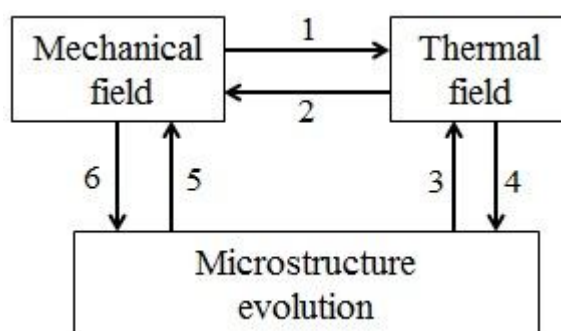


บทที่ 5 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในบทนี้จะกล่าวถึงแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ของกระบวนการขึ้นรูปร้อน รวมทั้งการวิเคราะห์ผลที่ได้จากการดำเนินงานวิจัยที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 และทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ได้จากการทดสอบกับผลการทำนายที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยไฟไนต์เอลิเมนต์ตามเงื่อนไขต่างๆ

5.1 แบบจำลองการขึ้นรูปร้อน

ในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปร้อนเหล็กแผ่น จะต้องพิจารณาถึงสมบัติทางกล (Mechanical field) และสมบัติทางความร้อน (Thermal field) ของวัสดุไปพร้อมๆ กัน [8] ซึ่งจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเหล็กกล้าที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคขณะทำการขึ้นรูปร้อนสามารถแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในการทำแบบจำลองการขึ้นรูปร้อน [65]

จากรูปที่ 5.1 ความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางกล สมบัติทางความร้อน และเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในการทำแบบจำลองการขึ้นรูปร้อน สามารถแสดงเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

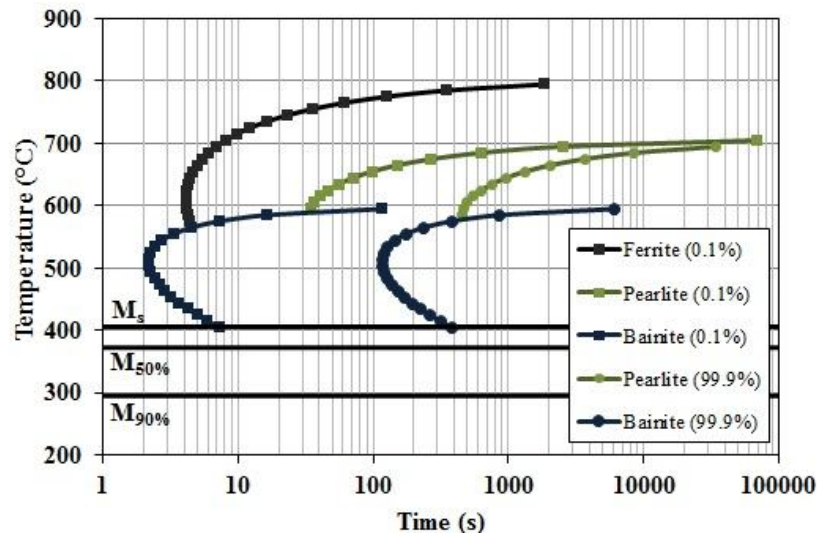
1. เงื่อนไขขอบเขตของความร้อนที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเหล็กกล้า (Thermal boundary conditions are deformation dependent) สามารถอธิบายได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ที่เป็นฟังก์ชันของความดัน และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่เป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ
2. การขยายตัวเนื่องจากความร้อน (Thermal expansion) คือค่าของความแตกต่างของความยาวหรือปริมาตรของชิ้นงานที่เปลี่ยนไปเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป 1 หน่วยของศา เมื่อเทียบกับความยาวหรือปริมาตรตั้งต้น การขยายตัวเนื่องจากความร้อนนั้นเป็นสมบัติเฉพาะของ

เหล็กกล้าแต่ละชนิด ซึ่งขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กกล้า โครงสร้างผลึก อุณหภูมิของจุดหลอมตัว (melting point) เป็นต้น

3. ความร้อนแฝงเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาค (Latent heat due to phase transformations) คือปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเปลี่ยนแปลงเฟสของวัสดุ โดยอุณหภูมิในขณะที่โครงสร้างกำลังเปลี่ยนเฟสนั้นจะคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง
4. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่มีผลมาจากอุณหภูมิ อ้างอิงข้อมูลอัตราการเย็นตัวของเหล็กกล้าโบรอนเกรด 22MnB5 ใน CCT diagram โดยที่อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานน้อยกว่า 3°C/s โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายจะเป็นเฟสเฟอร์ไรต์ และเพอร์ไลต์ ถ้าอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานมากกว่า 30°C/s โครงสร้างจุลภาคสุดท้ายจะเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ทั้งหมด (Full martensite)
5. สมบัติทางกลที่มีผลมาจากโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานการทำนายปริมาณโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและผลที่มีต่อสมบัติทางกล ปริมาณโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเช่น มาร์เทนไซต์ เฟอร์ไรต์ เพอร์ไลต์ และออสเทนไนต์ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ชิ้นงานมีสมบัติทางกลที่แตกต่างกัน
6. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคที่ส่งผลจากความเค้นและความเครียด โดยความสัมพันธ์ระหว่าง Stress กับ Strain ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 จะเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิ และ strain rate

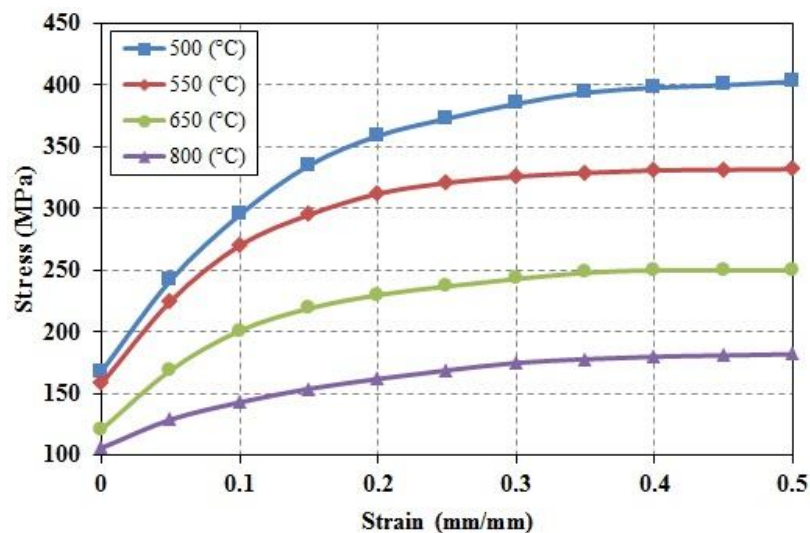
5.1.1 สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าโบรอน

ในการทำแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับการขึ้นรูปร้อนเหล็กแผ่น ชิ้นงานที่ใช้เป็นเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 ขนาดเดียวกับการทดลองจริงคือ กว้าง 130 มิลลิเมตร ยาว 150 มิลลิเมตร และหนา 1.4 มิลลิเมตร โดยในขั้นตอนแรกจะนำองค์ประกอบทางเคมีของเหล็กมาคำนวณหาแผนภาพ TTT ดังแสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งในแผนภาพจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิกับเวลาในการเกิดและสิ้นสุดการเปลี่ยนเฟสของ เฟสเฟอร์ไรต์ เฟอร์ไรต์ เบนไนต์ และ มาร์เทนไซต์ จากนั้นจึงนำค่าของกราฟในแผนภาพดังกล่าวมาใช้เป็นข้อมูลการเปลี่ยนเฟสของเหล็กโดยใช้แบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

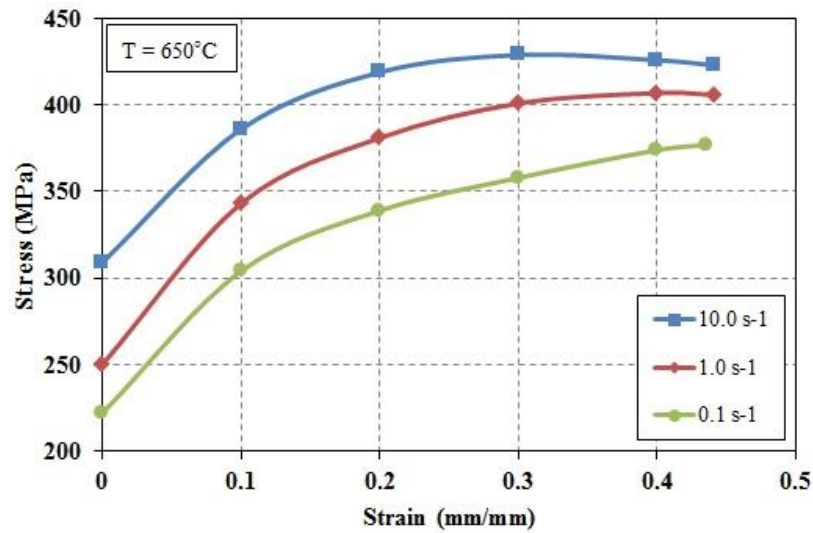


รูปที่ 5.2 แผนภาพ TTT ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5

นอกจากนี้ค่าสมบัติทางความร้อนและสมบัติทางกลของวัสดุที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 ได้แก่ ค่า E คือ ค่าโมดูลัสของเหล็กกล้าโบรอน, ν คืออัตราส่วนปัวซอง, c และ p คือ สัมประสิทธิ์ Cowper-Symonds สำหรับการคำนวณ flow stress, k คือ ค่าการนำความร้อนของ เหล็กกล้าโบรอน และ C_p คือ ค่าความจุความร้อนของเหล็กกล้าโบรอน [66] แสดงดังตารางที่ 5.1 และ กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 เป็นฟังก์ชันของ อุณหภูมิที่ strain rate 0.1 s^{-1} ดังแสดงในรูปที่ 5.3 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stress กับ strain ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 เป็นฟังก์ชันของ strain rate ที่อุณหภูมิ 650°C แสดงในรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 Flow Stress ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 ที่ strain rate 0.1 s^{-1} [66]



รูปที่ 5.4 Flow Stress ของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 เป็นฟังก์ชันของ strain rate ที่อุณหภูมิ 650°C [1]

ตารางที่ 5.1 สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของเหล็กกล้าโบรอน เกรด 22MnB5 ที่อุณหภูมิต่างๆ [66]

Temperature (°C)	E , Young's modulus (GPa)	ν , Poisson's ratio	ρ	c	k , thermal conductivity (W/m·K)	C_p , heat capacity (J/kg·K)
20	212	0.284	4.28	6.20×10^9	30.7	444
100	207	0.286	4.21	8.40×10^5	31.1	487
200	199	0.289	4.1	1.50×10^4	30	520
300	193	0.293	3.97	1.40×10^3	27.5	544
400	166	0.298	3.83	25.8	21.7	561
500	158	0.303	3.69	78.4		573
600	150	0.31	3.53	35.4	23.6	581
700	142	0.317	3.37	23.3		586
800	134	0.325	3.21	22.2	25.6	590
900	126	0.334	3.04	30.3		596
1000	118	0.343	2.87	55.2	27.6	603

5.1.2 สมบัติทางกลและสมบัติทางความร้อนของแม่พิมพ์

สมบัติต่างๆของแม่พิมพ์ที่ใช้ในแบบจำลองเป็นค่าสมบัติเดียวกันกับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการทดสอบจริง คือ AISI H13 โดยมีค่าสมบัติต่างๆ จากข้อมูลของโปรแกรม DEFORM 3D แสดงดังตารางที่ 5.2 และ Flow Stress ของ AISI D2 ดังตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.2 สมบัติทางความร้อนของแม่พิมพ์ AISI H13 [20]

Temperature (°C)	Heat capacity (J g ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal conductivity (W/m·K)
20	0.46	25
500	0.55	28.5
600	0.59	29.3

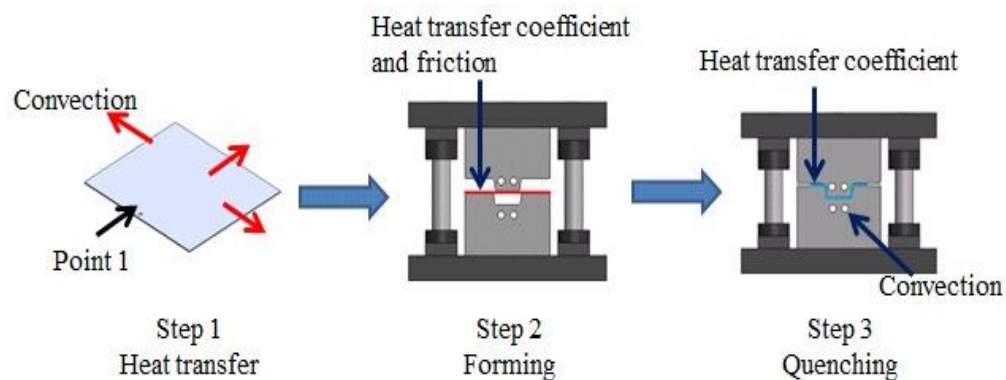
ตารางที่ 5.3 Flow Stress ของแม่พิมพ์ AISI H13 ที่อุณหภูมิ 820 องศาเซลเซียส

Strain (mm/mm)	Stress (MPa)	
	Strain rate 290 s ⁻¹	Strain rate 906 s ⁻¹
0	343.763	507.942
0.1	396.519	561.25
0.2	449.275	614.558
0.3	467.891	632.773
0.4	468	633

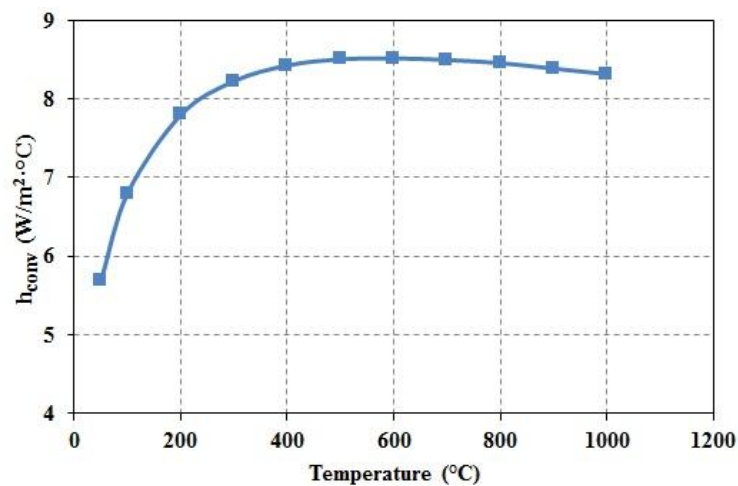
5.1.3 กระบวนการขึ้นรูปร้อน (Hot stamping process)

ในการขึ้นรูปชิ้นงานจริงต้องมีการเก็บค่าอุณหภูมิของชิ้นงานในตำแหน่งที่กำหนดมาเพื่อนำค่าอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจริงมาปรับค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ให้อุณหภูมิที่ได้สอดคล้องกับการทดลองจริงหลังจากนั้นจึงนำค่า สมบัติของเหล็กที่จะทำการขึ้นรูป, สมบัติของแม่พิมพ์ที่ใช้และแผนภาพ TTT มาใส่แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งแบบจำลองการขึ้นรูปชิ้นงานจะใช้เงื่อนไขต่างๆ ดังรูปที่ 5.5 โดยสามารถแบ่งการขึ้นรูปในแบบจำลองออกได้เป็น 3 ขั้นตอนด้วยกันคือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นช่วงที่ชิ้นงานถูกนำออกจากเตาที่มีอุณหภูมิตั้งต้นเป็น 950 องศาเซลเซียส เกิดการถ่ายเทความร้อนกับอากาศ ซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับอากาศ(Convection coefficients, h) แสดงดังรูปที่ 5.6 หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานไปวางบนแม่พิมพ์ตัวล่าง ใช้เวลา 6 วินาที ต่อมาในขั้นตอนที่ 2 เป็นช่วงที่แม่พิมพ์ตัวบนกดอัดแม่พิมพ์

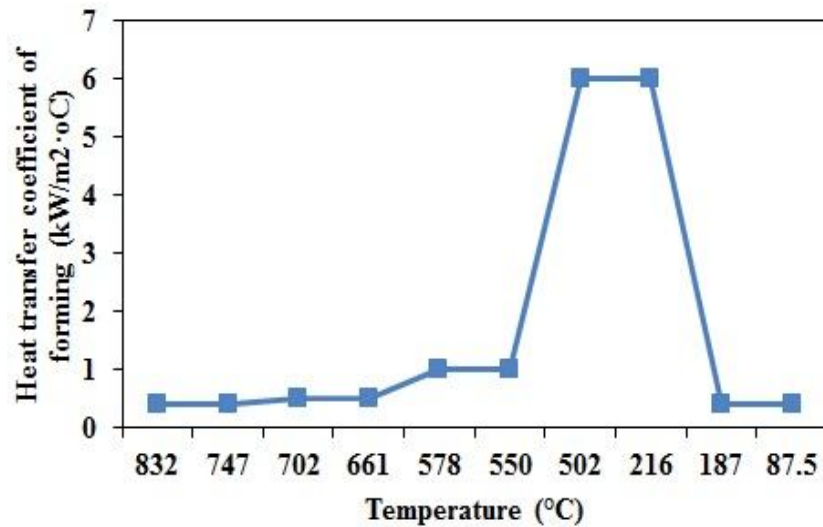
ตัวล่างเพื่อขึ้นรูปชิ้นงานใช้เวลาทั้งสิ้น 1 วินาที เนื่องจากขั้นตอนนี้ใช้เวลาน้อยในการขึ้นรูป ดังนั้นในงานนี้ได้ใช้ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ (Heat transfer coefficient) เป็น $11,000 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ขณะทำการขึ้นรูปซึ่งเป็นข้อมูลของโปรแกรม DEFORM 3D เนื่องจากเป็นจังหวะการขึ้นรูปจึงมี Pressure ที่สูงทำให้ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์สูงมาก และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ (Coefficient of Friction เป็น 0.3) จากข้อมูลงานวิจัยของ [46] ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์อยู่ระหว่าง 0.3-0.6 ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ชั้นเคลือบผิว (Coating) และสารหล่อลื่น (lubricants) และสุดท้ายขั้นตอนที่ 3 เป็นช่วงที่ความร้อนของชิ้นงานถูกถ่ายเทไปให้กับแม่พิมพ์ ค่าการถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์แสดงดังรูปที่ 5.7 ใช้เวลาในขั้นตอนนี้ทั้งสิ้น 20 วินาที ซึ่งค่าการถ่ายเทความร้อนในรูปที่ 5.7 ได้มาจากการปรับค่าการถ่ายเทความร้อนเพื่อให้ได้อุณหภูมิที่ตรงกันระหว่างการทดลองจริงกับผลแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่เพิ่มสูงขึ้นจะแปรผันโดยตรงเมื่อความดันเพิ่มขึ้น ความดันจะสูงขึ้นเนื่องจากผิวสัมผัสระหว่างชิ้นงานและแม่พิมพ์สัมผัสการอย่างสมบูรณ์ ดังนั้นการถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานไปสู่แม่พิมพ์จะสูงมาก [67]



รูปที่ 5.5 กลไกการให้ความร้อนชิ้นงานในแบบจำลองการขึ้นรูปร้อน

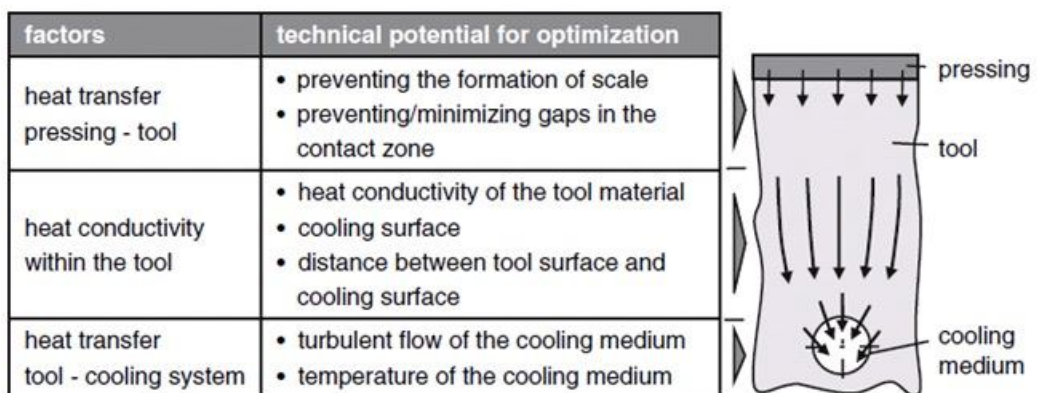


รูปที่ 5.6 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานหลักกับอากาศ[66]



รูปที่ 5.7 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนระหว่างชิ้นงานกับแม่พิมพ์ขณะปล่อยชิ้นงานเย็นตัวลง

โดยปกติแล้วในการขึ้นรูปแต่ละครั้งจะเกิดการสะสมของอุณหภูมิขึ้นที่แม่พิมพ์ ดังนั้นการใช้ท่อหล่อเย็นในแม่พิมพ์จึงเป็นการช่วยถ่ายเทความร้อนออกจากแม่พิมพ์ ดังนั้นกระบวนการขึ้นรูปร้อนจึงจำเป็นต้องมีการวางท่อเย็นชิ้นงานด้วยแม่พิมพ์ขณะขึ้นรูปเพื่อให้ได้ชิ้นงานเหล็กโบรอนที่มีความแข็งแรงสูง ซึ่งในกระบวนการดังกล่าวจะมีการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานมายังตัวแม่พิมพ์ (Heat transfer pressing – tool) ส่งผลให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น การที่แม่พิมพ์มีท่อหล่อเย็นก็จะช่วยในการถ่ายเทความร้อนที่สะสมบนตัวแม่พิมพ์โดยมีน้ำเป็นตัวกลางพาความร้อนออกไป ดังแสดงในรูปที่ 5.8 ซึ่งอัตราการไหลของน้ำในท่อ ขนาดของท่อ อุณหภูมิของแม่พิมพ์และของน้ำเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้น โดยค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Convection heat transfer coefficient) อยู่ระหว่าง 100 ถึง 20,000 W/m²K [68] ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของน้ำในท่อหล่อเย็นอธิบายได้ด้วยสมการที่ 5.1



รูปที่ 5.8 การถ่ายเทความร้อนของชิ้นงานไปยังน้ำในท่อหล่อเย็นแม่พิมพ์ [69]

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad \text{Eq. 5.1}$$

ค่า h คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน ($\text{W/m}^2\text{K}$), ค่า k คือ ค่าการนำความร้อนของน้ำ ($\text{W/m}\cdot\text{K}$), D คือ ขนาดของท่อหล่อเย็น (m) และ Nu คือ Nusselt Number (-) และเนื่องจากในที่นี้ $L/D > 10$ เมื่อ L คือความยาวของท่อหล่อเย็น (m) ซึ่งสามารถใช้ Sieder –Tate equation ในการหา Nu ได้ดังสมการที่ 5.2 [70]

$$Nu = (0.027) Re^{0.8} Pr^{1/3} \left(\frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0.14} \quad \text{Eq. 5.2}$$

ค่า Re คือ ค่า Reynolds Number (-) ซึ่งหาได้จากสมการ 5.3, Pr คือ Prandtl Number ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 0.7 ถึง 16,700 และ μ_b คือ ค่าความหนืดพลวัตของน้ำที่อุณหภูมิเฉลี่ย ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$) และ μ_s คือ ค่าความหนืดพลวัตของน้ำที่อุณหภูมิพื้นผิว ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$)

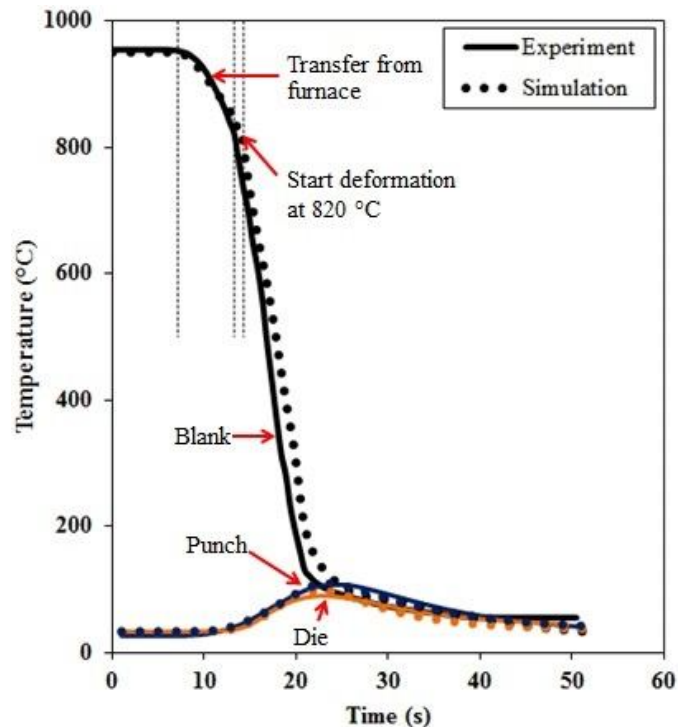
$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad \text{Eq. 5.3}$$

ค่า ρ คือ ความหนาแน่นของน้ำหล่อเย็น (kg/m^3), v คือ อัตราเร็วของน้ำหล่อเย็นในท่อ (m/s), และ μ คือความหนืดสัมบูรณ์ ($\text{N}\cdot\text{s/m}^2$), จากความสัมพันธ์ของทั้ง 3 สมการ พบว่าค่าอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนระหว่างแม่พิมพ์กับน้ำที่ไหลผ่านท่อเพิ่มสูงขึ้นและจะส่งผลต่ออุณหภูมิของแม่พิมพ์ให้ลดลงได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

5.2 อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานและแม่พิมพ์

5.2.1 อัตราการเย็นตัวของชิ้นงาน

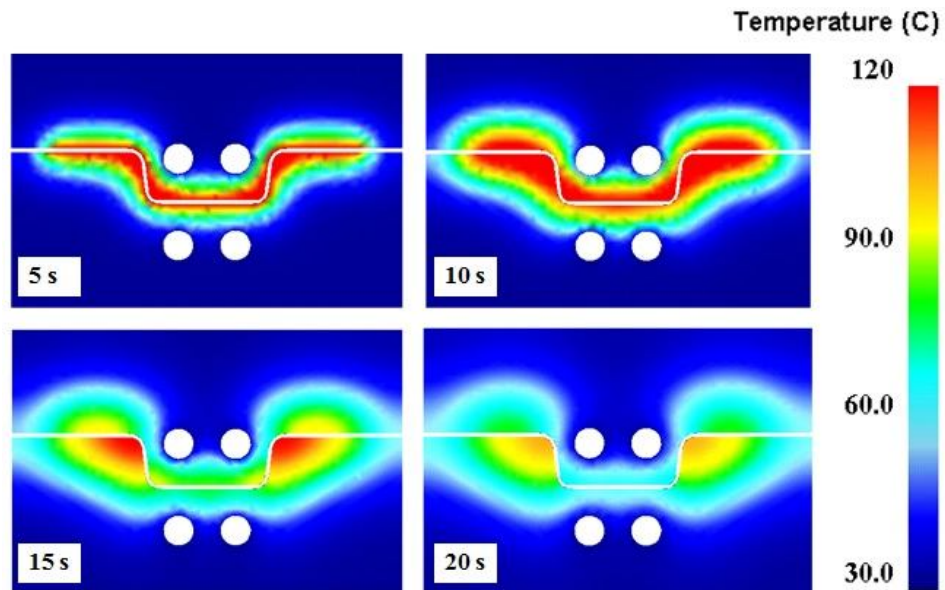
ผลของอัตราการเย็นของชิ้นงานและอุณหภูมิของแม่พิมพ์ที่ในระหว่างการขึ้นรูปชิ้นงานจริงเทียบกับผลการจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงในรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานและอุณหภูมิแม่พิมพ์ที่คำนวณด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ให้ผลที่ใกล้เคียงกับการขึ้นรูปจริงในช่วงหลังจากชิ้นงานนำออกจากเตาจนเข้าสู่ขั้นตอนการขึ้นรูป อุณหภูมิของชิ้นงานที่ทำนายโดยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์มีค่าที่สูงกว่าการทดลองขึ้นรูปจริงเพียงเล็กน้อย เมื่อชิ้นงานผ่านการขึ้นรูปเสร็จสิ้นแล้วอุณหภูมิของชิ้นงานจะลดลงอย่างรวดเร็วผลของอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจากแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ต่ำกว่าอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานจากการขึ้นรูปจริงเล็กน้อย ความคลาดเคลื่อนดังกล่าวเกิดจากค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (Heat transfer coefficient) ของผิวชิ้นงานที่สัมผัสกับแม่พิมพ์ที่ใช้ในการคำนวณ



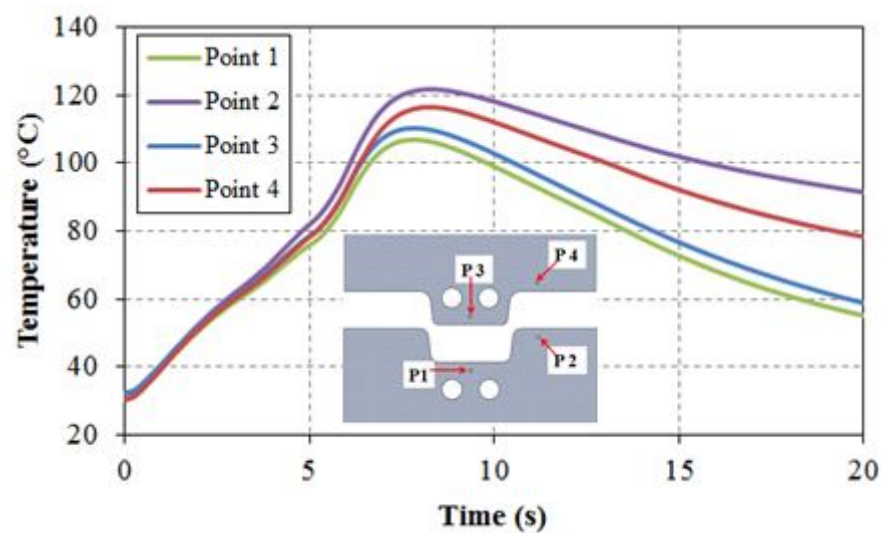
รูปที่ 5.9 การเปรียบเทียบผลอัตราการเย็นตัวของชิ้นงานและอุณหภูมิของแม่พิมพ์จากการทดลองกับแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

5.2.2 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์

ในหัวข้อนี้ได้ทำการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ โดยผลของการกระจายตัวของอุณหภูมิที่สะสมบนแม่พิมพ์ที่คำนวณ ได้แสดงดังรูปที่ 5.10 โดยผลที่แสดงเป็นการกระจายตัวของอุณหภูมิในแม่พิมพ์ที่มีที่ระบายความร้อนขณะเวลาที่ต่างกันหลังจากขึ้นรูปเสร็จสมบูรณ์ โดยใช้เวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์รวมทั้งสิ้น 20 วินาที ผลการคำนวณการถ่ายเทความร้อนจากชิ้นงานไปสู่แม่พิมพ์จะสังเกตเห็นได้ว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์จะลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาเพิ่มมากขึ้น และบริเวณที่ใกล้กับที่ระบายความร้อนเช่นบริเวณ Bottom area จะสามารถถ่ายเทความร้อนได้ดีกว่าบริเวณที่อยู่ไกลจากที่ระบายความร้อนเช่นบริเวณ Flange area เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ การสะสมของอุณหภูมิบริเวณ Bottom ของแม่พิมพ์จะต่ำกว่าอุณหภูมิสะสมบริเวณ Flange ดังนั้นการออกแบบและพัฒนาแม่พิมพ์ที่ให้การระบายความร้อนที่เหมาะสมมีความสำคัญอย่างมากในการผลิตด้วยกระบวนการขึ้นรูปร้อน รูปที่ 5.11 แสดงอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่มีที่ระบายความร้อนใน จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิของแม่พิมพ์ทั้งแม่พิมพ์ด้านบนและตัวล่างบริเวณ Bottom อุณหภูมิของแม่พิมพ์จะลดลงเร็วกว่าแม่พิมพ์บริเวณ Flange และมีอุณหภูมิต่างกันประมาณ 20°C เมื่อเวลาผ่านไป 20 วินาที เมื่อพิจารณาตำแหน่งที่ 2 พบว่ามีอุณหภูมิสะสมในแม่พิมพ์มากที่สุดเนื่องจากตำแหน่งนี้อยู่ไกลจากที่ระบายความร้อนมากที่สุด



รูปที่ 5.10 ผลการคำนวณการกระจายตัวของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่มีท่อระบายความร้อนในเวลาต่างกัน (5, 10, 15 และ 20s)

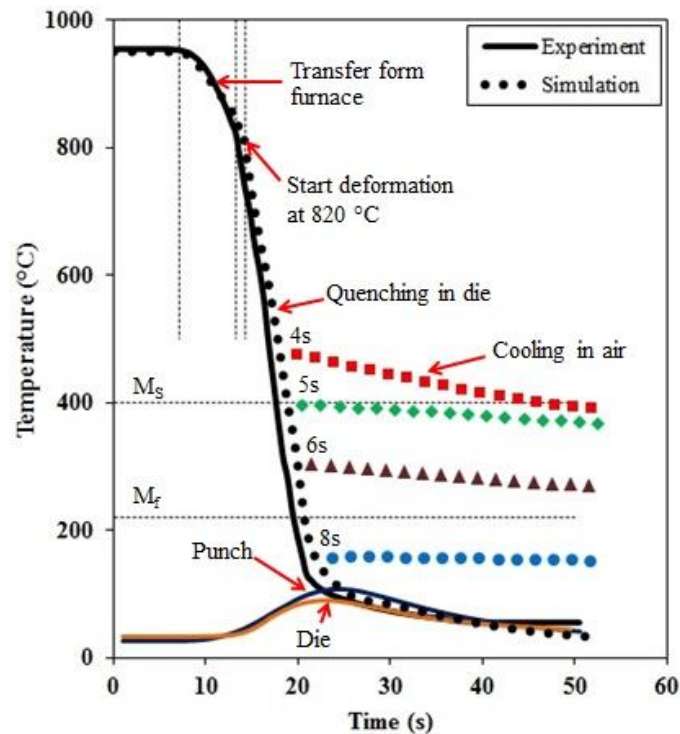


รูปที่ 5.11 ตำแหน่งของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในแม่พิมพ์ที่มีท่อระบายความร้อน

5.3 อิทธิพลของอัตราการเย็นตัวต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน

เพื่อทำนายผลของสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อน ในงานนี้ได้ ออกแบบการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ การเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ และหลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์มาเย็นตัวในอากาศ แสดงเป็น Profile ของอุณหภูมิ – เวลา ดังรูปที่ 5.12 หลังจากที่ยื่นงานเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4 วินาที จะเห็นว่าอุณหภูมิของชิ้นงาน ยังสูงกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดมาร์เทนไซต์ (M_s) เมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัว ในอากาศ (สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม สีต่างๆ) ในทำนองเดียวกันหลังจากที่ยื่นงานที่ยื่นตัวในแม่พิมพ์เป็น

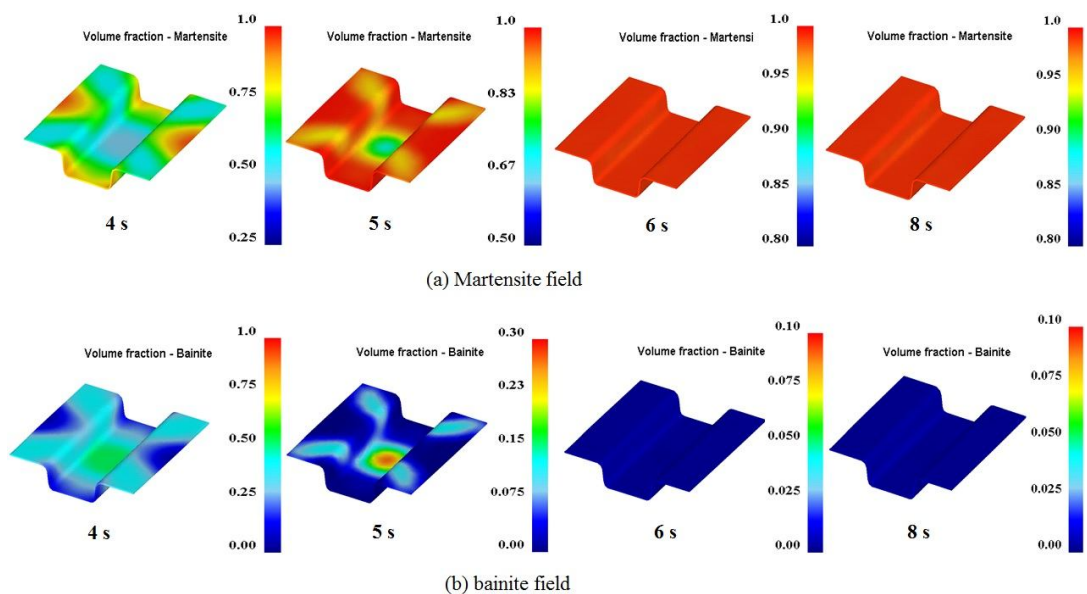
เวลา 5 วินาที อุณหภูมิของชิ้นงานมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิเริ่มเกิดมาร์เทนไซต์, นอกจากนั้นส่วนชิ้นงานที่เย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 6 วินาที อุณหภูมิของชิ้นงานอยู่ระหว่างอุณหภูมิเริ่มเกิดมาร์เทนไซต์และอุณหภูมิลิ้นสุดมาร์เทนไซต์ และสุดท้ายชิ้นงานที่เย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 8 วินาที อุณหภูมิของชิ้นงานจะต่ำกว่าอุณหภูมิลิ้นสุดมาร์เทนไซต์



รูปที่ 5.12 กราฟอุณหภูมิ-เวลาของการจำลองการขึ้นรูปร้อนโดยใช้เวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์และการเย็นตัวของชิ้นงานในอากาศแบบต่างๆ

การทำนายการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคในระหว่างการขึ้นรูปร้อนและการเย็นตัวของเหล็กโบรอนอาศัยข้อมูลจากแผนภาพ TTT จากรูปที่ 5.2 ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะเห็นได้ว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดมาร์เทนไซต์จะอยู่ที่ประมาณ 400 °C อัตราการเย็นตัววิกฤตของเหล็กกล้าโบรอนอยู่ที่ประมาณ 30 °C/s เมื่ออัตราการเย็นตัวของชิ้นงานสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตจะเกิดการเปลี่ยนเฟสออสเทนไนต์ (FCC) ไปเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (BCT) ได้อย่างสมบูรณ์เมื่อการเย็นตัวของชิ้นงานทำให้อุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิ M_f รูปที่ 5.13 แสดงผลการทำนายปริมาณโครงสร้างจุลภาคต่างๆ ที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่เย็นตัวในแม่พิมพ์ที่เวลาต่างๆ กันและต่อการเย็นตัวของชิ้นงานในอากาศเมื่อชิ้นงานเย็นตัวในแม่พิมพ์ 4 วินาที แล้วนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วให้ชิ้นงานเย็นตัวต่อในอากาศ จากผลการทำนายพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่เกิดขึ้นประกอบด้วยเฟสเบนไนต์ประมาณ 50% และเฟสมาร์เทนไซต์ประมาณ 50% ในทำนองเดียวกัน เมื่อปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในแม่พิมพ์ 5 วินาที แล้วนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วให้ชิ้นงานเย็นตัวต่อในอากาศพบว่าโครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานประกอบด้วยเฟสมาร์เทนไซต์เกือบทั้งชิ้นงาน และจะมีเฟสเบนไนต์เกิดขึ้นที่บริเวณตรงกลางของ

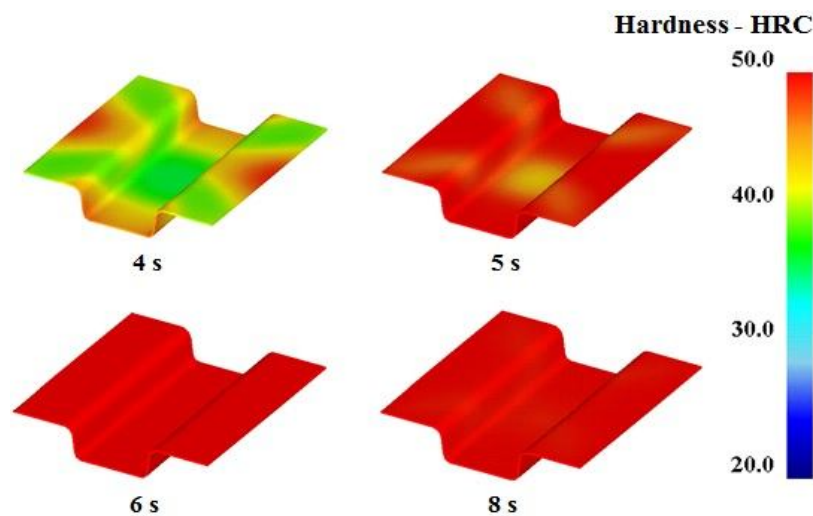
ชิ้นงาน (Bottom) เนื่องจากเมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ อุณหภูมิของชิ้นงานส่วนใหญ่อยู่ต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเฟสมาร์เทนไซต์ (M_s) จึงทำให้ชิ้นงานส่วนใหญ่มีเฟสมาร์เทนไซต์ แต่บริเวณตรงกลางของชิ้นงาน (Bottom) มีอัตราการเย็นตัวที่ช้ากว่าบริเวณอื่นๆ ทำให้บริเวณนี้เกิดเฟสเบนไนต์ และเมื่อปล่อยชิ้นงานให้เย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 6-8 วินาที แล้วนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์แล้วให้ชิ้นงานเย็นตัวต่อในอากาศ โครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในชิ้นงานเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ทั้งชิ้นงาน เนื่องจากอุณหภูมิของชิ้นงานที่ออกจากแม่พิมพ์ต่ำกว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดมาร์เทนไซต์ (M_s) จึงทำให้ชิ้นงานมีเฟสมาร์เทนไซต์อย่างสมบูรณ์



รูปที่ 5.13 ผลการทำนายการกระจายตัวของโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, 6, และ 8s และหลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ให้เย็นตัวในอากาศ

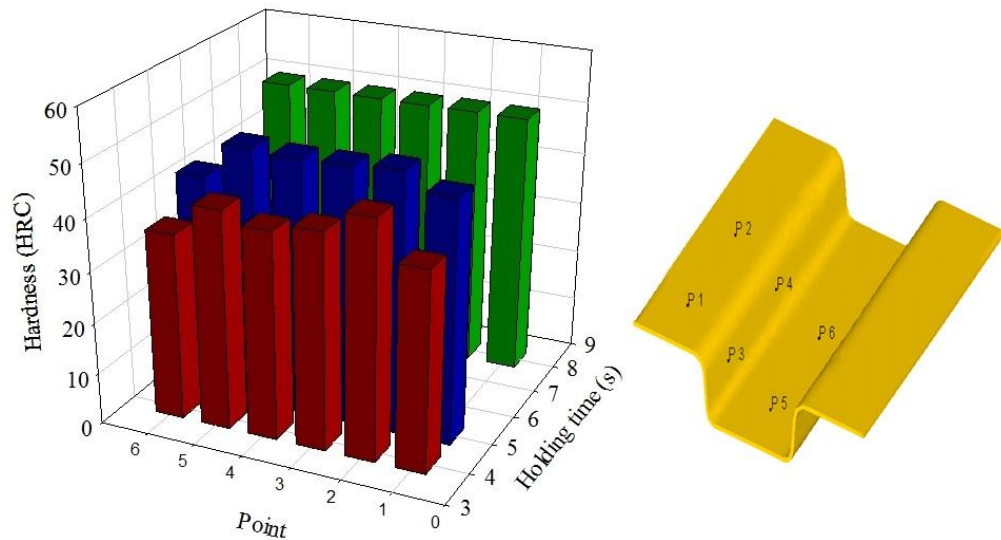
สำหรับการทำนายการกระจายตัวของความแข็งของชิ้นงานที่เย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, 6, และ 8s แล้วนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ การทำนายความแข็งจากแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์จะทำการคำนวณค่าความแข็งจากความแข็งของโครงสร้างต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง โดยกำหนดให้เฟสเบนไนต์และมาร์เทนไซต์มีความแข็งประมาณ 23 HRC และ 50 HRC ตามลำดับ รูปที่ 5.14 แสดงการผลคำนวณการกระจายตัวของความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, 6, และ 8s หลังจากนั้นนำชิ้นงานปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ จะสังเกตเห็นได้ว่าค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น เมื่อพิจารณาเวลาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ที่ 4 วินาที การค่าความแข็งจะอยู่ที่ระหว่าง 30-40 HRC ซึ่งสอดคล้องกับผลการทำนายโครงสร้างจุลภาคที่เกิดขึ้นในกรณีเดียวกัน สำหรับการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ที่ 5 วินาที จะเห็นว่าค่าความแข็งของชิ้นงานอยู่ประมาณ 50 HRC ยกเว้นที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงาน

(Bottom) ซึ่งจะมีค่าความแข็งประมาณ 45 HRC เนื่องจากบริเวณนี้เกิดโครงสร้างแบบเบนไนต์ด้วยสุดท้ายเมื่อพิจารณาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ในช่วง 6-8 วินาที ค่าของความแข็งที่ได้ของชิ้นงานอยู่ที่ประมาณ 50 HRC เมื่อพิจารณาผลของโครงสร้างจุลภาคและความแข็งที่ได้แล้ว ในการขึ้นรูปรีออนควรจะต้องให้เวลาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ไม่น้อยกว่า 8 วินาที เนื่องจากการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ในช่วง 6-7 วินาทีนั้น อุณหภูมิของชิ้นงานจะยังสูงกว่าจุดสิ้นสุดมาร์เทนไซต์ (M_s) และเมื่อนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ช่วงเวลานี้จะเกิดการบิดเบี้ยวของชิ้นงานเนื่องจากจะเกิดการเพิ่มขึ้นของปริมาตรประมาณ 3 % จากการบิดตัวของโครงสร้างจาก FCC ไปเป็น BCT [31]



รูปที่ 5.14 ผลการทำนายการกระจายตัวของความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปรีออนและเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, 6, และ 8s หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์มาปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

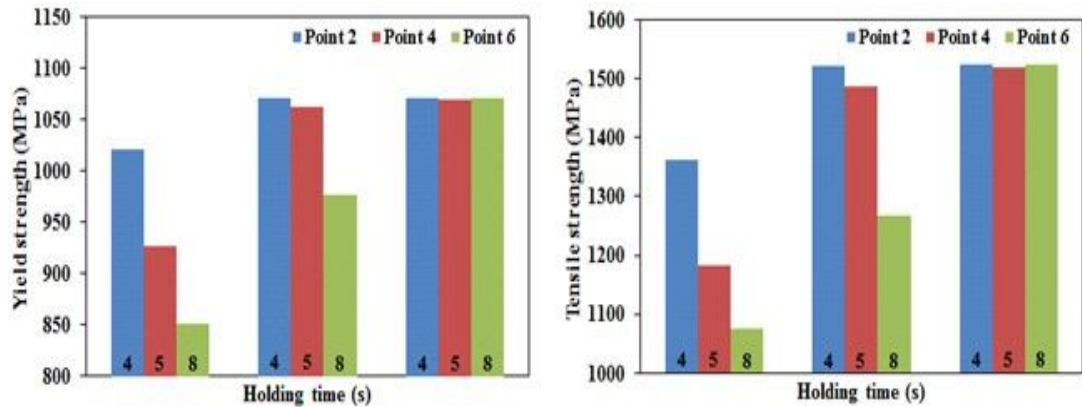
รูปที่ 5.15 แสดงผลการคำนวณค่าความแข็งของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปรีออนด้วยแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าบริเวณตรงกลางชิ้นงานที่ตำแหน่งที่ 6 (ตรงกลางของชิ้นงาน) มีค่าความแข็งที่ต่ำเมื่อเวลาการเย็นตัวในแม่พิมพ์ของชิ้นงานเป็น 4 และ 5 วินาที แต่เมื่อเวลาของการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้นเป็น 8 วินาที ความแข็งทุกจุดในชิ้นงานจะมีค่าความแข็งเท่ากันคือที่ประมาณ 50 HRC เพราะฉะนั้นการทำให้ชิ้นงานมีความแข็งที่สม่ำเสมอทั้งชิ้นงานจะต้องปล่อยให้ชิ้นงานเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลาที่เหมาะสม



รูปที่ 5.15 ผลการทำนายค่าความแข็งในตำแหน่งต่างๆ บนชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนและเย็นตัวในแม่พิมพ์ที่เวลา 4, 5, และ 8s หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์และปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ

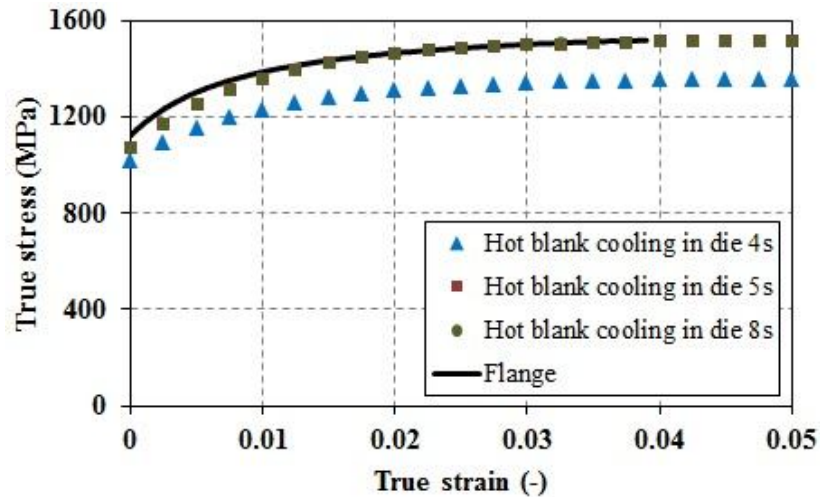
5.4 การทำนายสมบัติทางกลจากผลของแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการทำนายความแข็งด้วยแบบจำลองทางไฟไนต์เอลิเมนต์ของการขึ้นรูปร้อนของชิ้นงานที่ตำแหน่ง 2, 4 และ 6 จากรูปที่ 5.15 สามารถนำมาใช้ในการทำนายสมบัติทางกลของเหล็กด้วยโมเดล Voce ที่มีพารามิเตอร์ A , B และ n เป็นฟังก์ชันของค่าความแข็งจากตารางที่ 4.3 รูปที่ 5.16 (a) แสดงผลการทำนายค่า yield strength ของชิ้นงานที่ตำแหน่ง 2, 4 และ 6 หลังการขึ้นรูปและที่เย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ พบว่าค่า yield strength เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น และการทำนายค่า tensile strength ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่ตำแหน่ง 2, 4 และ 6 และเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s แสดงดังรูปที่ 5.16 (b) พบว่าค่า tensile strength เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาในการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์สูงขึ้น ผลของความแม่นยำการทำนาย yield strength และ tensile strength มีค่าเพิ่มสูงขึ้นนั้นมาจากสมการเส้นตรง (Linear equation) และสมการพหุนาม (Polynomial equations) จากสมการที่ 3.5-3.7



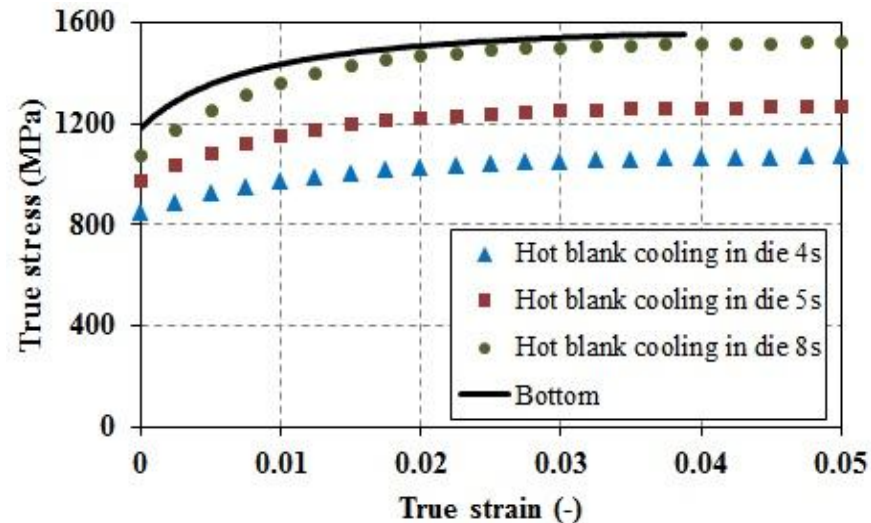
รูปที่ 5.16 (a) ผลการทำนายค่า yield strength (A) และ (b) ผลการทำนายค่า tensile strength (B) ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนตำแหน่ง 2, 4 และ 6 และเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s หลังจากนั้นจึงนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศด้วยโมเดลของ Voce

ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงด้วย Voce โมเดลโดยอาศัยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงจากไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งปีก (Flange) และเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศโดยให้ตำแหน่งที่ 2 เป็นตัวแทนของบริเวณ Flange แสดงดังรูปที่ 5.17 พบว่าการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงด้วย Voce โมเดลโดยอาศัยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงจากไฟไนต์เอลิเมนต์เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์นานขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดที่ได้จาก Voce โมเดลโดยอาศัยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงจากไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเวลาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ตั้งแต่ 5 วินาทีขึ้นไปจะได้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง เนื่องจากความแข็งแรงของชิ้นงานที่เย็นตัวในตั้งแต่ 5 วินาทีขึ้นไปมีค่าประมาณ 50 HRC ถึงแม้ว่าจะให้เวลาของชิ้นงานเย็นตัวในแม่พิมพ์นานขึ้น ค่าความแข็งแรงของชิ้นงานจะไม่เพิ่มสูงขึ้นอีก เนื่องจากโครงสร้างบริเวณนี้เป็นเฟสมาร์เทนไซต์ตั้งแต่วินาทีที่ 5 ทำให้ค่าความแข็งแรงไม่เพิ่มสูงขึ้น



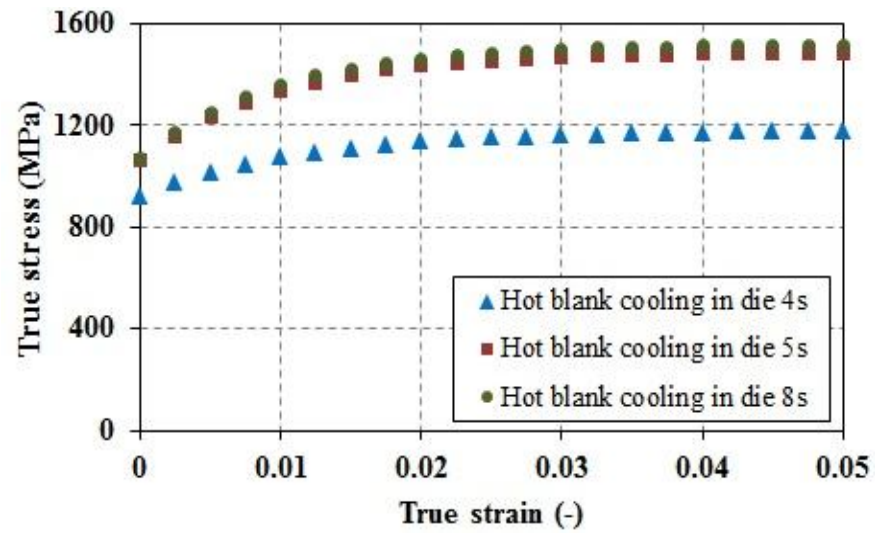
รูปที่ 5.17 ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งปีก (Flange) หลังการเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s และนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพื่อเย็นตัวในอากาศเทียบกับผลการทดลองกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งปีก (Flange)

ผลการการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงด้วย Voce โมเดลโดยอาศัยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงจากไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งตรงกลาง (Bottom) และเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ โดยให้ตำแหน่งที่ 6 เป็นตัวแทนของบริเวณ Bottom แสดงดังรูปที่ 5.18 พบว่าการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงด้วย Voce โมเดลโดยอาศัยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงจากไฟไนต์เอลิเมนต์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์นานขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองการทำนายกราฟความเค้นความเครียดที่ได้จาก Voce โมเดลโดยอาศัยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงจากไฟไนต์เอลิเมนต์พบว่าเวลาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ตั้งแต่ 8 วินาทีขึ้นไปจะได้ผลการทำนายที่ใกล้เคียงกับการทดลองจริง และเมื่อพิจารณา True strain ในช่วง 0-0.01 จะเห็นได้ว่าค่าความเค้น (Stress) จากการทดลองจะสูงกว่าความเค้นที่ได้จากแบบจำลองเนื่องจากกลุ่มของมาเทนไซต์ที่บริเวณ Bottom มีขนาดที่แตกต่างกับบริเวณปีก (Flange) โดยที่บริเวณตรงกลางของชิ้นงานมีกลุ่มของมาเทนไซต์ที่มีขนาดที่ละเอียดกว่าบริเวณปีกของชิ้นงานส่งผลให้สมบัติทางกลมีความแตกต่างกัน ดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.2 ดังนั้นการใช้โมเดลของ Voce มาประยุกต์ใช้จึงมีความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นในช่วง Strain ต่ำๆ



รูปที่ 5.18 ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งตรงกลาง (Bottom) หลังการเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s และนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพื่อเย็นตัวในอากาศเทียบกับกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งตรงกลาง (Bottom)

ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงด้วย Voce โมเดลโดยอาศัยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงจากไฟไนต์เอลิเมนต์ของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนที่บริเวณตำแหน่งด้านข้าง (Wall) และเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s หลังจากนั้นนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ปล่อยให้เย็นตัวในอากาศ โดยให้ตำแหน่งที่ 4 เป็นตัวแทนของบริเวณ Wall แสดงดังรูปที่ 5.19 พบว่าการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงด้วย Voce โมเดลโดยอาศัยผลการคำนวณค่าความแข็งแรงจากไฟไนต์เอลิเมนต์เพิ่มสูงขึ้นเมื่อเวลาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์นานขึ้นและเวลาการเย็นตัวของชิ้นงานในแม่พิมพ์ตั้งแต่ 8 วินาทีขึ้นไปจะได้ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดสูงที่สุด เนื่องจากความแข็งของชิ้นงานที่เย็นตัวตั้งแต่ 8 วินาทีขึ้นไปมีค่าประมาณ 50 HRC ถึงแม้ว่าจะให้เวลาของชิ้นงานเย็นตัวในแม่พิมพ์เพิ่มขึ้น ค่าความแข็งของชิ้นงานไม่เพิ่มสูงขึ้นอีกเพราะเกิดเฟสมาร์เทนไซต์สมบูรณ์แล้ว



รูปที่ 5.19 ผลการทำนายกราฟความเค้นความเครียดจริงของชิ้นงานที่ผ่านการขึ้นรูปร้อนบริเวณตำแหน่งด้านข้าง (Wall) หลังการเย็นตัวในแม่พิมพ์เป็นเวลา 4, 5, และ 8s และนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์เพื่อเย็นตัวในอากาศ