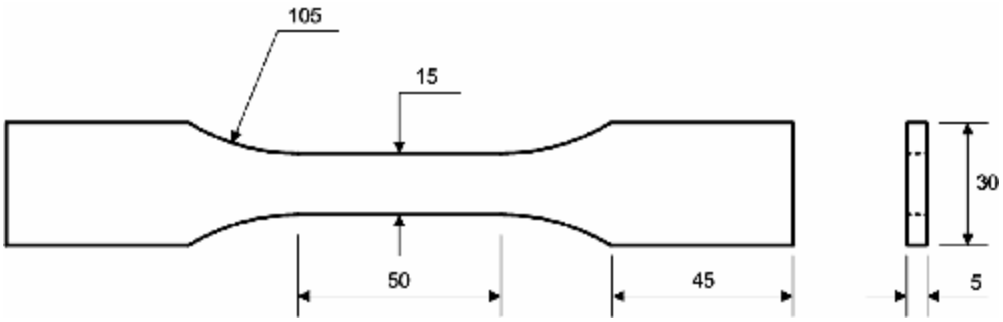
บทที่ 3

ระเบียบวิธีวิจัย

3.1 การศึกษาองค์ประกอบ โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกล

ชิ้นทดสอบทำจากเหล็กคาร์บอนต่ำแบบแผ่นรีดร้อน (hot-rolled) ซึ่งถูกตัดและขึ้นรูปด้วยเครื่องกัด (NC milling) รูปร่างของชิ้นทดสอบถูกออกแบบตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM E466-96 (Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials) [19] ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และเพื่อที่จะหลีกเลี่ยงความซับซ้อน เนื่องจากผลกระทบของทิศทางการรีดเหล็กต่อคุณสมบัติการล้า จึงกำหนดให้ทิศทางตามแนวยาวของชิ้นทดสอบขนานกับทิศทางการรีดของเหล็ก



รูปที่ 3.1 ชิ้นทดสอบแบบ drumbell-shape (มม) [19]

กระบวนการคาโบไนตรายดิง [5] เริ่มต้นด้วยให้ความร้อนชิ้นทดสอบถึงอุณหภูมิ 870°C ในบรรยากาศแก๊สเอนโดเทอร์มิค (endothermic) เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้แน่ใจว่าอุณหภูมิภายในเตามีความร้อนอย่างสม่ำเสมอ จากนั้นจึงเติมแก๊สตัวทำปฏิกิริยา (1% carbon potential) และแก๊สแอมโมเนีย (NH_3) ลงในเตาที่อัตราการไหลของแก๊สเท่ากับ 18 m^3/hour และรักษาอุณหภูมิให้คงที่ที่ 870°C เป็นเวลา 180 นาที ก่อนที่จะนำชิ้นทดสอบไปชุบแข็ง (quenching) ในน้ำมันที่อุณหภูมิ 60°C และกระบวนการต่อมาคือ อบเพื่อคลายความเครียด (tempering) โดยทำที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำออกมาจากเตาเพื่อปล่อยให้เย็นตัวที่อากาศภายนอก

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ชิ้นทดสอบวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค จะถูกตัดด้วยเครื่อง EDM (electrical discharged machine) เพื่อลดความเสียหายและผลกระทบอื่น ๆ ต่อโครงสร้างจุลภาค เนื่องจากกระทำภายใต้การปกคลุมด้วยน้ำมันและใช้หลักการตัดด้วยประกายไฟ (sparking) จึงช่วยระบายความร้อนและป้องกันการเกิดออกซิเดชั่น (oxidation) ระหว่างเหล็กกับอากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดสนิม และช่วยลดแรงกระแทกบนชิ้นทดสอบ ซึ่งอาจจะมีผลต่อความเค้นคงค้าง (residual stress) องค์ประกอบทางเคมีของชิ้นทดสอบที่ผ่านและไม่ผ่านการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง ได้วิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Baird: Spectovec 2000 Arc/Spark) เนื่องจากมีข้อจำกัดในการวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนด้วยเครื่องมือชนิดนี้ จึงได้วิเคราะห์เฉพาะธาตุพื้นฐานเท่านั้น ซึ่งได้แก่ C Si Mn และ P เป็นต้น รูปแบบของเหล็กคาร์บอนและเหล็กไนโตรเจน หลังจากการชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง หาได้ด้วยเครื่อง X-ray diffractometer (Bruker-axs: D8 discover with Cu Kα radiation)

การแสดงโครงสร้างจุลภาค ได้จากการตัดชิ้นทดสอบตามขวางด้วยเครื่องกัดไฟฟ้า (EDM) ทำการขัดผิวอย่างละเอียด (polished) และจุ่มในสารผสมระหว่างกรดไนตริก 2 มล. และเมทานอล 98 มล. [35] หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเครื่องถ่ายภาพแบบอิเลคตรอน (scanning electron microscopy, SEM)

การศึกษาความแข็งจุลภาคของเหล็กคาร์บอนต่ำ (AISI 1015) จะอ้างอิงข้อกำหนดตามมาตรฐาน ASTM E384-89 (Microhardness of Materials) [18] โดยชิ้นทดสอบถูกตัดตามขวางและนำไปขัดละเอียด (polishing) หลังจากนั้นนำไปหาความหนาผิวแข็ง (total case depth) ด้วยเครื่องวัดค่าความแข็งแบบ microhardness (Matsuzawa, MXT-α 3) โดยกำหนดให้แรงในการกดเท่ากับ 500 g เป็นเวลา 10 วินาที ซึ่งกำหนดหน่วยวัดค่าความแข็งเป็นแบบ vicker hardness และบนผิวชิ้นงานจะถูกวัดความแข็งในหลายทิศทางเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำ

ในการศึกษาสมบัติทางกลของเหล็กคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E8M-96 (Tension Testing of Metallic Materials) [17] โดยมีรูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบดังรูปที่ 3.1 สำหรับการทดสอบแรงดึงกระทำบนเครื่อง servo-hydraulic fatigue machine .ในระหว่างการทดสอบแรง การเปลี่ยนแปลงขนาดและเวลาจะถูกบันทึกค่าไว้ด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งการทดสอบแรงดึงจะแบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 เพื่อหาค่ายังมอดูลัส (Young's modulus) และช่วงที่ 2 เพื่อหาค่าความเค้นคราก (yield strength) และความเค้นดึงสูงสุดก่อนการแตกหัก (ultimate tensile strength) จากนั้นนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าความเค้น (stress) และความเครียด และนำไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความ

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

เค้นและความเครียด (stress-strain curve) เพื่อหาความเค้นครากและความคึงสูงสุดก่อนแตกหักที่เกิดขึ้น ซึ่งการคำนวณหาความเค้นและความเครียดคำนวณตามสมการดังนี้

$$stress(s) = \frac{Load(F)}{Area(A)} \quad MPa \tag{3.1}$$

$$strain(e) = \frac{\Delta L}{L} \tag{3.2}$$

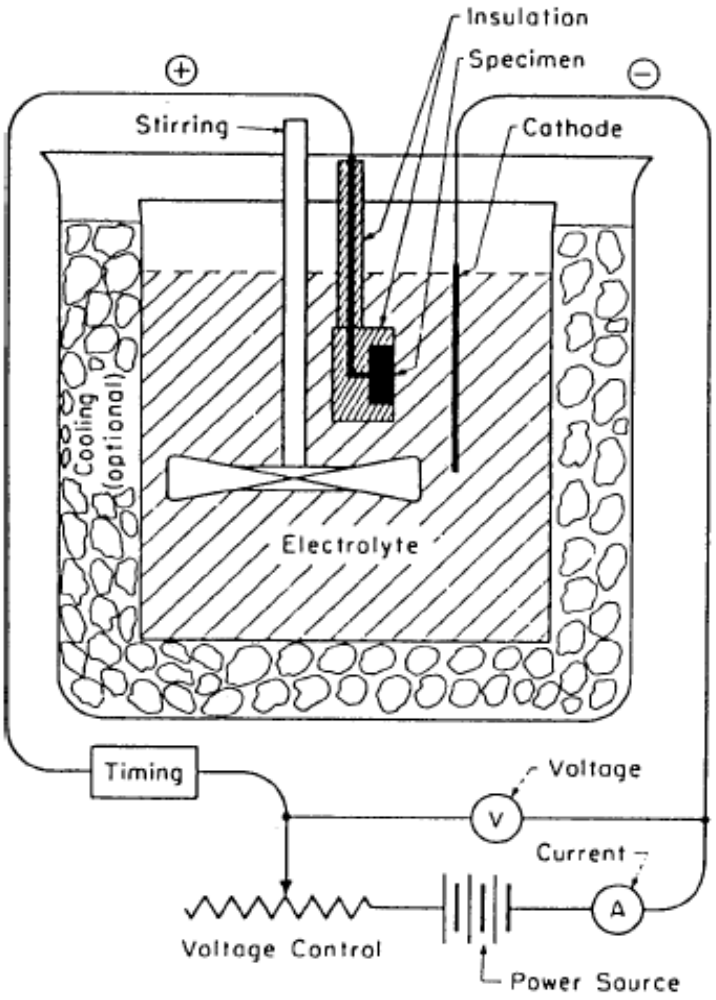
3.2 การศึกษาความเค้นคงค้าง

3.2.1 วิธีการ electrolytic polishing

รูปแบบของความเค้นคงค้างในทิศทางตามความลึกของชิ้นทดสอบที่ชุบแข็งแบบคาโบไนตรายดิง เริ่มต้นด้วยการนำผิวเหล็กชั้นนอกออกด้วยเทคนิควิธี Electrolytic Polishing ด้วยเครื่องขัดแบบ eletropolishing (Struer: LECtroPol-5) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 โดยกระทำที่แรงดันไฟฟ้า 60 V-DC เป็นเวลา 60 วินาที เพื่อให้ผิวเหล็กออกไปประมาณ 70 μm ภายใต้อุณหภูมิห้อง ในสารละลายระหว่างเอทานอล (95%) 700 มล., 2-butoxy ethanol 100 ml และกรด perchloric (30%) 200 มล. ซึ่งขั้นตอนนี้จะอ้างอิงตามข้อกำหนดของมาตรฐาน ASTM E1558-93 (Electrolytic Polishing of Metallographic Specimens) [36] หลังจากนั้นจะนำไปวัดความเค้นคงค้างด้วยเครื่อง X-ray diffraction (Bruker-axs: D8 discover with Cu Kα radiation) ซึ่งหลักการของ electrolytic polishing คืออาศัยหลักการจากปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ที่เรียกว่า cathode effect โดยมีทฤษฎีที่ว่าเมื่อกระแสไฟฟ้าตรงมีความต่างศักย์ที่ค่า ๆ หนึ่งและมีความเข้มข้นของกระแสไฟฟ้าต่อพื้นที่ในระดับที่เหมาะสม ไหลผ่านอ่างน้ำยาอีเล็คโทรไลต์ซึ่งจะกำหนดตามมาตรฐานและประเภทของวัสดุ โดยมีแท่งคาโทดและแอโนดอยู่ภายในอ่าง เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าแล้ว ที่แท่งคาโทดจะปรากฏฟองแก๊สไฮโดรเจนปกคลุม เนื่องจากแก๊สไฮโครเจนมีคุณสมบัติความต้านทางไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านจากแท่งคาโทดไปยังน้ำยาอิเล็คโทรไลต์จะต้องผ่านชั้นของฟองแก๊สไฮโดรเจนรอบ ๆ แท่งคาโทดจะทำให้เกิดความร้อนขึ้น ในขณะที่สายไฟขั้วลบจะต่อเข้ากับแท่งเหล็กหรือวัสดุอื่น ในขณะที่ที่ขั้วบวกจะต่อเข้ากับชิ้นงานซึ่งแช่อยู่ในอ่างน้ำยาอิเล็คโทรไลต์ จากขั้นตอนดังกล่าวจะทำเกิดการแตกตัวของอิออนบวกและลบ ซึ่งอิเลคตรอนจากขั้วบวกจะวิ่งไปหาขั้วลบทำให้อะตอมของชิ้นงานถูกดึงออกไป ความร้อนที่เกิดขึ้นที่

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ผิวของแท่งเหล็กจะเกิดความร้อนสูง ดังนั้นที่อ่างน้ำยาอิเล็คโทรไลต์จะติดตั้งถังชุบเย็น (cooling tank) เพื่อช่วยในการระบายความร้อนด้วย



รูปที่ 3.2 รูปแบบการทำ electrolytic polishing [36]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

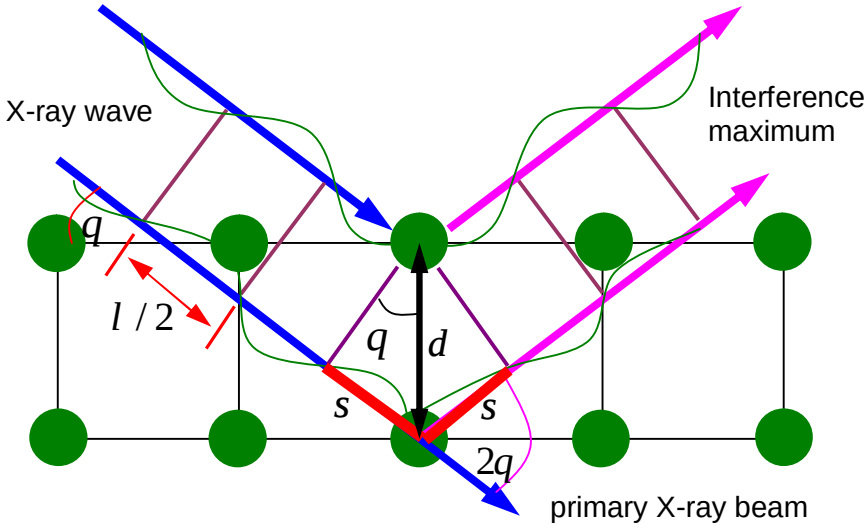
3.2.2 การวัดความเค้นคงค้าง

การวัดความเค้นคงค้างจะกำหนดด้วยวิธี $\sin^2 y$ ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของวิธีเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction) ซึ่งหลักการเบื้องต้นของเอกซเรย์ดิฟแฟรกชัน คืออาศัยการกระเจิงของคลื่นที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ l ตกกระทบบนวัสดุที่มีโครงสร้างเป็นผลึก เมื่อคลื่นตกกระทบกับอะตอมที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบก็จะเกิดการกระเจิงด้วยมุม q และเท่ากับมุม ตกกระทบ ซึ่งในความเป็นจริงจะมีคลื่นหลายขบวนและการกระเจิงจะเกิดกับอะตอมในระนาบ (plane) ต่าง ๆ โดยคลื่นที่กระเจิงออกมาจะมีลักษณะเป็นคลื่นที่มีการแทรกสอดแบบเสริม (constructive interference) ในรูปที่ 3.3 แสดงคลื่น 2 ขบวนตกกระทบและสะท้อนบนระนาบของผลึกที่มีระยะห่างกันเท่ากับ d ตามกฎความสัมพันธ์ของแบรกก์ (Bragg's law) สามารถแสดงด้วยสมการที่ 3.3 และ 3.4 ดังนี้

$$s = d \cdot \sin q \tag{3.3}$$

$$2d_{hkl} \sin q = n l \tag{3.4}$$

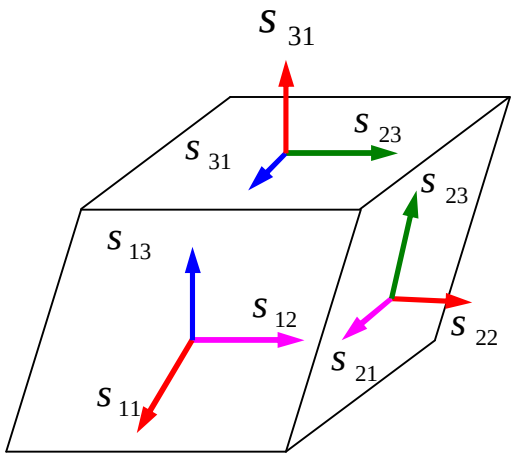
เมื่อ d_{hkl} คือระยะห่างระหว่างระนาบ (hkl) q คือมุมตกกระทบ l คือความยาวคลื่นและ n คือเลขจำนวนเต็ม



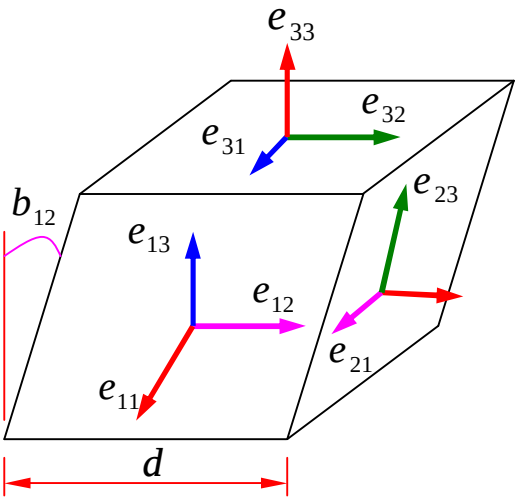
รูปที่ 3.3 การกระเจิงของคลื่น [38]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

การวัดความเค้นคงค้างจะอาศัยหลักการตกกระทบและสะท้อนของรังสีเอกซเรย์ผ่านชั้นอะตอมที่มีการจัดเรียงตัวของโครงสร้างภายในแตกต่างกัน ซึ่งความสัมพันธ์ ดังกล่าวความมีความเกี่ยวข้องกับความเปลี่ยนแปลงของความเค้นบนระนาบ ซึ่งความเค้นที่สูงกว่าการคราก (yield streagth) ทำให้ความเครียด (strain) เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบพลาสติก (plastic deformation) เกิดขึ้นบนระนาบ เมื่ออ้างอิงกับแกน x y และ z ดังแสดงในรูปที่ 3.4



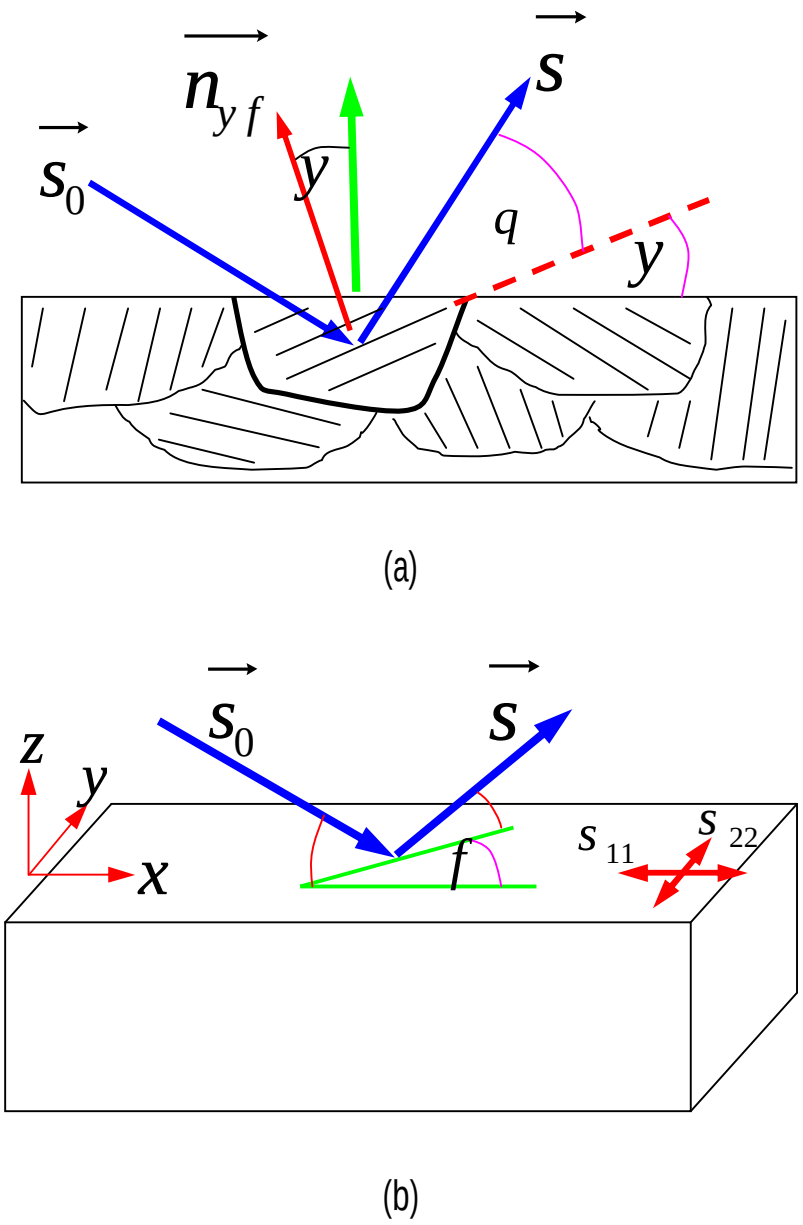
(a)



(b)

รูปที่ 3.4 ทิศทางบนระนาบ 3 มิติของ (a) ความเค้น (b) ความเครียด [38]

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com



รูปที่ 3.5 ทิศทางการตกกระทบและสะท้อนของรังสีเอกซเรย์บนชิ้นทดสอบ [38]

ในรูปที่ 3.5 แสดงเวกเตอร์ที่เกิดขึ้นบนระนาบของผลึก (netplane) ตามหลักการตกกระทบและสะท้อนของรังสีเอกซเรย์ โดยที่ $\vec{s_0}$ คือเวกเตอร์ของรังสีเอกซเรย์ที่ถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดพลังงานไปตกกระทบบนระนาบแบบผลึกของชิ้นทดสอบ (primary X-ray beam) และ $\vec{s}$ คือเวกเตอร์ของรังสีเอกซเรย์ที่สะท้อนกลับออกมา (diffracted X-ray beam) สำหรับมุม y และ f คือมุมที่บ่งบอกทิศทางของระนาบบนผลึกทำกับผิวของชิ้นทดสอบซึ่งได้จากการวัด

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ดังที่แสดงในรูปที่ 3.5 (a) และ 3.5 (b) ตามลำดับ $\vec{n_0}$ คือเวกเตอร์อ้างอิงที่มีทิศทางตั้งฉากกับผิวของชิ้นทดสอบ (normal vector of the surface) ขณะที่ $\vec{n_{yf}}$ คือเวกเตอร์ที่มีทิศทางตั้งฉากกับระนาบบนผลึก (normal vector of the netplane) และสุดท้ายค่า q คือมุมที่เกิดจากการสะท้อนของรังสีเอกซเรย์บนระนาบของผลึกหรือเรียกมุมนี้ว่า "Bragg angle" ซึ่งเป็นมุมที่ได้จากการวัดและนำไปใช้ในการคำนวณสมการตามความสัมพันธ์ของ Bragg ดังนี้

$$e = \Delta d / d_0 = (d - d_0)/d_0 = -\cot q_0 (q - q_0) \qquad (3.5)$$

เมื่อ e คือความเครียดและq_0 คือ Bragg angle ของ strain-free state (d_0) ซึ่งจากความสัมพันธ์ทั้งหมด สามารถแสดงด้วยสมการตามวิธี $\sin^2 y$ ดังนี้

$$\begin{aligned} e_{yf} = {} & 1/2s_2\left(s_{11}\cos^2 f + s_{22}\sin^2 f + s_{12}\sin 2f - s_{33}\right)\sin^2 y \\ & + 1/2s_2\left(s_{13}\cos f + s_{23}\sin f\right)\sin 2y + s_1\left(s_{11} + s_{22}\right) \\ & + \left(1/2s_2 + s_1\right)s_{33} \end{aligned} \qquad (3.6)$$

เมื่อ y, f คือทิศทางของมุมบนระนาบของผลึก ค่าq คือ Bragg angle $\vec{n_{yf}}$ คือเวกเตอร์ปกติบนระนาบของผลึก $\vec{n_0}$ คือเวกเตอร์ปกติบนผิวของชิ้นทดสอบ $\vec{s_0}$ และ $\vec{s}$ คือรังสีเอกซเรย์ตกกระทบและสะท้อนตามลำดับ

3.3 การศึกษาอายุการล้า

ในการศึกษาถึงผลกระทบของการล้าที่มีต่อเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ชุบแข็งและไม่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ จะอ้างอิงข้อกำหนดมาตรฐาน ASTM E466-96 (Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials) [19] โดยมีรูปร่างและขนาดชิ้นทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งการทดสอบจะกระทำด้วยเครื่อง servo-hydraulic (Instron 8801 100 kN load cell) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

ข้อกำหนดเบื้องต้นในการทดสอบการล้าที่สำคัญ คือ การกำหนดสภาวะในการทดสอบ โดยกำหนดสภาวะการทดสอบการล้าแบบความควบคุมด้วยภาระ (uniaxial load-controlled) ภายใต้ความชื้นสัมพันธ์ 55% และอุณหภูมิ 25 ^{0}C ใช้คลื่นทดสอบแบบ sinusoidal ที่มี

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

ความถี่ 30 H_z และอัตราส่วนความเค้น (R) เท่ากับศูนย์ ซึ่งภาระแบบวงรอบเริ่มต้นจากการดึง เนื่องจากเป็นสภาวะที่จะทำให้เกิดความเสียหายรุนแรงที่สุด การกำหนดอัตราส่วนความเค้นหรืออัตราส่วนของภาระ คืออัตราส่วนระหว่างแรงสูงสุดกับแรงต่ำสุดหรืออัตราส่วนระหว่างความเค้นต่ำสุดกับความเค้นสูงสุดต้องเหมาะสมกับสภาวะการทดสอบการล้าด้วย ดังสมการที่ 3.7 หรือสมการที่ 3.8

$$R = \frac{F_{\min}}{F_{\max}} \tag{3.7}$$

$$R = \frac{s_{\min}}{s_{\max}} \tag{3.8}$$

ค่าความเค้นที่ใช้ในการทดสอบ (applied stress) การล้าในงานวิจัยนี้มีค่าระหว่าง 0.4 ถึง 0.8 เปอร์เซนต์ของความเค้นดึงสูงสุด (ultimate tensile strength) จากการทดสอบการดึง (tensile testing) [34] และเท่ากับค่าแอมพลิจูดความเค้น (amplitude stress) ในการทดสอบการล้า ซึ่งค่าแอมพลิจูดความเค้นสามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$s_a = \frac{s_{\max} - s_{\min}}{2} \qquad MPa \tag{3.9}$$

การศึกษาการล้าในงานวิจัยนี้ จะนำเสนอด้วยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับอายุการล้า (S-N curve) โดยกำหนดให้ขีดจำกัดการล้า (fatigue limit) คือค่าความเค้นของชิ้นทดสอบที่มีอายุการล้าเท่ากับ 5,000,000 รอบ ไม่เกิดความเสียหาย

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

รูปที่ 3.6 เครื่อง servo hydraulic fatigue machine (instron 8801 100 kN load cell)

3.4 การศึกษากลไกความเสียหายจากการล้า

การศึกษากลไกความเสียหายจากการล้าของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง กระทำโดยนำชิ้นทดสอบที่แตกหักจากการล้า ที่ความเค้นในช่วง 420 MPa จนกระทั่งถึง 80 เปอร์เซนต์ของอายุการล้าทั้งหมด นำมาตัดขวางด้วยเครื่อง EDM และนำไปขัดละเอียด (polishing) หลังจากนั้นนำไปถ่ายภาพด้วยเครื่องถ่ายภาพแบบอิเลคตรอน (SEM) เพื่อสังเกตรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบที่เสียหายจากการล้า ซึ่งกลไกความเสียหายจากการล้าจะแบ่งการศึกษาได้ดังนี้

1. ศึกษาการเกิดของรอยร้าวจากการล้า เพื่อหาสาเหตุของการเกิดรอยร้าวจากการล้าของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) โดยสังเกตบริเวณของรอยร้าวที่เกิดขึ้นบนชิ้นทดสอบหลังการแตกหัก
2. ศึกษาการขยายตัวของรอยร้าวจากล้า เพื่อดูทิศทางและอัตราการขยายตัวของรอยร้าวผ่านบริเวณต่าง ๆ บนชิ้นทดสอบหลังการแตกหักจากการล้า

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

3. ศึกษาผลกระทบของความเค้นคงค้างที่มีต่อกลไกความเสียหายจากการล้า

การศึกษากลไกการเกิดและขยายตัวของรอยร้าวจากการล้าของเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิงจะนำไปเปรียบกับเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (AISI 1015 steel) ที่ไม่ได้ชุบแข็งด้วยวิธีคาโบไนตรายดิง เพื่อระบุความแตกต่างของพื้นผิวความเสียหาย

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com