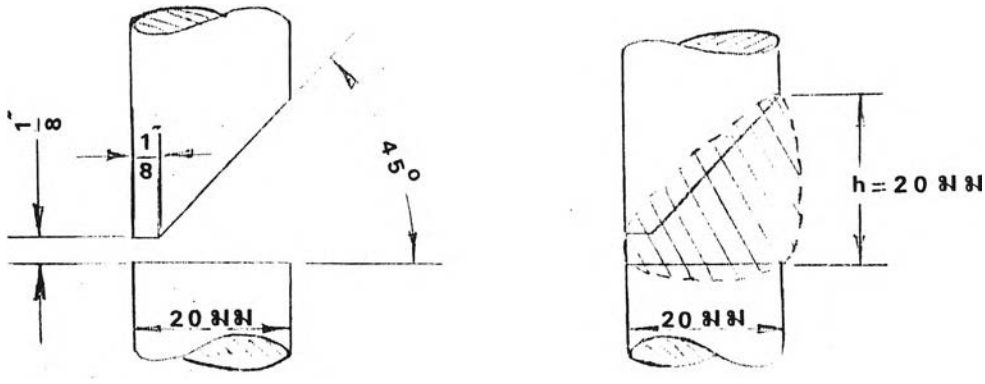
บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

เนื่องจากงานก่อสร้างขนาดใหญ่ต้องการความแข็งแรงสูงดังนั้นการต่อเหล็กเส้นเป็นสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้เพราะเหล็กเส้นมีความยาวจำกัด การต่อก็มีทั้งแนวตั้งและแนวนอนเนื่องจากโครงเหล็กที่เป็นโครงสร้างเสริมคอนกรีตนั้นมีการเสริมทั้งแนวตั้งและแนวนอนยิ่งเป็นอาคารขนาดใหญ่เหล็กเส้นที่ใช้ย่อมมีขนาดใหญ่ตามไปด้วยแรงหรือน้ำหนักของอาคารมีมากการต่อเกยอาจไม่เพียงพอตามคำแนะนำของ Rippstlen, (1970) เพราะการต่อเกยจะทำให้พื้นที่ของคอนกรีตบริเวณรอยต่อของเหล็กเส้นลดลงและการต่อเกยแนวเชื่อมจะรับแรงเฉือนเท่านั้นโดยมีพื้นที่รับแรงเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของแนวเชื่อมเท่านั้นซึ่งอาจไม่เพียงพอต่อการรับแรงหรือน้ำหนักของอาคารนั้นดังนั้นการต่อชนจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอาคารขนาดใหญ่และการต่อชนมี 4 แบบตามมาตรฐาน CRSI กำหนด (ดังในรูปที่ 1)

6.1 สรุปผลการทดลอง

1. การต่อในท่าตั้งซึ่งแบ่งเป็นบากงานด้านเดียว (แบบที่ 1) และบากงานทั้ง 2 ด้าน (แบบที่ 2) จากผลการทดสอบความต้านแรงดึงให้ผลใกล้เคียงกันแต่ถ้าพิจารณาถึงความสิ้นเปลืองในการทำงาน แบบที่ 1 จะมีความสิ้นเปลืองมากกว่าแบบที่ 2 เนื่องจากมีปริมาตรของรอยต่อมากกว่า ความสิ้นเปลืองจะเกิดจากต้องใช้ลวดเชื่อมมากกว่า เสียเวลาในการเชื่อมมากกว่า สิ้นเปลืองกระแสไฟเชื่อมมากกว่า ฯลฯ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าในการต่อชนท่าตั้งควรจะต่อชนบากงานทั้ง 2 ด้าน (ดังในรูปที่ 34 และ 35) ซึ่งเปรียบเทียบปริมาตรของรอยต่อของเหล็กข้ออ้อยที่ต่อชนในการวิจัย ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ได้ดังนี้



รูปที่ 34 การต่อแบบที่ 1 ต่อชนท่าตั้งบากงานด้านเดียว

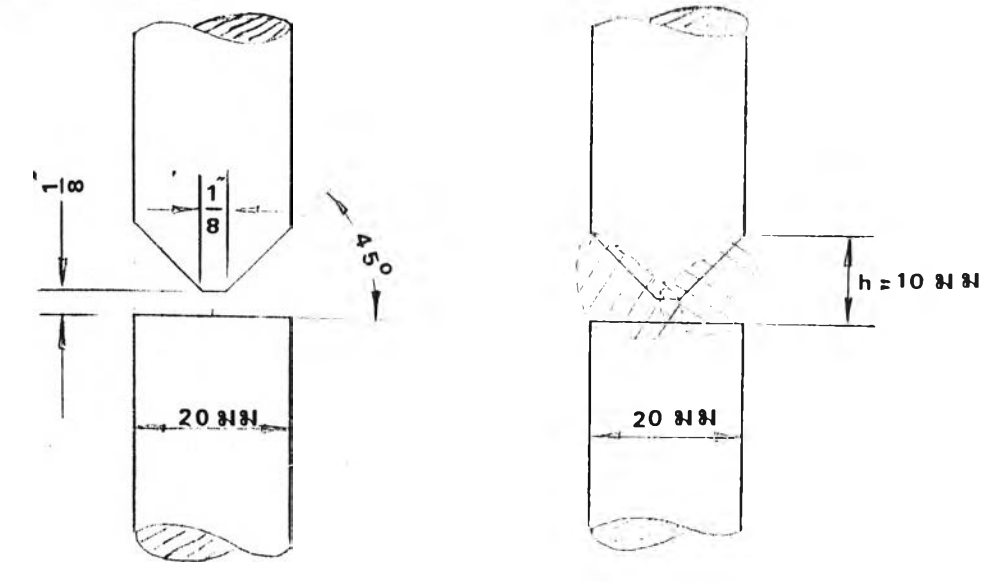
เราสามารถคำนวณปริมาตรของรอยต่อแบบที่ 1 ได้โดยพิจารณาจากรูปจะเห็นว่าเท่ากับครึ่งหนึ่งของปริมาตรรูปทรงกระบอกที่มีความสูงเท่ากับ 20 มม.(เพราะบากมุม 45°) (ดังรูป)

สูตร ปริมาตรของรอยต่อ = {[(π/4)*d^2]*h}/2

= {[(3.14/4)*20*20]*20}/2

= 3,140 $มม^3$.

ปริมาตรของรอยต่อที่ต้องเติมลวดเชื่อม = 3,140 $มม^3$.



รูปที่ 35 การต่อแบบที่ 2 การต่อท่าตั้งบากงานทั้งสองด้าน

เราสามารถคำนวณปริมาตรของรอยต่อแบบที่ 2 ได้ด้วยวิธีการคล้าย ๆ กันกับแบบที่ 1 เพียงแต่ในแบบที่ 2 บากงานสองด้านด้วยมุม 45° เช่นกัน (ดังในรูปที่ 36) จะทำให้ความสูงลดลงเป็นครึ่งหนึ่งเพราะบากมุมสองด้านจะบากเข้าไปได้เพียงครึ่งหนึ่งของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเหล็กเส้นเท่านั้น ปริมาตรของรอยต่อก็ยังคงเป็นครึ่งหนึ่งของปริมาตรรูปทรงกระบอกที่มีความสูงเท่ากับ 10 มม. ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

<u>สูตร</u> ปริมาตรของรอยต่อ = {[(π/4)*d^2]*h}/2

= {[(3.14/4)*20*20]*10}/2

= 1,570 $มม^3$.

ปริมาตรของรอยต่อแบบบากงานทั้งสองด้าน = 1,570 $มม^3$.

2. การต่อแบบที่ 3 และแบบที่ 4 เป็นการต่อแบบขนานนอนมีการเตรียมรอยต่อแบบบากงานด้านเดียวกับบากงานทั้งสองด้านคล้าย ๆ กันกับแบบที่ 1 โดยที่แบบที่ 4 มีผลการทดสอบความด้านแรงดึงสูงกว่าแบบที่ 3 และสูงกว่าทุก ๆ แบบด้วยนอกจากนี้ยังมีการประหยัดกว่าแบบที่ 3 ทั้งเวลาในการเชื่อม ลวดเชื่อมที่ต้องใช้เติม กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อม ฯลฯ ดังในรูปที่ 36 และ 37

ปริมาตรของรอยต่อแบบที่ 3 จะเห็นได้ว่ามีขนาดเท่ากับครึ่งหนึ่งของปริมาตรรูปทรงกระบอกที่มีความสูงของทรงกระบอกเท่ากับ ระยะ X (ดังในรูป) ซึ่งเท่ากับช่วงของการบากมุม 60° สามารถคำนวณความสูงและปริมาตรได้ดังนี้

<u>หาความสูง</u> SIN 60° = 20/X

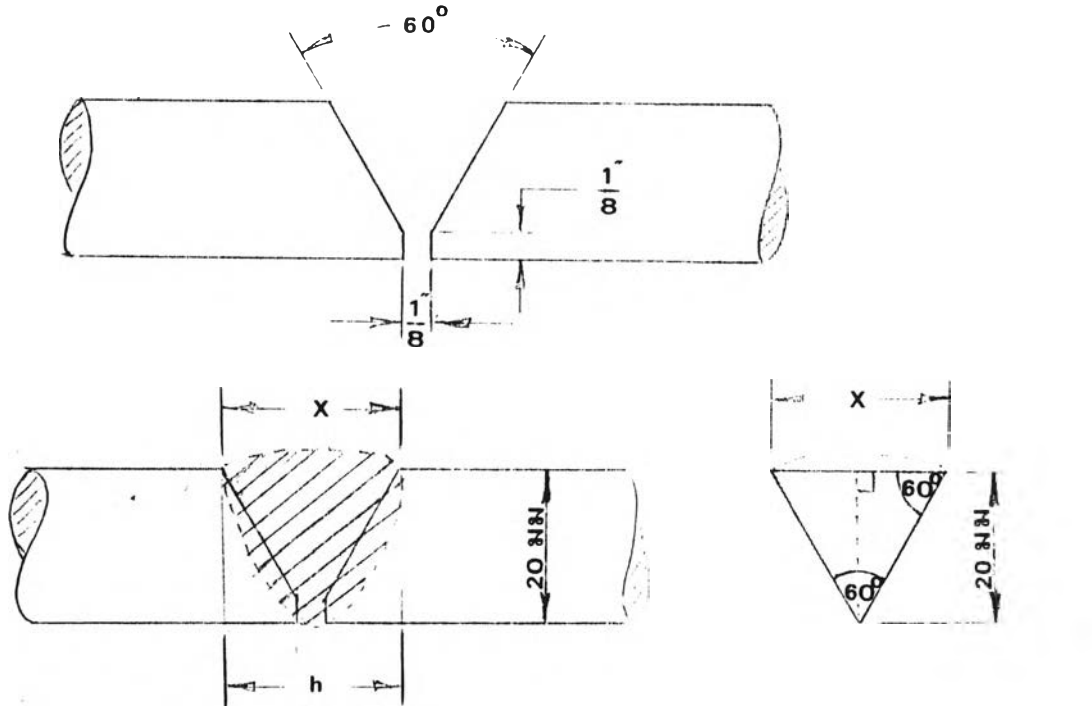
0.866 = 20/X

X = 20/0.866 = 23.1 มม.

<u>หาปริมาตรของรอยต่อ</u> = {[(π/4)*d^2]*h}/2

= {[(3.14/4)*20*20]*23.1}/2

ปริมาตรของรอยต่อแบบที่ 3 = 3,626.7 $มม^3$.



รูปที่ 36 การต่อแบบที่ 3 ต่อแบบท่าชนานนอนบากงานด้านเดียว

หาปริมาตรรอยต่อแบบที่ 4 สามารถหาได้ด้วยวิธีการคล้าย ๆ กันกับแบบที่ 3 และมีปริมาตรเท่ากับครึ่งหนึ่งของปริมาตรรูปทรงกระบอกที่มีความสูงลดลงจากแบบที่ 3 ครึ่งหนึ่ง ดังวิธีการต่อไปนี้

<u>หาความสูงของรูปทรงกระบอก</u>

$\text{SIN } 60^{\circ} = 10/X$

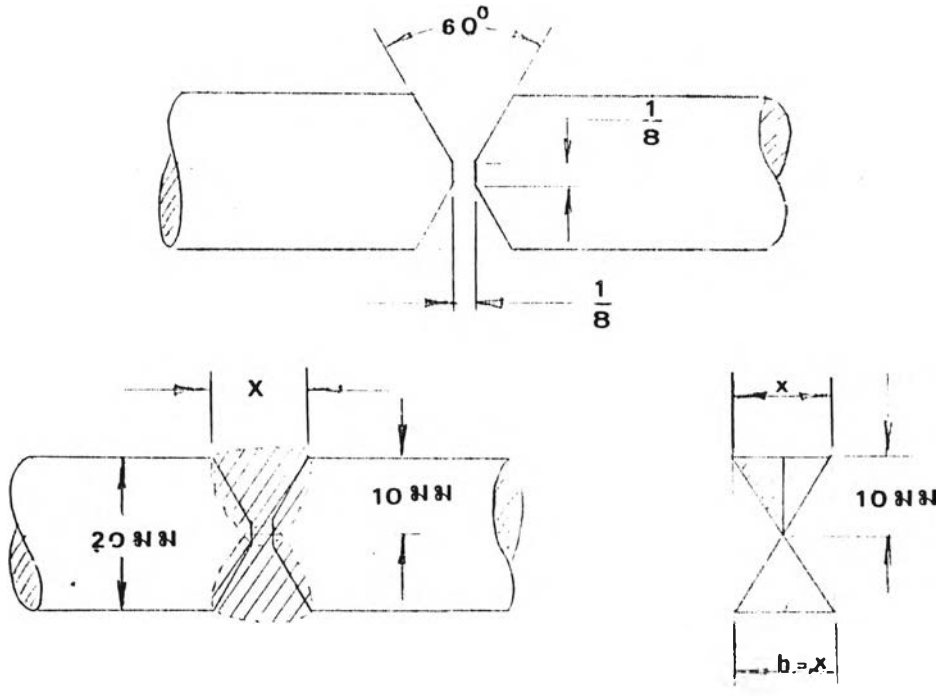
$0.866 = 10/X$

$X = 10/0.866 = 11.55$ มม.

<u>หาปริมาตรของรอยต่อ</u> $= \{[(\pi/4)*d^2]*h\}/2$

$= \{[(3.14/4)*20*20]*11.55\}/2$

$= 1,813.35$ มม^3.



รูปที่ 37 การต่อแบบที่ 4 ต่อชนท่าขนานนอนบากงานทั้งสองด้าน

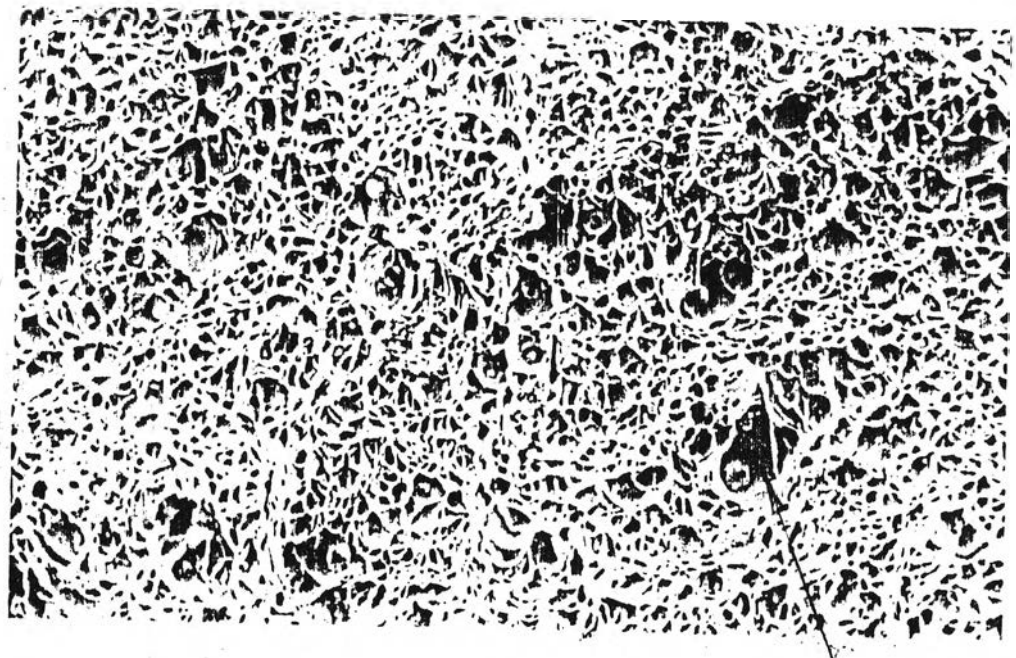
จากการคำนวณในทุก ๆ แบบสรุปได้ว่าการบากงานทั้งสองด้านจะประหยัดที่สุดเพราะนอกจากจะมีความต้านแรงดึงสูงกว่าหรือใกล้เคียงกันแล้วยังมีปริมาตรของรอยต่อน้อยกว่าซึ่งจะมีผลทำให้สิ้นเปลืองลวดเชื่อมน้อยกว่า ใช้เวลาในการเชื่อมน้อยกว่า สิ้นเปลืองกระแสไฟเชื่อมน้อยกว่า ความร้อนสะสมที่เกิดกับชิ้นงานน้อยกว่าเพราะปริมาตรที่น้อยต้องการการเติมลวดเชื่อมน้อยจึงทำให้การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในน้อยจะส่งผลต่อการมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีกว่า

3. จากข้อได้เปรียบหลาย ๆ ประการของแบบที่ 2 และแบบที่ 4 ดังกล่าวมาแล้วนั้น นอกจากจะประหยัดกระแสไฟ ประหยัดเวลาในการเชื่อม ประหยัดลวดเชื่อมและยังมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของเหล็ก คือปริมาตรของรอยต่อที่น้อยกว่าการเชื่อมซ้อนแนวก็น้อยซึ่งจะมีผลทำให้ความร้อนสะสมในรอยเชื่อมและบริเวณใกล้เคียงมีน้อยลงมีผลทำให้คุณสมบัติเชิงกลสูงขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานมีน้อย (ดังรูปเปรียบเทียบโครงสร้างก่อนเชื่อม และหลังเชื่อมที่ผ่านมา) จะเห็นได้ว่าเกรนของโครงสร้างจะละเอียดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิของการเชื่อมที่สูงประมาณ 1,300-1,400 °C จะทำให้คาร์บอนในเพียร์ไลท์ที่มีอยู่ 6.67 % แตกตัวออกเป็นเฟอร์ไรท์ซึ่งมีผลทำให้ความต้านแรงดึงลดต่ำลง

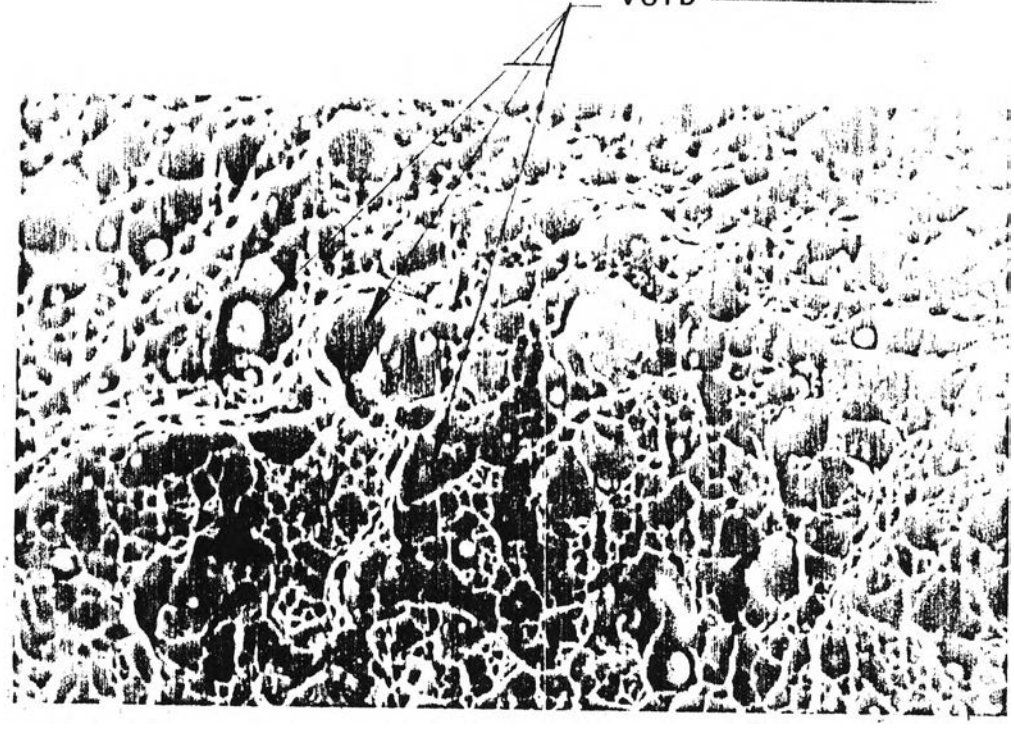
4. ผลของความต้านแรงดึงของเหล็กทั้ง 3 เกรดในการต่อทั้ง 4 แบบสรุปได้ว่าแบบที่ 2 เหมาะสำหรับการต่อในท่าตั้ง และแบบที่ 4 เหมาะสำหรับการต่อในท่าขนานนอน ถ้าเปรียบเทียบกับความต้านแรงดึงของเหล็กที่เชื่อมกับเหล็กเส้นปกติจะพบว่าเหล็กทุกเกรดที่เชื่อมมีความต้านแรงดึงต่ำกว่าเหล็กเส้นปกติ (ที่ไม่ได้เชื่อม) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างดังที่กล่าวมาแล้ว และผลจากการใช้ลวดเชื่อมเหล็กเหนียวธรรมดา (E-6013) ซึ่งมีความต้านแรงดึงระบุจากบริษัทผู้ผลิตเท่ากับ 68,000 ปอนด์/นิ้ว^2. หรือ 46.92 กก/มม^2. แต่ถ้าเปรียบเทียบกับ มอก.24-2527 (ตามตารางที่ 2) เหล็กเกรด SD 30 จะมีความต้านแรงดึงสูงกว่ามาตรฐานควบคุม ส่วนเกรด SD 40 มีผลการทดสอบใกล้เคียงมาตรฐานควบคุม และ SD 50 จะมีความต้านแรงดึงต่ำกว่ามาตรฐานควบคุมด้วยเหตุผลหลายประการดังกล่าวรวมทั้ง

ก. การเกิดช่องว่างหรือโพรง (Void formation) ของเฟอร์ไรท์เนื่องจากโครงสร้างของเฟอร์ไรท์มีคุณสมบัติอ่อนกว่าโครงสร้างอื่นเมื่อถูกดึงจะทำให้เกิดเป็นโพรงหรือช่องว่างทำให้โครงสร้างแยกห่างออกจากกันทำให้ดึงขาดออกจากกันได้ง่าย

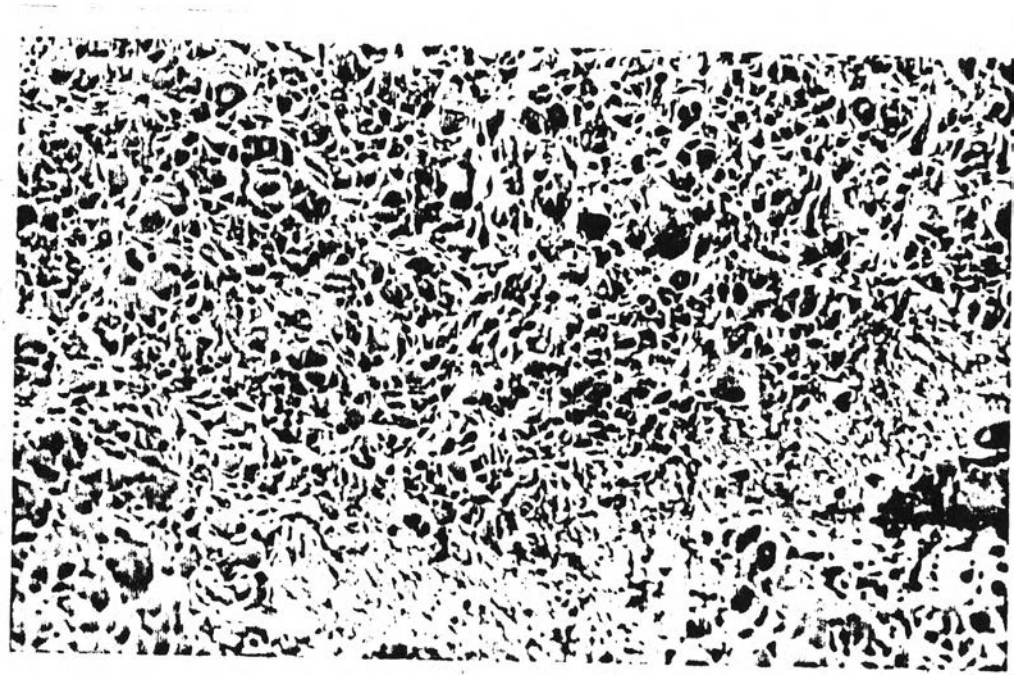
ข. การขยายตัวของโพรงโครงสร้าง (Void) ต่าง ๆ ซึ่งจะเริ่มจาก nonmetalic impurity แล้วขยายตัวมารวมกันจนกระทั่งทำให้เนื้อโลหะแยกออกและถูกดึงขาดออกจากกันได้ง่าย(ดังภาพ Scaning) ต่อไปนี้ ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนถึงความแตกต่างของเนื้อโลหะเกรดต่าง ๆ เมื่อถูกดึงขาดออกจากกันในกำลังขยาย 500 เท่า ดังรูปเปรียบเทียบ 38A และ 38B เป็นโครงสร้างของ A_{30} และ B_{30} รูปที่ 39A และ 39B เป็นโครงสร้างของ A_{50} และB_{50} โดยเป็นการเปรียบเทียบเหล็ก SD 30 ซึ่งให้ผลการทดสอบสูงกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรม และ SD 50 ซึ่งให้ผลการทดสอบต่ำกว่ามาตรฐานอุตสาหกรรม ส่วนเหล็ก SD 40 ให้ผลการทดสอบใกล้เคียงมาตรฐานอุตสาหกรรมมากที่สุดจึงไม่ได้ถ่ายภาพมาเปรียบเทียบ



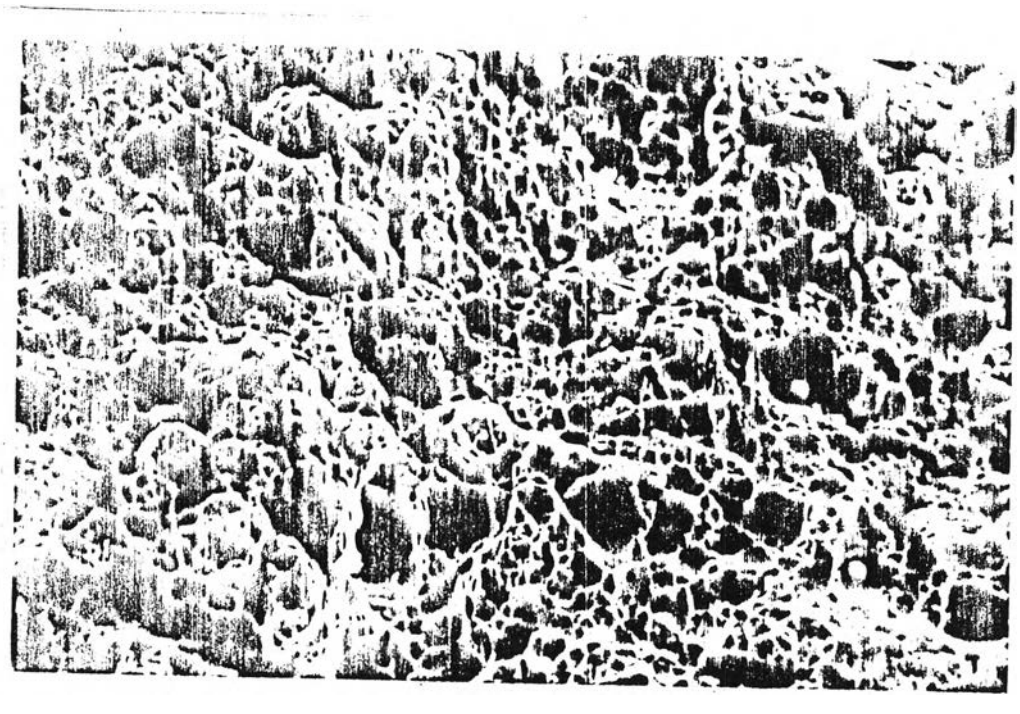
รูปที่ 38A ภาพโครงสร้างของ A_{30}



รูปที่ 38B ภาพโครงสร้างของ B_{30}



รูปที่ 39A ภาพโครงสร้างของ A_{50}



รูปที่ 39B ภาพโครงสร้างของ B_{50}

การวิจัยครั้งนี้มุ่งวิจัยความต้านแรงดึงของเหล็กเส้นที่ต่อชนด้วยการเชื่อมด้วยเหตุผลที่กล่าวมาเพื่อมุ่งที่จะหาข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมก่อสร้าง ด้วยการจำลองสถานการณ์จริงในงานก่อสร้างในประเทศไทย การต่อเหล็กเส้นด้วยการเชื่อมในงานก่อสร้างโดยทั่วไปมักใช้ลวดเชื่อมเหล็กเหนียว (Mild steel) ซึ่งเป็นลวดเชื่อม E 6013 ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษคือสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม มีความต้านแรงดึงเท่ากับ 68,000 ปอนด์/นิ้ว^2. หรือประมาณ 46.92 กก/มม^2. (Joe Lawrence Morris,1951) และใช้ได้ทั้งไฟกระแสตรงชั้วตรงและไฟฟ้ากระแสสลับ ผลการวิจัยพบว่าแบบของการต่อที่เหมาะสมที่สุดคือต่อท่าที่ 2 สำหรับการต่อในท่าตั้ง และต่อต่อท่าที่ 4 สำหรับการต่อในท่าขนานนอน มีผลความต้านแรงดึงในทุกเกรดใกล้เคียงกัน หากมีการวิจัยต่อไปควรจะทำการวิจัยด้วยการใช้ลวดเชื่อมที่มีคุณสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับเกรดของเหล็กพร้อมกับมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานทั้งก่อนและหลังการเชื่อมเพื่อเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลของงานเชื่อมด้วยอันจะเป็นการเพิ่มความต้านแรงดึงของชิ้นงานให้สูงขึ้นได้ตามข้อเสนอแนะการวิจัยข้อ 6.2

6.2 ข้อเสนอแนะเพื่อการวิจัยในอนาคต

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยในครั้งนี้เพื่อที่จะเป็นข้อมูลและพัฒนาฐานข้อมูลที่จำเป็นสำหรับงานก่อสร้าง ด้วยเหตุที่มีสิ่งก่อสร้างหลายแห่งได้พังทลายลงมาในช่วงระยะ 3-4 ปีที่ผ่านมาเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายแก่ทั้งชีวิตและทรัพย์สินของผู้ที่อยู่อาศัย รวมทั้งเป็นการพัฒนาการต่อเหล็กเส้นที่ใช้ในการก่อสร้าง ตามปกติในงานก่อสร้างทั่ว ๆ ไปมักใช้วิธีการต่อหรือประกอบโครงสร้างด้วยการใช้ลวดผูก การต่อก็เป็นการต่อเกยเสียเป็นส่วนมาก การวิจัยครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่าการต่อเกยใช้ไม่ได้ในสิ่งก่อสร้างขนาดใหญ่ นอกจากจะไม่เพียงพอต่อการรับแรงหรือน้ำหนักที่ถ่ายทอดมาแล้วยังทำให้พื้นที่หรือเนื้อคอนกรีตในบริเวณรอยต่อลดลงอาจทำให้การรับแรงต่าง ๆ ได้น้อยลงยังทำให้เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้เพราะเหล็กที่เกยกันในรอยต่อจะมีความยาวมากขึ้นถ้าเป็นสิ่งก่อสร้างที่ใหญ่ขึ้นซ้ำยังเป็นการเพิ่มน้ำหนักให้กับอาคารโดยมิได้เพิ่มความสามารถในการรับแรงให้เลย การเชื่อมต่อชนนอกจากจะเพิ่มกำลังในการต้านแรง หรือน้ำหนักจากอาคารยังสามารถลดน้ำหนักของอาคารลงอีกด้วยเพราะการต่อชนจะกระทำเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของเหล็กเท่านั้น ผลการวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่เกี่ยวข้องอย่างมากตามคาดหมาย

และจะมีประโยชน์ยิ่งขึ้นหากจะมีผู้ทำวิจัยในเรื่องนี้ต่อไปในอนาคตควรจะวิจัยไปตามข้อเสนอแนะต่อไปนี้

1. เนื่องจากเหล็กบางชั้นคุณภาพ โดยเฉพาะ SD 50 ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนค่อนข้างสูงการเชื่อมจะทำให้โครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป จำเป็นที่จะต้องมีการให้ความร้อนก่อนเชื่อมตามเหตุผลของการวิจัยนี้ได้กล่าวไว้แล้วซึ่งจะเป็นทางหนึ่งที่ทำให้คุณสมบัติเชิงกลสูงขึ้น

2. การเชื่อมต่อเหล็กข้ออ้อยเนื่องจากมีหลายชั้นคุณภาพทางที่จะปรับปรุงหรือรักษาคุณสมบัติเชิงกลให้คงเดิมได้เป็นอย่างน้อยควรจะมีการเลือกใช้ลวดเชื่อมที่มีธาตุต่าง ๆ ผสมอยู่ใกล้เคียงกับธาตุที่มีอยู่ในเหล็กเส้นเพื่อให้มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างน้อยที่สุด อันจะนำมาซึ่งคุณสมบัติเชิงกลตามที่กำหนดไว้จากมาตรฐานอุตสาหกรรม

3. จากการวิจัยพบว่าการเชื่อมต่อเหล็กข้ออ้อย (โดยเฉพาะ SD 50) จำเป็นต้องมีการให้ความร้อนก่อนเชื่อม ส่วนเกรดอื่น ๆ ในการวิจัยครั้งนี้ยังไม่ได้ทำการตรวจสอบว่าจะต้องให้ความร้อนก่อนการเชื่อมหรือไม่ วิธีการตรวจสอบก็ใช้วิธีการเช่นเดียวกับตัวอย่างการตรวจสอบของการวิจัยนี้ ควรจะทำการตรวจสอบถึงความจำเป็นที่จะต้องให้ความร้อนก่อนการเชื่อมในการวิจัยครั้งต่อไปเพื่อเป็นการเพิ่มหรือรักษาคุณสมบัติเชิงกลให้เป็นไปตามมาตรฐาน ส่วนหลังการเชื่อมควรมีการควบคุมอัตราการเย็นตัวของรอยต่อให้เป็นไปอย่างช้า ๆ และเย็นตัวลงอย่างสม่ำเสมอเพื่อให้รอยต่อไม่เกิดความเค้นมากเกินไปจะทำให้คุณสมบัติเชิงกลดีขึ้น

4. จากการวิจัยครั้งนี้พบว่าคุณสมบัติเชิงกลของรอยต่อในเหล็ก SD 30 มีคุณสมบัติเชิงกลสูงกว่ามาตรฐานควบคุม ในเหล็ก SD 40 มีคุณสมบัติเท่ากันหรือต่ำกว่ามาตรฐานควบคุมเล็กน้อย (สรุปได้ว่าใกล้เคียงกัน) และในเหล็ก SD 50 มีคุณสมบัติต่ำกว่ามาตรฐานควบคุมและพบว่ามีความจำเป็นที่จะต้องให้ความร้อนก่อนการเชื่อมและควรมีการควบคุมอัตราการเย็นตัวของรอยต่อเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลให้สูงขึ้น สิ่งที่ควรพิจารณาในการทำเช่นนี้คือ ค่าใช้จ่ายในการประกอบรอยต่อจะสูงขึ้น ควรจะมีการวิจัยถึงค่าใช้จ่ายว่าวิธีการที่จะควบคุมให้ค่าใช้จ่ายต่ำสุดควรจะมีการควบคุมอย่างไรเพื่อประโยชน์ต่อความแข็งแรงของสิ่งก่อสร้างโดยค่าใช้จ่ายไม่สูง

มากจนเกินความจำเป็น

5. การวิจัยครั้งนี้พบว่ารอยต่อของเหล็กเส้นมิได้ถูกดึงขาดแต่การขาดเกิดขึ้นที่ขอบหรือบริเวณที่ห่างจากรอยเชื่อมออกไป หากมีการวิจัยต่อไปควรจะมีการตรวจสอบโครงสร้างที่จุดขาดนี้ด้วยการตัดชิ้นงานในบริเวณนี้ด้วยการประมาณว่าเป็นบริเวณ HAZ (heat affect zone) เพื่อคำนวณหา %C และคำนวณหาความต้านแรงดึงเปรียบเทียบกับการดึงจริง ๆ ว่าสูตรของ Rolfe จะมีความแม่นยำเพียงใด