

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการประดิษฐ์วัสดุกำบังนิวตรอนช้าที่สามารถปั้นขึ้นรูปได้ และสามารถนำกลับมาใช้ได้หลายๆครั้ง โดยเลือกใช้ดินน้ำมันยี่ห้อ FIMO และไฮเคลย์ และพีวีซี ไฮบริด คิสเพอร์ชัน เรซิน เกรด 74GP กับ พลาสติกไซเซอร (DOP) มาผสมกับกรดบอริก ในการศึกษาขั้นแรกเป็นการศึกษาหาสัดส่วนและสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมวัสดุกำบัง ขั้นตอนที่สองคือการศึกษาถึงความสามารถในการกำบังนิวตรอนช้า

จากการวิจัยพบว่าวัสดุสามชนิดคือ ดินน้ำมันยี่ห้อ FIMO และ ไฮเคลย์ และ พีวีซี ไฮบริด คิสเพอร์ชัน เรซิน เกรด 74GP เป็นวัสดุที่สามารถผสมรวมกับกรดบอริก แล้วขึ้นรูปได้ โดยใช้พลาสติกไซเซอร (DOP) หรือกลีเซอรอลเป็นตัวช่วย ในกรณีของดินน้ำมันไฮเคลย์พบว่า พลาสติกไซเซอรและกลีเซอรอลไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อของดินน้ำมันไฮเคลย์ได้ แต่สามารถคลุกเคล้าให้ดินน้ำมันไฮเคลย์เหลวลงและเติมกรดบอริกเข้าไปได้ แต่วัสดุที่ได้จะร่วนและติดตามวัสดุที่สัมผัสเช่น ถูมือ บีกเกอร์ ส่วนกรณีของดินน้ำมันยี่ห้อ FIMO พบว่ากลีเซอรอลไม่สามารถละลายเข้าไปในเนื้อของ FIMO ได้ แต่สามารถคลุกเคล้าให้ FIMO เหลวลงและเติมกรดบอริกลงไปได้ ชิ้นงานที่ได้จะร่วน แต่ไม่ติดตามวัสดุที่สัมผัสอย่างเช่นกรณีของดินน้ำมันยี่ห้อไฮเคลย์ ส่วน พลาสติกไซเซอรสามารถละลายเข้าไปในเนื้อของ FIMO ได้ ชิ้นงานที่ได้เกาะตัวกันดีและไม่ติดตามวัสดุที่สัมผัส และพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของพลาสติกไซเซอรก็จะเติมกรดบอริกได้มากขึ้นตามลำดับ จนถึงจุดหนึ่งที่ปริมาณพลาสติกไซเซอรมากเกินไป ชิ้นงานจะเหลวเกินไป ดังชิ้นงาน A6 ที่มีสัดส่วนของ FIMO:DOP:กรดบอริก เท่ากับ 2.000:0.200:1.182 ชิ้นงานที่เตรียมได้เกาะตัวกันไม่ดีและเมื่อดึงให้ยืดออกจนเป็นเส้นบางๆ จะสังเกตเห็นเป็นลักษณะคล้ายเม็ดทราย อย่างไรก็ตามชิ้นงานดังกล่าวก็ยังคงใช้งานได้ แต่ชิ้นงาน A9 ซึ่งเพิ่มปริมาณของกรดบอริกขึ้นอีกจนถึงสัดส่วนของ FIMO:DOP:กรดบอริก เท่ากับ 2.000:0.289:1.502 พบว่าวัสดุที่ได้จะร่วนเกาะตัวกันไม่ดี รวมถึงมี พลาสติกไซเซอรติดตามถูมือเวลานำมาปั้น แม้จะเติมกรดบอริกเพิ่มมากขึ้นก็ไม่สามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ และเมื่อตั้งชิ้นงานที่ผสมจาก FIMO ทิ้งไว้ในห้องทดลอง พบว่าชิ้นงานที่ผสมได้แทบทุกชิ้นผิวด้านนอกจะแข็งขึ้นแต่เมื่อนำกลับมาวัด ชิ้นงานนั้นจะนุ่มลงสามารถปั้นได้ ยกเว้นเพียงชิ้นงาน A9 ที่มีกรดบอริก 39.62 % เมื่อบั่นแล้วจะแตกร่วนต้องใช้เวลาในการนวดนานเพื่อจะให้ได้สามารถปั้นได้อีกครั้ง จากการวิจัยวัสดุตั้งแต่ชิ้นงาน A1-A9 พบว่าชิ้นงาน A1-A5 มีความเหมาะสมในการนำมา

ปั่นขึ้นรูป ส่วนชิ้นงาน A6-A9 ไม่เหมาะสมเพราะการเติมพลาสติกไซเซออร์ที่มากเกินไปทำให้วัสดุที่
 ได้เหลว และไม่ได้เพิ่มความสามารถในการเกาะตัวของชิ้นงาน ในกรณีที่ใช้พีวีซี ไฮบริด คิสเพอร์
 ซัน เรซิน เกรด 74GP มาผสมกับ พลาสติกไซเซออร์ (DOP) พบว่าส่วนผสมทั้งสองสามารถละลายเข้า
 กันได้เกิดเป็นพลาสติกขอล แต่พลาสติกขอลดังกล่าวไม่ค่อยอยู่ตัวจะไหลเมื่อตั้งทิ้งไว้ ในขณะที่ผิว
 นอกของวัสดุเวลาสัมผัสกลับแข็งกระด้าง และการเกาะตัวไม่ดี เวลาบิคงจะแตกลักษณะคล้ายกับ
 เทียนไข แม้จะเติมกรดบอริกลงไปอีก ก็ยังคงได้วัสดุที่มีลักษณะเช่นเดิม เพราะพลาสติกไซเซออร์เพียง
 ทำให้พีวีซีนิ่มลงและจับตัวกันเล็กน้อย จึงได้ทำการศึกษาต่อโดยการให้ความร้อนกับส่วนผสมของ
 พีวีซีและพลาสติกไซเซออร์ที่อุณหภูมิ 67.5 องศาเซลเซียส พบว่าการเกาะตัวของวัสดุดีขึ้นสามารถ
 นำมาทำให้บิคงได้โดยที่ไม่แตกเหมือนเทียนไขและยังสามารถเติมกรดบอริกลงไปได้ เพราะเมื่อ
 ได้รับความร้อนทำให้พีวีซีเกิดการหลอมรวมกันเป็นโครงสร้างใหม่ที่มีการเกาะตัวกันมากขึ้น โดย
 เมื่อควบคุมปริมาณของพีวีซีและพลาสติกไซเซออร์ในสัดส่วน 2.000:1.250 กรัม แล้วเปลี่ยนเวลาใน
 การให้ความร้อนต่างๆ กัน พบว่าชิ้นงาน G3 ซึ่งใช้เวลาในการให้ความร้อน 60 นาทีเหมาะสมที่สุด
 กล่าวคือวัสดุที่ได้มีความอยู่ตัวและสามารถเติมกรดบอริกเข้าไปได้มากถึง 2.536 กรัม คิดเป็น
 43.83 % แต่ชิ้นงาน G2 และ G1 ซึ่งให้ความร้อนนานขึ้นเป็น 90 และ 120 นาที กลับเติมกรดบอริก
 ลงไปได้เพียง 29.92 และ 27.30 % ตามลำดับ และเมื่อศึกษาผลของปริมาณพลาสติกไซเซออร์ที่มีต่อ
 คุณสมบัติของวัสดุโดยการควบคุมปริมาณของพีวีซีและเวลาเช่นเดียวกับชิ้นงาน G3 แต่เปลี่ยน
 ปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ พบว่าได้วัสดุที่เหมาะสม สองชิ้นคือชิ้นงาน H1 และ H2 ซึ่งมีสัดส่วน
 ของพีวีซี พลาสติกไซเซออร์ และกรดบอริกเท่ากับ 2.000:1.250:2.536 และ 2.003:1.231:2.210
 ตามลำดับ คิดเป็นปริมาณของกรดบอริก 43.83 และ 40.60 % ตามลำดับ ซึ่งได้วัสดุที่เหมาะสมแก่การ
 ปั่น คือไม่เหลวหรือแห้งจนเกินไป ในขณะที่ลดปริมาณของพลาสติกไซเซออร์ลงเป็น 1.219 กรัม
 วัสดุที่ได้จะแข็ง ปั่นได้ยาก และเมื่อลดปริมาณของกรดบอริกเหลือ 1.017 กรัม วัสดุที่ผ่านการให้
 ความร้อนจะแข็งมากจนไม่สามารถเติมกรดบอริกเข้าไปได้ แต่เมื่อนำสัดส่วนและเวลาในการให้
 ความร้อนของชิ้นงาน H1 และ H2 ซึ่งมีความเหมาะสม ไปใช้ในการเตรียมวัสดุในปริมาณที่มากขึ้น
 กลับพบว่าชิ้นงานที่ได้นั้นเหลวเกินไป แม้จะปั่นได้แต่ก็ไม่คงตัวรวมถึงมีพลาสติกไซเซออร์ติดตามถู่
 มือเป็นจำนวนมาก เพราะเมื่อเพิ่มปริมาณของวัสดุมากขึ้นทำให้ความร้อนที่ให้แก่ส่วนผสมไม่ทั่วถึง
 พีวีซีจึงหลอมรวมกันได้ไม่มากพอ ชิ้นงานที่ได้จึงเหลวเกินไป และมีพลาสติกไซเซออร์ส่วนเกินที่
 ติดตามถู่มือขณะปั่น จึงได้ทำการศึกษาผลของเวลาในการให้ความร้อนแก่ส่วนผสมของพีวีซี
 และพลาสติกไซเซออร์ที่มีปริมาณมากเป็น 50 เท่า โดยยึดสัดส่วนของวัสดุตามชิ้นงาน H2 ซึ่งมี
 สัดส่วนของพีวีซี พลาสติกไซเซออร์และกรดบอริก เท่ากับ 100.0:61.5:110.5 กรัม แล้วเปลี่ยนแปลง
 เวลาในการให้ความร้อนแก่พลาสติกขอลเป็น 75, 80, 85, 90, 95, 100 และ 105 นาที ตามลำดับ แล้ว
 นำมาเติมกรดบอริก พบว่าเมื่อให้ความร้อนแก่ส่วนผสมดังกล่าวเป็นเวลา 95 นาทีจะเป็นช่วงเวลาที่
 เหมาะสมที่สุด ทั้งในแง่ของความอยู่ตัวของวัสดุรวมถึงปริมาณกรดบอริกที่สามารถเติมเข้าไปได้

เป็นจำนวนมาก นอกจากนี้เมื่อสัมผัสมีพลาสติกไซเซอรัลติดตามถุงมือเพียงเล็กน้อย แต่ในขณะที่เพิ่มเวลาในการให้ความร้อนขึ้นอีกเพียง 5 นาที หรือเวลาทั้งหมดในการให้ความร้อนคือ 100 นาที พบว่าส่วนผสมดังกล่าวเกาะตัวกันดีแต่ค่อนข้างแข็งทำให้เติมกรบอริกลงไปได้ยากแต่ยังสามารถเติมลงไปได้จนครบปริมาณ เมื่อเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนเป็น 105 นาที ชิ้นงานที่ได้นั้นเกาะตัวกันดีมากจนไม่สามารถเติมกรบอริกลงไปได้ตามจำนวนที่ต้องการ ในขณะที่ให้ความร้อนเพียง 90 นาที ชิ้นงานที่ได้เหลวและไม่อยู่ตัวเท่าที่ควร เมื่อนำมาปั่นพบว่า มี DOP พลาสติกไซเซอรัลติดตามถุงมือเป็นจำนวนมาก เมื่อลดระยะเวลาในการให้ความร้อนลงไปตามลำดับ ชิ้นงานที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายก็เหลวตามไปด้วย เมื่อตั้งทิ้งไว้จะไม่คงสภาพ แต่สำหรับเวลาที่ให้ความร้อนแก่ส่วนผสม 95 นาที เมื่อต้องการนำมาเตรียมชิ้นงานที่มีปริมาณกรบอริกต่ำ ๆ กลับใช้ระยะเวลาดังกล่าวไม่ได้ เพราะชิ้นงานที่ได้ในขั้นตอนสุดท้ายเหลวเกินไปและไม่อยู่ตัวรวมถึงมีพลาสติกไซเซอรัลติดตามถุงมือมากเหมือนชิ้นงานที่ให้ความร้อนน้อยเกินไป ดังนั้นในการเตรียมวัสดุที่มีปริมาณกรบอริกต่ำ ๆ เพื่อนำไปศึกษาความแตกต่างในการกำบังนิวตรอนช้า จึงจำเป็นต้องเพิ่มเวลาในการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานเป็น 100, 105 และ 110 นาที ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3.7 ซึ่งจะได้ชิ้นงาน K1-K8 ซึ่งมีปริมาณของกรบอริกแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 4.10 เมื่อนำวัสดุที่ได้ไปทำการกำบังนิวตรอนช้า โดยการควบคุมความหนาของชิ้นงานไว้ที่ 1 ซม. พบว่าค่าจำนวนนับรังสีที่ได้จะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรบอริก และสังเกตว่าเมื่อความเข้มข้นของกรบอริกเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 % จำนวนนิวตรอนที่ทะลุผ่าน จะลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง แต่ตั้งแต่ชิ้นงาน K5 จำนวนนิวตรอนทะลุที่ผ่านกลับมีค่าใกล้เคียงกัน เพราะความสามารถในการกำบังของวัสดุที่สูง จำนวนนิวตรอนที่สามารถทะลุผ่านได้จึงมีค่าน้อยมาก และมีผลของความผิดพลาดจากการวัด จึงไม่สามารถแยกความแตกต่างของจำนวนนิวตรอนทะลุผ่านได้ เมื่อนำค่าจำนวนนับรังสีที่ได้ไปคำนวณหาค่าภาคตัดขวางมหภาคของแต่ละชิ้นงาน ซึ่งจากการทดลองได้ค่าตั้งแต่ $1.38-4.65 \text{ cm}^{-1}$ เมื่อนำจำนวนนับรังสีมาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของกรบอริกโดยแสดงค่าในมาตราส่วนลอการิทึม ได้กราฟซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟเอกซ์โพเนนเชียลมีสมการ $y = 3203.9e^{-0.138x}$ มีค่า $R^2=0.9365$ กล่าวคือจำนวนนับรังสีจะลดลงตามความเข้มข้นของกรบอริกที่เพิ่มขึ้น จนเริ่มคงที่ตั้งแต่ชิ้นงาน K5 ที่มีความเข้มข้นของกรบอริก 20 % แต่เนื่องจากชิ้นงานดังกล่าวเป็นช่วงเริ่มต้นที่จำนวนนับรังสีเริ่มคงที่ อาจเกิดความผิดพลาดจากการวัด และเมื่อพิจารณาประกอบกับลักษณะของกราฟ พบว่ากราฟไปตัดแกน X ที่ความเข้มข้นของกรบอริกประมาณ 25 % จึงเลือกชิ้นงาน K6 ที่มีความเข้มข้นของกรบอริก 30.21 % ไปทดลองกำบังนิวตรอนช้าโดยเปลี่ยนความหนาของวัสดุเป็น 0.0, 0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.9 และ 1.0 ซม. ตามลำดับ พบว่าจำนวนนับรังสีจะลดลงเมื่อเพิ่มความหนาของชิ้นงาน เมื่อนำจำนวนนับรังสีที่ได้มาสร้างกราฟความสัมพันธ์กับความหนา ได้กราฟซึ่งมีลักษณะเป็นกราฟเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งมีสมการ $y = 18577e^{-3.4767x}$ มีค่า $R^2=0.9365$

จากการทดลองได้ชิ้นงาน K6 ที่มีความเข้มข้นกรดบอริก 30.21 % มีค่าภาคตัดขวางมหภาคเท่ากับ 3.4767 cm^{-1} และค่า HVL ของวัสดุประมาณ 0.2 ซม. สำหรับเป็นวัสดุกำบังนิวตรอนช้าที่สามารถปั่นขึ้นรูปได้ โดยไม่แห้งแข็งหรือเหลวจนเกินไป วัสดุดังกล่าวมีข้อดีคือสามารถเปลี่ยนรูปร่างได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อน จึงสะดวกสำหรับงานกำบังนิวตรอนช้าที่ต้องการความรวดเร็ว วัสดุดังกล่าวมีความปลอดภัยในการใช้งาน แม้มีบางองค์ประกอบที่สามารถเกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอนแล้วให้รังสีแกมมา เช่น CI-37 แต่จากการคำนวณความแรงรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นต่อน้ำหนักเป็นกรัมของพีวีซีในชิ้นงาน (ดังแสดงในภาคผนวก ข) โดยสมมติการกำบังนิวตรอนนอกเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ฟลักซ์ของนิวตรอนสูงสุด ซึ่งจะมีค่าไม่เกิน $10^6 \text{ n/cm}^2\text{-s}$ เช่นในกรณีของลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่นำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน พบว่า CI-37 เกิดอันตรกิริยาการจับนิวตรอนแล้วมี CI-38 เกิดขึ้น แล้วจึงสลายตัวโดยมีความแรงรังสีประมาณ $27 \mu \text{ Ci/kg}$ และจะให้รังสีแกมมาที่มีความแรงรังสีประมาณ 751 Bq/kg ซึ่งเป็นระดับที่ต่ำมาก อีกทั้งวัสดุกำบังรังสีที่ผลิตขึ้นมีราคาถูก (ประมาณ 283 บาท/กิโลกรัม)

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. วัสดุจับนิวตรอนช้าที่เลือกใช้คือ โบรอน-10 ที่อยู่ในรูปของกรดบอริก ปัจจุบันเป็นวัสดุห้ามนำเข้าเนื่องจากเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์บอแรกซ์ ดังนั้นจึงควรเลือกใช้สารประกอบอื่นๆ ของโบรอน ตัวอย่างเช่นสารประกอบโบรอนคาร์ไบด์ รวมถึงสารประกอบของแคลเซียมและลิเทียมซึ่งมีความสามารถในการกำบังนิวตรอนช้าเช่นกัน หรือการใช้สารประกอบที่เสริมสมรรถนะ เช่น enriched โบรอน-10 หรือ ลิเทียม-6 ซึ่งมีองค์ประกอบของ โบรอน-10 หรือ ลิเทียม-6 มากกว่าที่มีในธรรมชาติ

2. ในการทดลองได้เตรียมตัวอย่างโดยการผสมให้เข้ากันด้วยมือ เนื่องจากใช้ส่วนผสมปริมาณน้อย (ประมาณ 160-280 กรัม) จึงผสมให้เข้ากันได้ดี แต่ต้องใช้เวลาในการผสมเพื่อให้มั่นใจได้ว่าผสมทั่วถึง ซึ่งในการใช้งานจริงต้องเตรียมในปริมาณที่มากขึ้น จึงไม่สะดวกหากทำการผสมด้วยมือ การใช้เครื่องมือเช่น TWO-ROLL MILL สำหรับผสม จะทำให้สะดวกขึ้นและได้ผลการผสมที่ดีกว่าการผสมด้วยมือ

3. จากการทดลองพบว่าในกรณีที่เตรียมตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูง ๆ จะได้ชิ้นงานที่เกาะตัวกันไม่ดีและสังเกตเห็นลักษณะคล้ายเม็ดทรายกระจายอยู่ในชิ้นงาน เพราะในการทดลองใช้ตะแกรงร่อนกรดบอริกที่มีขนาด $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ซึ่งจะได้อนุภาคกรดบอริกขนาดใหญ่ การผสมจึงได้ชิ้นงานที่มีลักษณะคล้ายเม็ดทราย แต่ถ้าบดและคัดขนาดของกรดบอริกให้เล็กลงโดยเลือกใช้

ตะแกรงที่มีขนาดเล็กลง จะทำให้ได้วัสดุที่เกาะตัวกันดีและไม่มีปัญหาดังกล่าว รวมถึงทำให้เคมี
กรดบอริกลงไปได้มากขึ้นสำหรับกรณีที่ต้องการชิ้นงานที่มีความเข้มข้นของกรดบอริกสูง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย