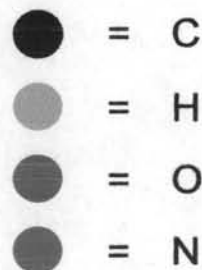
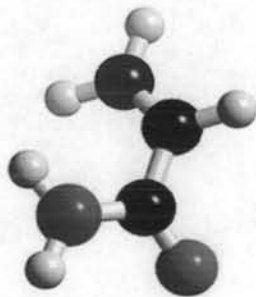
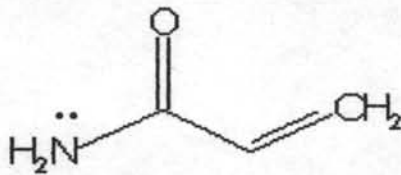


บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

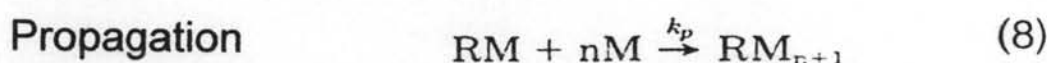
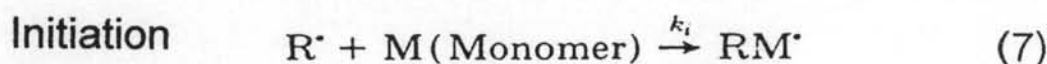
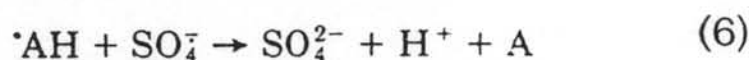
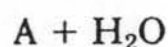
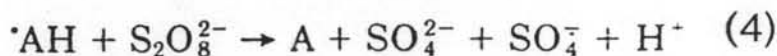
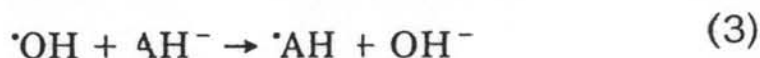
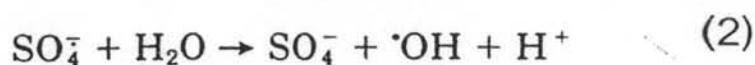
อภิปรายผลการวิจัย

อันเนื่องมาจากมีหลายท่านที่ได้กล่าวถึงปัญหาที่พบของการใช้ยิปซัมคือ ในเรื่องของความเปราะของวัสดุ และมีโอกาสที่จะเกิดการแตกหักได้ (Eden, 1978; John, Schwedhelm และ Lepe, 1997; Craig, Power และ Wataha, 2004) จึงได้มีการพยายามค้นคว้าทดลองในการหาสารต่าง ๆ เพื่อพัฒนาความแข็งแรงให้เพิ่มมากขึ้น แต่จากการศึกษาที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีการใช้สารเพิ่มความแข็งแรงให้กับยิปซัมที่มีประสิทธิภาพโดยไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติอื่น การศึกษานี้เป็นการพยายามปรับปรุงคุณภาพของยิปซัมให้มีความแข็งแรงที่เพิ่มมากขึ้น ในระยะเวลาที่สั้นลง เพื่อลดโอกาสที่จะเกิดการแตกหักระหว่างการแกะแม่แบบออกจากวัสดุพิมพ์ปาก และช่วยให้แม่แบบมีความแข็งแรงเพิ่มมากขึ้น โดยทำการศึกษาในแง่ของกำลังแรงอัด รวมทั้งศึกษาถึงผลกระทบต่อระยะเวลาการก่อตัว และการขยายตัวขณะแข็งตัวร่วมด้วย



ภาพที่ 26 แสดงลักษณะ โครงสร้างของอะคริลาไมด์

ในการศึกษานี้ได้ใช้อะคริลาไมด์ ซึ่งเป็นมอนอเมอร์ชนิดหนึ่งโดยมีโปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มต้นปฏิกิริยา (initiator) และใช้กรดแอสคอบิกทำหน้าที่เป็นสารกระตุ้นปฏิกิริยา (activator) โดยอ้างอิงจากการศึกษาของ Stav และคณะ (1991) ซึ่งได้ใช้อะคริลาไมด์ ในการปรับปรุงคุณภาพเช่นกัน โดยได้ทำการทดสอบเฉพาะคุณสมบัติของกำลังแรงอัด การทดลองของ Stav และคณะ ได้ใช้โปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นสารเริ่มต้นปฏิกิริยา และใช้โซเดียมไบซัลไฟต์เป็นสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา แต่ในการศึกษาครั้งนี้ได้เปลี่ยนสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยาเป็นกรดแอสคอบิกแทน เนื่องจากสามารถหาได้ง่าย และมีราคาถูกกว่า ดังนั้นในการทดลองนี้จึงได้ทำการทดลองโดยแบ่งออกเป็น 2 ตอนด้วยกัน คือ ตอนที่ 1 ได้ทำการศึกษาถึงปริมาณของกรดแอสคอบิก ที่แตกต่างกันที่มีผลต่อความอดทนแรงอัด ระยะเวลาก่อตัว และการขยายตัวขณะแข็งตัวของบิบซัม และเมื่อได้ปริมาณกรดแอสคอบิกที่เหมาะสมที่สุดจากการทดลอง ตอนที่ 1 แล้ว จึงนำปริมาณกรดแอสคอบิกที่เหมาะสมนั้นมาทำการทดลองต่อในตอนที่ 2 เพื่อศึกษาถึงปริมาณของอะคริลาไมด์ที่แตกต่างกัน ที่มีผลต่อกำลังแรงอัด ระยะเวลาก่อตัว และการขยายตัวขณะแข็งตัวของบิบซัม



Termination : Combination / Coupling

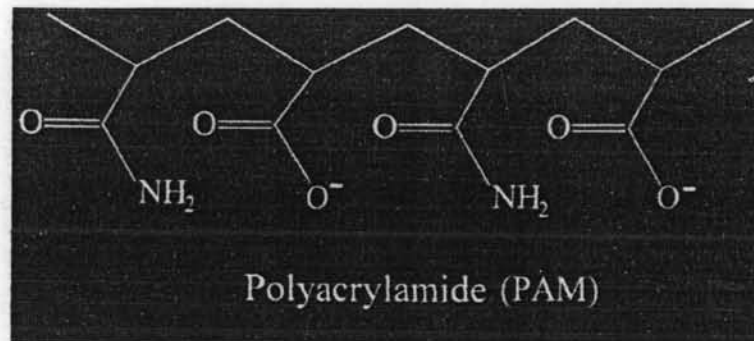
: Disproportionation

ภาพที่ 27 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์โดยมีโปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา และกรดแอสคอร์บิกเป็นสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา

(ที่มา : คัดแปลงจาก Bajpai, U. D. N.; Jain, A.; and Rai S. 1990. Grafting of polyacrylamide onto guar gum potassium persulfate / ascorbic acid redox initiating system. *J. Appl. Polymer Sci.* 39: 2187-2204.)

กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ของอะครีลาไมด์มีดังนี้ การเริ่มต้นของปฏิกิริยาจะเกิดจากสารเริ่มต้นปฏิกิริยา (โปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต) ทำปฏิกิริยากับสารกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา (กรดแอสคอร์บิก) จะได้เป็นอนุมูลอิสระ (free radical) ดังสมการที่ (1)-(3) ซึ่งอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นนั้นจะประกอบไปด้วย ซัลเฟต เรดิคัล ไอออน (SO_4^-) ไฮดรอก

ซิด เรดิคัล (hydroxyl radical; OH) และแอสคอเบท เรดิคัล (ascorbate; AH⁻) ตามลำดับ (Mehrotra และ Mushran, 1970; Bajpai และคณะ, 1990; Pediaditakis, 2003) และอนุมูลอิสระ จะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ (อะคริลาไมด์) กลายเป็นมอนอเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระ ซึ่งจะ去做ปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ตัวอื่นไปเรื่อย ๆ กลายเป็นสายโซ่โพลิเมอร์ที่มีความยาวมากขึ้น และการสิ้นสุดของปฏิกิริยาอาจเกิดขึ้นได้ทั้งในลักษณะของการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบรวมตัวหรือจับคู่ (combination or coupling) หรือการสิ้นสุดปฏิกิริยาแบบคิสพรอพออร์ชันเนชัน (disproportionation) (Allcock และ Lampe, 1989; Odian, 1991)



