บทที่ 6
บทสรุปและวิจารณ์ผล

การวิจัยการใช้วิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ศึกษาผลกระทบของชั้นกาวบางต่อการกระจายความเค้นในเนื้อยางของชิ้นงานแบบต่อชนได้แบ่งการวิจัยเป็น 4 กิจกรรมหลักประกอบด้วย การทดสอบสมบัติทางกลของยาง การทดสอบสมบัติทางกลของกาว การยืนยันความถูกต้องของต้นแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ และการศึกษาตัวแปรต่างๆจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ สามารถวิจารณ์และสรุปได้เป็นข้อ ๆ ดังนี้

6.1 สมบัติทางกลของยางและการยืนยันความถูกต้องค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดของยาง

การทดสอบสมบัติทางกลของยางเพื่อใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้แก่การทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว การทดสอบแรงกดในแนวแกนเดียว และการทดสอบแรงดึงในแนวระนาบ เมื่อนำค่าความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากการทดสอบมาประมวลผลด้วยโปรแกรม ABAQUS ได้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดในรูปของสมการพอลิโนเมียลดีกรีสอง ขึ้นกับลักษณะการรับแรงของชิ้นงาน คือชิ้นงานรับแรงดึงมีค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด C_{10}=-2.042 MPa, C_{01}=3.088 MPa, C_{20}=1.414 MPa, C_{11}=-3.878 MPa, C_{02}=3.678 MPa และชิ้นงานรับแรงกดมีค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด C_{10}=2.843 MPa, C_{01}=-1.986 MPa, C_{20}=2.013 MPa, C_{11}=-1.311 MPa, C_{02}=0.318 MPa

สำหรับการหาสมบัติเชิงกลของยางในเทอมค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดจากข้อมูลการทดสอบ ต้องพิจารณาลักษณะการรับแรงของชิ้นยาง ในงานวิจัยมีลักษณะการรับแรงของชิ้นงานสองลักษณะคือชิ้นงานรับแรงกดอย่างเดียว ใช้ข้อมูลการทดสอบแรงกดในแนวแกนเดียว และชิ้นงานรับแรงดึงอยางเดียว ใช้ข้อมูลในการทดสอบแรงดึงในแนวแกนเดียว คำนวณหาสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด ซึ่งในงานวิจัยชิ้นงานไม่ได้รับแรงเฉือน จึงไม่นำข้อมูลจากการทดสอบแรงดึงในแนวระนาบ (Planar Test) ซึ่งแสดงพฤติกรรมการรับแรงเฉือนของยางมาใช้ แต่ได้ทำการทดสอบแรงดึงในแนวระนาบไว้เป็นข้อมูล เพื่อใช้ในโอกาสต่อไป

การวิจัยนี้ได้ทำการยืนยันความถูกต้องของค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดที่คำนวณได้ข้างต้นด้วยสองวิธีคือ วิธีที่หนึ่ง นำค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดแทนค่าในสมการคณิตศาสตร์โพลิโนเมียลดีกรีสอง และคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดเปรียบเทียบกับข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบวัสดุ พบว่ามีค่าความแตกต่างเฉลี่ยน้อยกว่าหนึ่งเปอร์เซ็นต์ วิธีที่สอง ใช้ค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียด

เป็นสมบัติของวัสดุไฮเปอร์อิลาสติกในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ที่มีรูปทรงและขนาดเหมือนกับชิ้นงานทดสอบ ประมวลผลหาความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดจากต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่ได้จากการทดสอบวัสดุ พบว่ามีค่าความแตกต่างเฉลี่ยน้อยกว่าหนึ่งเปอร์เซ็นต์

จากผลการเปรียบเทียบข้างต้นสรุปได้ว่า วิธีการที่นำมายืนยันความถูกต้องค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดมีความน่าเชื่อถือได้ เนื่องจากผลที่ได้มีความสอดคล้องกับผลการคำนวณด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์โดยตรง และยังสรุปได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์พลังงานความเครียดที่คำนวณได้จากโปรแกรมสามารถนำมาใช้ในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของวัสดุเดียวกันได้อย่างถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือ

6.2 สมบัติทางกลของชั้นกาวบาง

การทดสอบสมบัติทางกลของกาวบางเพื่อใช้แทนพฤติกรรมของกาวในต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ประกอบด้วย การทดสอบความต้านทานแรงดึงเพื่อแทนพฤติกรรมการยึดติดของยางและโลหะในแนวแรง และการทดสอบความต้านทานแรงเฉือนเพื่อแทนพฤติกรรมการเหนี่ยวรั้งการเคลื่อนที่ของยางในแนวตั้งฉากกับแรง พบว่ากาวยางมีค่าความต้านทานแรงดึง1.128 MPa ความต้านทานแรงเฉือน 0.154 MPa มีพฤติกรรมแบบวัสดุเหนียว มีช่วงยืดหยุ่นในช่วง 0-60% Strain และช่วงพลาสติกถึง 300% Strain และกาวแห้งเร็วมีค่าความต้านทานแรงดึง 5.8 MPa ความต้านทานแรงเฉือน 2.6 MPa มีพฤติกรรมแบบวัสดุเปราะมีช่วงยืดหยุ่น 0-100% Strain ไม่มีพฤติกรรมในช่วงพลาสติก

การทดสอบสมบัติทำตามมาตรฐาน JIS K6849-1994 และ K 6850-1994 โดยสร้างชิ้นโลหะแท่งกลมและเชื่อมต่อด้วยกาวบางแล้วจึงทำการทดสอบ ด้วยวิธีนี้ต้องควบคุมความหนาชั้นกาวบางให้แม่นยำ ผู้วิจัยได้ออกแบบเครื่องควบคุมความหนาของชั้นกาวบางมาช่วยในการประกอบชิ้นงาน และออกแบบอุปกรณ์จับยึดชิ้นงานให้สามารถถ่ายแรงให้อยู่ในแนวเดียวกันได้จากเครื่องทดสอบสู่ชิ้นทดสอบ

6.3 จำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมในแบบจำลอง

การวิจัยนี้เลือกจำนวนเอลิเมนต์ที่เหมาะสมของแบบจำลอง โดยเปรียบเทียบความแตกต่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียดของแบบจำลองที่มีจำนวนเอลิเมนต์เปลี่ยนไปครั้งละประมาณหนึ่งเท่าตัว ซึ่งความแตกต่างเฉลี่ยต้องมีค่าไม่เกินหนึ่งเปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาพบว่าแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานแบบแผ่นกลมที่มีจำนวนเอลิเมนต์

1440 เอลิเมนต์ และแบบจำลองชิ้นงานแบบแผ่นสี่เหลี่ยมที่มีจำนวนเอลิเมนต์ 1000 เอลิเมนต์ มีความเหมาะสมเพียงพอต่อการนำไปศึกษาการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ เนื่องจากมีความแตกต่างของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของของแบบจำลองขนาดเดียวกันสูงสุดไม่เกินหนึ่งเปอร์เซ็นต์

6.4 การยืนยันความถูกต้องของต้นแบบไฟไนต์เอลิเมนต์ของรอยต่อชนยางกับกาว

การยืนยันความถูกต้องของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ทำโดยการเปรียบเทียบผลของความสัมพันธ์ระหว่างค่าการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในแนวแรง (Vertical Compressive Deformation) และค่าการเปลี่ยนรูปของชิ้นงานในแนวตั้งฉากกับแรง (Lateral Deformation) ที่ได้จากแบบจำลองและจากการทดสอบจริง พบว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมเพียงพอต่อการนำไปศึกษาการปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ ทั้งนี้เนื่องจากค่าความแตกต่างเฉลี่ยของแบบจำลองและการทดสอบจริงของชิ้นงานแบบต่างๆ มีค่าสูงสุดไม่เกินสิบเปอร์เซ็นต์

6.5 ผลการศึกษาการกระจายความเค้นในเนื้อยางจากแบบจำลอง

การเปลี่ยนรูปของชิ้นงานยางแบบต่อชนเมื่อได้รับแรงจากภายนอกจะเกิดการเปลี่ยนรูปในสองทิศทางคือ เกิดการยุบตัวหรือยืดตัวในแนวแรง (Vertical Deformation) และเกิดการขยายตัวหรือหดตัวในแนวตั้งฉากกับแรง (Lateral Deformation) กรณีชิ้นงานรับแรงกดมีพื้นผิวสัมผัสระหว่างยางกับโลหะเป็นอิสระ (Free Bonding) เมื่อชิ้นยางยุบตัวตามแนวแรงส่งผลให้ชิ้นยางยืดขยายตัวในแนวตั้งฉากกับแรงอย่างอิสระและพื้นผิวรอยต่อสามารถเคลื่อนตัวในแนวขนานพื้นผิวรอยต่อได้อย่างอิสระเช่นกัน และยังคงรักษาปริมาตรของยางไว้คงเดิม เนื่องจากยางมีสมบัติเป็นวัสดุที่อัดตัวไม่ได้ (Incompressible Material) ในขณะที่ชิ้นงานมีการเชื่อมต่อระหว่างยางกับโลหะด้วยชั้นกาวบาง เมื่อชิ้นงานรับแรงกด และเกิดการยุบตัวในแนวแรง เนื้อยางบริเวณชั้นกลางชิ้นงานจะพยายามขยายตัวออกในแนวตั้งฉากกับแนวแรง แต่บริเวณพื้นผิวรอยต่อไม่สามารถเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับแนวแรงได้อย่างอิสระ เนื่องจากถูกเหนี่ยวรั้งไว้ด้วยชั้นกาว ส่งผลให้บริเวณขอบอิสระด้านข้างชิ้นงานมีลักษณะโค้งนูน และต้องใช้แรงกดสูงกว่าชิ้นงานที่พื้นผิวรอยต่อเป็นอิสระ (Free Bonding) เพื่อให้ได้ระยะยุบตัวของชิ้นงานที่เท่ากัน

การกระจายความเค้นอุทกสถิต (Hydrostatic Pressure) ในเนื้อยางเมื่อรับแรงกดหรือแรงดึง พบว่าความเค้นอุทกสถิตมีค่าสูงสุดตรงจุดศูนย์กลางของเนื้อยางและมีแนวโน้มลดต่ำลงตามแนวรัศมีไปจนถึงขอบผิวอิสระของเนื้อยาง (Free Surface) เมื่อเปรียบเทียบกันในระนาบต่างๆ ตามแนวความหนาเนื้อยางพบว่าระนาบที่มี ค่าความเค้นอุทกสถิตสูงสุดคือรอยต่อระหว่างยางกับ

กาว ทั้งนี้เนื่องจากเนื้อยางเกิดการเปลี่ยนรูปเมื่อได้รับแรงกด โดยเกิดการยุบตัวในแนวแรง (Vertical Deformation) และยืดตัวออกในแนวตั้งฉากกับแรง (Lateral Deformation) เมื่อพิจารณายางบริเวณจุดศูนย์กลาง บริเวณนี้จะถูกจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างด้วยผนังยางส่วนที่เหลือ ทำให้มีการเคลื่อนที่น้อย และไม่มีการเปลี่ยนรูปทรง เมื่อชิ้นงานได้รับแรงกด จึงมีความดันสูงบริเวณนี้ และอิทธิพลของการจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างจะลดลงไปจนถึงบริเวณผิวอิสระ จึงทำให้ค่าความเค้นอุทกสถิตมีแนวโน้มลดลง และจากผลของการยึดติดบริเวณรอยต่อส่งผลต่อการสร้างการจำกัดการเคลื่อนที่ในแนวด้านข้างของยาง เพราะการยึดติดดังกล่าวช่วยเพิ่มการรั้งไม่ให้ยางยืดตัวออกด้านข้างจึงจำกัดเนื้อยางไม่ให้เคลื่อนตัวสูงที่ระนาบดังกล่าว ส่งผลให้เกิดความเค้นอุทกสถิตสูง เมื่อเปรียบเทียบกับระนาบอื่นๆตามแนวความหนา

การยึดติดของรอยต่อชิ้นงานด้วยชั้นกาวบางที่มีสมบัติการต้านทานแรงเฉือนที่ต่างกัน ทำให้ความสามารถในการเหนี่ยวรั้งการเคลื่อนที่ของยางในแนวด้านข้างแตกต่างกันด้วย ชั้นกาวบางที่มีความต้านทานแรงเฉือนสูง ทำให้พื้นผิวรอยต่อเคลื่อนตัวในแนวตั้งฉากกับแรงได้น้อย และสามารถเหนี่ยวรั้งต้านการเคลื่อนที่ได้ดีกว่าชั้นกาวที่ความต้านทานแรงเฉือนต่ำ ทำให้ชิ้นงานเกิดความเค้นอุทกสถิตสูงกว่าเมื่อชิ้นงานรับแรงกด และต้องใช้แรงกดสูงกว่าชิ้นงานที่เชื่อมต่อด้วยกาวที่มีความต้านทานแรงเฉือนต่ำเพื่อให้ได้ระยะยุบตัวของชิ้นงานที่เท่ากัน และเมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนค่าความต้านทานแรงเฉือนของชั้นกาวต่อค่าความเค้นอุทกสถิตในเนื้อยางสามารถแบ่งพฤติกรรมได้เป็นสองช่วงคือ ช่วงค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวต่ำกว่าค่ามอดูลัสของยาง และช่วงค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวสูงกว่าค่ามอดูลัสของยาง โดยพบว่าช่วงที่ค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวต่ำกว่าค่ามอดูลัสของยางคือต่ำกว่า 10 MPa ไปจนถึง 0.01 MPa พบว่าเนื้อยางบริเวณรอยต่อกับกาวและโลหะสามารถเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับแรงได้ขณะที่มีชั้นกาวที่มีความต้านทานแรงเฉือนต่ำเหนี่ยวรั้งอยู่ และค่าความเค้นอุทกสถิตในเนื้อยางจะมีค่าลดลงเมื่อค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวลดลง เนื่องจากค่ากาวที่มีค่าความต้านทานแรงเฉือนต่ำกว่าจะเหนี่ยวรั้งการเคลื่อนที่ของเนื้อยางบริเวณรอยต่อได้น้อยกว่าชิ้นงานที่เชื่อมด้วยกาวที่มีความต้านทานแรงเฉือนสูงกว่า ทำให้เนื้อยางบริเวณรอยต่อเคลื่อนที่ได้ดีกว่า ส่วนช่วงที่ค่าความต้านทานแรงเฉือนของกาวสูงกว่าค่ามอดูลัสของยางคือสูงกว่า 10 MPa ขึ้นไปจนถึง 1000 MPa ค่าความเค้นอุทกสถิตที่เกิดขึ้นในเนื้อยางมีค่าคงที่ เท่ากับที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานเชื่อมต่อแบบสมบูรณ์ ซึ่งชิ้นงานที่เชื่อมต่อแบบสมบูรณ์ลักษณะนี้ เนื้อยางบริเวณรอยต่อกับโลหะจะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับแรง และผลของความต้านทานแรงเฉือนของกาวที่สูงกว่ามอดูลัสของยาง จะสามารถยึดหรือเหนี่ยวรั้งเนื้อยางบริเวณรอยต่อกับกาวและโลหะไม่ให้เกิดกาวเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับแรง ขณะที่เนื้อยางบริเวณอื่นสามารถเคลื่อนที่ได้ เช่นเดียวกับการเชื่อมต่อแบบสมบูรณ์

ตัวประกอบรูปทรง (Shape Factor) หรืออัตราส่วนระหว่างพื้นรอยต่อหรือพื้นที่รับแรงของชิ้นงานต่อพื้นที่ด้านข้างหรือพื้นที่ผิวอิสระของชิ้นงาน จะส่งผลต่อค่าความเค้นอุทกสถิตที่เกิดขึ้น โดยพื้นที่ผิวอิสระด้านข้างชิ้นงานที่น้อยจะจำกัดการเคลื่อนในแนวด้านข้างได้สูง ส่งผลให้ความเค้นอุทกสถิตที่เกิดขึ้นในชิ้นงานโดยรวมสูง

6.6 สรุปผล

1. ชั้นกาวบางที่มีความต้านทานแรงเฉือนสูงกว่าค่ามอดูลัสของยาง จะสามารถยึดไม่ให้เนื้อยางบริเวณรอยต่อกับกาวและโลหะเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับแรงเมื่อชิ้นงานรับแรงกด เช่นเดียวกับชิ้นงานที่เชื่อมต่อแบบสมบูรณ์ ทำให้ค่าความเค้นอุทกสถิตและค่าความแข็งตึงของยางของชิ้นงานที่เชื่อมต่อด้วยกาวที่มีความต้านทานแรงเฉือนสูงกว่าค่ามอดูลัสของยางเท่ากับในชิ้นงานที่เชื่อมต่อแบบสมบูรณ์

2. ชั้นกาวบางที่มีความต้านทานแรงเฉือนต่ำกว่าค่ามอดูลัสของยาง จะช่วยเพิ่มการเหนี่ยวรั้งหรือต้านทานไม่ให้เนื้อยางเกิดการเปลี่ยนรูปหรือเคลื่อนตัวในแนวด้านข้างเมื่อชิ้นงานรับแรงกด เมื่อชั้นกาวที่ใช้เชื่อมต่อชิ้นงานมีความต้านทานแรงเฉือนลดลง จะเหนี่ยวรั้งหรือต้านทานการเปลี่ยนรูปได้น้อยลง ทำให้ความเค้นอุทกสถิต และค่าความแข็งตึงของยางลดลง

3. ค่าตัวประกอบรูปทรง (Shape Factor) ของชิ้นยางเพิ่มขึ้น หรืออัตราส่วนระหว่างพื้นที่ของชิ้นงานส่วนที่รับแรงต่อพื้นที่ด้านข้างชิ้นงานส่วนที่ไม่ได้รับแรงมีค่าสูงขึ้น ส่งผลให้การเหนี่ยวรั้งการต้านทานการเปลี่ยนรูปในเนื้อยางเพิ่มขึ้น และค่าความเค้นอุทกสถิตในเนื้อยางเพิ่มขึ้น