

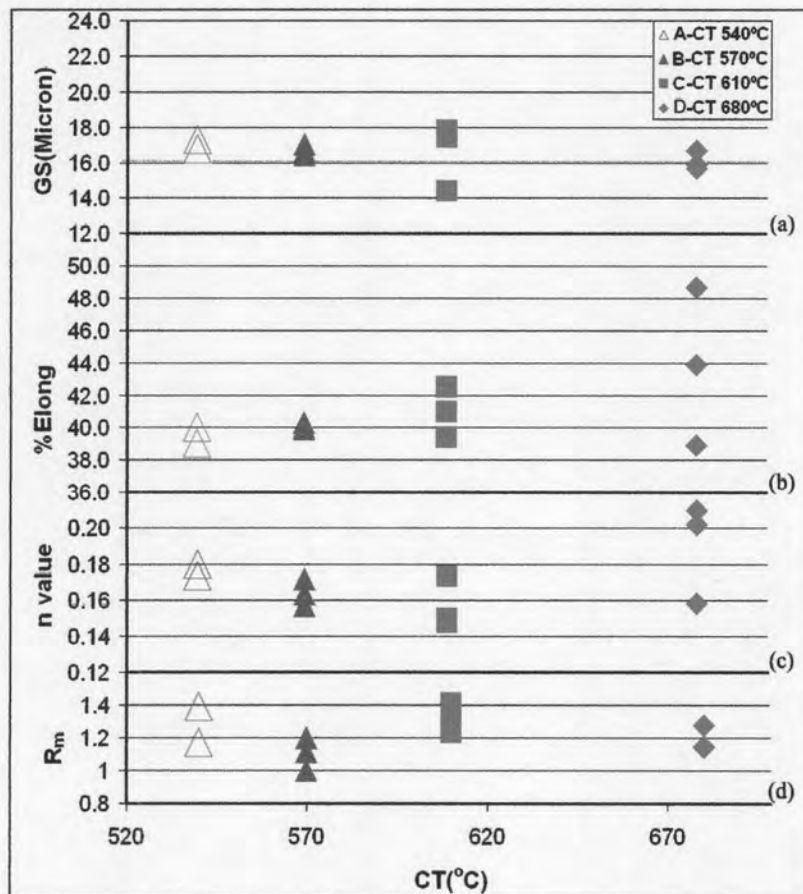
บทที่ 4

ผลและการอภิปราย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาผลของอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดร้อนต่อค่า plastic strain ratio และค่า strain-hardening exponent ผลของอุณหภูมิรีดละเอียดจะศึกษาโดยใช้ชิ้นงานตัวอย่างมีอุณหภูมิรีดละเอียดต่างกันคือ 860°C และ 890°C แล้วใช้อุณหภูมิรีดร้อนที่ 680°C เป็นการเปรียบเทียบและหาความสัมพันธ์ ส่วนผลของอุณหภูมิรีดร้อนศึกษาโดยใช้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีอุณหภูมิรีดละเอียดเท่ากันคือ 860°C แล้วมีอุณหภูมิรีดร้อน 540 570 610 และ 680°C ตามลำดับ ดังนั้นการวิเคราะห์เป็น 3 ส่วนคือ ที่อุณหภูมิรีดละเอียด 860°C อุณหภูมิรีดละเอียดสูงขึ้น และสุดท้ายวิเคราะห์อุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดร้อนทั้งหมด

4.1 อุณหภูมิรีดละเอียด 860°C

4.1.1 สมบัติทางกลของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดร้อนต่างๆ



รูปที่ 4.1 สมบัติต่างๆของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดร้อนต่างๆ

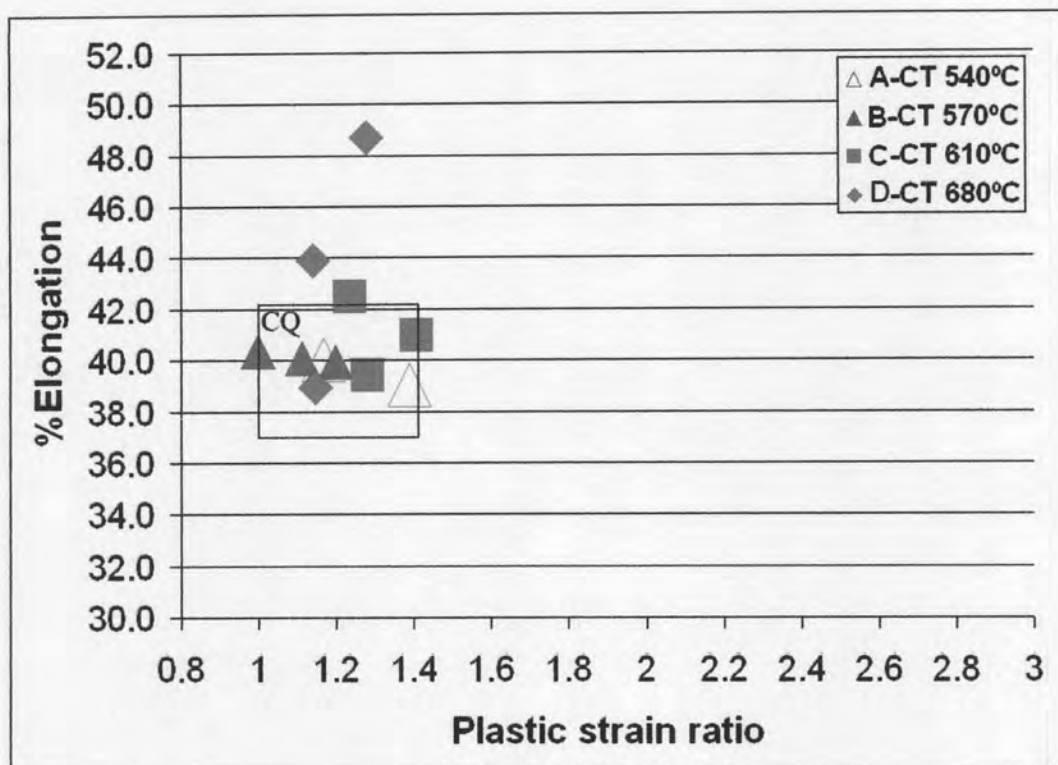
สมบัติทางกลของชิ้นงานที่รีดละเอียด 860°C แล้วม้วนที่อุณหภูมิ $540-680^{\circ}\text{C}$ ที่แสดงไว้ดังรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาขนาดเกรนเฟอร์ไรต์พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อขนาดเกรนเฟอร์ไรต์เล็กน้อยดังแสดงในรูป 4.1(a) ขนาดเกรนเฟอร์ไรต์มีค่าอยู่ระหว่าง 14-18 ไมครอน ซึ่งเทียบได้กับขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ในหน่วย ASTM No. ได้เป็น ASTM No.9 ที่มีขนาดเกรนเท่ากับ 16 ไมครอน

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยึดตัวดังแสดงในรูป 4.1(b) เปอร์เซ็นต์การยึดตัวเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิมีมากขึ้น เห็นได้จากชิ้นงานที่มีอุณหภูมิมี 540°C มีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวประมาณ 39 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่อุณหภูมิมี 680°C ให้เปอร์เซ็นต์การยึดตัวประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์

เมื่อพิจารณาค่า strain-hardening exponent พบว่าชิ้นงานที่มีอุณหภูมิมีสูงมีค่า strain-hardening exponent สูง รูปที่ 4.1(c) แสดงให้เห็นว่าช่วงอุณหภูมิมี $540-610^{\circ}\text{C}$ ค่า strain-hardening exponent มีค่าอยู่ระหว่าง 0.15-0.18 ในขณะที่อุณหภูมิมี 680°C ให้ค่า strain-hardening exponent สูง 2 ค่าคือ 0.20 และ 0.21 และมีค่าที่ต่ำคือ 0.16

เมื่อพิจารณาค่า plastic strain ratio พบว่าอุณหภูมิมีไม่ส่งผลต่อค่า plastic strain ratio เฉลี่ย โดยค่า plastic strain ratio ของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C และม้วนที่อุณหภูมิต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 1.0-1.4 โดยไม่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่ออุณหภูมิมีสูงขึ้น

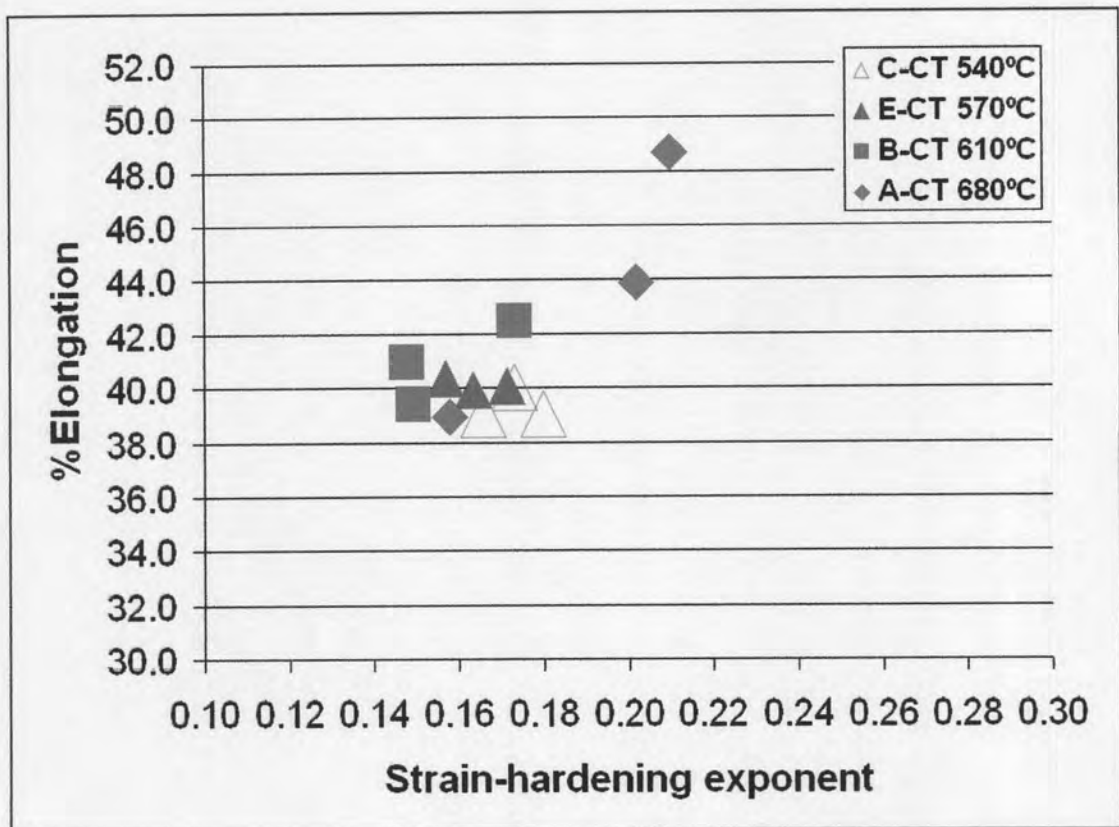
4.1.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า plastic strain ratio เฉลี่ย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิມ้วนต่างๆ

ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C แล้วມ้วนที่อุณหภูมิ 540-680°C พบว่าอุณหภูมิມ้วนไม่มีผลต่อค่า plastic strain ratio เฉลี่ยอย่างชัดเจน แต่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวซึ่งแสดงได้จากชิ้นงานที่มีอุณหภูมิມ้วนต่ำ (540°C) จะมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวประมาณ 39 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิມ้วนสูงให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวถึงประมาณ 44 เปอร์เซ็นต์ เมื่อพิจารณาเทียบกับช่วงคุณภาพ CQ (commercial quality) พบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีค่า plastic strain ratio เฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.0-1.4 ซึ่งยังอยู่ในช่วงคุณภาพ CQ และเปอร์เซ็นต์การยืดตัวส่วนใหญ่อยู่นะหว่างคุณภาพ CQ มีเพียงชิ้นงานที่มีอุณหภูมิມ้วนสูง (680°C) ที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าถึง 2 ค่าคือ 44 และ 49 เปอร์เซ็นต์ จึงแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิມ้วนที่สูงมีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงขึ้น

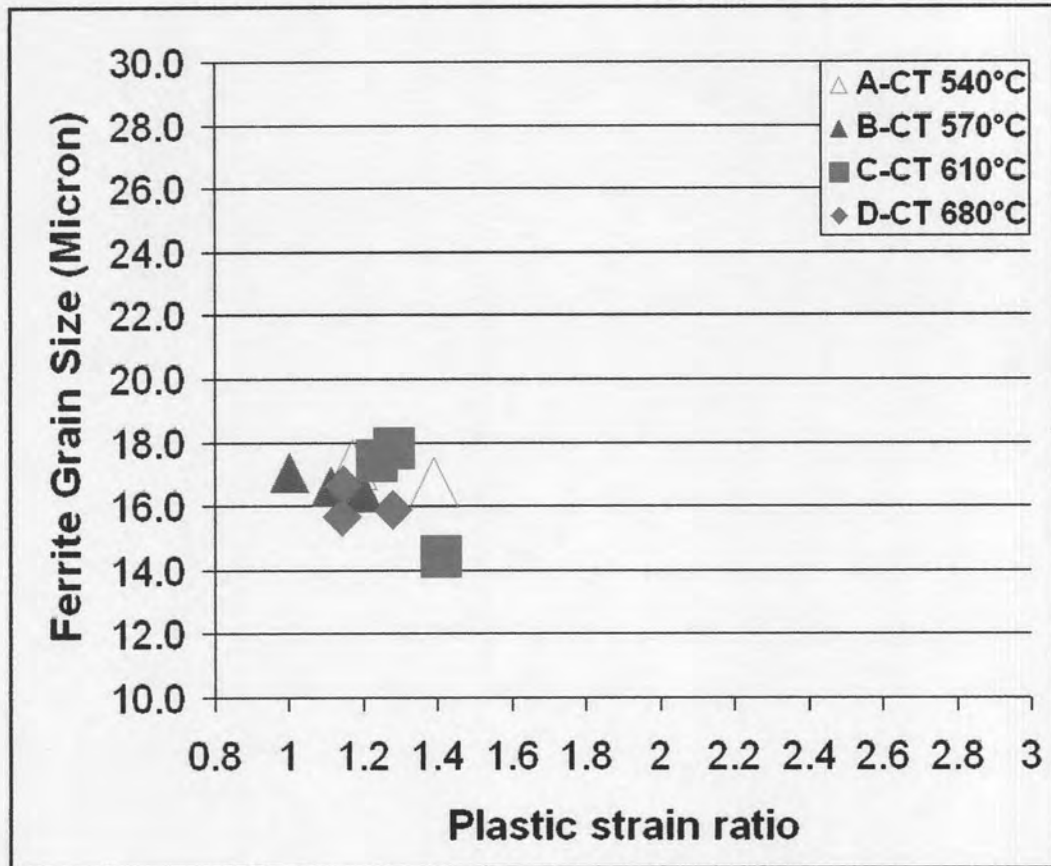
4.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า strain-hardening exponent



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า strain-hardening exponent ของชิ้นงานที่อุณหภูมิມ່ວນต่าง ๆ

รูปที่ 4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า strain-hardening exponent ได้อย่างชัดเจน โดยมีความสัมพันธ์เป็นไปในลักษณะแปรผันตามกันเห็นได้จากชิ้นงานที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงทั้ง 2 ค่าคือ 44 และ 49 เปอร์เซ็นต์ต่างให้ค่า strain-hardening exponent สูงคือ 0.20 และ 0.21 เมื่อพิจารณาต่อไปพบว่าชิ้นงานที่ให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงนั้นเป็นชิ้นงานที่มีอุณหภูมิມ່ວนสูง ดังนั้นจึงสามารถกล่าวได้ว่าอุณหภูมิມ່ວนของชิ้นงานที่สูงจะให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่สูงทำให้ชิ้นงานมีค่า strain-hardening exponent ที่สูงด้วย

4.1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio เฉลี่ย

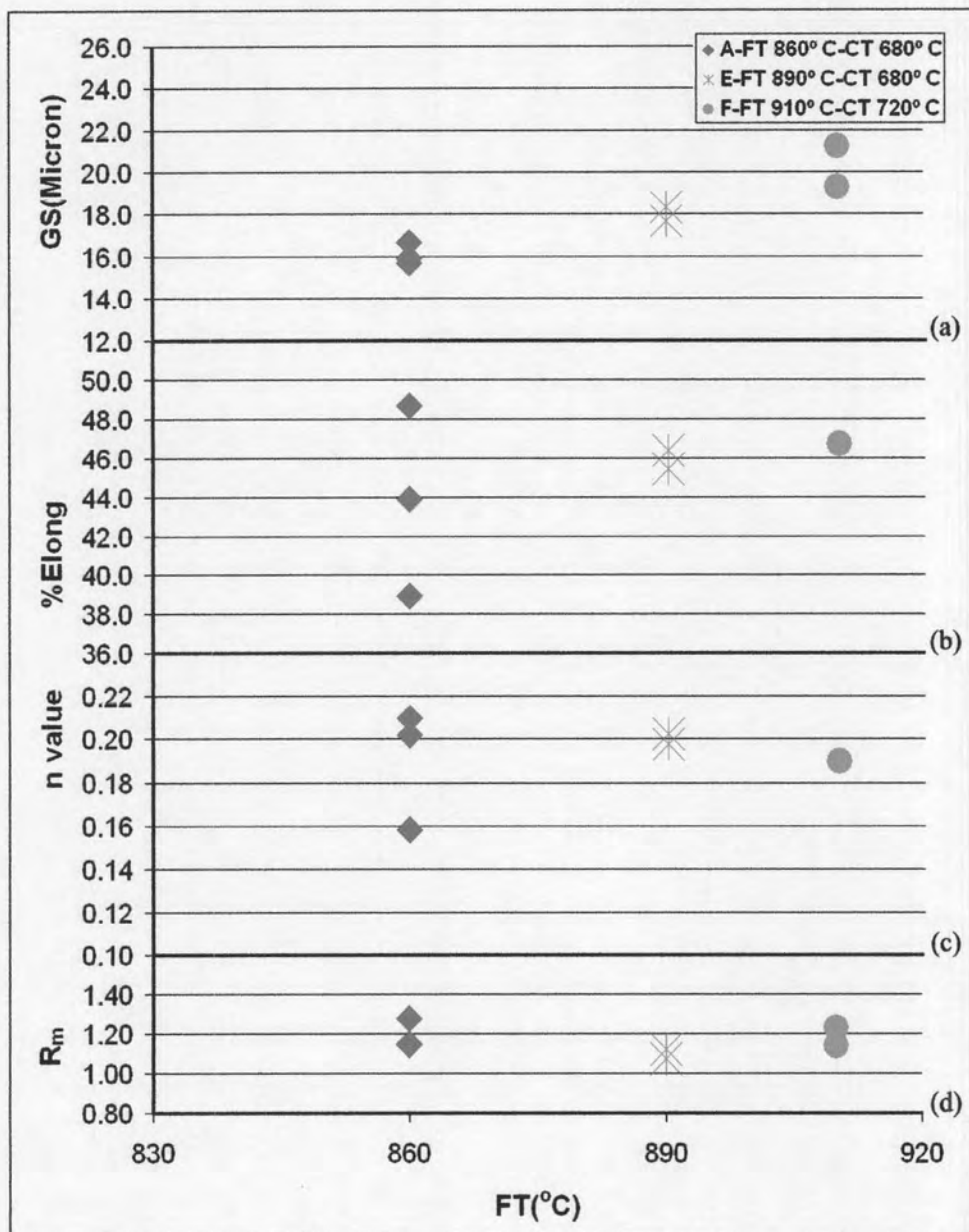


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิผ่นต่าง ๆ

ในการศึกษาเกี่ยวกับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยในเหล็กแผ่นรีดเย็นได้มีการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยซึ่งกล่าวไว้ว่า ขนาดเกรนเฟอร์ไรต์จะแปรผันตรงกับค่า plastic strain ratio เฉลี่ย ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงพิจารณาความสัมพันธ์ของขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยในเหล็กแผ่นรีดร้อนที่มีอุณหภูมิผ่นต่าง ๆ พบว่าขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ไม่มีผลต่อค่า plastic strain ratio อย่างชัดเจน

4.2 คุณสมบัติระดับละเอียดสูงขั้น

4.2.1 สมบัติทางกลของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิระดับละเอียดต่างๆ



รูปที่ 4.5 สมบัติต่างๆของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิระดับละเอียดต่างๆ

สมบัติทางกลของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิระดับละเอียดที่สูงขึ้น เมื่อพิจารณาขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ของชิ้นงานพบว่าขนาดเกรนเฟอร์ไรต์มีความสัมพันธ์กันโดยตรงกับอุณหภูมิระดับละเอียดที่

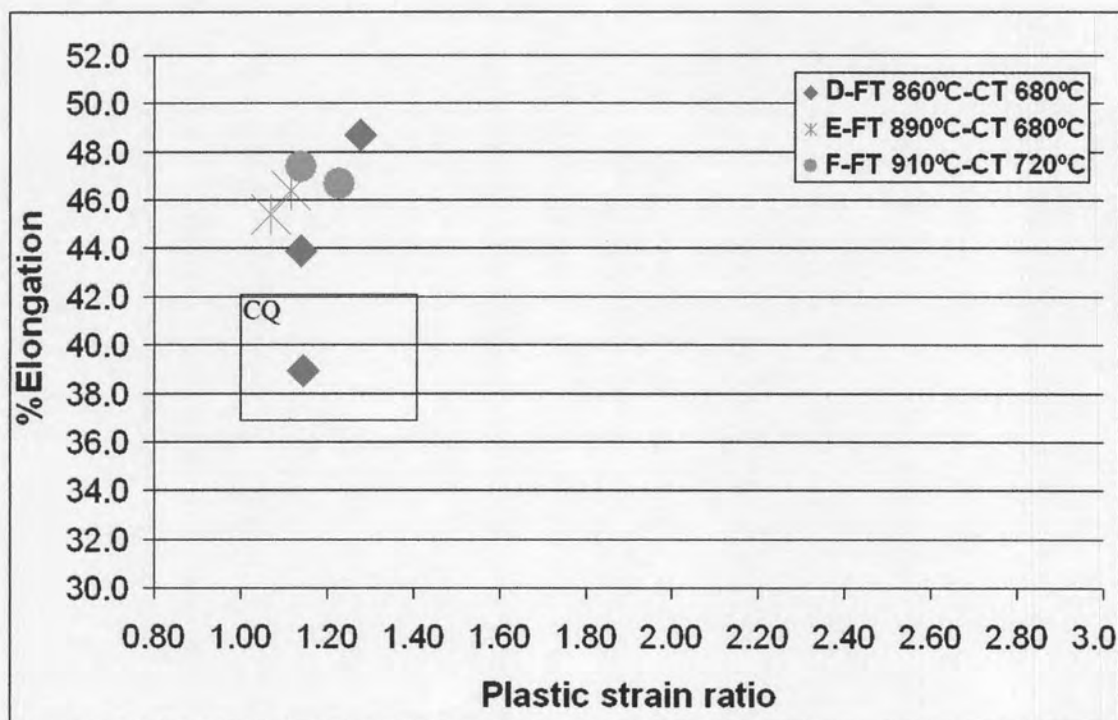
เพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นได้อย่างชัดเจนดังรูปที่ 4.5(a) ชิ้นงานจะมีขนาดเกรนเฟอร์ไรต์อยู่ระหว่าง 16-21 ไมครอน โดยขนาดเกรนเฟอร์ไรต์โตขึ้นจาก 16 ไมครอนเป็น 18 ไมครอนเมื่ออุณหภูมิรีดละเอียดสูงเป็น 890°C และโตขึ้นเป็น 21 ไมครอนเมื่ออุณหภูมิรีดละเอียดเพิ่มเป็น 910°C แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิรีดละเอียดที่เพิ่มสูงขึ้นทำให้ขนาดเกรนเฟอร์ไรต์สูงขึ้นตาม

เมื่อพิจารณาเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานพบว่าอุณหภูมิรีดละเอียดที่เพิ่มสูงขึ้นไม่แสดงผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอย่างชัดเจน โดยมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ในช่วง 44-49 เปอร์เซ็นต์ มีเพียงค่าเดียวที่ต่ำคือ 39 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 860 °C

ส่วนค่า strain-hardening exponent พบว่าทั้ง 3 กรณีมีค่า strain-hardening exponent อยู่ช่วง 0.19-0.21 และมีเพียงค่าเดียวที่ต่ำคือ 0.16 ซึ่งสอดคล้องกับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ต่ำ และเป็นชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C

เมื่อพิจารณาชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียดเท่ากันคือ 680°C แต่มีอุณหภูมิรีดละเอียดต่างกันเป็น 860 และ 890°C ตามลำดับพบว่าค่า plastic strain ratio เฉลี่ยไม่มีความเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัด โดยจะมีค่าอยู่ระหว่าง 1.1-1.3 ส่วนชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 910°C และม้วนที่อุณหภูมิ 720°C มีค่า plastic strain ratio เฉลี่ยเท่ากับ 1.2 ดังแสดงในรูป 4.5(d) ซึ่งนั่นแสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิรีดละเอียดไม่มีผลต่อค่า plastic strain ratio เฉลี่ย

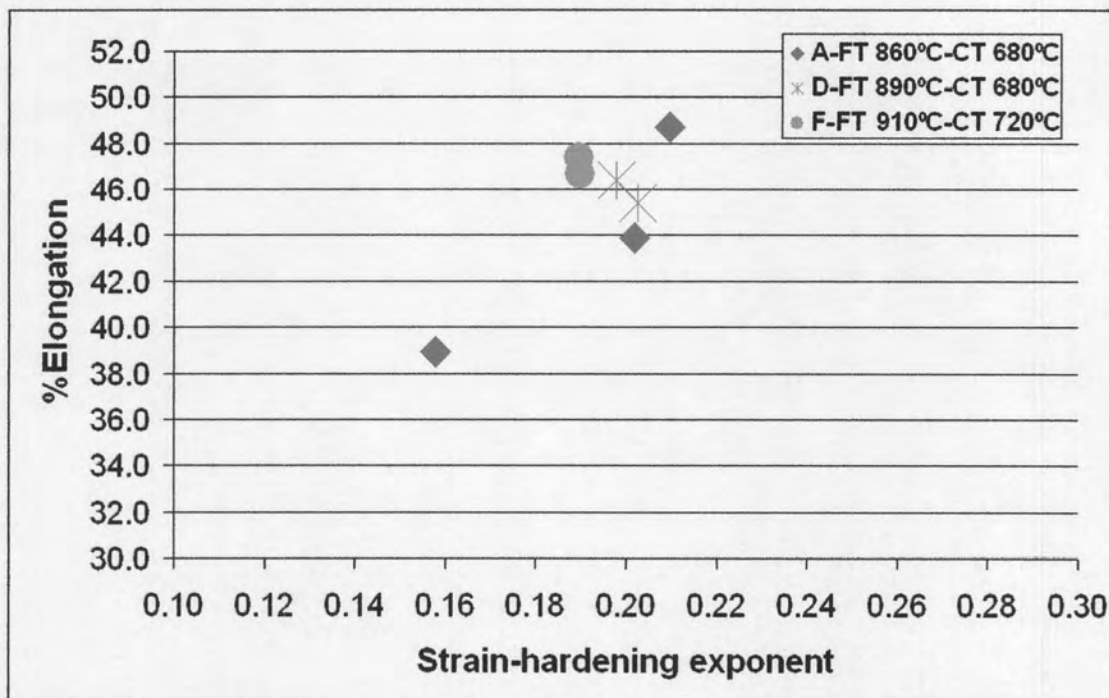
4.2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า plastic strain ratio เฉลี่ย



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิรีดละเอียดต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่า plastic strain ratio เฉลี่ยกับเปอร์เซ็นต์การยืดตัวพบว่าชิ้นงานทั้งหมดมีค่า plastic strain ratio เฉลี่ยอยู่ในช่วง 1.1-1.3 และยังคงอยู่ในช่วงคุณภาพ CQ แต่ชิ้นงานส่วนใหญ่มีค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวมากกว่าช่วงคุณภาพ CQ มีเพียงค่าเดียวเท่านั้นที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวอยู่ในช่วง CQ คือชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C มีเปอร์เซ็นต์การยืดอยู่ที่ 39 เปอร์เซ็นต์

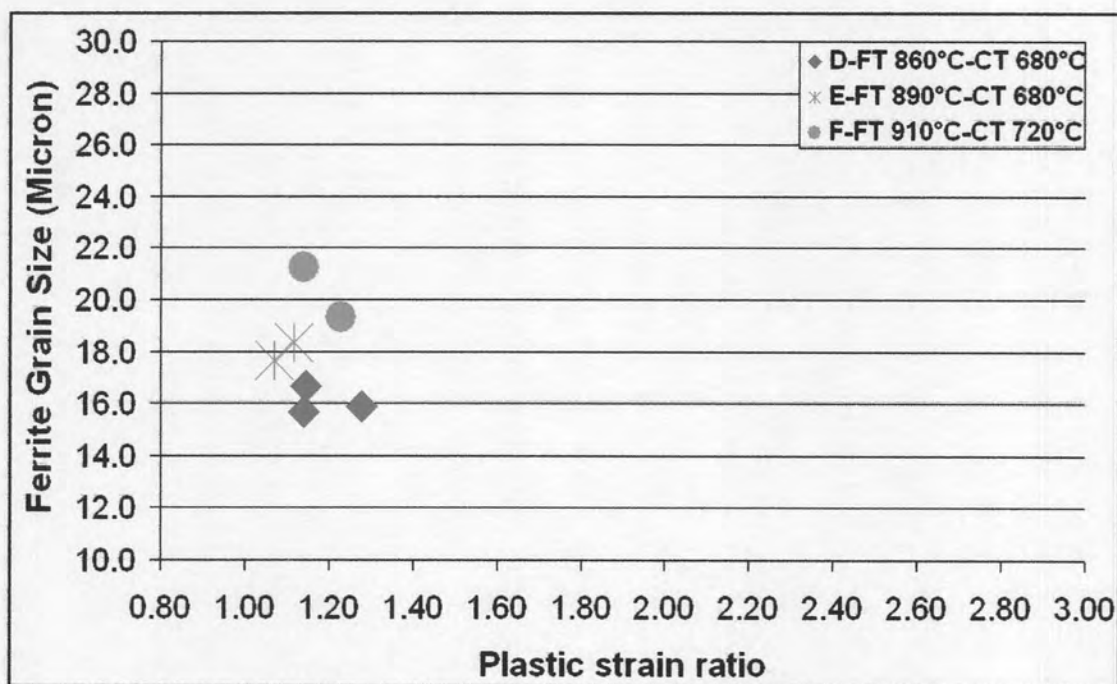
4.2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า strain-hardening exponent



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า strain-hardening exponent ของชิ้นงานที่อุณหภูมิรีดละเอียดต่างๆ

เมื่อพิจารณาค่า strain-hardening exponent กับเปอร์เซ็นต์การยืดตัว จะเห็นว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ค่า strain-hardening exponent เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลเช่นเดียวกับรูปที่ 4.3 ในกรณีที่อุณหภูมิรีดละเอียด 860°C แล้วม้วนที่อุณหภูมิ 540-680°C

4.2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio เฉลี่ย

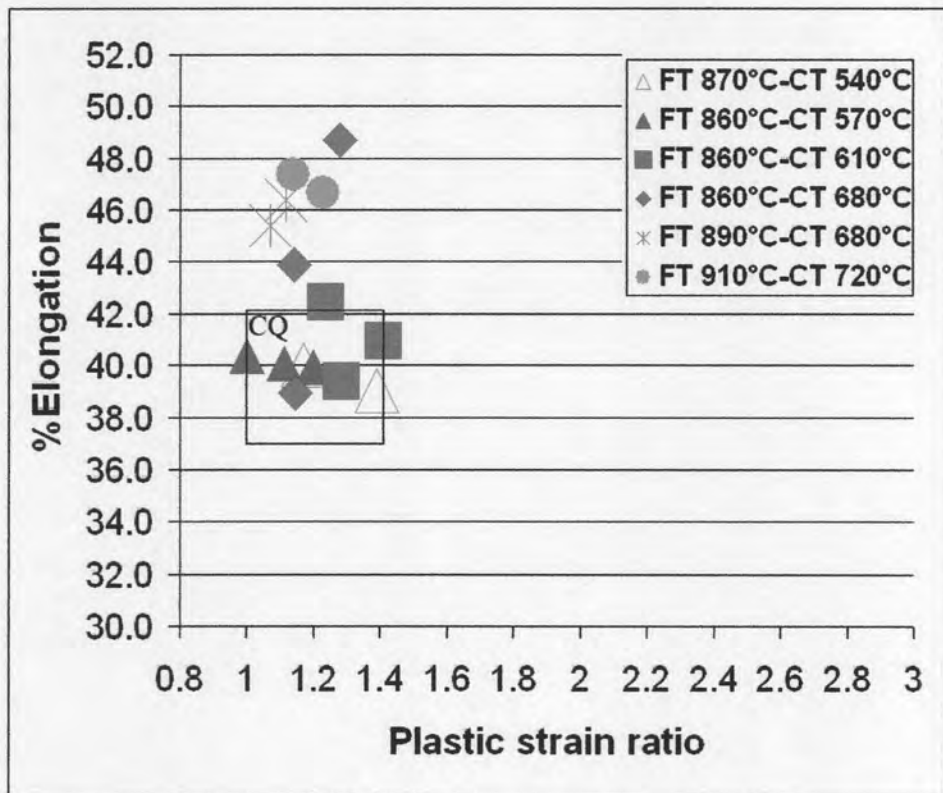


รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิรีดละเอียดต่างๆ

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่า plastic strain ratio เฉลี่ยและขนาดเกรนเฟอร์ไรต์มีค่าที่เกาะกลุ่มกันในวงแคบๆ คือมีค่า plastic strain ratio ระหว่าง 1.1-1.3 และขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ระหว่าง 16-21 ไมครอน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในกรณีที่อุณหภูมิรีดละเอียดสูงขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ก็ไม่ส่งผลต่อค่า plastic strain ratio เช่นเดียวกับกรณีที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C แล้วม้วนที่อุณหภูมิ 540-680°C

4.3 อุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดทั้งหมด

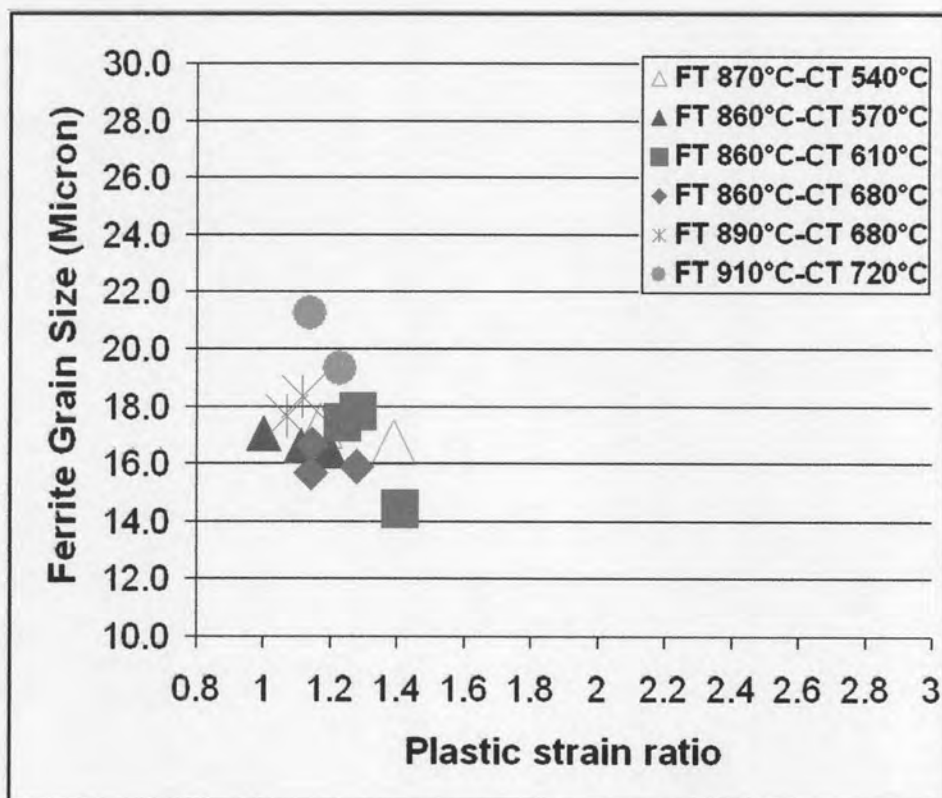
4.3.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า plastic strain ratio เฉลี่ย



รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดทั้งหมดต่างๆ

เมื่อพิจารณาภาพรวมแล้วพบว่าทั้งอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดทั้งหมดไม่ส่งผลต่อค่า plastic strain ratio เฉลี่ย แต่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดทั้งหมดดังแสดงในภาพที่ 4.9 โดยชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดทั้งหมดสูงเกือบทั้งหมดมีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวสูงกว่าช่วงคุณภาพ CQ และมีเพียงแค่ค่าเดียวเท่านั้นที่มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ต่ำและอยู่ในช่วงคุณภาพ CQ คือ ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 860°C แล้วม้วนที่อุณหภูมิ 680°C ที่ให้เปอร์เซ็นต์การยืดตัวที่ 39 เปอร์เซ็นต์

4.3.2 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio เฉลี่ย



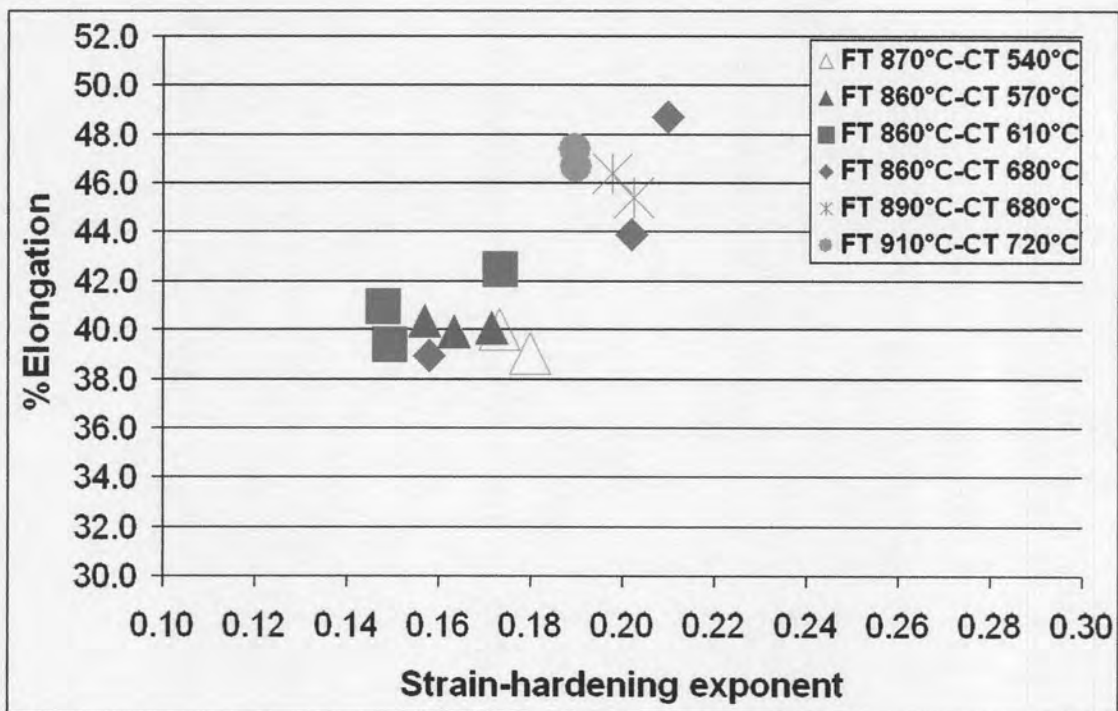
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio เฉลี่ยของชิ้นงานที่อุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิมี้วนต่างๆ

จากข้อมูลที่ได้ศึกษาผลของขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ต่อค่า plastic strain ratio ในเหล็กแผ่นรีดเย็นที่กล่าวถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ต่อ plastic strain ratio เฉลี่ยว่า ASTM No. ที่ลดลง (ขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ในหน่วยไมครอนมีขนาดเพิ่มขึ้น) จะทำให้ค่า plastic strain ratio สูงขึ้น แต่ในงานวิจัยนี้ไม่ปรากฏความสัมพันธ์ดังกล่าว ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็น 2 กรณีคือ

- 1.) อาจจะเป็นเพราะขนาดเกรนของชิ้นงานตัวอย่างมีความแตกต่างกันไม่มากพอ (ต่างกันไม่ถึงในระดับ 1 ASTM No.) ที่จะส่งผลให้ค่า plastic strain ratio เปลี่ยนแปลงได้อย่างชัดเจน

2.) อาจจะเป็นเพราะว่ากลไกการตกผลึกใหม่ (recrystallization) ของเหล็กแผ่นรีดร้อน และเหล็กแผ่นรีดเย็นมีความแตกต่างกัน โดยเหล็กแผ่นรีดร้อนจะมีกลไกการตกผลึกใหม่เป็นแบบ dynamic recrystallization ในขณะที่เหล็กแผ่นรีดเย็นมีกลไกการตกผลึกใหม่เป็นแบบ static recrystallization ซึ่งผลของการตกผลึกใหม่นี้เอง ที่มีผลต่อเนื้อกับ crystallographic texture เนื่องจากค่า plastic strain ratio เจลี่ยนั้นแปรผันตามอัตราส่วนของความเข้มระหว่าง texture (111) ต่อ texture (001) ในเหล็กแผ่นรีดเย็นนั้นสามารถควบคุมการเกิด static recrystallization เพื่อบังคับ texture (111) เกิดขึ้นมามากได้ แต่ในเหล็กแผ่นรีดร้อนการควบคุมการเกิด dynamic recrystallization ไม่สามารถทำได้ดังนั้นก็ทำให้ไม่สามารถควบคุมการเกิด texture (111) จึงไม่พบความสัมพันธ์กันระหว่างขนาดเกรนเฟอร์ไรต์กับค่า plastic strain ratio

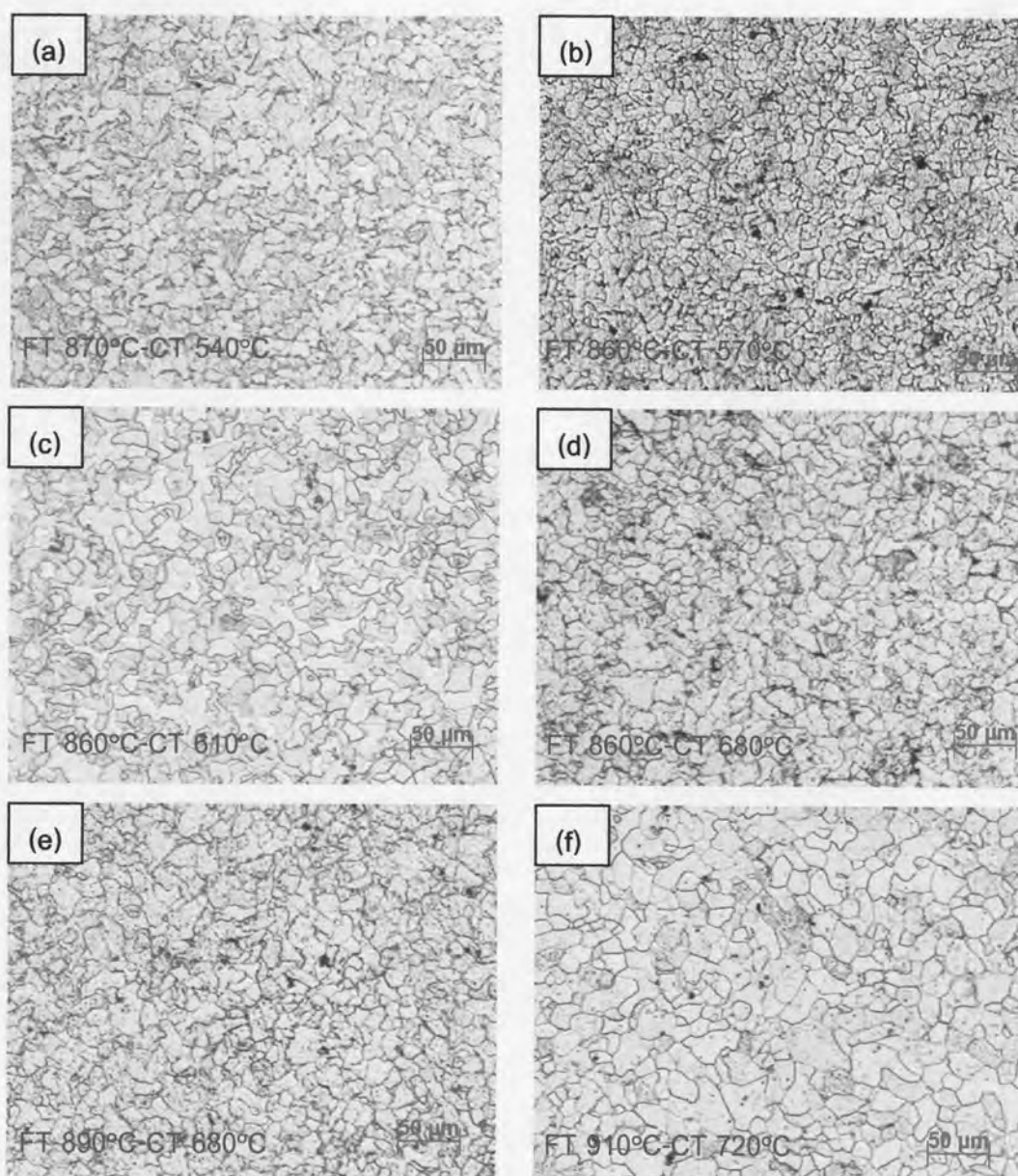
4.3.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า strain-hardening exponent



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยืดตัวกับค่า strain-hardening exponent ของชิ้นงานที่อุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.11 พบว่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดต่างกัน มีความสัมพันธ์กับค่า strain-hardening exponent ในลักษณะแปรผันตามกัน เมื่อเปอร์เซ็นต์การยืดตัวเพิ่มขึ้นค่า strain-hardening exponent จะเพิ่มขึ้นตาม โดยชิ้นงานที่เปอร์เซ็นต์การยืดตัวและค่า strain-hardening exponent สูงจะมีอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดสูงเห็นได้จากชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียด 890 และ 910°C มีเปอร์เซ็นต์การยืดตัว อยู่ช่วง 45-47 เปอร์เซ็นต์ มีค่า strain-hardening exponent อยู่ระหว่าง 0.19-0.20 จากข้อมูล สามารถระบุได้อุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิรีดที่สูงจะให้ค่า plastic strain ratio ที่สูง

4.3.4 โครงสร้างจุลภาค



รูปที่ 4.12 โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่อุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิผ่นต่างๆ

โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานตัวอย่างบางส่วนที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่า ชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิผ่นต่างๆมีโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนกันดังนี้คือ เนื้อพื้นเป็นเฟอไรต์และมีเฟิร์ลไลต์บางส่วน และลักษณะเกรนเป็นรูปร่างหลายเหลี่ยม (equi-axed) ส่วนที่ต่างกันของชิ้นงานแต่ชิ้นคือ ขนาดเกรนเฟอไรต์ชิ้นงานซึ่งมีขนาดแตกต่างกัน ชิ้นงานที่ขนาดเกรนเล็กที่สุดในรูปที่ 4.12 คือรูปที่ 4.12(b) มีขนาดเกรนเท่ากับ 16.4 ไมครอนและชิ้นงานที่

มีขนาดเกรนโตที่สุดในรูปที่ 4.12 คือรูปที่ 4.12(f) มีขนาดเกรนเท่ากับ 21.2 ไมครอน เมื่อพิจารณา
ชิ้นงาน 4.12(b) คือชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียดและอุณหภูมิหมุนเวียนต่ำที่สุดคือ มีอุณหภูมิรีด
ละเอียด 860°C แล้วหมุนที่อุณหภูมิ 570°C ชิ้นงาน 4.12(f) คือชิ้นงานที่มีอุณหภูมิรีดละเอียดและ
อุณหภูมิหมุนเวียนสูงที่สุดคือมีอุณหภูมิรีดละเอียด 910°C แล้วหมุนที่อุณหภูมิ 720°C เนื่องจากชิ้นงาน
มีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เหมือนต่างกันแค่ขนาดทำให้พิจารณาความสัมพันธ์ได้เพียงแค่
พิจารณาความสัมพันธ์เกี่ยวกับขนาดเกรนเฟอร์ไรต์ได้เท่านั้น ซึ่งได้พิจารณาไปแล้วในหัวข้อก่อน
หน้า