ภาพที่ 28 แสดงโครงสร้างทางเคมีของพอลิเมอร์ของอะคริลาไมด์

จากผลการศึกษาดอนที่ 1 พบว่า ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ในกลุ่มที่ใส่กรดแอสคอบิก 0.026 M จะให้ค่ากำลังแรงอัดกับชิ้นงานมากที่สุด โดยที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง และ 24 ชั่วโมง จะให้ค่ากำลังแรงอัดมากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ แสดงให้เห็นว่า กรดแอสคอบิก 0.026 M เป็นปริมาณที่เหมาะสมที่สุดในการกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยากับ โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต เพื่อให้ได้อนุมูลอิสระที่พอเหมาะต่อการเกิดปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ของอะคริลาไมด์ ซึ่งคิดเป็นอัตราส่วนโมลาร์ดังนี้คือ อะคริลาไมด์ : โปแตสเซียมเปอร์ซัลเฟต : กรดแอสคอบิก เท่ากับ 1.675 : 0.005 : 0.026 กรณีที่ใช้กรดแอสคอบิกหรือตัวเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาที่น้อยกว่า 0.026M ให้ค่ากำลังแรงอัดที่น้อยกว่า หรือไม่แตกต่างกับกลุ่มควบคุมในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง อาจเนื่องมาจากปริมาณของตัวเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยามีน้อยเกินไปจึงส่งผลให้เกิดอนุมูลอิสระในปริมาณที่น้อยเกินไปที่จะทำปฏิกิริยาการเกิดพอลิเมอร์ที่เหมาะสมได้ และอาจมี

ปริมาณของโปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และอะคริลาไมด์ หลงเหลืออยู่จำนวนมาก ซึ่งอาจเป็นตัวขัดขวางต่อการเชื่อมยึดกันของผลิตภัณฑ์ได้ หรือในกรณีที่ใช้ปริมาณกรดแอสคอบิกที่มากกว่า 0.026 M จะให้ค่ากำลังแรงอัดน้อยกว่าหรือไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม อาจเนื่องมาจากการที่มีกรดแอสคอบิกที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยากับโปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต และอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาย้อนกลับในการเกิดอนุมูลอิสระที่จะไปทำปฏิกิริยากับอะคริลาไมด์จึงส่งผลให้มีสารตกค้างที่ไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ซึ่งอาจเป็นตัวขัดขวางการเชื่อมยึดของผลิตภัณฑ์เช่นกัน จากภาพที่ 27 แสดงกลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์โดยมีโปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟตเป็นตัวเริ่มต้นปฏิกิริยา และกรดแอสคอบิกเป็นตัวกระตุ้นการเกิดปฏิกิริยา จากสมการที่ (1)-(3) จะแสดงให้เห็นถึงขั้นตอนของการเกิดอนุมูลอิสระ ซึ่งถ้าใช้ปริมาณความเข้มข้นของกรดแอสคอบิกที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการสร้างซัลเฟตไอออนเพิ่มมากขึ้นดังเห็นได้จากสมการที่ (4) ซึ่งเมื่อกรดแอสคอบิกทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้แอสคอบท เรดิคัล (AH[•]) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับเปอร์ซัลเฟต ไอออน (S₂O₈^{•-}) จึงทำให้เกิดอนุมูลอิสระจำนวนลดลงซึ่งก็คือจะได้อนุมูลอิสระเพียง 1 ตัว แต่ถ้ากรดแอสคอบิกเกิดปฏิกิริยาร่วมกับเปอร์ซัลเฟต (S₂O₈^{•-}) ดังสมการที่ (1)-(3) จะได้อนุมูลอิสระ 3 ตัว ดังนั้นจะเห็นได้ว่าหากใช้ปริมาณความเข้มข้นของกรดแอสคอบิกที่มากเกินไปจะทำให้เกิดอนุมูลอิสระลดลงซึ่งส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ลดลงตามไปด้วย (Mehrotra และ Mushran, 1970; Bajpai และคณะ, 1990) ดังนั้นเมื่อประเมินจากค่ากำลังแรงอัดที่ระยะเวลาต่าง ๆ ในกลุ่มที่ใส่กรดแอสคอบิก 0.026 M น่าจะเป็นปริมาณที่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยามากที่สุดในการช่วยเพิ่มกำลังแรงอัดให้กับชิ้นงานยิบซัมได้

จากผลการศึกษาตอนที่ 2 พบว่าที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ในกลุ่มที่ใส่อะคริลาไมด์ 2.0% จะให้ค่ากำลังแรงอัดกับชิ้นงานมากที่สุด โดยทั้ง 3 ช่วงระยะเวลา จะให้ค่าที่มากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ โดยกลุ่มที่ใส่ปริมาณอะคริลาไมด์ที่น้อยลง จะให้ค่ากำลังแรงอัดที่ลดลงเข้าใกล้กลุ่มควบคุม อาจเนื่องมาจากมีสัดส่วนของพอลิอะคริลาไมด์ที่ลดน้อยลง และกลุ่มที่ใส่อะคริลาไมด์มากกว่า 2.0% ก็ให้ค่ากำลังแรงอัดลดลงเข้าใกล้กลุ่มควบคุมเช่นกัน อาจเนื่องมาจากมีสัดส่วนของพอลิอะคริลาไมด์ที่มากเกินไปในการเสริมความแข็งแรงให้กับชิ้นงานยิบซัม

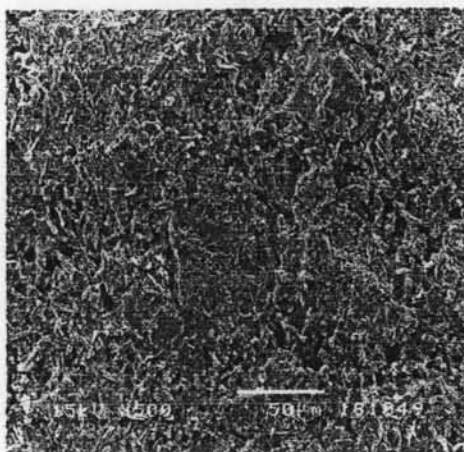
การศึกษาในแง่ของระยะเวลาการก่อตัว พบว่าในกลุ่มการทดลองโดยมากจะใช้ระยะเวลาการก่อตัวที่สั้นลง ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจาก ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ของอะคริลาไมด์ ทำให้เกิดการก่อตัวของผลิตภัณฑ์ยิบซัมได้รวดเร็วขึ้น ยกเว้นกลุ่ม อะคริลาไมด์ 3.0% จะใช้ระยะเวลาการก่อตัวที่มากกว่ากลุ่มควบคุม อาจเนื่องมาจากการขัดขวางของพอลิอะคริลาไมด์ที่มากเกินไป

การศึกษาในแง่ของการขยายตัวของแข็งตัว โดยปกติแล้วระหว่างการก่อตัวของ ยิบซัมจะพบว่ามีการขยายตัวของแข็งตัวเกิดขึ้นอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาของแข็งตัวที่มีการเปลี่ยนแปลง จากสารประกอบไฮดรอกไซด์ไปเป็นสารประกอบไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์ ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดจาก กระบวนการการเกิดผลึก โดยเมื่อผลึกของสารประกอบไฮดรอกไซด์ไฮดรอกไซด์มีการขยายตัวขึ้น และขัดขวาง กันเองกับผลึกใกล้เคียงทำให้เกิดแรงผลักดันกัน และเกิดการขยายตัวของมวลทั้งหมดขึ้น จาก การศึกษาในครั้งนี้พบว่าในทุกกลุ่มการทดลองจะให้ค่าการขยายตัวของแข็งตัวน้อยกว่าในกลุ่ม ควบคุม ซึ่งอาจเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ของอะครีลาไมด์จะทำให้เกิดการหดตัว (Allcock และ Lampe, 1989; Odian, 1991) ซึ่งส่งผลต่อการหดตัวโดยรวมของชิ้นงานยิบซัม จึง ทำให้การขยายตัวของแข็งตัวของยิบซัมลดลง

การทำหน้าที่ของพอลิอะครีลาไมด์ในการเพิ่มประสิทธิภาพของชิ้นงานยิบซัม น่าจะเกิดจากอะครีลาไมด์มีกลุ่มของเอไมด์ (amide group) ที่มีความเป็นขั้ว (polarity) โดยส่วน ของไนโตรเจนจะมีอิเล็กตรอนวงนอกที่เหลืออยู่ (coordinating site) ซึ่งสามารถใช้อิเล็กตรอน เหล่านี้ร่วมกับแคลเซียมที่เป็นธาตุโลหะได้ จึงทำให้เกิดการเชื่อม โมเลกุลเข้ากับผลึกยิบซัม (Allcock และ Lampe, 1989) และขณะที่ยิบซัมมีการก่อตัวจะมีน้ำหลงเหลืออยู่ระหว่างผลึกยิบซัม แล้วค่อย ๆ ระเหยไปกลายเป็นช่องว่างจำนวนมากภายในชิ้นงานยิบซัม ในการใช้อะครีลาไมด์เป็น ส่วนผสม ซึ่งอะครีลาไมด์มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ง่ายก็น่าจะไปแทรกอยู่ระหว่างผลึกยิบซัม ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์สมบูรณ์แล้ว จะเป็นตัวช่วยแทรกในช่องว่างเหล่านั้นแทนในลักษณะ การสะสมของวัสดุของสเมียร์ (smear phase) นอกจากนี้ ส่วนของพอลิเมอร์ที่อยู่รอบผลึกยิบ ซัมจะช่วยในการเสริมแรงบริเวณรอยต่อของผลึก จึงส่งผลให้ยิบซัมมีกำลังแรงอัดเพิ่มมากขึ้น (Stav และคณะ, 1991) และจากการตรวจสอบภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง กราด (Scanning electron microscope; SEM) จะเห็นกลุ่มของพอลิอะครีลาไมด์ที่เชื่อมระหว่าง ผลึกยิบซัม และพบว่าปริมาณช่องว่างลดลงเมื่อเทียบกับภาพที่ได้จากกลุ่มควบคุม ดังภาพที่ 29-34



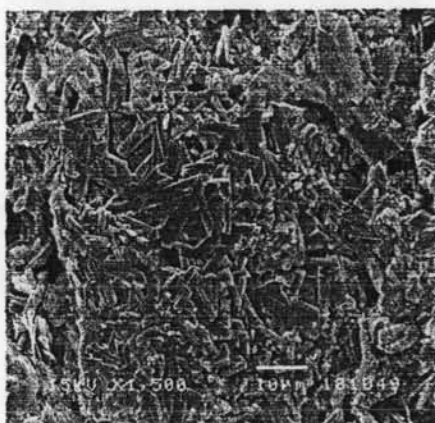
ภาพที่ 29 แสดงภาพของยิบซัมชนิดที่ 4 ที่ก่อตัวแล้ว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า



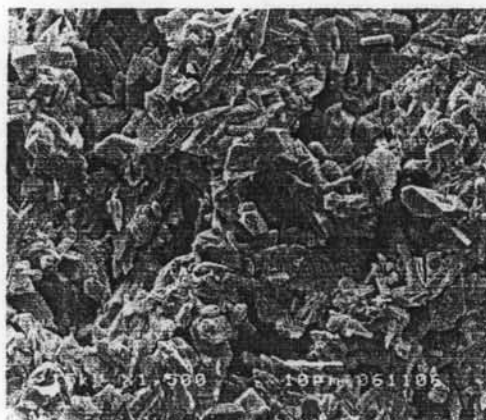
ภาพที่ 30 แสดงภาพของยิบซัมชนิดที่ 4 ปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิอะคริลาไมด์ที่ก่อตัวแล้ว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า



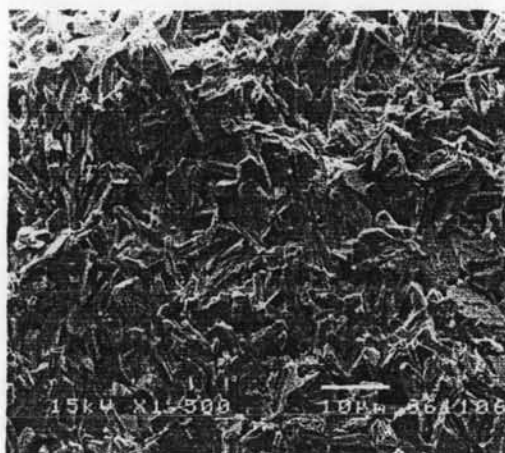
ภาพที่ 31 แสดงภาพพื้นผิวภายนอกของยีสัมชนิดที่ 4 ที่ก่อดัวแล้ว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



ภาพที่ 32 แสดงภาพพื้นผิวภายนอกของยีสัมชนิดที่ 4 ปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิเอทรีทาลีนที่ก่อดัวแล้ว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



ภาพที่ 33 แสดงภาพพื้นผิวภายในของขีปนาวุธชนิดที่ 4 ที่ก่อตัวแล้ว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1500 เท่า



ภาพที่ 34 แสดงภาพพื้นผิวภายในของขีปนาวุธชนิดที่ 4 ปรับปรุงคุณภาพด้วยพอลิอะคริลาไมด์ที่ก่อตัวแล้ว จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 1500 เท่า

ดังนั้นจากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การใช้อะครีลาไมด์ร่วมกับยิบซัมจะช่วยเพิ่มกำลังแรงอัดให้กับฉนวน รวมทั้งช่วยลดระยะเวลาในการก่อตัว และลดการขยายตัวขณะแข็งตัวของฉนวนยิบซัมอีกด้วย

ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการศึกษาในครั้งนี้ได้ทำการทดสอบกำลังแรงอัด จะเห็นได้ว่าค่ากำลังแรงอัดของกลุ่มควบคุมมีค่าต่ำกว่าที่องค์กรระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม (The International Organization for standardization: ISO 6873 Dental gypsum product) กำหนดไว้ อาจเนื่องมาจากขนาดของชิ้นงานในการทดลองนี้ได้เลือกใช้ขนาดของชิ้นงานตามการทดลองของ Prombonas และ Vlissidis (1994) ที่ได้เคยทำการทดสอบค่ากำลังแรงอัดของยิปซัมเช่นกัน ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขององค์กรระหว่างประเทศว่าด้วยมาตรฐานของผลิตภัณฑ์ยิปซัมทางทันตกรรม เนื่องด้วยข้อจำกัดของเครื่องทดสอบสากล (Instron Universal testing machine; Instron 8872) จึงทำให้ค่าที่ได้ต่ำกว่าเกณฑ์ของมาตรฐานที่กำหนดไว้

งานวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาถึงปริมาณที่เหมาะสมของกรดแอสคอบิก และอะคริลาไมด์ ในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ในชิ้นงานยิปซัม โดยทำการทดสอบในแง่ของค่ากำลังแรงอัด ระยะเวลาก่อตัว และการขยายตัวขณะแข็งตัว แต่ในการที่จะนำผลิตภัณฑ์ยิปซัมนี้มาใช้งานทางทันตกรรม อาจจำเป็นต้องทำการทดสอบคุณสมบัติอื่น ๆ เพิ่มเติมอีก เช่น ความสามารถในการลอกลายระเอียด ความต้านทานต่อการขีดถู ความแข็งผิว ความต้านแรงดึง และความเข้ากันได้กับวัสดุพิมพ์ปากชนิดต่าง ๆ เป็นต้น (Ferracane, 2001) และการใส่สารเชื่อมขวาง (crosslink agent) เพิ่มเติม ก็น่าจะเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความแข็งแรงกับวัสดุให้มากขึ้นได้

สรุปผลการวิจัย

จากระเบียบวิธีการวิจัยและข้อกำหนดในการวิจัยที่ได้กล่าวมาข้างต้น สามารถสรุปผลการศึกษาได้ดังนี้

1. ยิบซัมชนิดที่ 4 ที่ผสมอะคริลาไมด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะมีผลต่อค่ากำลังแรงอัดที่แตกต่างกันกับยิบซัมชนิดที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

1.1 กลุ่มที่ใส่อะคริลาไมด์ 2.0% จะให้ค่ากำลังแรงอัดของชิ้นงานยิบซัมมากที่สุด และมากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระยะเวลา 1 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 48 ชั่วโมง ($p < 0.05$)

2. ยิบซัมชนิดที่ 4 ที่ผสมอะคริลาไมด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะมีผลต่อระยะเวลาการก่อตัวที่แตกต่างกันกับยิบซัมชนิดที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

2.1 กลุ่มที่ใส่อะคริลาไมด์ 2.0% จะใช้ระยะเวลาการก่อตัวน้อยกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

3. ยิบซัมชนิดที่ 4 ที่ผสมอะคริลาไมด์ในปริมาณที่เหมาะสมจะมีผลต่อการขยายตัวขณะแข็งตัวที่แตกต่างกันกับยิบซัมชนิดที่ 4 อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

3.1 กลุ่มที่ใส่อะคริลาไมด์ 2.0% จะมีการขยายตัวขณะแข็งตัวน้อยกว่ากลุ่มควบคุม

4. ยิบซัมชนิดที่ 4 ที่ใส่อะคริลาไมด์ 2.0% โดยมีอัตราส่วนโมลาร์ของ โปแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต : กรดแอสคอบิก เท่ากับ 0.005 : 0.026 น่าจะเป็นกลุ่มที่สามารถนำไปใช้ในการศึกษาเพิ่มเติมต่อไปได้