บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

บทนี้นำเสนอผลการตรวจสอบชิ้นงานที่เตรียมได้ พร้อมทั้งทำการอภิปรายผลโดยเริ่มจาก การนำเสนอผลการตรวจสอบเฟสของสารตั้งดื่น ผลการประดิษฐ์พอร์ซเลนเซรามิกนาโน กอมโพสิต ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ โครงสร้างจุลภากและสมบัติทางกล ตามลำคับ

4.1 ผลการตรวจสอบเฟสของสารตั้งต้นด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

จากการตรวจสอบเฟสของสารตั้งต้นที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ผงพอร์ซเลนทันตกรรม และอะลูมินา (Al₂O₃) ขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรและระดับไมโครเมตร ด้วยเทกนิก XRD พบว่า ได้ผลดังแสดงในรูป 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ



ร**ูป 4.1** X-ray diffraction pattern ของผงพอร์ซเลนทางทันตกรรมที่นำมาใช้เปรียบเทียบกับ ฐานข้อมูล NaAlSi₃O₈ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0415, Al₂O₃ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 10-0414 และ KAlSi₂O₆ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 85-1626 ตามลำคับ

จากรูป 4.1 พบว่า X-ray diffraction pattern ของผงพอร์ซเลนทางทันตกรรมมีความ สอดกล้องกับฐานข้อมูลของสาร 3 ชนิด คือ sodium aluminum silicate ซึ่งมีสูตรเป็น NaAISi₃O₈ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 03-0415 โดยมีโครงสร้างของเฟสเป็นแบบ triclinic ผสมอยู่กับ บีตาอะลูมินาซึ่งมีสูตรเป็น AI₂O₃ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 10-0414 ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบ hexagonal และ potassium aluminum silicate ที่มีสูตรเป็น KAISi₂O₈ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 85-1626 โดยมีโครงสร้างของเฟสเป็นแบบ tetragonal จากข้อมูลที่แสดงในตาราง 2.1 และ X-ray diffraction pattern ขององก์ประกอบต่าง ๆ ของผงพอร์ซเลน จะเห็นได้ว่า SiO₂ เป็น ส่วนประกอบที่มีปริมาณมากที่สุด ซึ่งจากข้อมูลข้างต้นนี้สามารถดาดคะเนการเกิดเฟสใน โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกได้ว่า จะประกอบด้วยเฟสของ SiO₂ เป็นส่วนใหญ่ที่อยู่ในรูปของเฟส ของแก้ว สังเกตได้จาก X-ray diffraction pattern ที่มีความคมชัดของพีกต่ำ (รูป 4.1) ซึ่งจะเป็นผลดี ต่อสมบัติทางกายภาพ เนื่องจากมีความโปร่งแสงสูง เพราะดัชนีหักเหของเฟสของแก้วที่เกิดขึ้นมัก มีก่าใกล้เกียงกับดัชนีหักเหของแก้ว (1.5) [11] แต่อาจส่งผลทำให้สมบัติทางกลแย่ลงเนื่องจากเฟส ของแก้วมีความแข็งแรงน้อยกว่าเฟสที่เป็นผลึกและจากรูปก็จะพบว่ามีเฟสที่เป็นผลึกปนอยู่บ้าง เล็กน้อยเท่านั้น [41]

จากรูป 4.2 (a) จะเห็นได้ว่า X-ray diffraction pattern ของอะลูมินาขนาดอนุภาคระดับ นาโนเมตรที่นำมาใช้ในการเสริมแรงมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 10-0425 ของแกมมาอะลูมินาในระบบ cubic และรูป 4.2 (b) X-ray diffraction pattern ของอะลูมินา ขนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรมีความสอดคล้องเป็นอย่างดีกับแฟ้มข้อมูลหมายเลข 10-0173 ของ แอลฟาอะลูมินาในระบบ rhombohedral จาก X-ray diffraction pattern สามารถนำข้อมูลมาใช้ คำนวณหาขนาดของผลึกอะลูมินาได้โดยอาศัยสมการของ Scherrer (สมการ 3.1) ซึ่งจากการ คำนวณพบว่าอนุภาคอะลูมินาที่ใช้มีขนาดผลึกประมาณ 21 นาโนเมตร และ 8.55 ไมโครเมตร ตามลำดับ

Copyright[©] by Chiang Mai University All rights reserved



ลิขสิทธิ์มหาวิทย[ุ]งาลัยเชียงไหม

ร**ูป 4.2** ผลการตรวจสอบอนุภาคผงอะลูมินา (Al₂O₃) ที่นำมาใช้ในการเสริมแรง (a) อนุภาคอะลูมินา ขนาคนาโนเมตรเปรียบเทียบกับ X-ray diffraction pattern จากแฟ้มข้อมูลของอะลูมินา JCPDS หมายเลข 10-0425 และ (b) อนุภาคอะลูมินาขนาคไมโครเมตรเปรียบเทียบกับ X-ray diffraction pattern จากแฟ้มข้อมูลของอะลูมินา JCPDS หมายเลข 10-0173 ตามลำคับ จากนั้นได้ทำการตรวจสอบพฤติกรรมการแจกแจงของขนาดอนุภาค (particle size distribution analysis) ของอะลูมินาขนาดไมโครเมตรและขนาดนาโนเมตรด้วยเครื่อง particle size analyzer ได้ผลดังแสดงในรูป 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณารูป 4.3 พบว่าผงอะลูมินามี พฤติกรรมการแจกแจงของขนาดอนุภาคที่ดี (มีพีคเดียว) โดยมีขนาดของอนุภาคอยู่ในช่วงประมาณ 6 – 10 ไมโครเมตร ซึ่งถือได้ว่าเป็นช่วงของขนาดอนุภาคที่แคบเมื่อเทียบกับพฤติกรรมการกระจาย ตัวของอะลูมินาขนาดนาโนเมตร ดังรูป 4.4 แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของผงอะลูมินานั้นเกาะกันเป็น กลุ่มก้อน (agglomeration) อยู่หลายช่วงขนาด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงที่ขนาดเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตร จากพฤติกรรมการกระจายตัวของอนุภาคขนาดประมาณ 0.04 ไมโครเมตร มีความถี่สูง ที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดของเครื่องมือที่ไม่สามารถทำการตรวจวัดขนาดอนุภาคที่อยู่ในระดับ นาโนเมตรได้อย่างแม่นยำนั่นเอง



