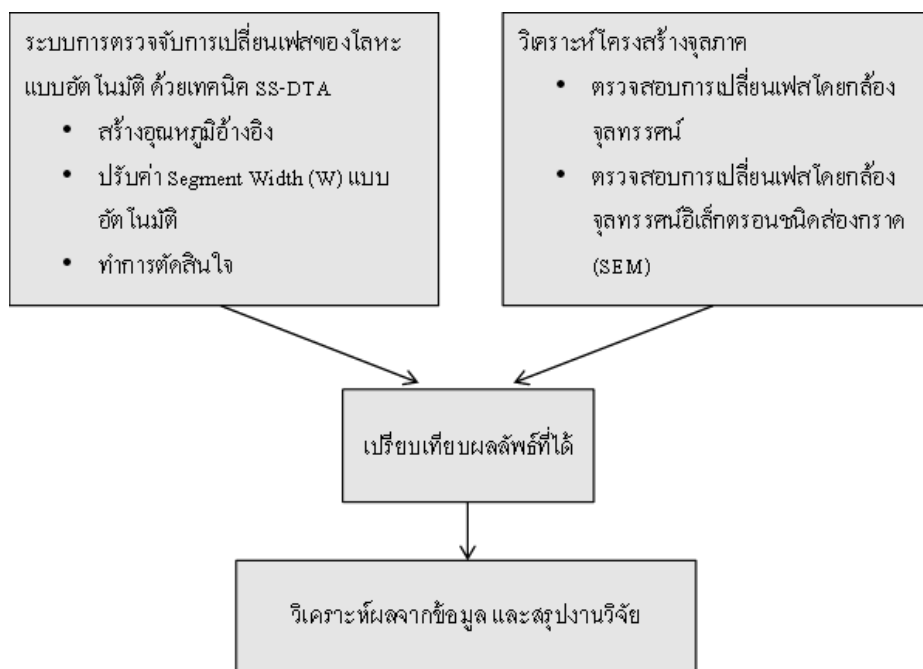


บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย

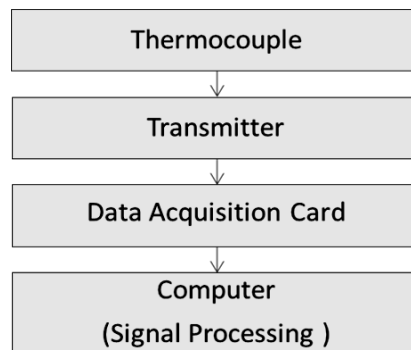
งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสของโลหะขณะทำการเชื่อมร่วมกับเทคนิค SS-DTA โดยตรวจหาการเปลี่ยนของผลต่างอุณหภูมิที่ได้จากการทำ SS-DTA และบ่งชี้ถึงชนิดของเฟสที่เกิดขึ้นหลังการเชื่อมโลหะ โดยการแบ่งวิธีการวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ การวิเคราะห์ผลการเปลี่ยนเฟสของโลหะโดยใช้เทคนิค SS-DTA ซึ่งทำการวัดข้อมูลการเย็นตัวของแนวรอยเชื่อมและหาวิธีการสำหรับการสร้างอุณหภูมิอ้างอิงที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการนำไปใช้ร่วมกับเทคนิคการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติ และในส่วนที่สองเป็นการตรวจสอบแบบทำลาย โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope) หรือตรวจสอบการเปลี่ยนเฟสโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนชนิดส่องกราด (SEM) เพื่อยืนยันถึงการเปลี่ยนเฟส แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

การศึกษาการพัฒนาเทคนิคการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสของโลหะแบบอัตโนมัติ เป็นเทคนิคที่ต้องใช้การวัดอุณหภูมิการเย็นตัวของรอยเชื่อมในบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone: HAZ) ที่มีอุณหภูมิสูงมากและใกล้เคียงกับแนวเชื่อม ดังนั้นเครื่องมือวัดที่ใช้จะต้องทนอุณหภูมิได้สูงกว่าอุณหภูมิในช่วงที่มีการเปลี่ยนเฟส สำหรับการทดลองนี้เราทำการทดสอบกับวัสดุสแตนเลสเกรด SUS321 เป็นวัสดุทดสอบหลัก และนำข้อมูลงานวิจัยของ SS-DTA ที่ทดสอบกับวัสดุ zinc alloy, ER309 ผสมกับ ERCoCr-A, alloy 617, และ incoloy 800H มาใช้ทดสอบกับระบบหาการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติ โดยส่วนประกอบเครื่องมือวัดจะแสดงตามแผนผังในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แสดงภาพของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้เทคนิค SS-DTA ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



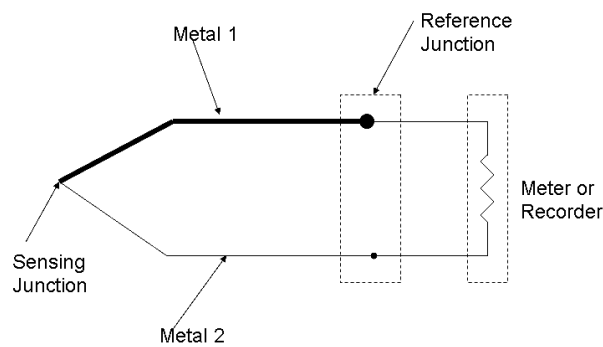
รูปที่ 3.2 แผนผังส่วนประกอบของเครื่องมือวัดอุณหภูมิที่ใช้เทคนิค SS-DTA



รูปที่ 3.3 เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ 8 ช่องสัญญาณ

3.1.1 เทอร์โมคัปเปิล (Thermocouple)

เทอร์โมคัปเปิลเป็นอุปกรณ์วัดอุณหภูมิโดยใช้หลักการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิหรือความร้อนเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้า (emf) เทอร์โมคัปเปิลทำมาจากโลหะตัวนำที่ต่างชนิดกัน 2 ตัว (แตกต่างกันทางโครงสร้างของอะตอม) นำมาเชื่อมต่อปลายทั้งสองเข้าด้วยกันที่ปลายด้านหนึ่ง เรียกว่าจุดวัดอุณหภูมิ ส่วนปลายอีกด้านหนึ่งปล่อยให้เปิดไว้ เรียกว่าจุดอ้างอิง หากจุดวัดอุณหภูมิและจุดอ้างอิงมีอุณหภูมิต่างกันก็จะทำให้มีการนำ กระแสในวงจรเทอร์โมคัปเปิลทั้งสองข้าง ปรากฏการณ์นี้ถูกค้นพบโดยนักวิทยาศาสตร์ชาวเยอรมันชื่อว่า Thomas Seebeck [10] ในปี ค.ศ.1821 และวงจรพื้นฐานแสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 วงจรพื้นฐานของเทอร์โมคัปเปิล [6]
(ที่มา: <http://student.nu.ac.th/electronic/00008.doc>)

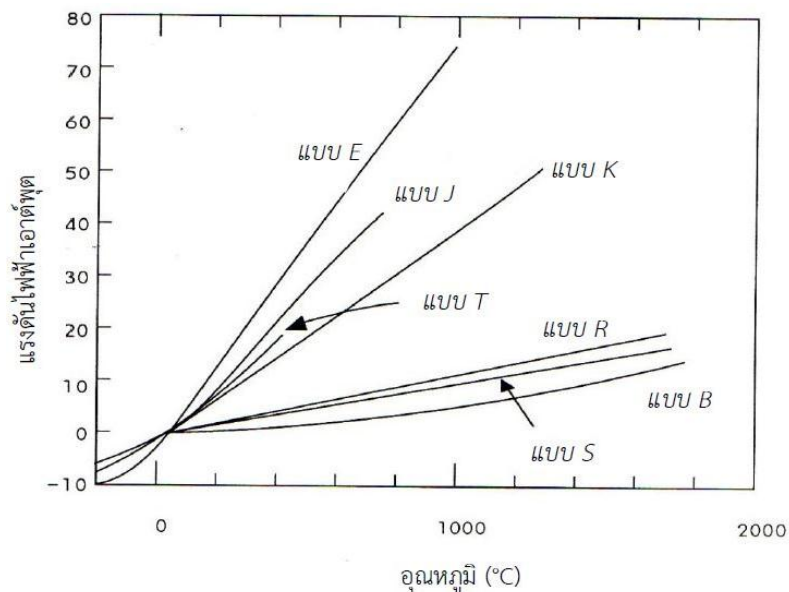
ปัจจุบันเทอร์โมคัปเปิลมีหลาย Type ให้เลือก แล้วแต่ย่านอุณหภูมิและลักษณะการใช้งาน โดยความแตกต่างของแต่ละ Type นี้ เกิดจากการเลือกใช้คู่ของวัสดุ (element) ของโลหะที่นำโลหะชนิดต่าง ๆ กันมาจับคู่เชื่อมเข้าด้วยกันจะทำให้คุณสมบัติของเทอร์โมคัปเปิลที่ได้แตกต่างกันไปตามตารางแสดงคุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิลแบบมาตรฐาน type ต่าง ๆ

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติเปรียบเทียบเทอร์โมคัปเปิ้ลแบบมาตรฐาน Type ต่าง ๆ [11]

(ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6810/standard-thermocouple>)

Type	ส่วนผสม	ย่านอุณหภูมิใช้งาน		แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ mV
		°C	°F	
B	แพลทินัม - 30% โรเดียม แพลทินัม - 6% โรเดียม	0 ถึง 1820	32 ถึง 3310	0 ถึง 13.814
R	แพลทินัม - 13% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768	-60 ถึง 3210	-0.26 ถึง 21.108
S	แพลทินัม-10% โรเดียม แพลทินัม	-50 ถึง 1768 -210 ถึง 760	-60 ถึง 3210 -350 ถึง 1400	-0.236 ถึง 18.698 -8.096 ถึง 42.922
J	เหล็ก/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1372	-450 ถึง 2500	-6.458 ถึง 54.875
K	โครเมล/อะลูเมล	-270 ถึง 400	-450 ถึง 750	-6.258 ถึง 20.865
T	ทองแดง/คอนสแตนแตน	-270 ถึง 1000	-450 ถึง 1830	-9.835 ถึง 76.358
E	โครเมล/คอนสแตนแตน			

- แรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้จากการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่วัดกับจุดเยือกแข็งของน้ำ



รูปที่ 3.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

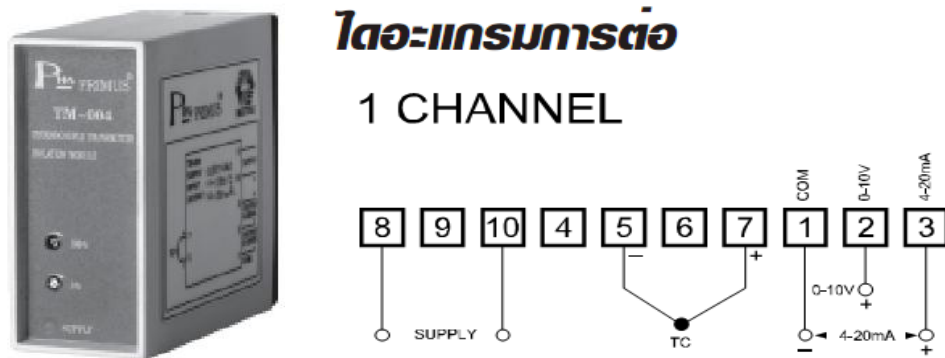
(ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/6810/standard-thermocouple>)

สำหรับในงานวิจัยนี้เราใช้เทอร์โมคัปเปิล Type k ขนาด 0.65 มม. แบบมีชีลด์หุ้มเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากภายนอก เนื่องจากเทอร์โมคัปเปิลชนิดนี้มีย่านการวัดอุณหภูมิตั้งแต่ -270 ถึง 1,372 °C และให้แรงเคลื่อนไฟฟ้าออกมาสูงสุดถึง 54.875 ที่อุณหภูมิ 1,372 °C จากตารางที่ 3.1 และรูปที่ 3.5

3.1.2 Thermocouple transmitter

เทอร์โมคัปเปิลทรานสมิตเตอร์ (thermocouple transmitter) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่แปลงสัญญาณทางไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตที่ได้จากเทอร์โมคัปเปิลให้เป็นสัญญาณมาตรฐาน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สัญญาณนิวแมติกส์และสัญญาณทางไฟฟ้า

1. สัญญาณนิวแมติกส์ (pneumatics signal) เป็นสัญญาณมาตรฐานที่อยู่ในรูปของความดันลม ใช้ความดันของลมในการควบคุมกระบวนการ ตัวอย่างสัญญาณมาตรฐานชนิดนิวแมติกส์ ได้แก่ 3-15 psi (BS) 0.2-1 bar (SI) และ 0.2-1 kg/cm² (Metric)
2. สัญญาณทางไฟฟ้า (electrical signal) เป็นสัญญาณมาตรฐานที่อยู่ในรูปของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้า แบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ แรงดันไฟฟ้า 1-5 V กระแสไฟฟ้า 4-20 mA และแรงดันไฟฟ้า 0-10 V กระแสไฟฟ้า 0-100 mA



รูปที่ 3.6 Thermocouple transmitter รุ่น Primus TM 004

(ที่มา: <http://www.primusthai.com/products>)

สำหรับ thermocouple transmitter ที่นำมาใช้กับงานวิจัยเป็นของยี่ห้อ primus รุ่น TM-004 [12] ที่แปลงสัญญาณจากเทอร์โมคัปเปิล (type K) เป็นสัญญาณ Analog มาตรฐานคือ 0-10 V ที่มีย่านการวัด

ของอุณหภูมิในช่วง 0-1200 องศาเซลเซียส และสามารถปรับ zero และ span ได้ นอกจากนั้น input และ output ยังแยกอิสระจากกัน (isolation) เพื่อป้องกันกระแสไฟฟ้าจากการเชื่อมเข้าสู่เครื่องมือวัด

3.1.3 Data Acquisition Card



รูปที่ 3.7 Data Acquisition Card

(ที่มา: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en>)

Data Acquisition Card รุ่น USB 6009 [13] ทำหน้าที่แปลงสัญญาณอนาล็อก 0-10 โวลต์จาก thermocouple transmitter เป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ผลด้วยคอมพิวเตอร์ผ่าน port USB โดยในหนึ่งช่องสัญญาณเราใช้การ sampling ข้อมูลที่ 2 KHz และมี resolution 14 bit เพื่อให้สามารถเก็บข้อมูลได้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะเย็นตัวขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงและรับสัญญาณอนาล็อกได้พร้อมกันสูงสุด 8 ช่องสัญญาณ

3.2 การทดลองเพื่อหาวิธีการประมาณค่าอุณหภูมิการเย็นตัวของรอยเชื่อม

การหาการเปลี่ยนแปลงโดยเทคนิค SS-DTA ผลต่างของอุณหภูมิที่ใช้สำหรับการดูการเปลี่ยนแปลงจะถูกสร้างโดยอุณหภูมิที่ได้จากการวัดจริงขณะเชื่อมชิ้นงานลบกับอุณหภูมิอ้างอิงที่ถูกสร้างขึ้นตามสมการที่ (2.1) และอุณหภูมิอ้างอิง (T_p) สามารถหาได้จาก 4 วิธี ดังนี้

3.2.1 สมการวัฏจักรความร้อน (Thermal cycle equations)

สมการนี้เป็นสมการในการหาค่าประมาณการเย็นตัวของกระบวนการเชื่อมโลหะ โดยสามารถหาค่าอุณหภูมิอ้างอิงได้จากสมการที่ (3.1) และ (3.2)

$$T_r = T_0 + \theta_k \left(\frac{\Delta t}{t} \right)^{1/k} \cdot \exp \left(- \frac{\theta_k \Delta t}{k \exp(T_p - T_0)^k} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{\theta_k} = \left(\frac{1}{(500 - T_0)^k} - \frac{1}{(800 - T_0)^k} \right) \quad (3.2)$$

เมื่อ

- T_p คือ peak temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- T_0 คือ initial temperature ($^{\circ}\text{C}$)
- T_r คือ temperature ที่เวลาใดๆ ($^{\circ}\text{C}$)
- t คือ เวลา (s)
- Δt คือ ช่วงเวลาการเย็นตัวระหว่าง $800 - 500$ $^{\circ}\text{C}$
- k คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของความหนาของโลหะที่ส่งผลต่อการถ่ายเทความร้อน โดยโลหะบางจะมีค่าประมาณ 1 และโลหะหนาจะมีค่าประมาณ 2 [5]

3.2.2 Polynomial Approximation

การทดสอบการประมาณค่า cooling curve ของการเชื่อมเพื่อนำมาใช้เป็นอุณหภูมิอ้างอิงให้กับเทคนิค SS-DTA ด้วยวิธี polynomial approximation จะใช้สมการ polynomial function (4) ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการหนึ่งที่เป็นที่นิยมสำหรับการ fit หรือประมาณค่าฟังก์ชัน $f(x)$ จึงเป็นวิธีที่น่าจะนำมาใช้ในการสร้างอุณหภูมิอ้างอิงที่ให้ fit กับอุณหภูมิการเย็นตัวได้ใกล้เคียงกัน

$$T_r^P(t) = a_n t^n + a_{n-1} t^{n-1} + \dots + a_1 t + a_0 \quad (3.3)$$

เมื่อ T_r^P คืออุณหภูมิอ้างอิงที่ถูกประมาณขึ้นโดย Polynomial function, n เป็น order ของสมการ polynomial และ a_n คือ ค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนาม

3.2.3 4-Segment Piecewise Nonlinear Approximation

การทดลองด้วยการประมาณค่า cooling curve ด้วยวิธี 4-segment nonlinear piecewise approximation วิธีนี้จะแบ่งข้อมูลของ cooling curve เป็น 4 ช่วงเวลาเท่าๆ กัน แล้วใช้สมการ polynomial curve fitting (5) และ (6) มาทำการสร้างเป็นอนุกรมอ้างอิง

$$T_r^{PWNL}(t) = \sum_{i=1}^4 P_i(t) \quad (3.4)$$

$$P_i(t) = \begin{cases} a_{n,i}t^n + a_{n-1,i}t^{n-1} + \dots + a_{1,i}t + a_{0,i}, & (i-1)W_p \leq t \leq iW_p \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.5)$$

เมื่อ T_r^{PWNL} คืออนุกรมอ้างอิงที่ถูกประมาณขึ้น โดย 4-segment piecewise nonlinear approximation ที่เวลาใดๆเป็นผลรวมของการทำ polynomial ทั้ง 4 ส่วน, P_i เป็น polynomial function ของ ส่วนข้อมูลการเย็นตัวที่ i

3.2.4 Piecewise Linear Approximation

นอกจากสมการวัฏจักรความร้อนของการเชื่อมแล้ว อนุกรมอ้างอิงสามารถหาได้จากข้อมูลวัดโดยใช้ วิธี piecewise linear approximation โดยประมาณอนุกรมอ้างอิงด้วยการสร้างสมการเส้นตรงจำนวน M เส้น จากข้อมูล cooling curve ที่มีความยาวในแกนเวลาเท่าๆกันเป็น W ดังแสดงในสมการที่ (3.6) – (3.9)

$$T_r(t) = \sum_{i=1}^M f_i(t) \quad (3.6)$$

$$f_i(t) = \begin{cases} m_i t + b_i, & l_i \leq t < u_i \\ 0 & \end{cases} \quad (3.7)$$

$$l_i = (i-1) \cdot W \quad (3.8)$$

$$u_i = i \cdot W \quad (3.9)$$

เมื่อ

T_r คือ อนุกรมอ้างอิงที่เวลาใดๆ

M คือ จำนวนช่วงเวลาทั้งหมดที่ถูกแบ่ง

m_i และ b_i คือ ค่าความชันและจุดตัดบนแกนอุณหภูมิของเส้นตรงเส้นที่ i

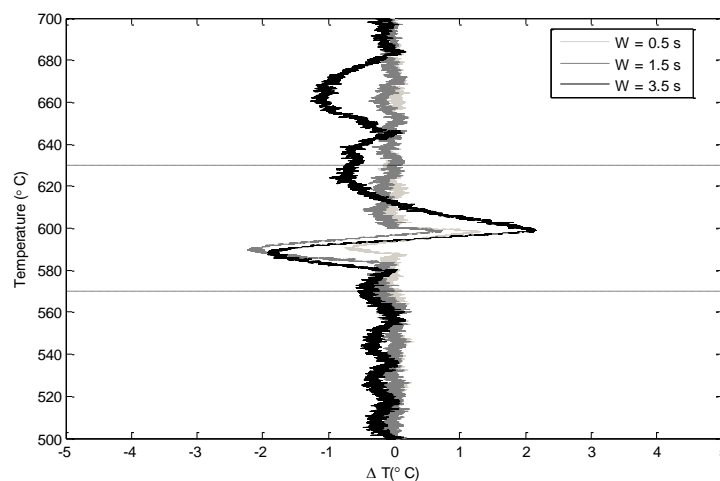
t คือ เวลา

W คือ ขนาดความกว้างของเส้นตรงแต่ละเส้นมีหน่วยเป็นเวลา

อุณหภูมิอ้างอิง (T_r) ซึ่งประมาณจากเซตของสมการเส้นตรงที่อธิบายตามสมการข้างต้นจะถูกนำไปหาผลต่างของอุณหภูมิที่วัดได้จริงกับตัวอุณหภูมิอ้างอิงแล้วนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับอุณหภูมิที่วัดได้จริง ช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างจะเป็นตัวบ่งบอกถึงการเปลี่ยนเฟส

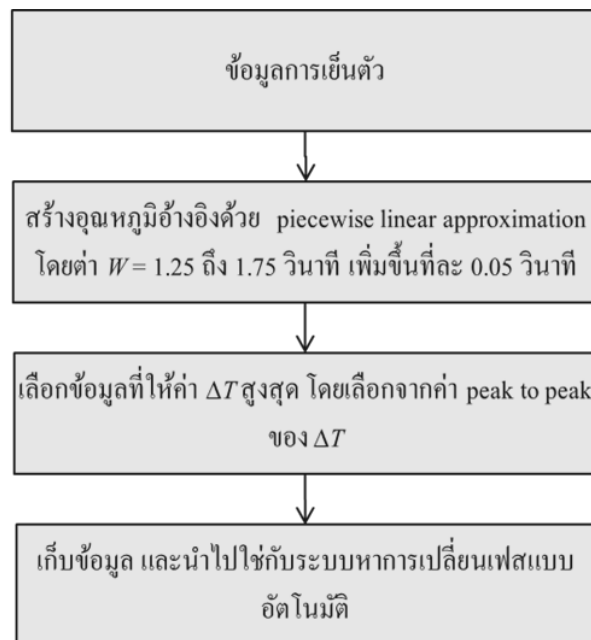
3.3 การทดสอบระบบปรับค่า Segment Width (W) แบบอัตโนมัติ

จากการทดลองหาวิธีการประมาณค่าอุณหภูมิการเย็นตัวของรอยเชื่อม ผลที่ได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธี piecewise linear approximation สามารถทำให้เห็นผลต่างอุณหภูมิในช่วงที่มีการเปลี่ยนเฟส และไม่มีการเปลี่ยนเฟสได้ชัดเจนที่สุดจากการนำไปใช้ร่วมกับ SS-DTA ด้วยเหตุนี้วิธีการประมาณอุณหภูมิอ้างอิงด้วย piecewise linear approximation จึงเหมาะสำหรับที่จะนำมาใช้สำหรับการพัฒนาระบบการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสของโลหะแบบอัตโนมัติ แม้ว่าเทคนิค SS-DTA จะสามารถตรวจจับการเปลี่ยนเฟสของวัสดุในงานเชื่อม แต่ความเด่นชัดของความแตกต่างอุณหภูมิจะถูกกำหนดด้วยค่า segment width ซึ่งปัจจุบันการกำหนดค่า segment width ถูกปรับโดยผู้ใช้งาน



รูปที่ 3.8 ความแตกต่างของผลต่างอุณหภูมิเมื่อ $W = 0.5, 1.5,$ และ 3.5 ของ SUS321 เกิด Cr_{23}C_6 ในช่วงอุณหภูมิ 570 - 630 องศาเซลเซียส

สำหรับการทดลองนี้จะทำออกแบระบบการปรับค่า segment width แบบอัตโนมัติ จากแสดงในรูปที่ 3.8 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่า segment width เพิ่มขึ้นจะทำให้เห็นผลต่างอุณหภูมิเกิดการแกว่งชัดเจนขึ้น แม้จะทำให้ช่วงผลต่างอุณหภูมิในช่วงที่มีการเปลี่ยนเฟสชัดเจนขึ้นก็ตาม ส่งผลโดยตรงการวิเคราะห์ผลโดยตรง ดังนั้นในการออกการระบบปรับค่า segment width เราจำเป็นต้องจำกัดช่วงให้เหมาะสม ซึ่งในทดสอบเราเลือกใช้ค่า segment width ในช่วง 1.25 – 1.75 วินาที และเพิ่มขึ้นทีละ 0.05 วินาที เพื่อให้ได้ค่าที่ทำให้ผลต่างอุณหภูมิเด่นชัดสูงสุด โดยในการดูความเด่นชัดของผลต่างอุณหภูมิเราได้จากการหาค่า peak to peak สำหรับขั้นตอนในการทำงานแสดงในรูปที่ 3.9

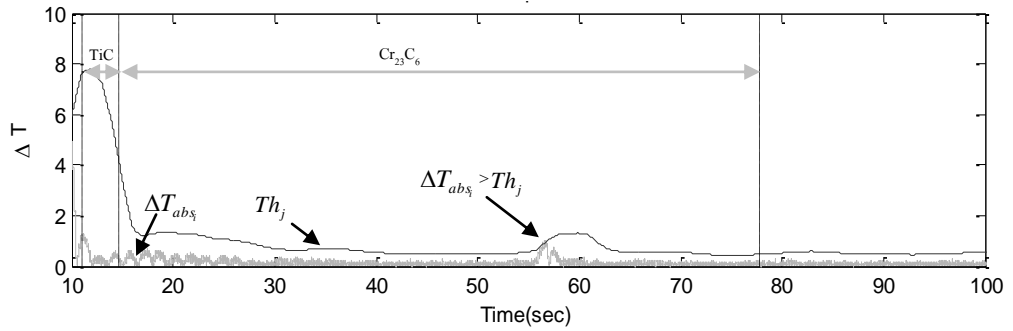


รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการทำงานระบบการปรับค่า W แบบอัตโนมัติ

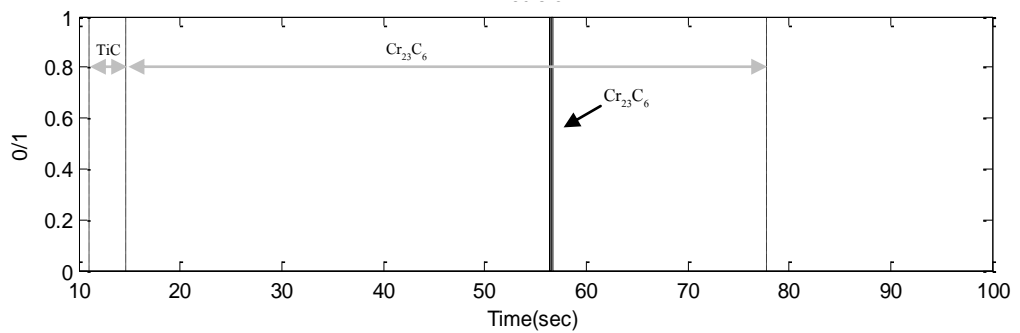
3.4 การทดสอบระบบการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสของโลหะแบบอัตโนมัติ

ส่วนของระบบการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติโดยคอมพิวเตอร์ แทนการที่ผู้ใช้ต้องวิเคราะห์เองจากกราฟผลต่างอุณหภูมิ เพื่อเพิ่มความถูกต้องในการบ่งชี้ถึงการเปลี่ยนเฟสที่เกิดขึ้นในรอยเชื่อม การตรวจหาการเปลี่ยนเฟสโดยอัตโนมัติจะทำการเปรียบเทียบผลต่างของอุณหภูมิ (ΔT) กับเส้นอ้างอิง แสดงตัวอย่างการทดสอบกับสแตนเลส SUS 321 ในรูปที่ 3.10 โดยเส้นอ้างอิง (Th_j) เส้นสีดำจะอยู่เหนือกว่าเส้นค่าสัมบูรณ์ของผลต่างอุณหภูมิ (ΔT_{abs}) เส้นสีเทา ซึ่งส่วนที่สูงกว่าเส้น

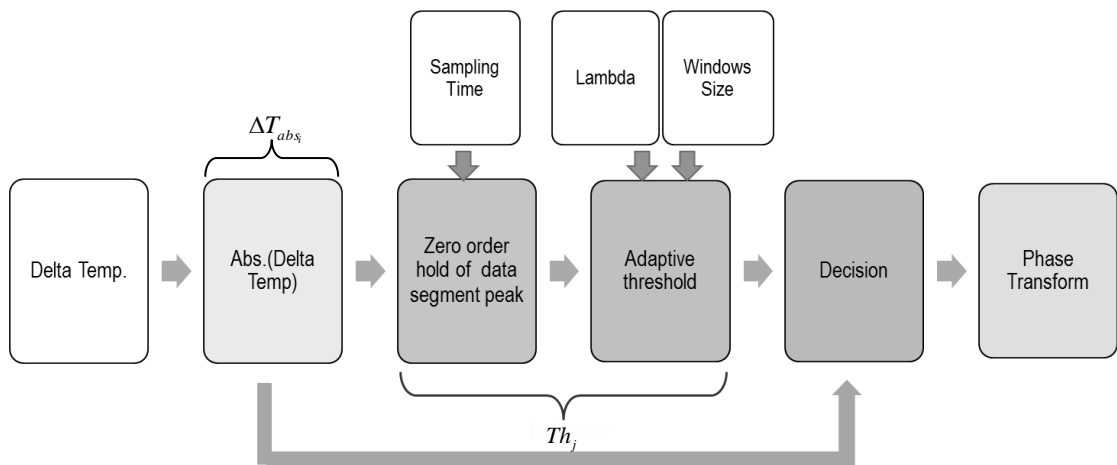
อ้างอิงและอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่สามารถเปลี่ยนเฟสได้จะถูกพิจารณาว่าเกิดการเปลี่ยนเฟส และส่วนที่อยู่ต่ำกว่าหรือสูงกว่าแต่อยู่นอกช่วงอุณหภูมิที่สามารถเปลี่ยนเฟสได้จะถูกพิจารณาว่าไม่มีการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้น แสดงในรูปที่ 3.11 และขั้นตอนการทำงานของโปรแกรมแสดงในรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.10 เส้นค่าสัมบูรณ์ของผลต่างอุณหภูมิ (เส้นสีเทา) เทียบกับเส้นอ้างอิง (เส้นสีดำ)



รูปที่ 3.11 ผลจากการ Decision ข้อมูล แสดงการระบุช่วงเวลาและประเภทของเฟสที่เกิดขึ้น



รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการทำงานของระบบการตรวจจับการเปลี่ยนเฟสของโลหะแบบอัตโนมัติ

ขั้นตอนการสร้างเส้นอ้างอิงสำหรับระบบการเปลี่ยนเฟสแบบอัตโนมัติมีขั้นตอนดังนี้
 ลำดับที่ 1 นำข้อมูลผลต่างของอุณหภูมิจากการทำ SS- DTA โดยสร้างอุณหภูมิอ้างอิงที่ได้จากข้อมูล
 วัดโดยใช้วิธี piecewise linear approximation มาหาค่าสัมบูรณ์ (absolute value) เพื่อลดขั้นตอนการ
 วิเคราะห์ให้เหลือเพียงด้านบวกเท่านั้น แสดงในสมการที่ 3.10

$$\Delta T_{abs} = |\Delta T_i| \quad (3.10)$$

ลำดับที่ 2 นำข้อมูลผ่าน zero order hold of data segment peak เพื่อให้ได้รูปร่างของสัญญาณ โดยที่การ
 หาค่าสูงสุดในแต่ละ sampling time

$$\Delta \tilde{T}_j = \max(\Delta T_{abs}) \quad (3.11)$$

เมื่อ

$$i = 1 - (j + s + 1), j = k \times s \text{ โดยที่ } k = 0, 1, 2, \dots$$

s = sampling time

k = จำนวน sampling

ลำดับที่ 3 ทำ adaptive threshold กับข้อมูลที่ผ่าน zero order hold of data segment peak เพื่อสร้างเส้น
 อ้างอิงในการแยกสัญญาณระหว่างส่วนที่มีการเปลี่ยนเฟสกับส่วนที่ไม่มีการเปลี่ยนเฟส

$$Th_j = \lambda \sum_{i=j}^{j+w-1} \Delta \tilde{T}_i \quad (3.12)$$

เมื่อ

w คือขนาดของ windows size ในการทำ moving average filter

λ คือค่าคงที่ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 1

ลำดับที่ 4 ทำการตัดสินใจโดยเปรียบเทียบผลต่างอุณหภูมิกับเส้นอ้างอิง โดยให้ค่าการตัดสินใจ
 ออกมา 2 ค่า ได้แก่ 1 เมื่อผลต่างอุณหภูมิสูงกว่าเส้นอ้างอิง และ 0 เมื่อ ผลต่างอุณหภูมิต่ำกว่าหรือ
 เท่ากับเส้นอ้างอิงแสดงในสมการ (3.13)

$$d_j = \begin{cases} 0, & Th_j \geq \Delta T_{abs} \\ 1, & Th_j < \Delta T_{abs} \end{cases} \quad (3.13)$$

3.4.1 การเลือกค่า Lambda (λ)

เพื่อหาประสิทธิภาพของการตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงแบบอัตโนมัติ จะทำการจัดวางตัวเลขเข้าในตารางที่ 3.2 ที่มีขนาด 2x2 เพื่อคำนวณค่า λ ที่ทำให้ระบบตรวจจับการเปลี่ยนแปลงแบบอัตโนมัติมีค่า accuracy สูงที่สุด โดยค่า λ คือค่าคงที่ที่มากกว่า หรือเท่ากับ 1 ที่ถูกนำมาใช้เพื่อทำให้เส้นอ้างอิงอยู่ในระดับที่สูงกว่าระดับของสัญญาณรบกวนแต่ไม่สูงกว่าสัญญาณที่แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของโลหะ ค่า λ จะถูกเลือกโดยดูจากค่า λ ที่ให้ค่า accuracy สูงที่สุด

ตารางที่ 3.2 ตารางสำหรับการคำนวณค่า Accuracy

หาการเปลี่ยนแปลงแบบ อัตโนมัติ (Auto SS – DTA)	การตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค	
	เปลี่ยนแปลง	ไม่เปลี่ยนแปลง
ตรวจจับที่มีการเปลี่ยนแปลง	a	b
ตรวจจับว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง	c	d

จากตารางที่ 3.2 จะสามารถคำนวณค่า accuracy ได้จากสมการที่ (3.14)

$$\text{Accuracy} = \frac{a + d}{a + b + c + d} \quad (3.14)$$

- โดยที่
- a* คือจำนวนผลลัพธ์ที่ระบบตรวจจับอัตโนมัติแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลง และตรงกับผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างว่ามีการเปลี่ยนแปลงจริง
 - b* คือจำนวนผลลัพธ์ที่ระบบตรวจจับอัตโนมัติแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่ตรงกับผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง
 - c* คือจำนวนผลลัพธ์ที่ระบบตรวจจับอัตโนมัติแสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ไม่ตรงกับผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างว่ามีการเปลี่ยนแปลง
 - d* คือจำนวนผลลัพธ์ที่ระบบตรวจจับอัตโนมัติแสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลง และตรงกับผลที่ได้จากการตรวจสอบโครงสร้างว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจริง