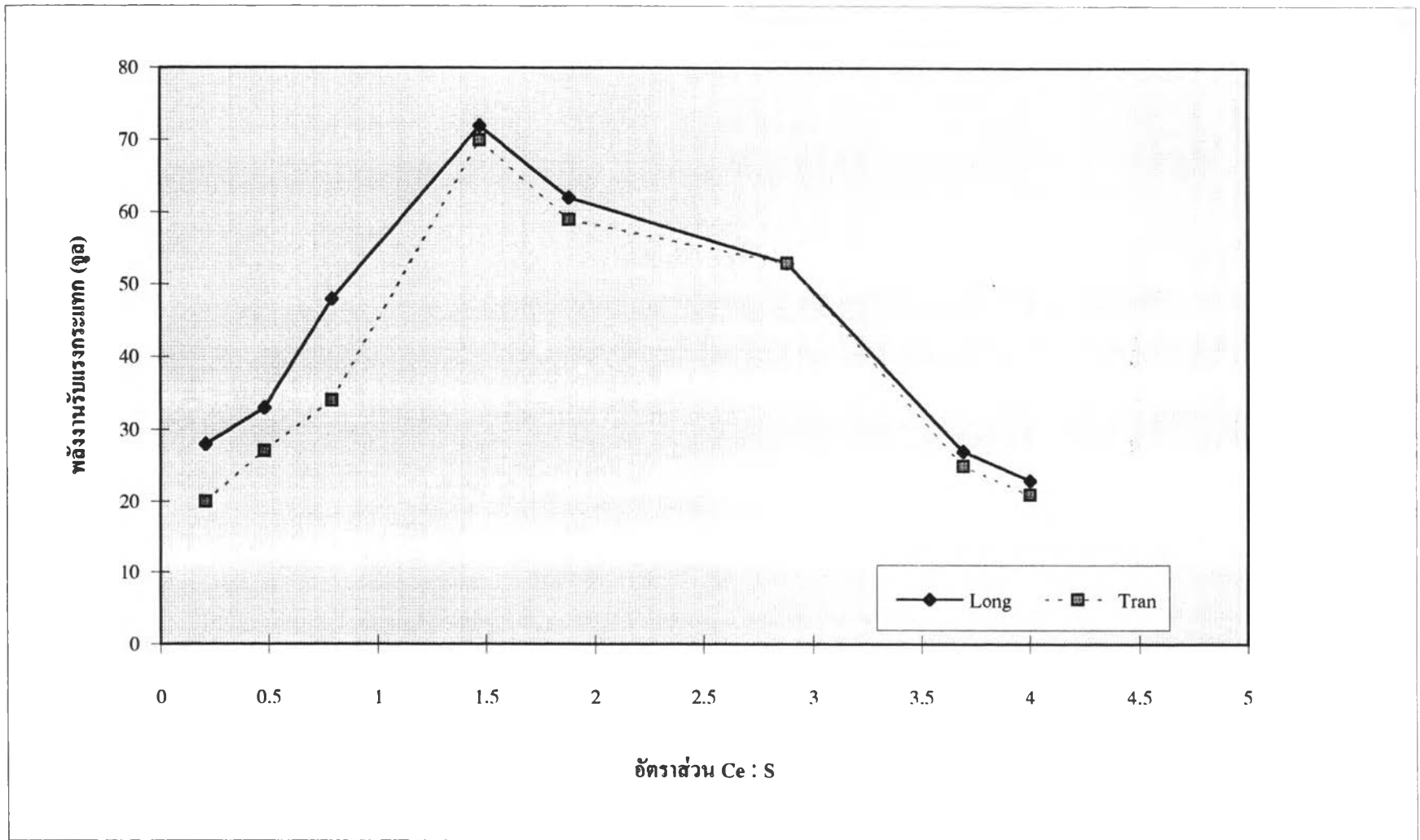


## บทที่ 5

### การอธิบายผลงานทดลอง

#### การรับแรงกระแทก

The Charpy V-Notch (CVN) Toughness เป็นค่าที่ได้จากการทดสอบซึ่งใช้สำหรับการศึกษาพฤติกรรมการแตกหักของโลหะโดยเฉพาะเหล็กกล้า โดยการวัดค่าปริมาณของพลังงานที่ใช้ไปในการทำให้ชิ้นงานทดสอบแตกหัก ถ้าการแตกหักเป็นแบบการแตกเหนียว พลังงานที่ใช้จะมีค่ามากขณะที่การแตกเปราะจะใช้พลังงานน้อยกว่า จากตารางที่ 4.1 ค่าของพลังงานรับแรงกระแทกของชิ้นงานที่ผ่านการชุบขึ้นรูปและควบคุมรูปร่างของซิลิโคนคลุ้ชด้วย MM. โดยเริ่มตั้งแต่อัตราส่วนของ Ce:S ที่ 0.21 (ไม่ได้อัล MM.) จนถึง 4.00 ทั้งในทิศทางตามแนวการขึ้นรูป, Long และทิศทางขวางการขึ้นรูป, Tran มาเขียนกราฟดังแสดงในรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานรับแรงกระทำ กับอัตราส่วน Ce : S ในชิ้นงานทดลอง

จากรูปที่ 5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานรับแรงกระทำกับอัตราส่วน Ce:S ในชิ้นงานทดลอง พบว่าสามารถแบ่งกราฟออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงเพิ่มพลังงานรับแรงกระทำ ตั้งแต่อัตราส่วน Ce:S เท่ากับ 0.21 จนถึง 1.47 กับช่วงลดพลังงานเริ่มจากอัตราส่วนที่มากกว่า 1.47 จนถึง 4.00 ในช่วงแรก การเพิ่มอัตราส่วนดังกล่าวจะเพิ่มค่าพลังงานรับแรงกระทำทั้งในทิศทาง Long และ Tran และค่าของทั้งสองทิศทางก็จะขยับเข้าใกล้กันเรื่อย ๆ จนถึงอัตราส่วน 1.47 ซึ่งที่จุดนี้สามารถกล่าวได้ว่าวัสดุเป็นไอโซทรอปิกของพลังงานรับแรงกระทำ ( ทิศ Long เท่ากับ 72 และ Tran เท่ากับ 70 จูล) การเพิ่มพลังงานรับแรงกระทำจากอัตราส่วน 0.21 ถึง 1.47 ในทิศ Long จะเพิ่มจาก 28 ไปถึง 72 จูล คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่ม 157% ในทิศ Tran เพิ่มจาก 20 ไปถึง 70 จูล คิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มถึง 250% จากการตรวจพื้นผิวรอยแตกของชิ้นงานหลังจากการทดสอบแรงกระทำเพื่อหาสาเหตุ Shear Fracture โดยใช้ชิ้นงานหมายเลข 11, 22 และ 23 ซึ่งมีค่าอัตราส่วนที่ 0.21, 0.79 และ 1.47 ตามลำดับ ในทิศ Tran ดังแสดงในรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 พื้นผิวรอยแตกจะบิดเบี้ยวหรือแสดงพฤติกรรมการแตกหักของชิ้นงานได้ว่าเป็นการแตกเหนียวหรือแตกเปราะอย่างไร โดยถ้าแตกเหนียวพื้นผิวดังกล่าวจะมีลักษณะขรุขระ สาก เป็นเส้น ๆ สีคล้ำและผิวหน้าจะแสดงให้เห็นถึงการบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นในระหว่างการแตกหัก เช่น รูปที่ 4.3 ส่วนการแตกเปราะจะมีผิวหน้าที่เรียบเป็นประกายสว่างสะท้อนแสงเป็นแนวเป็นแนว ผิวหน้าจะมีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสเกือบสมบูรณ์ ซึ่งแสดงว่าการแตกหักเกิดขึ้นโดยแทบจะไม่มีการแปรรูปถาวรที่เรียกว่า plasticity อยู่เลยเช่น รูปที่ 4.5 จากรูป 4.1, 4.2 และ 4.3 จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ Shear Fracture เท่ากับ 31, 40 และ 82% ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนพฤติกรรมการแตกหักจากการแตกเปราะ รูป 4.1 อัตราส่วน 0.21 มาเป็นการแตกเหนียวมากขึ้นจนถึงรูปที่ 4.3 อัตราส่วน 1.47 ซึ่งสอดคล้องกับกราฟในช่วงการเพิ่มพลังงานรับแรงกระทำ ได้มีความพยายามอย่างเต็มที่ในการที่จะรักษาให้ชิ้นงานทดลองทุกชิ้นมี

สภาพทุกอย่างเหมือนกันมากที่สุด โดยการสร้างกระบวนการทุกขั้นตอนที่ขึ้นงานทดลองผ่านให้มีความคงที่ ยกเว้นอย่างเดียวคือการเติม MM. ลงไปในขั้นตอนการหล่อ หลอม เหล็กกล้าที่ปริมาณต่าง ๆ กัน เพื่อให้ MM. เป็นพารามิเตอร์เดียวของงานทดลองนี้ การเติม MM. เพื่อให้แร่เอิร์ทไปจับกับกำมะถันแทนที่แมงกานีสเกิดเป็นซิลิไซด์ใหม่แปรรูปในระหว่างกระบวนการทุบขึ้นรูป จากการศึกษาเรื่อง Stress Concentration สมการ (2.12) และ (2.13) พบว่า ถ้าอินคลูชันยึดตัวมากและมีปลายแหลมมากเท่าไร ค่า Stress Concentration ก็ยิ่งมากขึ้นเท่านั้นและถ้ามีความมากจนถึงค่าวิกฤตก็จะเกิดรอยร้าวและเกิดการสืบของรอยร้าวอย่างรวดเร็ว อันจะทำให้ชิ้นงานเกิดการแตกหักแบบเปราะจากการตรวจโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานทดลอง ในช่วงการเพิ่มพลังงานรับแรงกระทำทั้งในทิศทาง Long และ Tran หมายเลข 11, 22 และ 23 ซึ่งมีอัตราส่วนดังกล่าวมาแล้วได้แสดงในรูปที่ 4.8 ถึง 4.20 โดยความยาวของอินคลูชันได้ลดลงเรื่อย ๆ พร้อม ๆ กับความกลมมากขึ้นเรื่อย ๆ รวมทั้งมีความแตกต่างระหว่างสองทิศทางน้อยลงเช่นกัน ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานรับแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น

ในส่วนในช่วงการลดลงของพลังงานรับแรงกระทำ โดยเริ่มจากอัตราส่วนของ Ce:S ที่มากกว่า 1.47 จนถึง 4.00 พลังงานดังกล่าวมีค่าลดลงโดยตลอด การตรวจพื้นผิวรอยแตกโดยใช้ชิ้นงานหมายเลข 27 เป็นตัวศึกษาพบว่า พฤติกรรมการแตกหักกลับไปเป็นการแตกเปราะโดยมีค่าเปอร์เซ็นต์ Shear Fracture ที่ 31% ดังแสดงในรูปที่ 4.4 จุดที่น่าสนใจของชิ้นงานหมายเลข 27 ก็คือเมื่อชิ้นงานผ่านกระบวนการทุบขึ้นรูปในสถานะที่เหมือนกับชิ้นงานอื่น ๆ ชิ้นงานนี้กลับเกิดรอยแตกรอยร้าวบริเวณพื้นผิวชิ้นงานโดยรอบดังแสดงในรูปที่ 4.26 ถึง 4.30 และจากการตรวจรอยแตกดังกล่าวที่กำลังขยาย 500 และ 200X พบว่าเป็นรอยแตกตามขอบเกรนที่เรียกว่า Intergranular Crack ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33 นอกจากนั้นจากการตรวจโครงสร้างจุลภาคพบว่า มีซิลิไซด์อินคลูชันที่ตกผลึกอยู่ตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และยัง

พบโลหะผสม Fe-Ce ที่บริเวณขอบเกรนดังแสดงในรูปที่ 4.24 และ 4.25 อย่างไรก็ตามโครงสร้างจุลภาคยังประกอบไปด้วย ซัลไฟด์อินคลูชันที่มีรูปร่างกลมเหมือนในชิ้นงานหมายเลข 23 แต่มีขนาดเล็กกว่า ดังแสดงในรูป 4.21 ถึง 4.23 ดังตรงนี้สามารถอธิบายได้ว่า เมื่อมีการเติมแร่เอิร์ทในเหล็กกล้าในปริมาณที่มากเกินไป เช่น ชิ้นงานหมายเลข 27 อัตราส่วน Ce : S เท่ากับ 4 ซึ่งซีเรียมที่มีปริมาณมากนี้จะจับตัวกับกำมะถันและคกผลึกเป็นซีเรียมซัลไฟด์ที่กระจุกกระจายและมีขนาดเล็กกว่า ดังรูป 4.21 ถึง 4.23 แต่ซีเรียมที่มีปริมาณมากเกินไป เมื่อจับกับกำมะถันหมดแล้วและด้วยเหตุที่ซีเรียมนั้นแทบจะไม่สามารถละลายในเหล็กได้เลยในสภาวะของแข็ง ดังนั้นระหว่างกระบวนการแข็งตัวของน้ำเหล็ก ซีเรียมที่เหลือดังกล่าวจะถูกผลักให้ไปอยู่ตามบริเวณขอบเกรนและเกิดเป็นสารประกอบเชิงโลหะกับเหล็กได้แก่  $CeFe_2$  ซึ่งมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ 1070 C (Brandes, ed., 1983) และถ้าส่วนผสมบริเวณไหนเป็นส่วนผสมของยูเทคติก Ce-Fe ที่มี Ce 92.5% อุณหภูมิยูเทคติก คือ 592 C (Luyckx, 1980) เมื่อนำชิ้นงานไปขึ้นรูปร้อนจึงเกิดการแตกเปราะที่อุณหภูมิสูงอย่างรุนแรง ดังแสดงในรูป 4.24 ถึง 4.33 รอยแตกลักษณะดังกล่าวเริ่มเห็นชัดเจนที่ชิ้นงานหมายเลข 26 ดังนั้นการเติมแร่เอิร์ทที่มากเกินไปจึงเป็นจุดที่ต้องระมัดระวังอย่างยิ่งอันเป็นส่วนสำคัญส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของ Ce:S ซึ่งจากที่กล่าวมาทั้งหมดนั้นพบว่าอัตราส่วนของ Ce:S ในการควบคุมรูปร่างของซัลไฟด์อินคลูชันเพื่อการปรับปรุงพลังงานรับแรงกระแทก มีค่าอัตราส่วนที่ดีที่สุดอยู่ที่ประมาณ 1.5 และควรระมัดระวังอย่างยิ่งเมื่อค่าอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าเกิน 3 อย่างไรก็ตามอัตราส่วนดังกล่าวได้มาที่เปอร์เซ็นต์การลดลงของความหนาชิ้นงานเท่ากับ 50%

### โครงสร้างจุลภาค

จากรูปที่ 4.6 แสดงซัลไฟด์อินคลูชันของชิ้นงานหมายเลข 10 ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่ได้ชุบขึ้นรูปและไม่ได้ควบคุมรูปร่างของซัลไฟด์อินคลูชัน จากการตรวจ SEM. ในรูป 4.7 ยืนยันว่าอินคลูชันดังกล่าวเป็นแมงกานีสซัลไฟด์

อินคลูชัน และจากตารางที่ 3.3 ปริมาณออกซิเจนในเหล็กอยู่ที่ 0.011% ซึ่งจัดเป็น MnS กลุ่มที่ 1 แต่ปริมาณออกซิเจนก็ไม่มากพอที่จะได้ MnS กลมตลอด ดังรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.8 แสดงรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชันของชิ้นงานหมายเลข 11 ในทิศทาง Long ซึ่งเป็นชิ้นงานที่ไม่ได้ควบคุมรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชัน พบว่าเมื่อนำชิ้นงานไปผ่านกระบวนการชุบขึ้นรูปซิลไฟด์อินคลูชันจะเกิดการยึดตัวอย่างรุนแรงมีลักษณะยาวรี โดยเฉพาะในทิศทาง Long ซึ่งทำให้เกิด Stress Concentration สูง ชิ้นงานจะแตกเปราะเมื่อรับแรงกระแทกและจากการตรวจ SEM. พบว่าเป็น MnS อินคลูชัน เหมือนชิ้นงานหมายเลข 10 ดังแสดงในรูป 4.9

รูปที่ 4.10 แสดงรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชันของชิ้นงานหมายเลข 11 ในทิศทาง Tran พบว่าเกิดการยึดตัวอย่างรุนแรงเช่นเดียวกันแต่ก็ยังมีน้อยกว่าในทิศทาง Long และจากการตรวจด้วย SEM. พบว่าเป็น MnS อินคลูชันเช่นเดียวกันดังแสดงในรูป 4.11

รูปที่ 4.12 แสดงรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชันของชิ้นงานหมายเลข 22 ในทิศทาง Long ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีการควบคุมรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชัน โดยมีอัตราส่วน Ce:S เท่ากับ 0.79 พบว่าอินคลูชันเริ่มมีบางส่วนที่ไม่ยึดตัวเต็มที่มีความยาวลดลง รวมทั้งมีลักษณะกลมมนมากขึ้น จากการตรวจด้วย SEM. พบว่ามีซีเรียมซิลไฟด์ ซีเรียมออกไซด์ซิลไฟด์ แต่ก็ยังมีแมงกานีสซิลไฟด์อยู่ด้วยดังแสดงในรูปที่ 4.13 และจากรูป 4.13 ในบริเวณ ก. เมื่อนำมาตรวจด้วย SEM. พบว่าเป็นอนุภาคนาอินคลูชันดังแสดงในรูป 4.14

รูปที่ 4.15 แสดงรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชันของชิ้นงานหมายเลข 22 ในทิศทาง Tran ซึ่งจะเห็นได้อย่างชัดเจนถึงการควบคุมซิลไฟด์อินคลูชันบางส่วนไม่ให้ยึดตัว ในทิศทางนี้ความยาวของอินคลูชันจะลดลงอีกและมีความกลมมากยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามก็ยังแสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนของ Ce:S ที่ 0.79 ยังน้อยเกินไปสำหรับการควบคุมรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชันและจากการตรวจด้วย SEM.

พบว่ามิลักษณะเดียวกันกับรูปที่ 4.14 ในทิศทาง Long แต่ไม่พบoluminaอินคลูชัน ดังแสดงในรูป 4.16

รูปที่ 4.17 และ 4.18 แสดงซิลไฟด์อินคลูชันของชิ้นงานหมายเลข 23 ในทิศทางทั้ง Long และ Tran ซึ่งมีอัตราส่วน Ce:S เท่ากับ 1.47 พบว่าสามารถควบคุมรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชันได้อย่างสมบูรณ์ โดยรูปร่างกลมมากกว่าชิ้นงานหมายเลข 10 และมีขนาดเล็กกว่า มีการกระจายกระจายอย่างสม่ำเสมอ ลักษณะรูปร่างและขนาดของทั้งสองทิศทางก็เหมือน ๆ กันด้วย จึงทำให้มีค่าพลังงานรับแรงกระแทกสูงสุดรวมทั้งมีความเป็นไอโซโทรปีด้วย และจากการตรวจด้วยSEM. พบว่าอินคลูชันอยู่ในรูปของซี เรียมซิลไฟด์และซี เรียมออกซิซิลไฟด์อย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.19

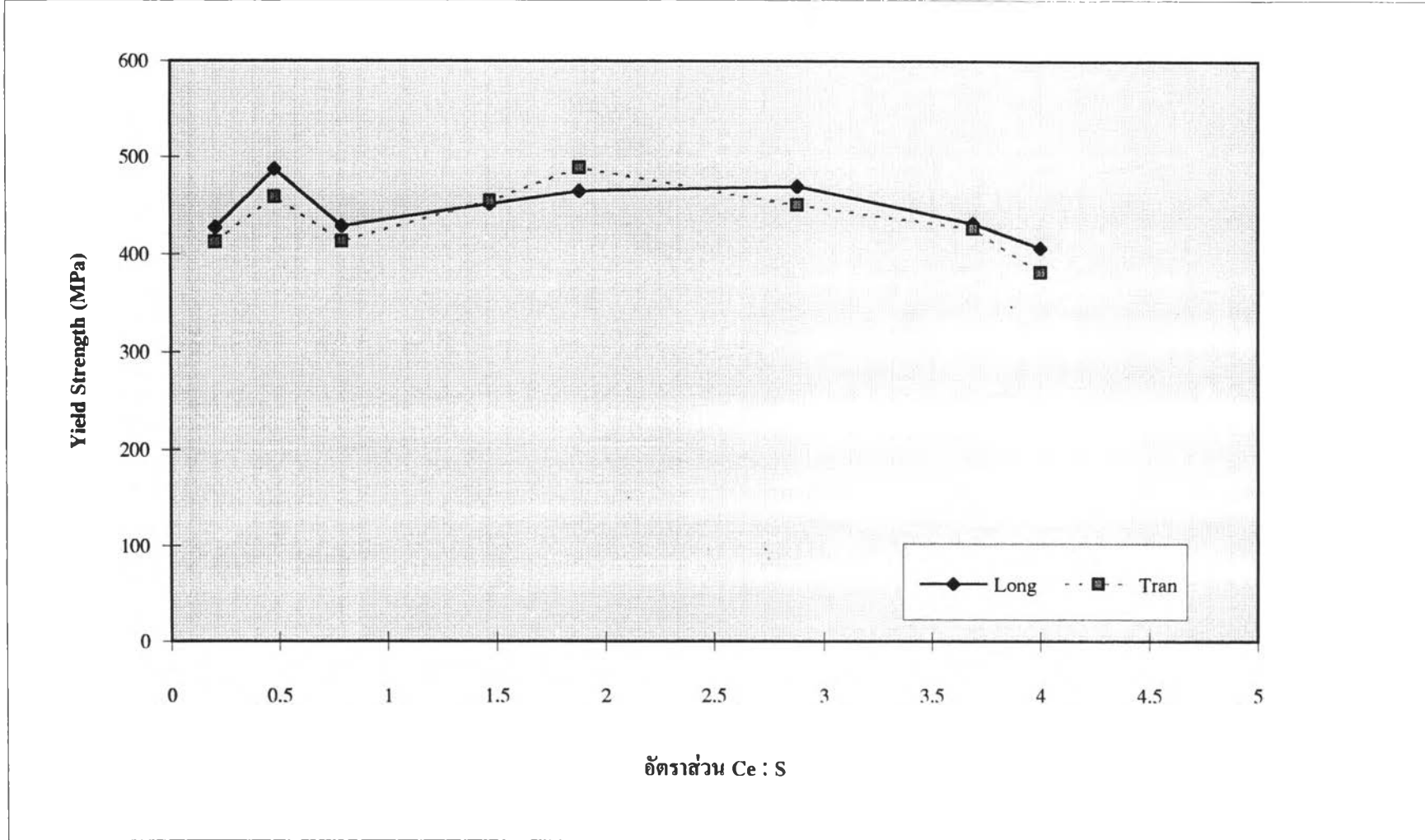
รูปที่ 4.21 และ 4.22 แสดงซิลไฟด์อินคลูชันของชิ้นงานหมายเลข 27 ทั้งในทิศทางLongและTran ซึ่งชิ้นงานนี้มีซี เรียมในปริมาณที่มากเกินไปจนทำให้มีอัตราส่วน Ce:S เท่ากับ 4 พบว่าซิลไฟด์อินคลูชันบางส่วนมีลักษณะกลมเหมือนในชิ้นงานหมายเลข 23 แต่ขนาดเล็กกว่า และจากการตรวจด้วย SEM. พบว่ามีซี เรียมอยู่สูงแต่ก็ยังเป็นซี เรียมซิลไฟด์ และซี เรียมออกซิซิลไฟด์ ดังแสดงในรูปที่ 4.23 อย่างไรก็ตามจะพบสารประกอบเชิงโลหะเหล็ก-ซี เรียม คกลมเล็กอยู่ตามบริเวณขอบเกรน จากการตรวจด้วย SEM. ดังแสดงในรูป 4.24 และ 4.25 และบางบริเวณก็ยังพบซิลไฟด์อินคลูชันที่คกลมเล็กตามขอบเกรนดังรูปที่ 4.31 ซึ่งทำให้ชิ้นงานนี้มีการแตกเปราะอย่างรุนแรง ค่าพลังงานรับแรงกระแทกลดต่ำลง จากการตรวจสอบรอยแตกพบว่าเป็นการแตกตามขอบเกรน ดังแสดงในรูปที่ 4.32 และ 4.33

รูปที่ 4.37 และ 4.38 เป็นการวัดขนาดเกรนของชิ้นงานทดลอง โดยใช้วิธี Linear Intersected Segment Method ตาม ISO 643-1983 ซึ่งจะได้ค่า Mean Intersected Segment ของชิ้นงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 0.02 มิลลิเมตร แสดงว่าแร่ฮีทไมต์ไม่ส่งผลใด ๆ ถึงขนาดของเกรนเหล็กกล้า ซึ่งตรงกับงานของ Luyckx และคนอื่น ๆ (1970)

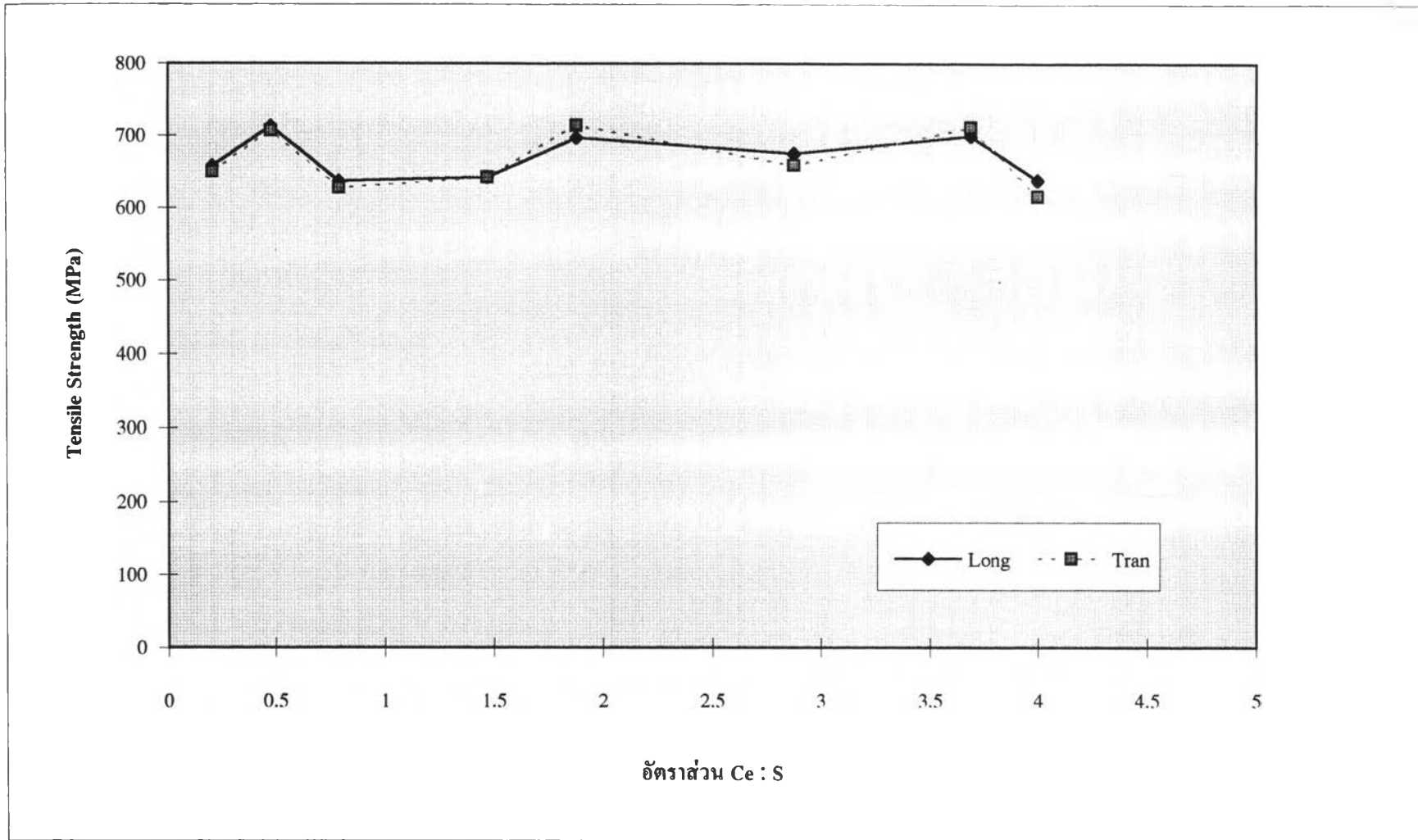
**คุณสมบัติแรงดึง**

จากตารางที่ 4.2 นำผลการทดสอบ Yeild Strength และ Tensile Strength มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์กับอัตราส่วน Ce:S ดังแสดงในรูปที่ 5.2 และ 5.3





รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield Strength กับอัตราส่วน Ce : S ในชิ้นงานทดลอง



รูปที่ 5.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile Strength กับอัตราส่วน Ce : S ในชิ้นงานทดลอง

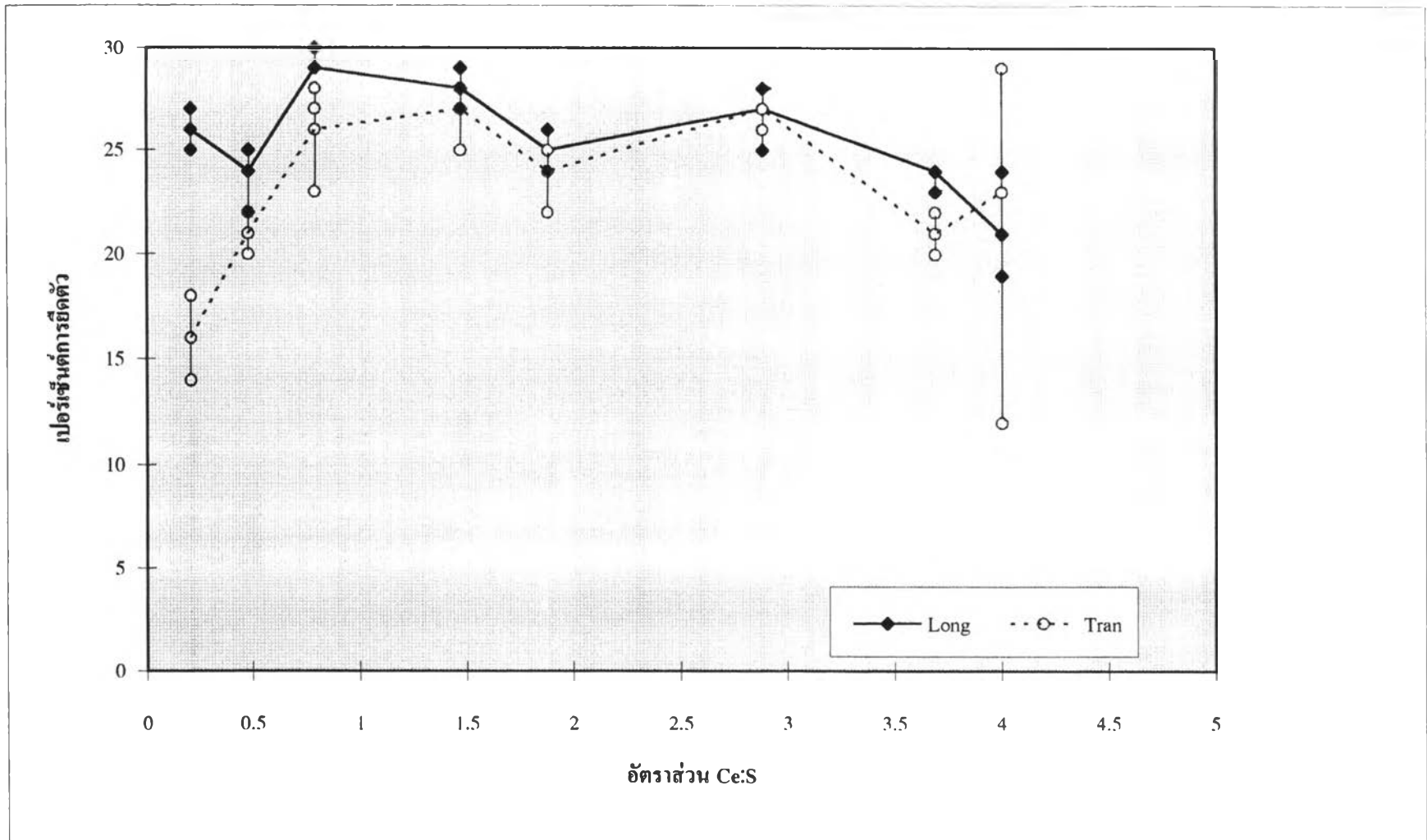
รูปที่ 5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Yield Strength กับอัตราส่วน Ce:S  
ในชิ้นงานทดลอง

รูปที่ 5.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Tensile Strength กับอัตราส่วน Ce:S  
ในชิ้นงานทดลอง

จากทั้งสองรูปพบว่าที่ทุกๆ อัตราส่วน Ce:S ไม่มีความเปลี่ยนแปลงค่า  
ของค่า Yield Strength และ Tensile Strength ที่สังเกตได้ชัดเจน  
ทั้งทิศทาง Long และ Tran แสดงว่าการยึดตัวหรือไม่ยึดตัวของซิลไฟด์อินคลูชัน  
ไม่มีผลใด ๆ ต่อค่ากำลังวัสดุ

อัตราการยึดตัวหรืออัตราของการรับภาระจะส่งผลกระทบต่ออย่างมาก  
ต่อการไหลและการแตกหักของโลหะ จากการศึกษาเรื่อง Stress Concentra-  
tion ในวัสดุเหนียวการแปรรูปดวารจะเกิดขึ้นเมื่อ Stress Concentration  
มีค่ามากกว่า Yield Strength และการเพิ่มแรงดึงเนื่องจาก Strain  
Hardening ก็จะทำให้เกิดการเพิ่ม Local Strain ถ้าโลหะนั้นมีความ  
เหนียวเพียงพอและได้รับภาระในอัตราช้า เช่นการทดสอบแรงดึง การกระจาย  
ความเค้นจะเกิดการจัดการกระจายใหม่ที่เรียกว่า Redistribution of  
Stress ซึ่งจะไม่เกิดขึ้นในวัสดุเปราะ ดังนั้น Stress Concentration  
จะไม่เป็นอันตรายต่อโลหะเหนียวที่ถูกกระทำด้วยอัตราการรับภาระอย่างช้า ๆ  
(Dieter, 1988) ซึ่งการรับภาระอย่างรวดเร็วจะไม่มีเวลาสำหรับความเค้น  
ที่จะกระจายไปในทุกๆ จุดของชิ้นงาน การแตกหักจึงสามารถจะเริ่มเกิดขึ้นที่จุด  
ที่หนึ่งของชิ้นงาน โดยไม่เกี่ยวข้องกับส่วนอื่นก็ได้ เหล็กกล้าโลหะผสมต่ำจัดเป็น  
วัสดุเหนียวโดยเฉพาในชิ้นงานทดลองนี้มีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวตั้งแต่ 20 %  
ขึ้นไปโดยประมาณ เมื่อได้รับอัตราการยึดตัวอย่างช้า ๆ จากการทดสอบแรงดึงที่  
30% ต่อนาที จึงปลอดภัยจาก Stress Concentration ค่าที่ได้จากตาราง 4.2  
และรูป 5.2 กับ 5.3 จึงแสดงให้เห็นว่าไม่มีผลใด ๆ ต่อการยึดตัว  
ของซิลไฟด์อินคลูชัน ซึ่งตรงกับงานของ Luyckx (1970) และงานของ Ray,  
Paul และ Jha (1995)

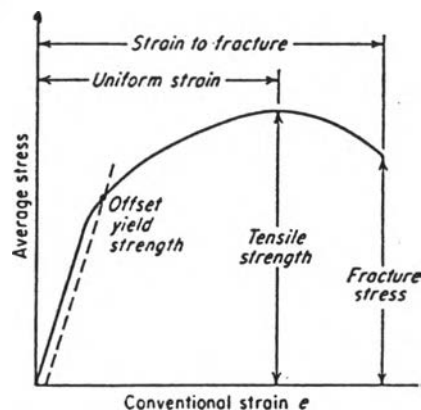
ความเหนียวหมายถึง คุณสมบัติของวัสดุต่อความสามารถที่จะยืดออก  
ได้หรือถูกดึงออกได้ ในช่วงของการแปรรูปถาวรและส่วนมากค่าของความเหนียว  
มักจะคิดกันเป็นเปอร์เซ็นต์ของการยืดออกของชิ้นทดสอบ เมื่อชิ้นทดสอบถูกดึงขาด  
(สมเกียรติ ใจประสิทธิ์พร และ ปรีทรรศน์ พันธุ์รียงก์, 2538) จากตาราง  
4.2 นำค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมาเขียนกราฟ ดังแสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การปิดตัวกับอัตราส่วน Ce : S ในชั้นงานทดลอง

รูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับอัตราส่วน Ce:S ในชิ้นงานทดลอง พบว่ามีความเป็นแอนไอโซทรอปีย่างชัดเจน สำหรับชิ้นงานหมายเลข 11 ซึ่งไม่ได้ควบคุมรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชัน โดยมีอัตราส่วน Ce:S เท่ากับ 0.21 และมีความเป็นไอโซทรอปียากขึ้นเรื่อย ๆ พร้อมกับมีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากขึ้นจนถึงที่อัตราส่วน 1.47 ของชิ้นงานหมายเลข 23 แสดงว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวได้รับผลกระทบจากการยืดตัวของซิลไฟด์อินคลูชันซึ่งแตกต่างจากค่ากำลังวัสดุ สำหรับชิ้นงานหมายเลข 27 ซึ่งเกิดรอยแตกจากการทุบขึ้นรูป ดังแสดงในรูป 4.26 ถึง 4.30 ทำให้เกิดปัญหาในการเตรียมชิ้นงานสำหรับการทดสอบแรงดึง โดยเฉพาะบริเวณที่มีการคดงอของ Fe-Ce มากๆ ตามขอบเกรน จึงต้องใช้ชิ้นงานทดลองที่อัตราส่วน Ce:S = 4 ถึง 2 ขึ้น และการคดงอดังกล่าวก็ไม่ได้กระจายอย่างสม่ำเสมอซึ่งมีส่วนทำให้เกิดความแตกต่างของผลการทดสอบแรงดึงอย่างมาก ดังแสดงในรูป 5.4

เปอร์เซ็นต์การยืดตัวของโลหะอาจแบ่งออกเป็นสองช่วงคือ ช่วงแรก Uniform Extension และช่วงหลัง Localized Extension นั่นคือ ช่วงที่เริ่มเกิดคอคอด ดังแสดงในรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 กราฟความเค้น-ความเครียด (Dieter, 1988)

จากรูป 5.5 เมื่อเกิดคอคอดขึ้นการยึดตัวของซิลไฟด์อินคลูชันจะช่วย  
เร่งคอคอดนั้นทำให้เกิดการแตกหักเร็วขึ้น การยึดตัวของอินคลูชันจึงมีผลต่อ  
เปอร์เซ็นต์การยึดตัวในช่วง Localized Extension ซึ่งสอดคล้องกับงานของ  
Kozasu, Shimizu และ Kubota (1973) และงานของ Ray, Paul และ  
Jha (1995)

#### การควบคุมรูปร่างของซิลไฟด์อินคลูชันด้วย CaSi

จากตารางที่ 1.1 และ 1.2 แสดงให้เห็นถึงอุปสรรคสำคัญในการ  
ใส่แคลเซียมลงไปบนน้ำเหล็กหลอมเหลว โดยจะเกิดปัญหาการสูญเสียแคลเซียม  
และไม่สามารถควบคุมปริมาณของแคลเซียมได้อย่างมีประสิทธิภาพเพราะความ  
ดันไอที่สูงมากกับปัญหาการกระจายที่ไม่สม่ำเสมอ เพราะแคลเซียมมี  
ความตึงผิวต่ำมากเมื่อเทียบกับเหล็กหรือซีเรียม เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว  
การใส่แคลเซียมลงในน้ำเหล็กที่ดีที่สุดก็คือใส่ในรูปของ CaSi ซึ่งจะถูกนำไป  
บรรจุอยู่ภายในหลอดเหล็กกล้าแล้วข้อนเข้าไปบนน้ำเหล็ก อย่างไรก็ตามสำหรับ  
งานทดลองนี้ไม่สามารถหาแคลเซียมในลักษณะดังกล่าวได้ จึงใช้ในรูปของ CaSi  
ผง ทำให้ไม่สามารถปรับเปลี่ยนปริมาณของแคลเซียมในเหล็กกล้าโลหะผสมคำ  
ห่อได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ชิ้นงานทดลองหมายเลข 31, 32 และ 33 มี  
ปริมาณแคลเซียมเท่ากันหมดคือ 0.011 ทั้งที่ใส่ CaSi ต่างกันมากดังแสดงใน  
ตารางที่ 3.4 และอัตราส่วน Ca:S ก็อยู่ในช่วงเดียวกันหมดคือ 0.52 0.65  
และ 0.61 จากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานหมายเลข 31 พบ  
ว่าเกิดการกระจุกตัวเป็นแห่ง ๆ ของแคลเซียมซิลไฟด์ขนาดเล็กและมีรูปร่าง  
เป็นเหลี่ยมมุม ดังแสดงในรูปที่ 4.34 และบางบริเวณจะยังมีการยึดตัวตามเกรน  
ดังรูป 4.35 ซึ่งแสดงถึงการที่แคลเซียมไม่สามารถกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ  
ตลอดทั่วทั้งชิ้นงาน และจากการตรวจด้วย SEM. พบทั้งแมงกานีสซิลไฟด์

เหล็กซิลไฟต์ และแคลเซียมซิลไฟต์ ดังแสดงในรูป 4.36

การที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนปริมาณของแคลเซียมในเหล็กและอัตราล้วน  $Ca:S$  ได้ทำให้ไม่สามารถสรุปอะไรได้ชัดเจน บางบริเวณดูเหมือนกับว่ามีแคลเซียมพอดี หรือ มากเกินไป เช่นในรูป 4.34 ทำให้อินคลูชันมีขนาดเล็กและไม่มีการยึดตัว แต่บางบริเวณเหมือนกับว่าแคลเซียมเข้าไปไม่ถึงจึงยังมีการยึดตัวอยู่ อย่างไรก็ตาม อาจกล่าวได้ว่า การใส่แคลเซียม ต้องใช้วิธีที่จะทำให้แคลเซียมกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอทั่วถึงมากกว่านี้ ทั้งนี้ก็เพราะจากตาราง 4.1 แสดงให้เห็นว่ายังไม่สามารถปรับปรุงพลังงานการรับแรงกระแทกได้เลย อย่างไรก็ตามจากงานของ Luyckx (1970) และงานของ Kitamura (1980) พบว่าแคลเซียมมีประสิทธิภาพในการควบคุมรูปร่างของซิลไฟต์อินคลูชันน้อยกว่าแร่เอิร์ทเธียมมาก

จากงานวิจัยนี้ทำให้สามารถนำวิธีและหลักการควบคุมรูปร่างของซิลไฟต์อินคลูชัน มาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต ผลิตภัณฑ์ จากกระบวนการทูนขึ้นรูปร้อน โดยการผลิต หรือ กำหนดวัตถุประสงค์ที่จะนำมาใช้ทูนขึ้นรูป ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดีขึ้นในด้านพลังงานรับแรงกระแทกและความเหนียว