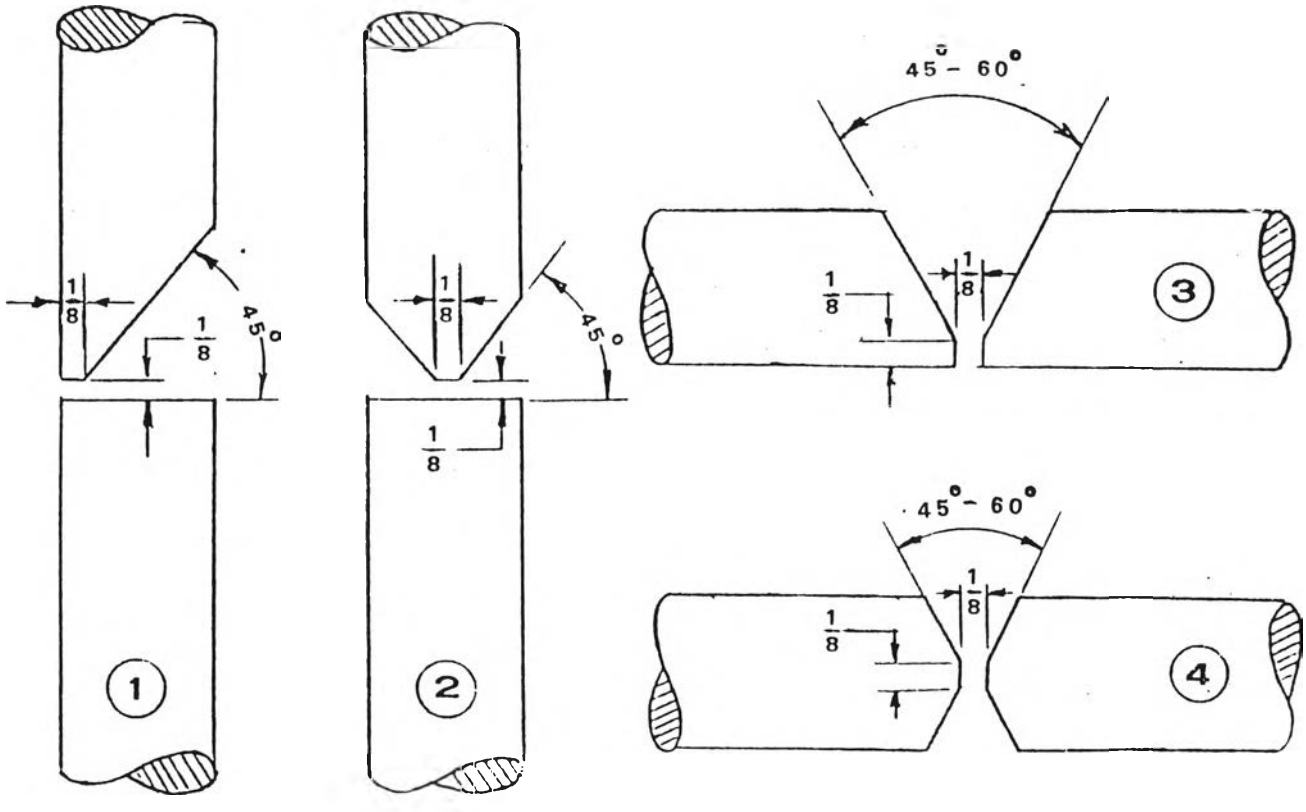
บทที่ 4

การทดลอง

เหล็กที่นำมาทำการทดลองครั้งนี้เป็นเหล็กข้ออ้อยเกรดต่าง ๆ เพราะเป็นเหล็กที่ใช้กันในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ซึ่งมีคุณสมบัติการยึดเหนี่ยวระหว่างผิวของเหล็กกับคอนกรีตดีกว่าเหล็กเส้นกลมผิวเรียบ การทดลองจะใช้เหล็กข้ออ้อยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. ขึ้นไปและกระทำกับทั้ง 3 ชั้นคุณภาพคือ SD 30, SD 40 และ SD 50 โดยเลือกเอาตัวอย่างจาก 2 บริษัท คือ บริษัท A และ E (ตามโครงการที่เสนอ) แต่ในการทดลองจะใช้สัญญลักษณ์ A และ B ซึ่งเป็นบริษัทที่มีเหล็กเส้นครบ 3 เกรด(ชั้นคุณภาพ) การเก็บตัวอย่างด้วยวิธีการทำหนังสือจากหัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการไปขอตัวอย่างเหล็กจากโรงงาน การขอตัวอย่างมีปัญหาอยู่บ้าง คือ เหล็กชั้นคุณภาพ SD 50 มีการผลิตน้อยและมีผลิตเฉพาะใน 2 บริษัทนี้เท่านั้น เพราะเป็นเหล็กที่มีคุณสมบัติเชิงกลสูงค่อนข้างมาก (63 กก.แรง/มม^2) ตาม มอก. 24-2527 ซึ่งเกินความจำเป็นสำหรับการก่อสร้างขนาดย่อมจึงไม่ค่อยได้ผลิตเก็บไว้จำหน่ายนอกจากจะมีการสั่งล่วงหน้าดังนั้นเหล็กตัวอย่างที่ได้จึงมีขนาดแตกต่างกันคือ SD 30, SD 40 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม.และ SD 50 ที่ได้มี 2 ขนาดคือ จากบริษัท A ได้ขนาด 32 มม.และจากบริษัท B ได้ขนาด 28 มม. แล้วนำตัวอย่างมาเตรียมรอยต่อทุก ๆ ชั้นคุณภาพจนครบตัวอย่างตามผังการทดลอง แบบของการต่อดังในรูปที่ 14 การทดลองในทุก ๆ ชั้นคุณภาพจะกระทำแบบละ 8 ชิ้นรวม 4 แบบ ทั้ง 3 ชั้นคุณภาพจะเป็นชิ้นทดสอบรวมบริษัทละ 96 ชิ้น ดังนั้น 2 บริษัทจะมีชิ้นทดสอบรวม 192 ชิ้น นอกจากนั้นเหล็กแต่ละชั้นคุณภาพของแต่ละบริษัทจะนำมาตัดและขัดเตรียมเป็นชิ้นทดสอบโครงสร้างจุลภาค (Micro structure) โดยตัดชิ้นSpecimen จากทั้ง 2 บริษัทโดยนำมาจากชั้นคุณภาพละ 3 ชิ้นดังนั้นจะมีชิ้นทดสอบรวม 18 ชิ้นเพื่อนำไปถ่ายภาพโครงสร้างชิ้นตัวอย่างละ 2 รูป รวมทั้งสิ้น 36 รูป เมื่อถ่ายภาพโครงสร้างแล้วนำชิ้นตัวอย่างจาก 2 บริษัทที่เป็นชั้นคุณภาพเดียวกันมารวมกันแล้วหยิบแบบสุ่มเอาชั้นคุณภาพละ 3 ชิ้น รวม 3 ชั้นคุณภาพจะมีชิ้นตัวอย่างรวม 9 ชิ้นเพื่อส่งไปทำการวิเคราะห์ธาตุที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เพื่อนำผลการวิเคราะห์ธาตุมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณตามวิธีการของ Underwood,(1970)

และ Rolfe,(1937)ต่อไป

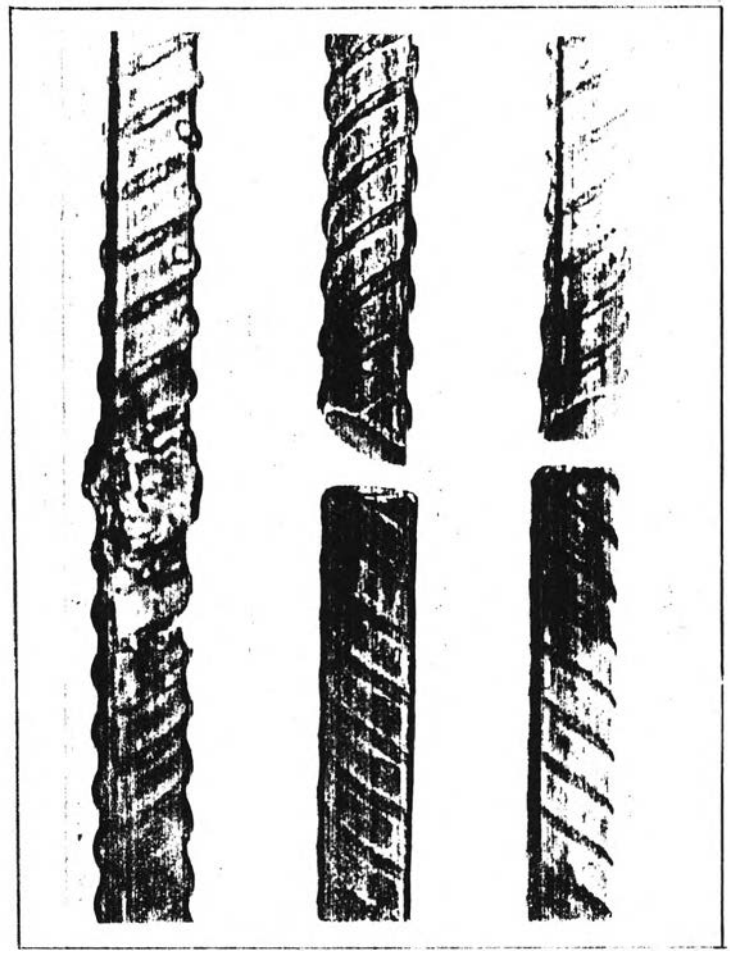


รูปที่ 14 แบบของการต่อชนเหล็กเส้น (Rippstien, 1970)

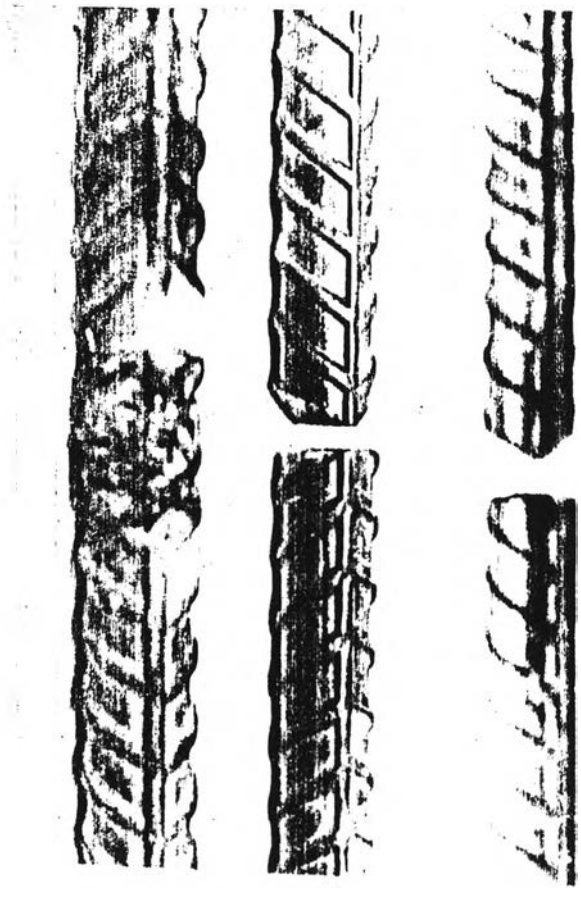
4.1 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

เมื่อเตรียมชิ้นทดลองที่ได้จากบริษัทต่าง ๆ มาแล้ว ตามแบบการทดลองทั้ง 4 แบบที่ได้กำหนดไว้ในทุก ๆ ชั้นคุณภาพ แล้วนำชิ้นทดลองไปเชื่อมตามแบบของการทดลองตามมาตรฐานของ CRSI ในการเชื่อมจะใช้ช่างเชื่อมคนเดียวกันในทุก ๆ ชิ้นและใช้กระแสไฟเชื่อมเท่ากันด้วยคือใช้กระแสไฟเชื่อมประมาณ 90 แอมแปร์ ใช้ลวดเชื่อมเหล็กเหนียวธรรมดาคือ E-6013 เชื่อมชิ้นงาน

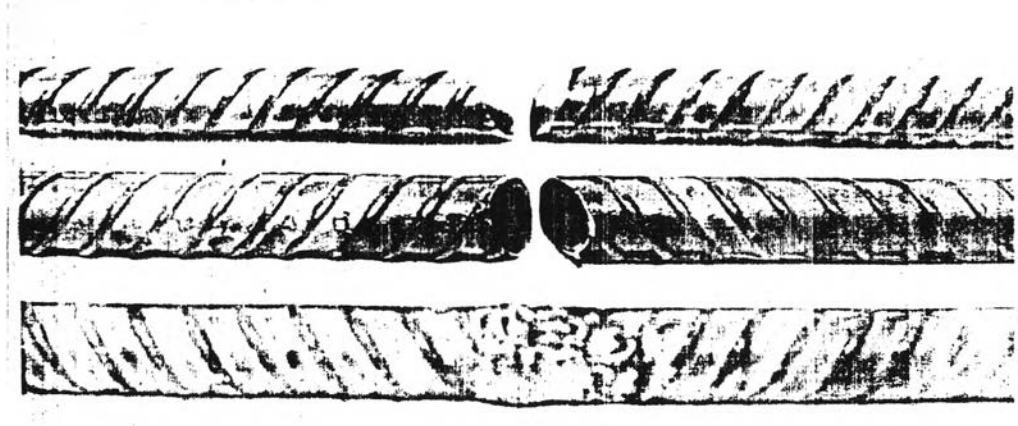
ทุกชิ้นและวางท่าของชิ้นงานตามมาตรฐานกำหนด ทั้ง 4 แบบ การเชื่อมจะกระทำอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่องกันทุก ๆ ชิ้น เมื่อเชื่อมเสร็จแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงในอากาศจนถึงอุณหภูมิปกติ แบบของการต่อชิ้นงานเพื่อเชื่อมตามท่าต่าง ๆ และชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วแสดงไว้ในรูปที่ 15, 16, 17 และ18 ตามลำดับ



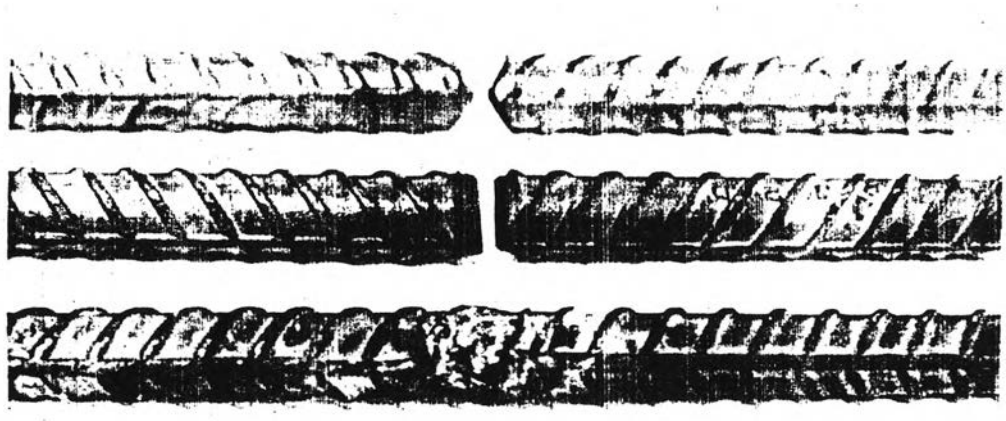
รูปที่ 15 ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมและเชื่อมแบบที่ 1



รูปที่ 16 ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมและเชื่อมแบบที่ 2

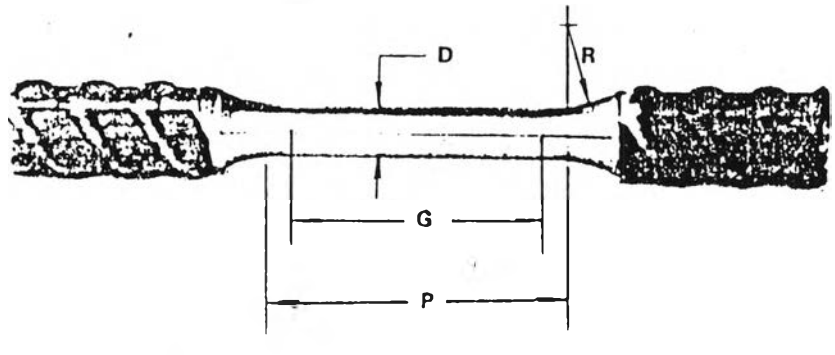


รูปที่ 17 ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมและเชื่อมแบบที่ 3



รูปที่ 18 ชิ้นตัวอย่างที่เตรียมและเชื่อมแบบที่ 4

เหล็กที่ผ่านการเชื่อมจะทำการทดสอบความต้านแรงดึงซึ่งจะต้องกลึงลดขนาดลงตามแบบของมาตรฐานการทดสอบ JIS Z 3111 - 1970 ตามรูป จะกลึงลดขนาดลงเหลือเส้นผ่านศูนย์กลาง D = 12.5 มม. ระยะความยาวพิกัด L = 50 มม. ระยะของผิวงานที่กลึงขนานกันยาว P = 60 มม. และรัศมีที่เป็นส่วนโค้งบ่าของส่วนที่จะจับชิ้นทดสอบ R =15 มม. เป็นอย่างน้อย (ดังรูปที่ 19) ชิ้นตัวอย่างของทั้ง 2 บริษัทจะกำหนดรหัสไว้ตามลักษณะการต่อ แบบของการเชื่อมและเกรดของแต่ละบริษัท มีสัญญลักษณ์ดังนี้



รูปที่ 19 แบบชิ้นทดสอบความต้านแรงดึงของเหล็กที่ผ่านการเชื่อม ตามมาตรฐาน JIS Z 3111-1970

ชั้นคุณภาพ SD 30

1. รหัส A_{11-30} ,A_{12-30} ,A_{13-30} ,-----,A_{18-30}
2. รหัส A_{21-30} ,A_{22-30} ,A_{23-30} ,-----,A_{28-30}
3. รหัส A_{31-30} ,A_{32-30} ,A_{33-30} ,-----,A_{38-30}
4. รหัส A_{41-30} ,A_{42-30} ,A_{43-30} ,-----,A_{48-40}

ชั้นคุณภาพ SD 40

1. รหัส A_{11-40} ,A_{12-40} ,A_{13-40} ,-----,A_{18-40}
2. รหัส A_{21-40} ,A_{22-40} ,A_{23-40} ,-----,A_{28-40}
3. รหัส A_{31-40} ,A_{32-40} ,A_{33-40} ,-----,A_{38-40}
4. รหัส A_{41-40} ,A_{42-40} ,A_{43-40} ,-----,A_{48-40}

ชั้นคุณภาพ SD 50

1. รหัส A_{11-50} ,A_{12-50} ,A_{13-50} ,-----,A_{18-50}
2. รหัส A_{21-50} ,A_{22-50} ,A_{23-50} ,-----,A_{28-50}
3. รหัส A_{31-50} ,A_{32-50} ,A_{33-50} ,-----,A_{38-50}
4. รหัส A_{41-50} ,A_{42-50} ,A_{43-50} ,-----,A_{48-50}

ชิ้นตัวอย่างของบริษัท B ก็จะมีการกำหนดรหัสเหมือน ๆ กันกับของบริษัท A เพียงแต่เปลี่ยนอักษร A เป็น B โดยตัวอักษรต่าง ๆ มีความหมายดังนี้ คือ

A_{11-30} ; A หมายถึงชิ้นตัวอย่างของบริษัท A

1 ตัวแรกหมายถึงแบบของการต่อแบบที่ 1

1 ตัวที่สองหมายถึงตัวอย่างชิ้นที่ 1

30 หมายถึงชั้นคุณภาพของเหล็ก SD 30

หรือ A_{12-30} ; A หมายถึงชิ้นตัวอย่างของบริษัท A

1 หมายถึงแบบของการต่อแบบที่ 1

2 หมายถึงชิ้นตัวอย่างชิ้นที่ 2

30 หมายถึงชั้นคุณภาพของเหล็ก SD 30

หรือ A_{32-50} ; A หมายถึงชิ้นตัวอย่างของบริษัท A

3 หมายถึงแบบของการต่อแบบที่ 3

2 หมายถึงชิ้นตัวอย่างชิ้นที่ 2

50 หมายถึงชั้นคุณภาพของเหล็ก SD 50

หรือ B_{45-40} ; B หมายถึงชิ้นตัวอย่างของบริษัท B

4 หมายถึงแบบของการต่อแบบที่ 4

5 หมายถึงชิ้นตัวอย่างชิ้นที่ 5

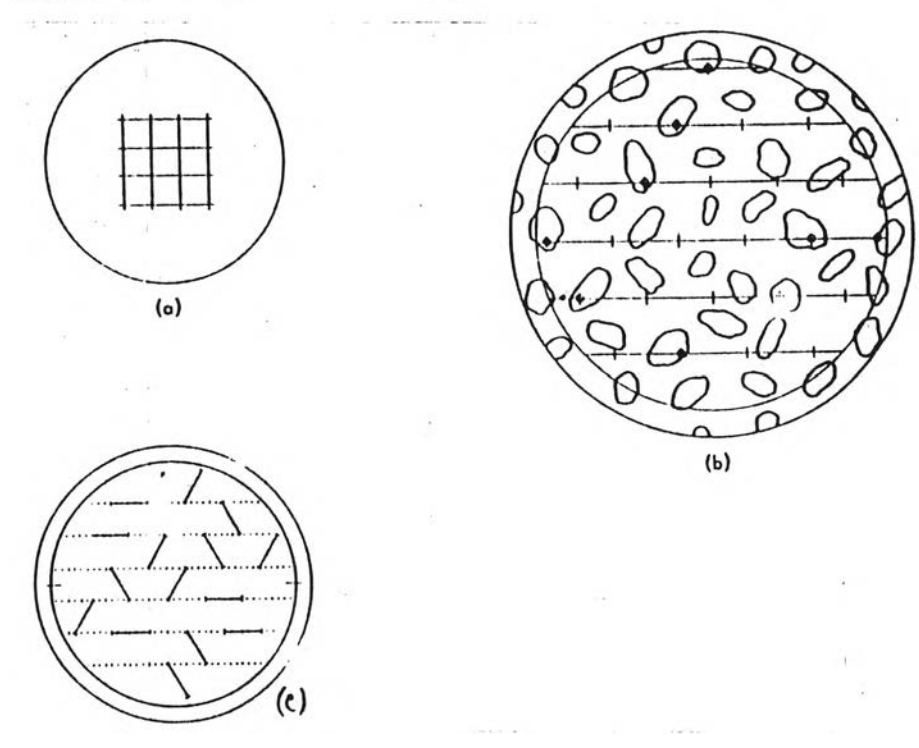
40 หมายถึงชั้นคุณภาพของเหล็ก SD 40

ฯลฯ

4.2 <u>การตรวจนับสัดส่วนของโครงสร้างจากภาพถ่ายโครงสร้างจุลภาค</u>

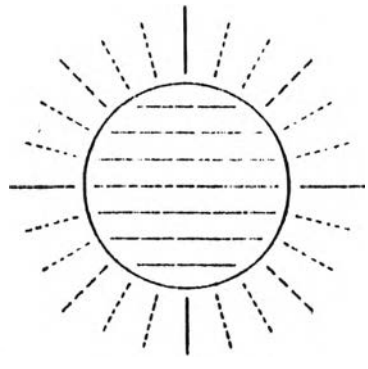
ตามวิธีการ Quantitative Stereology โดย Underwood,(1970) ได้กล่าวถึงวิธีการหาสัดส่วนของโครงสร้างว่า มีวิธีการในการตรวจหาสัดส่วนของโครงสร้างอยู่หลายวิธี วิธีการวัดเหล่านี้จะกระทำต่อภาพถ่ายโครงสร้างหรือภาพโครงสร้างที่มองเห็นจากกล้องจุลทรรศน์ วิธีการต่าง ๆ มีดังต่อไปนี้

1. ด้วยวิธีการใช้จุดนับ (Point counting) P_p เป็นวิธีการหนึ่งที่ง่ายที่สุดในหลักการของ Quantitative streology วิธีการจะทดสอบด้วยการใช้จุดอ้างอิงโดยการสร้างจุดตัดในรูปของตารางหรือจุดที่ปลายสุดของเส้นสั้น ๆ ที่ใช้ในการทดสอบ การนับจะกำหนดเปรียบเทียบจำนวนโครงสร้างที่เราสนใจตรงที่จุดตัดในพื้นที่ของรูปที่เท่า ๆ กัน และมีกำลังขยายเท่ากัน ดังในรูปที่ 20

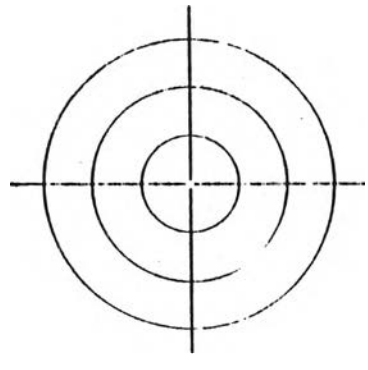


รูปที่ 20 การนับโครงสร้างด้วยการใช้จุดนับ (Underwood, 1970)

2. การใช้ความยาวของเส้นเป็นตัววัด (Number of points [intersections] generated per unit length of test line) P_L วิธีนี้จะใช้เส้นที่กำหนดไว้ในขอบเขตของพื้นที่โครงสร้างที่จะนับโดยจะกำหนดจุดตัด บนเส้นไว้ด้วยช่วงที่ยาวเท่า ๆ กัน จะสนใจตรงที่จุดตัดทาบบนโครงสร้างที่เราต้องการนับ ดังในรูปที่ 21



(a) แบบเส้นขนานสำหรับสุ่มนับโครงสร้างแบ่งด้วยมุม 15°



(b) แบบเส้นวงกลมสำหรับสุ่มนับโครงสร้าง

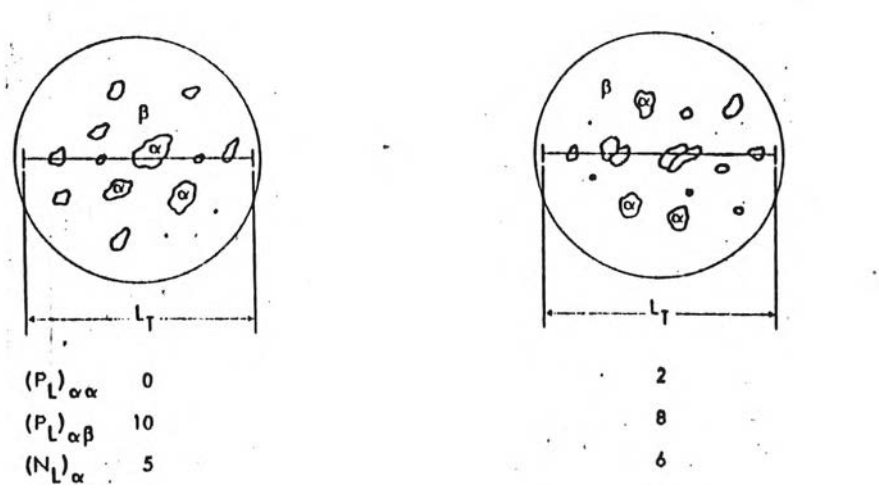
รูปที่ 21 การนับโครงสร้างด้วยเส้น (Underwood, 1970)

3. การวัดด้วยความยาวของเส้นที่กำหนดและมีจุดตัดทับกับโครงสร้างที่เราสนใจ (Number of interceptions of second-phase areas per unit length of test line) N_L มีวิธีการคล้ายกับการนับด้วยความยาวของเส้น (P_L) ดังในรูปที่ 21 แต่ถ้า

โครงสร้างแอลฟา (α-particle) ไม่ใช่โครงสร้างที่แยกจากกันเป็นโครงสร้างเดี่ยว ๆ การนับจะมีความสัมพันธ์กันระหว่าง N_L และ P_L ดังนั้นจะต้องทำการนับโครงสร้างที่แตกต่างกันนี้ด้วยส่วนที่ตัดกับเส้นที่ใช้ในการตรวจนับ (ดังในรูปที่ 22) นั่นคือจะมีผลของจุดตัดที่ตับเบิลแอลฟา ($\alpha\alpha$) และที่เป็นจุดตัดของแอลฟาและเบต้า ($\alpha\beta$) ดังนั้นสำหรับอนุภาคแอลฟา (α) จะได้จากสูตรดังนี้

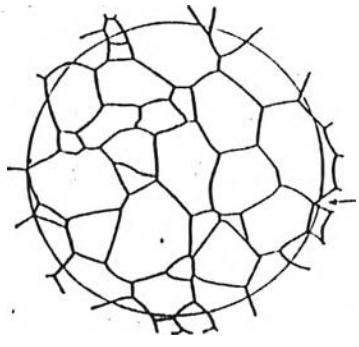
$$(N_L)_\alpha = \{2(P_L)_{\alpha\alpha} + (P_L)_{\alpha\beta}\}/2 \quad \text{มม}^{-1} \qquad \text{(5)}$$

และถ้าทุกอนุภาคแยกออกจากกันหมด ค่าของ $(P_L)_{\alpha\alpha}$ จะเป็นศูนย์ (0) ทำให้มีความสัมพันธ์เหมือนเดิม (สูตรที่ 5) แต่ถ้าโครงสร้างประกอบด้วยแอลฟาเฟส (α-phase) เท่านั้นจะทำให้ $(P_L)_{\alpha\beta}$ เป็นศูนย์ (0) และ $N_L = P_L$ เป็นเสมือนกับช่องว่างที่อยู่ระหว่างเกรน



รูปที่ 22 วิธีการวัดด้วยเส้นเทียบกับจุดตัดของโครงสร้าง (Underwood, 1970)

4. การวัดด้วยจำนวนจุดบนภาพโครงสร้างต่อหน่วยพื้นที่ (Number of point on a microstructure per unit area) P_A จำนวนของจุดที่นับได้ทั้งหมดจากพื้นที่ที่เลือกไว้จะให้เป็นสัดส่วนของ P/A ดังในรูปที่ 23



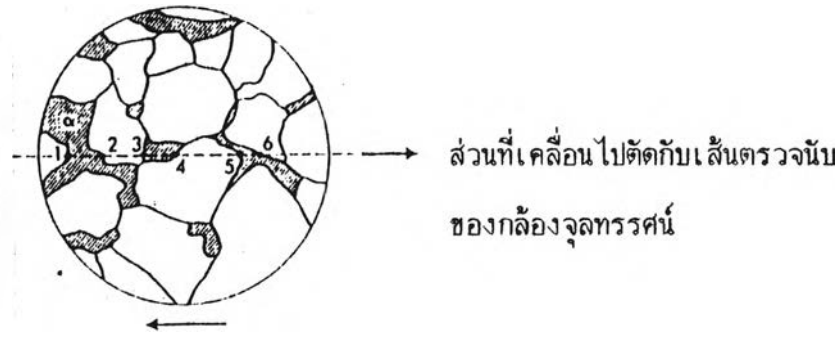
ชนิดของโครงสร้างที่มีเส้น
แบ่งเกรนบนพื้นผิวของหน้าตัด
ที่ลูกศรชี้เป็นจุดรวมของเส้น 4 เส้น

รูปที่ 23 วิธีการนับด้วยพื้นที่ที่กำหนด (Underwood, 1970)

5. นับด้วยจำนวนของสิ่งที่เราสนใจหรือโครงสร้างที่เราจะนับต่อพื้นที่ที่กำหนด (Count the number of objects in a certain area of the microstructure) N_A

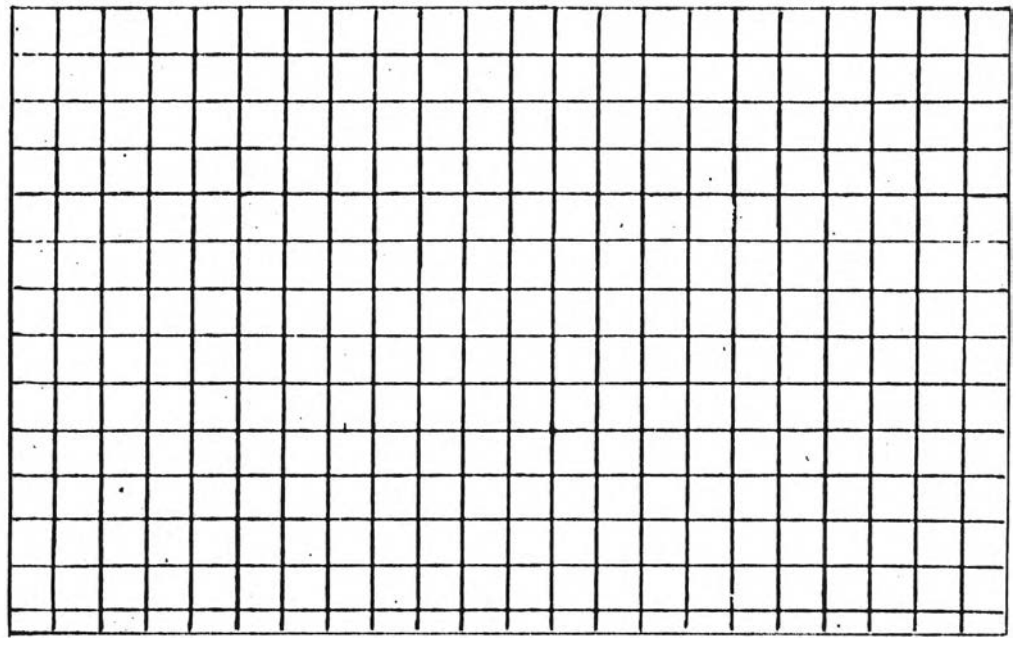
6. พิจารณาความสัมพันธ์ของพื้นที่ของโครงสร้างหรือเกรนต่อหน่วยพื้นที่ของรูปภาพโครงสร้าง (Determination of the relative area of a phase or constituent per unit area of the microstructure) A_A

7. วัดด้วยเส้นตรงที่ใช้ตรวจนับด้วยการวางทาบเส้นตรงนี้ด้วยการสุ่มโดยนับจุดที่เส้นตรงตัดกับโครงสร้างจุลภาค (intercepted lengths are measured along randomly applied lines across the microstructure) L_L ดังในรูปที่ 24



รูปที่ 24 วิธีการวัดด้วยเส้นที่กำหนดตัดกับโครงสร้างด้วยการสุ่ม (L_L) (Underwood, 1970)

จากวิธีการตรวจนับหาสัดส่วนของโครงสร้างหลายๆวิธีที่กล่าวมาแล้วนั้น วิธีการที่ง่ายที่สุดก็คือการตรวจนับด้วยวิธีการใช้จุดนับ (Point counting)P_p โดย Underwood, 1970 ซึ่งวิธีการนี้จะทำโดยการสร้างจุดตัด (intersections of a test grid) ในขนาดที่เท่ากันกับพื้นที่ที่ต้องการตรวจนับ โดยจุดตัดที่สร้างขึ้นจะมีตารางที่เท่า ๆ กันตลอดพื้นที่ที่จะตรวจนับ ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จะกระทำด้วยวิธีการแบ่งพื้นที่จากรูปโครงสร้างจุลภาค (Microstructure) ขนาดเท่าภาพโปสการ์ดออกเป็นขนาดตารางที่เท่า ๆ กันได้จุดตัดรวมเท่ากับ 273 จุด (ดังรูปที่ 25) วิธีการนับจะใช้แผ่นพลาสติคใสหรือแผ่นใสถ่ายเอกสารถ่ายตารางที่สร้างขึ้นนี้แล้วใช้แผ่นใสนี้ทาบตารางลงบนรูปภาพโครงสร้างจุลภาคแล้วนับจุดที่จุดตัดของตารางทับกับจุดที่เราสนใจแต่ก่อนที่จะทำการนับจะต้องกำหนดวิธีการไว้ล่วงหน้าเพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนที่อาจจะเกิดขึ้นจากความลำเอียงในการนับและวิเคราะห์ทางสถิติดูว่าตารางที่เราใช้ทดสอบมี 273 จุดนั้นเพียงพอหรือไม่ในขอบเขตความเชื่อมั่น 95%



รูปที่ 25 รูปตารางที่ใช้ในการตรวจนับโครงสร้าง

<u>วิธีการนับด้วยจุดนับ</u> (Point-Count Procedure)

เพื่อเป็นเครื่องมือก่อนทำการวิเคราะห์ทางสถิติ เราจะกำหนดขอบเขตเพื่อเป็นแนวทางในการปฏิบัติเพื่อเป็นการทำอย่างมีระบบในการนับ ดังนี้

1. จะต้องตัดสินใจว่ายอมให้คลาดเคลื่อนสูงสุดเท่าใด ในการตัดสินใจผู้ทำควรจะทำใจให้แน่วแน่ว่ายอมให้ความคลาดเคลื่อนนี้แปรเปลี่ยนไปมากน้อยแค่ไหน

2. ตัดสินใจหาค่าประมาณของปริมาณของส่วนย่อย (ส่วนที่ต้องการนับโดยมากเท่ากับตารางที่จะใช้นับ) โดยใช้ตาราง(Grid)ในการตรวจนับเพื่อหาค่า P_P

3. การประมาณค่าคร่าวๆนี้จะกระทำโดยการคำนวณค่าประมาณของจุดตัดทั้งหมด (P_T) ที่ต้องการเพื่อให้การตรวจนับในข้อ 2. มีความแม่นยำและใช้ได้ในความมั่นใจระดับหนึ่ง สำหรับขอบเขตความมั่นใจ 95% Gladman และ Woodhead แนะนำสูตรว่า

$$P_T = P_P(1-P_P)/\delta^2(P_P) \qquad \text{---------- (6)}$$

4. เลือกตารางที่จะใช้โดยยึดเวลาที่จะใช้ในการนับให้สั้นที่สุดจุดประสงค์เพื่อให้การนับใช้เวลาน้อยที่สุดด้วยจุดตัดที่คำนวณได้และมีความมั่นใจตามที่ตั้งไว้

5. การจะเพิ่มความเร็วในการนับมีความสำคัญในระดับหนึ่งด้วยวิธีการหาค่าเฉลี่ยของจุดที่ใช้นับตกลงในพื้นที่หนึ่ง ๆ ในรูปและต้องมีการบันทึกจำนวนที่นับได้เพื่อให้เป็นไปตามเป้าหมาย

6. ช่องว่างระหว่างขอบเขตต่าง ๆ ของรูปควรจะมีการคัดเลือก ดังนั้นพื้นที่ทั้งหมดของชิ้นทดสอบควรจะเป็นตัวอย่างแบบเดียวกัน

7. การบันทึกจำนวนจุดต่อขอบเขตของรูปจะเป็นแบบอัตโนมัติหรือบันทึกด้วยมือขึ้นอยู่กับความถนัดหรือความเหมาะสมต่าง ๆ ของผู้ทดสอบและความสำคัญของงาน จุดนับที่ตกอยู่ ณ. เขตแดน (grain boundary) ควรจะนับเป็น 1/2 การทำเช่นนี้เพื่อหลีกเลี่ยงความลำเอียงอันอาจเกิดจากตัวผู้ทดสอบและเป็นการระบุขนาดของความคลาดเคลื่อนในการทดลอง

8. ในแต่ละวิธีการตรวจสอบต้องการประมาณความเบี่ยงเบนมาตรฐาน จะเปรียบเทียบกันได้จะต้องมีขนาดของพื้นที่ ๆ จะทดสอบเท่ากัน

9. เมื่อการตรวจนับผ่านพ้นไปประมาณครึ่งหนึ่ง ปริมาณของเศษย่อยควรจะคำนวณค่า P_T ใหม่เพื่อที่จะยังคงรักษาความเที่ยงตรงของค่า P_T ไว้

10. เมื่อการตรวจนับสิ้นสุดลง เราต้องคำนวณค่าสุดท้ายของ P_P และยังคงได้ค่า $\delta^2(V_v)$ หรือ $\delta(V_v)$ จากสมการที่ 6

$$P_P = P_\alpha / P_T \qquad \text{(7)}$$

เมื่อ P_P = ratio ของจุด α ที่นับได้จาก grid

P_α = จุดของ grid ที่ทับอยู่บน element ที่เราจะนับ

P_T = จำนวนจุดตัดของ grid ทั้งหมด

การตรวจสอบตารางที่ใช้นับโครงสร้าง (Grid) ที่สร้างขึ้น เพื่อให้มั่นใจว่ามีความแม่นยำเชื่อถือได้ตามวิธีการนับด้วยจุดนับแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก.

นอกจากนี้ก่อนที่จะทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคจะต้องกำหนดวิธีการเพื่อใช้ในการตรวจสอบนอกเหนือจากวิธีการของ Underwood เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนอันอาจเกิดขึ้น

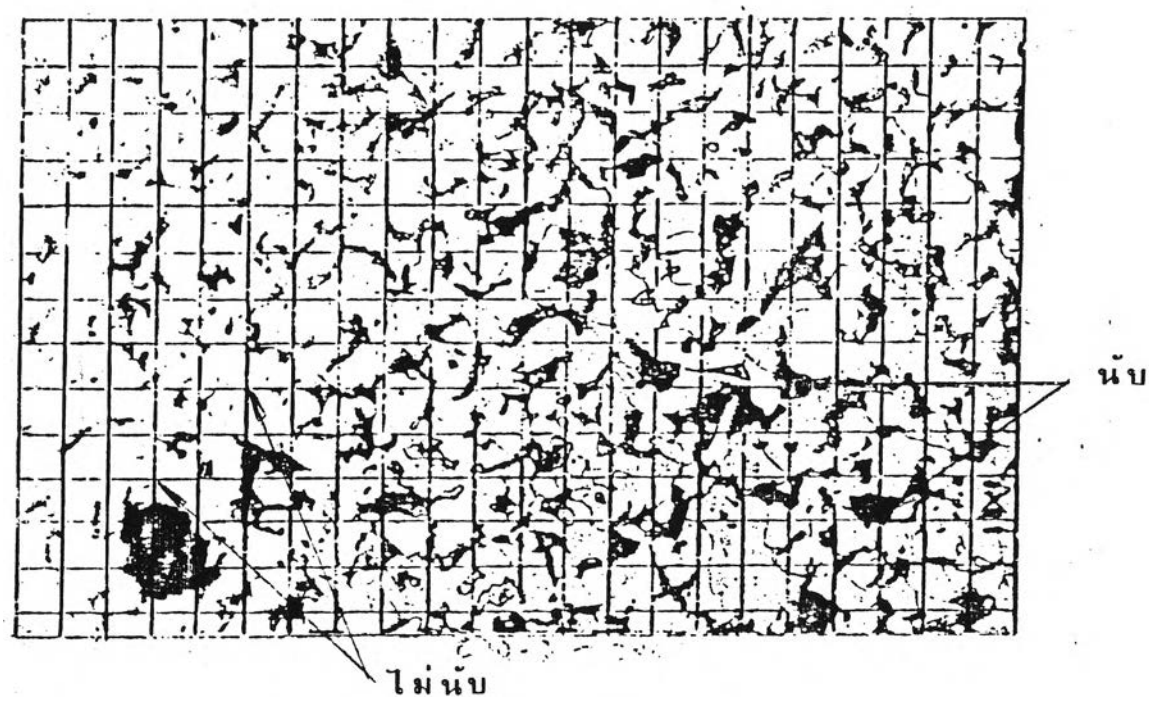
จากความลำเอียงในการนับดังต่อไปนี้

1. การตรวจนับจะกระทำด้วยการทาบตาราง grid ที่เราสร้างขึ้นบนภาพที่มีกำลังขยายเท่ากัน ขนาดของภาพเท่ากัน (การวิจัยครั้งนี้ใช้ขนาดภาพโปสการ์ด) ในทุก ๆ ภาพ

2. การนับต้องกระทำด้วยความเร็วที่สม่ำเสมอ เช่นประมาณภาพละ 3 นาที แล้วพัก 3 นาที

3. จุดตัดที่ทาบลงบนโครงสร้างจะต้องการนับที่ภาพโครงสร้างอะไร เช่น การวิจัยครั้งนี้เป็นโครงสร้างของเหล็กคาร์บอนต่ำซึ่งเป็น เพียร์ไลท์และเฟอร์ไรท์ จะนับเฉพาะที่จุดตัดทาบบนโครงสร้างเพียร์ไลท์เท่านั้นเพราะเป็นโครงสร้างสีดำนับได้ง่าย การนับจะนับทุก ๆ จุดที่จุดตัดทาบบนโครงสร้างเพียร์ไลท์ แต่จุดตัดที่ทาบบนเส้นแบ่งเกรนและบนโครงสร้างเฟอร์ไรท์จะไม่นับ

4. ภาพทุกภาพที่วิจัยครั้งนี้มีกำลังขยายเท่ากันคือ 200 เท่า และเป็นตัวอย่างของเหล็กข้ออ้อยจากบริษัท A และ B ที่ระบุเป็นเกรดเดียวกัน



รูปที่ 26 ตัวอย่างการวางตารางนับโครงสร้างบนภาพโครงสร้างจุลภาค

ผลของการนับภาพโครงสร้างจุลภาคจากตัวอย่างของบริษัท A และ B ทั้ง 18 ภาพซึ่งตรวจนับเฉพาะโครงสร้างเพียร์ไลท์ ได้ผลดังนี้

1. A_{30-1} จำนวนจุดที่นับได้ 96 จุด = (96*100)/273 = 35.16%
2. A_{30-2} จำนวนจุดที่นับได้ 67 จุด = (67*100)/273 = 24.54%
3. A_{30-3} จำนวนจุดที่นับได้ 55 จุด = (55*100)/273 = 20.15%
4. A_{40-1} จำนวนจุดที่นับได้ 182 จุด = (182*100)/273= 66.67%
5. A_{40-2} จำนวนจุดที่นับได้ 132 จุด = (132*100)/273= 48.35%
6. A_{40-3} จำนวนจุดที่นับได้ 76 จุด = (76*100)/273 = 27.84%
7. A_{50-1} จำนวนจุดที่นับได้ 175 จุด = (175*100)/273= 64.10%
8. A_{50-2} จำนวนจุดที่นับได้ 175 จุด = (175*100)/273= 64.10%
9. A_{50-3} จำนวนจุดที่นับได้ 178 จุด = (178*100)/273= 65.20%
10. B_{30-1} จำนวนจุดที่นับได้ 48 จุด = (48*100)/273 = 17.58%
11. B_{30-2} จำนวนจุดที่นับได้ 94 จุด = (94*100)/273 = 34.43%
12. B_{30-3} จำนวนจุดที่นับได้ 66 จุด = (66*100)/273 = 24.18%
13. B_{40-1} จำนวนจุดที่นับได้ 95 จุด = (95*100)/273 = 34.80%
14. B_{40-2} จำนวนจุดที่นับได้ 92 จุด = (92*100)/273 = 33.70%
15. B_{40-3} จำนวนจุดที่นับได้ 78 จุด = (78*100)/273 = 28.57%
16. B_{50-1} จำนวนจุดที่นับได้ 132 จุด = (132*100)/273= 48.35%
17. B_{50-2} จำนวนจุดที่นับได้ 78 จุด = (78*100)/273 = 28.57%
18. B_{50-3} จำนวนจุดที่นับได้ 77 จุด = (77*100)/273 = 28.20%

จากผลการนับเปอร์เซนต์ของเพียร์ไลท์ (% Pearlite) ของเหล็กเกรดต่าง ๆ ของแต่ละบริษัทจำนวนเกรดละ 3 ชิ้น นำเอาผลที่นับได้เหล่านี้มาหาค่าเฉลี่ยได้ผลดังนี้

1. %เพียร์ไลท์ ของ A_{30} =(35.16 + 24.54 + 20.15)/3 = 26.62 %
2. %เพียร์ไลท์ ของ A_{40} =(66.67 + 48.35 + 27.84)/3 = 47.62 %

3. %เพียร์ไลท์ ของ A_{50} =(64.10 + 64.10 + 65.20)/3 = 64.47 %

4. %เพียร์ไลท์ ของ B_{30} =(17.58 + 34.43 + 24.18)/3 = 25.40 %

5. %เพียร์ไลท์ ของ B_{40} =(34.80 + 33.70 + 28.57)/3 = 32.09 %

6. %เพียร์ไลท์ ของ B_{50} =(48.35 + 28.57 + 28.20)/3 = 35.04 %

ค่าเฉลี่ยที่ตรวจสอบได้จากเหล็กเกรดต่าง ๆ ของบริษัท A และ B เหล่านี้เป็นค่าเฉลี่ยของ % เพียร์ไลท์ ส่วนที่เหลือจะเป็นสัดส่วนของ % เฟอร์ไรท์ โดยนำเอา % เพียร์ไลท์ลบออกจาก 100 แล้วนำค่าของ % เพียร์ไลท์ และ % เฟอร์ไรท์นี้ไปคำนวณหาเปอร์เซนต์คาร์บอนด้วยการแทนค่าลงในสูตรที่แนะนำโดย Rolfe,(1937) เพื่อนำผลที่คำนวณได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากการทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากศูนย์เครื่องมือฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ว่าวิธีการของ Rolfe จะมีความแม่นยำเพียงใด

สูตร % C = [(%เพียร์ไลท์/8)/15] + [(%เฟอร์ไรท์*0.025)/100]

% C ใน A_{30} =[(26.62/8)/15] + [(73.38*0.025)/100]

= 0.22183 + 0.01834

= 0.24017 = 0.24 %

% C ใน A_{40} =[(47.62/8)/15] + [(53.38*0.025)/100]

= 0.39683 + 0.01309

= 0.40992 = 0.41 %

% C ใน A_{50} =[(64.47/8)/15] + [(35.53*0.025)/100]

= 0.53725 + 0.00888

= 0.54613 = 0.55 %

ในทำนองเดียวกันเราสามารถหาค่า %C ในเหล็กเกรดต่างๆของบริษัท B ได้ด้วยวิธีการเดียวกันดังต่อไปนี้

% C ใน B_{30} =[(25.40/8)/15] + [(74.60*0.025)/100]

= 0.21166 + 0.01865

= 0.23031 = 0.23 %

% C ใน B_{40} =[(32.09/8)/15] + [(67.91*0.025)/100]

= 0.26741 + 0.01697

= 0.28843 = 0.29 %

% C ใน B_{50} =[(35.04/8)/15] + [(64.96*0.025)/100]

= 0.29200 + 0.01624

= 0.30824 = 0.31 %

ปริมาณของ % C ที่คำนวณได้จากวิธีการของ Underwood และ Rolfe จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตารางที่ 1 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานควบคุม มอก.24-2527 มีค่าใกล้เคียงกัน ค่าที่ระบุควบคุมจากตารางเป็นค่าที่แฝงอยู่ในรูปของ (คาร์บอน + แมงกานีส/6) มีเพียง SD 30 เท่านั้นที่ควบคุมเปอร์เซนต์คาร์บอนเท่ากับ 0.28 % เปรียบเทียบกันแล้วจะเห็นได้ว่าวิธีการของ Underwood และ Rolfe มีความแม่นยำพอสมควร จากนั้นนำผลที่คำนวณได้นี้ไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ ชิ้นตัวอย่างที่ส่งไปวิเคราะห์ได้จากการสุ่มชิ้นตัวอย่างที่ถ่ายภาพแล้วได้ชิ้นตัวอย่างดังนี้

เกรด SD_{30} ได้ชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น คือ A_{1-30} , B_{1-30} , B_{2-30}

เกรด SD_{40} ได้ชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น คือ A_{1-40} , A_{2-40} , B_{2-40}

เกรด SD_{50} ได้ชิ้นตัวอย่าง 3 ชิ้น คือ A_{2-50} , B_{2-50} , B_{3-50}

ผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สามารถวิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ ได้ทั้งสิ้นจำนวน 21 ธาตุ แต่ในมาตรฐานอุตสาหกรรมควบคุมเพียง 5 ธาตุเท่านั้น ผลที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากศูนย์ฯ แสดงรายละเอียดอยู่ในภาคผนวก ข. และพอจะสรุปเป็นตารางตามมาตรฐานอุตสาหกรรม ของชิ้นตัวอย่าง A_{1-30} ได้ดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ธาตุจากศูนย์ของตัวอย่าง A_{1-30}

ชั้นคุณภาพ	ร้อยละโดยน้ำหนัก				
	คาร์บอน	แมงกานีส	ฟอสฟอรัส	กำมะถัน	คาร์บอน + แมงกานีส/6
A_{1-30}	.2551	.7972	.0339	.0471	.2551+(.7972/6)=.3880

ผลจากการคำนวณตามวิธีการของ Underwood และ Rolfe เป็นการคำนวณพิจารณาเฉพาะธาตุคาร์บอนเพียงธาตุเดียว จึงเปรียบเทียบกับปริมาณธาตุที่ระบุในตารางที่ 1 ได้ไม่ชัดเจน ดังนั้นจึงนำมาเปรียบเทียบกับธาตุคาร์บอนที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากศูนย์วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีค่าดังนี้

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนจากการคำนวณและการวิเคราะห์

เกรด	ปริมาณคาร์บอน(%)	
	ผลจากการคำนวณ	ผลจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ
A_{1-30}	0.3094	0.2551
B_{1-30}	0.1671	0.2150
B_{2-30}	0.3033	0.2257
A_{1-40}	0.5639	0.3138
A_{2-40}	0.4158	0.3123
B_{2-40}	0.2974	0.3084
A_{2-50}	0.5431	0.3880
B_{2-50}	0.2570	0.2901
B_{3-50}	0.2529	0.2840

จากผลการเปรียบเทียบปริมาณคาร์บอนโดยการสุ่มตัวอย่างจากทั้ง 2 บริษัท มีข้อสังเกตุอยู่ว่าชิ้นตัวอย่างของบริษัท A ผลที่ได้ไม่ว่าจะใช้วิธีการคำนวณ หรือ จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ธาตุจะมีค่า %C สูงกว่าของบริษัท B ทุกชิ้น หากนำผลทั้งหมดมาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเปรียบเทียบกัน จะได้ผลดังนี้

ตารางที่ 6 ผลเฉลี่ยเปรียบเทียบค่าเปอร์เซนต์คาร์บอน

ชั้นคุณภาพ	ปริมาณคาร์บอน(%)	
	ผลเฉลี่ยจากการคำนวณ	ผลเฉลี่ยจากเครื่องวิเคราะห์
SD 30	0.2599	0.2319
SD 40	0.4257	0.3115
SD 50	0.3510	0.3207

จากผลการเฉลี่ยค่าคาร์บอนในตารางที่ 6 จะเห็นว่าวิธีการคำนวณและการวิเคราะห์ด้วยเครื่องทั้ง SD 30, SD 40,และSD 50 มีผลที่แตกต่างกันเพราะมีผลมาจากตำแหน่งของการทดสอบของโครงสร้างจุลภาคกับการวิเคราะห์ธาตุเป็นคนละตำแหน่งและเป็นจุดเล็ก ๆ เท่านั้นอาจทำให้ค่าที่ได้แตกต่างกันบ้าง หากการทดสอบใช้ตำแหน่งการทดสอบหลาย ๆ จุด แล้วหาค่าเฉลี่ยเปรียบกันจะทำให้ผลการวิเคราะห์ใกล้เคียงกันมากขึ้น

เปรียบเทียบการทำนายคุณสมบัติเชิงกลด้วย %คาร์บอนจากการคำนวณและจากเครื่องวิเคราะห์ธาตุ

สูตร การทำนายคุณสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการของ Rolfe, (1937) มีดังนี้

$$TS = [((93*\%C)+41)/2]*1.55 \quad กก/มม^2$$

เกรด SD 30 % C จากการคำนวณเฉลี่ย = 0.2599 %

$$TS = [((93*0.2599)+41)/2]*1.55$$

$$= 50.5072 \quad กก/มม^2$$

เกรด SD 30 % C จากเครื่องวิเคราะห์เฉลี่ย = 0.2319 %

TS = [((93*0.2319)+41)/2]*1.55

= 48.4891 กก/มม^2

เกรด SD 40 % C จากการคำนวณเฉลี่ย = 0.4257 %

TS = [((93*0.4257)+41)/2]*1.55

= 62.4573 กก/มม^2

เกรด SD 40 % C จากเครื่องวิเคราะห์เฉลี่ย = 0.3115 %

TS = [((93*0.3115)+41)/2]*1.55

= 54.2263 กก/มม^2

เกรด SD 50 % C จากการคำนวณเฉลี่ย = 0.3510 %

TS = [((93*0.3510)+41)/2]*1.55

= 57.0733 กก/มม^2

เกรด SD 50 % C จากเครื่องวิเคราะห์เฉลี่ย = 0.3207 %

TS = [((93*0.3207)+41)/2]*1.55

= 54.8894 กก/มม^2

ผลการทำนายความด้านแรงดึงด้วยวิธีการของ Rolfe ได้ % คาร์บอนที่ได้จากการคำนวณ และจากการวิเคราะห์ด้วยเครื่องทดสอบ ซึ่งเป็นเปอร์เซนต์คาร์บอนของเหล็กเส้นปกติ นำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการทดสอบความด้านแรงดึงด้วยการดึงจริง ๆ จากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้ผลตามตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ตารางเปรียบเทียบความต้านแรงดึงตามวิธีของ Rolfe และ Underwood

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึง (กก./มม^2.)	
	% C จากการคำนวณ	% C จากเครื่องวิเคราะห์
SD 30	50.5072	48.4891
SD 40	62.4573	54.2263
SD 50	57.0733	54.8894

ตารางที่ 8 ตารางเปรียบเทียบความต้านแรงดึงของเหล็กเส้นปกติกับเหล็กเส้นที่ผ่านการเชื่อม

(ผลจากการดึงด้วยเครื่องทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือฯ)

ชั้นคุณภาพ	ความต้านแรงดึง (กก./มม^2.)			
	เหล็กเส้นปกติ		เหล็กเส้นที่เชื่อม	
	บริษัท A	บริษัท B	บริษัท A	บริษัท B
SD 30	61.92	58.79	52.44	54.53
SD 40	71.85	68.65	55.91	57.72
SD 50	80.11	78.66	55.73	54.42

จากการเปรียบเทียบความต้านแรงดึงของเหล็กเส้น (ในตารางที่ 7 และ 8) พบว่า ในกรณีที่ใช้วิธีการคำนวณด้วย %C โดยการใช้สูตรของ Rolfe,1937 ความต้านแรงดึงที่ใช้ %C ซึ่งได้จากการตรวจนับด้วยวิธีการของ Underwood,1970 กับการใช้ %C ที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากศูนย์เครื่องมือฯให้ผลแตกต่างกัน มีค่าที่แตกต่างมากกว่าค่าอื่น ๆ อยู่บ้าง คือ ความต้านแรงดึงของ SD40 ผลความต้านแรงดึงที่คำนวณได้จากการใช้ %C จากวิธีการของ Underwood,1970 ได้ = 62.4573 กก/มม^2 ขณะที่ใช้ %C จากเครื่องวิเคราะห์ได้ผล = 54.2263 กก/มม^2 มีค่าที่ต่างกัน = 8.2310 กก/มม^2 สาเหตุเพราะการถ่ายภาพโครงสร้างและการวิเคราะห์ธาตุล้วนแต่เป็นการวิเคราะห์จากจุดเล็ก ๆ เท่านั้น หากการวิเคราะห์ใช้จำนวนตัวอย่างหรือตำแหน่งของการวิเคราะห์มากขึ้นจะมีผลทำให้ค่าเฉลี่ยของผลการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันมากขึ้น อีกประการหนึ่งก็เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์คนละตำแหน่ง และจำนวนตัวอย่างที่น้อย ส่วนผลความต้านแรงดึงของเหล็กเส้นปกติเปรียบเทียบกับเหล็กที่เชื่อมพบว่ามีความแตกต่างกันมากทั้งของบริษัท A และบริษัท B ในความต้านแรงดึงของเหล็กที่เชื่อมทุกเกรดของทั้งสองบริษัทมีค่าใกล้เคียงกันแต่มีผลต่างจากความต้านแรงดึงของเหล็กเส้นปกติมาก สาเหตุเพราะการต่อชนเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E-6013 ซึ่งลวดเชื่อมนี้มีความต้านแรงดึงต่ำสด 46.92 กก/มม^2 จึงมีผลทำให้ความต้านแรงดึงต่ำลง รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของรอยต่ออันเนื่องมาจากอุณหภูมิในการเชื่อม ดังนั้นการจะเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กที่เชื่อมอาจกระทำได้โดยการเลือกลวดเชื่อมที่มีคุณสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กและอาจมีการอบให้ความร้อน (Heat treatment) แก่รอยต่อก่อนการเชื่อมและควบคุมการเย็นตัวหลังการเชื่อม ถ้าหากค่าของ C.E.(Carbon Equivalent) อยู่ในขอบเขตตามตารางต่อไปนี้

การตรวจสอบว่าจะต้องมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนเชื่อมหรือไม่จะกระทำได้โดยการใช้สูตรหาค่า C.E. ดังต่อไปนี้ (นิธิ เจริญรัตน์ โลหะในงานวิศวกรรมเครื่องกล,2527)

$$C.E. = \%C+(\%Mn/6)+(\%Ni/15)+(\%Mo/4)+(\%Cr/5) \quad \text{---------} \quad (8)$$

ตารางที่ 9 ตารางกำหนดอุณหภูมิที่จำเป็นต่อการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนเชื่อม

(นิธิ เจริญรัตน์ โลหะในงานวิศวกรรมเครื่องกล เรื่องงานเชื่อม, 2527)

C.E.	อุณหภูมิที่ต้องเผาชิ้นงานก่อนเชื่อม (°C)
จนถึง 0.45%	ไม่จำเป็นต้องให้ความร้อน
0.45%-0.6%	100 - 200°C
เกิน 0.60%	200 - 300°C

แต่อย่างไรก็ดี เหล็กกล้าผสม (Alloy Steel) นั้นอุณหภูมิในการให้ความร้อน (Preheat) ไม่ควรเกินกว่าอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดโครงสร้างมาเทนไซท์ (Martensite Temperature) เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดมาเทนไซท์ขึ้น ควรที่จะคำนวณหาอุณหภูมิที่จะทำให้เกิดโครงสร้างมาเทนไซท์ก่อน ด้วยการใช้สูตรต่อไปนี้ (นิธิ เจริญรัตน์ โลหะในงานวิศวกรรมเครื่องกล, 2527)

$$Tm = 550^{\circ}C - 350\%C - 40\%Mn - 35\%V - 20\%Cr - 17\%Ni - 10\%Cu - 10\%Mo - 5\%W - 15\%Co + 30\%Al \quad \text{-------} \quad (9)$$

การวิจัยครั้งนี้พบว่าเหล็กเกรด SD50 ซึ่งมีปริมาณคาร์บอนสูงที่สุดความต้านแรงดึงของชิ้นงานหลังจากเชื่อมต่อแล้วลดลง จึงขอนำเอามาเป็นตัวอย่างที่จะคำนวณดูว่าควรจะต้องมีการให้ความร้อนก่อนการเชื่อมหรือไม่

ตัวอย่าง $A_2$50 มีปริมาณธาตุที่ได้จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุจากศูนย์ฯดังนี้

Fe	6.462
C	0.3880
Si	0.3379
Mn	1.246
P	0.0203
S	0.0413
Ni	0.0977
Cr	0.2333
Mo	0.0126
Ti	0.0037
V	0.0523
Al	0.0035
W	0.0000
Co	0.0219
Nb	0.0097
Pb	0.0389
Sn	0.0333
As	0.0217
B	0.0000
Zr	0.0061

แทนค่าธาตุต่าง ๆ เพื่อหาค่า C.E.ในสูตรที่ 8 ได้ดังนี้

C.E. = 0.3880+(1.246/6)+(0.0977/15)
+(0.0126/4)+(0.2333/5)
=0.65199

จากค่า C.E. ที่คำนวณได้จะเห็นว่าเมื่อเทียบกับตารางแล้วจะต้องทำการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนเชื่อม และอุณหภูมิที่ต้องให้อยู่ระหว่าง 200-300 °C ดังนั้นจะต้องคำนวณต่อไปอีกว่าอุณหภูมิที่ใช้นั้นจะทำให้เกิดโครงสร้างมาเทนไซท์หรือไม่ด้วยการแทนค่าธาตุต่าง ๆ ที่มีอยู่ลงในสูตรที่ 9 ดังนี้

$$
\begin{aligned}
Tm &= 550^{\circ}C-(350*.3880)-(40*1.246)-(35*.0523) \\
&\quad -(20*.2333)-(17*.0977)-(10*.2532)-(10*.0126) \\
&\quad -(5*.0000)-(15*.0219)+(30*.0035) \\
&= 353.3211 \simeq 353\ ^{\circ}C
\end{aligned}
$$

จากการคำนวณตามตัวอย่างนี้จะเห็นว่าควรจะต้องมีการให้ความร้อนแก่ชิ้นงานก่อนเชื่อมและควบคุมอัตราการเย็นตัวหลังเชื่อมเพื่อเพิ่มคุณสมบัติเชิงกลแก่ชิ้นงาน ในอุณหภูมินี้ (200-300°) เทียบกับอุณหภูมิที่คำนวณได้จาก = 353 °C แสดงว่ายังไม่เกิดโครงสร้างมาเทนไซท์ ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิในการเผาชิ้นงานก่อนเชื่อมตามตารางที่กำหนดไว้ได้

<u>คำนวณความแข็งแรงของการต่อตามทฤษฎีเปรียบเทียบกับผลการทดลอง</u>

ในการทดลองครั้งนี้กำหนดให้ใช้เหล็กเส้นที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 มม. เชื่อมต่อชนแบบต่าง ๆ 4 แบบ (ดังในรูปที่ 1) เมื่อเชื่อมเสร็จแล้วต้องกลึงลดขนาดลงให้เหลือขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มม. ก่อนจะนำไปทดสอบหาความต้านแรงดึง ในการต่อครั้งนี้เป็นการต่อชนซึ่งจะทำให้พื้นที่รับแรงมีขนาดเท่ากับรอยต่อหรือเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 12.5 มม. หากคำนวณตามทฤษฎีจะได้ค่าความแข็งแรงออกมาในรูปของแรงดึงที่ควรจะเป็นซึ่งได้จากการใช้ค่าความต้านแรงดึงจากตารางที่ 2 และพื้นที่หน้าตัดไปแทนค่าสูตรจะได้ผลดังต่อไปนี้

สูตร ความต้านแรงดึง = (แรง / พท.หน้าตัด)

แรง = ความต้านแรงดึง*พท.หน้าตัด ---------- (10)

จากการใช้ค่าความต้านแรงดึงตามมาตรฐานของกระทรวงอุตสาหกรรม (ตารางที่ 2)

SD 30	49	= แรง /[(3.14/4)*12.5*12.5]
	แรง	= 49*(3.14/4)*12.5*12.5
		= 6010.16 กิโลกรัมแรง
SD 40	57	= แรง /[(3.14/4)*12.5*12.5]
	แรง	= 57*(3.14/4)*12.5*12.5
		= 6991.41 กิโลกรัมแรง
SD 50	63	= แรง /[(3.14/4)*12.5*12.5]
		= 63*(3.14/4)*12.5*12.5
		= 7727.34 กิโลกรัมแรง

จากผลการทดลอง

ใช้ผลการทดสอบที่ได้จากการทดลองต่อชิ้นงานแล้วส่งทดสอบที่ศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้ค่าเฉลี่ยของความต้านแรงดึงของแบบที่ให้ค่าสูงสุดในทุก ๆ เกรด คือ SD30 SD40 SD50 ตามตารางที่ 10 ซึ่งเป็นของบริษัท A และ B ตามลำดับ

ตารางที่ 10 ความต้านแรงดึงสูงสุด (กก./มม^2)

SD30		SD40		SD50	
บริษัท A	บริษัท B	บริษัท A	บริษัท B	บริษัท A	บริษัท B
52.44	54.53	55.91	57.72	55.73	54.42

การคำนวณด้วยการใช้สูตรเดียวกันกับการคำนวณตามทฤษฎีได้ผลดังต่อไปนี้

SD30 (A) แรง =52.44*(3.14/4)*12.5*12.5

=6,432.09 กิโลกรัมแรง

SD30 (B) แรง =54.53*(3.14/4)*12.5*12.5

=6,688.44 กิโลกรัมแรง

SD40 (A) แรง =55.91*(3.14/4)*12.5*12.5

=6,857.71 กิโลกรัมแรง

SD40 (B) แรง =57.72*(3.14/4)*12.5*12.5

=7,079.72 กิโลกรัมแรง

SD50 (A) แรง =55.73*(3.14/4)*12.5*12.5

=6.835.63 กิโลกรัมแรง

SD50 (B) แรง =54.42*(3.14/4)*12.5*12.5

=6,674.95 กิโลกรัมแรง

ตารางที่ 11 ตารางเปรียบเทียบแรงจากทฤษฎีและจากการทดลอง (กิโลกรัมแรง)

SD30			SD40			SD50		
ทฤษฎี	A	B	ทฤษฎี	A	B	ทฤษฎี	A	B
6,010	6,432	6,660	6,991	6,857	7,079	7,418	6.835	6.675

จากตารางที่ 11 จะเห็นได้ว่าแรงที่คำนวณได้จากทฤษฎีและจากการทดลองในเกรด SD30 และ SD40 ไม่แตกต่างกันมากนัก จะแตกต่างกันมากที่ SD50 พบว่าเหล็กที่เชื่อมมีค่าของแรงกระทำที่คำนวณได้จากการทดลองจริง ๆ ต่ำกว่าจากทฤษฎีค่อนข้างมากเหตุที่เป็นเช่นนี้พอจะสรุปได้ว่า

1. เนื่องจากเหล็ก SD50 มีส่วนผสมของธาตุคาร์บอนรวมกันอยู่ในรูปของคาร์บอนกับแมงกานีส และมีค่ามากกว่าเหล็กเกรดอื่น คือ มีค่า [คาร์บอน + แมงกานีส/6] = 0.60% จะเป็นสาเหตุทำให้มีผลกระทบต่อคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเมื่อผ่านการเชื่อมซึ่งมีผลมาจากการแตกตัวของคาร์บอนในเพียร์ไลท์ (Pearlite) ไปเป็นเฟอร์ไรท์ (Ferrite) จึงทำให้คุณสมบัติเชิงกลลดต่ำลง

2. รอยต่อถูกเชื่อมด้วยลวดเชื่อม E - 6013 ซึ่งมีความต้านแรงดึงต่ำสุดเท่ากับ 46.92 กก/มม^2 ซึ่งเป็นขนาดที่ต่ำกว่าคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กเกรดนี้อยู่แล้วจึงเป็นเหตุหนึ่งที่ทำให้ความต้านแรงดึงของเหล็กนี้ลดลง

3. อุณหภูมิของการเชื่อมทำให้โครงสร้างของเหล็ก SD50 เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากอุณหภูมิที่ใช้เป็นจุดที่ทำให้เหล็กหลอมละลายจึงทำให้เกิดการฟอร์มรูปร่างของโครงสร้างใหม่ (ดังในรูปที่ 13A -13E) จึงทำให้ความต้านแรงดึงลดลง

ตารางที่ 12 เปรียบเทียบแรงที่กระทำจากการคำนวณตามทฤษฎีด้วยผลจาก สมอ.และการดึงจริง ๆ

ชั้นคุณภาพ	แรงที่กระทำต่อพื้นที่หน้าตัดของชิ้นทดสอบ (กก.แรง)		
	ใช้ความต้านแรงดึงจาก มอก.24-2527	ใช้ความต้านแรงดึงจากผลการดึงจริงๆ	
		บริษัท A	บริษัท B
SD 30	6,010.16	6,452.58	6,688.45
SD 40	6,991.41	6,857.71	7,079.72
SD 50	7,418.25	6,835.63	6,674.95