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Copyright[©] by Chiang Mai University All rights reserved



รูป 4.4 พฤติกรรมการแจกแจงขนาดอนุภาคของผงอะลูมินาขนาดนาโนเมตร

เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM ของผงอะลูมินาทั้งสองขนาด แสดงดังรูป 4.5 และ 4.6 พบว่า อะลูมินาขนาด ไม โครเมตรมีขนาดอนุภาคประมาณ 5 – 15 ไม โครเมตร และมีความหนาประมาณ 1 – 4 ไม โครเมตร ส่วนอะลูมินาขนาดนาโนเมตรนั้น ไม่สามารถบอกขนาดที่แท้จริงของอนุภาคได้ เนื่องจากผงอะลูมินาเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อน ซึ่งเป็นธรรมชาติของอนุภาคระดับนาโนเมตร เพื่อลดพลังงานพื้นผิว (surface energy) อันเนื่องมาจากพื้นที่ผิวที่มากเกินไป [50] แต่ขนาดของกลุ่ม ก้อนนั้นก็ยังกงอยู่ในเรือนนาโนเมตร



รูป 4.5 ภาพถ่าย SEM ของผงอะลูมินาขนาดไมโครเมตร

ີລິບສີກອິ Copyrigh AII r



<mark>อใหม่</mark> versity v e d

ร**ูป 4.6** ภาพถ่าย SEM ของผงอะลูมินาขนาคนาโนเมตร

ตาราง 4.1 ผลการตรวจสอบขนาดอนุภากของผงอะลูมินาด้วยเทคนิกต่าง ๆ						
เทกนิกการตรวจสอบ	อนุภาคอะลูมินา ขนาดนาโนเมตร (นาโนเมตร)	อนุภาคอะลูมินา ขนาดไมโกรเมตร (ไมโครเมตร)				
ระบุโดยผู้ผลิต	10	7 - 15				
XRD	21	8.55				
Particle size analysis	< 100	6 - 10				
SEM	50 - 100	5-15				

จากการตรวจสอบขนาดอนุภากของอะลูมินาด้วยเทกนิกต่าง ๆ ดังที่กล่าวมานั้น แสดงได้ ดังตาราง 4.1

จากตาราง 4.1 พบว่าผลการตรวจสอบขนาดอนุภากที่ได้จากเทคนิคต่างกันจะมีค่าแตกต่าง กันไปบ้างแต่ก็ยังคงอย่ภายในช่วงของขนาดที่ใกล้เคียงกัน โดยค่าที่ได้จาก Scherrer's equation นั้น เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณจาก X-ray diffraction pattern ซึ่งเป็นขนาดของผลึกบางผลึกเท่านั้น แต่ ้ ค่าที่ได้จากเครื่อง Particle size analyzer นั้นเป็นการบอกขนาดของอนุภาคหรือกลุ่มกระจุกอนุภาค ได้เป็นช่วงการกระจายตัวเชิงสถิติ ในขณะที่การตรวจสอบขนาคอนุภาคจากเทคนิค SEM นั้นอาศัย การเทียบแถบวัด (scale bar) กับภาพถ่าย 2 มิติ เป็นตัวบอกขนาคอนุภาค โดยประมาณ

4.2 ผลการประดิษฐ์พอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต

เมื่อนำผงสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมได้ในหัวข้อ 4.1 มาทำการขึ้นรูปและเผาซินเทอร์ภายใต้ เงื่อนไขดังรายละเอียดแสดงในตาราง 3.3 จะได้ชิ้นงานพอร์ซเลนเซรามิกดังแสดงในรูป 4.7 ถึง 4.9



รูป 4.7 พอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต (a) สูตร D (b) สูตร D(An₅) (c) สูตร D(An_{2,5})(Am_{2,5}) และ (d) สูตร D(Am₅)



ร**ูป 4.8** พอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต (a) สูตร D(An₁₀) (b) สูตร D(An₅)(Am₅) และ (c) สูตร D(Am₁₀)



ร**ูป 4.9** พอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต (a) สูตร D(An₁₅) (b) สูตร D(An_{7.5})(Am_{7.5}) และ (c) สูตร D(Am₁₅)

จากรูป 4.7 ถึง 4.9 จะเห็นได้ว่าพอร์ซเลนเซรามิกที่เตรียมได้มีสีขาวขุ่น ผิวชิ้นงานมีความ มันวาวเนื่องมาจากองก์ประกอบส่วนใหญ่เป็นเฟสของแก้ว [41] นอกจากนี้ยังพบอีกว่าผิวของ ชิ้นงานมีความขรุขระมากขึ้นตามปริมาณของอนุภาคอะลูมินาที่เติมลงไป เนื่องจากอนุภาคของ อะลูมินานั้นไปก่อให้เกิดความเค้นดึงเชิงรัศมี (radial tensile stress) ในเฟสของแก้ว ส่งผลให้รอย แตกในเนื้อแก้วเคลื่อนที่ไปตามขอบอนุภาคอะลูมินาเพื่อลดความเค้นดังกล่าว [51] แสดงดังรูป 4.10



รูป 4.10 แผนภาพการเคลื่อนที่ของรอยแตกในเฟสเมทริกซ์ที่เป็นแก้วของวัสคุคอมโพสิต [51]



จากนั้นนำพอร์ซเลนเซรามิกที่มีสัดส่วนองค์ประกอบต่าง ๆ ตรวจสอบอีกครั้งด้วยเทคนิค XRD แสดงดังรูป 4.10

ร**ูป 4.11** X-ray diffraction pattern ของพอร์ซเลนเซรามิกสูตรต่าง ๆ โดยที่ (a) D, (b) D(An₅), (c) $D(An_{2.5})(Am_{2.5})$, (d) $D(Am_5)$, (e) $D(An_{10})$, (f) $D(An_5)(Am_5)$, (g) $D(Am_{10})$, (h) $D(An_{15})$, (i) $D(An_{7.5})(Am_{7.5})$ และ (j) $D(Am_{15})$ เมื่อ •= ลูไซท์

เมื่อพิจารณา X-ray diffraction pattern ของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิตพบว่ามี ความสอดคล้องกับข้อมูลของผงพอร์ซเลนทันตกรรมโดยไม่พบพีคของอะลูมินาทั้งสองช่วงขนาด อนุภาคที่ใช้ในการเสริมแรงซึ่งคาดว่าเนื่องจากปริมาณอะลูมินาที่เติมลงไปมีน้อยกว่าร้อยละ 5 โดย น้ำหนัก [38] จะมีก็แต่พีคของลูไซท์(•) เท่านั้น (พีคที่มีความเข้มสูงที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งค่า 20 เป็น 16.48, 25.90 และ 27.30) ที่ตรวจพบว่าปะปนอยู่กับพีกของพอร์ซเลนโดยมีความสอดกล้องกับ ข้อมูลสารลูไซท์ สูตร KAISi₂O₆ ในแฟ้มข้อมูล JCPDS หมายเลข 85-1626 ซึ่งมีโครงสร้างแบบ tetragonal ทั้งนี้ จากรูป 2.1 จะเห็นได้ว่าลูไซท์จะเริ่มเกิดการฟอร์มตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า 990°ซ และ หากอัตราการลงของอุณหภูมิในการเผาซินเทอร์ต่ำปริมาณผลึกของลูไซท์ก็จะเพิ่มมากขึ้น [52] แต่ ในการทดลองนี้เลือกใช้อัตราการลงของอุณหภูมิซินเทอร์ที่ก่อนข้างสูง [36] เหมือนกับการทำ พอร์ซเลนเซรามิกในอุตสาหกรรม

4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต

เมื่อนำชิ้นงานพอร์ซเลนเซรามิกที่เตรียมได้มาตรวจสอบสมบัติทางกายภาพโดยทำการ ตรวจวัดก่ากวามหนาแน่น ค่าการหดตัวหลังเผา ก่ากวามพรุนทั้งหมด และผ่านการวิเกราะห์ทาง สถิติ พบว่าได้ผลแสดงดังตาราง 4.2

TE		สมบัติทางกายภาพ			
เซรามิกสูตร	ความหนาแน่น	ความหดตัว	ความพรุน		
	(g/cm ³)	(%)	(%)		
D	2.37 ± 0.01	15.75 ± 0.50	6.54 ± 1.36		
D(An ₅)	2.38 ± 0.01	16.11 ± 0.51	6.42 ± 1.22		
D(An _{2.5})(Am _{2.5})	2.37 ± 0.01	15.79 ± 0.48	5.84 ± 0.89		
D(Am ₅)	2.40 ± 0.03	15.64 ± 0.25	6.75 ± 0.91		
D(An ₁₀)	2.39 ± 0.01	18.18 ± 0.41	7.51 ± 1.35		
$D(An_5)(Am_5)$	2.40 ± 0.01	17.27 ± 0.28	5.43 ± 1.20		
D(Am ₁₀)	2.40 ± 0.02	16.03 ± 0.32	6.59 ± 0.91		
D(An ₁₅)	2.43 ± 0.01	22.04 ± 0.33	5.25 ± 1.19		
D(An _{7.5})(Am _{7.5})	2.40 ± 0.01	16.64 ± 0.42	5.53 ± 1.28		
D(Am ₁₅)	2.41 ± 0.03	17.22 ± 0.38	5.84 ± 1.34		

ตาราง 4.2 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต

จากการตรวจสอบความหนาแน่นพบว่า เซรามิกทั้ง 10 สูตร มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่า ความหนาแน่นอยู่ในช่วง 2.37 – 2.43 g/cm³ เมื่อเทียบกับค่าความหนาแน่นของเซรามิกที่ระบุโดย บริษัท คือ 2.4 g/cm³ [36] ซึ่งจะเห็นได้ว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาซินเทอร์เป็นช่วงอุณหภูมิ เหมาะสมที่ทำให้พอร์ซเลนเซรามิกสุกตัวอย่างทั่วถึง เนื่องจากเซรามิกที่ได้มีค่าความหนาแน่น ใกล้เคียงกับที่ผู้ผลิตระบุไว้

สำหรับค่าความหคตัวของพอร์ซเลนเซรามิกนั้นมีค่าอยู่ใน ช่วง 15.75 – 18.44% ยกเว้น สูตร D(An₁₅) ซึ่งมีการหคตัวสูงถึง 22.04% เป็นผลเนื่องมาจากปริมาณของอนุภาคอะลูมินาขนาคนา โนที่เติมลงไป ทั้งนี้เพราะอนุภาคอะลูมินาขนาคเล็กสามารถเข้าไปแทรกตัวระหว่างอนุภาคของ พอร์ซเลนได้เป็นอย่างดี จึงทำให้เกิดความแน่นตัว (compaction) ที่สูงมากขึ้น และมีขนาคหลังการ เผาที่หคเล็กลงอย่างเห็นได้ชัด [34] ดังแสดงในรูป 4.9

นอกจากนี้เซรามิกทั้ง 10 สูตร ยังมีค่าความพรุนที่ใกล้เคียงกันมากแม้จะมีการเติมอนุภาค ของอะลูมินาลงไปในปริมาณที่ต่างกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 5.25 – 8.25 ซึ่งกาดว่าเป็นผลมา จากการเลือกใช้เงื่อนไขการเผาที่เหมาะสม กล่าวคือ จากการศึกษาของ Cheung และ Darvell [16] รายงานว่าปริมาณรูพรุนของพอร์ซเลนเซรามิกจะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิซินเทอร์ให้สูงมากขึ้น หรือ อาจกล่าวได้ว่าสูงกว่าอุณหภูมิซินเทอร์ที่ผู้ผลิตแนะนำ [36] ซึ่งอุณหภูมิซินเทอร์มีผลต่อปริมาณของ รูพรุนมากกว่าเวลาในการเผาซินเทอร์ นอกจากนี้ยังพบอีกว่าหากเพิ่มระยะเวลาในการเผาซินเทอร์ ให้นานขึ้นจะยิ่งทำให้รูพรุนเพิ่มมากขึ้นอีกด้วย

4.4 ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต

จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิตที่มีความ หนาแน่นสูงที่สุดของทุกสูตรด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าได้ผลดังแสดง ในรูป 4.12 และ 4.14 – 4.16 เมื่อพิจารฉาเซรามิกสูตร D (สูตรที่ 1) ซึ่งเป็นพอร์ซเลนเซรามิก บริสุทธิ์ (รูป 4.12) พบว่าเนื้อเซรามิกส่วนใหญ่เป็นเฟสของแก้ว ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นผิวเรียบ และมี อนุภาคขนาดประมาณ 1 – 2 ไมโครเมตร กระจายอยู่บนผิวหน้าบางบริเวณ ซึ่งกาดว่าเป็นเฟสของ Al₂O₃ และ KAlSi₃O₆ จากผลการตรวจสอบองก์ประกอบทางเคมีด้วยวิธี Energy Dispersive X-Ray (EDX) ดังรูป 4.13 ทำให้ทราบว่าบริเวณตำแหน่งที่แสดงด้วยสัญลักษณ์ A นั้นประกอบด้วยธาตุ อะลูมิเนียม (Al) ออกซิเจน (O) โพแทสเซียม (K) และซิลิกอน (Si) ซึ่งกาดว่าเป็นผลึกของ Al₂O₃ และ KAlSi₃O₆ ทั้งนี้สามารถตรวจสอบโครงสร้างของผลึกเหล่านี้ได้จาก X-ray diffraction pattern ของพอร์ซเลนเซรามิกในหัวข้อ 4.2 ส่วนบริเวณเรียบ ๆ ที่แสดงด้วยสัญลักษณ์ B นั้นพบว่าเป็นเฟส ของแก้ว ซึ่งถือว่าเป็นเฟสส่วนใหญ่ในโครงสร้างของพอร์ซเลนเซรามิกซึ่งมี SiO₂ เป็นองก์ประกอบ หลัก เมื่อพิจารณาชิ้นงานพอร์ซเลนเซรามิกกลุ่มที่ 1 ที่เติมอนุภาคอะลูมินาขนาดไมโครเมตรลงไป ร้อยละ 5 (D(Am₃)), 10 (D(Am₁₀)) และ 15 (D(Am₁₅))โดยปริมาตร ตามถำดับ (รูป 4.14) พบว่ามีอยู่ 2 เฟสหลัก คือเฟสที่เป็นแก้วและอนุภาคอะลูมินาซึ่งมีโครงสร้างผลึกแบบ rhombohedral ขนาด ประมาณ 5 – 7 ไมโครเมตร การกระจายตัวของผลึกอะลูมินาเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ แต่การวางตัว ของผลึก (orientation) อะลูมินามีความแตกต่างกันซึ่งคาดว่าแปรผันตามปริมาณอะลูมินาที่เติมลง ไป กล่าวคือ จากรูป 4.14 (a) เซรามิกสูตร D(Am₅) พบว่าการวางด้วของผลึกอะลูมินาเป็นไปอย่าง สุ่ม ส่วนรูป 4.14 (b) เซรามิกสูตร D(Am₅) พบว่าการวางด้วของผลึกอะลูมินาเป็นไปอย่าง สุ่ม ส่วนรูป 4.14 (b) เซรามิกสูตร D(Am₁₀) และ (c) เซรามิกสูตร D(Am₁₅) พบว่าการวางตัวของ ผลึกอะลูมินามีทิศทางที่คล้ายกลึงกัน (preferred orientation) คาดว่าเนื่องมาจากผลึกอะลูมินาที่มี ปริมาณเพิ่มมากขึ้น เมื่ออะลูมินาได้รับความร้อนในระหว่างการเผาซินเทอร์ก็จะทำให้การวางตัว ของผลึกเป็นไปในทิศทางที่คล้ายกลึงกันเพื่อให้ทุก ๆ ผลึกสามารถอยู่รวมกันได้โดยไม่ทำให้ ขึ้นงานเซรามิกเสียรูปร่างไป นอกจากนี้ยังพบอีกว่าความขรุงระของผิวหน้าชิ้นงานนั้นเป็นผลมา จากอนุภาคอะลูมินาและเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณของอะลูมินาที่เติมลงไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งสูตร D(Am₁,) ซึ่งสอดกล้องกับผลการประดิษฐ์พอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิตในหัวข้อ 4.2

เมื่อพิจารณารูป 4.15 ซึ่งเป็นภาพถ่าย SEM ของบริเวณผิวหน้าพอร์ซเลนเซรามิกกลุ่มที่ 2 ซึ่งมีการเติมอนุภาคอะลูมินาขนาคนาโนเมตรลงไปร้อยละ 5 (D(An,)), 10 (D(An,)) และ 15 (D(An,,))โดยปริมาตร ตามลำดับ พบว่าอะลูมินามีลักษณะการกระจายตัวกล้ายกลึงกับที่พบในกลุ่ม ที่ 1 นั่นคือ อนุภาคอะลูมินาขนาดนาโนเมตรมีการกระจายตัวก่อนข้างสม่ำเสมอในเนื้อแก้ว จะมี บ้างที่รวมตัวกันอยู่เป็นกลุ่มกระจุก เมื่อพิจารณาภาพถ่าย SEM ประกอบกับข้อมูลการตรวจสอบ ้สมบัติทางกายภาพที่ได้กล่าวมาในหัวข้อ 4.3 แล้วพบว่าการกระจุกตัวของอะลูมินามีความสัมพันธ์ กับการหดตัวของชิ้นงานที่มีปริมาณอะลูมินาขนาดนาโนเมตรร้อยละ 15 โดยปริมาตร อย่างเด่นชัด เนื่องจากมีการกระจุกตัวของอะถูมินามากขึ้นเรื่อย ๆ ตามปริมาณที่เติมถงไปนั่นเอง เมื่อ เปรียบเทียบรูป 4.14 และ 4.15 จะพบความแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดซึ่งคาดว่าเป็นผลมาจากการ เลือกใช้ขนาดและรูปร่างของอะลูมินาที่แตกต่างกันในการนำมาเสริมแรงนั่นเอง จากรูป 4.14 จะ พบว่าอนุภาคของอะลูมินามีลักษณะเป็นแผ่น สอคคล้องกับภาพถ่าย SEM (รูป 4.5) ของอนุภาค อะลูมินาขนาดไมโครเมตรที่นำมาใช้โดยมีการกระจายตัวอยู่ภายในเนื้อแก้วอย่างสม่ำเสมอ ในขณะ ที่ รูป 4.15 พบว่าอนุภาคอะลูมินาขนาดนาโนเมตรมีลักษณะเป็นเม็ดกลม กระจุกตัวกันอยู่และแยก ออกจากเนื้อแก้วอย่างเห็นได้ชัด (รูป 4.15 (a)) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณอะลูมินาขนาดนาโนเมตรเป็น ร้อยละ 15 โดยปริมาตร (รูป 4.15 (c)) พบว่าแนวโน้มการกระจายตัวของอนุภากอะลูมินามีความ คล้ายคลึงกับ รูป 4.14 (a) มากขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะ โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานเซรามิกกลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นการผสมระหว่าง ผงอะลูมินาขนาคนาโนเมตรและ ไมโครเมตรในอัตราส่วน 1:1 คังรูป 4.16 พบว่ามีลักษณะแตกต่าง จากสองกลุ่มที่กล่าวมาแล้ว คาคว่าเป็นผลเนื่องจากขนาคของอนุภาคอะลูมินา จากรูป 4.16 (a)

พบว่าอนุภาคขนาคไมโครเมตรและนาโนเมตรแยกกันอยู่อย่างเห็นได้ชัด ไม่มีการเชื่อมต่อระหว่าง ้ผิวของอะลูมินาทั้งสองขนาดปรากฏให้เห็น โดยอะลูมินาขนาดนาโนเมตรกระจายตัวอยู่อย่าง ้สม่ำเสมอในเนื้อแก้วซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวของอนุภาคขนาคนาโนเมตรที่สามารถกระจายตัวได้คื เนื่องจากมีขนาดเล็ก [9] ส่วนอะลูมินาขนาดอนุภากระดับไม โกรเมตรเกาะกันอยู่อย่างหลวม ๆ และ การกระจายตัวไม่เป็นไปอย่างสม่ำเสมอเท่าไรนัก เมื่อพิจารณารูป 14.6 (a) เทียบกับ 14.6 (b) จะ พบว่ามีลักษณะการกระจายตัวของอะลูมินาที่คล้ายคลึงกัน แต่แตกต่างกันที่ปริมาณของอะลูมินา กล่าวคือ หากเปรียบเทียบอัตราส่วนของอะลูมินาขนาดไมโครเมตรเทียบกับขนาดของภาพถ่ายทั้ง สอง จะพบว่า รูป 14.6 (a) มีอนุภาคขนาดใมโครเมตรอยู่เพียงร้อยละ10 ของรูปเท่านั้น แต่จากรูป 14.6 (b) พบว่ามีอนุภาคขนาดไมโครเมตรมากกว่าร้อยละ 25 ของรูป ซึ่งคาดว่าปริมาณของอะลูมินา ้งนาดอนุภาคระดับไมโครเมตรและนาโนเมตรที่เพิ่มนี้จะส่งผลให้ความแข็งแรงและความต้านทาน ต่อรอยแยกเพิ่มขึ้น เนื่องจากอนภาคขนาดไมโครเมตรจะเข้าไปเป็นเฟสเสริมแรง ทำให้เนื้อแก้วมี ้ความแข็งแรงมากขึ้น นอกจากนี้อนุภากขนาคนาโนเมตรซึ่งกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในเนื้อแก้วก็ ้จะช่วยเพิ่มความต้านทานต่อรอยแยกให้กับชิ้นงานเซรามิก [9] จากรูป 4.16 (c) จะพบว่าการกระจาย ้ตัวของอะถูมินาแตกต่างจากรูป 4.16 (a) และ (b) อย่างเห็นได้ชัด กล่าวคือ อนุภาคขนาคนาโนเมตร ้ของอะลูมินาจะเกาะอยู่ที่ผิวของอนุภาคขนาดไม โครเมตร คาดว่าเนื่องมาจากแรงยึคเหนี่ยว (cohesive force) ระหว่างอนุภาคอะลูมินามีมากกว่าแรงยึคเหนี่ยวระหว่างอะลูมินากับเนื้อแก้ว จึง ทำให้อะถูมินาทั้งสองขนาคอนุภากมีแนวโน้มที่จะเกาะกันอยู่และเกิคการสานเป็นโครงสร้างที่มี อะลูมินาขนาคไมโครเมตรเป็นโครงสร้างหลักและอนุภาคขนาคนาโนเมตรเป็นสะพานเชื่อม ระหว่างอะลูมินาขนาดไมโครเมตร ด้วยขนาดอนุภากอะลูมินาที่แตกต่างกัน (bimodal distribution) ้จึงทำให้เกิคความแน่นตัว (compaction) สูงขึ้นด้วยการลคช่องว่าง (void) และการจัดเรียงตัวกันใหม่ ของอนุภาคเพื่อเติมเต็มช่องว่างเหล่านี้ โดยกระบวนการการไหลแบบพลาสติก (plastic flow) [31] ทำให้เซรามิกมีความหนาแน่นสูง การหคตัวและปริมาณรูพรุนน้อยเมื่อเทียบกับเซรามิกสูตรอื่น ๆ

เมื่อพิจารณารูป 14.4 ถึง 14.6 เปรียบเทียบกับแบบจำลองเซรามิกนาโนคอมโพสิตของ Kuntz [9] และ Niibara [23] พบว่าหากใช้เฟสเมทริกซ์เป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่ม ชิ้นงานเซรามิกที่ ประดิษฐ์ได้ในการทดลองนี้ไม่สามารถจัดแบ่งอยู่ในกลุ่มใดได้เลยเนื่องจากเฟสเมทริกซ์นั้นเป็น แก้วจึงไม่มีขอบเกรน แต่หากใช้เฟสเสริมแรงเป็นเกณฑ์และอนุมานว่าเฟสของแก้วมีเกรนขนาคเล็ก มากในเรือนนาโน ก็อาจจัดให้ชิ้นงานเซรามิกที่เตรียมได้อยู่ในกลุ่มของแบบจำลองประเภท นาโน-ไมโคร คอมโพสิต (nano-micro composites)



ร**ูป 4.12** ภาพถ่าย SEM ของพอร์ซเลนเซรามิกสูตร 1 (D) ที่ใช้ในการตรวจสอบองค์ประกอบทาง เคมีด้วยเทคนิค EDX (กำลังขยาย 9500 เท่า)





รูป 4.14 ภาพถ่าย SEM ของ (a) D(Am5), (b) D(Am10) และ (c) D(Am15)



รูป 4.15 ภาพถ่าย SEM ของ (a) D(An₅), (b) D(An₁₀) และ (c) D(An₁₅)



รูป 4.16 ภาพถ่าย SEM ของ (a) D(An2.5)(Am2.5), (b) D(An5)(Am5) และ (c) D(An7.5)(Am7.5)

4.5 การตรวจสอบสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต

จากการทดสอบสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิตทั้ง 10 สูตร ที่เตรียม ได้โดยการนำมาหาก่ากวามแข็งในหน่วยวิกเกอร์ (H_v) ค่ามอดูลัสของยัง (E) ก่ากวามต้านทานต่อ รอยแยก (K_{Ic}) ด้วยวิธีการกด (indentation) ด้วยหัวกดนูปและวิกเกอร์ และหาก่ากวามทนแรงคัด โด้งด้วยการกดแบบ 3 จุด (M) พบว่าได้ผลดังแสดงในตาราง 4.3

เซรามิกสูตร —	สมบัติทางกล			
	H _v (GPa)	E (GPa)	K_{IC} (MPa.m ^{1/2})	M (MPa)
D	3.22 ± 0.19	57.8 ± 6.60	1.08 ± 0.10	82.7 ± 8.50
D(An ₅)	4.40 ± 0.10	81.0 ± 8.00	1.45 ± 0.15	119.1 ± 20.80
D(An _{2.5})(Am _{2.5})	4.65 ± 0.10	84.8 ± 7.30	1.44 ± 0.14	124.3 ± 14.20
D(Am ₅)	4.35 ± 0.10	79.7 ± 6.80	1.39 ± 0.18	118.9 ± 20.50
D(An ₁₀)	6.08 ± 0.39	110.4 ± 12.80	1.69 ± 0.19	134.5 ± 18.80
$D(An_5)(Am_5)$	6.23 ± 0.50	119.0 ± 13.20	1.73 ± 0.17	133.3 ± 11.80
D(Am ₁₀)	5.98 ± 0.15	108.6 ± 10.70	1.63 ± 0.20	132.7 ± 19.10
D(An ₁₅)	7.22 ± 0.47	134.9 ± 16.60	1.93 ± 0.21	148.9 ± 13.10
D(An _{7.5})(Am _{7.5})	8.23 ± 0.56	150.8 ± 12.00	1.98 ± 0.19	163.5 ± 16.00
D(Am ₁₅)	6.65 ± 0.18	129.0 ± 13.40	1.84 ± 0.20	142.3 ± 15.70

ตาราง 4.3 ผลการตรวจสอบสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต

จากตาราง 4.3 จะเห็นว่าสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิกบริสุทธิ์และพอร์ซเลนเซรามิก ที่เสริมแรงด้วยอนุภาคอะลูมินามีความแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะได้นำเสนอรายละเอียด ตามลำดับดังนี้

4.5.1. ค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์ (Vickers hardness, H.)

นำชิ้นงานเซรามิกทั้ง 10 สูตร ที่ผ่านการเผาซินเทอร์แล้วมีความหนาแน่นสูงสุดมาทำการ ทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาคที่มีหัวกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงในการกดเป็น 300 กรัม ซึ่งผลการทดสอบที่ได้สามารถแสดงเป็นดังกราฟ



ร**ูป 4.17** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งวิกเกอร์และพอร์ซเลนเซรามิกนาโน คอมโพสิตทั้ง 10 สูตร

จากกราฟรูป 4.17 จะเห็นได้ว่าก่าความแข็งวิกเกอร์ของพอร์ซเลนเซรามิกที่เครียมได้นั้น มี แนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณของอนุภาคอะลูมินาที่เดิมลงไป โดยมีก่ามากที่สุดในเซรามิกสูตร D(An_{7.5})(Am_{7.5}) ซึ่งมากกว่าชุดควบคุมถึง 150.6% นั่นหมายความว่าอนุภาคของอะลูมินาสามารถ เพิ่มความแข็งให้กับเนื้อแก้วของพอร์ซเลนได้อย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะระบบที่มีอนุภาคสองขนาด ปนกันอยู่ นอกจากนี้ยังพบว่าก่าความแข็งวิกเกอร์ของพอร์ซเลนเซรามิกสูตรเติมอนุภาคอะลูมินา ขนาดไมโครเมตรลงไปจะน้อยกว่าของสูตรที่เดิมอนุภาคนาโนและไมโครผสมกัน คาดว่า เนื่องมาจากการเติมเต็มช่องว่างและการแทนที่เฟสของแก้วเป็นไปได้ดีกว่า และเมื่อพิจารณาร่วมกับ สมบัติทางกายภาพในหัวข้อ 4.3 พบว่ามีความสอดคล้องกัน กล่าวคือ พอร์ซเลนเซรามิกสูตรที่เดิม อนุภาคอะลูมินานาโนและไมโครผสมกันลงไปจะมีความหนาแน่นสูงและปริมาณรูพรุนที่ด่ำ ซึ่ง สมบัติทางกายภาพแหล่านี้ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งของเซรามิก [33 – 34] และเมื่อพิจารณาจาก ภาพถ่าย SEM ของรอยกควิกเกอร์ (รูป 4.18) จะพบว่าการเคลื่อนที่ของรอยแตกนั้นเป็นไปอย่าง สมมาตรในทุกมุมของรอยกด โดยเคลื่อนที่ผ่านเฟสของแก้ว และเมื่อเพิ่มไปพบกับอนุภาค อะลูมินา (บริเวณ A) รอยแตกก็จะสิ้นสุดลงเนื่องจากไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ [34] นอกจากนี้ ยังพบอีกว่าการเดิมอะลูมินาขนาดไมโครเมตรลงไปมากกว่าร้อยละ 10 โดยปริมาตรจะทำให้ก่า ความแข็งเพิ่มขึ้นน้อยมากเมื่อเทียบกับอัตราส่วนอื่น เนื่องจากทั้งขนาดและปริมาณของอะลูมินามี ผลต่อกระบวนการเผาซินเทอร์ [31]



รูป 4.18 ลักษณะของรอยกดที่เกิดจากการกดผิวหน้าของพอร์ซเลนเซรามิกด้วยหัวกดแบบวิกเกอร์

4.5.2 ค่ามอดูลัสของยัง (Young's Modulus, E)

เมื่อนำชิ้นงานเซรามิกทั้ง 10 สูตร ที่ผ่านการเผาซินเทอร์แล้วมีความหนาแน่นสูงสุดมาทำ การทดสอบด้วยเครื่องวัดก่าความแข็งจุลภาคที่มีหัวกดแบบนูป โดยใช้แรงในการกดเป็น 100 กรัม จากนั้นนำค่าความแข็งในหน่วยนูปที่ได้มาคำนวณเพื่อหาค่ามอดูลัสของยัง (E) ด้วยสมการที่ 3.5 ดังที่กล่าวมาแล้วในบทข้างต้น ซึ่งพบว่าสามารถแสดงค่า E ของพอร์ซเลนเซรามิกได้ดังรูป 4.19 ค่ามอดูลัสของยังเป็นสมบัติทางกลตัวหนึ่งที่บ่งบอกถึงความแข็งแรงเชิงความยืดหยุ่นของ สาร เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูป 4.19 จะเห็นได้ว่าค่ามอดูลัสของยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามปริมาณ ของอะลูมินาที่เดิมลงไป ซึ่งเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์กับขนาดของอนุภาคอะลูมินาสามารถ อธิบายได้ว่าในกรณีของเซรามิกกลุ่มที่มีปริมาณอะลูมินาเท่ากันนั้น พบว่าค่ามอดูลัสของยังของ เซรามิกระบบที่มีอนุภาคอะลูมินาสองขนาดผสมกันอยู่จะมีค่าสูงสุดในกลุ่ม และค่ามอดูลัสของยังของ เซรามิกระบบที่มีอนุภาคอะลูมินาสองขนาดผสมกันอยู่จะมีค่าสูงสุดในกลุ่ม และค่ามอดูลัสของยัง จะมีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 150.8 GPa ที่สูตร D(An_{7.5})(Am_{7.5}) อย่างไรก็ตามค่ามอดูลัสของยังที่คำนวณ ได้มีความคลาดเกลื่อนด่อนข้างสูง โดยเฉพาะในชิ้นงานที่มีปริมาณอะลูมินาสูง (ร้อยละ 10 - 15 โดยปริมาตร) เนื่องจากรอยกดที่เกิดจากการกดด้วยหัวกดแบบนูปนั้นมีขนาดเล็กมาก (ประมาณ 20 ใมโครเมตร) ทำให้การวัดขนาดอย่างแม่นยำเป็นไปได้ยากจึงส่งผลต่อล่าที่คำนวณได้ [52] เมื่อ เปรียบเทียบรูป 4.17 และ 4.19 จะเห็นได้ว่ากราฟมีแนวโน้มกล้ายกัน คือ สูตรที่เดิมอะลูมินาสอง ขนาดผสมกันจะมีค่ามอดูลัสของยังมากที่สุดในกลุ่ม ซึ่งอาจอนุมานได้ว่าค่ามอดูลัสของยังแปรผัน ตามค่าความแข็งวิกเกอร์



ร**ูป 4.19** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ามอดูลัสของยังและพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต ทั้ง 10 สูตร

4.5.3 ค่าความต้านทานต่อรอยแยก (Fracture Toughness, K_{ic})

ทำการนำชิ้นงานเซรามิกทั้ง 10 สูตร ที่ผ่านการเผาซินเทอร์แล้วให้ความหนาแน่นสูงสุดมา ทำการทดสอบด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งจุลภาคที่มีหัวกดแบบวิกเกอร์ โดยใช้แรงในการกดเป็น 300 กรัม ซึ่งพบว่าลักษณะรอยกดนั้นมีรอยแตก (crack) ออกจากมุมทั้งสี่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูป 4.20 นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแยกและพอร์ซเลน เซรามิกนาโนคอมโพสิตทั้ง 10 สูตร ดังรูป 4.21 พบว่ามีความแตกต่างของก่าความด้านทานต่อรอย แยกน้อยมาก ประมาณ 4% ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าก่าความต้านทานต่อรอยแยกของเซรามิกเหล่านี้มี ความเกี่ยวข้องสัมพันธ์กับหลายตัวแปร เช่น ขั้นตอนในระหว่างกระบวนการเตรียม เงื่อนไขที่ เลือกใช้ในการเผาซินเทอร์ ขนาดและการกระจายตัวของรูพรุน รวมทั้งปริมาณและขนาดของสารที่ เติมลงไป จึงทำให้ไม่สามารถบ่งบอกถึงแนวโน้มหรือความสัมพันธ์ของผลการทคลองได้อย่าง ชัคเจน [52]



รูป 4.20 ลักษณะของรอยกดที่เกิดจากการกดพื้นผิวหน้าของพอร์ซเลนเซรามิกแล้วมีรอยแตก เกิดขึ้นจากมุม



ร**ูป 4.21** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแยกและพอร์ซเลนเซรามิกนาโน คอมโพสิตทั้ง 10 สูตร

4.5.4 ค่าความทนแรงดัดโค้ง (Flexural strength, M)

นำชิ้นงานพอร์ซเลนเซรามิกที่ผ่านการเผาซินเทอร์แล้วทั้ง 10 สูตร มาทำการทคสอบความ ทนแรงคัค โค้งด้วยการกคแบบ 3 จุค ด้วยเครื่อง universal testing machine โคยมีอัตราการกคลง (crosshead speed) 1 มิลลิเมตร/นาที พบว่าชิ้นงานเซรามิกที่เติมอะลูมินาลงไปมีความทนต่อแรงคัค โค้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ประมาณ 44.0 – 97.7%) แสดงคังรูป 4.22



ร**ูป 4.22** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความทนแรงคัคโค้งและพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอม โพสิตทั้ง 10 สูตร

จากผลการทดลองข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการเติมอนุภาคอะลูมินาลงไปในเนื้อแก้วมีผลต่อ ค่าความทนต่อแรงคัดโค้งอย่างมาก ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับงานวิจัยที่ผ่านมาในอดีต [30, 33, 34, 51] นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดของอะลูมินามีผลต่อความทนต่อแรงคัดโค้งมากกว่าปริมาณที่เติมลงไป เนื่องมาจากการเกิด recrystallization ของอะลูมินาขนาดนาโนและการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ของอะลูมินาขนาดไมโคร ซึ่งทำให้เกิดกวามแน่นตัวสูงและการหดตัวต่ำตามไปด้วย [34] จากผลการทคลองพบว่าขนาดอนุภาคของอะลูมินาที่เติมลงไปมีความสัมพันธ์กับเฟสที่ เกิดขึ้น โกรงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิก เมื่อพิจารณาเฟสที่เกิดขึ้น พบว่า ทั้งอนุภาคขนาดนาโนเมตรและไมโครเมตรของอะลูมินาที่เติมลงไปจะไปเพิ่มปริมาณผลึกซึ่งเป็น เฟสเสริมแรงเฟสให้กับเนื้อพอร์ซเลน และส่งผลให้โครงสร้างจุลภาคของพอร์ซเลนจากเดิมที่เป็น แก้วเปลี่ยนแปลงไป กล่าวคือ การกระจายตัวของอนุภาคอะลูมินาขนาดนาโนเมตรเป็นไปอย่างไม่ สม่ำเสมอ ส่วนมากเกาะตัวกันเป็นกระจุก และแยกตัวออกจากเฟสของแก้วอย่างเห็นได้ชัด ส่วน อนุภาคขนาดไมโครเมตรของอะลูมินานั้นกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอในเนื้อแก้ว ซึ่งแตกต่างจาก อนุภาคอะลูมินาขนาดนาโนเมตรอย่างเด่นชัด แม้ว่าอนุภาคอะลูมินาทั้งสองช่วงขนาดจะส่งผลให้ เกิดโครงสร้างจุลภาคที่แตกต่างกัน แต่ก็ทำให้สมบัติทางกลของพอร์ซเลนเซรามิกนาโนคอมโพสิต โดยเฉพาะความทนแรงคัดโค้งดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับพอร์ซเลนเซรามิกบริสุทธิ์ ซึ่งความ ทนแรงคัดโค้งนี้เป็นสมบัติที่สำคัญในการนำไปประยุกต์ใช้ทางทันตกรรม

AL UNIVERSITA AL UNIVERSITA AL UNIVERSITA AL UNIVERSITA

adansuriansurianaeloeolinu Copyright[©] by Chiang Mai University All rights reserved