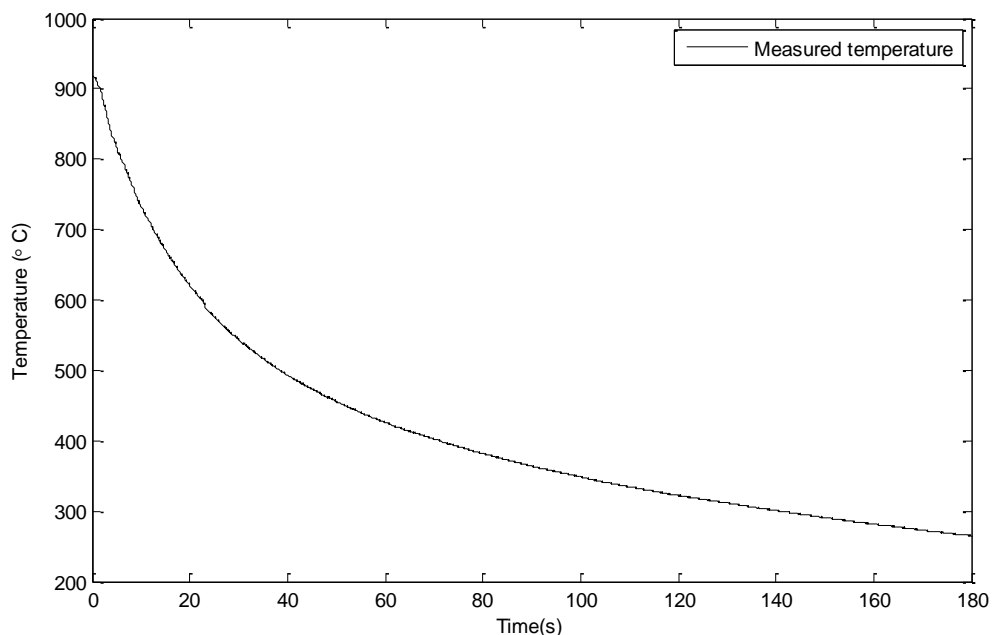


## บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงวิธีการทดลอง และผลการทดลอง การทดลองประกอบด้วย 4 ส่วน คือ การทดสอบโครงสร้างจุลภาคสแตนเลส SUS321, การทดลองหาวิธีการประมาณอุณหภูมิการเย็นตัวของรอยเชื่อม, การทดลองระบบหาค่าพารามิเตอร์  $n$  แบบอัตโนมัติ และการทดลองระบบหาการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติ

### 4.1 ผลการทดลองหาวิธีการประมาณอุณหภูมิการเย็นตัวของรอยเชื่อม

ในการทดลองนี้จะทำการทดสอบวิธีการประมาณอุณหภูมิการเย็นตัวที่ใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิง ( $T$ ) ของเทคนิค SS-DTA เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำมาใช้ร่วมกับการหาการเปลี่ยนเฟสโดยอัตโนมัติ โดยเราใช้ข้อมูลการเย็นตัวของการเชื่อมเชื่อมสแตนเลส SUS 321 ที่ผ่านการทดสอบโครงสร้างจุลภาคแล้วว่ามี การเปลี่ยนเฟสเป็นตัวทดสอบ แสดงในรูปที่ 4.1



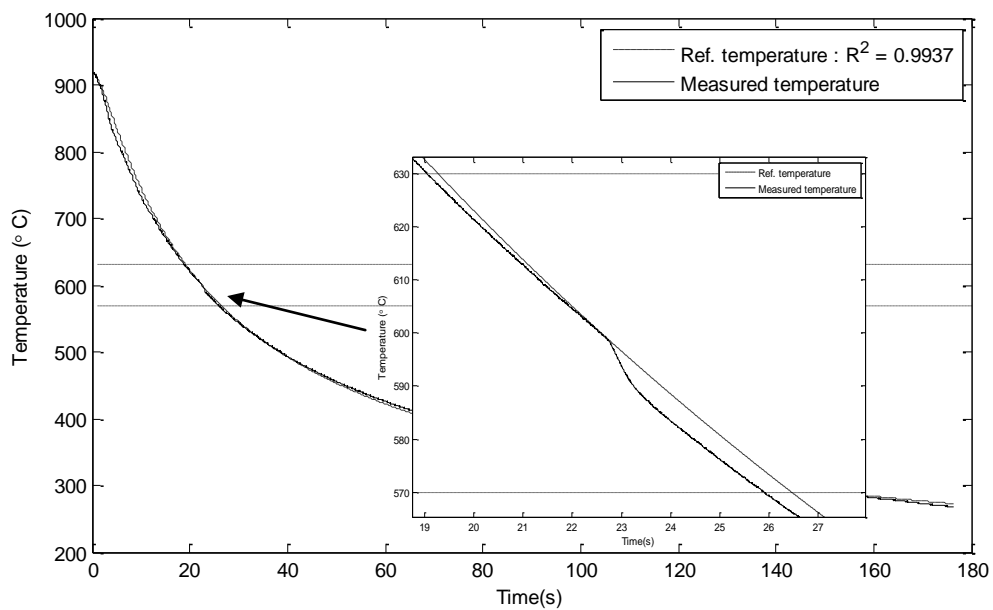
รูปที่ 4.1 ข้อมูลการเย็นตัวของการเชื่อมเชื่อมสแตนเลส SUS 321

#### 4.1.1 การประมาณค่าอุณหภูมิอ้างอิงด้วยสมการวัฏจักรความร้อน (Thermal Cycle Equations)

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) การสร้างอุณหภูมิอ้างอิงด้วยสมการวัฏจักรความร้อนมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามตารางที่ 4.1 สำหรับการวัดการซ้อนทับของข้อมูลเราใช้ R-Squared ( $R^2$ ) ค่านี้คือตัวสถิติที่ใช้วัดว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ได้นี้มีความสมรूपกับข้อมูลมากน้อยอย่างไร ระหว่างข้อมูลการเย็นตัวที่ได้จากการวัด กับข้อมูลการเย็นตัวที่สร้างขึ้น ค่าที่ได้จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งค่าที่เข้าใกล้ 0 มีความหมายว่าไม่มีหรือมีการซ้อนทับของข้อมูลน้อย และค่าที่เข้าใกล้ 1 มีความหมายว่ามีการซ้อนทับของข้อมูลมาก

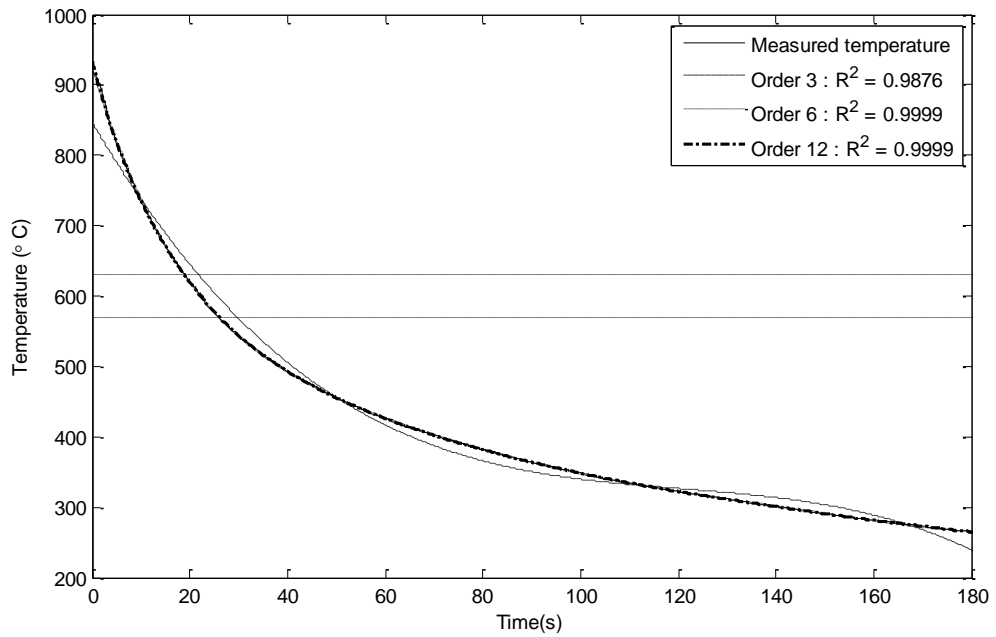
ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้สร้างอุณหภูมิอ้างอิง (สมการที่ (3.1) และ(3.2))

ชื่อพารามิเตอร์	ค่าพารามิเตอร์
Peak temperature (°C)	918.42
Initial temperature (°C)	35
$\Delta t$ (ช่วงเวลาการเย็นตัวระหว่าง 800 – 500 °C) (วินาที)	30.7175
ค่าสัมประสิทธิ์ $k$	1.9985

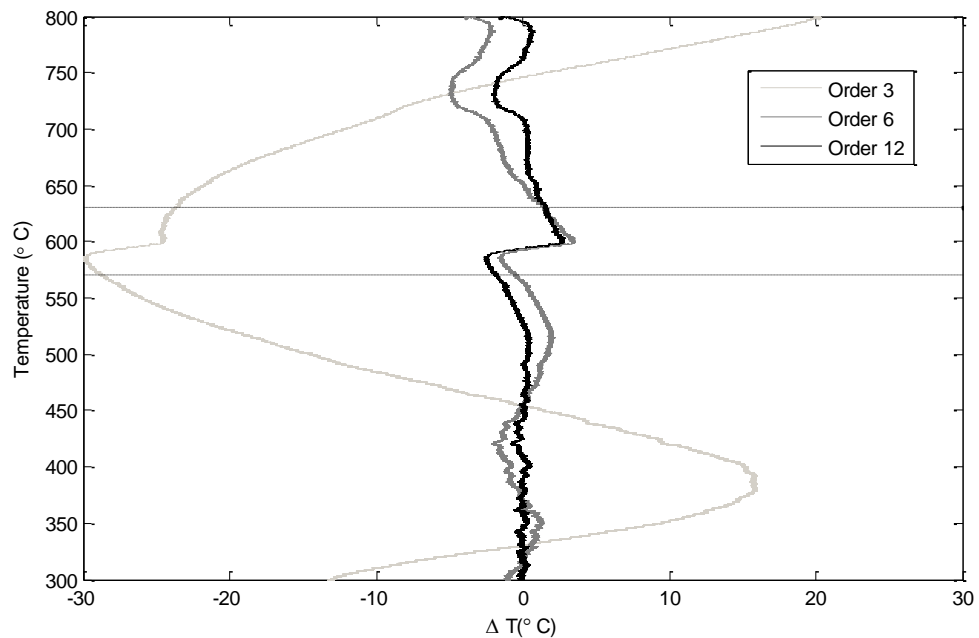


รูปที่ 4.2 อุณหภูมิการเย็นที่ได้จากการวัดเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงที่สร้างด้วยวิธีสมการวัฏจักรความร้อนและภาพขยาย โดยมีค่า  $R^2 = 0.9937$





รูปที่ 4.4 อุณหภูมิการเย็นที่ได้จากการวัดเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงที่สร้างด้วยวิธี polynomial function ที่ order 3, 6, และ 12



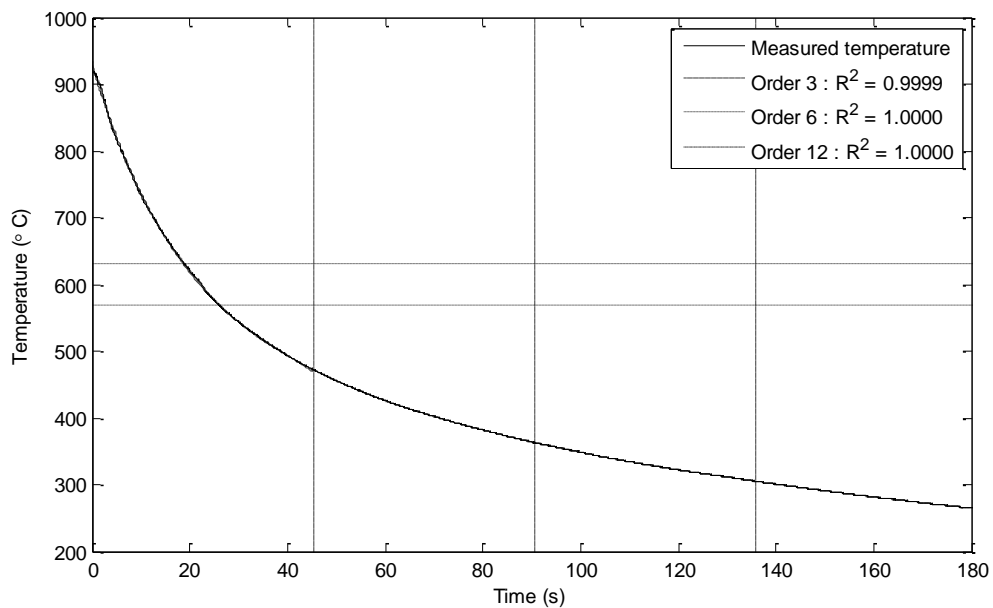
รูปที่ 4.5 ผลที่ได้จากการทำ SS-DTA โดยใช้อุณหภูมิอ้างอิงที่สร้างจากด้วยวิธี วิธี polynomial function ที่ order 3, 6, และ 12

จากตารางที่ 4.2 ค่า order ที่เราเลือกมาทดสอบได้แก่ 3, 6, และ 12 เพื่อเปรียบเทียบค่าในช่วงใดทำให้ได้ อุณหภูมิอ้างอิงซ้อนทับอุณหภูมิจริงได้มากที่สุด และเห็นการเปลี่ยนเฟสได้ชัดเจนที่สุด ในรูปที่ 4.4 จะ

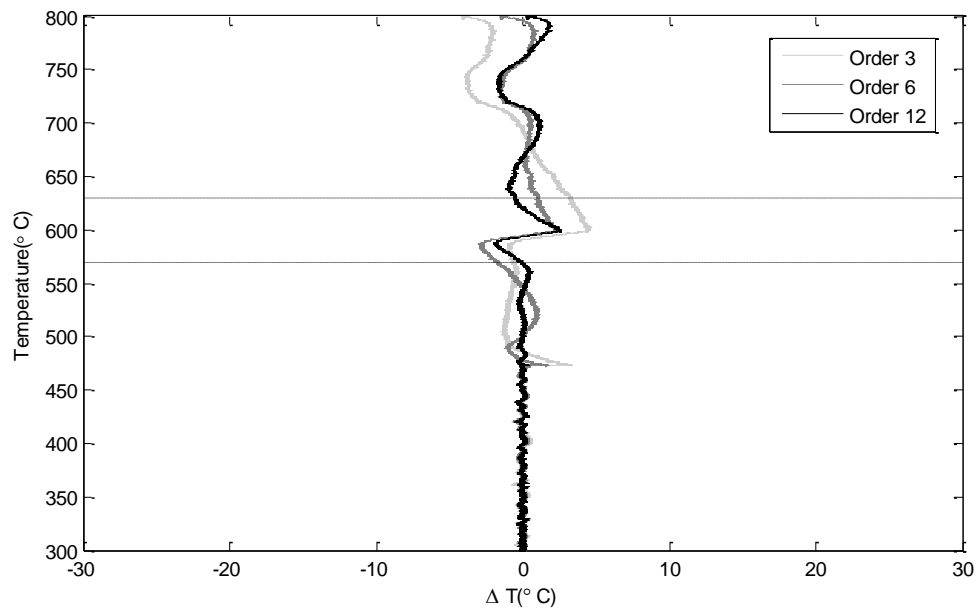
เห็นได้ว่า order 6 และ 12 สามารถซ้อนทับอุณหภูมิจริงได้ชัดเจนกว่า order 3 ซึ่งสอดคล้องกับค่า R-Squared และแสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดในกระบวนการการเปลี่ยนเฟสเกิดได้ชัดเจนพอที่จะสามารถวิเคราะห์ได้ด้วยตาเปล่า แสดงในรูปที่ 4.5

#### 4.1.3 การประมาณค่าอุณหภูมิอ้างอิงด้วย 4 –segment Piecewise Nonlinear Approximation

การสร้างอุณหภูมิอ้างอิงด้วย 4 –segment piecewise nonlinear approximation เป็นการแบ่งช่วงข้อมูลการเย็นตัวออกเป็น 4 ช่วงเท่า ๆ กัน และใช้ polynomial function order 3, 6, และ 12 ในการสร้างอุณหภูมิอ้างอิง แต่วิธีการนี้จะได้ค่า R-Squared สูงกว่าใน order ที่เท่ากัน ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.6 และผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากการทำ SS-DTA จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เกิดในกระบวนการการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นอยู่ในช่วงอุณหภูมิประมาณ 570 – 630 °C ได้ชัดเจนกว่าวิธี polynomial function ได้ด้วยตาเปล่าที่ order เท่ากัน



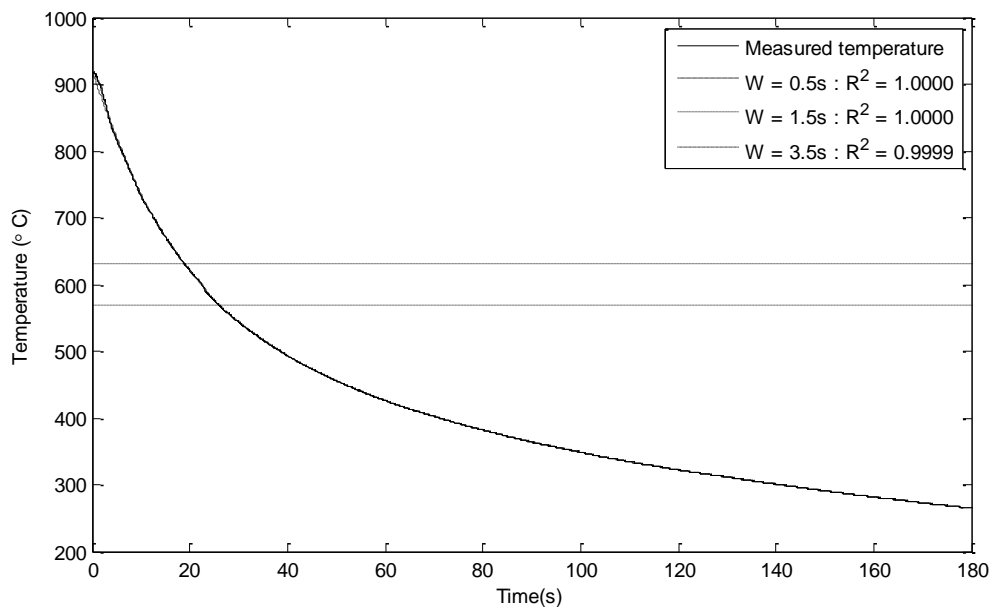
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิการเย็นที่ได้จากการวัดเทียบกับอุณหภูมิอ้างอิงที่สร้างด้วยวิธี 4 –segment piecewise nonlinear approximation ที่ order 3, 6, และ 12



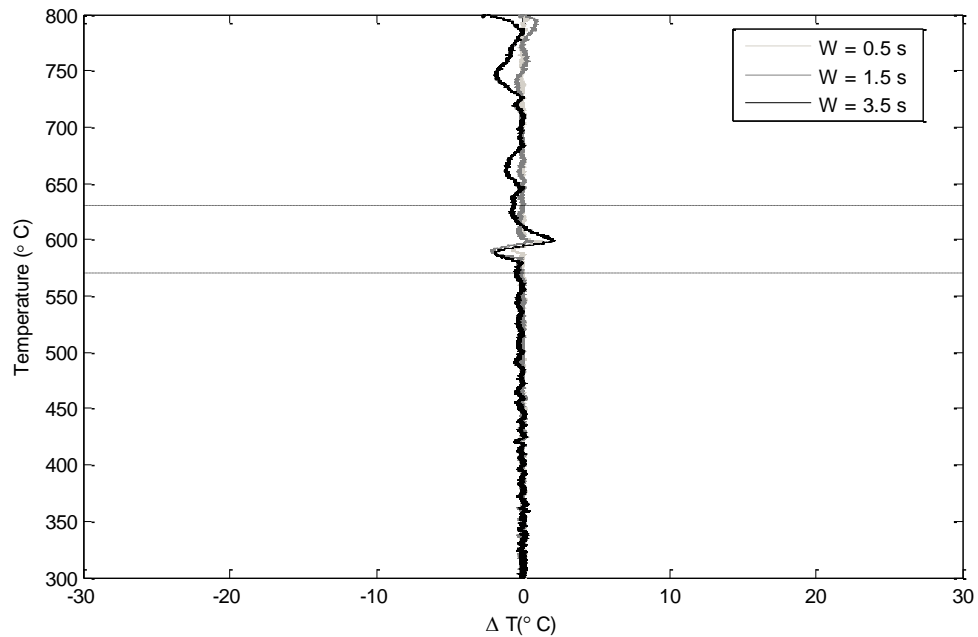
รูปที่ 4.7 ผลที่ได้จากการทำ SS-DTA โดยใช้อนุกรมอँगอิงที่สร้างจากด้วยวิธี 4-segment piecewise nonlinear approximation ที่ order 3, 6, และ 12

#### 4.1.4 การประมาณค่าอนุกรมด้วย Piecewise Linear Approximation

วิธีการประมาณค่าอนุกรมการเย็นของโลหะด้วยวิธีการประมาณเชิงเส้นแบบช่วง (piecewise linear approximation) โดยการสร้างอนุกรมอँगอิงด้วยวิธีการดึงค่าข้อมูลจากข้อมูลจริง โดยที่ segment width มีค่าเท่ากับ 0.5, 1.5, และ 3.5 วินาที ตามสมการที่ (3.6) ถึง (3.9)



รูปที่ 4.8 อนุกรมการเย็นที่ได้จากการวัดเทียบกับอนุกรมอँगอิงที่สร้างด้วยวิธี piecewise linear approximation ที่  $W$  มีค่าเท่ากับ 0.5, 1.5, และ 3.5 วินาที



รูปที่ 4.9 ผลที่ได้จากการทำ SS-DTA โดยใช้อุณหภูมิอ้างอิงที่สร้างจากด้วยวิธี piecewise linear approximation ที่  $W$  มีค่าเท่ากับ 0.5, 1.5, และ 3.5 วินาที

จากรูปที่ 4.8 การซ้อนทับกันระหว่างอุณหภูมิอ้างอิงกับอุณหภูมิจริงจะมากขึ้นเมื่อ segment width เข้าใกล้ศูนย์ แต่ค่าความกว้างของผลต่างอุณหภูมิจะลดแสดงในรูป 4.9 เพื่อหาว่าวิธีใดให้ความแตกต่างระหว่างช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟสกับช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนเฟสได้ชัดเจนที่สุด เราจึงสร้างตัววัดคุณสมบัติดังกล่าว เรียกว่า distinguishability ซึ่งพิจารณาเทียบเป็นอัตราส่วนระหว่าง  $\Delta T_C / \Delta T_U$  โดยที่  $\Delta T_C$  คือค่าผลต่างอุณหภูมิจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด ในช่วงอุณหภูมิที่มีการเปลี่ยนเฟส และ  $\Delta T_U$  คือค่าผลต่างอุณหภูมิจากจุดสูงสุดถึงจุดต่ำสุด นอกช่วงการเปลี่ยนเฟส ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3 ในการทดลองนี้จะพบว่า วิธีสมการวัฏจักรความร้อนมีการซ้อนทับกันระหว่างอุณหภูมิการเย็นตัวกับอุณหภูมิอ้างอิงน้อยกว่าวิธีอื่น ซึ่งดูได้จากค่า  $R^2$  ทำผลต่างอุณหภูมิเกิดการเบี่ยงเบนไปด้านข้างอย่างมาก แสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งส่งผลต่อผลการพิจารณาว่ามีเฟสเกิดขึ้นหรือไม่ อีกทั้งวิธีการนี้เราจำเป็นต้องรู้ค่าพารามิเตอร์ที่นำมาใช้ในการคำนวณอุณหภูมิอ้างอิง จึงไม่เหมาะที่จะมาใช้ สำหรับการประมาณค่าอุณหภูมิด้วย polynomial approximation กับวิธี 4-segment piecewise nonlinear approximation ทั้งสองวิธีมีพื้นฐานในการคำนวณที่เหมือนกัน แต่วิธี 4-segment piecewise nonlinear approximation ให้ค่า  $R^2$  ได้สูงกว่าที่ order เท่ากัน และวิธีสุดท้ายคือการประมาณค่าอุณหภูมิด้วย piecewise linear approximation เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถสร้างอุณหภูมิอ้างอิงได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเย็นตัว ดูได้จากค่า  $R^2$  ที่เท่ากับ 1 และ distinguishability มีค่าสูงสุด วิธีการนี้จึงเหมาะสมที่จะนำไปใช้กับระบบการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติ

ตารางที่ 4.3 ตารางค่า distinguishability

Method	Distinguishability
Thermal cycle equation	0.2345
Polynomial degree 3	0.1289
Polynomial degree 6	0.7291
Polynomial degree 12	1.4579
4-segment degree 3	0.7631
4-segment degree 6	1.4835
4-segment degree 12	1.2401
Piecewise linear (W = 0.5s)	2.5099
Piecewise linear (W = 1.5s)	1.7016
Piecewise linear (W = 3.5s)	1.2230

## 4.2 ผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาค

การทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อทำการยืนยันผลที่ได้จากการตรวจสอบด้วยเทคนิค SS-DTA วัสดุที่ถูกนำมาใช้ในการทดสอบคือ สแตนเลส เกรด SUS321 ซึ่งวัสดุที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรม โดยเรานำโลหะที่ทำการเชื่อมแล้วมาทำการตรวจสอบโครงสร้างการเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งมีขั้นตอนในการเตรียมชิ้นงานสแตนเลส SUS321 ดังนี้

- i) ทำการตัดโลหะ stainless steel SUS 321 ให้ได้ขนาดประมาณ  $0.5 \times 1.5$  cm เพื่อให้ได้ขนาดที่เหมาะสมไปส่องกล้องจุลทรรศน์ดูโครงสร้างของโลหะ โดยเราเลือกตำแหน่งแนวตัดขวางของรอยเชื่อมและเทอร์โมคัปเปิล
- ii) นำโลหะที่ตัดแล้วไปหล่อขึ้นรูปกับพอลิเมอร์ให้เป็นรูปทรงกระบอก ซึ่งจะได้ดังรูปที่ 4.10



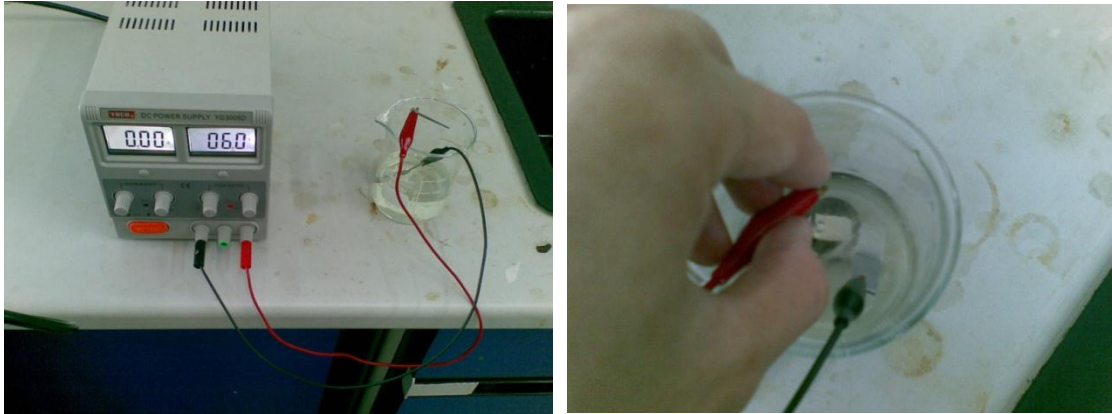
รูปที่ 4.10 ชิ้นงานที่นำไปหล่อขึ้นรูปกับพอลิเมอร์

iii) นำโลหะที่ถูกขึ้นรูปไปขัดผิวหน้าให้เรียบเงาเป็นมัน โดยกระดาษทรายเบอร์ 100, 200, 400, 800, และ 1000 ก่อนตามด้วยโพลิชซึ่งเพื่อลบรอยต่างๆ ที่ผิวหน้าโลหะ ดังรูปที่ 4.11



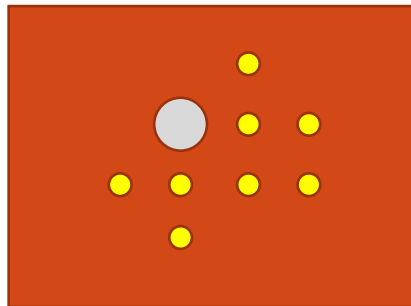
รูปที่ 4.11 เครื่องขัดผิวหน้าโลหะ

iv) นำโลหะที่ขัดผิวหน้าจนเรียบและได้ระดับแล้วนำไปจุ่มกรด oxalic acid 10% (บวกจิมที่ชิ้นงาน ลบไว้ที่แผ่นที่จุ่มกรด) และปล่อยกระแสไฟฟ้าประมาณ 6 โวลต์ โดยให้จุ่มไว้ประมาณ 40 วินาที เพื่อให้เห็นโครงสร้างของโลหะชัดเจน ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การกัดผิวหน้าโลหะด้วยกรด Oxalic acid

v) นำโลหะที่ได้แล้วไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงหรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เพื่อดูลักษณะโครงสร้างจุลภาค เพื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับเทคนิค SS-DTA ต่อไป สำหรับผลการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของสแตนเลส SUS321 แสดงตารางที่ 4.4 กับ 4.5 และตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแสดงในรูปที่ 4.13 และ 4.14

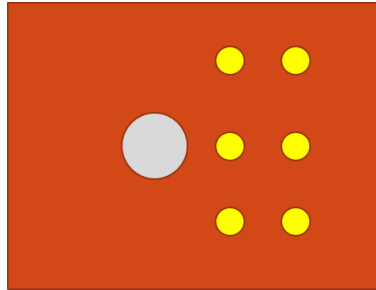


รูปที่ 4.13 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแบบ 8 จุด

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบ โครงสร้างจุลภาคแบบ 8 จุด

ชั้นที่	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8
1	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด
2	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	-	-	ไม่เกิด
3	-	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	เกิด $Cr_{23}C_6$	-

หมายเหตุ “-” ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลหลุดจากจุดวัดอุณหภูมิ



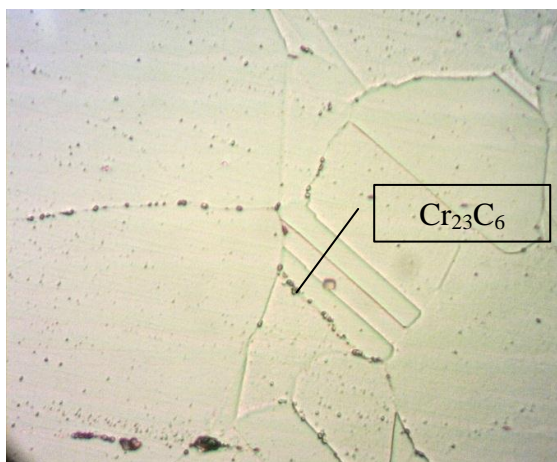
รูปที่ 4.14 แสดงตำแหน่งการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลแบบ 6 จุด

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบ โครงสร้างจุลภาคแบบ 6 จุด

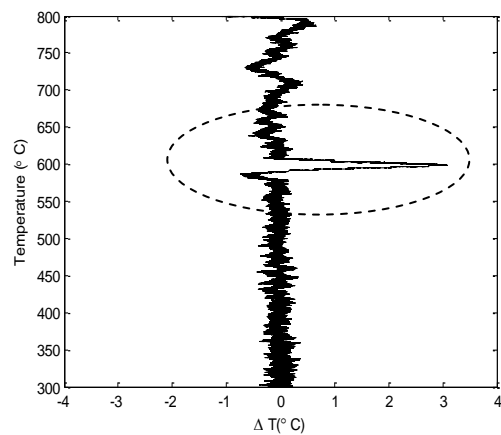
ชั้นที่	Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	Ch 5	Ch 6
4	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด
5	-	ไม่เกิด	-	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด
6	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด	ไม่เกิด

หมายเหตุ “-” ไม่สามารถวัดอุณหภูมิได้เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลหลุดจากจุดวัดอุณหภูมิ

จากผลที่ได้จากการทดสอบโครงสร้างจุลภาคของ stainless steel SUS 321 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟส 34 ข้อมูล และมีการเปลี่ยนแปลงเฟส 1 ข้อมูล stainless steel SUS 321 ในการทดลองพบว่าเกิด  $Cr_{23}C_6$  ในตำแหน่ง channel ที่ 7 โดยภาพโครงสร้างจุลภาคถูกถ่ายกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เปรียบเทียบกับเทคนิค SS-DTA ที่ใช้วิธีการสร้างอุณหภูมิอ้างอิงแบบ Piecewise linear (0057 = 1.5 s) กับอุณหภูมิการเย็นตัวหลังการเชื่อมของ channel ที่ 7 แสดงในรูปที่ 4.15



(ก)

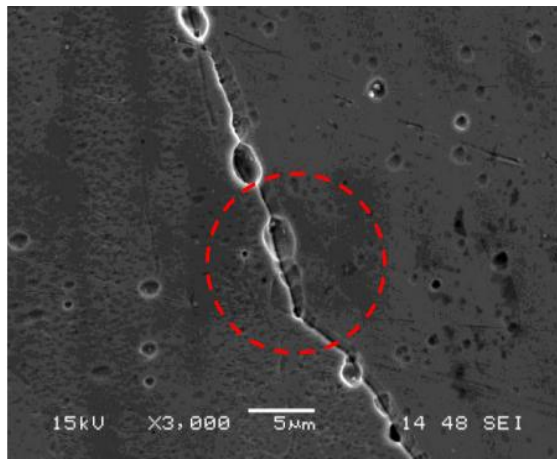


(ข)

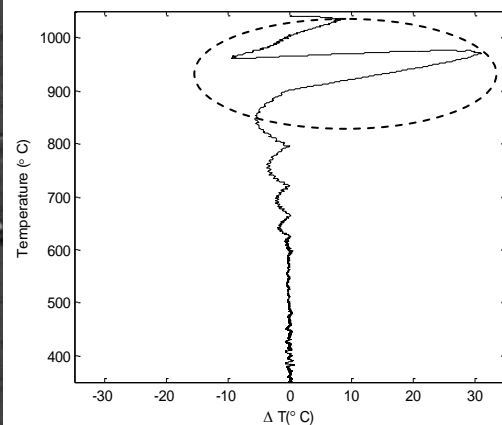
รูปที่ 4.15 (ก) โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ stainless steel SUS 321 เทียบกับ (ข) ผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากการทำ SS-DTA

ในการทดลองระบบตรวจหาการเปลี่ยนเฟสอัตโนมัติ ได้นำข้อมูลงานวิจัยที่เคยนำเสนอ เป็นงานวิจัยที่ใช้เทคนิค SS-DTA กับการศึกษาการเปลี่ยนเฟสในงานเชื่อมกับวัสดุต่างๆ 5 ข้อมูลได้แก่ stainless steel SUS 321 [14], alloy 617 [15], zinc alloy [16], ERCoCr-A ผสมกับ ER30 [17], และ Incoloy 800H [18] ทำให้มีข้อมูลของวัสดุที่มีการเปลี่ยนเฟสรวมเป็น 6 ข้อมูล โดยมีรายละเอียดดังนี้

- stainless steel SUS 321[14] เป็นข้อมูลจากงานวิจัยเรื่อง “During Welding Investigation of Phase Transformations of Weld Metal by Using Single Sensor Differential Thermal Analysis (SS-DTA)” โดยศึกษาการเปลี่ยนเฟสด้วยการใช้เทคนิค SS-DTA กับวัสดุสแตนเลสเกรด SUS321 ที่ถูกเชื่อมด้วยวิธี GTAW และยืนยันผลด้วย SEM และ EDS โดยพบว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น TiC ในจุดที่ทำการวัดที่อยู่ในบริเวณ HAZ ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.16



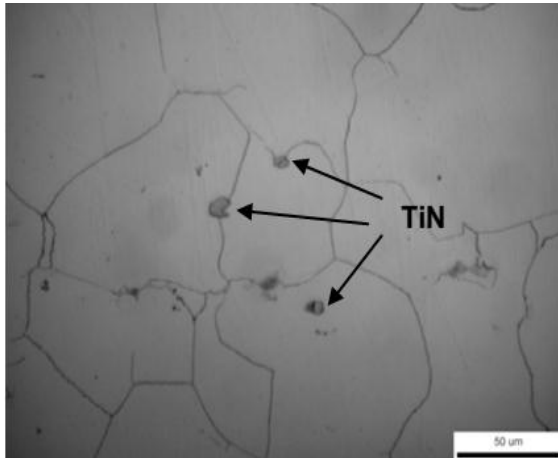
(ก)



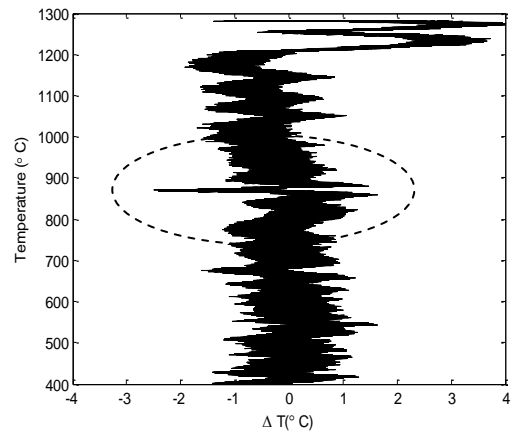
(ข)

รูปที่ 4.16 (ก) โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ stainless steel SUS 321จากการทำ SEM และ(ข)ผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากการทำ SS-DTA [14]

- alloy 617 [15] เป็นข้อมูลจากงานวิจัยเรื่อง “A study of Precipitation in Alloy 617 HAZ Weldment” ศึกษาการเปลี่ยนเฟสด้วยการใช้เทคนิค SS-DTA กับวัสดุ Alloy 617 ในบริเวณ HAZ ที่ถูกเชื่อมด้วยวิธี GTAW และยืนยันผลด้วย SEM และ EDS โดยพบว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสเป็น TiN (Titanium Nitride) ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.17

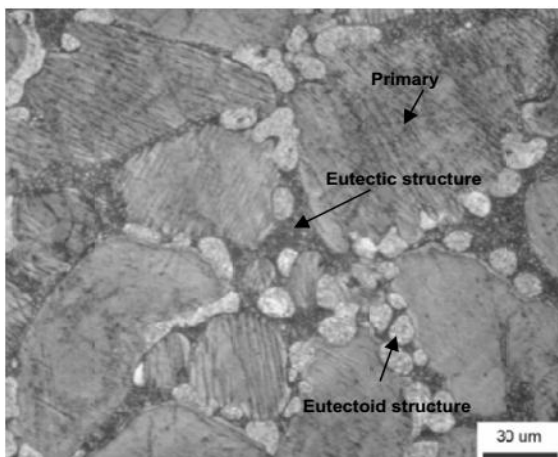


(ก)

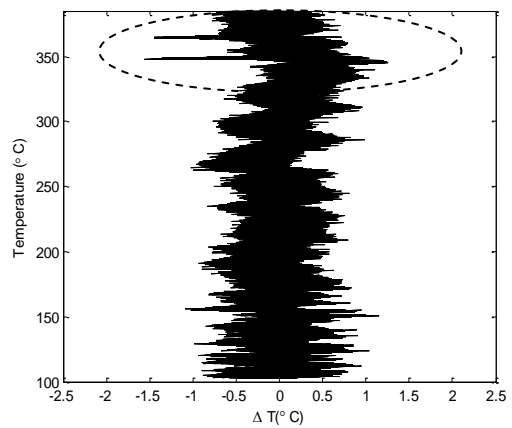


รูปที่ 4.17 (ก) โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ Alloy 617จากการทำ SEM และ(ข)ผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากการทำ SS-DTA [15]

- zinc alloy [16] เป็นข้อมูลจากงานวิจัยเรื่อง “A study of phase transformations in zinc alloys by a single sensor differential thermal analysis (SS-DTA) technique” ศึกษาการเปลี่ยนเฟสด้วยการใช้เทคนิค SS-DTA กับวัสดุสังกะสีผสมที่มีส่วนผสมของ Zn-4.0Al-3.1Cu-0.5Mg ด้วยการเชื่อมแก๊สสามารถตรวจพบโครงสร้างมีลักษณะเป็นเดนไดรต์กับโครงสร้างยูเทคติกและโครงสร้างยูเทคตอยด์ขนาดเล็กแทรกอยู่ระหว่างช่องเดนไดรต์ เฟสที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับแผนภาพเฟสสมดุลของสังกะสี-อะลูมิเนียม และยืนยันผลโครงสร้างจุลภาคของสังกะสีผสมจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)แสดงในรูปที่ 4.18



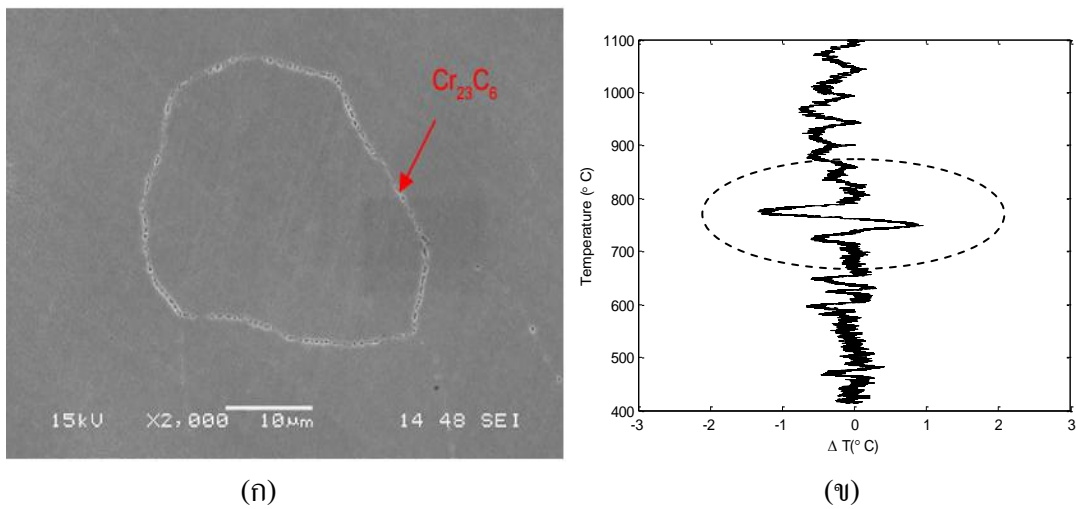
(ก)



(ข)

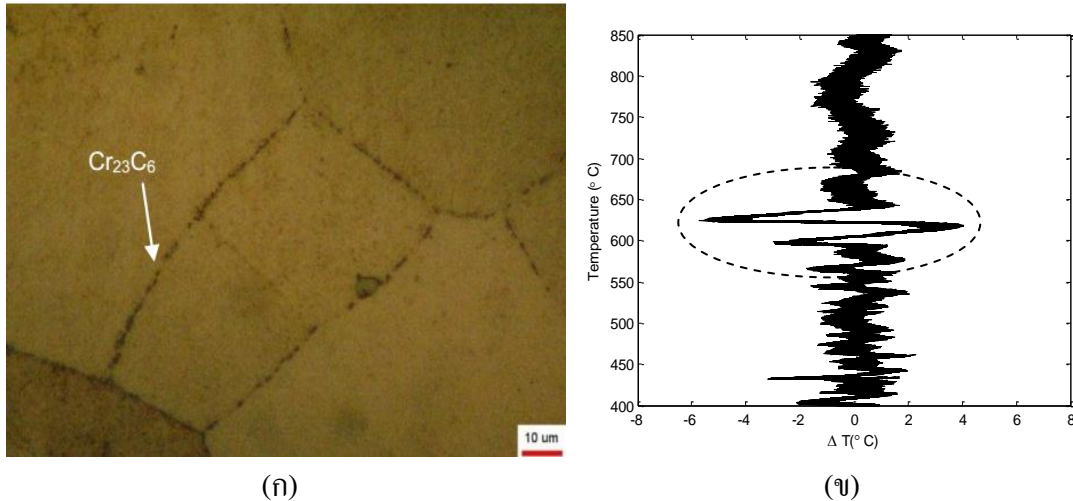
รูปที่ 4.18 (ก) โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ zinc จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และ(ข)ผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากการทำ SS-DTA [16]

- ERCoCr-A ผสมกับ ER30 [17] เป็นข้อมูลจากงานวิจัยเรื่อง “Effect of Dilution Ratio on Phase Transformation of ERCoCr-A and ER309 Deposit Weld Metal” การศึกษาผลกระทบของอัตราส่วนการเจือจางต่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของชิ้นงานในระหว่างการเชื่อมด้วยวิธีเชื่อม โดยชิ้นงานที่ทำการทดลองจะจำลองอัตราส่วนการเจือจางระหว่างลวดเชื่อม ERCoCr-A (Stellite 6) กับ ER309 ในอัตราการเจือจางที่แตกต่าง โดยข้อมูลที่นำมาใช้เป็นการผสมลวดเชื่อม ERCoCr-A (Stellite 6) กับ ER309 ในอัตรา 60:40 และตรวจหาการเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยเทคนิค SS-DTA, EDS, และ SEM พบว่าเกิด  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  ขึ้นในชิ้นงานเชื่อมทดสอบ โดยใช้การเชื่อมแบบ GTAW โครงสร้างจุลภาคและผลต่างอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 (ก) โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ ERCoCr-A ผสมกับ ER30 จากการทำให้ SEM และ(ข)ผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากการทำให้ SS-DTA [17]

- Incoloy 800H [18] เป็นข้อมูลจากงานวิจัยเรื่อง “Phase Transformation Monitoring of Incoloy 800H GTAW Spot Weldment” ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเฟสด้วยการใช้เทคนิค SS-DTA กับวัสดุ Incoloy 800H ที่ถูกเชื่อมด้วยวิธี GTAW และยืนยันผลด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยพบว่าการเปลี่ยนแปลงเฟสเป็น  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  ซึ่งแสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 (ก) โครงสร้างจุลภาคของวัสดุ Incoloy 800H จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และ(ข) ผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากการทำ SS-DTA [18]

### 4.3 ผลการทดลองระบบปรับค่า segment width แบบอัตโนมัติ

การประมาณค่าอุณหภูมิด้วย piecewise linear approximation เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถสร้างอุณหภูมิอ้างอิงได้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิการเย็นตัว จากค่า  $R^2$  ที่เท่ากับ 1 และ distinguishability มีค่าสูงสุด แสดงในตารางที่ 4.3 วิธีการนี้จึงถูกเลือกใช้ร่วมกับ SS-DTA และระบบหาการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติ เพื่อให้ผลต่างอุณหภูมิที่แสดงถึงการเปลี่ยนเฟสแสดงออกมาได้ชัดเจนที่สุดก่อนนำข้อมูลไปวิเคราะห์ด้วยระบบหาการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติ การปรับค่า segment width ( $W$ ) ที่เหมาะสมเป็นส่วนสำคัญอย่างยิ่ง แต่โดยทั่วไปการปรับค่า  $W = 1.5$  วินาที [19] ซึ่งไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่า  $W$  ที่เหมาะสมจะทำให้ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสแสดงออกมาได้ชัดเจน ช่วยลดความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อวิเคราะห์ผลด้วยตาเปล่า แสดงในรูปที่ 4.9 ดังนั้นการปรับค่า  $W$  แบบอัตโนมัติ จะเป็นระบบที่จะช่วยเลือกค่า  $W$  ที่ทำให้ช่วงอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสแสดงออกมาได้ชัดเจน ซึ่งจะเลือกค่า  $W$  ในช่วง 1.25 -1.75 วินาที และมีขั้นตอนการทำงาน [19] ดังนี้

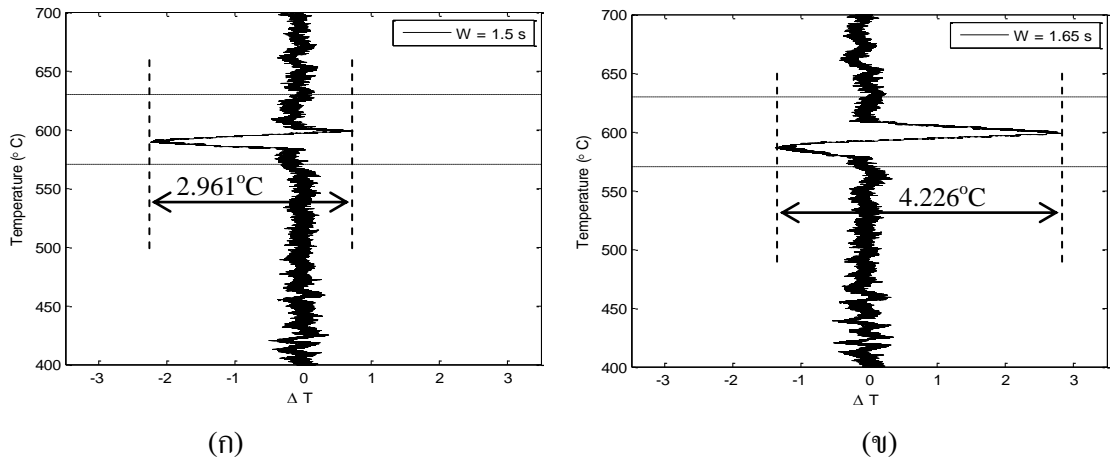
**Step 1:** Initialise the phase transformation temperatures.

**Step 2:** For  $W = W_{min}$  to  $W_{max}$  with incremental step of  $\Delta W$ , perform the piecewise linear SS-DTA.

**Step 3:** For each of  $W$  in Step 2, calculate the range of  $\Delta T$  over the phase transformation temperatures where the range is the maximum minus the minimum.

**Step 4:** Determine the optimal  $W$  as the one that gives the highest value of the range of  $\Delta T$ .

ทำการทดลองกับวัสดุแตนเลส เกรด SUS 321 ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.21 และตารางที่ 4.6



รูปที่ 4.21 ผลที่ได้จากการทำ SS-DTA โดยใช้เทคนิค piecewise linear กับ (ก) segment width 1.5 s และ (ข) segment width 1.65 s จากการทดสอบกับ stainless steel SUS 321

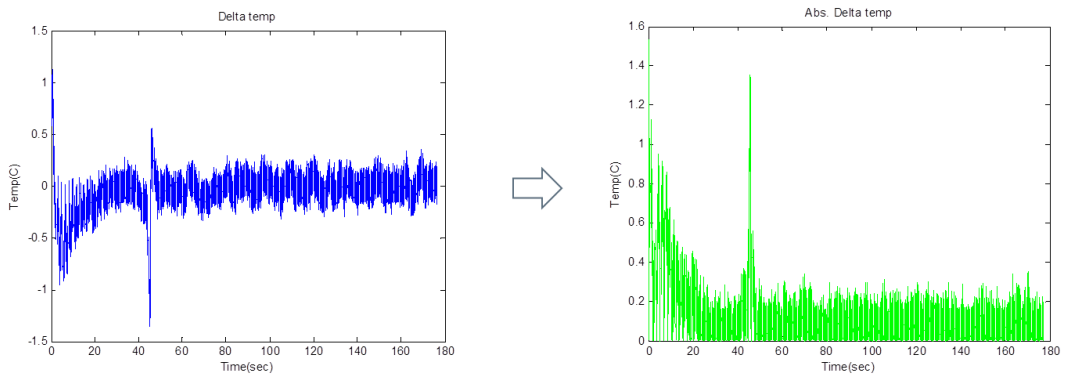
ตารางที่ 4.6 ค่าความกว้างของผลต่างอุณหภูมิในช่วง W = 1.25-1.75 s

W (s)	1.25	1.30	1.35	1.40	1.45	1.50	1.55	1.60	1.65	1.70	1.75
Range of $\Delta T$	2.549	2.829	3.808	2.791	3.858	2.961	3.826	3.097	4.226	3.105	3.710

#### 4.4 ผลการทดลองระบบการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติ

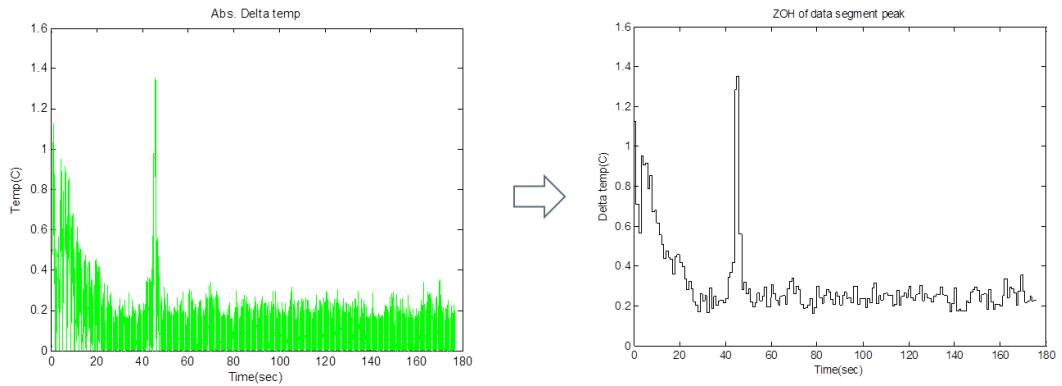
ระบบการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติโดยคอมพิวเตอร์มีขั้นตอนดังนี้

1. หาค่าสัมบูรณ์ (absolute value)

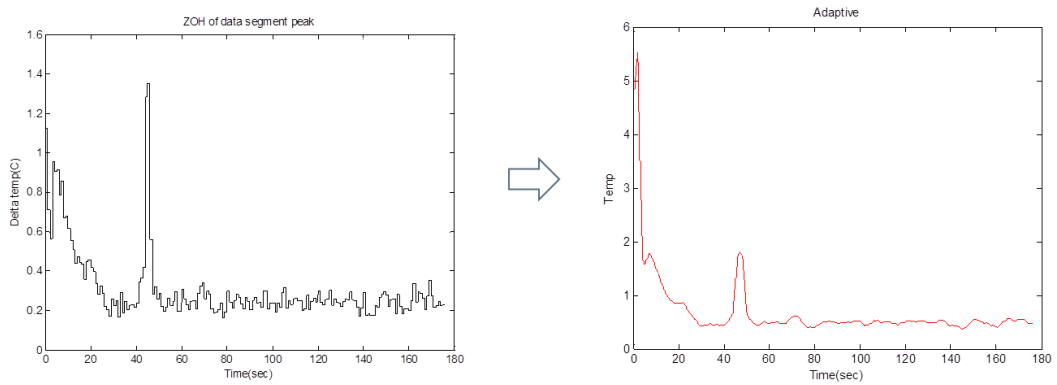


รูปที่ 4.22 ตัวอย่างผลการทำ SS-DTA ที่ผ่านการหาค่าสัมบูรณ์

2. สร้างเส้นอ้างอิงด้วย zero order hold of data segment peak และ adaptive threshold

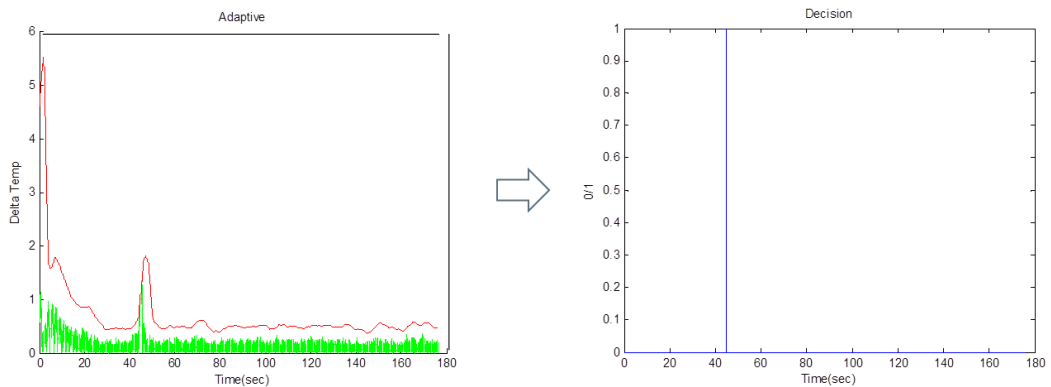


รูปที่ 4.23 ตัวอย่างผลการสร้างเส้นอ้างอิงด้วย zero order hold of data segment peak



รูปที่ 4.24 ตัวอย่างผลการสร้างเส้นอ้างอิงด้วย adaptive threshold

3. การตัดสินใจว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสหรือไม่นั้น ทำโดยเปรียบเทียบค่าอนุกรมที่แตกต่างกันกับเส้นอ้างอิง โดยกราฟมีค่า = 0 แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนเฟส และค่า = 1 แสดงว่ามีการเปลี่ยนเฟส



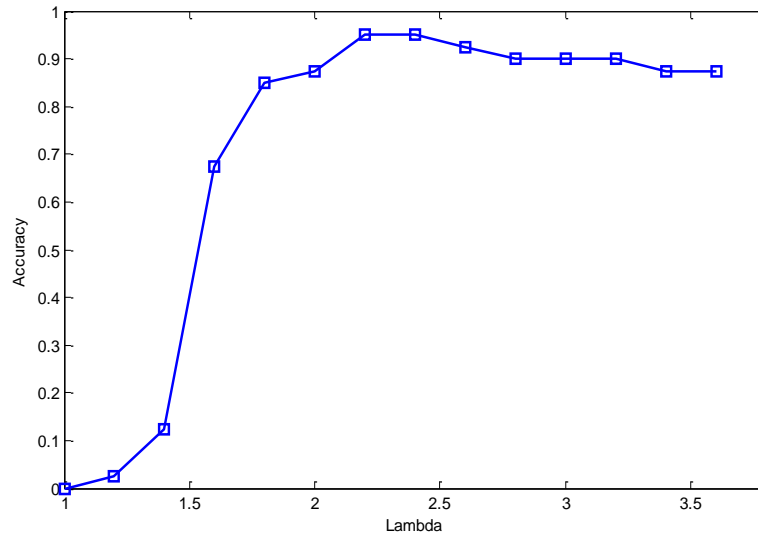
รูปที่ 4.25 ตัวอย่างผลที่ได้จากการทำ Decision ข้อมูล

ผลที่ได้จากการทดลองระบบการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติโดยใช้ค่า  $\lambda = 1.0$  ถึง 3.6 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 แสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ตารางสรุปผลการทดลองระบบการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติ

		เกิดเปลี่ยนเฟส						ค่า a	ค่า c	ไม่เกิด sus 321 (34 ข้อมูล)	ค่า d	ค่า b
		sus 321	sus 321	sus309	Alloy617	zinc	800H					
1	lambda= 1.0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	34	
2	lambda= 1.2	0	0	0	0	1	0	1	5	0	34	
3	lambda= 1.4	0	0	0	0	1	0	1	5	4	30	
4	lambda= 1.6	1	0	0	1	1	0	3	3	24	10	
5	lambda= 1.8	1	0	0	1	0	1	3	3	31	3	
6	lambda= 2.0	1	0	0	1	0	1	3	3	32	2	
7	lambda= 2.2	1	1	0	1	0	1	4	2	34	0	
8	lambda= 2.4	1	1	1	0	0	1	4	2	34	0	
9	lambda= 2.6	1	1	1	0	0	0	3	3	34	0	
10	lambda= 2.8	1	1	0	0	0	0	2	4	34	0	
11	lambda= 3.0	1	1	0	0	0	0	2	4	34	0	
12	lambda= 3.2	1	1	0	0	0	0	2	4	34	0	
13	lambda= 3.4	0	1	0	0	0	0	1	5	34	0	
14	lambda= 3.6	0	1	0	0	0	0	1	5	34	0	

พิจารณาค่า  $\lambda$  ที่ให้ค่า accuracy สูงที่สุดโดยหาได้จากสมการที่ (3.14) โดยผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.26 และตารางที่ 4.8

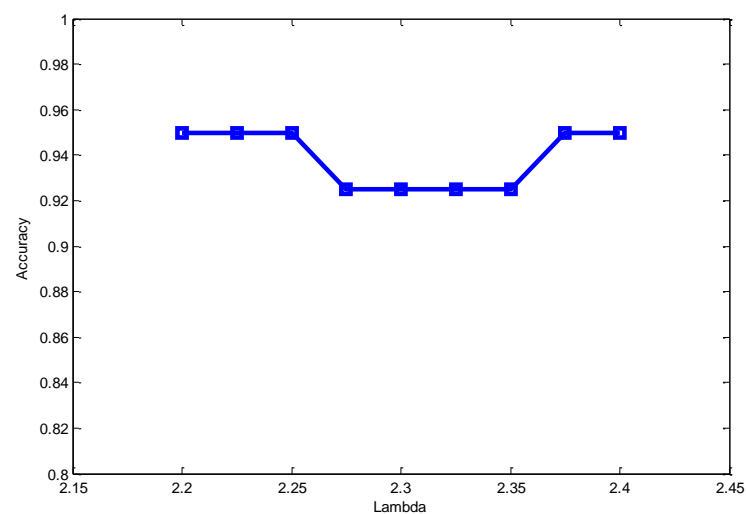


รูปที่ 4.26 Accuracy curve

ตารางที่ 4.8 ค่า accuracy เมื่อทดสอบแลมบ์ดาตั้งแต่ 1 ถึง 3.6

Lambda	1	1.2	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4	2.6	2.8	3	3.2	3.4	3.6
Accuracy	0	0.025	0.125	0.675	0.85	0.875	0.95	0.95	0.925	0.9	0.9	0.9	0.875	0.875

จากกราฟที่ 4.26 แสดงให้เห็นว่าค่า  $\lambda$  ที่อยู่ในช่วง 2.2 ถึง 2.4 ให้ค่า Accuracy สูงถึง 0.95 (95%) ดังนั้นเพื่อทดสอบว่าค่าใดในช่วง 2.2 ถึง 2.4 ให้ค่า accuracy สูงสุด จึงทำการทดลองระบบหาการเปลี่ยนแปลงแบบอัตโนมัติโดยใช้ค่า  $\lambda = 2.2$  ถึง 2.4 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.025 ผลที่ได้แสดงในรูปที่ 4.27 และตารางที่ 4.9



รูปที่ 4.27 Accuracy curve ในช่วงค่า  $\lambda = 2.2$  ถึง 2.4 และเพิ่มขึ้นทีละ 0.025

ตารางที่ 4.9 ค่า accuracy เมื่อทำการทดสอบค่าแลมบ์ดาระหว่าง 2.2 ถึง 2.4

Lambda	2.200	2.225	2.250	2.275	2.300	2.325	2.350	2.375	2.400
Accuracy	0.950	0.950	0.950	0.925	0.925	0.925	0.925	0.950	0.950

ในการทดลองเราพบว่าค่า error ที่เกิดขึ้นอันเนื่องจากระบบไม่สามารถตรวจจับการเปลี่ยนเฟสของ zinc ที่ทำการเชื่อมได้ ซึ่งอาจเกิดจากวัสดุชนิดนี้เกิดการเปลี่ยนเฟสที่อุณหภูมิต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่นมากและในการทดลองเชื่อมชิ้นงาน เราใช้การเชื่อมแก๊ส ซึ่งแตกต่างกับวัสดุชนิดอื่น ๆ ที่ใช้การเชื่อมตึก ทำให้ต้องใช้ค่า  $\lambda$  ที่ต่ำกว่าวัสดุชนิดอื่น โดยค่า  $\lambda$  อยู่ในช่วงประมาณ 1.2 ถึง 1.6