บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การวิจัยนี้ถูกจัดกระทำเพื่อทดสอบสมมติฐานที่ว่ามีความแตกต่างของอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อน 2 ขั้นตอนและผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนเดียว โดยอาศัยค่าสถิติ ที เทสต์ทำการเปรียบเทียบ โดยได้เลือกใช้ลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol® จากบริษัท 3M/Unitek ซึ่งวิเคราะห์อัตราส่วนอะตอมระหว่างนิกเกิลและไทเทเนียม โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเลกตรอนชนิดส่องกราด อยู่ที่ อะตอมนิกเกิลร้อยละ 55.88 และอะตอมไทเทเนียมร้อยละ 44.12 แต่เนื่องจากลวดที่ได้รับมา (as-received condition) เป็นลวดที่ไม่แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานที่แสดงให้เห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้น ซึ่งก็ตรงกับที่ Waters[11] รายงานไว้ว่าลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol® ของบริษัท 3M/Unitek เป็นลวดที่มีคุณสมบัติเป็นผลึกมาร์เทนไซต์ที่เสถียร อันเกิดขึ้นจากการดึงลวดเป็นเส้นในขณะผลิตทำให้ลวดมีความเค้น (stress) อยู่ในตัว ทำให้ไม่มีคุณสมบัติของปรากฏการณ์จำรูป [5] และ ความยืดหยุ่นยิ่งยวด[14] แต่ Kusy[5] รายงานว่าสามารถทำให้ ปรากฏการณ์จำรูปกลับคืนมาได้โดยการอบชุบด้วยความร้อน ซึ่งหมายความว่าทำให้มีการเปลี่ยนแปลงระหว่างเฟสทั้งสองของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมเกิดขึ้นได้อีกครั้งนั่นเอง ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงต้องออกแบบให้มีการอบชุบด้วยความร้อน 2 ขั้นตอนโดยที่ขั้นตอนแรกจะเป็นการจัดกระทำเพื่อลดความเค้นทั้งที่เกิดจากการดึงลวดเป็นเส้นในขณะผลิตซึ่งอาจที่จะไม่เท่ากันในแต่ละเส้นหรือความเค้นที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการตัดลวดและปรับคุณสมบัติให้ลวดที่ได้รับมา มาอยู่ในระดับหรือคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกัน ส่วนขั้นตอนที่ 2 จึงเป็นการอบชุบด้วยความร้อนเพื่อการศึกษาและอธิบายผลของการวิจัย โดยเปรียบเทียบผลกับกลุ่มควบคุมซึ่งเป็นลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียม Nitinol® ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนแรกขั้นตอนเดียว

อุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิล ไทเทเนียมประกอบด้วยอุณหภูมิค่าต่างๆ ดังนี้

1. อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ (martensitic start : M_s)
2. อุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด (martensitic finish : M_f)
3. อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์ (austenitic start : A_s)
4. อุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุด (austenitic finish : A_f)

การทดสอบสมมติฐานโดยอาศัยค่าสถิติ ที เทสต์ นี้กระทำโดยซอฟท์แวร์ SPSS รุ่นที่ 6 บนระบบปฏิบัติการวินโดว์

การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์

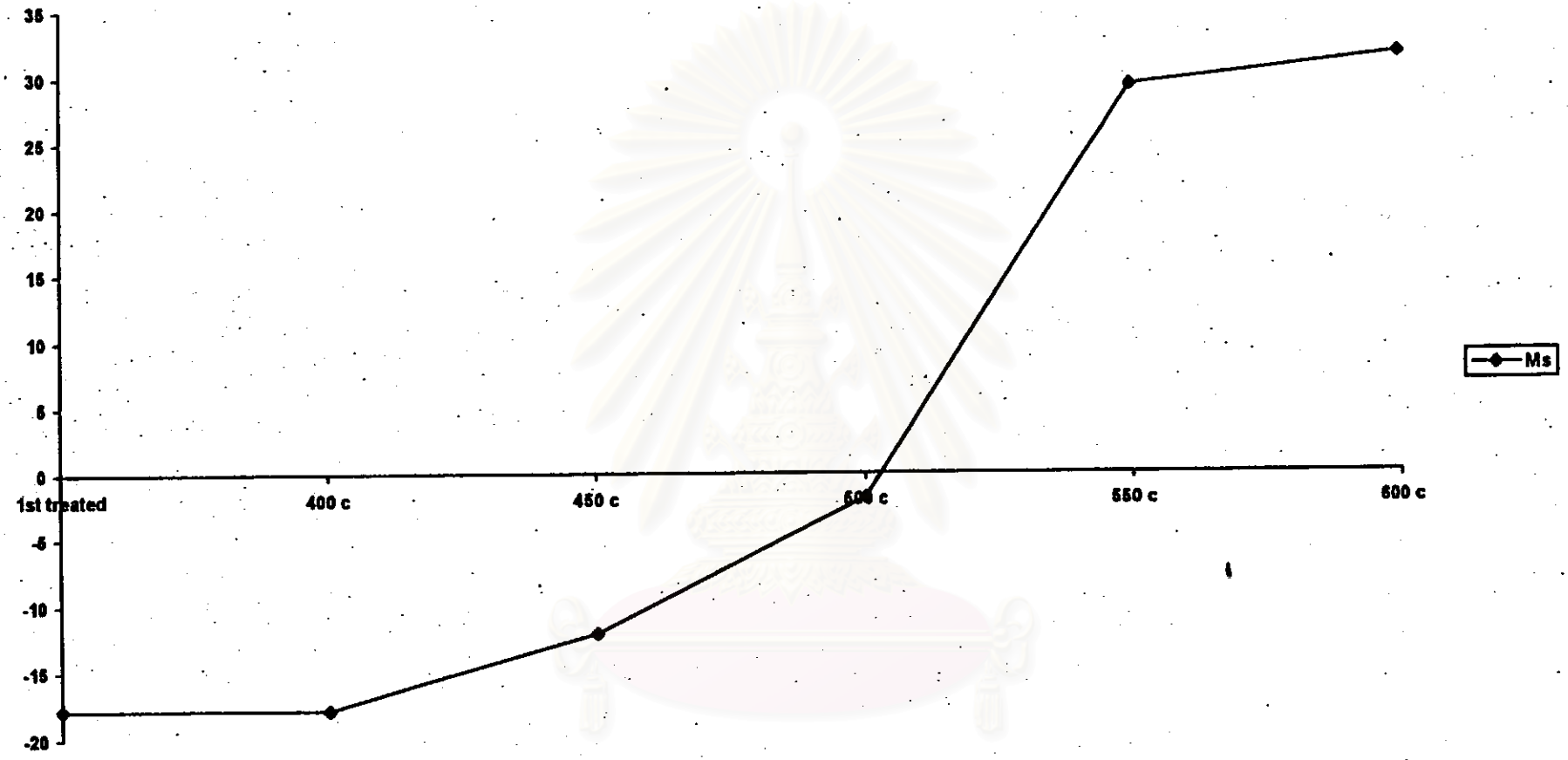
กลุ่มที่	การอบชุบด้วยความร้อน	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ($^{\circ}$ซ)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
1	ขั้นตอนที่ 1 (ควบคุม)	3	-17.8070	.234	.135
2	ขั้นตอนที่ 1+2/400°ซ	3	-17.8620	.735	.424
3	ขั้นตอนที่ 1+2/450°ซ	3	-12.1123	.380	.219
4	ขั้นตอนที่ 1+2/500°ซ	3	-1.8627	.392	.226
5	ขั้นตอนที่ 1+2/550°ซ	3	29.4077	.110	.064
6	ขั้นตอนที่ 1+2/600°ซ	3	31.7187	.025	.014

ตารางที่ 2 แสดงค่าทางสถิติของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

เปรียบเทียบระหว่าง		ค่าสถิติ ที	การแปลผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
กลุ่มที่ 1 กับ	กลุ่มที่ 2	0.12	ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 3	-22.12	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 4	-60.50	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 5	-316.36	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 6	-364.96	มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 3 แสดงการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติ ที เทสต์ของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 21 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนสู่เฟสมาร์เทนไซต์ของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด

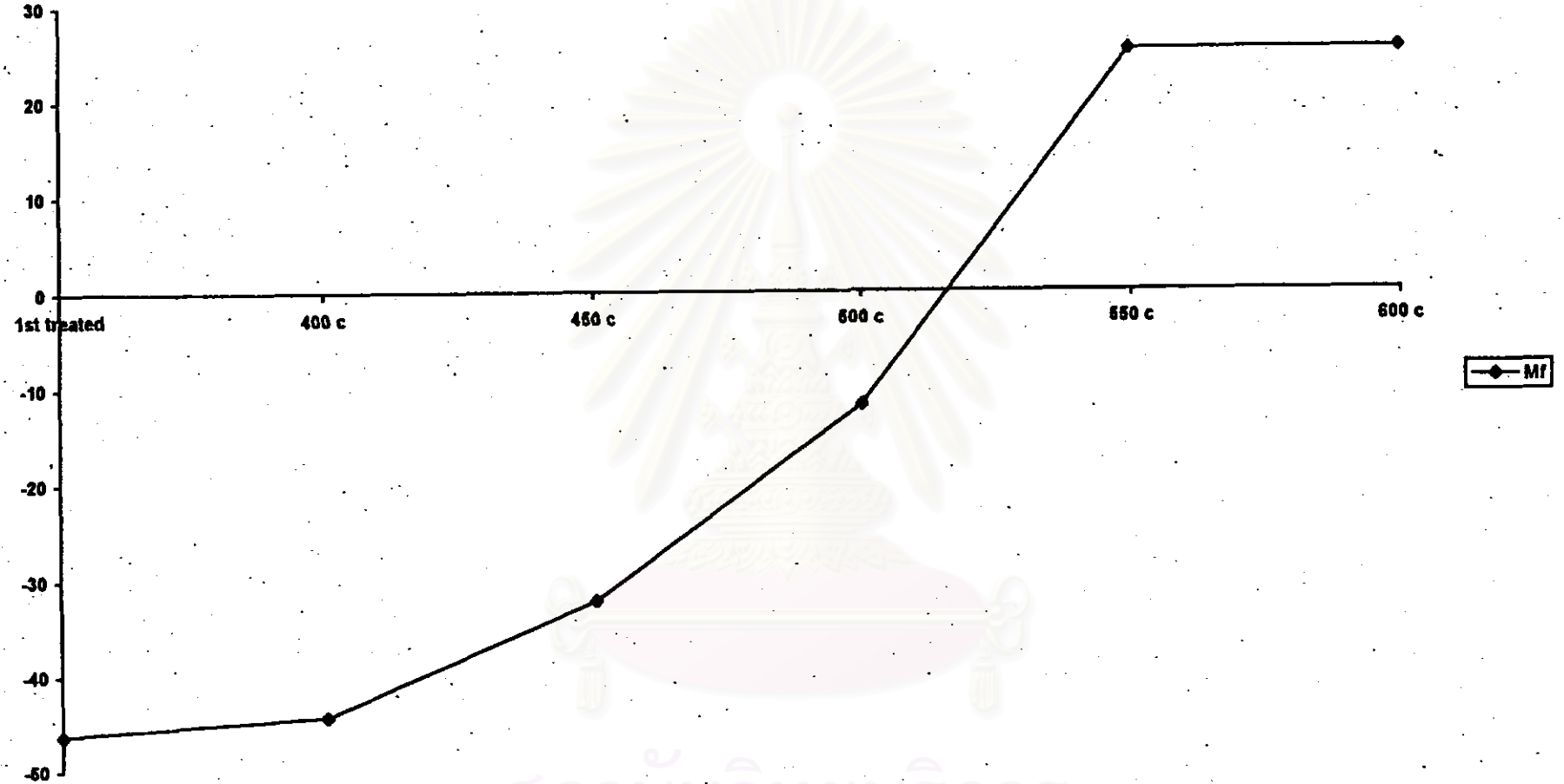
กลุ่มที่	การอบชุบด้วยความร้อน	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ($^{\circ}$ซ)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
1	ขั้นตอนที่ 1 (ควบคุม)	3	-46.3017	.511	.295
2	ขั้นตอนที่ 1+2/400°ซ	3	-44.4793	.820	.473
3	ขั้นตอนที่ 1+2/450°ซ	3	-32.3120	1.131	.653
4	ขั้นตอนที่ 1+2/500°ซ	3	-11.7850	.693	.400
5	ขั้นตอนที่ 1+2/550°ซ	3	25.3050	1.042	.601
6	ขั้นตอนที่ 1+2/600°ซ	3	25.4540	.212	.122

ตารางที่ 4 แสดงค่าทางสถิติของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

เปรียบเทียบระหว่าง		ค่าสถิติ ที	การแปลผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
กลุ่มที่ 1 กับ	กลุ่มที่ 2	-3.27	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 3	-19.53	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 4	-69.47	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 5	-106.90	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 6	-224.82	มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติ ที เทสต์ของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 22 แสดงค่าเฉลี่ยอุณหภูมิที่การเปลี่ยนสู่เฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุดของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์

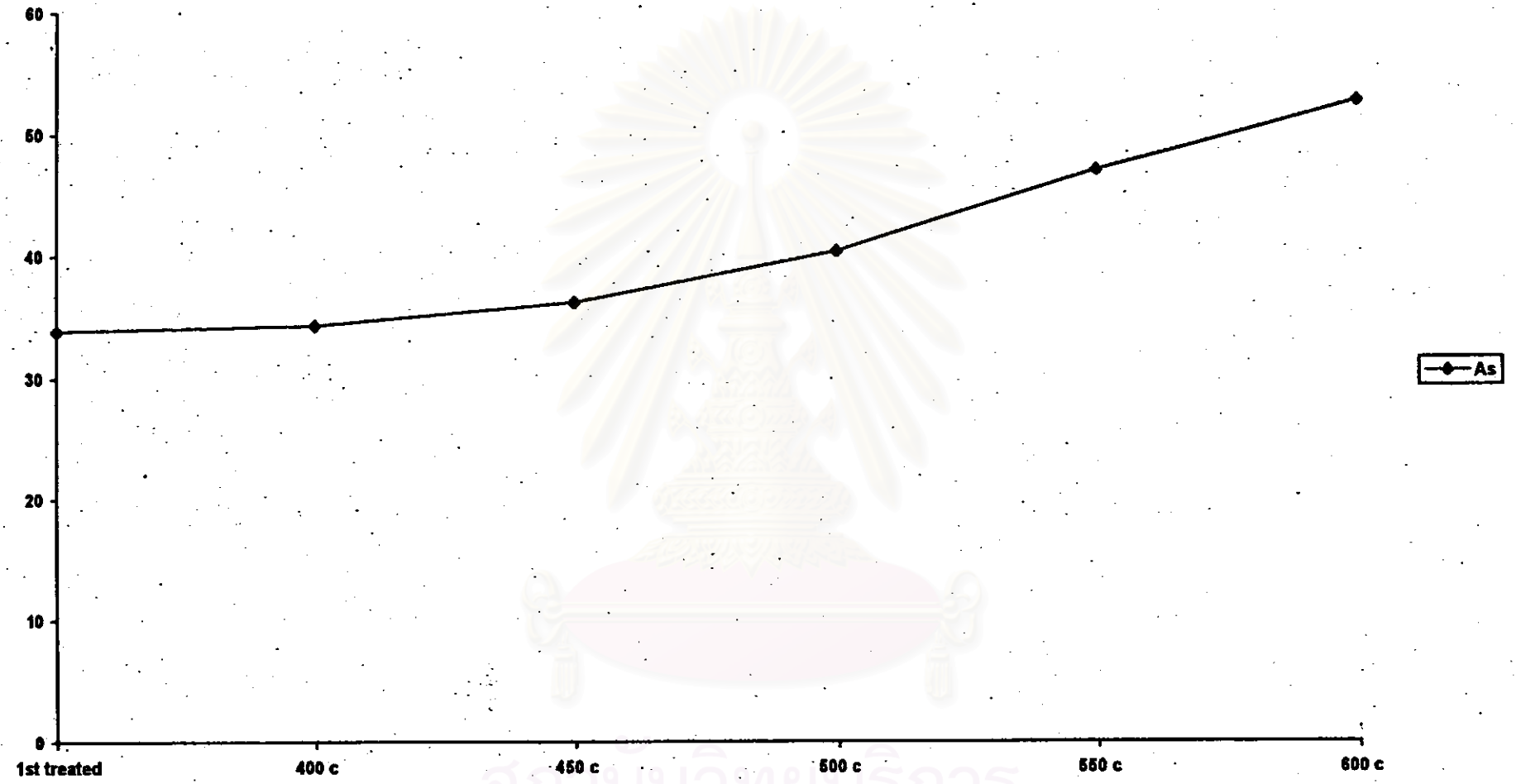
กลุ่มที่	การอบชุบด้วยความร้อน	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ($^{\circ}$ซ)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
1	ขั้นตอนที่ 1 (ควบคุม)	3	33.8790	.433	.250
2	ขั้นตอนที่ 1+2/400°ซ	3	34.3673	1.245	.719
3	ขั้นตอนที่ 1+2/450°ซ	3	36.2483	1.917	1.107
4	ขั้นตอนที่ 1+2/500°ซ	3	40.4030	.276	.159
5	ขั้นตอนที่ 1+2/550°ซ	3	47.1237	.973	.562
6	ขั้นตอนที่ 1+2/600°ซ	3	52.7890	.303	.175

ตารางที่ 6 แสดงค่าทางสถิติของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

เปรียบเทียบระหว่าง		ค่าสถิติ ที	การแปลผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
กลุ่มที่ 1 กับ	กลุ่มที่ 2	-0.64	ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 3	-2.09	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 4	-22.01	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 5	-21.54	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 6	-61.99	มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติ ที เทสต์ของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 23 แสดงค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนสู่เฟสออสเทไนท์ของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเปรียบเทียบอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุด

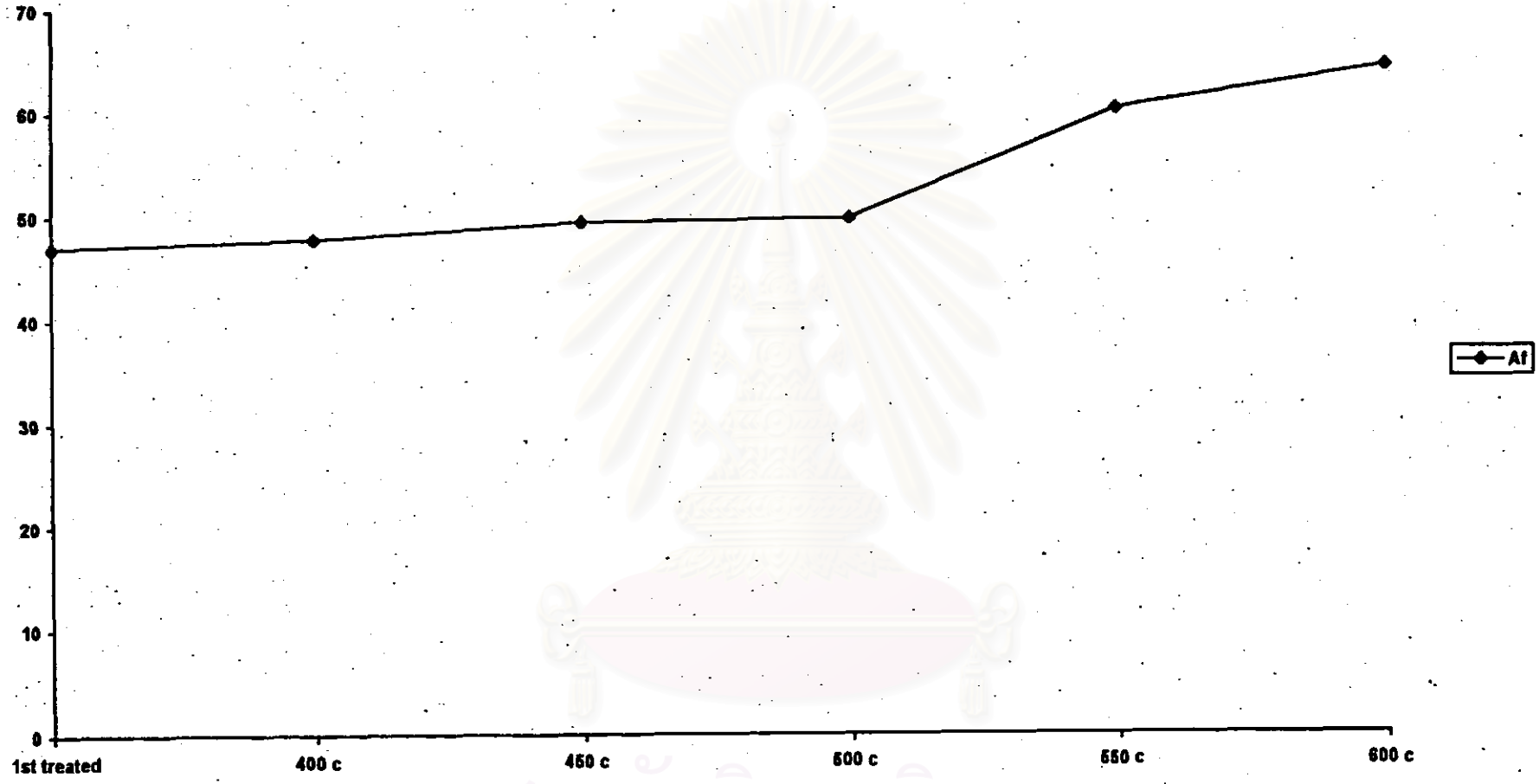
กลุ่มที่	การอบชุบด้วยความร้อน	จำนวนตัวอย่าง	ค่าเฉลี่ยเลขคณิต (^{0}ซ)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน
1	ขั้นตอนที่ 1 (ควบคุม)	3	46.9710	.392	.226
2	ขั้นตอนที่ 1+2/400^{0}ซ	3	47.8413	.314	.181
3	ขั้นตอนที่ 1+2/450^{0}ซ	3	49.4330	.573	.331
4	ขั้นตอนที่ 1+2/500^{0}ซ	3	49.7693	.111	.064
5	ขั้นตอนที่ 1+2/550^{0}ซ	3	60.2687	.532	.307
6	ขั้นตอนที่ 1+2/600^{0}ซ	3	64.3773	.168	.097

ตารางที่ 8 แสดงค่าทางสถิติของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุด ที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

เปรียบเทียบระหว่าง		ค่าสถิติ ที	การแปลผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
กลุ่มที่ 1 กับ	กลุ่มที่ 2	-3.00	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 3	-6.14	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 4	-11.90	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 5	-34.86	มีความแตกต่างกันทางสถิติ
	กลุ่มที่ 6	-70.68	มีความแตกต่างกันทางสถิติ

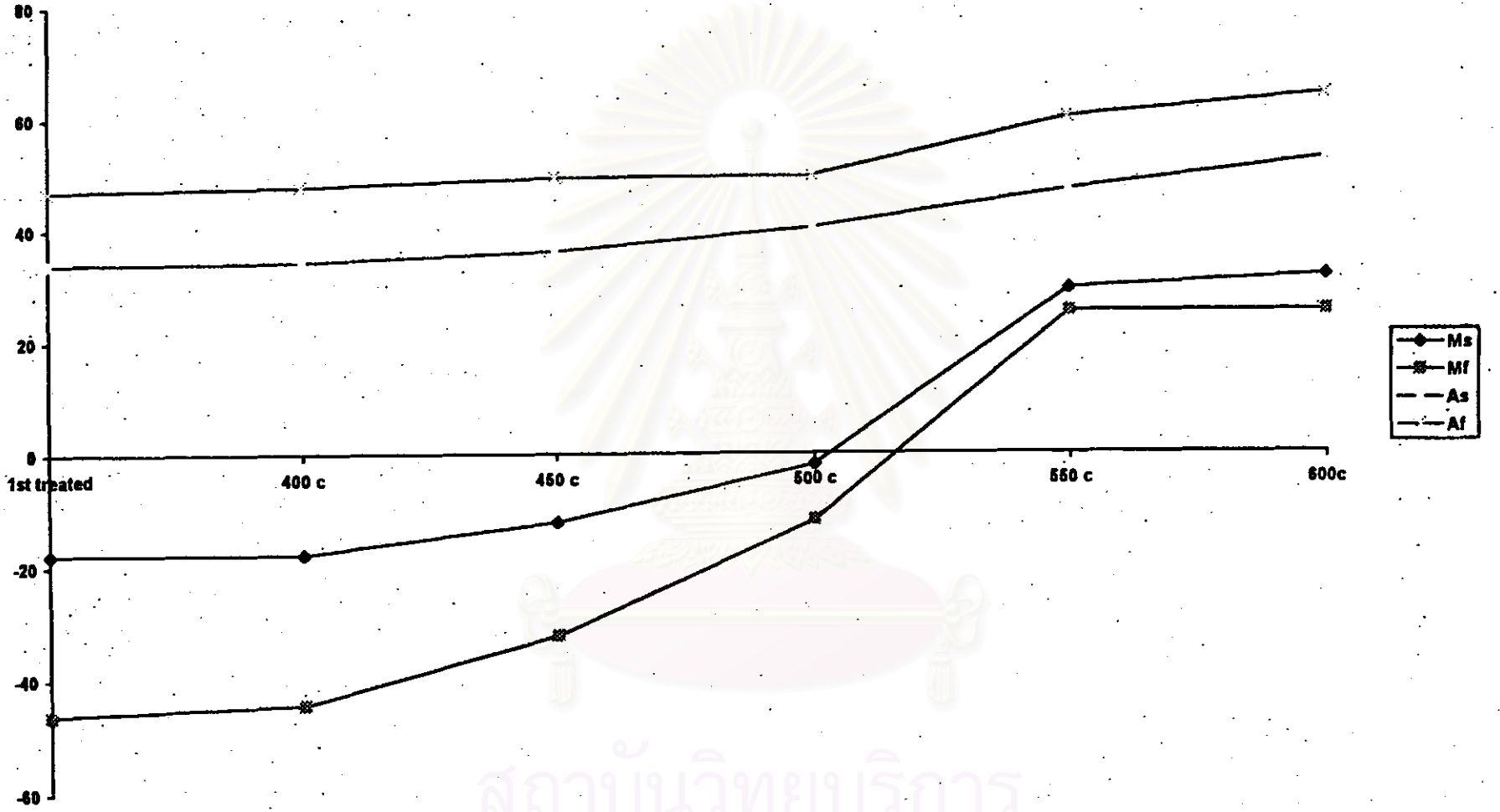
ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบด้วยค่าสถิติ ที เทสต์ของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 24 แสดงค่าอุณหภูมิที่การเปลี่ยนสู่เฟสออสเทไนท์สิ้นสุดของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 25 แสดงค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมค่าต่างๆที่เปลี่ยนแปลงไปจากการอบชุบความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

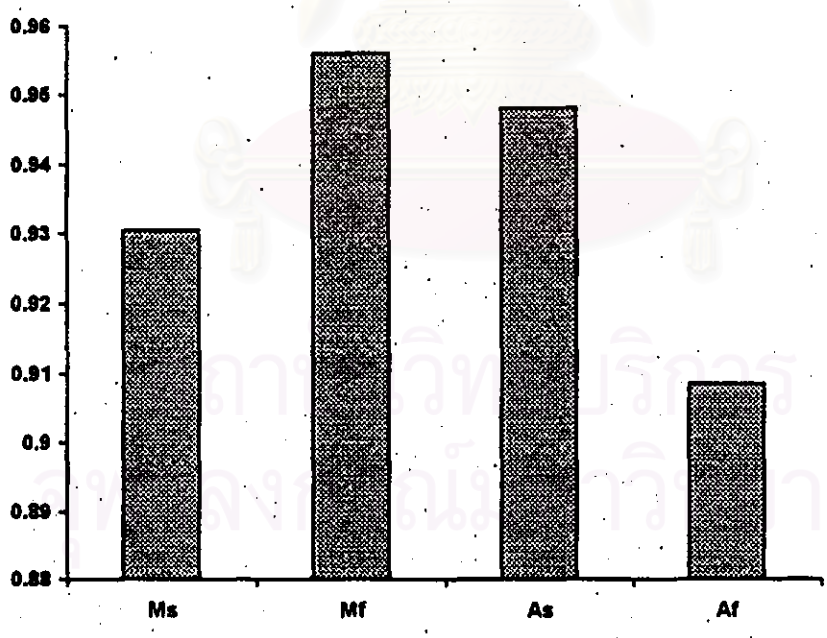
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดสอบความสัมพันธ์

เป็นการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสแต่ละค่ากับอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อนด้วยค่าสถิติ เพียร์สัน โพรดักต์ โมเมนต์พบว่า

ความสัมพันธ์กับ	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	การแปลผล
M_s	0.9306	มีความสัมพันธ์มากในทางบวก
M_f	0.9560	มีความสัมพันธ์มากในทางบวก
A_s	0.9480	มีความสัมพันธ์มากในทางบวก
A_f	0.9085	มีความสัมพันธ์มากในทางบวก

ตารางที่ 10 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสแต่ละค่ากับอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อน



รูปที่ 26 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสแต่ละค่ากับอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อน

วิจารณ์ผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่า กลุ่มที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 เท่ากับ 400°ซ นั้น อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติจากกลุ่มควบคุมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่อุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุดและอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุดนั้น มีความแตกต่างทางสถิติจากกลุ่มควบคุมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ส่วนกลุ่มที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 450, 500, 550 และ 600°ซ นั้นพบว่ามีความแตกต่างทางสถิติจากกลุ่มควบคุมที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งในอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์, อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์, อุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด และอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุด

ส่วนการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสแต่ละค่ากับอุณหภูมิการอบชุบด้วยความร้อนด้วยค่าสถิติเพียร์สัน โพรดักต์ โมเมนต์พบว่าค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสทุกค่ามีความสัมพันธ์ในทางบวก (positive correlation) กับอุณหภูมิของการอบชุบด้วยความร้อน ซึ่งหมายความว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการอบชุบด้วยความร้อนให้สูงขึ้น ค่าอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสทุกค่าก็เพิ่มสูงขึ้นด้วย

นอกจากนี้ เส้นกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ได้จากเครื่องดิฟเฟอเรนเชี่ยล สแกนนิง คาลอริมิเตอร์จากกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 1 และที่อุณหภูมิ 400, 450, 500 องศาเซลเซียสในขั้นตอนที่ 2 ยังแสดงให้เห็นถึงการการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่ชี้ให้เห็นการเกิดเฟสระหว่างกลาง (intermediate phase) ในระหว่างที่เครื่องดิฟเฟอเรนเชี่ยล สแกนนิง คาลอริมิเตอร์ทำงานในช่วงลดอุณหภูมิ (Cooling Phase) อีกด้วย

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสแต่ละค่าพบว่ามีความคล้ายคลึงกับการศึกษาที่มีอยู่ใน Shape Memory Alloys : Hiroyosu Funakubo - editor[12] โดยที่การศึกษาดังกล่าวมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิและเวลาในการบ่ม (aging) ต่ออุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสแต่ละค่าของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่มีปริมาณอะตอมนิกเกิลอยู่ร้อยละ 51 ซึ่งก็พบว่าทั้งอุณหภูมิและเวลาในการบ่ม มีผลทำให้อุณหภูมิของการเปลี่ยนเฟสแต่ละค่าของลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมดังกล่าวมีค่าสูงขึ้นเช่นเดียวกัน

การศึกษาดังกล่าวได้ให้เหตุผลว่า การบ่มทำให้มีการแยกตัวออกมา (precipitation) ของโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่มีปริมาณอะตอมนิกเกิลสูง (Supersaturated Ni) และเมื่อผล (product) ที่ได้จากการบ่มโตขึ้นๆก็จะมีการสูญเสียการยึดเหนี่ยวกับส่วนอื่น (Coherency with the matrix is lost) ความเครียดรอยต่อ (Interface strain) ก็ลดลงหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าต้นกำเนิดของความเค้นที่ควบคุมการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์หรือการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสระหว่างกลางถูกจำกัดลง

จากความรู้ที่ว่าการที่โลหะจำรูปมีความสามารถในการเปลี่ยนเฟสได้นั้นนอกจากจะอาศัยสมดุลของพลังงานอิสระทางเคมี (Chemical free energy) แล้วยังมีอิทธิพลของพลังงานระหว่างรอยต่อ (Interface energy) และ พลังงานจากความเครียด (Strain energy)ในรูปของ

แรงขับที่สมดุลของพลังงานอิสระทางเคมีจะต้องเอาชนะ หากแรงขับมีมากการเปลี่ยนแปลงจากเฟสดั้งเดิม (Parent phase)ไปสู่เฟสมาร์เทนไซต์อันเป็นเฟสที่มีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำก็จะเกิดที่อุณหภูมิต่ำกว่าแรงขับมีน้อย และเมื่อจากผลการวิจัยพบว่าอุณหภูมิ ที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ สูงขึ้นตามอุณหภูมิของการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่เพิ่มขึ้นก็อาจอธิบายได้ด้วยทฤษฎีที่ว่าด้วยแรงขับที่ลดลงดังที่กล่าวมาแล้ว

การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด ตามอุณหภูมิของการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่เพิ่มขึ้นอาจอธิบายได้ด้วยคุณสมบัติของโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่เป็นโลหะจำรูปชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ชนิดเทอร์โมอิลาสติก กล่าวคือผลึกมาร์เทนไซต์จะเกิดการขยายขนาดขึ้นเป็นอัตราส่วนกับการลดลงของอุณหภูมิ ซึ่งในการวิจัยนี้การทำงานในช่วงลดอุณหภูมิเครื่องดิฟเฟอเรนเชี่ยล สแกนนิง คาลอริมิเตอร์ ถูกกำหนดให้มีความเร็วเท่ากันหมดคือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ดังนั้นอาจเป็นได้ที่ว่าลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่มีอุณหภูมิ ที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ อันหมายถึงจุดเริ่มการเกิดการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ เกิดที่อุณหภูมิสูงกว่าก็จะมีการขยายขนาดของผลึกมาร์เทนไซต์จนสิ้นสุดได้ก่อนเช่นเดียวกัน นั่นหมายความว่าอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุดก็จะมีค่าที่สูงกว่าเช่นเดียวกัน นอกจากนี้พลังงานความร้อนที่ให้ขณะอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิสูงๆ ย่อมมีผลในการลดความเค้นและความเครียดที่อาจควบคุมการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์ได้มากกว่าพลังงานความร้อนที่ให้ที่อุณหภูมิต่ำๆ จึงทำให้การเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์เกิดได้ง่ายขึ้น การขยายขนาดของผลึกมาร์เทนไซต์เกิดได้เร็วขึ้น ช่วงความกว้างระหว่างอุณหภูมิ ที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์และอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุดในลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิสูงกว่าจึงมีช่วงที่แคบกว่าลวดโลหะนิกเกิลไทเทเนียมที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิต่ำกว่า

การเกิดการสูงขึ้นของอุณหภูมิ ที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์ และ ที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุดในช่วงกราฟเพิ่มอุณหภูมิของเครื่องดิฟเฟอเรนเชี่ยล สแกนนิง คาลอริมิเตอร์ ก็สามารถใช้หลักทางอุณหพลศาสตร์ของโลหะจำรูปได้เช่นเดียวกัน กล่าวคือในสมดุลของของพลังงานอิสระทางเคมีระหว่างเฟสดั้งเดิมและเฟสมาร์เทนไซต์ของโลหะจำรูปชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงสู่เฟสมาร์เทนไซต์แบบเทอร์โมอิลาสติกจะมีค่าอุณหภูมิที่เป็นจุดสมดุลอยู่ 2 ค่าคือ T_0 ซึ่งจะอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างระหว่างอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ และอุณหภูมิ ที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุด และ T_0' ซึ่งจะอยู่ ณ ตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างระหว่างอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุด และอุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์ เมื่อพลังงานความร้อนที่ให้ขณะอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 มีผลต่อสมดุลและองค์ประกอบของพลังงาน ทำให้อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์ และอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสมาร์เทนไซต์สิ้นสุดเปลี่ยนแปลงก็จะมีผลทำให้ T_0 , T_0' , อุณหภูมิที่เริ่มเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์และอุณหภูมิที่การเปลี่ยนเฟสเป็นเฟสออสเทไนท์สิ้นสุดเปลี่ยนแปลงไปด้วยในทำนองเดียวกัน

ส่วนการพบเฟสระหว่างกลาง ในระหว่างที่เครื่องดิฟเฟอเรนเชี่ยล สแกนนิง คาลอริมิเตอร์ทำงานในช่วงลดอุณหภูมิ (cooling phase) ในกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 1 และที่อุณหภูมิ 400, 450, 500 องศาเซลเซียสในขั้นตอนที่ 2 นั้นอาจอธิบายได้ว่า ถึงแม้การเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างเฟสของโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมจะเกิดเฟสระหว่างกลางที่มีรูปผลึกเป็น rhombohedral (r-phase)[12] แต่ดังที่ได้กล่าวแล้วว่าการอบชุบด้วยความร้อนมีอิทธิพลต่อพลังงานระหว่างรอยต่อและพลังงานจากความเครียดอันเป็นต้นกำเนิดของความเค้นที่เป็นปัจจัยควบคุมการเปลี่ยนแปลงเฟส ทำให้ช่วงการเกิดเฟสระหว่างกลางนั้นขยับไปในทิศทางที่อุณหภูมิสูงขึ้นเช่นเดียวกับการเกิดเฟสมาร์เทนไซต์ ดังจะเห็นได้จากกราฟที่ได้จากเครื่องดิฟเฟอเรนเชี่ยล สแกนนิง คาลอริมิเตอร์ในช่วงลดอุณหภูมินั้นเอง และจากการที่ไม่พบเฟสระหว่างกลางในกลุ่มตัวอย่างที่ผ่านการอบชุบด้วยความร้อนขั้นตอนที่ 2 ที่อุณหภูมิ 550 และ 600 องศาเซลเซียส นั้นอาจอธิบายได้ว่าเพราะการเปลี่ยนแปลงเฟสไปมาระหว่างเฟสออสเทไนท์-เฟสมาร์เทนไซต์ อันเป็นเฟสที่เสถียร (stable phase) นั้นต้องมีการเปลี่ยนแปลงผ่านเฟสระหว่างกลางที่เป็นเฟสกึ่งเสถียร (metastable phase) เมื่อมีการอบชุบด้วยความร้อนซึ่งมีผลต่อพลังงานระหว่างรอยต่อและพลังงานจากความเครียดอันเป็นปัจจัยควบคุมการเปลี่ยนแปลงเฟสก็อาจทำให้การเปลี่ยนแปลงไปมาระหว่างเฟสออสเทไนท์-เฟสมาร์เทนไซต์ เกิดได้โดยไม่ต้องผ่านเฟสระหว่างกลาง

เมื่อเปรียบเทียบการวิจัยนี้กับการศึกษาของ Yoneyama และคณะ[9] พบว่าผลที่ได้มีความแตกต่างกันทั้งๆที่ใช้รูปแบบของการอบชุบด้วยความร้อน 2 ขั้นตอนเหมือนๆกันนั่นอาจเป็นเพราะอัตราส่วนของปริมาณอะตอมในลวดโลหะผสมนิกเกิลไทเทเนียมที่แตกต่างกัน ซึ่งในการศึกษาของ Yoneyama และคณะไม่ได้บอกอัตราส่วนไว้แต่ Nitinol® ที่ใช้ในการวิจัยนี้มีการหาค่าอัตราส่วนของปริมาณอะตอมไว้อยู่ที่นิกเกิลร้อยละ 55.88 และไทเทเนียมร้อยละ 44.12

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย