

## บทที่ 5

### ผลการทดลอง

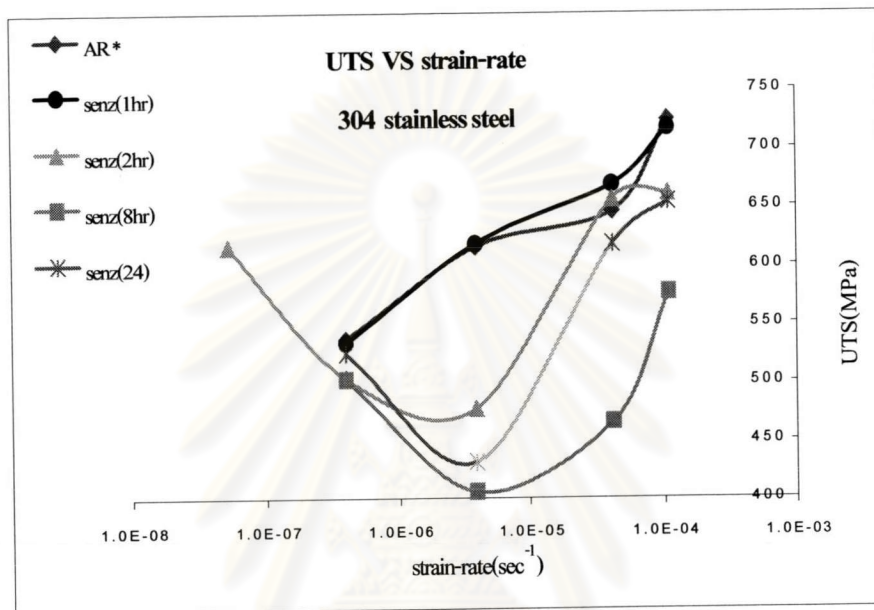
#### 5.1 คำนำ

ในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมาย 4 ประการ คือ 1) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลอันเนื่องมาจากผลของอัตราความเครียดซ้ำในวัสดุที่ผ่านกระบวนการเซมิไทเซชันในระดับเวลาต่างๆ กัน 2) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในระดับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจากผลของอัตราความเครียดซ้ำและอัตราการเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน 3) อธิบายถึงกลไกการเกิดร่วมกันระหว่างอัตราความเครียดซ้ำและอัตราการเกิดปฏิกิริยากัดกร่อนที่วิกฤตอันเป็นสาเหตุของการเกิด SCC ในวัสดุ ซึ่งทั้งหมดนี้จะแสดงให้เห็นถึงระดับความไวต่อ SCC ที่ต่างกันในแต่ละวัสดุ อันเกี่ยวข้องถึงความสามารถที่ต่างกันในการสร้างออกไซด์ฟิล์มของวัสดุในแต่ละระดับของการเซมิไทเซชัน และแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของรอยแตกที่เกิดในวัสดุเมื่อได้รับอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนแปลงไป และ 4) อธิบายผลการทดลองโดยใช้ความสัมพันธ์ power law relation จาก Strain-Rate Damage Model [5]

#### 5.2 การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่องมือทดสอบแรงดึงอัตราความเครียดซ้ำ

การทดสอบคุณสมบัติเชิงกลด้วยเครื่อง SSRT เป็นการทดสอบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุในสภาวะแวดล้อมที่จำลองขึ้น การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นจะแสดงให้เห็นถึงความไวของวัสดุต่อการเกิด SCC ในการทดลองที่มีการเปลี่ยนค่าอัตราความเครียดซ้ำระหว่าง  $4.0 \times 10^{-7}$  -  $1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> และทำการทดลองในระบบหมุนเวียนสารละลายผสม โซเดียมไทโอซัลเฟต โซเดียมคลอไรด์และกรดซัลฟูริก คุณสมบัติเชิงกลที่ทำการทดสอบได้แก่ ค่าความเค้นสูงสุด (Ultimate Tensile Strength: UTS) ค่าเปอร์เซ็นต์ที่ลดลงของพื้นที่หน้าตัดชิ้นงาน (Percent Reduction in Area: %RA) และค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแตกของชิ้นงาน (strain to failure) ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลที่ได้แสดงในตารางที่ 5.1 โดยที่ค่าคุณสมบัติเชิงกลจะนำมาแสดงในรูปแบบของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำและ UTS ดังรูปที่ 5.1 ขณะที่กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำและ %RA แสดงดังรูปที่ 5.2 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำและค่าเปอร์เซ็นต์ความเครียด ณ จุดแตกของชิ้นงานแสดงดังรูปที่ 5.3 โดยที่การอธิบายผลการทดลองนั้นจะแบ่งกลุ่มชิ้นงานออกเป็นสองกลุ่มเพื่อสะดวกต่อการ

อธิบายความสัมพันธ์ที่เกิดจากรูปกราฟผลการทดลอง กลุ่มแรกเป็นกลุ่มของชิ้นงานที่มีความไวต่อสารละลายผสมที่ใช้ในการทดลองค่อนข้างต่ำ ซึ่งได้แก่ชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการเซนซิไทเซชัน และชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ส่วนชิ้นงานกลุ่มที่สองได้แก่ชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 2, 8 และ 24 ชั่วโมง ซึ่งชิ้นงานกลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่มีความไวต่อสารละลายผสมที่ใช้ในการทดลองสูงเมื่อเทียบกับชิ้นงานกลุ่มแรก

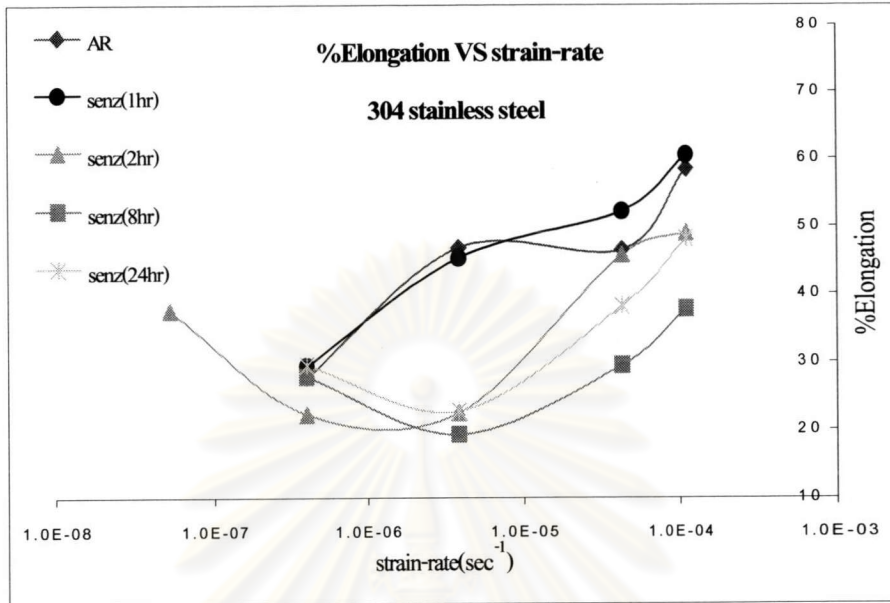


\*AR (as - received) = วัสดุที่ได้รับจากโรงงานผลิต

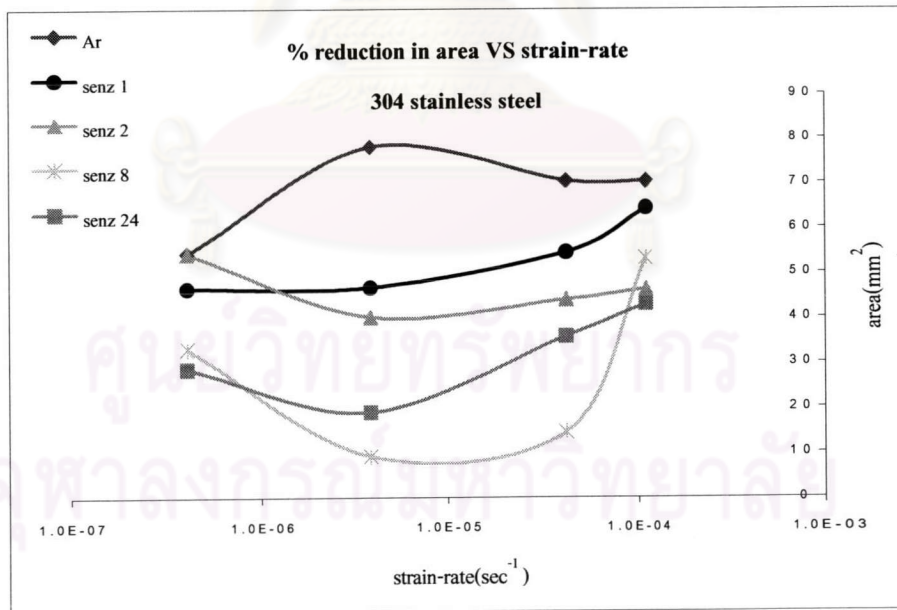
**รูปที่ 5.1** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำ และ UTS ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

จากรูปที่ 5.1 จะสังเกตเห็นได้ว่าในวัสดุในกลุ่มที่สองซึ่งเป็นกลุ่มที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 2, 8 และ 24 ชั่วโมง อัตราความเครียดซ้ำมีผลอย่างมากต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ โดยค่า UTS ของวัสดุกลุ่มนี้จะมีค่าต่ำที่สุดที่อัตราความเครียด  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> เช่นเดียวกันทั้งหมด และเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างวัสดุที่ผ่านการเซนซิไทเซชันระดับต่างกันในกลุ่มเดียวกันจะพบว่าแนวโน้มไปในทางเดียวกัน แต่สำหรับวัสดุในกลุ่มที่หนึ่งซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการเซนซิไทเซชัน จะพบว่าค่า UTS ของวัสดุมีแนวโน้มที่แตกต่างออกไปคือมีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงตามอัตราความเครียดซ้ำที่เพิ่มขึ้นอันเป็นผลมาจากวัสดุนี้มีการเสียหายที่เกิดจากการกัดกร่อนเมื่อวัสดุอยู่ในสภาวะ aggressive environment แสดงดังรูปที่ 5.4 ร่วมกับความเสี่ยงจากการเกิด mechanical failure ความเสียหายที่เกิดขึ้นจะแตกต่างจากวัสดุที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 2, 8 และ 24 ชั่วโมง ซึ่งความเสี่ยงจากทั้งสามกรณีดังกล่าวมีผลของ environmental assists cracking เข้ามาเกี่ยวข้องร่วมกับผลของอัตราความเครียดซ้ำทำให้ชิ้นงานส่วนใหญ่เกิดการเสียหายในรูปแบบผสมระหว่าง Ductile และ Brittle

failure อย่างไรก็ตามยังคงพบว่าเมื่อขึ้นงานบางส่วนเกิดความเสียหายแบบ Brittle failure เพียงอย่างเดียว รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดลองแสดงไว้ดังตารางที่ 5.1



รูปที่ 5.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%Elongation และอัตราความเครียดซ้ำของเหล็กกล้าไร้สนิม 304



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%Reduction in area และอัตราความเครียดซ้ำของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

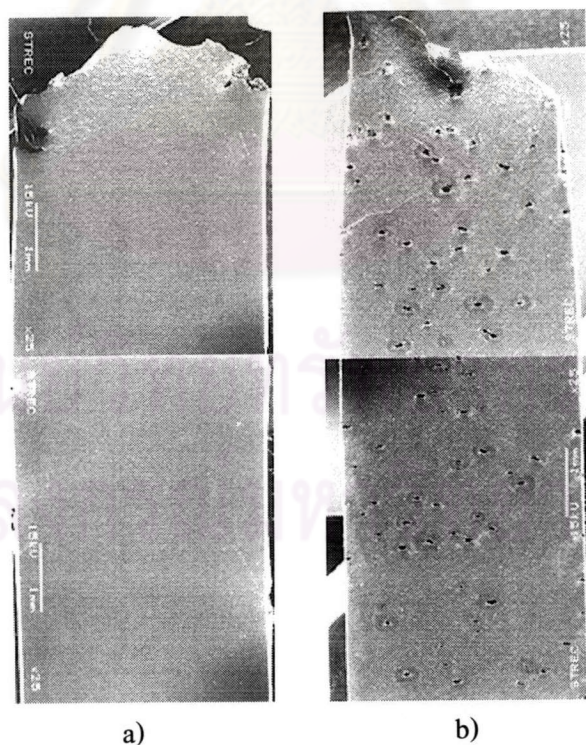
ตารางที่ 5.1 คุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงานที่ทำการทดลองที่อัตราความเครียดต่างกัน

Sensitization - time (hr)	strain-rate (วินาที <sup>-1</sup> )	%Elongation	UTS	%reduction in area	Failure Mode*
Non-sensitization	$1.1 \times 10^{-4}$	58.4	723.5	70.2	Ductile
	$4.2 \times 10^{-5}$	46.5	645.1	70.3	Ductile
	$3.9 \times 10^{-6}$	46.8	615.3	77.0	Ductile
	$4.0 \times 10^{-7}$	27.8	536.2	54.2	Ductile
1 hr	$1.1 \times 10^{-4}$	60.5	716.8	64.3	Ductile
	$4.2 \times 10^{-5}$	52.2	668.2	54.4	Ductile
	$3.9 \times 10^{-6}$	45.3	617.8	46.5	Ductile
	$4.0 \times 10^{-7}$	29.4	533.3	46.3	Ductile
2 hr**	$1.1 \times 10^{-4}$	49.0	660.6	46.2	Ductile + Brittle
	$4.2 \times 10^{-5}$	45.8	655.6	43.9	Ductile + Brittle
	$3.9 \times 10^{-6}$	22.5	477.2	40.0	Brittle
	$4.0 \times 10^{-7}$	22.3	502.7	54.1	Ductile
8 hr	$1.1 \times 10^{-4}$	37.7	576.2	53.2	Ductile + Brittle
	$4.2 \times 10^{-5}$	29.5	465.4	14.5	Brittle
	$3.9 \times 10^{-6}$	19.3	405.4	9.1	Brittle
	$4.0 \times 10^{-7}$	27.8	502.2	32.9	Ductile + Brittle
24 hr	$1.1 \times 10^{-4}$	48.1	653.3	42.9	Ductile + Brittle
	$4.2 \times 10^{-5}$	38.1	617.9	35.6	Ductile + Brittle
	$3.9 \times 10^{-6}$	22.7	431.3	18.8	Brittle
	$4.0 \times 10^{-7}$	29.5	524.5	28.4	Ductile + Brittle

\*ความเสียหายที่เกิดขึ้นบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานจากผลของ SCC เมื่อตรวจสอบด้วย SEM ;  $SCC < 25\%$  ชิ้นงานจะเสียหายแบบ ductile failure,  $25\% < SCC < 50\%$  จะเสียหายแบบ ductile + brittle failure และ  $SCC > 50\%$  จะเสียหายแบบ brittle failure

\*\*สำหรับการทดลองที่อัตราความเครียด  $5.2 \times 10^{-8}$  วินาที<sup>-1</sup> กับชิ้นงานที่ผ่านการ Sensitization เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่าชิ้นงานไม่เกิดการเสียหาย เมื่อทำการทดลองผ่านไปกว่า 1698 ชั่วโมง จึงหยุดทำการทดลอง โดยชิ้นงานมีค่า UTS = 615.7 MPa และมี % Elongation ก่อนหยุดการทดลองที่ 37.5 %

สำหรับการเปลี่ยนแปลงของ % Reduction in area (%RA) ในวัสดุนั้น เมื่อพิจารณารูปที่ 5.2 จะเห็นว่าค่า % RA ของวัสดุกลุ่มที่หนึ่งซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการเซนซิไทเซชัน พบว่ามีแนวโน้มค่อนข้างที่จะคงที่คือมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราการความเครียดซ้ำมีค่าเพิ่มขึ้น ค่า %RA ที่สูงในวัสดุกลุ่มนี้แสดงให้เห็นถึงการเกิด necking ของวัสดุจากการเกิด ductile failure แต่สำหรับวัสดุกลุ่มที่สองซึ่งเป็นกลุ่มที่ผ่านการเซนซิไทเซชันที่เวลา 2 , 8 และ 24 ชั่วโมงแล้วอัตราการความเครียดซ้ำมีผลต่อค่า % RA ของวัสดุอย่างเห็นได้ชัดซึ่งจากเส้นแนวโน้มของกลุ่มที่สองจะเห็นว่าค่า % RA จะลดลงเมื่ออัตราการความเครียดซ้ำมีค่าลดลงจาก  $1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> จนกระทั่งที่อัตราการความเครียดซ้ำเท่ากับ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> วัสดุจะมีค่า % RA ต่ำที่สุดซึ่งแสดงให้เห็นผลของการเกิด SCC ในวัสดุได้อย่างชัดเจน จากนั้นค่า % RA มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอีกครั้งที่อัตราการความเครียดซ้ำ  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> และเช่นเดียวกับรูปที่ 5.2 เมื่อพิจารณารูปที่ 5.3 จะพบว่าในวัสดุกลุ่มที่หนึ่งมี %Elongation เพิ่มขึ้นตามอัตราการความเครียดซ้ำที่เพิ่มขึ้นแสดงถึงผลกระทบเพียงเล็กน้อยจากอัตราการความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนแปลงไปพร้อมกับผลที่เกิดจากการกัดกร่อนโดยทั่วไปในวัสดุที่อยู่ในสภาวะ aggressive environment ดังรูปที่ 5.4 แต่สำหรับวัสดุกลุ่มที่สองแล้วการลดลงของ %Elongation อย่างมากที่อัตราการความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> แสดงให้เห็นผลของอัตราการความเครียดซ้ำต่อการเกิด SCC ในวัสดุได้อย่างชัดเจน



รูปที่ 5.4 แสดงการกัดกร่อนที่เกิดขึ้นในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 1 ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า a) ชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเซนซิไทเซชันอัตราการความเครียด  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> b) ชิ้นงานที่เซนซิไทเซชัน 1 ชั่วโมง อัตราความเครียด  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup>

เมื่อนำค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากทั้ง 3 กราฟมาพิจารณาร่วมกันก็จะเห็นถึงความสอดคล้องกันของข้อมูลคือ จะพบว่าค่า % RA ในรูปที่ 5.2 และค่า % Elongation ในรูปที่ 5.3 นั้นมีแนวโน้มเป็นไปตามค่า UTS ในรูปที่ 5.1 นั่นคือค่า % RA และค่า % Elongation ของชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 2, 8 และ 24 ชั่วโมง จะมีค่าน้อยที่สุดที่อัตราความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> และสำหรับวัสดุที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และวัสดุที่ไม่ได้ผ่านการเซนซิไทเซชัน พบว่ามีแนวโน้มค่อนข้างที่จะคงที่คือมีการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราความเครียดซ้ำมีค่าเพิ่มขึ้น

ค่าคุณสมบัติเชิงกลที่ได้จากการทดลองอาจกล่าวได้ว่า อัตราความเครียดซ้ำและการเซนซิไทเซชันมีผลต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุทั้งสองกลุ่มที่ทำการทดลองเช่นเดียวกัน การเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงกลที่เกิดขึ้นในวัสดุแต่ละระดับของการเซนซิไทเซชันที่ได้รับอัตราความเครียดซ้ำที่แตกต่างกันนั้น การทดสอบเชิงกลเพียงอย่างเดียวไม่สามารถที่จะอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นได้ สำหรับการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติเชิงกลในวัสดุที่ผ่านการเซนซิไทเซชันระดับต่างกันนั้นสามารถอธิบายได้จากผลของเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทเซชัน จากงานวิจัยของ กิตติศักดิ์ โกศลวรรณชนะ[36] ที่ได้ตรวจสอบการเชื่อมต่อกันของปริมาณคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ได้รับจากโรงงานผลิต (As-Received: AR); 304AR ที่ระดับการเซนซิไทเซชันต่างกัน พบว่าภายหลังการเซนซิไทเซชันชิ้นงานมีปริมาณคาร์ไบด์ที่แตกต่างกันดังตารางที่ 5.2

**ตารางที่ 5.2** การเชื่อมต่อกันของปริมาณคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของระดับการเซนซิไทเซชันต่างกัน

Specimen type	Sensitization Time at 650 °c (hr)	Carbide Linkage (%)
304AR (As-Received)	1	< 64.22 <sup>*</sup>
	2	64.22
	8	89.73
	24	85.76 <sup>**</sup>

\* เป็นค่าที่หาได้จากเส้นแนวโน้มของกราฟระหว่าง sensitization-time กับ %Carbide Linkage สมการเส้นแนวโน้มคือ  $y = 5.624 \ln(x) + 67.893$  ซึ่งเมื่อแทนค่า  $x = 1$  จะได้ค่า  $y$  เท่ากับศูนย์ ดังนั้นในที่นี้จึงแทนค่าว่าถ้า sensitization-time เท่ากับ 1 ค่า %Carbide Linkage จะต้องน้อยกว่าค่าที่ได้จาก sensitization-time = 2 ชั่วโมง อย่างแน่นอน

\*\* เป็นค่าที่หาได้จากเส้นแนวโน้มของกราฟระหว่าง sensitization-time กับ %Carbide Linkage สมการเส้นแนวโน้มคือ  $y = 5.624 \ln(x) + 67.893$  ซึ่งเมื่อแทนค่า  $x = 1$  จะได้ค่า  $y$  เท่ากับ 85.76

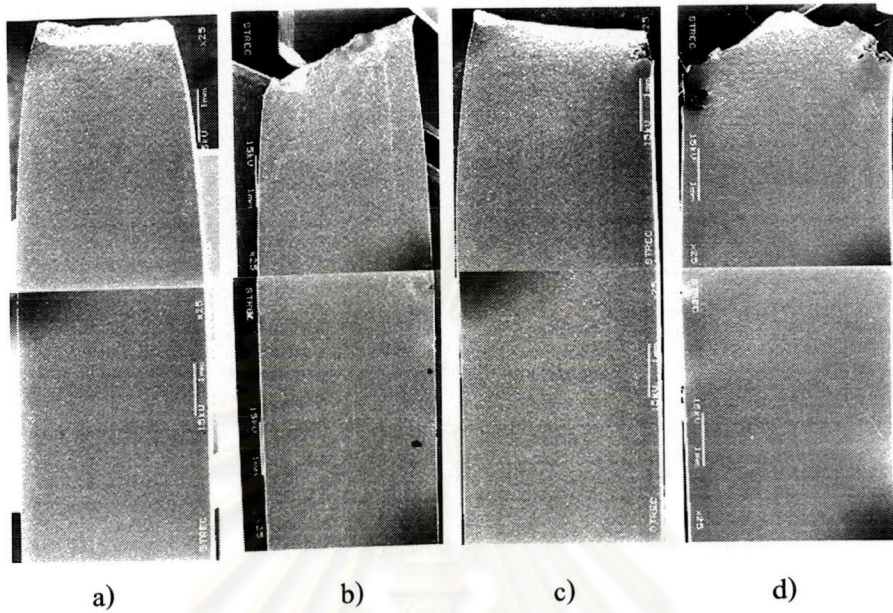
จากค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนในตารางที่ 5.2 จะพบว่าที่ ช่วงเวลาการเซนซิไทเซชัน เท่ากับ 8 ชั่วโมง ชิ้นงานจะมีค่าเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนมากที่สุดคือ 89.7 % ซึ่งในงานวิจัยของ D.B.Well และคณะ[37] พบว่าวัสดุที่มีการเชื่อมต่อกันของขอบเกรนที่ถูกเซนซิไทมากกว่า 89% จะทำให้วัสดุนั้นสามารถเกิดการแตกร้าวด้วยผลของ IGSCC ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลที่ได้จากการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.1 และจากรูปที่ 5.1-5.3 ที่แสดงให้เห็นว่าที่เวลาเซนซิไทเซชันเท่ากับ 8 ชั่วโมง วัสดุจะมีค่า UTS, %RA และ%Elongation ที่ต่ำกว่าช่วงเวลาอื่นๆ รองลงมาได้แก่ 2 ชั่วโมงตามลำดับ

การใช้เวลาเซนซิไทเซชันที่ต่างกันของวัสดุที่ใช้ทดลองนั้นเหตุผลเพื่อที่จะทำให้วัสดุมีความไวต่อการเกิด SCC ในระบบที่ใช้ทดลองมีความแตกต่างกัน ซึ่งความแตกต่างกันนั้นเป็นผลมาจากการลดประสิทธิภาพของออกไซด์ฟิล์มจากปริมาณโครเมียมที่ลดลง ทำให้สามารถสังเกตเห็นผลของอัตราความเครียดซ้ำที่จะเกิดขึ้นกับชิ้นงานได้ละเอียดมากขึ้นจากการที่ชิ้นงานมีประสิทธิภาพของออกไซด์ฟิล์มในการป้องกันการเกิด SCC ที่แตกต่างกัน

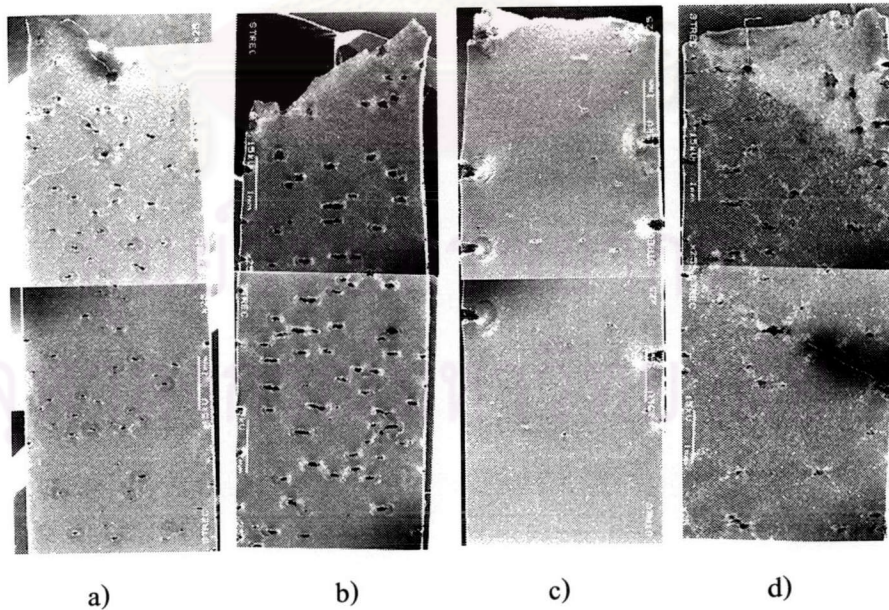
### 5.3 ผลการตรวจสอบพื้นผิวของชิ้นงานด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

ในการที่จะทราบถึงกลไกของการเกิดการแตกหักอันเนื่องมาจากการเกิด Environmental Assists Cracking (EAC) ร่วมกับอัตราความเครียดซ้ำในการทำให้เกิดการแตกร้าวด้วยผลของความเค้น (SCC) นั้น ข้อมูลที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุจากการทดสอบ SSRT เพียงอย่างเดียวคงไม่สามารถอธิบายถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดซ้ำได้ ประกอบกับในการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้นได้ทำการทดสอบ ในสารละลายผสมระหว่างโซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไทโอซัลเฟตและกรดซัลฟูริก ซึ่งภายหลังการทดสอบพบว่าที่บริเวณผิวของชิ้นงานและบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย จะพบว่ามีเกิดการเกิด pit และรอยแตก (crack) ในปริมาณและขนาดที่มากน้อยต่างกัน ซึ่งการพิจารณาชิ้นงานจากการสังเกตด้วยตาเปล่าไม่สามารถที่บอกได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นบนชิ้นงานมากน้อยเพียงใด ดังนั้นการสังเกตจากภาพถ่ายชิ้นงานที่กำลังขยายต่างๆ จะทำให้สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงทางด้านโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงาน การตรวจสอบบริเวณผิวของชิ้นงานนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 บริเวณคือบริเวณผิวด้านข้างของชิ้นงานและบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานที่เกิดความเสียหาย

### 5.3.1 ผลการตรวจสอบการเกิด PIT และรอยแตก บริเวณผิวด้านข้างของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304

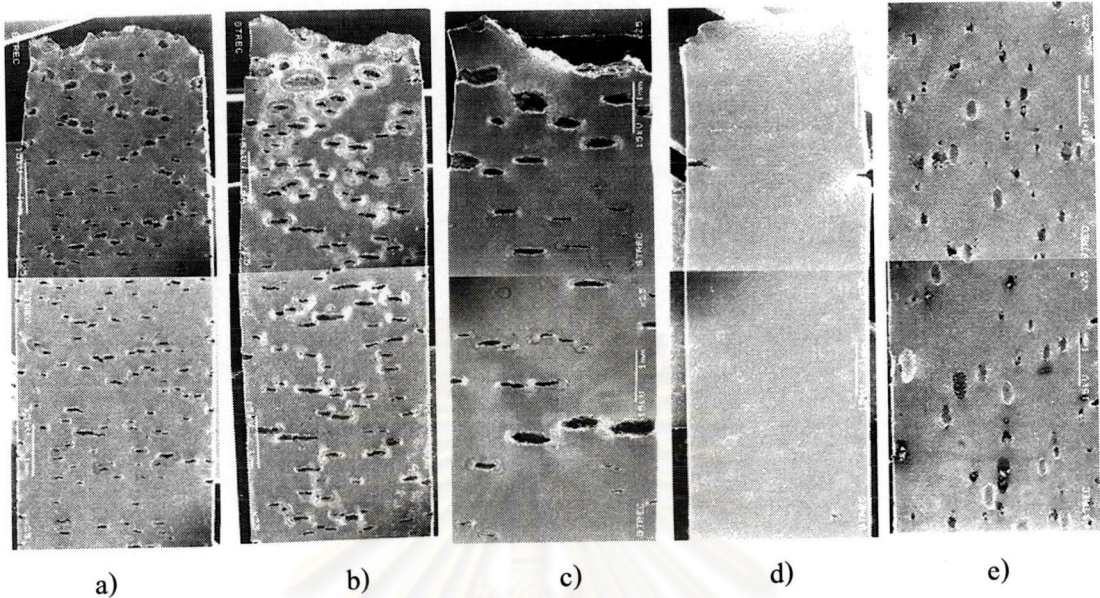


รูปที่ 5.5 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 1 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราความเคียดซ้ำ a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ในชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเซนซิไทเซชัน ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า

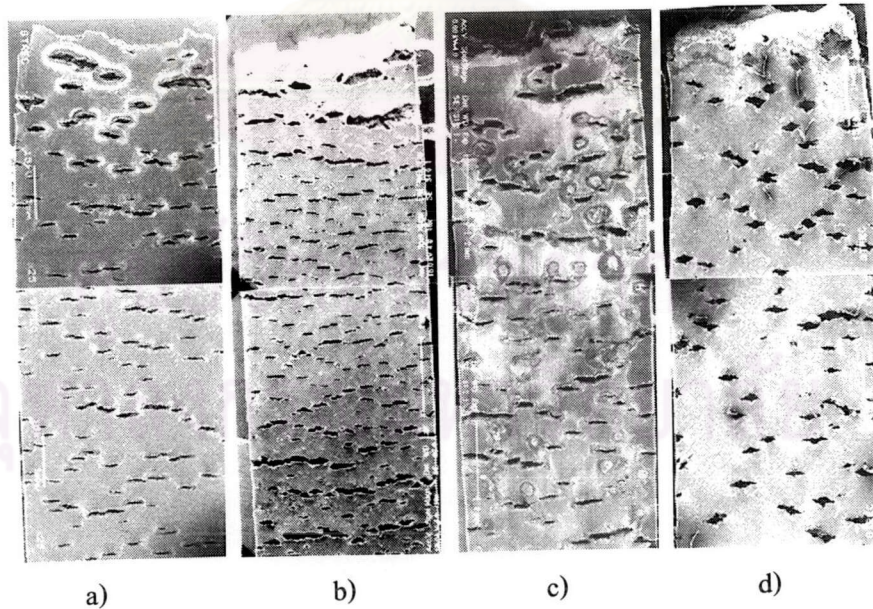


รูปที่ 5.6 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 1 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราความเคียดซ้ำ a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ในชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า

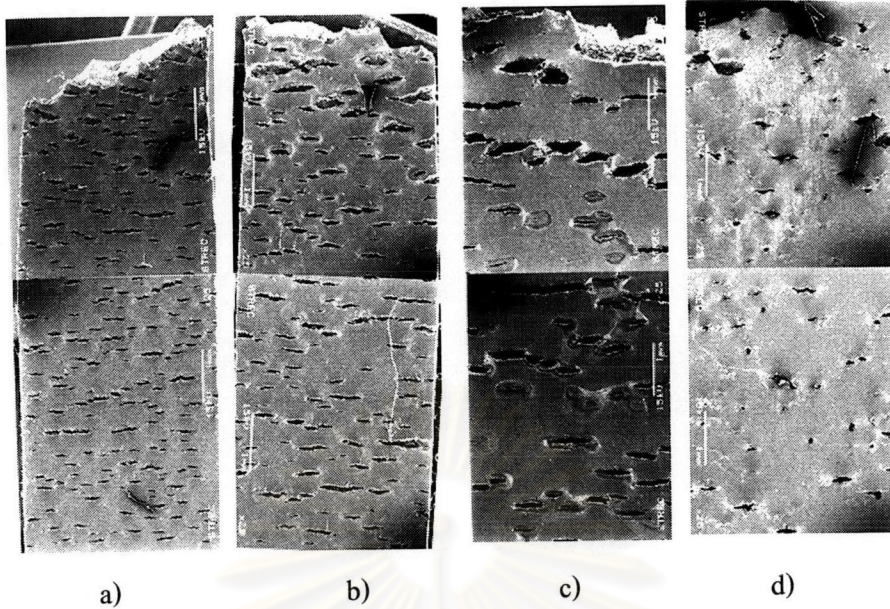




รูปที่ 5.7 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 2 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดซ้ำ a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  e)  $5.2 \times 10^{-8}$  วินาที<sup>-1</sup> ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า



รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 2 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดซ้ำ a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ในชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 8 ชั่วโมง ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า

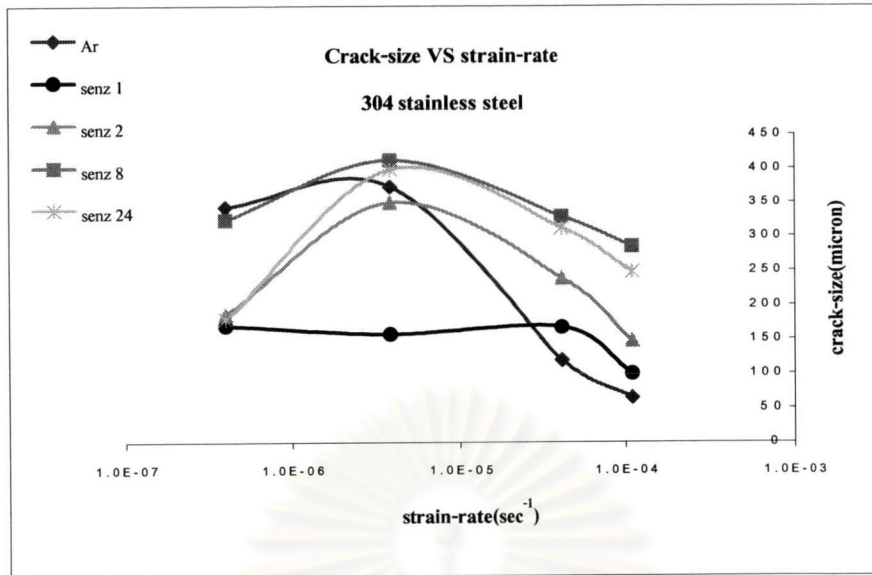


**รูปที่ 5.9** การเปลี่ยนแปลงขนาดและความหนาแน่นของรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 กลุ่มที่ 2 จากผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดซ้ำ a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ในชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า

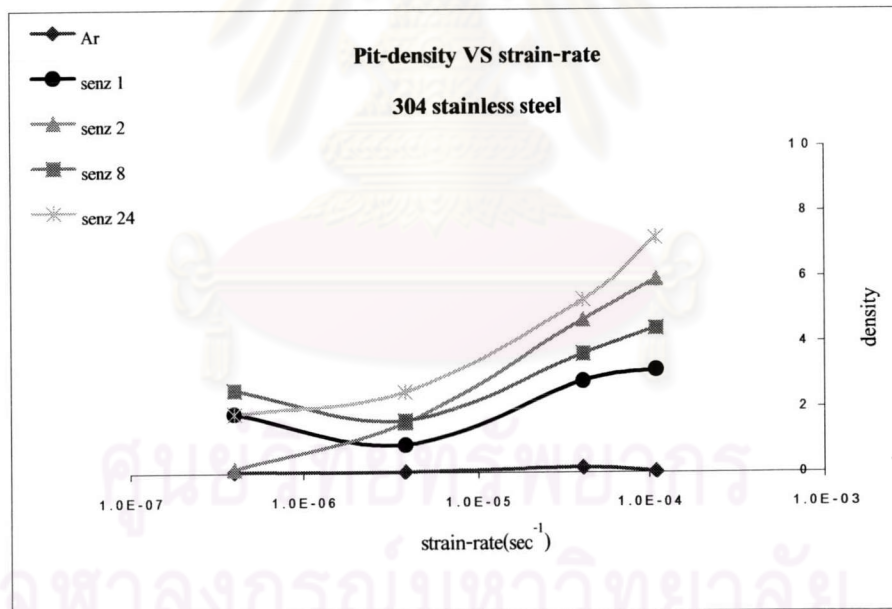
การตรวจสอบพื้นผิวด้านข้างของชิ้นงานจากภาพถ่าย ทำให้ได้ข้อมูลที่สำคัญคือขนาดของรอยแตก\* (crack-size) และจำนวนของ pit หรือ crack ทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อ 1 หน่วยพื้นที่ (pit-density) ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวเราสามารถนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crack-size และ pit-density กับอัตราความเครียดซ้ำได้ดังรูปที่ 5.10 และ 5.11 ตามลำดับ

จากรูปที่ 5.7-5.9 และรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นว่าอัตราความเครียดซ้ำมีผลต่อขนาดของรอยแตกในวัสดุกลุ่มที่สองซึ่งเป็นกลุ่มที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 2, 8 และ 24 ชั่วโมง ขนาดของรอยแตกจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่ออัตราความเครียดซ้ำมีค่าลดลงจาก  $1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> จนกระทั่งที่อัตราความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> รอยแตกที่เกิดขึ้นจะมีขนาดใหญ่กว่าที่อัตราความเครียดซ้ำอื่นๆ หลังจากนั้นขนาดของรอยแตกจะลดลงจนกระทั่งที่อัตราความเครียดซ้ำที่  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ในขณะที่ชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นั้นพบว่าขนาดของรอยแตกจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มอัตราความเครียดซ้ำจาก  $1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> เป็น  $4.2 \times 10^{-5}$  วินาที<sup>-1</sup> หลังจากนั้นขนาดของรอยแตกค่อนข้างจะคงที่เมื่ออัตราความเครียดซ้ำลดลงดังแสดงในรูปที่ 5.6 ในส่วนของชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเซนซิไทเซชันดังแสดงในรูปที่ 5.5 จำนวนรอยแตกที่เกิดขึ้นมีน้อยมากเพียง 1-2 จุด ดังนั้นค่าที่ได้จากกราฟจึงมีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับชิ้นงานอื่นๆ ซึ่งค่าที่นำมาวาดกราฟนั้นเป็นค่าเฉลี่ยที่ได้จากการเกิดรอยแตกเป็นจำนวนมาก

\* เป็นขนาดความยาวของรอยแตกที่วัดในแนวที่ตั้งฉากกับ Tensile axis



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crack-size และ strain-rate ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304



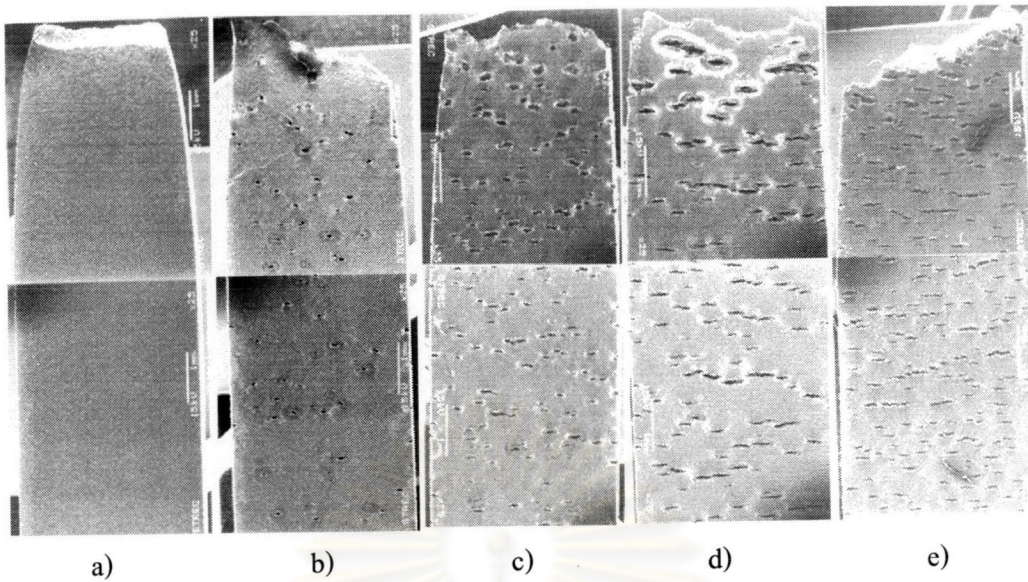
รูปที่ 5.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง pit-density และ strain-rate ที่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านข้างของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304

รูปที่ 5.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดกร่อนและ pit-density จากการสังเกตจะพบว่าจำนวน pit และรอยแตกที่เกิดขึ้นในวัสดุกลุ่มที่สองซึ่งเป็นกลุ่มที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 2 , 8 และ 24 ชั่วโมง มีแนวโน้มที่ลดลงอย่างรวดเร็วเมื่ออัตราการกัดกร่อนมีค่าลดลงจาก

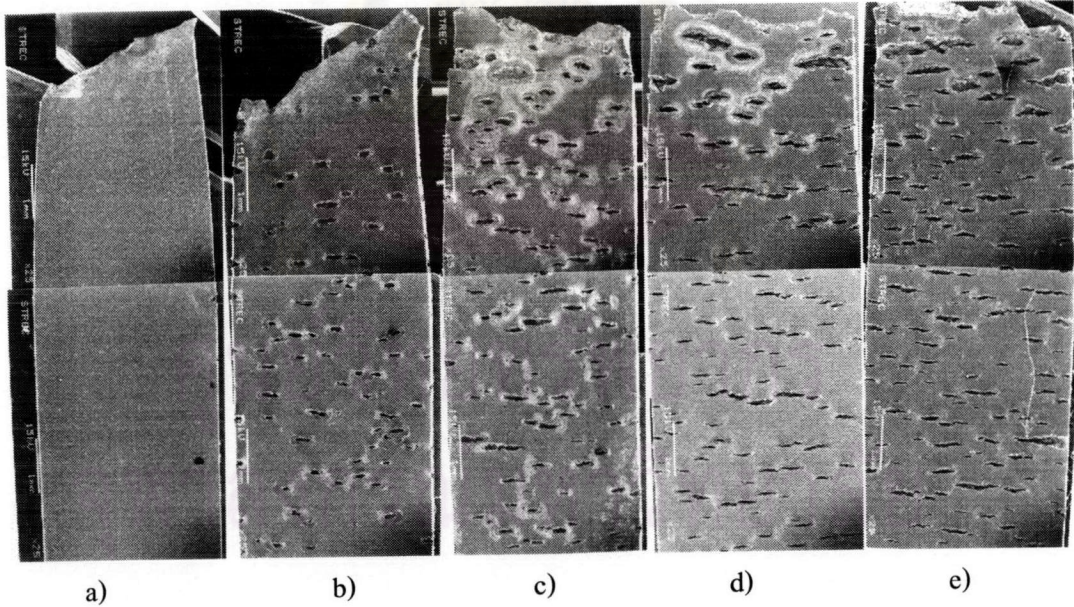
$1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> จนกระทั่งที่อัตราความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> หลังจากนั้น pit-density จะมีแนวโน้มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่ออัตราความเครียดซ้ำมีค่าลดลงต่ำกว่า  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> จนกระทั่ง  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ดังรูปที่ 5.7-5.9 ขณะที่ pit-density ของชิ้นงานที่เซนซิไทเซชัน 1 ชั่วโมง มีค่าที่ค่อนข้างน้อยและค่าที่ได้ค่อนข้างจะคงที่ดังรูปที่ 5.6 ต่างจากชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเซนซิไทเซชันซึ่งคงแสดงในรูปที่ 5.5 ค่าที่ได้นั้นได้มาจากจำนวน pit-density ที่น้อยมากทำให้ค่าที่ได้เกิดความคลาดเคลื่อนไปจากแนวโน้มของชิ้นงานในกลุ่มเดียวกันพอสมควร

เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากกราฟทั้งสองมาสัมพันธ์กันจะพบว่า ในชิ้นงานกลุ่มที่ 2 นั้นข้อมูลที่ได้แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยแตก ความหนาแน่นของ pit และอัตราความเครียดซ้ำคือ ถ้าอัตราความเครียดซ้ำที่ใช้ในการทดลองมีค่าสูง ( $1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup>) ชิ้นงานจะเกิดรอยแตกเป็นจำนวนมากในขณะเดียวกันก็พบว่ารอยแตกที่เกิดขึ้นนั้นจะมีขนาดเล็กเป็นส่วนใหญ่ และเมื่อลดอัตราความเครียดซ้ำให้ต่ำลงมาที่  $4.2 \times 10^{-5}$  วินาที<sup>-1</sup> กระทั่งที่อัตราความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> จะพบว่าปริมาณของรอยแตกที่เกิดขึ้นมีแนวโน้มลดลงขณะที่ขนาดของรอยแตกนั้นเพิ่มขึ้น จากนั้นเมื่อลดอัตราความเครียดซ้ำให้ต่ำลงมาที่  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> กลับพบว่าขนาดของรอยแตกนั้นมีแนวโน้มที่ลดลงอีกครั้งในขณะที่จำนวนรอยแตกที่เกิดขึ้นค่อนข้างจะคงที่ ความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองกลไกการเกิด SCC โดยใช้ film rupture model ในหัวข้อ 2.4.1 กลไกการเกิดการกัดกร่อนด้วยผลของความเค้น และผลของอัตราความเครียดซ้ำต่อความไวของวัสดุในการเกิดการกัดกร่อนด้วยผลของความเค้น ในหัวข้อ 2.4.2

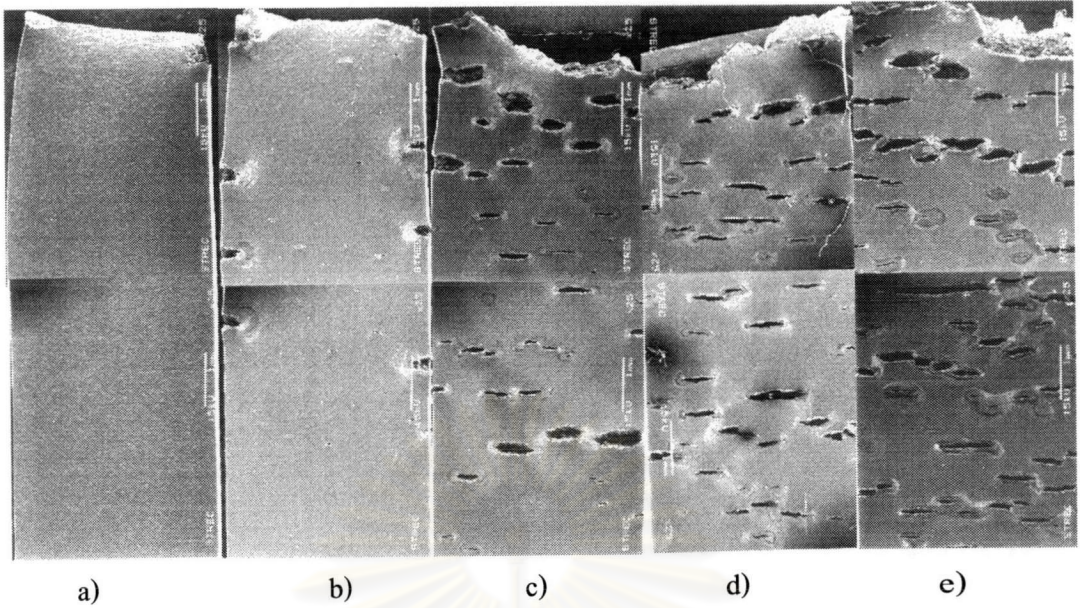
นอกจากอัตราความเครียดซ้ำแล้วระดับการเซนซิไทเซชันก็มีผลต่อการเกิด pit และรอยแตกดังรูปที่ 5.12 - 5.15 คือเมื่อระดับการเซนซิไทเซชันสูงขึ้นจาก 0, 1, 2, 8 และ 24 ชั่วโมง วัสดุจะมีขนาดของรอยแตกที่ใหญ่ขึ้นตามลำดับ และจะมีขนาดใหญ่มากที่สุดที่ระดับการเซนซิไทเซชันเท่ากับ 8 ชั่วโมง ยกเว้นที่การเซนซิไทเซชันเท่ากับ 24 ชั่วโมง ที่จะมีขนาดของรอยแตกที่พบน้อยกว่าการเซนซิไทเซชันที่ 8 ชั่วโมง ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นสามารถอธิบายได้จากปริมาณการเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ดังตารางที่ 5.2 และอธิบายได้จากความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเซนซิไทเซชัน ปริมาณของโครเมียมคาร์ไบด์และระดับความลึกของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน แสดงดังรูปที่ 5.16 ซึ่งระดับการเซนซิไทเซชันที่มากขึ้นไป ( $T_1$ ) จะส่งผลให้ระดับความลึกและปริมาณของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่บริเวณใกล้ขอบเกรนลดลง ระดับการเซนซิไทเซชันที่เหมาะสม ( $T_2$ ) จะทำให้ขอบเกรนเกิดความเสียหายได้เร็วที่สุด



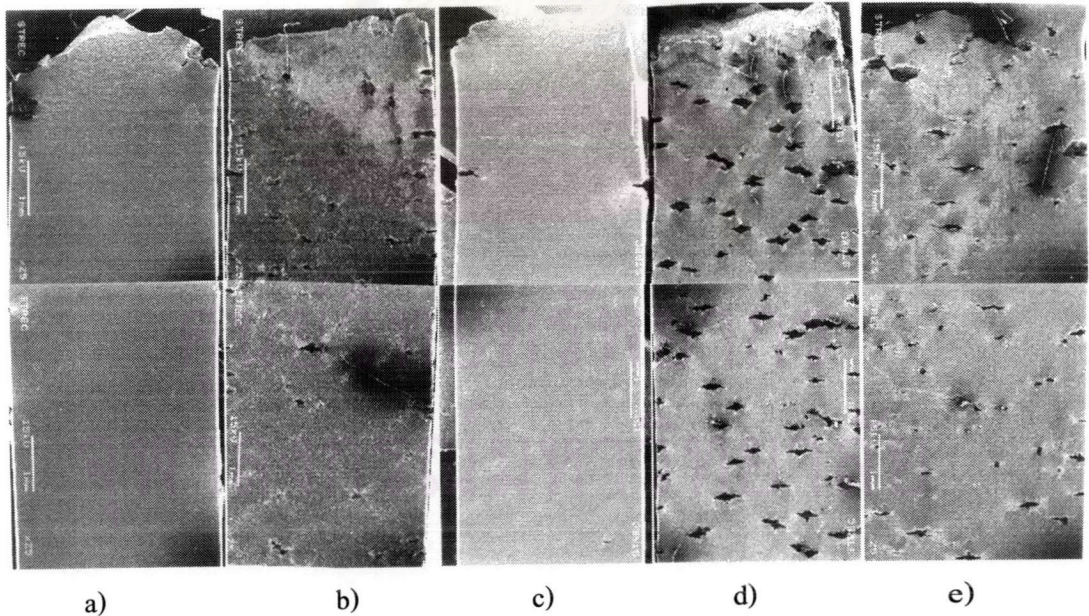
**รูปที่ 5.12** การเกิดรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทเซชันที่อัตราความเคียดซ้ำ  $1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> a) 0 hr. b) 1 hr. c) 2 hr. d) 8 hr. e) 24 hr. ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า



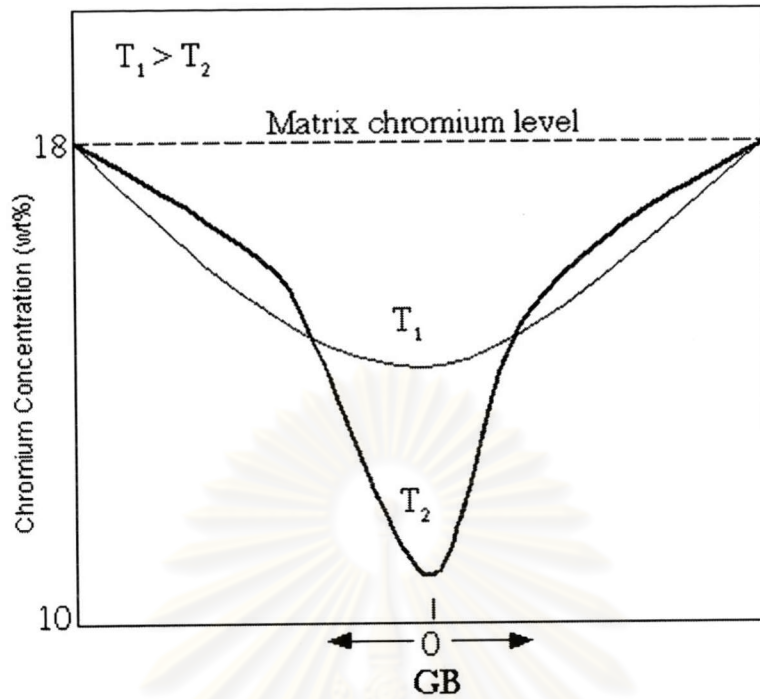
**รูปที่ 5.13** การเกิดรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทเซชันที่อัตราความเคียดซ้ำ  $4.2 \times 10^{-5}$  วินาที<sup>-1</sup> a) 0 hr. b) 1 hr. c) 2 hr. d) 8 hr. e) 24 hr. ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า



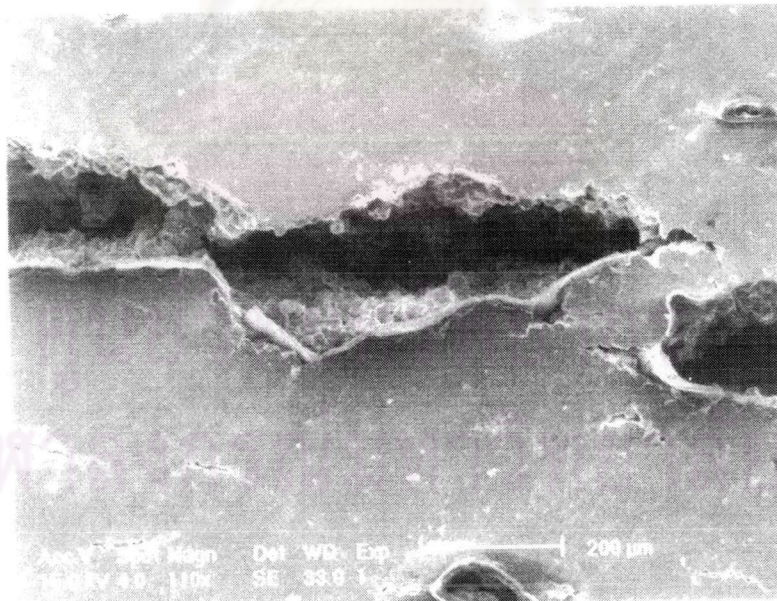
**รูปที่ 5.14** การเกิดรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทเซชันที่อัตราความเคียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> a) 0 hr. b) 1 hr. c) 2 hr. d) 8 hr. e) 24 hr. ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า



**รูปที่ 5.15** การเกิดรอยแตกในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากผลของเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทเซชันที่อัตราความเคียดซ้ำ  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> a) 0 hr. b) 1 hr. c) 2 hr. d) 8 hr. e) 24 hr. ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเซนซิไทเซชัน ปริมาณของโครเมียมคาร์ไบด์และระดับความลึกของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่ขอบเกรน [36]



รูปที่ 5.17 ลักษณะของ pit ที่เกิดขึ้นจากผลของอัตราความเครียดซ้ำและการกัดกร่อนของสารละลายที่วิกฤตในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง และได้รับอัตราความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> ถ่ายที่กำลังขยาย 110 เท่า

จากที่กล่าวมาในข้างต้นจะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำและอัตราการกัดกร่อนของสารละลายมีผลต่อลักษณะและขนาดของรอยแตกที่เกิดขึ้น ในรูปที่ 5.7-5.9 จะเห็นว่าวัสดุที่มีความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำและอัตราการกัดกร่อนของสารละลายที่วิกฤตนั้น จะทำให้เกิดการแพร่ขยายของรอยแตก ลักษณะส่วนปลายของรอยแตกทั้งสองด้านจะเล็กแหลม และแพร่ในทิศที่ตั้งฉากกับ tensile axis ดังรูปที่ 5.17 และเมื่อตรวจสอบภายในบริเวณรอยแตกจะพบความเสียหายแบบ IGSCC จากผลของปริมาณโครเมียมคาร์ไบด์บริเวณขอบเกรน ความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุดังกล่าวจะเกิดจากการเชื่อมต่อกันของรอยแตกเป็นผลทำให้เกิด SCC ในวัสดุ ขณะเดียวกันในวัสดุที่ได้รับอัตราความเครียดซ้ำและมีการเกิดการกัดกร่อนที่ไม่วิกฤตจะทำให้รอยแตกที่เกิดขึ้นไม่สามารถแพร่ขยายได้ในทิศที่ตั้งฉากกับ tensile axis ดังรูปที่ 5.18 ลักษณะของรอยแตกจะขยายออกในแนวที่ขนานกับ tensile axis และส่วนปลายจะมีลักษณะที่มนอันเกิดจาก plastic deformation ซึ่งจะก่อให้เกิดความเสียหายแบบ ductile failure กับวัสดุดังกล่าว



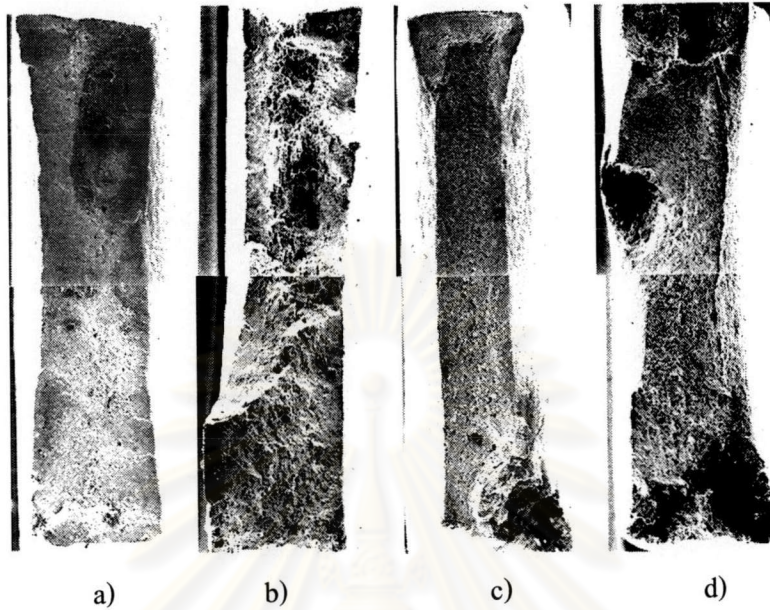
Tensile axis



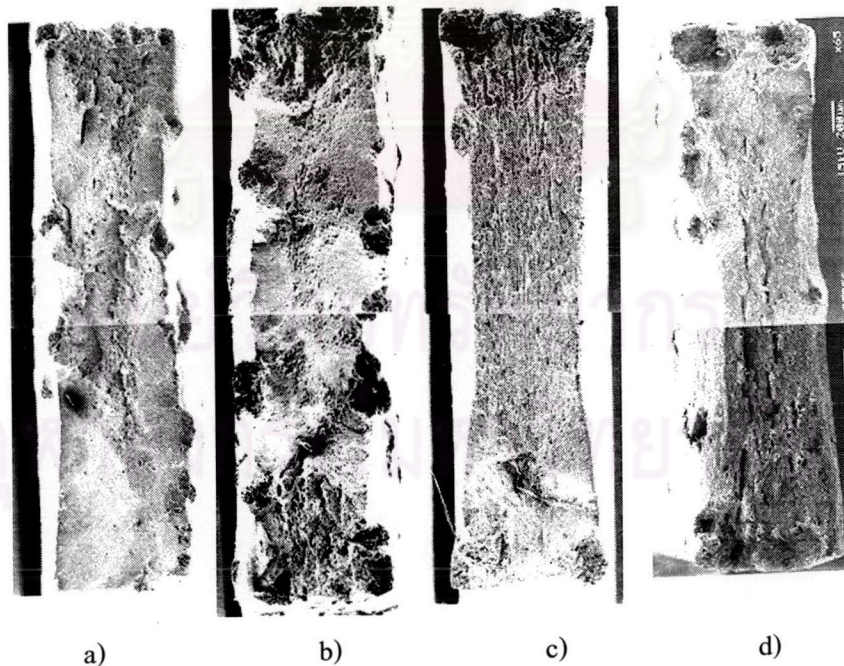
รูปที่ 5.18 ลักษณะของ pit ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 2 ชั่วโมง อัตราความเครียดซ้ำ  $5.2 \times 10^{-8}$  วินาที<sup>-1</sup> ที่ปราศจากการแพร่ของรอยแตกเนื่องจากได้รับอัตราความเครียดซ้ำและการกัดกร่อนที่ไม่เหมาะสม ถ่ายที่กำลังขยาย 25 เท่า



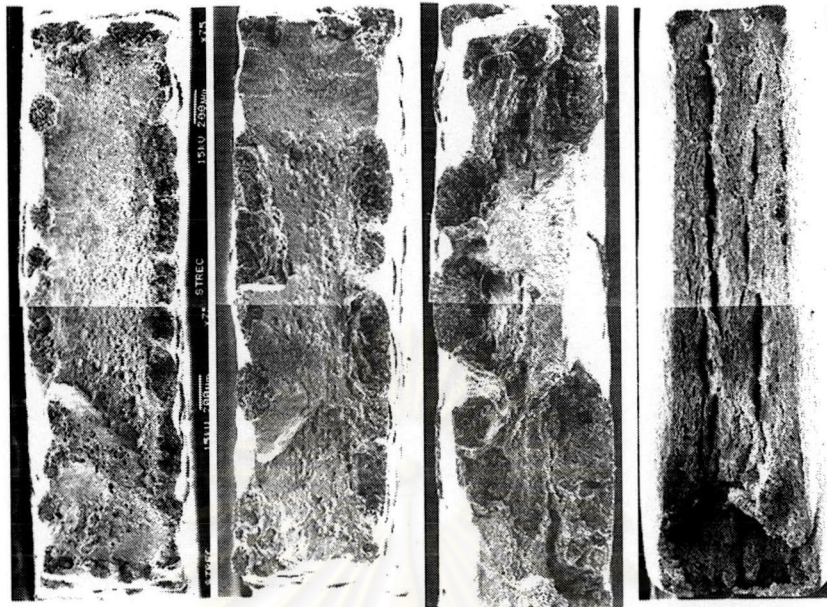
### 5.3.2 ผลการตรวจสอบการเกิด PIT และรอยแตกบริเวณภาคตัดขวางของชิ้นงานเหล็กกล้าไร้สนิม 304



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ไม่ผ่านการเซนซิไทเซชัน a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ถ่ายที่กล้องขยาย 85 เท่า



รูปที่ 5.20 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 1 ชั่วโมง a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ถ่ายที่กล้องขยาย 85 เท่า



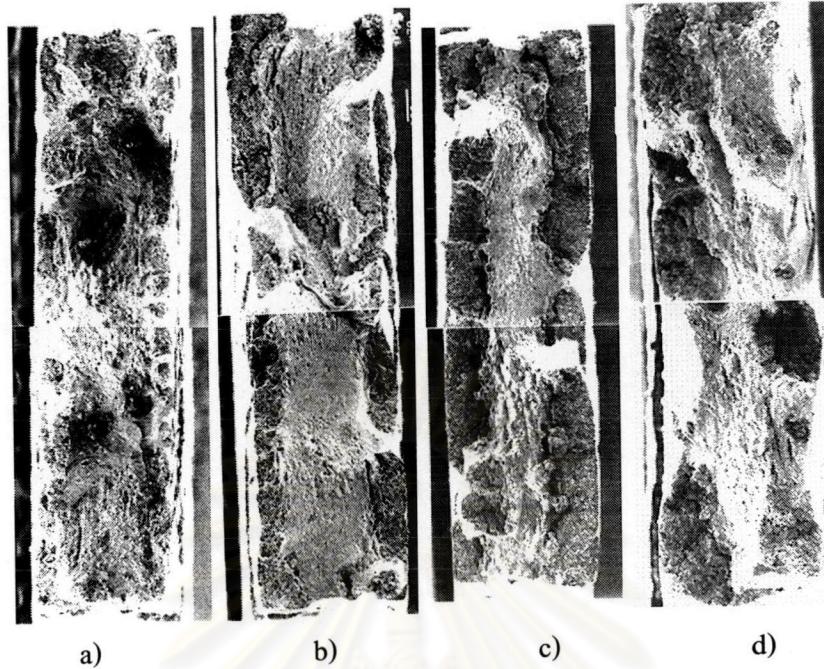
a) b) c) d)

รูปที่ 5.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 2 ชั่วโมง a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ถ่ายที่กำลังขยาย 85 เท่า



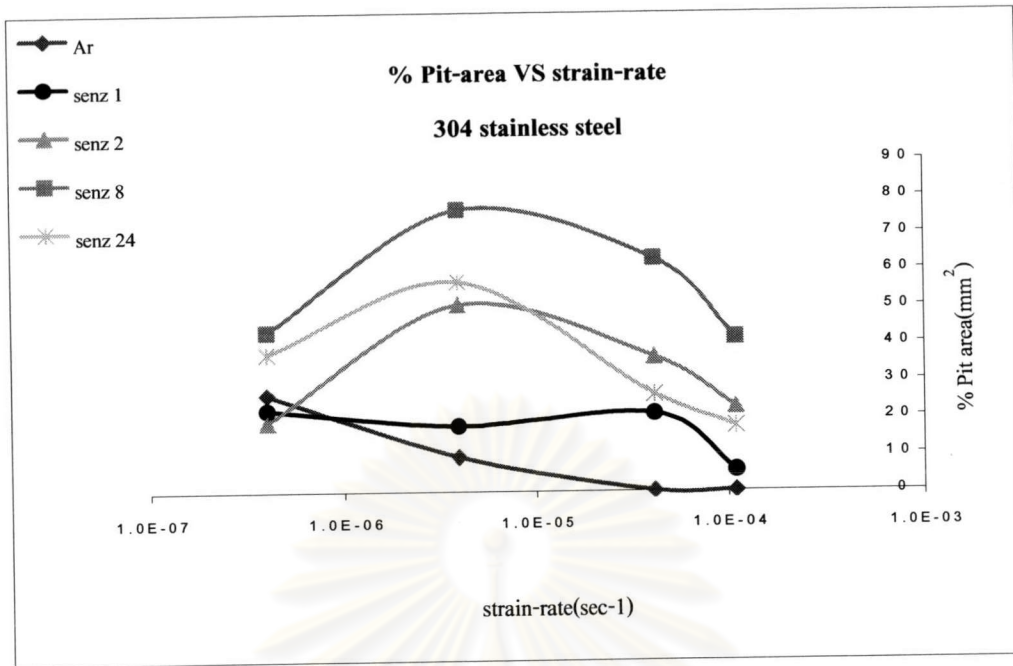
a) b) c) d)

รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ถ่ายที่กำลังขยาย 85 เท่า



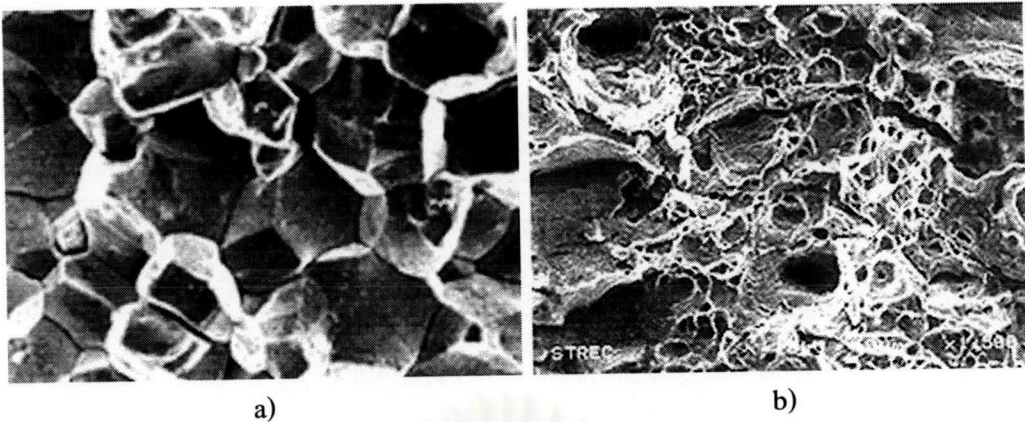
รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดซ้ำที่เปลี่ยนไปกับการเกิด SCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 24 ชั่วโมง a)  $1.1 \times 10^{-4}$  b)  $4.2 \times 10^{-5}$  c)  $3.9 \times 10^{-6}$  d)  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> ถ่ายที่กำลังขยาย 85 เท่า

จากการตรวจสอบบริเวณด้านข้างของชิ้นงานที่แสดงให้เห็นถึงขนาดที่ต่างกันของรอยแตก และจากการสังเกตที่บริเวณรอยแตกพบว่าการเกิดความเสียหายของชิ้นงานส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณที่มีการเชื่อมต่อกันของรอยแตกในแนวที่ตั้งฉากกับ tensile axis ซึ่งการเชื่อมต่อกันของรอยแตกที่เกิดขึ้นบนผิวของชิ้นงานนั้น เมื่อมองจากภาพด้านภาคตัดขวางของชิ้นงานจะพบว่า ในชิ้นงานที่มีอัตราความเครียดซ้ำและระดับการเซนซิไทเซชันต่างกันจะมีพื้นที่ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันในภาคตัดขวางโดยรอบชิ้นงานต่างกันดังรูปที่ 5.19 - 5.23 นอกจากนี้ยังมีความลึกของรอยแตกจากบริเวณผิวของชิ้นงานที่ต่างกัน การตรวจสอบจากภาพถ่ายด้านภาคตัดขวางของชิ้นงานทำให้เราสามารถทราบถึงปริมาณของพื้นที่ที่มีการเกิด pit ซึ่งก็คือ %pit-area และความลึกโดยเฉลี่ยของการเกิด pit (pit-deep) ซึ่งค่าดังกล่าวได้แสดงความสัมพันธ์กับอัตราความเครียดซ้ำดังรูปที่ 5.24 และ 5.26 ตามลำดับ

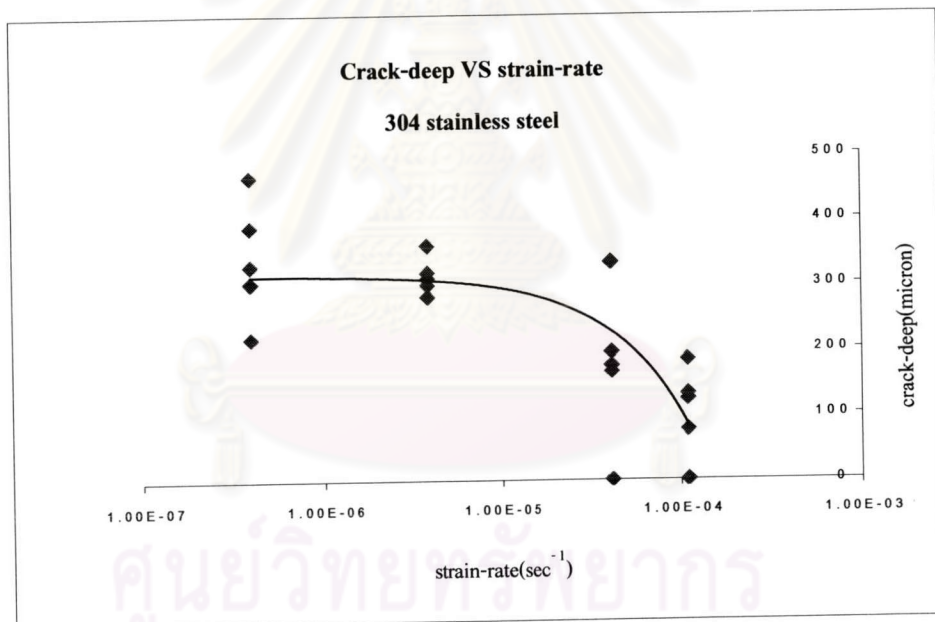


รูปที่ 5.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง % Pit-area และ strain-rate ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

จากภาพถ่ายแสดงภาคตัดขวางของชิ้นงานในรูปที่ 5.19-5.23 เมื่อนำความสัมพันธ์ระหว่าง % Pit-area และ strain-rate มาวาดกราฟในรูปที่ 5.24 จะสังเกตเห็นได้ว่าพื้นที่ภาคตัดขวางของชิ้นงานในกลุ่มที่สองคือชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 2, 8 และ 24 ชั่วโมง นั้นพื้นที่ของการเกิด pit จะเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการความเครียดที่ใช้ในการทดลองมีค่าลดลงจากอัตรา  $1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> การเพิ่มขึ้นของ % pit-area จะเพิ่มขึ้นจนกระทั่งมีค่ามากที่สุดที่อัตราการความเครียด  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> หลังจากนั้นแม้ว่าอัตราการความเครียดจะมีค่าต่ำมาอยู่ที่  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> แต่ค่าของ %pit-area กลับไม่สูงขึ้นในทางกลับกันค่า %pit-area กลับมีแนวโน้มที่ลดลง และเมื่อสังเกตภาพถ่ายขยายบริเวณภาคตัดขวางชิ้นงานจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะพบว่าบริเวณภาคตัดขวางที่มีการเกิด pit ลึกลงไปในเนื้อชิ้นงานจะเกิดความเสียหายของโครงสร้างวัสดุในบริเวณดังกล่าวแบบ IGSCC ทั้งหมดดังรูปที่ 5.25 a) ส่วนบริเวณที่ไม่พบการเกิด pit นั้นวัสดุจะเกิดความเสียหายในโหมดของ ductile failure ดังรูปที่ 5.25 b) ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ %pit-area จะมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับความไวของแต่ละชิ้นงานที่มีระดับการเซนซิไทเซชันต่างกันต่อสารละลายที่ใช้ในการทดลอง โดยชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 2 ชั่วโมงขึ้นไปจะไวต่ออัตราการเปลี่ยนแปลงความเครียดมากกว่าชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชันเป็นเวลา 1 ชั่วโมง และชิ้นงานที่ไม่ผ่านการเซนซิไทเซชัน ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นดังกล่าวเป็นผลอันเนื่องมาจากการเหลืออยู่ไม่เท่ากันของปริมาณโครเมียมที่บริเวณขอบเกรนจากกระบวนการเซนซิไทเซชัน



รูปที่ 5.25 a) การเกิด IGSCC บริเวณภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 8 ชั่วโมง อัตราความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> b) Ductile failure ในภาคตัดขวางของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านการเซนซิไทเซชัน 1 ชั่วโมง อัตราความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> ถ่ายที่ กำลังขยาย 1500 เท่า

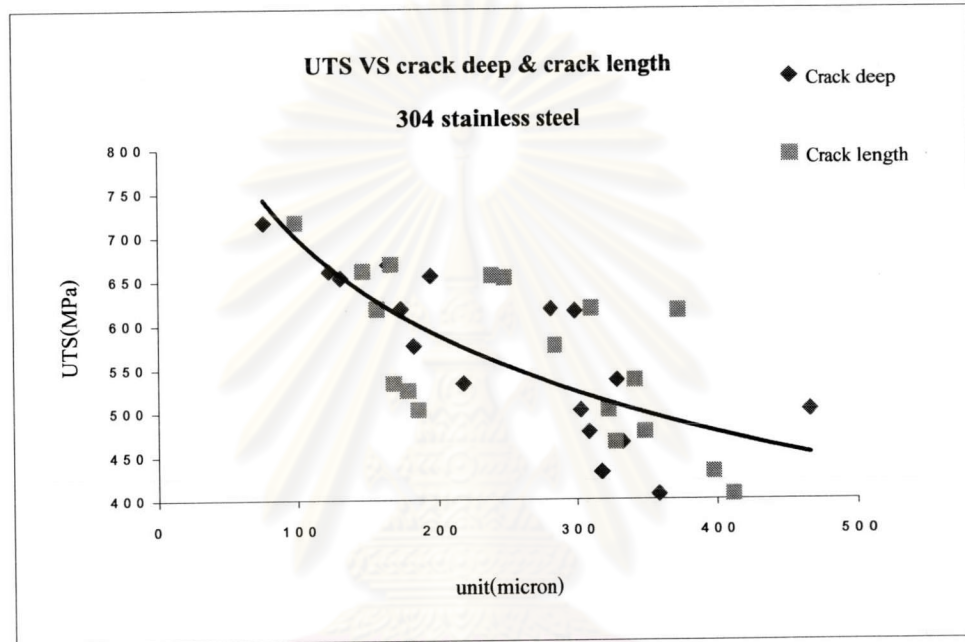


รูปที่ 5.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง crack -deep และ strain-rate ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

เมื่อสังเกตค่า crack-deep ของวัสดุจากรูปที่ 5.19-5.23 และนำมาวาดกราฟในรูปที่ 5.26 จะพบว่าเมื่ออัตราความเครียดซ้ำมีค่าลดต่ำลงจาก  $1.1 \times 10^{-4} - 3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> แนวโน้มค่าความลึกของรอยแตกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นค่าความลึกของรอยแตกที่อัตราความเครียดซ้ำต่ำกว่า  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> จนกระทั่ง  $4.0 \times 10^{-7}$  วินาที<sup>-1</sup> จะมีค่าค่อนข้างที่ใกล้เคียงกัน กราฟในรูปที่ 5.24 และ 5.26 แสดงให้เห็นว่าการเกิดร่วมกันระหว่างผลของอัตราความเครียดซ้ำและผลของ

environmental assists cracking จะเกิดร่วมกัน ได้ดีที่สุดที่อัตราการความเครียดซ้ำ  $3.9 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> โดยดูจากผลของความลึกของรอยแตกที่ลึกที่สุด ณ จุดนี้

เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลของขนาดและความลึกของรอยแตกที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุรูปที่ 5.27 จึงได้แสดงความสัมพันธ์ของขนาดและความลึกของรอยแตกที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุ จะเห็นได้ว่าค่า UTS ของวัสดุจะลดลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อขนาดและความลึกของรอยแตกมีค่ามากขึ้น



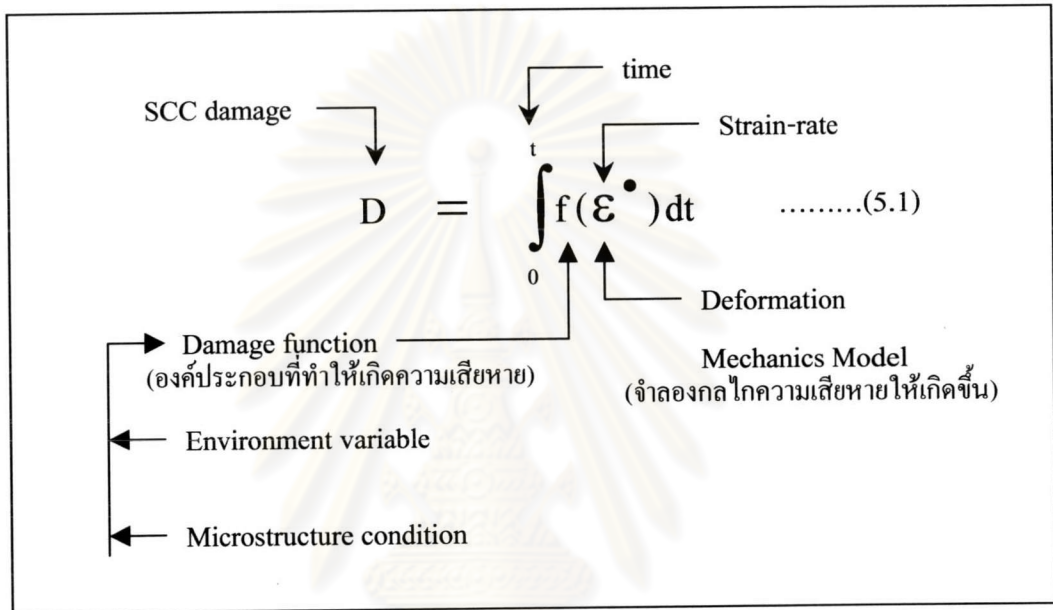
รูปที่ 5.27 แสดงความสัมพันธ์ของ UTS ที่มีต่อทั้งขนาดและความลึกของรอยแตกของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

#### 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายที่เกิดขึ้นจากผลของ SCC กับอัตราการความเครียดซ้ำในแบบจำลอง strain rate damage model ของ Gerber และ Garud จาก power law relation

ระดับอัตราการความเครียดซ้ำที่มีผลอย่างมากกับความเสียหายที่พบในชิ้นงานทดลองแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของอัตราการความเครียดซ้ำที่ใช้เป็นกลไกสำคัญในการจำลองความเสียหายที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเกิด SCC ในวัสดุ ความเสียหายที่เกิดขึ้นจากผลของอัตราการความเครียดซ้ำในการทดลองสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองความเสียหายการเกิด SCC ที่สร้างขึ้นในรูปแบบของแบบจำลองทฤษฎีกึ่งการทดลอง (semi empirical theory) โดย Gerber และ Garud [4] ที่ใช้อัตราการความเครียดซ้ำเป็นกลไกสำคัญในการจำลองความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุ ซึ่งระดับอัตรา

ความเครียดซ้ำที่ใช้และปริมาณความเสียหายที่ได้รับในวัสดุสามารถนำไปใช้ทำนายอายุของวัสดุที่จะเกิด SCC จากการใช้งานจริงได้

ในแบบจำลองแสดงให้เห็นถึงความเสียหายแบบ SCC ที่เกิดขึ้น(D) ในช่วงเวลา t นั้นเกิดจากการร่วมกันของปัจจัยต่าง ๆ ที่จำลองให้ความเสียหายเกิดขึ้น (damage function) เช่น corrosive environment หรือ microstructure condition โดยใช้อัตราความเครียดซ้ำในการผลักดันให้เกิดความเสียหายดังกล่าว ดังความสัมพันธ์ในสมการที่ 5.1 ในรูปที่ 5.28

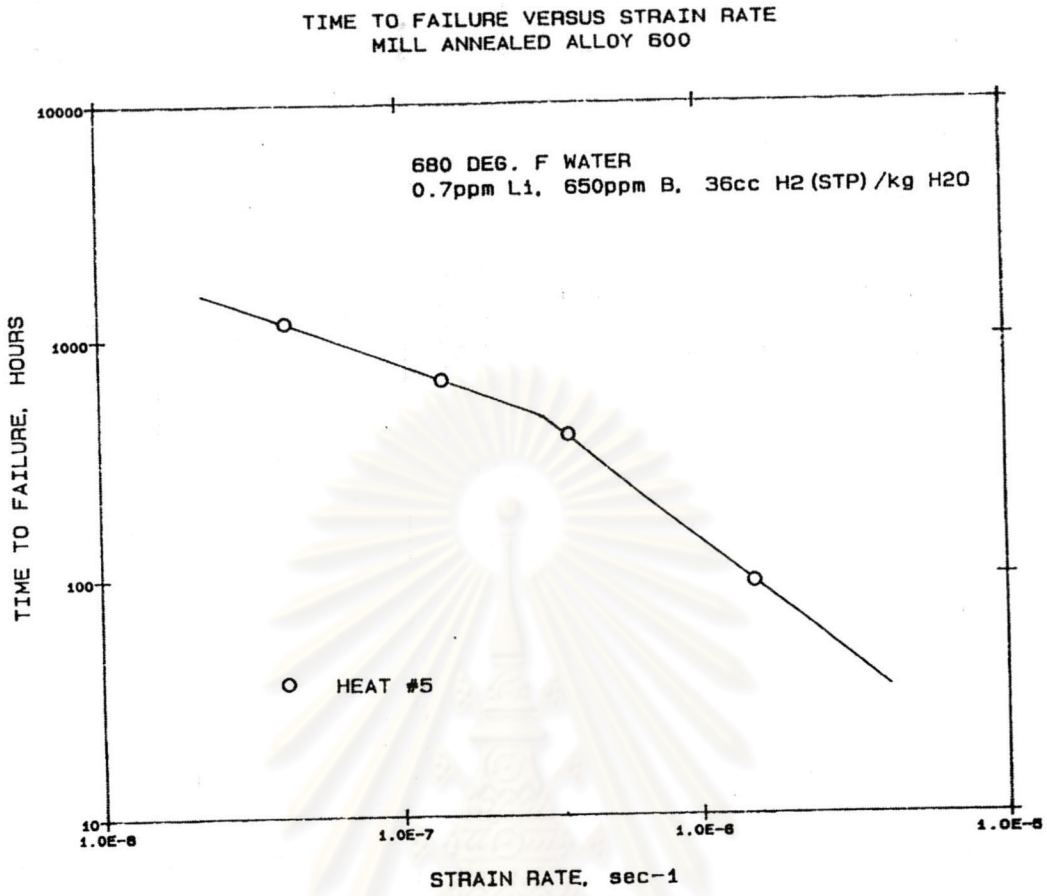


รูปที่ 5.28 ความสัมพันธ์ระหว่างความเสียหายที่เกิดขึ้นจากผลของ SCC กับอัตราความเครียดซ้ำในแบบจำลอง strain rate damage model ของ Gerber และ Garud

จากสมการในรูปที่ 5.28 นั้น ความเสียหายที่เกิดขึ้น (damage function) และอัตราความเครียดซ้ำจะมีความสัมพันธ์ตาม power law relation ซึ่งตัวแปร A และ p จะเป็นค่าคงที่ขึ้นอยู่กับแต่ละวัสดุและสภาวะที่วัสดุได้รับ ดังสมการที่ 5.2

$$f(\dot{\epsilon}) = A \dot{\epsilon}^p \quad \dots\dots\dots(5.2)$$

ระดับความเสียหายในวัสดุจะเพิ่มมากขึ้นตามระยะเวลาที่วัสดุได้รับอัตราความเครียดซ้ำดังสมการที่ 5.3 จนกระทั่งเมื่อวัสดุเกิดความเสียหายแบบ SCC ในช่วงเวลา  $t_f$  ความเสียหายที่เกิดขึ้น (d) จะเป็นค่าที่เข้าสู่ค่าวิกฤติ ( $d$  value reach to  $d_{critical}$ ) และเป็นสภาวะวิกฤติที่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายแบบ SCC ดังสมการที่ 5.4 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์แบบ power law relation



รูปที่ 5.29 กราฟระหว่างช่วงเวลาที่เกิดความเสียหายและอัตราความเครียดซ้ำของ alloy 600 ที่อุณหภูมิ 680 °F [5]

$$\frac{D}{A} = d = \int_0^t \epsilon \cdot p \, dt \quad \dots\dots(5.3)$$

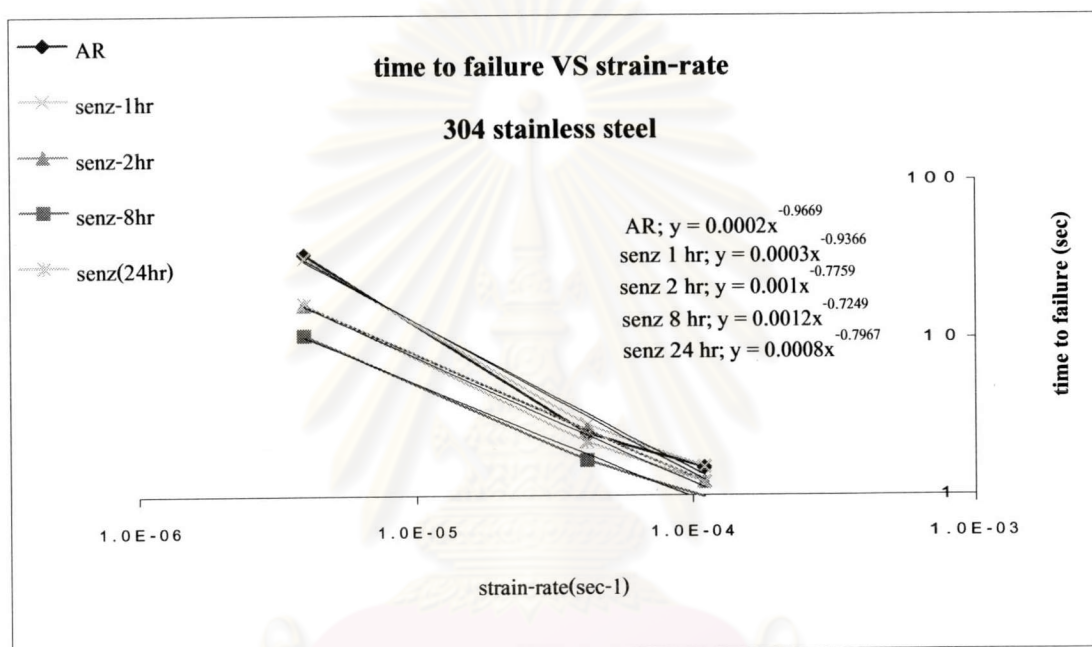
critical condition

$$d \rightarrow d_{critical} = \epsilon \cdot p \cdot t_f \quad \dots\dots(5.4)$$

เมื่อทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $t_f$  และอัตราความเครียดซ้ำในแบบ log-scale จะพบว่าความชันของกราฟที่ได้จะเท่ากับ  $-p$  ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ power law relation ในสมการที่ 5.4 โดยที่ค่าของความชัน  $p$  ในแบบจำลองความเสียหายของ Gerber และ Garud [4] จะแสดงถึงการเข้าร่วมของ aggressive environment ในการทำให้ชิ้นงานเกิดความเสียหาย เช่น กราฟระหว่างช่วงเวลาที่เกิดความเสียหายและอัตราความเครียดซ้ำของ alloy 600 ที่อุณหภูมิ 680 °F ในรูปที่ 5.29 [5]



ระดับอัตราความเครียดที่สูงเกินไป (high strain-rate) ความชันที่ได้จาก power law relation จะมีค่าเท่ากับ  $-1$  ( $p = 1$ ) แสดงถึงความเสียหายที่พบเกิดจาก mechanical failure เพียงอย่างเดียว สำหรับระดับอัตราความเครียดที่ต่ำลงมา (low strain-rate) ความชันที่ได้จะมีค่าสูงกว่า  $-1$  ( $p < 1$ ) ถ้าความเสียหายที่เกิดขึ้นในวัสดุมีการเข้าร่วมของสภาวะที่กัดกร่อน ดังนั้นค่า  $p$  ในสมการ 5.4 จึงแสดงถึงระดับของผลกระทบที่ได้รับจากสภาวะการกัดกร่อนในการทดลอง ซึ่งจะมากหรือน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับโครงสร้างจุลภาคของวัสดุรวมถึงอัตราความเครียดที่วัสดุได้รับ โดยที่กลไกการเกิดนั้นอธิบายได้จาก film rupture model ที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2 ข้างต้น



รูปที่ 5.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายแบบ SCC และอัตราความเครียดที่ได้จากการทดลองในเหล็กกล้าไร้สนิม 304

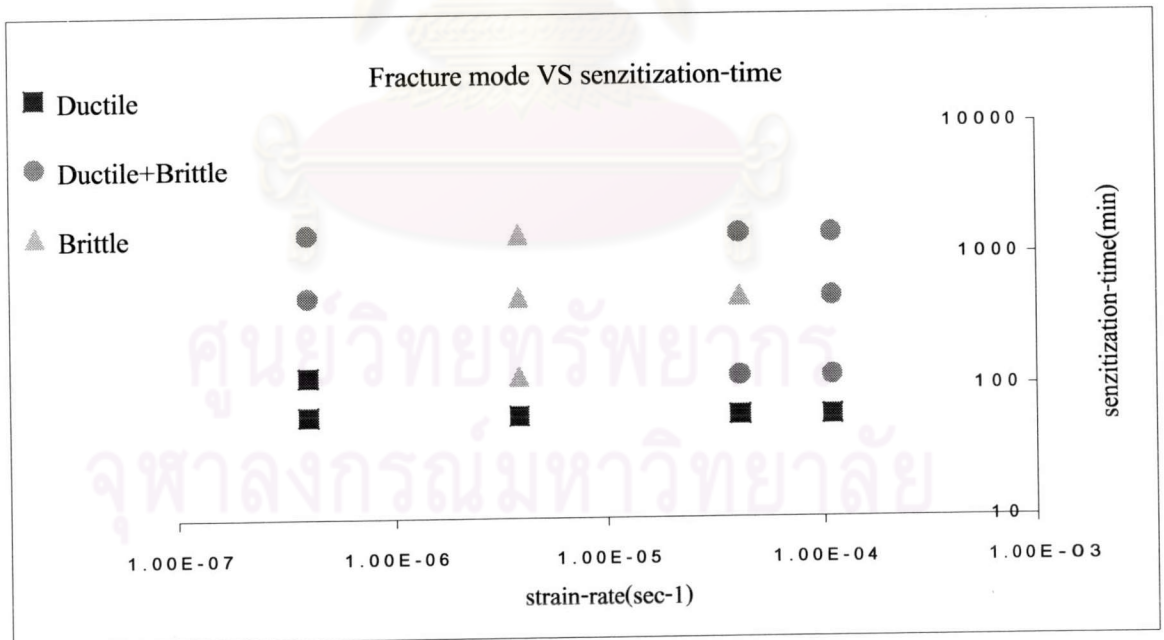
การนำมาใช้ของ power law relation สำหรับอธิบายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ทำให้วัสดุเกิดความเสียหายแบบ SCC กับอัตราความเครียดที่ได้จากการทดลองนั้นแสดงดังรูปที่ 5.30 และค่า  $p$  ที่ได้แสดงไว้ดังตารางที่ 5.3 จากรูปจะเห็นว่าในวัสดุกลุ่มที่ 1 (เซนซิไทเซชันเท่ากับ 0 และ 1 ชั่วโมง) นั้น ลักษณะของกราฟที่ได้จะมีความชันประมาณ  $-1$  ในทุกระดับอัตราความเครียดด้วยผลของความเสียหายที่เกิดจาก mechanical failure เพียงอย่างเดียว ส่วนวัสดุในกลุ่มที่ 2 (เซนซิไทเซชันเท่ากับ 2, 8 และ 24 ชั่วโมง) ความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นเมื่อวัสดุมีการเซนซิไทเซชันที่เพิ่มขึ้น จนกระทั่งค่าสูงสุดของความชันอยู่ที่ระดับการเซนซิไทเซชันเท่ากับ 8 ชั่วโมง ยกเว้นที่ระดับการเซนซิไทเซชันเท่ากับ 24 ชั่วโมง กราฟจะมีความชันน้อยกว่าที่ 8 ชั่วโมง และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูป 5.29 กับผลการทดลองในรูป 5.30 จะพบว่ากราฟของข้อมูลในกลุ่ม

ที่ 2 นั้น จะไม่มีส่วนของกราฟที่มีความชันเท่ากับ  $-1$  สอดคล้องกับลักษณะของความเสียหายที่พบ ดังแสดงในรูปที่ 5.31 เมื่อชิ้นงานได้รับอัตราความเครียดซ้ำระหว่าง  $3.9 \times 10^{-6}$  ถึง  $1.1 \times 10^{-4}$  วินาที<sup>-1</sup> ที่แสดงให้เห็นว่าไม่มีการเกิดความเสียหายกับชิ้นงานในลักษณะของ ductile failure

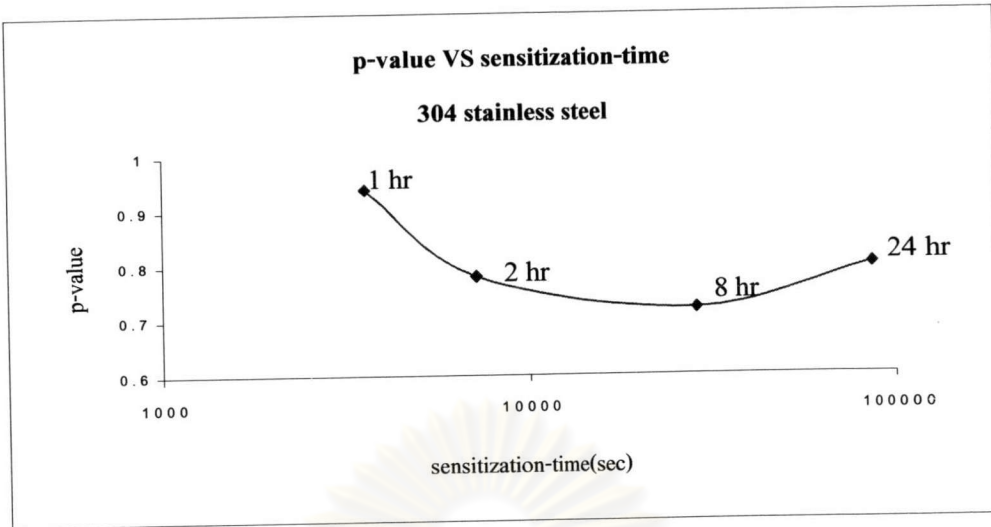
ตารางที่ 5.3 ค่า p ที่ได้จากความชันกราฟระหว่างเวลาที่เหล็กกล้าไร้สนิม 304 เกิดความเสียหายและ อัตราความเครียดซ้ำในแบบ log-scale

Sensitization-time (hr)	AR	1	2	8	24
p-value	0.97	0.94	0.78	0.72	0.8

เมื่อนำค่า p ที่ได้จากค่าความชันของกราฟในรูปที่ 5.30 มาสัมพันธ์กับระดับการเซนซิไทเซชันจะพบว่าลักษณะของกราฟที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลผลการเชื่อมต่อกันของปริมาณคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนในตารางที่ 5.2 และความสัมพันธ์ระหว่างระดับการเซนซิไทเซชัน ปริมาณของโครเมียมคาร์ไบด์ รวมทั้งระดับความถี่ของการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่ขอบเกรนดังรูปที่ 5.20 ซึ่งค่า p จะมีค่าต่ำที่สุดที่เวลาเซนซิไทเซชันเท่ากับ 28800 วินาที (8 ชั่วโมง) แสดงดังในรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.31 รูปแบบความเสียหายที่เกิดขึ้นในชิ้นงานทดลองเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่มีระดับการเซนซิไทเซชันต่างกันจากผลของอัตราความเครียดซ้ำ และ environment assists cracking

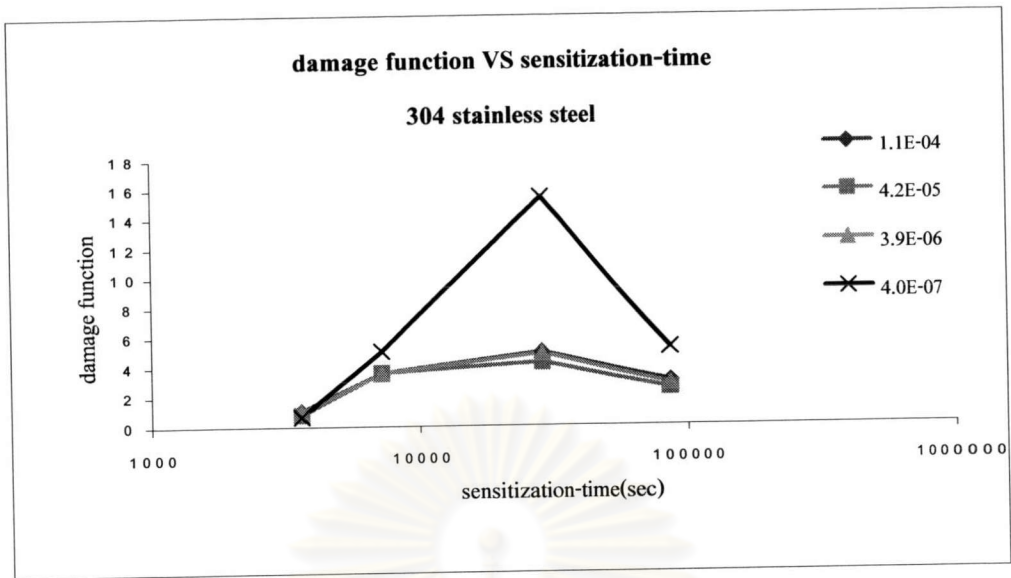


รูปที่ 5.32 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า p กับเวลาที่ใช้ในการเซนซิไทเซชัน ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

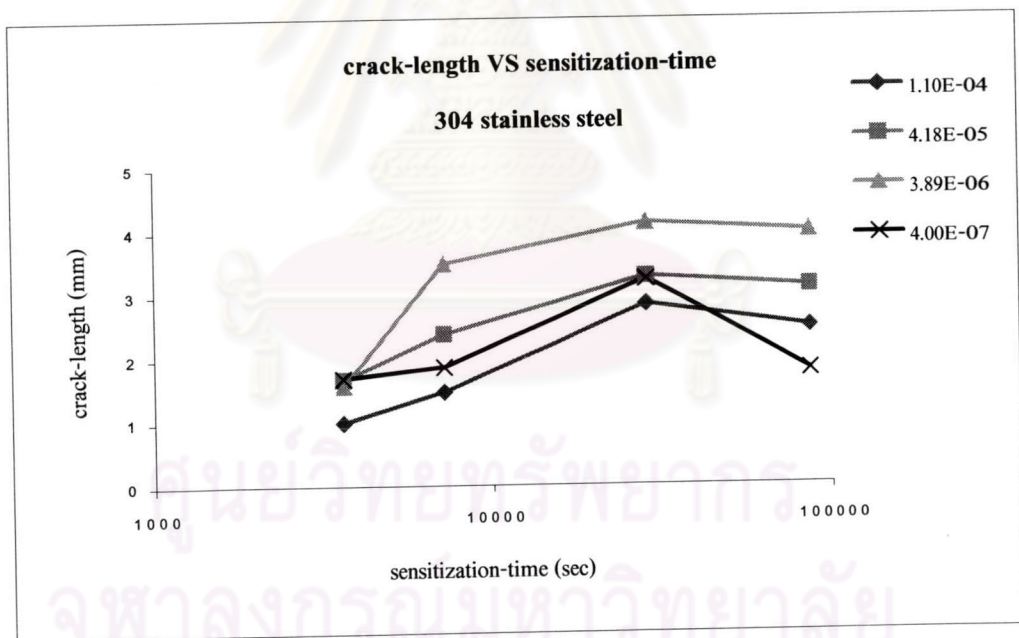
ตารางที่ 5.4 ค่า damage function ที่ได้จากความสัมพันธ์ power law relation ของเหล็กกล้าไร้สนิม 304

Damage function					
strain-rate(วินาที <sup>-1</sup> )	AR	senz(1hr)	senz(2hr)	senz(8hr)	senz(24hr)
1.1E-04	0.78	1.04	3.58	4.93	2.97
4.2E-05	0.51	0.78	3.58	4.23	2.46
3.9E-06	0.69	0.96	3.53	4.82	2.80
4.0E-07	0.40	0.66	5.04	15.39	5.22

จากนั้นเมื่อนำค่า p,  $t_f$  และอัตราความเครียดเข้าแทนค่าลงในสมการ 5.4 จะได้ damage function; d ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงความเสียหายของวัสดุจากการเกิด SCC ตามความสัมพันธ์ของ power law relation ค่า d ที่ได้แสดงดังตารางที่ 5.4 และเมื่อนำค่า d มาวาดกราฟเพื่อดูการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเมื่อชิ้นงานมีระดับการเซนซิไทเซชันต่างกันจะได้ดังรูปที่ 5.33 ซึ่งพบว่าเส้นกราฟมีแนวโน้มที่สัมพันธ์กับความยาวของรอยแตกที่เกิดขึ้นจากการเกิด SCC ในชิ้นงานทดลอง(crack-length; c) ดังรูปที่ 5.34 เมื่อนำค่า d กับค่า c มาเปรียบเทียบกับค่า p ดังรูปที่ 5.35 จะเห็นได้ว่าค่า d ที่ได้จากการคำนวณและค่า c จากการทดลองมีค่าสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นและมีแนวโน้มไปในทางเดียวกันคือ ค่า d และ c จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ p มีค่าลดลง



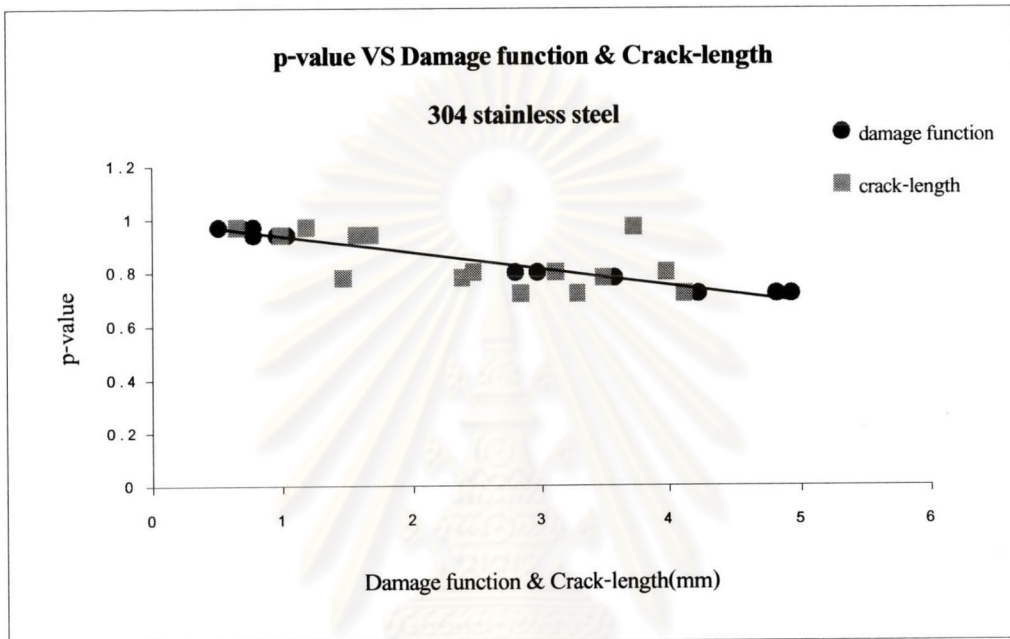
รูปที่ 5.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า damage function และระดับการเซนซิไทเซชัน ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304



รูปที่ 5.34 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า crack-length และระดับการเซนซิไทเซชัน ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304

การประยุกต์ใช้แบบจำลอง strain-rate damage model ของ Gerber และ Garud [4] ด้วย power law relation เข้ากับการทดสอบความไวต่อการแตกหักอันเนื่องมาจากความเค้นในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ด้วยอัตราความเครียดซ้ำหลายระดับโดยอาศัยกลไกการแตกหักจากผลของอัตรา

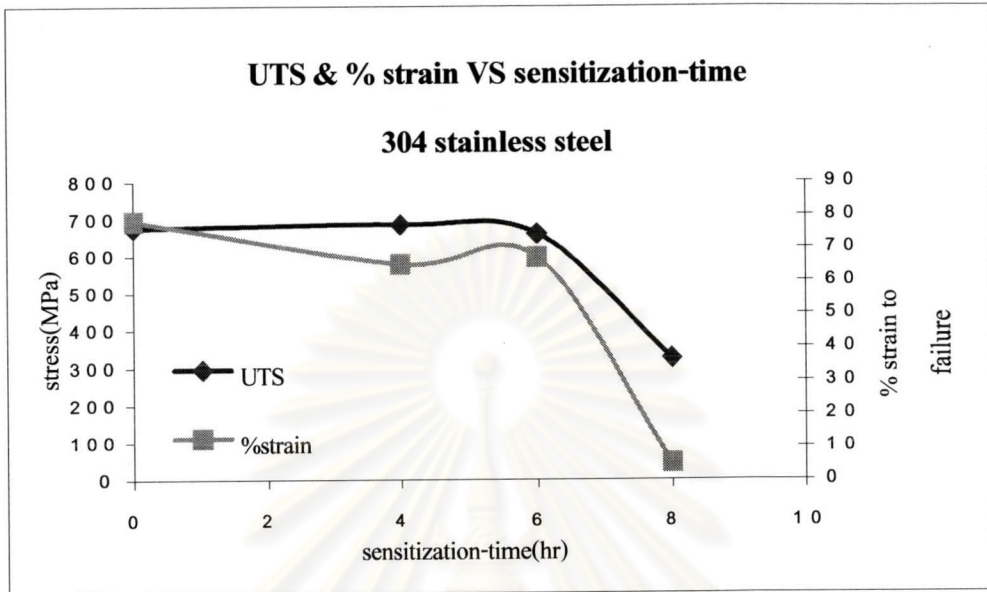
ความเครียดซ้ำในการจำลองและอธิบาย SCC ที่เกิดขึ้นกับชิ้นงานทดลองนั้น ค่า p ที่ได้จากความชันกราฟระหว่างอัตราความเครียดซ้ำและเวลาที่ชิ้นงานเกิดความเสียหายในแบบ log-scale สามารถใช้เป็นครุณีที่บอกถึงการเปลี่ยนไปของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุอันเนื่องมาจากการความร้อน เช่น ผ่านการเซนซิไทเซชันได้เป็นอย่างดี โดยดูได้จากค่า p ที่ลดลงหรือค่าความชันของกราฟที่เพิ่มขึ้น



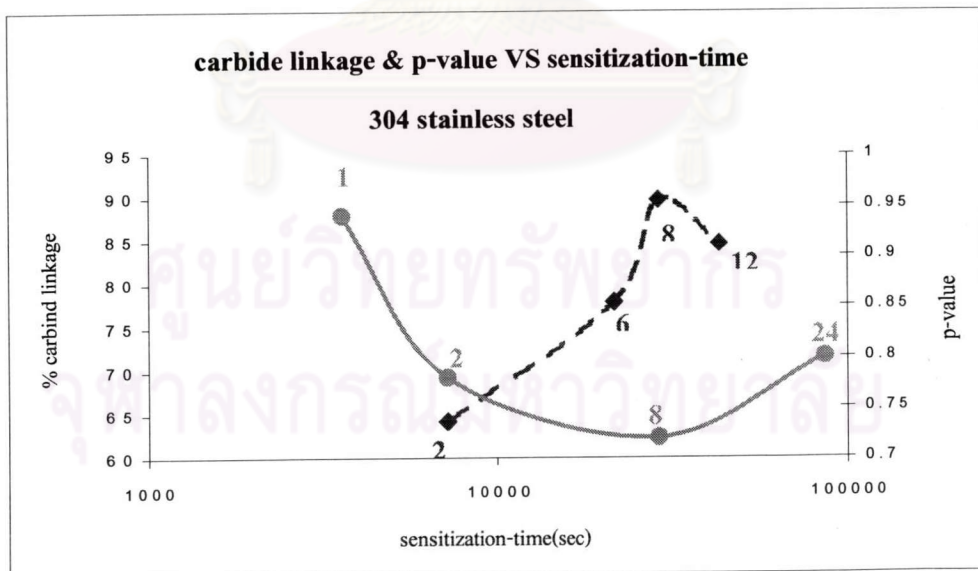
รูปที่ 5.35 ความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นระหว่าง damage function และ crack-length กับค่า p ในเหล็กกล้าไร้สนิม 304

จากที่กล่าวมาทั้งหมดในข้างต้นแสดงให้เห็นว่าการทดสอบวัสดุโดยการดึงด้วยอัตราความเครียดซ้ำ(SSRT)หลายระดับ เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถใช้ทำนายวัสดุว่าได้รับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคจากกระบวนการทางความร้อนหรือไม่ หรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของวัสดุที่เกิดขึ้นมีผลต่อการนำวัสดุไปใช้งานในสภาวะนั้น ๆ มากน้อยเพียงใด โดยการทดสอบ SSRT สามารถจำลองให้เกิดขึ้นได้สำหรับสภาวะที่สนใจ สำหรับการตรวจสอบความไวของโครงสร้างจุลภาคในเหล็กกล้าไร้สนิม 304 ที่ผ่านกระบวนการเซนซิไทเซชันในงานวิจัยของ กิตติศักดิ์ โกลลวรรณ [36] ด้วยการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของชิ้นงาน โดยใช้เทคนิค SSRT ที่ระดับอัตราความเครียดซ้ำ  $1.75 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> ในสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟตในรูปที่ 5.36 พบว่าชิ้นงานที่ผ่านการเซนซิไทเซชันน้อยกว่า 6 ชั่วโมง ค่าคุณสมบัติเชิงกลไม่สามารถที่จะแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุจากการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน ยกเว้นการเซนซิไทเซชันเท่ากับ 8 ชั่วโมง ที่แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติเชิงกลที่ลดลงอย่างมากจากการ

เปลี่ยนแปลงไปของโครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ซึ่งการเชื่อมต่อกันของโครเมียมคาร์ไบด์จากผลของระดับการเซนซิไทเซชันนั้นมีผลอย่างมากต่อความเสียหายแบบ SCC ที่เกิดขึ้น



รูปที่ 5.36 ผลการทดสอบคุณสมบัติเชิงกลของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 โดยใช้เทคนิค SSRT ที่ระดับอัตราความเครียดซ้ำ  $1.75 \times 10^{-6}$  วินาที<sup>-1</sup> ในสารละลายโซเดียมไทโอซัลเฟต



รูปที่ 5.37 เปรียบเทียบค่า p-value กับเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรนจากงานวิจัยของ กิตติศักดิ์ โกศลวรรณณะ [36] ในการทำนายโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากกระบวนการเซนซิไทเซชัน

เมื่อเปรียบเทียบค่า  $p$ -value รูปที่ 5.37 ในการทำนายโครงสร้างจุลภาคที่เปลี่ยนแปลงไปของเหล็กกล้าไร้สนิม 304 จากกระบวนการเซนต์ไทเซชัน กับงานวิจัยของ กิตติศักดิ์ โกศลวรรณชนะ [36] รูปที่ 5.36 จะเห็นได้ว่าค่า  $p$ -value มีความไวพอที่จะบอกได้ว่าโครงสร้างจุลภาคของวัสดุมีการเปลี่ยนแปลงไปจากการเกิดโครเมียมคาร์ไบด์ที่เพิ่มขึ้นตามระดับการเซนต์ไทเซชันที่เพิ่มขึ้น โดยที่ค่า  $p$ -value จะมีค่าต่ำสุดที่ระดับการเซนต์ไทเซชัน 8 ชั่วโมง และลดลงเล็กน้อยที่ระดับการเซนต์ไทเซชัน 24 ชั่วโมง สอดคล้องเป็นอย่างดีกับเปอร์เซ็นต์การเชื่อมต่อกันของคาร์ไบด์ที่บริเวณขอบเกรน



ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย