglassและพอลิเมทิลเมทาคริเลตในรูปของผงมีเครื่องหมายทางการค้า เช่นDiakon (ICI) Acry-ace (Fudow Chemical Co.Japan) Lucite (Dupoint) และ Vedril (Montecatini) [14]

เรซินอะคริลิก(Acrylic Resin) เป็นอนุพันธ์ของเอซิดีนและมีกลุ่มไวนิล (Vinly Group) อยู่ในโครงสร้างอนุกรมของเรซินอะคริลิก(Acrylic Resin Series) ที่เกี่ยวข้องกับทางทันตกรรมมีอย่างน้อย 2 อนุกรม คือ อนุกรมที่ได้จากกรดอะคริลิก ( $\text{CH}_2 = \text{CHCOOH}$ ) กับอนุกรมจากกรดเมทา-คริลิก( $\text{CH}_2 = \text{C}(\text{CH}_3)\text{COOH}$ ) สารประกอบของอนุกรมทั้งสองได้จากแบบรวมตัวพอลิเมอร์ไฮดรอกซีแบบรวมตัว แม้สารเหล่านี้จะแข็งและใสแต่ดูดน้ำมากทำให้อ่อนและลดกำลังความแข็งแรงลงไม่เหมาะกับการนำไปใช้ในปาก แต่เอสเทอร์ของกรดเหล่านี้ใสและดูดน้ำน้อยมาก จึงนำมาใช้ในปาก เช่น พอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งมีสูตรโครงสร้างห่วงโซ่ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของพอลิเมทิลเมทาคริเลต [15]



เมื่อ X แทนเอสเทอร์แรดิคัลของอินทรีย์หรืออินทรีย์ ซึ่งทำให้เกิดเรซินอะคริลิกชนิดต่างๆ มากมาย แต่ที่นิยมใช้ทำฟันประดิษฐ์และฐานเดนเจอร์ ได้แก่ พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl Methacrylate) คือ X เป็น  $\text{CH}_3$ แรดิคัล

เมทิลเมทาคริเลตมีลักษณะใสจุดเดือด 100 องศาเซลเซียส มีความหนาแน่น 1.19 กรัมต่อลูกบาศก์ เซนติเมตรและเป็นตัวละลายสารอินทรีย์ได้ดีมาก พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นเทอร์โมพลาสติกมีกำลังความ แข็งแรงสูงสุดในกลุ่มเดียวกันอ่อนตัวที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส [15] ซึ่งเหมาะสำหรับอัดในบ้ำ ถ้าทำให้ ร้อนถึงอุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส พอลิเมทิลเมทาคริเลตถูกดีฟอ-ลิเมอไรซ์ได้เมทิลเมทาคริเลตเชิงเดี่ยวหรือ มอนอเมอร์เดิมอีก

เมทิลเมทาคริเลตโมเลกุลเชิงเดี่ยวหรือมอนอเมอร์(Simple Molecule or Monomer) สามารถ รวมตัวเป็นมหโมเลกุลหรือพอลิเมอร์(Macromolecule or Polymer) ของพอลิเมทิลเมทา-คริเลตได้โดย ปฏิกริยาพอลิเมอไรเซชันแบบรวมตัวซึ่งเกิดจากตัวกระตุ้น อาจเป็นความร้อนแสงอัล-ตราไวโอเลตพวกหนึ่ง หรือสารอินทรีย์อีกพวกหนึ่งไปแยกหรือทำปฏิกิริยากับตัวเริ่มต้นให้ปล่อยแรดิคัลอิสระออกมา แรดิคัลอิสระนี้ ทำปฏิกิริยากับบอนด์คู่ระหว่างคาร์บอนต่อคาร์บอนของเมทิลเม-ทาคริเลตเชิงเดี่ยวกลายเป็นพอลิเมทิลเมทา-คริเลต

แนวโน้มการนำพอลิเมทิลเมทาคริเลตมาใช้งานในรูปของอะคริลิกพลาสติกถูกประยุกต์ใช้ในงานหลาย อย่างไม่ว่าจะเป็นเครื่องประดับ อุปกรณ์สำนักงานในรูปของอะคริลิกพลาสติกถูกประยุกต์ใช้ในงานหลายอย่าง ไม่ว่าจะเป็นเครื่องประดับ อุปกรณ์สำนักงาน อุปกรณ์ในห้องน้ำ สีทาบ้าน ป้ายโฆษณาหรือป้ายชื่อร้านและ อื่นๆอีกมากมาย ส่วนใหญ่มักเป็นทางเลือกแทนการใช้กระจก เนื่องจากกระจกมีความเปราะบาง แดง่าย ไม่ ทนต่อรอยขีดข่วน ไม่ทนต่อสภาพอากาศจึงทำให้อะคริลิกพลาสติกเป็นทางเลือกใหม่กับงานเฉพาะด้านมากขึ้น โดยสมบัติพื้นฐานของพอลิเมทาคริเลตเป็นพลาสติกโปร่งที่มีพื้นผิวมันวาวสูง ทนทานสูงและโปร่งใสจัดเป็น วัสดุที่แข็ง แต่มีความเปราะ มีความต้านทานแรงดึงแรงอัด และจุดแข็งดีถือว่าเป็นที่น่าพอใจสามารถ ต้านทานรอยขีดข่วนได้

### 2.2.3 ซิลิกาหรือซิลิกอนไดออกไซด์ [17]

ซิลิกอนไดออกไซด์ (Silicon Dioxide) หรือสามารถเรียกง่ายๆ ได้อีกอย่างหนึ่งว่าซิลิกาคือสารประกอบ ระหว่างออกไซด์และซิลิกอนรวมตัวกันเป็นสูตรทางเคมีคือ  $\text{SiO}_2$  และเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรง ซิลิกามักพบ ได้ทั่วไปในธรรมชาติอาจในรูปของทรายหรือควอตซ์และในผนังเซลล์ของไดอะตอม ซิลิกาเป็นสารประกอบที่มี จำนวนมากโดยทั่วไปบนเปลือกโลก

ซิลิกาได้นำมาใช้เป็นวัสดุในการผลิตที่หลากหลายอาทิ เช่น คริสตัลกระจก แก้วน้ำและขวดแก้ว สายใยแก้วที่ใช้ในการโทรคมนาคมก็เป็นผลิตผลจากซิลิกาเช่นเดียวกันและยังใช้เป็นวัตถุดิบแรกเริ่มในผลิตภัณฑ์จำพวกเซรามิกเช่น เครื่องปั้นดินเผา เครื่องหิน เครื่องลายคราม และการผลิตพาร์ตแลนด์ซีเมนต์

พื้นที่ผิวของซิลิกาเป็นปัจจัยที่สำคัญในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพความแข็งแรงเมื่อนำไปใช้เป็นวัสดุเสริมแรงในอุตสาหกรรมต่างๆ ซิลิกาที่มีขนาดอนุภาคเล็กจะมีพื้นที่ผิวสูงและให้ความแข็งแรงในการเสริมแรงได้ดี

ในทางการค้าซิลิกาเป็นแหล่งผลิตซิลิกอนและถูกใช้ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นส่วนของวัสดุก่อสร้าง ส่วนซิลิกาอสัณฐาน (Amorphous Silica) ถูกใช้เป็นสารดูดความชื้น สารดูดซับ สารเพิ่มความแข็งแรง สารเติมแต่ง และองค์ประกอบของตัวเร่งปฏิกิริยา

ตารางที่ 2.1 สมบัติทางกายภาพทั่วไปของซิลิกอนไดออกไซด์ [18]

ชื่อทั่วไป	Silica, Quartz, Free, Crystalline Silica, Silica Flour, Silica
สูตรโมเลกุล	SiO <sub>2</sub>
น้ำหนักโมเลกุล	60.1g/mole
สถานะ	ของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น
ความถ่วงจำเพาะ	2.2
จุดเดือด	>2,200 °C
จุดหลอมเหลว	1713 °C

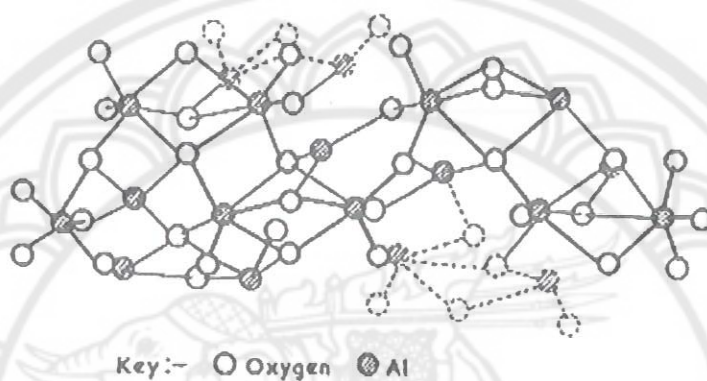
#### 2.2.4 อลูมินาหรืออลูมิเนียมออกไซด์[19]

อลูมินา (Alumina) มีชื่อทางเคมีคืออลูมิเนียมออกไซด์ (Aluminium Oxide: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) มีรูปร่างโมเลกุลเป็นแบบทรงเหลี่ยมแปดหน้าปัจจุบันถูกพัฒนานำมาใช้งานมากขึ้นในอนาคต อลูมินาจัดว่าเป็นวัสดุที่มีมูลค่าสูงเนื่องจากมีสมบัติที่โดดเด่นหลายด้านเช่นมีจุดหลอมเหลวที่สูงมีความแข็งแรงสูงและมีเสถียรภาพทางเคมีที่สูง ไพลิน (Sapphire) คืออลูมินาซึ่งอยู่ในรูปผลึกเดี่ยว (Single Crystal) ซึ่งเป็นอลูมินาที่มีมูลค่าสูงมากเนื่องจากถูกนำไปใช้เป็นเครื่องประดับส่วนอลูมินาที่อยู่ในรูปโครงสร้างผลึกที่ซับซ้อน (Polycrystalline) นั้นจะมีราคาที่ถูกกว่าแต่เป็นวัตถุดิบที่มีบทบาทอย่างมากในอุตสาหกรรมต่างๆโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมที่ต้องการใช้งานที่อุณหภูมิสูงอลูมินาถูกนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมต่างๆอย่างหลากหลายเช่นผลิตภัณฑ์อลูมินาที่ใช้ทำลูกบิด

ผนังกรหุ้มอบด เครื่องมือตัดแต่งวัสดุวิศวกรรม-ยนต์และชิ้นส่วนลดอันตรายจากกระสุนตลอดจนชิ้นส่วนสำหรับ  
อวัยวะทดแทนในทางการแพทย์เช่น

ข้อต่อกระดูกเทียม เป็นต้น

อลูมินาที่มีความเสถียรมากที่สุดอยู่ในรูปอัลฟาอลูมินา ( $\alpha$  -  $Al_2O_3$ ) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นเฮกซา  
โกนอล (Hexagonal) โดยมีออกซิเจนเรียงตัวกันแบบเฮกซาโกนอลและมีลูมิเนียมที่มีขนาดเล็กกว่าแทรกอยู่  
ในช่องออกตะฮีดรอล 2 ใน 3 ส่วนของช่องทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6แสดงการแทรกของอลูมินาในช่องออกตะฮีดรอล[19]

โดยผงอลูมินาจะเป็นที่นิยมใช้มากที่สุดเพราะเป็นวัสดุเริ่มต้นในการขึ้นรูปแบบต่างๆได้ดีทั้งนี้ลูมิ  
นาคี่นำมาใช้จะต้องมีความบริสุทธิ์สูงและมีความละเอียดมากเพราะสมบัติทางฟิสิกส์และเชิงกลของอลูมินา  
สามารถเพิ่มขึ้นได้โดยการกำจัดมลทินต่างๆ ออกไปเช่น

2.2.6.1 การปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยการปรับปรุงองค์ประกอบและโครงสร้างจุลภาค

2.2.6.2การใช้ผงอลูมินาที่มีความละเอียดระดับเล็กกว่าไมโครเมตร

เพื่อที่จะให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีเนื้อละเอียดมากๆ

2.2.6.3 การพัฒนาอลูมินาเซรามิกที่มีรูพรุน

เนื่องจากสมบัติของอลูมินาที่มีความแข็งสูง มีความหนาแน่นสูง มีความต้านทานต่อการขีดสีและสึกกร่อนสูง  
ทนต่อสารเคมี เป็นฉนวนไฟฟ้าที่อุณหภูมิสูงได้ดี และมีความทนไฟสูง จึงสามารถนำมาใช้ในอุตสาหกรรมได้  
หลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมเครื่องขัดถู (Abrasive) อุตสาหกรรมวัสดุทนไฟ อุตสาหกรรมเซรามิก และ  
อื่นๆ ซึ่งแนวโน้มในการนำอลูมินาไปใช้งานก็ได้มีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ สามารถนำอลูมินาที่ได้จากการ  
สังเคราะห์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลายประเภท เช่น อุปกรณ์ประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนรถยนต์

อุปกรณ์นวนไฟฟ้า เครื่องมือตัดแต่ง อุปกรณ์ทางการแพทย์ อวัยวะเทียม เครื่องมือวิทยาศาสตร์ เป็นต้น ไดโพลีเมอร์ที่นำมาใช้ในส่วนนี้จะมีชนิดที่เป็นผง เป็นผลึกเดี่ยวๆ เป็นแผ่นฟิล์มบางๆ เป็นเส้นใยและที่เป็นรูปพรุน

### 2.2.5 ไทเทเนียมไดออกไซด์[18]

ไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถผลิตเป็นโลหะเจือด้วยการผสมกับเหล็ก อะลูมิเนียม วาเนเดียม โมลิบดีนัมและธาตุอื่นๆ เพื่อผลิตโลหะเจือที่แข็งแรงแต่น้ำหนักเบาสำหรับใช้ในยาน-อวกาศหรืออากาศยาน การทหาร กระบวนการทางอุตสาหกรรม (สารเคมี สารเคมีจากปิโตรเลียม ระบบผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเล (Desalination Plant) เยื่อกระดาษและกระดาษ) ยานยนต์ อาหารจากเกษตรกรรม ภายอุปกรณ์ทางการแพทย์ กระดูกเทียม เครื่องมือทางทันตกรรม ฟันปลอมรากเทียม สินค้าทางการกีฬา อัญมณี โทรศัพท์มือถือ และการประยุกต์ใช้อื่นๆ

คุณสมบัติที่มีประโยชน์มากที่สุดของรูปโลหะคือมีความต้านทานการกัดกร่อนและมีอัตราส่วนความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูงกว่าโลหะชนิดใดๆ ในสภาวะบริสุทธิ์ ไทเทเนียมไดออกไซด์มีความแข็งเท่ากับเหล็กกล้าบางชนิด แต่เบากว่าร้อยละ 45 สมบัติทางเคมีและสมบัติทางฟิสิกส์ของไทเทเนียมไดออกไซด์คล้ายกับเซอร์โคเนีย

ตารางที่ 2.2 สมบัติทางกายภาพทั่วไปของไทเทเนียมไดออกไซด์ [18]

ชื่อทั่วไป	Baytitan , Titanium Oxide
สูตรโมเลกุล	TiO <sub>2</sub>
น้ำหนักโมเลกุล	47.867 g/mole
สถานะ	ของแข็งสีขาว ไม่มีกลิ่น
ความถ่วงจำเพาะ	3.9
จุดเดือด	2,500–3,000 °C
จุดหลอมเหลว	1840 °C

### 2.2.6 สารคู่ควบ(Coupling Agents) [3]

สารคู่ควบ คือ สารที่ช่วยปรับปรุงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ ทำหน้าที่เหมือนเป็นสะพานเชื่อมทั้งสองโมเลกุลไว้ โดยส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นส่วนที่จะเกิดปฏิกิริยากับฟิล-เลอร์และอีกส่วนหนึ่งของโมเลกุลเป็นส่วนที่จะเกิดการรวมตัวหรือทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์ได้เป็นอย่างดี เมื่อพื้นผิวฟิลเลอร์ได้รับการปรับปรุงด้วยสารคู่ควบจะช่วยลดแรงดึงผิวของฟิลเลอร์หรือเปลี่ยนลักษณะพื้นผิวของฟิลเลอร์ที่มีสมบัติ

เป็นไฮโดรฟิลิก(Hydrophilic) เปลี่ยนไปเป็นไฮโดรโฟบิก(Hydrophobic) ทำให้สามารถเข้ากันได้กับพอลิเมอร์ ซึ่งไม่เพียงช่วยให้การผสมเกิดได้ดีขึ้น แต่ยังช่วยปรับปรุงสมบัติโดยรวมของคอมโพสิตอีกด้วย กลไกการปรับปรุงการยึดระหว่างฟิลเลอร์กับพอลิเมอร์โดยการใช้สารคู่ควบ

สารคู่ควมมีสูตรทั่วไปคือ  $(RO)_x-M-(R-X)_y$

โดยM คือ โลหะ ได้แก่ ซิลิคอน ไททาเนียม หรือ เซอร์โคเนียม

X เป็นหมู่ฟังก์ชันที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับพอลิเมอร์ เช่น หมู่ไวนิล

หมู่อะนิโม เป็นต้น

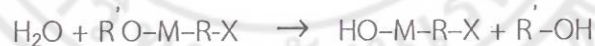
R เป็นหมู่อินทรีย์ที่เชื่อมอยู่ระหว่างหมู่ X กับโลหะ M

O เป็นหมู่ที่เข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับฟิลเลอร์หรือเส้นใยเสริมแรง

การยึดระหว่างสารประสานและฟิลเลอร์อาจเกิดจากปฏิกิริยาโดยตรงระหว่างหมู่ OR ของสารคู่ควมกับหมู่ OH ที่พื้นผิวฟิลเลอร์ดังนี้



หรืออาจเกิดจากการที่หมู่ OR ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยความชื้นที่พื้นผิวฟิลเลอร์ได้เป็นหมู่ OH ซึ่งจะเข้าทำปฏิกิริยาต่อไปกับฟิลเลอร์ดังนี้



สำหรับการยึดเกาะระหว่างสารคู่ควมและพอลิเมอร์เกิดจากหมู่ X ของสารคู่ควมเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันของพอลิเมอร์ โดยหมู่ X มีแตกต่างกันหลายชนิดเพื่อให้เหมาะสมในการใช้งานกับพอลิเมอร์ชนิดต่างๆ

การใช้สารคู่ควมมี 2 วิธี

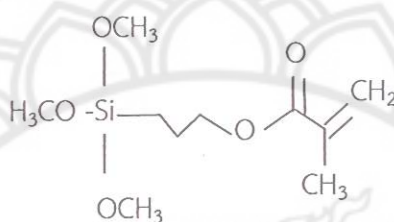
2.2.6.1 นำไปเคลือบหรือปรับแต่งที่พื้นผิวของฟิลเลอร์แล้วจึงนำไปผสมกับพอลิเมอร์

2.2.6.2 ผสมกับพอลิเมอร์โดยตรงระหว่างกระบวนการคอมพาวด์ดิ้ง

สำหรับสารคู่ควมที่ใช้กันทั่วไปมีดังนี้คือ

- ก. สารโคเมียมเชิงซ้อน (Chromium Complexes)
- ข. ซิลเลน (Silanes)
- ค. ไททานेट (Titanates)
- ง. เซอร์โคเนียมอะลูมินेट (Zirconium Aluminates)

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้สารคู่ควบประเภทซิลเลน คือ 3-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตร-เมทอกซีซิลเลน (3-Methacryloxypropyltrimethoxysilane; 3-MPS) โดยจะแสดงลักษณะการจัดเรียงโครงสร้างทางเคมีของ 3-MPS ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะโครงสร้างของ 3-MPS [3]

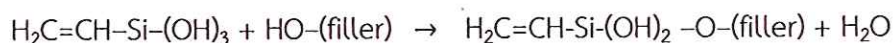
### 2.2.7 ซิลเลน (Silanes)

ซิลเลนเป็นสารคู่ควบที่นิยมใช้มากที่สุดกับผลิตภัณฑ์พลาสติกเสริมแรงด้วยฟิลเลอร์มีสูตรทั่วไปคือ  $Y-Si(OR)_3$  โดยหมู่ OR (เช่น  $-OCH_3$ ,  $-OC_2H_5$ ) จะเข้าทำปฏิกิริยาเกิดพันธะกับฟิลเลอร์ ในขณะที่หมู่ Y (เช่น หมู่ไวนิล หมู่อะมิโน หมู่อีพอกซี และหมู่ Mercapto) จะทำปฏิกิริยากับพอลิ-เมอร์ซึ่งมีผลทำให้ฟิลเลอร์ยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี ตัวอย่างเช่น การใช้ 3-เมทาคริลอกซีโพรพิลไตร-เมทอกซีซิลเลน (3-MPS) จะช่วยให้ฟิลเลอร์ยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดังนี้คือ

ขั้นที่ 1 หมู่เอทอกซีถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นหมู่ซิลลานอล ( $Si-OH$ )



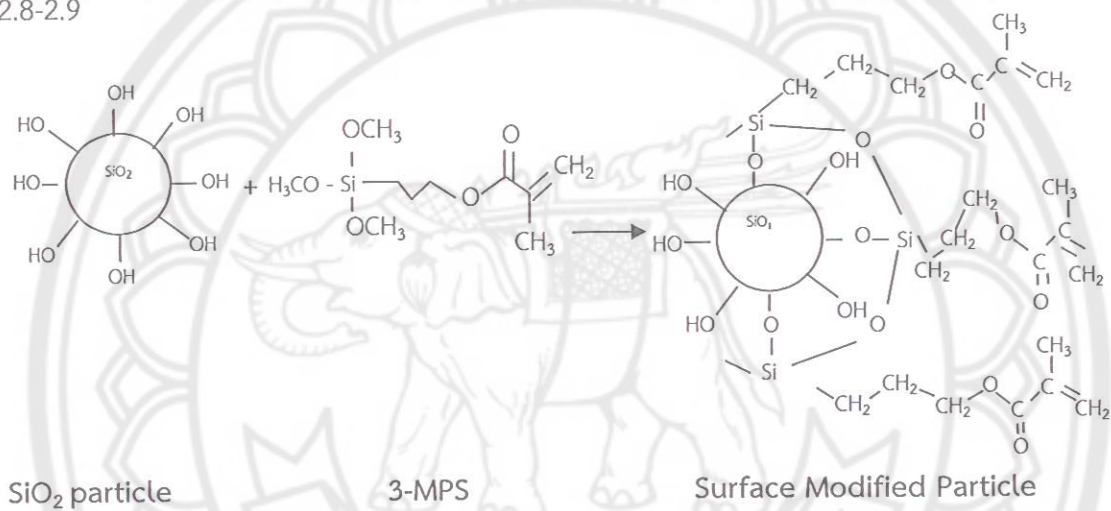
ขั้นที่ 2 ซิลลานอลเข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ OH ที่พื้นผิวของฟิลเลอร์เกิดเป็นพันธะ Si-O-Si ระหว่างสารคู่ควบกับฟิลเลอร์



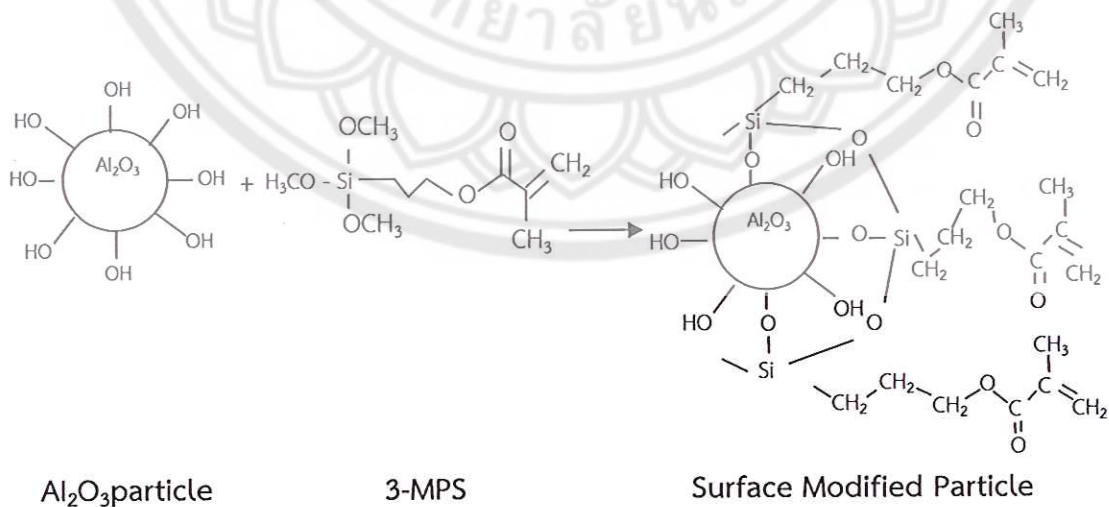
ในขณะเดียวกันหมู่อัลคิลจะเข้าทำปฏิกิริยากับพอลิเมอร์เกิดเป็นพันธะโคเวเลนต์ระหว่างสารคู่ควบกับพอลิเมอร์ โดยวิธีการนี้ จึงทำให้ฟิลเลอร์มีแรงยึดติดกับพอลิเมอร์เมทริกซ์ได้ดี

การใช้สารคู่ควบไซเลนจะมีประสิทธิภาพสูงเมื่อนำไปใช้เป็นสารคู่ควบสำหรับฟิลเลอร์ ต่อไปนี้คือ ซิลิกา แก้ว อลูมินา และอลูมินอซิลิเกต ในทางตรงกันข้าม เมื่อนำไปใช้กับแคลเซียมคาร์บอเนต ไซเลนจะไม่มีประสิทธิภาพเลย

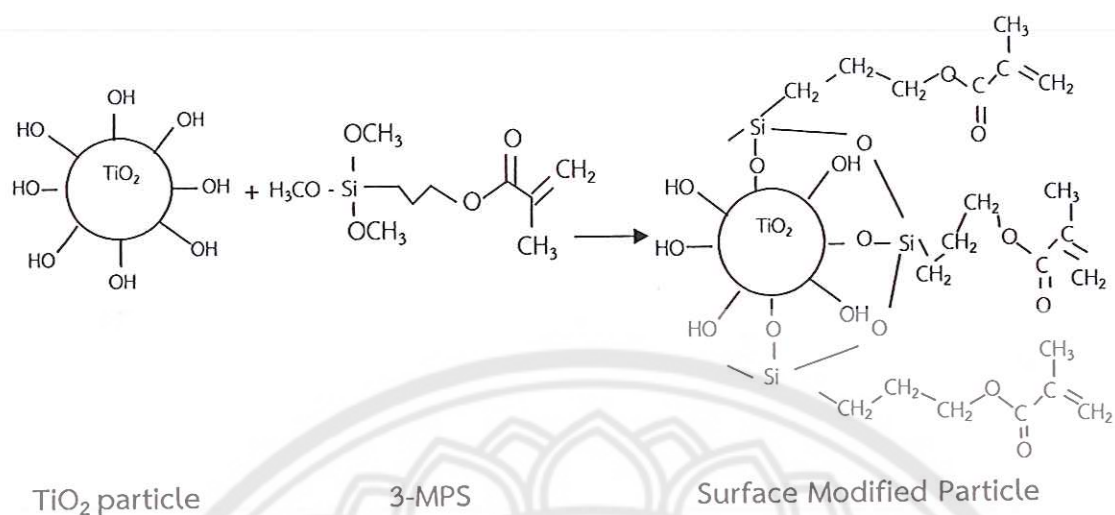
ในการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของพอลิเมอร์โดยการใส่ฟิลเลอร์นั้น คอมโพสิตที่ได้จะมีสมบัติดี ถ้าทำให้ฟิลเลอร์กระจายตัวหรือยึดเกาะกับพอลิเมอร์ได้ดี ซึ่งวิธีการหนึ่งที่ยอมรับใช้กันมานานแล้วคือ การเคลือบหรือปรับสภาพพื้นผิวของฟิลเลอร์ด้วยสารที่สามารถเข้ากันได้ดีกับทั้งเนื้อพอลิเมอร์และฟิลเลอร์ โดยงานวิจัยนี้เลือกฟิลเลอร์หรือวัสดุเสริมแรง 3 ชนิด คือ ซิลิกอนไดออกไซด์ อลูมิเนียมออกไซด์ และไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยจะแสดงลักษณะการปรับสภาพพื้นผิวของวัสดุเสริมแรงโดยใช้ 3-MPS เป็นตัวปรับสภาพพื้นผิว ดังรูปที่ 2.8-2.9



รูปที่ 2.8 การปรับสภาพพื้นผิวของซิลิกอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.9 การปรับสภาพพื้นผิวของอลูมิเนียมออกไซด์



รูปที่ 2.10 การปรับสภาพพื้นผิวของไทเทเนียมไดออกไซด์





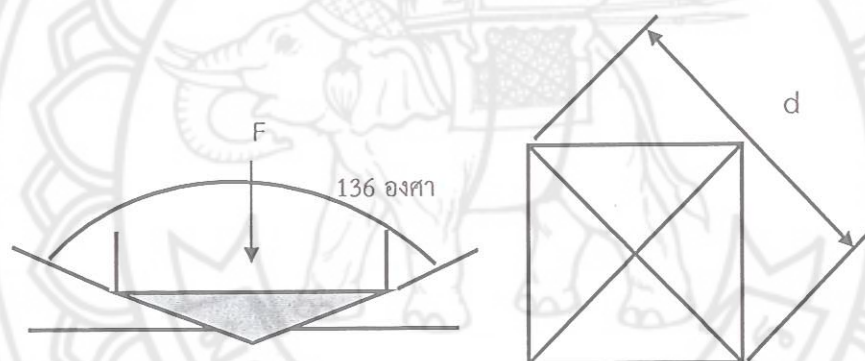
### บทที่ 3

#### การทดสอบสมบัติการใช้งาน

##### 3.1 การวัดความแข็งวิกเกอร์(Vickers Hardness Test-VHN) [20]

วิธีนี้ใช้หัวกดพีระมิดฐานสี่เหลี่ยมที่ทำมาจากเพชรมีมุม 136 องศา แรงกด 5-120 กิโลกรัม เหมาะสำหรับวัดความแข็งของวัสดุที่มีความเปราะ จึงเหมาะในการวัดความแข็งผิวของพื้นธรรมชาติ และพื้นปลอม โดยมีหลักการคล้ายคลึงกับการทดสอบความแข็งนูนและบริเนลล์ แต่มีความแตกต่างกันตรงที่วิธีนี้ใช้หัวกดรูปพีระมิด แรงกดทำให้รอยกดคล้ายรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสบนผิววัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ค่าความแข็งของวัสดุจะถูกวัดจากเส้นทแยงมุมของสี่เหลี่ยมจัตุรัสทั้งสองเส้น นำมาหาค่าความแข็งเฉลี่ยแล้วคำนวณมาเป็นค่าความแข็งวิกเกอร์(Vicker's Hardness Number-VHN) ค่าความแข็งวิกเกอร์และบริเนลล์มีความสัมพันธ์กันตามสมการที่ 2.1

$$\text{VHN} = 1.05\text{BHN} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.11 ลักษณะหัวกดและรอยกดของการวัดความแข็งวิกเกอร์

$$\text{การคำนวณค่าความแข็ง} \quad \text{HV} = \frac{2F \sin(136/2)}{d^2} \quad (2.2)$$

HV = ความแข็งวิกเกอร์(Vickers Hardness)

F = น้ำหนักที่ใช้กด (kg)

d = ความยาวเส้นทแยงมุม (mm)

ตารางที่ 2.3 ข้อกำหนดของซีฟันเทียมอะคริลิกตามมาตรฐาน ISO 3336[21]

ความหนาแน่น ( $\text{g/cm}^3$ )	1.2
มอดูลัสของการยืดหยุ่น (GPa)	2.5
ความแข็งผิว (VHN)	20

### 3.2 การต้านทานแรงดัดโค้ง(Flexural Strength) [20]

เป็นค่าความเค้นที่ได้จากการทดสอบให้เกิดการงอตัวโดยใช้หัวกด (Indenter) ซึ่งกดลงตั้งฉากกับชิ้นทดสอบที่อยู่ในลักษณะแนวนอนโดยมีตัวรองรับ (Supporting Jig) เป็นตัวกำหนดช่วงห่างของตัวรองรับ (Span) การทดสอบในลักษณะนี้ชิ้นทดสอบจะได้รับทั้งแรงเค้นดึง (Tensile Stress) และแรงกด (Compressive Stress) ซึ่งแรงเค้นกดจะเกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบ ส่วนแรงเค้นดึงจะเกิดใต้ชิ้นทดสอบค่า Flexural Strength คือความเค้นมากที่สุดหาได้ดังสมการที่ 2.3

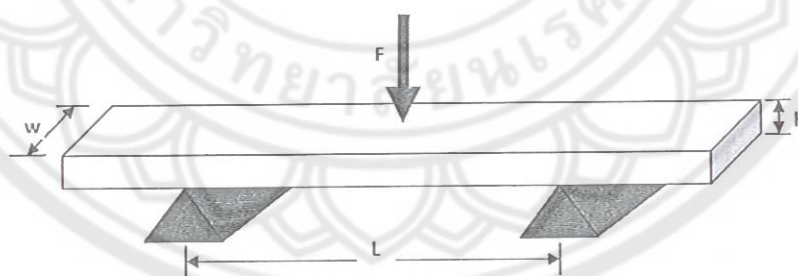
$$\text{Flexural Strength} = \frac{3FL}{2Wh^2} \quad (2.3)$$

F = น้ำหนักที่ทำให้เกิดการแตกของพอลิเมอร์

L = ระยะห่างระหว่างตำแหน่งของวัสดุที่รองรับ

W = ความกว้างของตัวอย่าง

H = ความสูงของตัวอย่าง



รูปที่ 2.12 แสดงแผนผังการทดสอบการต้านทานแรงดัดโค้ง

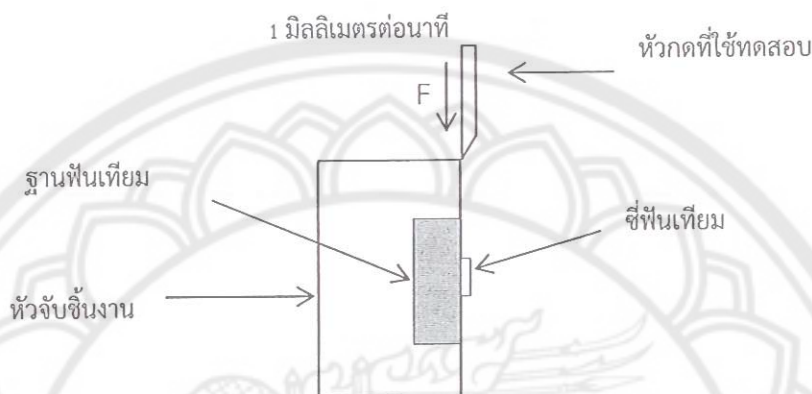
และมอดูลัสของความยืดหยุ่น (Modulus of Elasticity) ในการทำให้ตัวอย่างงอ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.4

$$\text{Flexural Modulus} = \frac{L^3 F}{4Wh^3 d} \quad (2.4)$$

d = ระยะที่ถูกดัด ณ จุดศูนย์กลางชิ้นทดสอบ

### 3.3 แรงยึดเฉือน(Shear Bond Strength) [22]

แรงที่มากกระทำขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวางเพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านกันโดยที่ความเค้นแรงเฉือนมีค่าเท่ากับผลลัพธ์ของแรงเฉือนและพื้นที่ภาคตัดขวางที่ขนานกับแรงเฉือนที่มากกระทำ โดยการทดสอบนี้จะให้แรงกด (Compressive Stress) ที่ตั้งฉากกับชิ้นงานทดสอบจะได้ค่าในการกดมากที่สุดที่ทำให้วัสดุสองชิ้นหลุดออกจากกันหาได้จากสมการที่ 2.5



รูปที่ 2.13แสดงการทดสอบแรงยึดเฉือน

นำค่าแรงที่ได้มาคำนวณหาค่าความแข็งแรงพันธะเฉือน (Shear Bond Strength) โดยใช้สูตร

$$\begin{aligned} \text{ความแข็งแรงพันธะเฉือน (SBS)} &= \frac{\text{แรง}}{\text{พื้นที่หน้าตัด}} \\ &= \frac{F}{\pi r^2} \end{aligned} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $F$  คือค่าแรงที่ใช้ทำให้ซี่ฟันหลุดออกจากฐานพื้นเทียม (N)

คือรัศมีของซี่ฟันเทียม(วัดค่าแต่ละซี่) (m)

หน่วยของความแข็งแรงพันธะเฉือนคือ นิวตันต่อตารางเมตร ( $N/m^2$ ) หรือปาสคาลหรือแปลงเป็นเมกะปาสคาล

### 3.4 การทดสอบสมบัติ visco-elastic

การทดสอบสมบัติทางวิสโคอีลาสติกของวัสดุ จะทำการทดสอบด้วยเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA) เป็นการทดสอบทางกลเชิงไดนามิกส์ โดยเครื่องจะให้แรงแบบต่อเนื่องเป็นรอบหรือ oscillating force แก่ชิ้นงานและวิเคราะห์ผลการตอบสนองของชิ้นงานต่อแรงที่ได้รับ ซึ่งจะแตกต่างจากการรับแรงแบบ static

โดยการตอบสนองของชิ้นงานทดสอบสามารถวัดและวิเคราะห์ในรูปของความสามารถในการคืนรูป (elasticity) การrelaxationของสายโซ่ ค่านดูลัส เป็นต้น ในการทดลองนี้ตัวอย่างจะถูกจับยึดอยู่ระหว่างอุปกรณ์จับยึดจากนั้นให้แรงแบบไดนามิกส์กับตัวอย่างโดยกำหนดค่าความถี่ ความเค้นที่เกิดขึ้นจะถูวัดและสร้างเป็นความสัมพันธ์ในรูปแบบของมอดูลัสสะสม(storage modulus), loss modulus และค่า  $\tan\delta$  ของชิ้นงานทดสอบ โดยสามารถได้ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว  $T_g$  จากกราฟที่จุดพีคของ  $\tan\delta$

### 3.5 Scanning Electron Microscopy (SEM)

เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร การสร้างภาพเกิดจากการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานตัวอย่าง โดยภาพที่ได้จากเครื่อง SEM จะเป็นภาพลักษณะ 3มิติ

### 3.6 Water sorption

การวัดการดูดซึมน้ำจะทำการวัดน้ำหนักของชิ้นงานเมื่อผ่านการแช่น้ำเทียบกับน้ำหนักก่อนแช่เทียบเป็นร้อยละ โดยการวัดการดูดซึมน้ำที่ทำการแช่ตัวอย่างในช่วงเวลาต่างกัน เนื่องจากพบว่าความสามารถในการดูดซึมน้ำที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมวัสดุอัดแทรกของวัสดุคอมโพสิตทำให้สมบัติทางกลมีค่าต่ำลง

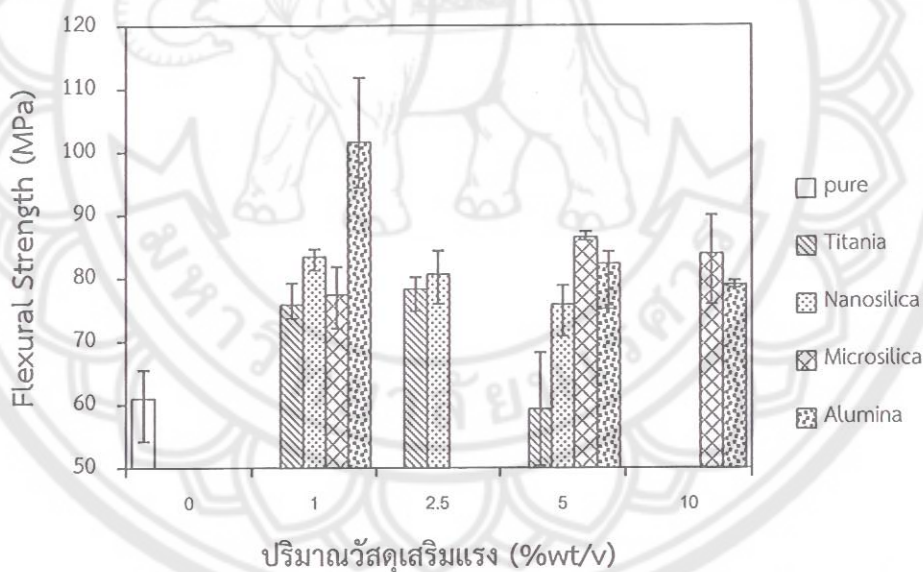
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการเติมวัสดุเสริมแรงทั้งหมด 3 ชนิด (ซิลิกา 15 นาโนเมตรซิลิกา 40 ไมโครเมตรลูมิเนียมออกไซด์ 40 ไมโครเมตร และไทเทเนียมไดออกไซด์) ในวัสดุซีฟฟันเทียมอะคริลิกชนิดบ่มตัวด้วยความร้อน โดยแบ่งการวิเคราะห์ผลเป็นลำดับขั้นตอน คือ ลำดับแรกจะนำเสนอการวิเคราะห์ผลของการเติมชนิดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟฟันเทียมอะคริลิก จากนั้นจะศึกษาผลของปริมาณการเติมวัสดุเสริมแรงตามด้วยการศึกษาผลของขนาดวัสดุเสริมแรง และลำดับสุดท้ายศึกษาผลของการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงด้วยไซเลนที่มีผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุซีฟฟันเทียมอะคริลิก โดยมีรายละเอียดผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลองมีดังนี้

#### 4.1 ผลการทดสอบสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง

##### 4.1.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบชนิดของการเติมวัสดุเสริมแรง



รูปที่ 4.1.1 แผนภูมิแสดงผลของชนิดและปริมาณวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟฟันเทียมอะคริลิกต่อสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Strength)

จากรูปที่ 4.1.1 แสดงผลของชนิดวัสดุเสริมแรงต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่าเมื่อมีการเติมวัสดุเสริมแรงทุกชนิด ทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ( $P > 0.05$ ) โดยที่ซีฟฟันเทียมอะคริลิกที่ไม่ได้มีการเติมวัสดุเสริมแรงมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเท่ากับ 60.98 MPa เมื่อพิจารณาที่ปริมาณวัสดุ

เสริมแรง 1%wt/v พบว่าอลูมิเนียมออกไซด์มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 101.59 MPa ในขณะที่ไททาเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเฉลี่ยเท่ากับ 75.76 และ 77.33 MPa ตามลำดับ จากการที่สมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นนั้นสามารถอธิบายได้บนพื้นฐานของทรานสฟอร์มเมชันที่ฟเฟนนิ่ง (Transformation Toughening) [7] คือ อลูมิเนียมออกไซด์ที่อยู่ในเฟสเทอร์โกไนต์ที่ถูกแรงจากภายนอกกระทำ จะเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็นมอโนคลินิกทำให้เกิดการขยายตัวของเฟสในทิศทางตรงกันข้ามกับทิศของรอยร้าว พลังงานที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนเฟสดังกล่าวมีปริมาณสูงกว่าพลังงานที่ทำให้เกิดรอยร้าวขยายตัว ทำให้เกิดแรงอัดรอบรอยร้าวส่งผลให้ลดหรือหยุดการขยายตัวของรอยร้าว [26] จึงทำให้วัสดุเสียหายช้าลง ซึ่งอนุภาคต่างชนิดกันอาจมีความสามารถในการเปลี่ยนเฟสต่างกัน ทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งมีค่าที่แตกต่างกันไปด้วย ในขณะที่เมื่อทำการพิจารณาที่ปริมาณการเติมวัสดุเสริมแรง 5%wt/v ซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งสูงกว่าอลูมิเนียมออกไซด์ เนื่องจากไม่ใช่ปัจจัยด้านชนิดเพียงอย่างเดียวที่มีผล แต่ว่าปัจจัยด้านปริมาณการเติมก็มีผลด้วยเช่นกันซึ่งจะได้อภิปรายผลต่อไป

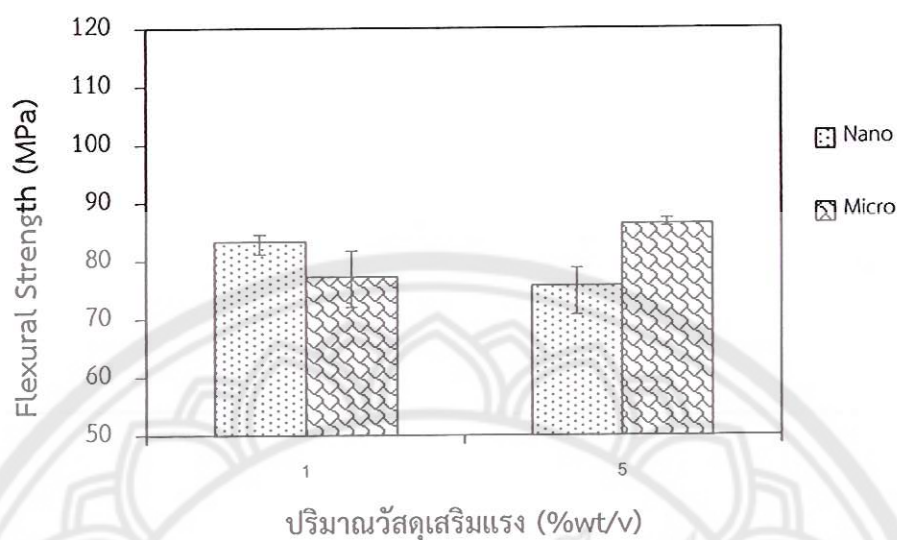
#### 4.1.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบปริมาณของการเติมวัสดุเสริมแรง

จากรูปที่ 4.1.1 แสดงผลของปริมาณวัสดุเสริมแรงต่อค่าการต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่าวัสดุเสริมแรงแต่ละชนิดมีอิทธิพลของปริมาณที่ต่างกัน เมื่อพิจารณาวัสดุเสริมแรงไททาเนียมไดออกไซด์พบว่าเมื่อเติมในปริมาณ 1%wt/v มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเฉลี่ยเท่ากับ 75.77 MPa ซึ่งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญส่งผลให้พินเทียมอะคริลิกที่มีการเติมวัสดุเสริมแรงรับแรงได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับซีพินเทียมอะคริลิกที่ไม่ได้มีการเติมวัสดุเสริมแรง และเมื่อเติมวัสดุเสริมแรง 2.5%wt/v จะทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งมีค่าเฉลี่ยสูงที่สุดเท่ากับ 78.25 MPa แต่เมื่อเพิ่มเป็น 5%wt/v กลับส่งผลให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลง เนื่องจากการเติมวัสดุเสริมแรงนั้น ควรมีความเหมาะสมของสัดส่วนในการเติมจึงจะส่งผลให้วัสดุมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้น

พิจารณาที่วัสดุเสริมแรงซิลิกอนไดออกไซด์ พบว่าเมื่อเติมวัสดุเสริมแรงในปริมาณการเติม 1%wt/v และ 5%wt/v ทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ แต่เมื่อเติมวัสดุเสริมแรงในปริมาณ 10%wt/v จะมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญพิจารณาที่วัสดุเสริมแรงอลูมิเนียมออกไซด์พบว่าเมื่อเติมในปริมาณ 1%wt/v มีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเฉลี่ยสูงขึ้นมาเท่ากับ 101.59 MPa แต่เมื่อเติมมากกว่านี้จะทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ

จากผลการทดลองข้างต้นพบว่า การเติมวัสดุเสริมแรงช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งได้ด้วยปริมาณการเติมที่เหมาะสม ซึ่งอนุภาคของวัสดุเสริมจะช่วยให้เรื่องของการเปลี่ยนเฟสที่เรียกว่าทรานสฟอร์มเมชันที่ฟเฟนนิ่งดังที่กล่าวไว้ข้างต้น แต่ว่าการเติมวัสดุเสริมแรงในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลง เนื่องจากปริมาณของอนุภาคที่มากเกินไป จะก่อให้เกิดรอยต่อระหว่างพื้นผิวที่มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้นทนต่อแรงดัดโค้งได้ไม่ดี

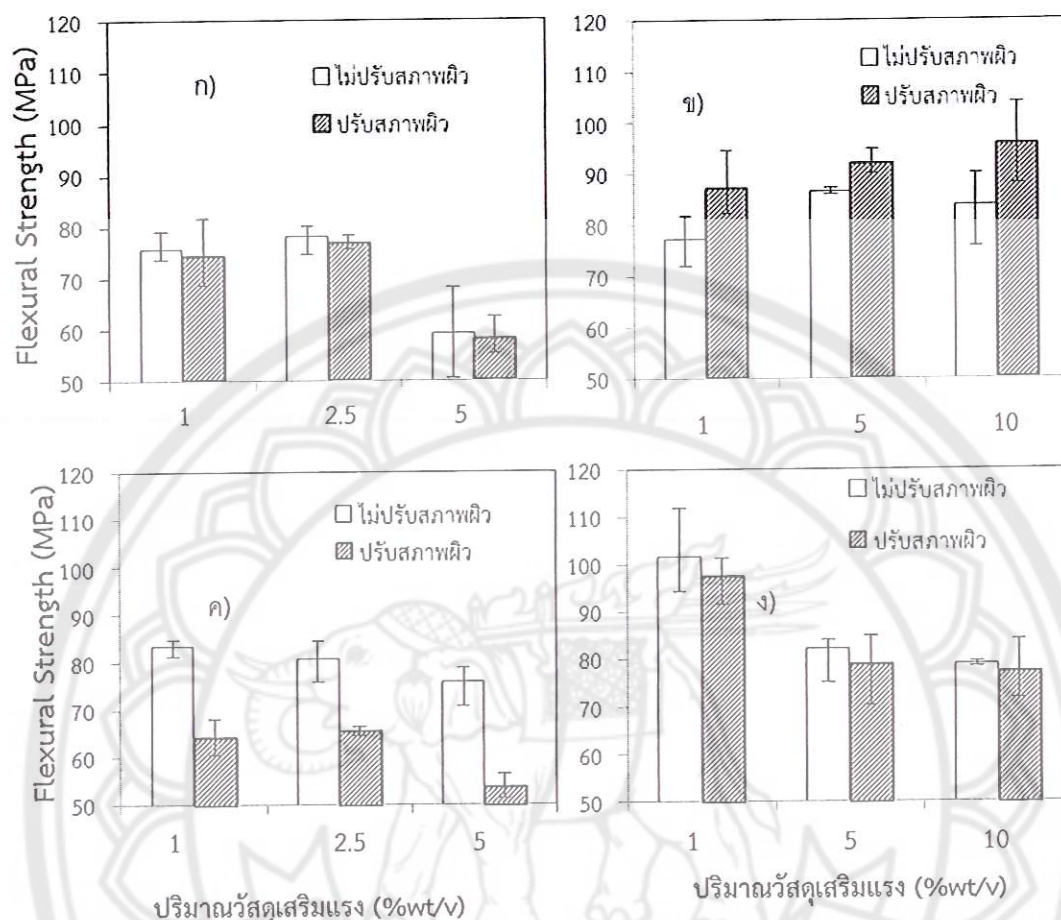
#### 4.1.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลของขนาดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีพินเทียมอะคริลิก



รูปที่ 4.1.2 แผนภูมิแสดงผลของขนาดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีพินเทียมอะคริลิกต่อสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Strength)

จากรูป 4.1.2 แสดงผลของขนาดอนุภาควัสดุเสริมแรงซิลิกอนไดออกไซด์ต่อการต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่าที่ปริมาณวัสดุเสริมแรง 1%wt/v ขนาดนาโนเมตรมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเฉลี่ยมากกว่าขนาดไมโครเมตร คือ 83.35 และ 77.33 MPa ตามลำดับ เนื่องจากขนาดนาโนเมตรมีความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดีกว่าขนาดไมโครเมตร จึงมีการรับแรงได้ดีกว่าขนาดไมโครเมตร แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติม 5%wt/v ขนาดไมโครเมตรมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งดีกว่าขนาดนาโนเมตร เนื่องจากเหตุผลในด้านปริมาณการเติมที่เหมาะสม ซึ่งได้กล่าวไว้ข้างต้น

#### 4.1.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรง



รูปที่ 4.1.3 แผนภูมิแสดงผลของการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีเมนต์เทียมอะคริลิกต่อสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง (Flexural Strength)

- ก) วัสดุเสริมแรงไทเทเนียมไดออกไซด์
- ข) วัสดุเสริมแรงซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 40 ไมโครเมตร
- ค) วัสดุเสริมแรงซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 15 นาโนเมตร
- ง) วัสดุเสริมแรงอะลูมิเนียมออกไซด์

จากรูปที่ 4.1.3 แสดงผลของการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงด้วยไฮเลนต่อสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่าเมื่อปรับผิวด้วยไฮเลนกับไททาเนียมไดออกไซด์ อะลูมิเนียมออกไซด์ และซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ในขณะที่ซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด

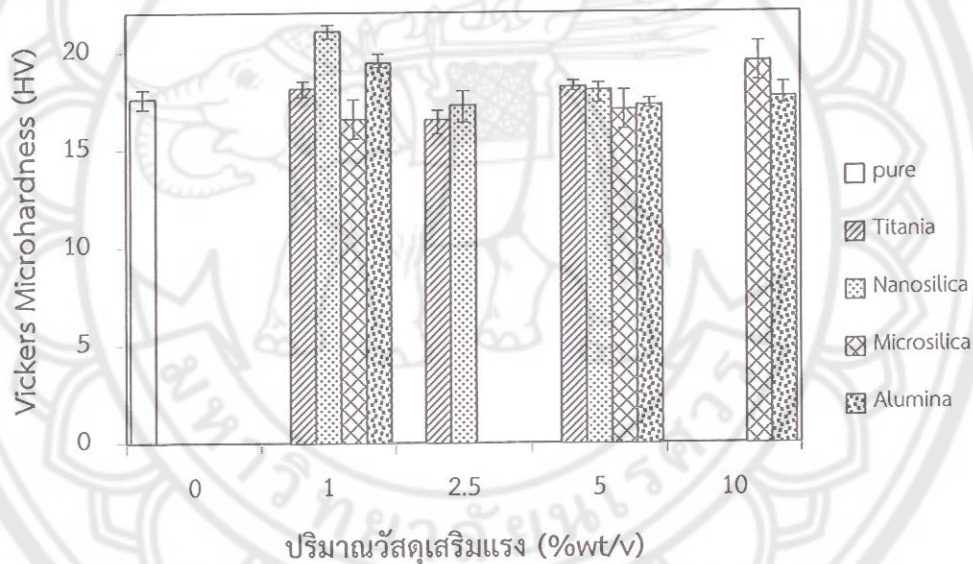




ไมโครเมตรเมื่อถูกปรับผิวด้วยไซเลนทำให้สมบัติการต้านทานการดัดโค้งดีขึ้น ซึ่งขัดกับหลายๆงานวิจัย R. L. Bowen[23] กับ S. C. Bayne[24] ที่รายงานไว้ว่าเมื่อมีการปรับผิวด้วยไซเลนจะทำให้อนุภาคซึ่งเข้ากับพอลิเมอร์ได้ไม่ดี ให้เข้ากันได้ด้วยพันธะทางเคมี ซึ่งจะทำให้สมบัติทางกลของวัสดุดีขึ้น แต่จากผลการทดลองในงานนี้พบว่าสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งด้อยลง อาจเป็นเพราะหมู่ OR ของไซเลนที่ควรจับกับหมู่ซิลานอลของอนุภาควัสดุเสริมแรงกลับจับกับไซเลนกันเองทำให้อนุภาควัสดุเสริมแรงเข้ากับพอลิเมอร์ได้ไม่ดีและเกิดข้อบกพร่องในส่วนที่ไซเลนจับกันเอง การกระจายตัวของอนุภาคจึงกระจายได้แย่งผลให้สมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งด้อยลง

## 4.2 ผลการทดสอบสมบัติความแข็งผิววิกเกอร์

### 4.2.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบชนิดของวัสดุเสริมแรง



รูปที่ 4.2.1 แผนภูมิแสดงผลของชนิดและปริมาณวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิกต่อสมบัติความแข็งผิววิกเกอร์ (Vickers Microhardness Test)

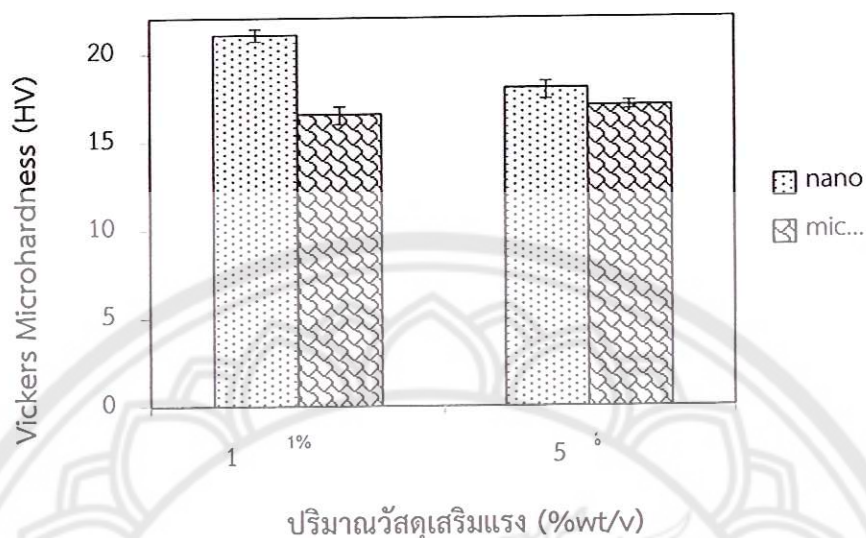
จากรูปที่ 4.2.1 แสดงผลของชนิดวัสดุเสริมแรงต่อความแข็งผิวของซีฟีนเทียมอะคริลิก พบว่าการเติมวัสดุเสริมแรงช่วยเพิ่มค่าความแข็งผิวได้ในบางชนิดขั้นเท่านั้นโดยที่ซีฟีนเทียมอะคริลิกที่ไม่มีการเติมวัสดุเสริมแรงมีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 17.6 HV เมื่อพิจารณาชนิดของวัสดุเสริมแรงที่ปริมาณการเติม 1%wt/v พบว่าลูมิเนียมออกไซด์มีค่าความแข็งผิวเฉลี่ยมากที่สุดเท่ากับ 19.43 HV ในขณะที่ไททาเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าความแข็งเฉลี่ยเท่ากับ 18.13 และ 16.56 HV ตามลำดับ เนื่องจากความแข็งของ

อนุภาคแต่ละชนิดมีค่าความแข็งที่แตกต่างกัน โดยที่อะลูมิเนียมออกไซด์ซึ่งมีค่าสเกลความแข็งของโมส์มากที่สุดเท่ากับ 9 ของไททานเนียมไดออกไซด์และ ซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าเท่ากับ 5.5-6.5 และ 6-7 ตามลำดับ [25] ซึ่งอนุภาคที่แข็งกว่าจะสามารถรับแรงได้ดีกว่า นอกจากนี้อาจเป็นผลของมวลโมเลกุลของวัสดุเสริมแรงดังกล่าวด้วย โดยที่อะลูมิเนียม-ออกไซด์มีค่ามวลโมเลกุลเท่ากับ 101.96 กรัมต่อโมลไททานเนียมไดออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์เท่ากับ 79.86 กรัมต่อโมล 60.08 กรัมต่อโมล ตามลำดับจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติANOVA ( $P < 0.05$ ) พบว่าชนิดของวัสดุเสริมแรงในปริมาณการเติม 5%wt/v ไม่มีผลต่อค่าความแข็งผิว

#### 4.2.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบปริมาณของการเติมวัสดุเสริมแรง

จากรูปที่ 4.2.1 แสดงผลของปริมาณการเติมวัสดุเสริมแรงต่อค่าความแข็งผิว จากผลการทดลองเมื่อพิจารณาที่ไททานเนียมไดออกไซด์พบว่าเมื่อเติมวัสดุเสริมแรงเข้าไป ไม่มีผลต่อการปรับปรุงสมบัติความแข็งอย่างไม่มีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) และเมื่อพิจารณาที่ซิลิกอนไดออกไซด์พบว่าเมื่อเติมในปริมาณ 1 และ 5%wt/v ค่าความแข็งลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่เมื่อเติม 10%wt/v ค่าความแข็งผิวเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเท่ากับ 19.5 HV ในขณะที่เมื่อพิจารณาที่อะลูมิเนียมออกไซด์พบว่าเมื่อเติมวัสดุเสริมแรงในปริมาณการเติม 1%wt/v จะให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 19.43 HV และเมื่อเติมมากกว่า 1%wt/v ทำให้ค่าความแข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเติมวัสดุเสริมแรงเพื่อเพิ่มค่าความแข็ง จำเป็นต้องเติมในปริมาณที่เหมาะสมซึ่งจะช่วยเสริมแรงทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเติมในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้มีรูพรุนเกิดขึ้น [7] ซึ่งจะเป็นข้อบกพร่องทำให้สมบัติความแข็งลดลงจากผลการทดลองข้างต้นพบว่าปริมาณที่เหมาะสมของอะลูมิเนียมออกไซด์และซิลิกอนไดออกไซด์ คือ ปริมาณการเติมที่ 1%wt/v และ 10%wt/v หรือมากกว่าตามลำดับและในส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดนาโนเมตรมีค่าความแข็งเฉลี่ยสูงสุดที่ปริมาณการเติม 1%wt/v และค่าความแข็งจะลดลงเมื่อเติมมากกว่า 1%wt/v เนื่องจากอนุภาคขนาดนาโนเมตรมีสมบัติที่ง่ายต่อการรวมตัวกัน ซึ่งจะเป็นจุดบกพร่องทำให้สมบัติความแข็งลดลง

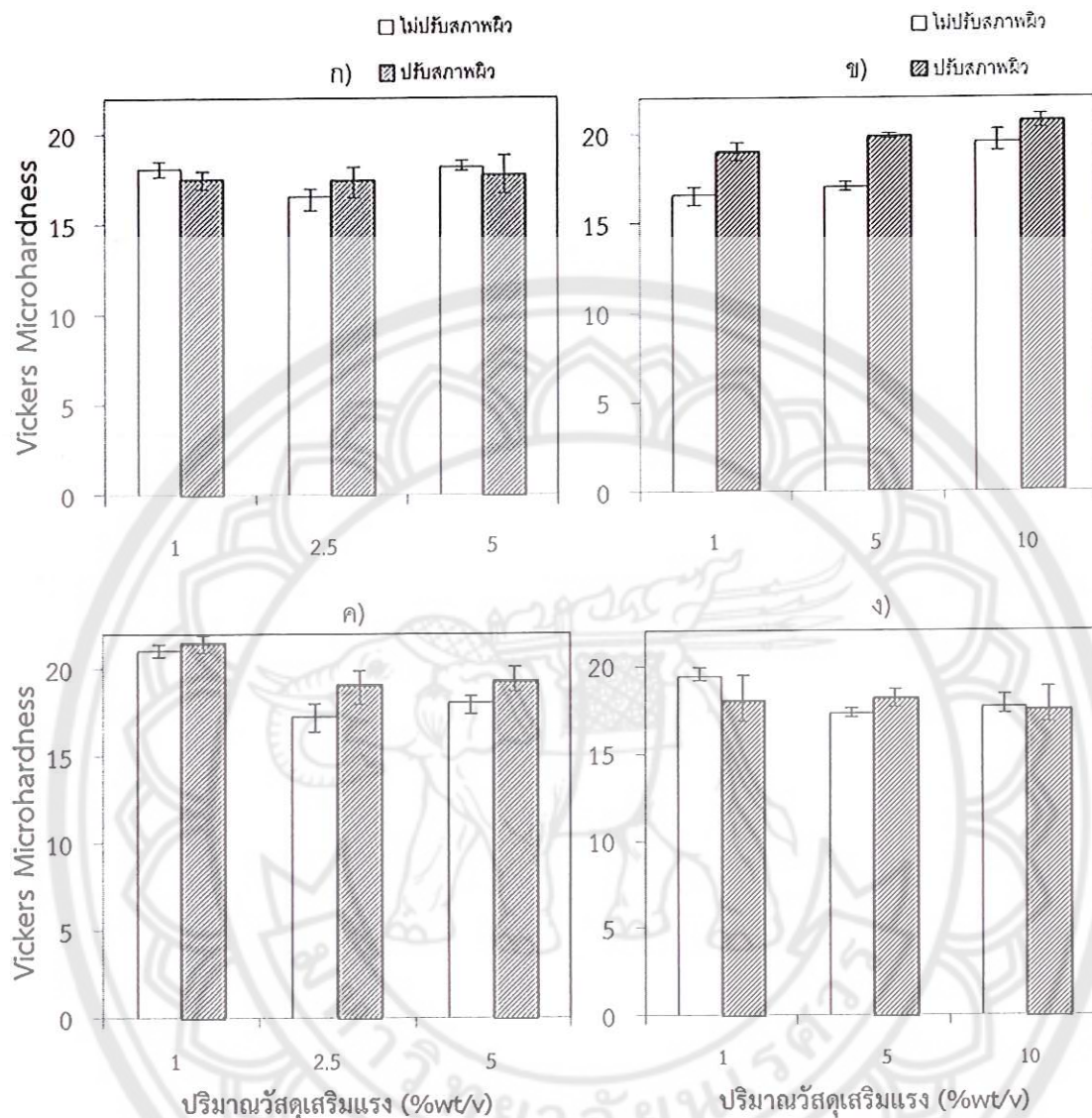
#### 4.2.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลของขนาดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิก



รูปที่ 4.2.2 แผนภูมิแสดงผลของขนาดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิกต่อสมบัติความแข็งผิววิกเกอร์ (Vickers Microhardness Test)

จากรูปที่ 4.2.2 แสดงผลของขนาดอนุภาคซิลิกอนไดออกไซด์ต่อค่าความแข็งผิวทั้งปริมาณการเติมวัสดุเสริมแรงที่ 1 และ 5%wt/v อนุภาคขนาดนาโนเมตรให้ค่าความแข็งผิวมากกว่าขนาดไมโครเมตร เนื่องจากขนาดนาโนเมตรมีความหนาแน่นในการจัดเรียงตัว (Packing Density) มากกว่าขนาดไมโครเมตร [11] จึงเป็นสาเหตุทำให้ขนาดนาโนเมตรให้ค่าความแข็งที่มากกว่าขนาดไมโครเมตร

#### 4.2.4 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลของการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิก



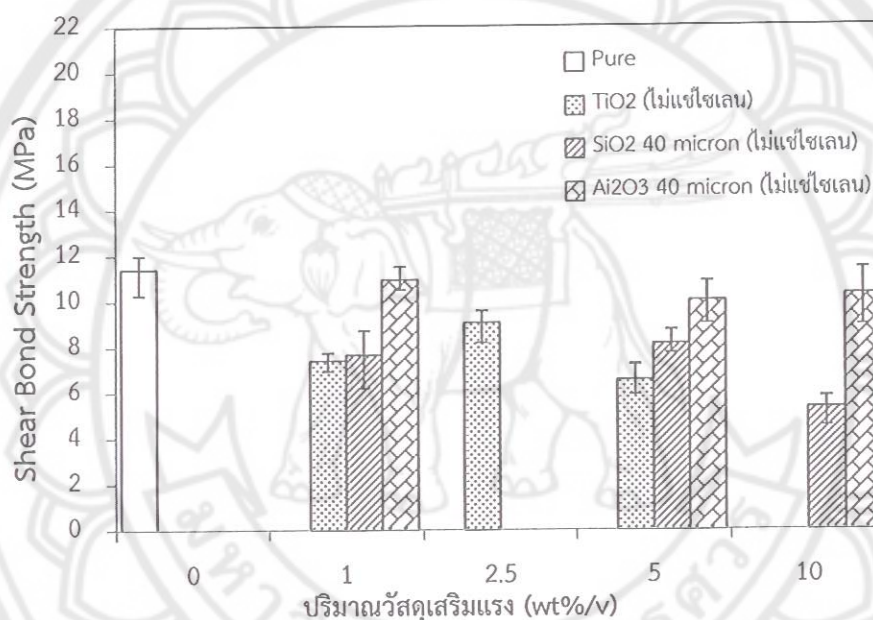
รูปที่ 4.2.3 แผนภูมิแสดงผลของการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิกต่อสมบัติความแข็งผิววิกเกอร์ (Vickers Microhardness Test)

- ก) วัสดุเสริมแรงไทเทเนียมไดออกไซด์
- ข) วัสดุเสริมแรงซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 40 ไมโครเมตร
- ค) วัสดุเสริมแรงซิลิกอนไดออกไซด์ขนาด 15 นาโนเมตร
- ง) วัสดุเสริมแรงอะลูมิเนียมออกไซด์

จากรูปที่ 4.2.3 แสดงผลของการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิก จากผลการทดลองพบว่าเมื่อปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงไททาเนียมไดออกไซด์และอลูมิเนียมออกไซด์มีการปรับปรุงสมบัติความแข็งแรงอย่างไม่มีนัยสำคัญ แต่ในส่วนของซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดไมโครเมตร และขนาดนาโนเมตร การปรับผิวด้วยไฮเลนมีผลทำให้ค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยงานวิจัย R. L. Bowen[23] กับ S. C. Bayne[24] ไฮเลนดังกล่าวจะช่วยเพิ่มการเข้ากันได้ระหว่างอนุภาควัสดุเสริมแรงกับพอลิเมอร์

#### 4.3 ผลการทดสอบสมบัติแรงยึดเหนี่ยว

##### 4.3.1 ผลการทดสอบเปรียบเทียบชนิดของการเติมวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิก



รูปที่ 4.3.1 แผนภูมิแสดงผลของชนิดและปริมาณวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิก ต่อสมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Shear Bond Strength)

จากรูปที่ 4.3.1 แสดงผลของชนิดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิกต่อสมบัติแรงยึดเหนี่ยว พบว่าเมื่อมีการเติมวัสดุเสริมแรงทั้ง 3 ชนิดทำให้ค่าสมบัติแรงยึดติดกับฐานฟันเทียมเฉลี่ยต่ำกว่าเรซินอะคริลิกที่ไม่มีการเสริมแรงอย่างมีนัยสำคัญ ( $P < 0.05$ ) เมื่อพิจารณาที่ปริมาณวัสดุเสริมแรง 1 และ 5%wt/v พบว่าอะลูมิเนียมออกไซด์มีค่าแรงยึดเหนี่ยวติดเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 10.93MPa และ 10.02 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ไททาเนียมไดออกไซด์มีค่าแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 7.39MPa และ 6.56 MPa ตามลำดับ และซิลิกอนไดออกไซด์มีค่าแรงยึดเหนี่ยวติดเฉลี่ยน้อยสุดเท่ากับ 7.64MPa และ 8.13 MPa ตามลำดับ เนื่องจากอะลูมิเนียมออกไซด์มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ไม่ดี ซึ่งอนุภาคดังกล่าวจะเป็นตัวขัดขวางการยึดติด จึงทำให้บริเวณผิวสัมผัสระหว่างฐานฟันเทียมกับซีฟีนเทียมอาจมีอนุภาคอยู่น้อย จึงทำให้ซีฟีนเทียมกับฐานฟันเทียมมีค่าแรงยึดเหนี่ยว

ติดที่สูง ในทางตรงกันข้ามซิลิกอนไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์มีการกระจายตัวของอนุภาคที่ดีกว่า อะลูมิเนียมออกไซด์ จึงมีค่าแรงยึดติดที่ต่ำกว่าให้ผลการทดลองในตาราง ก.3 (ภาคผนวก ก)

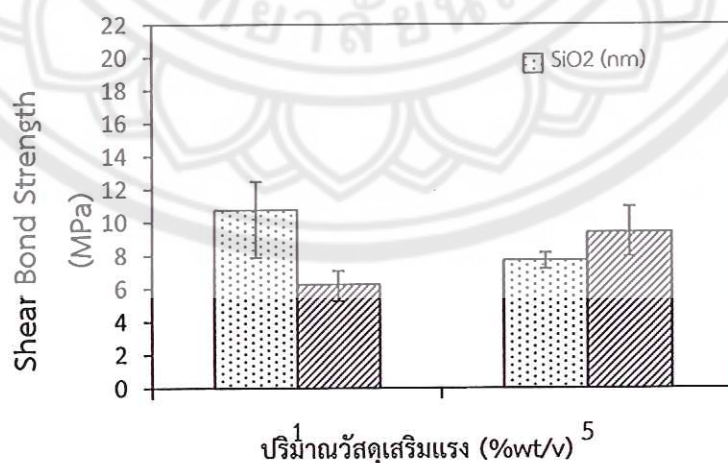
#### 4.3.2 ผลการทดสอบเปรียบเทียบปริมาณการเติมวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟันทึยมอะคริลิก

จากรูปที่ 4.3.1 แสดงผลปริมาณวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟันทึยมอะคริลิกต่อสมบัติแรงยึดเหนี่ยวเมื่อพิจารณาที่ไทเทเนียมไดออกไซด์ พบว่าเมื่อมีการเติมวัสดุเสริมแรงในปริมาณ 1 2.5 และ 5%wt/v มีค่าแรงยึดติดเฉลี่ยเท่ากับ 7.39 9.06 และ 6.56 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ปริมาณ 2.5%wt/v มีค่าแรงยึดติดเฉลี่ยมากที่สุด เนื่องจากอนุภาคที่ผิวจะทำหน้าที่ช่วยเพิ่มแรงเสียดทาน จึงทำให้ที่ 2.5%wt/v มีค่าแรงยึดติดเฉลี่ยมากกว่า 1%wt/v แต่เมื่อเติมถึง 5%wt/v อนุภาคอาจมากเกินไปจนไปขัดขวางการยึดติดระหว่างซีฟันทึยมกับฐานฟันทึยมและทำให้น้ำพอลิเมอร์เหลือน้อย จึงส่งผลให้แรงยึดติดด้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ

พิจารณาที่ซิลิกอนไดออกไซด์พบว่า เมื่อมีการเติมที่ 1 5 และ 10%wt/v มีค่าแรงยึดติดเฉลี่ยเท่ากับ 7.64 8.13 และ 5.33 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าที่ปริมาณ 5%wt/v มีค่าแรงยึดติดเฉลี่ยมากที่สุด เนื่องจากอนุภาคที่ผิวจะทำหน้าที่ช่วยเพิ่มแรงเสียดทาน จึงทำให้ที่ 5%wt/v มีค่าแรงยึดติดเฉลี่ยมากกว่า 1%wt/v แต่เมื่อเติมถึง 10%wt/v อนุภาคของวัสดุเสริมแรงอาจมากจนทำให้เข้าไปแทนที่ของน้ำพอลิเมอร์ทำให้น้ำพอลิเมอร์น้อยลง จึงส่งผลให้แรงยึดติดด้อยลงอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาที่อะลูมิเนียมออกไซด์พบว่า เมื่อมีการเติมที่ 1 5 และ 10%wt/v มีค่าแรงยึดติดเฉลี่ยเท่ากับ 10.93 10.02 และ 10.29 MPa ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุเสริมแรงจะทำให้ค่าแรงยึดติดลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญ

#### 4.3.3 ผลการทดสอบเปรียบเทียบผลของขนาดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟันทึยมอะคริลิก

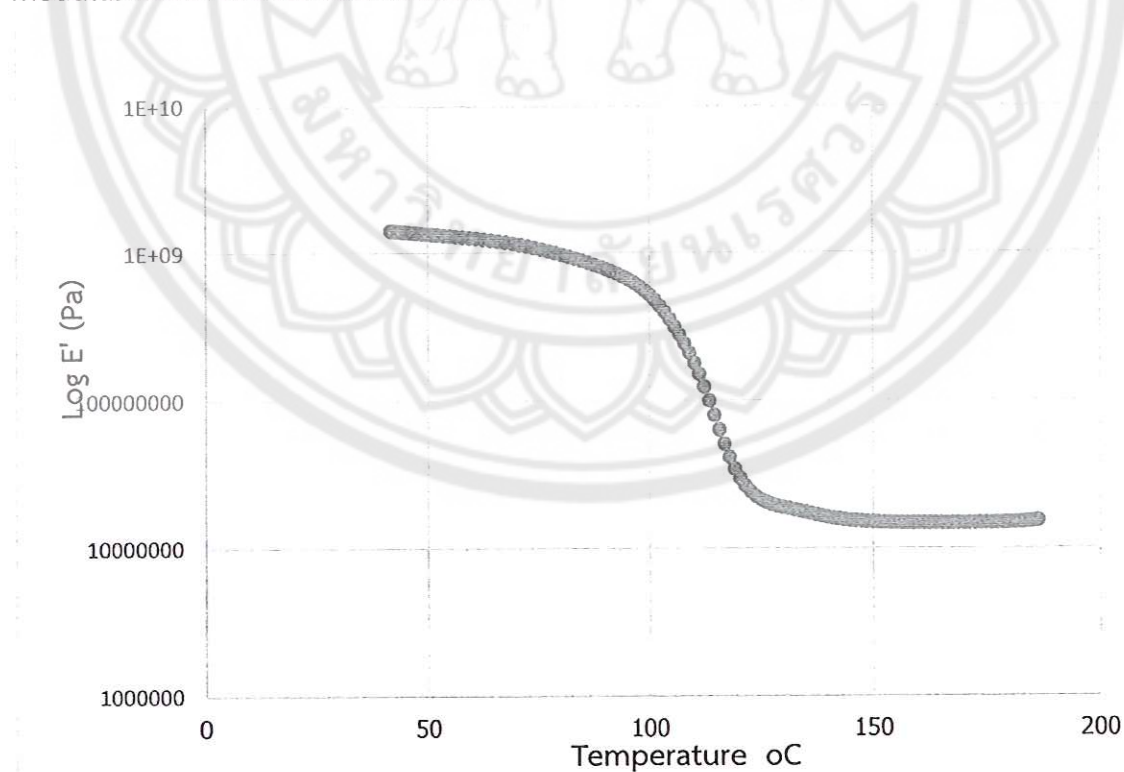


รูปที่ 4.3.2 แผนภูมิแสดงผลของขนาดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟันทึยมอะคริลิกต่อสมบัติแรงยึดเหนี่ยว (Shear Bond Strength)

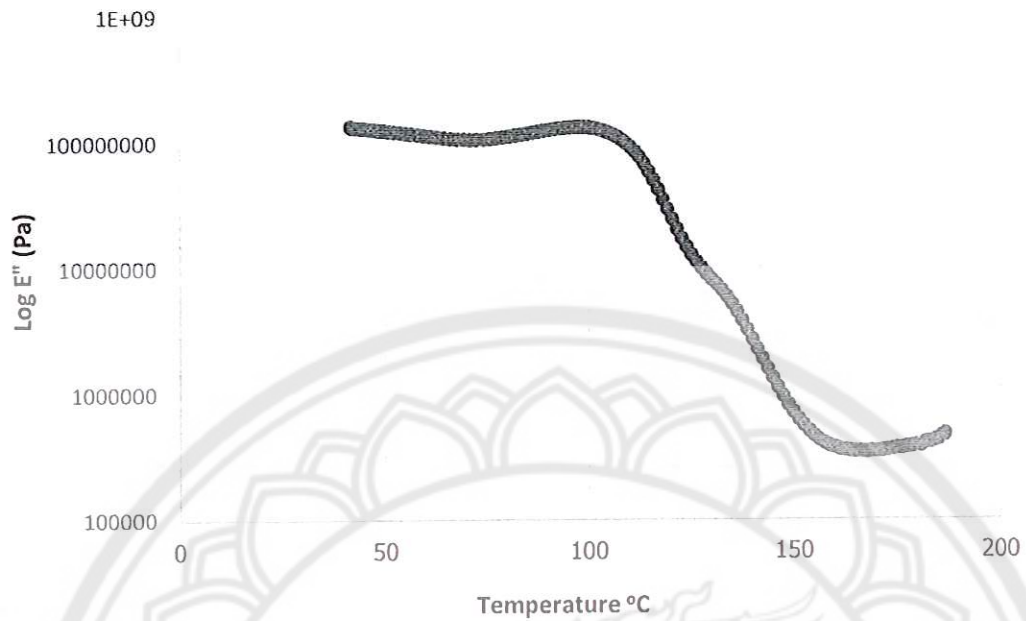
จากรูปที่ 4.3.2 แสดงผลของขนาดวัสดุเสริมแรงในวัสดุซีฟีนเทียมอะคริลิกต่อสมบัติแรงยึดเหนี่ยวติด โดยเปรียบเทียบที่ซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดอนุภาค 15 นาโนเมตรกับ 40 ไมโครเมตรเมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติม 1%wt/v จะเห็นว่าที่ขนาดนาโนเมตรมีค่าสมบัติแรงยึดเหนี่ยวเฉลี่ยเท่ากับ 9.7 MPa ในขณะที่ซิลิกอนไดออกไซด์ขนาดไมโครเมตรมีค่าแรงยึดติดเฉลี่ยเท่ากับ 7.64 MPa ซึ่งน้อยกว่าขนาดนาโนเมตรอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากอนุภาคขนาดนาโนเมตรมีการกระจายตัวของอนุภาคที่มากพอในการช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างวัสดุซีฟีนเทียมกับฐานพินเทียม ในขณะที่อนุภาคไมโครเมตรมีการกระจายตัวที่แยกว่าขนาดนาโนเมตร ซึ่งอนุภาคดังกล่าวในปริมาณ 1%wt/v ทำหน้าที่เป็นตัวขัดขวางการยึดติดระหว่างซีฟีนเทียมกับฐานพินเทียม เมื่อพิจารณาที่ปริมาณ 5%wt/v จะเห็นว่าที่ขนาดนาโนเมตรมีสมบัติแรงยึดเหนี่ยวต่ำกว่าอนุภาคไมโครเมตรอย่างมีนัยสำคัญ คือเท่ากับ 3.77 และ 5.33 MPa ตามลำดับ เนื่องมาจากขนาดนาโนเมตรที่ปริมาณการเติม 5%wt/v มีปริมาณอนุภาคมากเกินไป ทำให้เนื้อพอลิเมอร์น้อยลงส่งผลให้แรงยึดติดเหนี่ยวน้อยลงเช่นกัน ในขณะที่ขนาดไมโครเมตรที่ปริมาณการเติม 5%wt/v มีปริมาณอนุภาคที่มากพอในการช่วยเพิ่มแรงเสียดทานระหว่างวัสดุซีฟีนเทียมกับฐานพินเทียมดังที่กล่าวไว้ข้างต้น

#### 4.4 ผลการทดสอบสมบัติจากเครื่อง Dynamic Mechanical Analyzer (DMA)

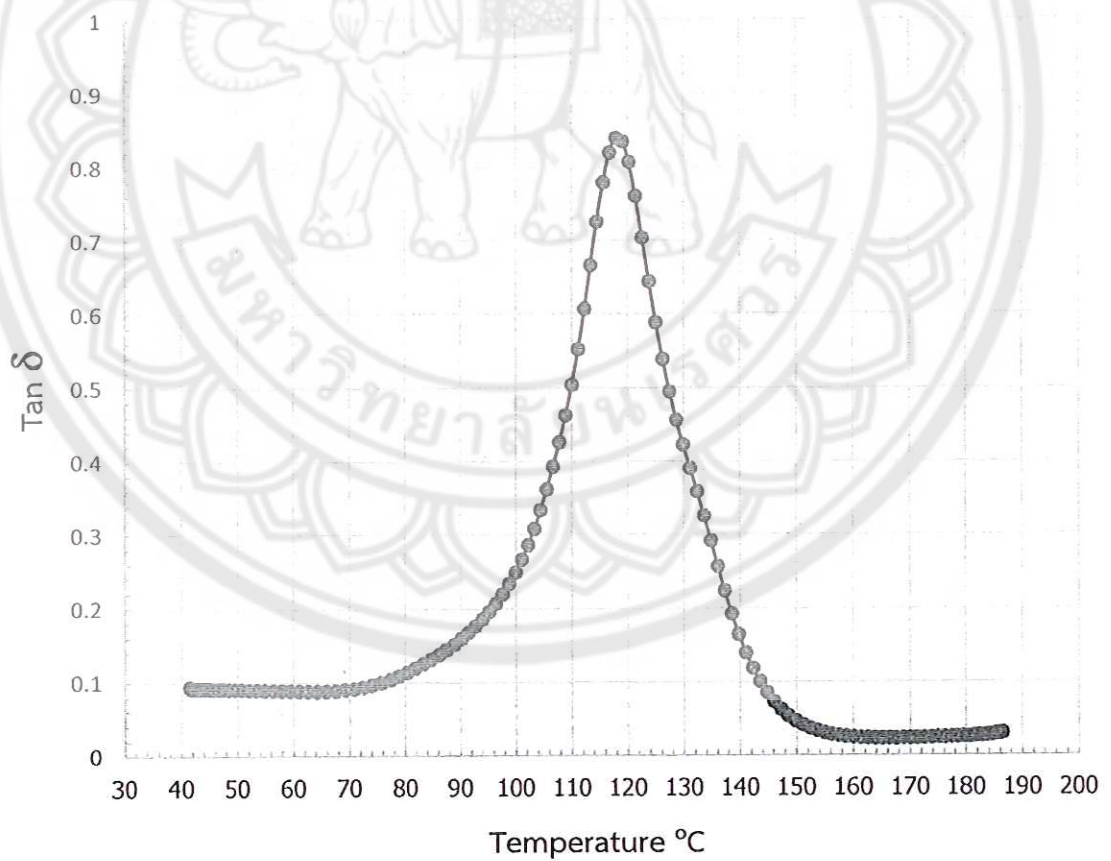
ผลการทดลองจากเครื่อง DMA จะได้ออกมาในรูปแบบของข้อมูล ของมอดูลัสสะสม (storage modulus), loss modulus และค่า  $\tan\delta$  ของชิ้นงานทดสอบ



รูปที่ 4.4.1 แสดงกราฟระหว่างค่า storage modulus กับอุณหภูมิ



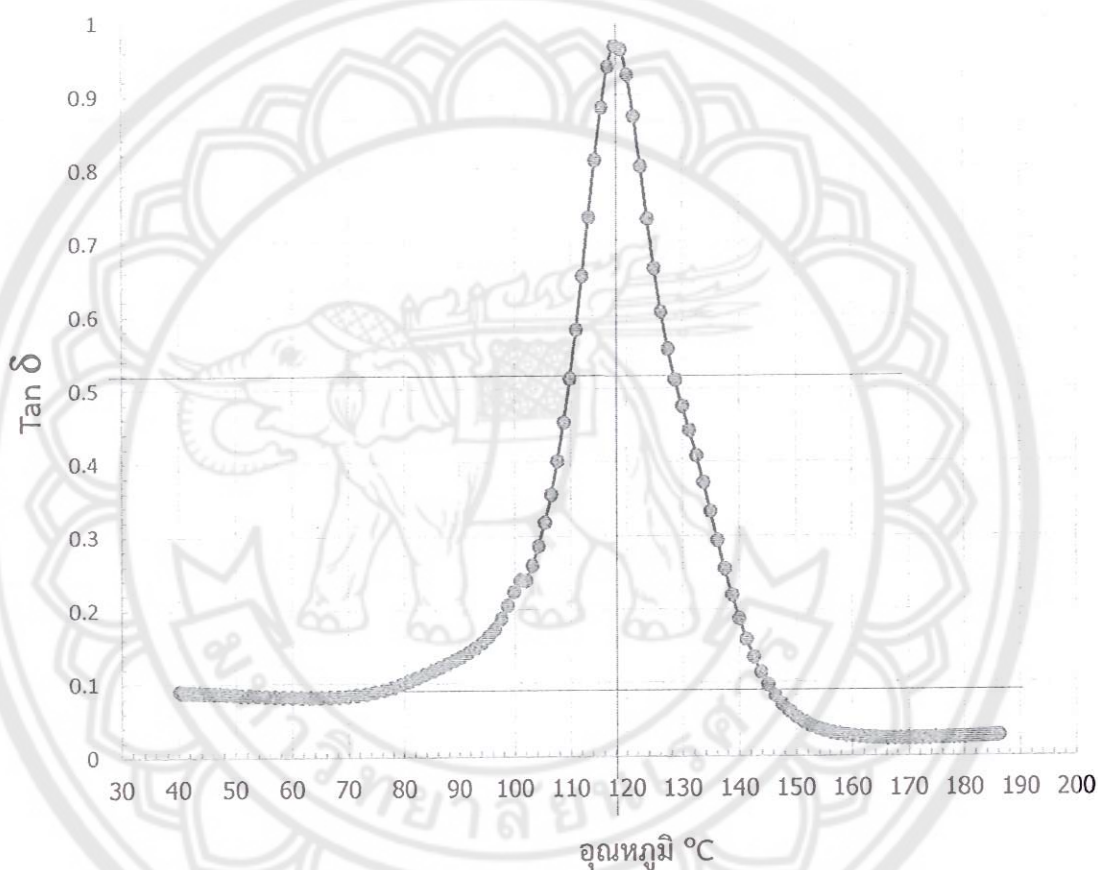
รูปที่ 4.4.2 แสดงกราฟระหว่างค่า loss modulus กับอุณหภูมิ



รูปที่ 4.4.3 แสดงกราฟระหว่างค่า Tan  $\delta$  กับอุณหภูมิ



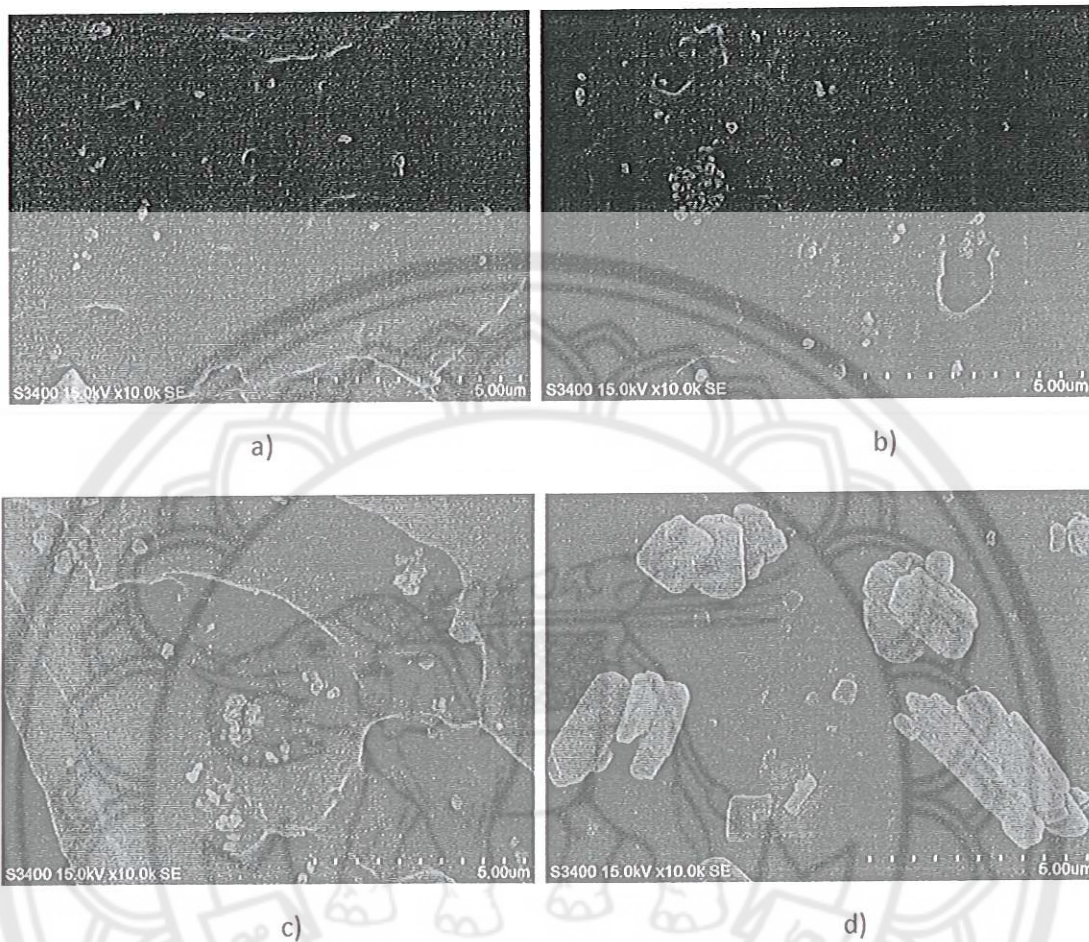
โดยสามารถได้ค่าอุณหภูมิคล้ายแก้ว  $T_g$  จากกราฟที่จุดพีคของ  $\tan\delta$  นอกจากนั้นยังสามารถระบุค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูงพีคของ  $\tan\delta$  ( $\Delta T$ ) เพื่อใช้ระบุความเป็นheterogeneous โดยถ้าค่านี้มีความกว้างมาก หมายความว่ามีความเป็น heterogeneous สูงต้องเวลา relaxation time มากขึ้นตัวอย่างการหาค่า  $\Delta T$  ดังแสดงในรูปที่



รูปที่ 4.4.4 แสดงค่า  $T_g$  และวิธีการคำนวณค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูงพีคของ  $\tan\delta$  ( $\Delta T$ )

ชิ้นงานทดสอบที่ทำการเติมวัสดุเสริมแรงจะมีค่า  $T_g$  ไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่ส่วนสูงของพีคที่แสดงถึงความเข้ากันได้มีค่าลดลงและมีค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูงพีคสูงขึ้นที่แสดงถึงความเป็นheterogeneous ที่มากขึ้นเมื่อปริมาณของวัสดุเสริมแรงเพิ่มขึ้น

#### 4.5 ผลจากเครื่อง Scanning Electron Microscopy (SEM)



รูปที่ 4.5.1 แสดงรูปการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด a) ซิลิกา ที่ความเข้มข้น 1wt% b)ซิลิกา ที่ความเข้มข้น 5wt% c) ซิลิกา ที่ความเข้มข้น 10wt% d) อลูมินา

รูปการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นว่าที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงสามารถกระจายตัวได้ดีในวัสดุเนื้อหลัก แต่เมื่อปริมาณของวัสดุเสริมแรงเพิ่มมากขึ้นจะเห็นการเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนของวัสดุเสริมแรง สอดคล้องกับผลการทดสอบทางกลที่มีค่าต่ำลงเมื่อปริมาณของสารเสริมแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการรวมตัวเป็นก้อนทำให้การเชื่อมต่อระหว่างวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรงไม่ดีและการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรงทำให้การดูดซึมน้ำสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติการใช้งานต่ำลง

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการวิจัยพบว่าการเติมวัสดุเสริมแรงช่วยเพิ่มสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งได้ด้วยปริมาณการเติมที่เหมาะสม ซึ่งอนุภาคของวัสดุเสริมจะช่วยในเรื่องของการเปลี่ยนเฟสที่เรียกว่าทรานสฟอร์มเมชันที่เฟนนิ่ง แต่ว่าการเติมวัสดุเสริมแรงในปริมาณที่มากเกินไปจะทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลง เนื่องจากปริมาณของอนุภาคที่มากเกินไปนั้น จะก่อให้เกิดรอยต่อระหว่างพื้นผิวที่มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้วัสดุมีความเปราะมากขึ้นทนต่อแรงดัดโค้งได้ต่ำลง ขนาดอนุภาควัสดุเสริมแรงมีผลที่ชัดเจนต่อการต้านทานแรงดัดโค้ง พบว่าที่ปริมาณวัสดุเสริมแรง 1%wt/ขนาดนาโนเมตรมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งเฉลี่ยมากกว่าขนาดไมโครเมตร เนื่องจากขนาดนาโนเมตรมีความหนาแน่นของการจัดเรียงตัวของอนุภาคดีกว่าขนาดไมโครเมตร จึงมีการรับแรงได้ดีกว่าขนาดไมโครเมตร แต่เมื่อพิจารณาที่ปริมาณการเติม 5%wt/ขนาดไมโครเมตรมีค่าการต้านทานแรงดัดโค้งดีกว่าขนาดนาโนเมตร เนื่องจากเหตุผลในด้านปริมาณการเติมที่เหมาะสม ซึ่งได้กล่าวไว้ข้างต้น

ส่วนการปรับสภาพผิวของวัสดุเสริมแรงด้วยไซเลนต่อสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งนั้นพบว่าเมื่อปรับผิวด้วยไซเลนทำให้ค่าการต้านทานแรงดัดโค้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญซึ่งขัดกับหลายๆงานวิจัยเช่น R. L. Bowen[23] กับ S. C. Bayne[24] ที่รายงานไว้ว่าเมื่อมีการปรับผิวด้วยไซเลนจะทำให้อนุภาคซึ่งเข้ากับพอลิเมอร์ได้ดี ให้เข้ากันได้ด้วยพันธะทางเคมี ซึ่งจะทำให้สมบัติทางกลของวัสดุดีขึ้น แต่จากผลการทดลองในงานนี้พบว่าสมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งด้อยลง อาจเป็นเพราะหมู่ OR ของไซเลนที่ควรจับกับหมู่ซิลานอลของอนุภาควัสดุเสริมแรงกลับจับกับไซเลนกันเองทำให้อนุภาควัสดุเสริมแรงเข้ากับพอลิเมอร์ไม่ได้และเกิดข้อบกพร่องในส่วนที่ไซเลนจับกันเอง การกระจายตัวของอนุภาคจึงกระจายได้ไม่ดีส่งผลให้สมบัติการต้านทานแรงดัดโค้งด้อยลง

การเติมวัสดุเสริมแรงมีผลช่วยเพิ่มความแข็งแรงที่ผิวของชิ้นงานทดสอบได้เมื่อเทียบกับซีฟันเทียมอะคริลิกที่ไม่มีการเติมวัสดุเสริมแรง อย่างไรก็ตามชนิดของวัสดุเสริมแรงให้ผลที่ไม่ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญโดยพบว่าอลูมิเนียมออกไซด์มีค่าความแข็งแรงผิวเฉลี่ยมากที่สุด ชิ้นงานทดสอบที่ทำการเติมวัสดุเสริมแรงจะมีค่าTgไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก แต่ส่วนสูงของพีคที่แสดงถึงความเข้ากันได้มีค่าลดลงและมีค่าความกว้างที่ครึ่งของความสูงพีคสูงขึ้นไปแสดงถึงความเป็นheterogeneousที่มากขึ้นเมื่อปริมาณของวัสดุเสริมแรงเพิ่มขึ้น

ที่ปริมาณความเข้มข้นต่ำการกระจายตัวของวัสดุเสริมแรงสามารถกระจายตัวได้ดีในวัสดุเนื้อหลัก แต่เมื่อปริมาณของวัสดุเสริมแรงเพิ่มมากขึ้นจะเห็นการเกาะรวมตัวกันเป็นก้อนของวัสดุเสริมแรง สอดคล้องกับผลการทดสอบทางกลที่มีค่าต่ำลงเมื่อปริมาณของสารเสริมแรงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการรวมตัวเป็นก้อนทำให้การเชื่อมต่อระหว่างวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรงไม่ดีและการเกิดช่องว่างระหว่างวัสดุเนื้อหลักและวัสดุเสริมแรง

ทำให้การดูดซึมน้ำสูงขึ้นส่งผลให้สมบัติการใช้งานต่ำลง และหลังจากผ่านการจำลองการใช้งานและการแช่  
ชิ้นงานทดสอบในน้ำเป็นเวลา3เดือน สมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบลดต่ำลงและสมบัติวิสโคอิลาสติกมีค่า  
เปลี่ยนไปเกิดจากการดูดซึมน้ำเข้าไปในชิ้นงานทำให้เกิดช่องว่างภายในซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงที่ต่ำลง  
อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงหลังจากผ่านการใช้งานไปแล้ว3 เดือนถึงแม้จะมีค่าลดลงแต่ยังคงผ่านมาตรฐาน  
การใช้งานของฟันเทียม



## เอกสารอ้างอิง

- [1] A.E. Stoia, C.Sinescu, M.Pielmusi, M.Enescu, A. Tudor and R. O.Rominu.(2011).Tensile Testing, A Method Used to Demonstrate The Effect of Organic Solvents on Acrylic Teeth Denture Base Resin Bond Strength. *Internation Journal ofBiology and Biomedical Engineering.*, Vol.5, pp.1.
- [2] X. Miao, M. Zhu, Y. Li, Q. Zhang and H. Wang.(2012).Synthesis of Dental Resins Using Diatomite and Nano-Sized SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub>.*Materials Lnternational.*, Vol. 22, No. 2,pp. 94-99.
- [3] Suzuki, S. Invitro wear of nano-composite denture teeth. *J Prosthodont* 2004;13(4): 238-43
- [4] F. Kawano, T. Ohguri, T. Ichikawa, I. Mizuno and A. Hasegawa.(2002).Shock Absorbability and Hardness of Commercially Available Denture Teeth.*TheInternation Journal of Prosthodontics.*, pp. 243-247.
- [5] P.Suwannaroop, P. Chaiareenont, N. Koottathape, H. Takahashi and M. Arksornnukit. (2011).In Vitro Wear Resistance,Hardness and Elastic Modulus of Artificial Denture Teeth. *Dental Material Journal.*,Vol. 30, No. 4, pp. 461-468.
- [6] S. A. Shahdad, J. F. McCabe, S. Bull, S. Rusby and R. W. Wassell. (2007). Hardness Measured With Traditional Vickers and Martens Hardness Methods. *Dental Material.*,pp. 1079-1085.
- [7] M.Vojdani, R. Bagheri and A. A. R. Khaledi. (2012)Effect of Aluminium Oxide Addition on The Flexural Strength, Surface Hardness, and Roughness of Heat-polymerized Acrylic Resin. *Journal of Dental Sciences.*,pp. 238-244.
- [8] F. Unalan and I. Dikbas.(2007). Effect of Mica and Glass on Surface Hardness of Acrylic Resin Teeth Material.*Dental Material Journal.*,Vol. 26, No. 4, pp.545-548.
- [9] M.K.Saritha. (2012). An in Vitro Study to Investigate The Flexural Strength of Conventional Heat Polymerised Denture Base Resin With Addition of Different Percentage ofAluminium Oxide Powder.*Asian Journal of Medical and Clinical Sciences.*

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [10] S.P.Samuel, S. Li, I. Mukherjee, Y. Guo, A. C. Patel, G. Baranand Y. Wei.(2009). Mechanical Properties of Experimental Dental Composites Containing a Combination of Mesoporous and Nonporous Spherical Silica as Fillers.*Dental Materials.*,Vol. 25,pp. 296–301.
- [11] H.Wang, Z. Meifang, Y. Li, Q. Zhang and H. Wang.(2011).Mechanical Properties of Dental Resin Composites by Co-filling Diatomite and Nanosized Silica Particles.*Materials Science and Engineering.*, Vol. 31, pp. 600–605.
- [12] C. Caeg,K. F. Leinfelder, W. R. LacefieldandW. Bell. (1990). Effectiveness of a Method Used In Bonding Resins to Metal. *J Prosthet Dent.*,Vol. 64, pp. 37-41.
- [13] K. B. May, J. Fox, M. E. RazzoogandB. R. Lang. (1995).Silane to Enhance The Bond between Polymethyl Methacrylate and Titanium. *J Prosthet Dent.*,Vol. 73, pp. 428-431.
- [14] ณิชจร ชูมา และภัทรพร ชูติเนตร.(2555).ศึกษาสมบัติเชิงกลของฐานฟันเทียมจากพอลิเมทิลเมทาคริเลต เสริมแรงด้วยเส้นใยแก้ว.มหาลัยนเรศวร, พิษณุโลก.
- [15] เจน รัตน์ไพศาล.(2533).พันธุวัสดุศาสตร์.(พิมพ์ครั้งที่สอง),กรุงเทพฯ: บริษัทสำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช จำกัด. กรุงเทพฯ, หน้า 385-387.
- [16] PolymethylMethacrylate. Material Safety Data Sheet. Bangs Laboratories, Inc. 9025 Technology Drive. Fishers. Indiana 46038.
- [17] Sideridou I., Tserki V., Papanastasiou G.Study of water sorption, solubility and modulus of elasticity of light-cured dimethacrylate-based dental resins. *Biomaterials* 24(2003) 655-665
- [18] Asaoka K., Hirano S. Diffusion coefficient of water through dental composite resin. *Biomaterials* 24(2003) 975-979
- [19]อนรรัตน์ ภูวานคำ.(2005).การพัฒนาวัสดุเชิงประกอบ อลูมินา-มุลไลต์-เซอร์โคเนีย สำหรับงานทางวิศวกรรม.มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา.
- [20] ชนิดา ศุภอมรกุล. (2008).ความต้านทานต่อการสึกของซีฟีนปลอมอะคริลิกเรซินชนิดต่างๆ, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [21] J. F. McCabe. *Applied Dental Materials 9 Edition*.Blackwell ISBN-13:978- 1-4051-3961-8.
- [22] Abdul S. Khan, Monisha J. Phillips, K. Elizabeth Tanner, Ferranti S. Wong. Comparison of the visco-elastic behavior of a pre-impregnated reinforced glass fiber composite with resin-based composite. *Dental Materials* 2008; 24:1534-1538.
- [23] R.L.Bowen.(1963). Properties of a Silica-reinforced Polymer for Dental Restoration. *J Am Dent Assoc.*, Vol. 66, pp. 57-64.
- [24] S. C. Bayne, M. S., Ph.D and F.A.D.M. (2005). Dental Biomaterials: Where are we and Where are we going. *J Dent Educ.*, Vol. 69, pp. 571-85.
- [25] D. Tabor. (2000). *The Hardness of Metals*. Oxford University Press.
- [26] พีรพงษ์ จันทร์พุ่ม. (2551). เซอร์โคเนียเซรามิก: เซรามิกทางเลือกสำหรับฟันเทียมบางส่วน ติดแน่นในฟันหลัง. ว.ทันต. ปีที่ 58 ฉบับที่ 1 ม.ค.-มี.ค.
- [27] Xia Y., Zhang F., Xie H., Gu N. Nanoparticle-reinforced resin-based dental composites. *J.Dentistry* 36 (2008) 450-455
- [28] Sideridou I., Tserki V., Papanastasiou G. Study of water sorption, solubility and modulus of elasticity of light-cured dimethacrylate-based dental resins. *Biomaterials* 24(2003) 655-665
- [29] Wang H., Zhu M., Li Y., Zhang Q., Wang H. Mechanical properties of dental resin composites by co-filling diatomite and nanosized silica particles. *Materials science and Engineering* C31 (2011) 600-605
- [30] Tu M. G., Liang W. M., Wu T.C., Chen S.Y. Improving the mechanical properties of fiber-reinforced acrylic denture-base resin. *Materials and Design* 30 (2009) 2468-2472
- [31] Vuorinen A.M., Dyer S.R., Lassila L.V.J., Vallittu P.K. Effect of rigid rod polymer filler on mechanical properties of poly-methyl methacrylate denture base material. *Dental Materials* 24(2008) 708-713

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [32] Asaoka K., Hirano S. Diffusion coefficient of water through dental composite resin.  
*Biomaterials* 24(2003) 975-979
- [33] Ellakwa A., Cho N., Lee I.B. The effect of resin matrix composition on the polymerization shrinkage and rheological properties of experimental dental composites. *Dental Materials* 23(2007)1229-1235
- [34] Mesquita R.V., Axmann D., Gerstorfer G.J. Dynamic visco-elastic properties of dental composite resins. *Dental Materials* (2006)22, 258-267
- [35] Joel R. Fried; *Polymer Science And Technology* 2<sup>nd</sup> ed. Pearson Education, Inc., U.S.A.(2003)
- [36] Council on Dental Material and Device : *Guide to Dental Materials and Devices*, 210 p., American Dental Association, sixth edition, 1972-1973