บทที่ 10
บทสรุป ปัญหาที่พบและข้อเสนอแนะ

10.1 บทสรุป

วิทยานิพนธ์นี้ได้แสดงวิธีการประยุกต์ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในการแก้ปัญหารอยร้าวในวัตถุยืดหยุ่นได้ในสองมิติ โดยในสองบทแรกจะกล่าวถึงทฤษฎีในการเข้าถึงปัญหารอยร้าว ซึ่งแนวทางที่เหมาะสมก็คือ แนวทางของกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น ดังนั้นในบทที่ 2 จึงได้กล่าวถึงความรู้พื้นฐาน และทฤษฎีการแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้น เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาความล้าได้ จากนั้นจึงทำการประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ากับปัญหาดังกล่าวในบทที่ 4 ซึ่งจะเริ่มจากการกล่าวถึงความหมายทางกายภาพของระบบสมการเชิงอนุพันธ์สำหรับปัญหาของแข็งยืดหยุ่นได้ พร้อมทั้งเงื่อนไขขอบเขตที่จำเป็นในการแก้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์ดังกล่าว ในขั้นต่อมาจึงได้ประดิษฐ์สมการไฟไนต์เอลิเมนต์จากระบบสมการเชิงอนุพันธ์ด้วยวิธีการถ่วงน้ำหนักเศษตกค้าง แล้วจึงประยุกต์แนวคิดทั้งหมดนี้เข้ากับปัญหารอยร้าว ซึ่งจะแสดงถึงลักษณะของเอลิเมนต์สำหรับปลายรอยร้าวการหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น รวมถึงขั้นตอนในการทำนาย แนวทางเดินของรอยร้าวด้วย

หลังจากทำความเข้าใจในการประยุกต์ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เข้ากับปัญหารอยร้าวแล้ว จึงได้ทำการประดิษฐ์โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สอดคล้องกัน และสามารถคำนวณบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลได้ ดังมีรายละเอียดในบทที่ 5 โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ถูกประดิษฐ์ขึ้นมีชื่อว่า KFACTOR ซึ่งเขียนโดยภาษาฟอร์แทรน และในบทที่ 6 ได้นำเอาเทคนิคการปรับขนาดของเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาประยุกต์เข้ากับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้น เพื่อให้ได้ผลเฉลยที่มีความแม่นยำยิ่งขึ้น โดยไม่จำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์ขนาดเล็กเป็นจำนวนมาก

ในบทที่ 7 ได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์ที่ได้จากไฟไนต์เอลิเมนต์ร่วมกับเทคนิคการปรับขนาดของเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติ โดยเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณเชิงวิเคราะห์ด้วยวิธีการอื่นๆ ซึ่งปัญหาที่นำมาใช้ในการตรวจสอบนี้ เป็นปัญหารอยร้าวในรูปแบบอย่างง่ายทั้งหมด 5 ปัญหา ได้แก่ แผ่นสี่เหลี่ยมแบนที่มีรอยร้าวตรงกลางภายใต้ความเค้นดึง แผ่นสี่เหลี่ยมแบนที่มีรอยร้าวอยู่ที่ขอบข้างเดียวภายใต้ความเค้นดึง แผ่นสี่เหลี่ยมแบนที่มีรอยร้าวอยู่ที่ขอบทั้งสองข้างภายใต้ความเค้นดึง ปัญหารอยร้าวที่ขอบของรูเจาะในแผ่นแบนภายใต้ความเค้นดึง และปัญหารอยร้าวที่ขอบของรอยเจาะที่ขอบทั้งสองข้างของแผ่นแบนภายใต้ความเค้นดึง โดยหลังจากการทดสอบความถูกต้องของโปรแกรมจนเกิด

ความมั่นใจแล้ว จึงได้นำไปวิเคราะห์การทำนายอายุของรอยร้าวในชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT และแบบคานดัดสามจุดกด ซึ่งชิ้นทดสอบทั้งสองนี้จะก่อให้เกิดภาระต่อรอยร้าวเป็นภาระแบบที่ 1 เพียงอย่างเดียว ต่อมาจะนำไปคำนวณปัญหารอยร้าวที่รับภาระแบบผสมทั้งแบบที่ 1 และแบบที่ 2 โดยตัวอย่างที่นำมาแสดงมีดังนี้คือ ปัญหาการคำนวณหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นในแผ่นแบนที่มีรอยร้าวที่ขอบภายใต้ความเค้นเฉือน และปัญหาสุดท้ายเป็นปัญหาการทำนายทิศทางแนวทางเดินของรอยร้าวในแผ่นแบนที่มีรอยร้าวที่ขอบภายใต้ความเค้นเฉือน

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ได้ประดิษฐ์ขึ้นนี้ได้นำเอาเทคนิคการปรับขนาดของเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้ โดยเทคนิคดังกล่าวนี้จะทำการปรับขนาดของเอลิเมนต์ให้มีขนาดที่เหมาะสมตลอดทั้งปัญหาโดยอัตโนมัติ ทำให้ผลเฉลยที่ได้มีความแม่นยำสูงขึ้นโดยไม่จำเป็นต้องใช้เอลิเมนต์เป็นจำนวนมาก ช่วยให้ประหยัดเวลาในการคำนวณและหน่วยความจำของเครื่องคอมพิวเตอร์เป็นอย่างมาก

10.2 ปัญหาที่พบในขณะทำวิทยานิพนธ์

- ปัญหาลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ทำการประยุกต์กลศาสตร์การแตกหักของเชิงเส้นเข้ากับปัญหารอยร้าวในวัตถุยืดหยุ่นได้ ซึ่งจากทางทฤษฎีพบว่าความเค้นที่เกิดพื้นที่บริเวณปลายรอยร้าวจะมีค่าเข้าสู่อนันต์ ดังนั้นเอลิเมนต์ที่ใช้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อผลเฉลยที่จะเกิดขึ้น โดยในขั้นแรกผู้วิจัยได้ทดลองใช้เอลิเมนต์แบบสามเหลี่ยมต่อสามจุดร่วมกับเทคนิคการปรับขนาดของเอลิเมนต์ ซึ่งพบว่าในการหาค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นโดยวิธีการประมาณการเคลื่อนตัวนั้นค่อนข้างยุ่งยากและมีความแม่นยำไม่สูงนัก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาเอลิเมนต์ที่ก่อให้เกิดความเค้นแบบกูลาร์ดี้ที่ปลายรอยร้าวซึ่งเป็นลักษณะของเอลิเมนต์ที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ คือ เอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบหกจุดต่อซึ่งเลื่อนจุดต่อกลางด้านที่ติดกับปลายรอยร้าวไปอยู่ที่ตำแหน่งหนึ่งในสี่ ดังรูปที่ 4.8 โดยใช้เอลิเมนต์ชนิดนี้ล้อมรอบปลายรอยร้าวและจากผลการคำนวณพบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีความแม่นยำค่อนข้างสูง

- ปัญหาการวางตัวของเอลิเมนต์สำหรับปลายรอยร้าว

สำหรับการวางตัวของเอลิเมนต์สำหรับปลายรอยร้าวนั้น จากการศึกษาพบว่าหากไม่ทำการจัดเอลิเมนต์ที่ปลายรอยร้าวให้อยู่ในลักษณะที่เป็นระเบียบล้อมรอบจุดปลายรอยร้าวจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ค่อนข้างคลาดเคลื่อนมากแม้จะประยุกต์เทคนิคการปรับขนาดของเอลิเมนต์โดยอัตโนมัติเข้าไปแล้วก็ตาม ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้ทำการจัดเรียงเอลิเมนต์รอบๆ

จุดปลายรอยร้าวอย่างเป็นระเบียบ (Rosette) ซึ่งมีผลให้ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นมีความแม่นยำมากขึ้น

- ปัญหาในการทดลองชิ้นทดสอบ

สำหรับในการวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบชิ้นทดสอบมาตรฐานแบบ CT และแบบคานดัดสามจุดกด ซึ่งปัญหาที่พบมักจะอยู่ที่การติดตั้งชิ้นทดสอบ เนื่องจากหากทำการติดตั้งไม่เหมาะสมเครื่องจะไม่สามารถทำงานได้ นอกจากนี้ยังพบปัญหาในการกำหนดภาระที่กระทำชิ้นทดสอบเนื่องจากภาระที่ตั้งบนแผงควบคุมอาจมีค่าไม่ตรงกับภาระที่กระทำได้จริง ดังนั้นในการทดสอบแต่ละครั้งทำการสอบเทียบเครื่องมือก่อน และปัญหาที่พบอีกปัญหาหนึ่งคือปัญหาความเรียบของผิวชิ้นงาน เนื่องจากชิ้นงานที่ทำการกลึงมาไม่เรียบจะทำให้มองเห็นรอยร้าวได้ลำบากเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ ดังนั้นจึงควรมีการเตรียมผิวของชิ้นงานให้ดีเสียก่อน

10.3 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ในงานวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการวิเคราะห์ปัญหารอยร้าวโดยใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งสามารถนำไปสู่งานวิจัยที่ต่อเนื่องได้หลายแนวทางด้วยกัน อันได้แก่

1. การศึกษาถึงลักษณะของเอลิเมนต์ที่ใช้ในบริเวณปลายรอยร้าว อาจเลือกใช้เอลิเมนต์สี่เหลี่ยมแปดจุดต่อ ซึ่งสามารถก่อให้เกิดความเค้นแบบซิงกูลาริตี้ที่จุดปลายรอยร้าวได้เช่นกัน และทำให้การคำนวณมีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น เนื่องจากเอลิเมนต์ดังกล่าวนี้ จะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับเอลิเมนต์สามเหลี่ยมแบบหกจุดต่อ แต่จำนวนสมการที่ใช้ในการคำนวณน้อยกว่า

2. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหาการทำนายแนวทางเดินของรอยร้าวที่มีแนวรอยร้าวมากกว่าหนึ่งแนวในชิ้นงานได้

3. การพัฒนาโปรแกรมคอมพิวเตอร์ เพื่อหาพารามิเตอร์อื่นๆ ที่สำคัญ ซึ่งแสดงถึงสภาวะของความรุนแรงของรอยร้าว สำหรับชิ้นงานที่อยู่นอกเหนือขอบเขตของวัตถุยืดหยุ่นได้ เช่น คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ J-integral ซึ่งช่วยให้สามารถประยุกต์ใช้ได้กับวัตถุที่มีบริเวณเสียรูปมากเกินขอบเขตของทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักยืดหยุ่นเชิงเส้นได้, คำนวณหาค่าพารามิเตอร์ C^* ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถแสดงถึงผลของความคืบได้ เป็นต้น

4. การประยุกต์เอลิเมนต์แบบสามมิติ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ปัญหารอยร้าวในวัตถุยืดหยุ่นได้ในสามมิติ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับปัญหาจริงในวงการอุตสาหกรรมได้ดียิ่งขึ้น