บทที่ 5

การทดสอบสมบัติทางกลของชิ้นงานทดสอบที่เตรียมขึ้น

ในงานวิจัยนี้มีการทดสอบสมบัติทางกลสองอย่างได้แก่ การทดสอบการต้านแรงดึง และการทดสอบความแข็ง โดยนำชิ้นงานทดสอบที่เตรียมจากวัสดุทั้งสองอย่างคือ Al-7%Si ที่ผลิตจากกระป๋อง และ A356 ที่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเหมือนกันมาทำการทดสอบเหมือนกัน โดยแต่ละสภาวะทางความร้อนจะใช้ชิ้นงาน 3 ตัวอย่างในการทดสอบ ในการทดสอบการต้านแรงดึงสิ่งที่สนใจศึกษาคือ ความต้านทานแรงดึงของชิ้นงาน(Tensile Strength) การยืดตัวของชิ้นงานที่ถูกดึง (Elongation) และลักษณะการวิบัติของชิ้นงาน ส่วนการทดสอบความแข็งจะสนใจเพียงค่าความแข็งเพียงอย่างเดียว

5.1 การทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง

5.1.1 ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ

ทำจากวัสดุสองชนิด คือ Al-7%Si และ A356 ซึ่งผ่านกระบวนการขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีเดียวกัน นำชิ้นงานของวัสดุทั้งสองชนิดมาผ่านกระบวนการทางความร้อนที่สภาวะต่างๆ เหมือนกัน คือ ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเลย ผ่านการอบละลายเพียงอย่างเดียว และผ่านการอบละลายต่อด้วยบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ

สภาวะการบ่มแข็ง มีสองตัวแปร คือ อุณหภูมิบ่มแข็ง และเวลาในการบ่มแข็ง

- อุณหภูมิบ่มแข็ง มี 4 ค่าในการทดลองนี้ ได้แก่ 120°C, 150°C, 175°C และ 205°C
- เวลาบ่มแข็ง แปร 8 ช่วงเวลาเพิ่มขึ้นทุกๆ 2 ชั่วโมง ได้แก่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมงตามลำดับ

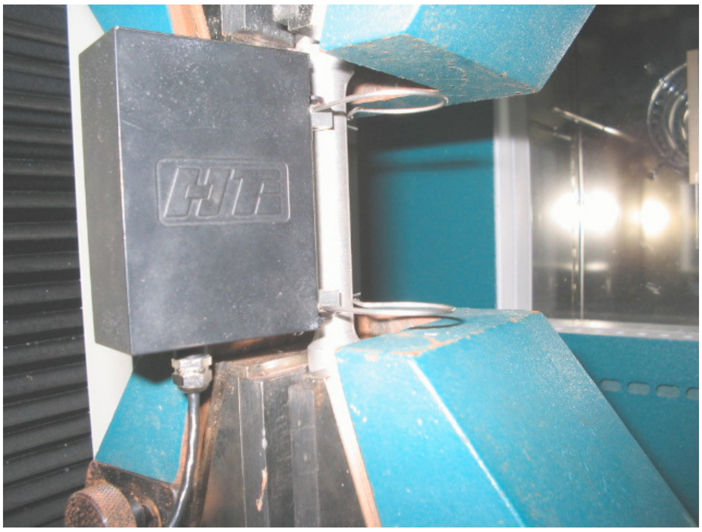
รวม 32 สภาวะการบ่มแข็ง เมื่อรวมกับสภาวะที่ไม่ผ่านการบ่มแข็ง และไม่ผ่านกระบวนการความร้อนใดๆเลยจะได้เป็น 34 สภาวะ และได้ทำการทดสอบ 3 ชิ้นงานต่อ 1 สภาวะ

5.1.2 ค่าสภาวะการทดสอบ

ในการทดสอบนี้ใช้การดึงโดยกำหนดอัตราระยะเคลื่อนที่คงที่ (Displacement Rate Fixed) คือ 3 มิลลิเมตรต่อนาที ชิ้นงานทดสอบมีความยาวช่วง Gauge Length 50 มิลลิเมตร

คำนวณเป็น Strain Rate จะได้ (3 ม.ม. / 50ม.ม.) / 60 วินาที เท่ากับ 1×10^{-3} ต่อวินาที

รูปที่ 5.1 เครื่องมือทดสอบแรงดึงที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 5.2 การใช้อุปกรณ์ Extensometer วัดระยะยืดตัวของชิ้นงานทดสอบ

5.1.3 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึง

ชิ้นงานที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆมาแล้วนำมาทดสอบการต้านแรงดึงได้ผลต่างๆ เป็นดังนี้

5.1.3.1 ผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบจาก Al-7%Si ที่ผลิตจากกระป๋อง

- ชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเลย

ตารางที่5.1 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
1	133.1	0.822	127.10	0.805
2	121.3	0.831		
3	126.9	0.763		

- ชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายเพียงอย่างเดียว

ตารางที่5.2 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายอย่างเดียว

ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
1	135.1	0.967	125.37	0.875
2	115.6	0.782		
3	125.4	0.875		

- ชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่5.3 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
120	2	1	138.6	0.999	136.73	0.983
		2	125.3	0.838		
		3	146.3	1.113		
	4	1	140.8	0.906	140.46	1.045
		2	131.2	1.228		
		3	149.4	1.002		
	6	1	147.2	1.180	147.57	1.203
		2	140.2	1.228		
		3	155.3	1.203		
	8	1	150.3	1.540	149.07	1.394
		2	142.6	1.361		
		3	154.3	1.281		
	10	1	152.9	1.312	157.37	1.510
		2	163.2	1.780		
		3	156.0	1.440		
	12	1	150.2	1.128	149.27	1.252
		2	134.2	1.346		
		3	163.4	1.284		
	14	1	153.7	1.230	152.60	1.230
		2	149.3	1.198		
		3	154.8	1.264		
	16	1	145.6	1.274	147.90	1.243
		2	92.3	0.413		
		3	150.2	1.212		

*** หมายเหตุตัวเลขที่ทำแรเงาเป็นตัวเลขที่เบี่ยงเบนจากตัวอื่นมาก จะไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่5.4 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 150°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
150	2	1	138.7	0.999	140.63	1.074
		2	130.6	1.160		
		3	152.6	1.063		
	4	1	139.0	1.370	151.20	1.320
		2	152.3	1.180		
		3	162.3	1.410		
	6	1	146.0	1.267	152.03	1.347
		2	152.6	1.460		
		3	157.5	1.313		
	8	1	82.6	0.576	147.55	1.210
		2	145.0	1.280		
		3	150.1	1.140		
	10	1	147.2	1.210	151.54	1.193
		2	150.2	1.098		
		3	157.2	1.270		
	12	1	152.9	1.132	150.43	1.154
		2	142.1	1.186		
		3	156.3	1.145		
	14	1	148.8	1.156	142.40	1.122
		2	136.3	0.997		
		3	142.1	1.214		
	16	1	145.6	1.168	143.37	1.113
		2	153.5	1.273		
		3	131.0	0.899		

*** หมายเหตุตัวเลขที่ทำแรเงาเป็นตัวเลขที่เบี่ยงเบนจากตัวอื่นมาก จะไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่5.5 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 175°C

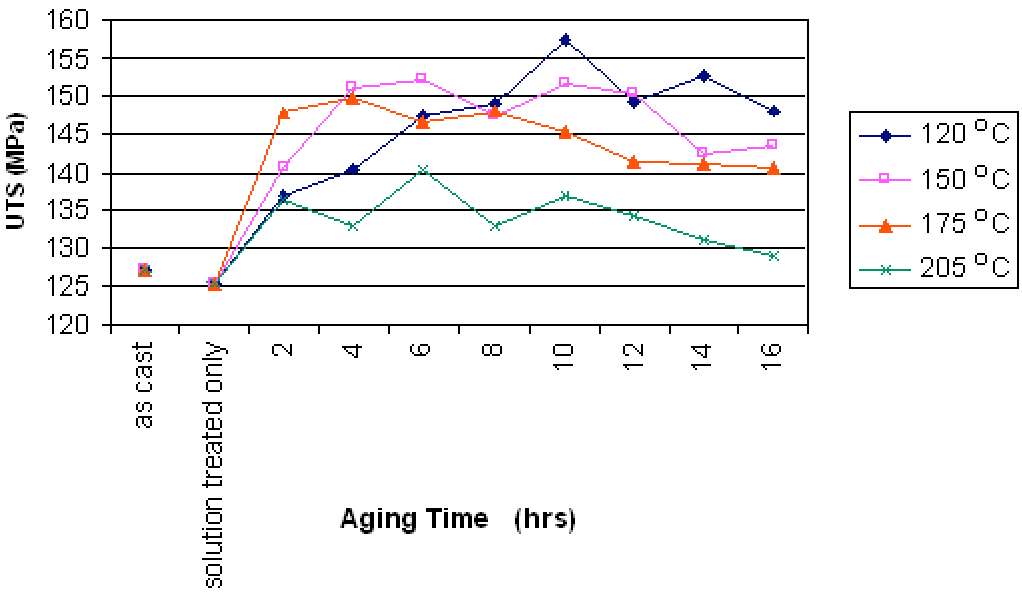
อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
175	2	1	148.2	1.180	147.67	1.157
		2	139.6	0.981		
		3	155.2	1.312		
	4	1	152.6	1.281	149.87	1.218
		2	138.1	1.160		
		3	158.9	1.214		
	6	1	149.0	1.280	146.57	1.154
		2	135.3	1.081		
		3	155.4	1.103		
	8	1	142.1	1.020	148.10	1.115
		2	112.5	0.288		
		3	154.1	1.210		
	10	1	148.0	1.101	145.35	1.135
		2	106.0	0.364		
		3	142.7	1.168		
	12	1	145.0	1.210	141.50	1.172
		2	138.0	1.133		
		3	94.2	0.621		
	14	1	142.1	1.302	141.13	1.100
		2	133.2	0.987		
		3	148.1	1.012		
	16	1	131.5	0.923	140.73	1.019
		2	143.1	1.100		
		3	147.6	1.036		

*** หมายเหตุตัวเลขที่ทำแรเงาเป็นตัวเลขที่เบี่ยงเบนจากตัวอื่นมาก จะไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

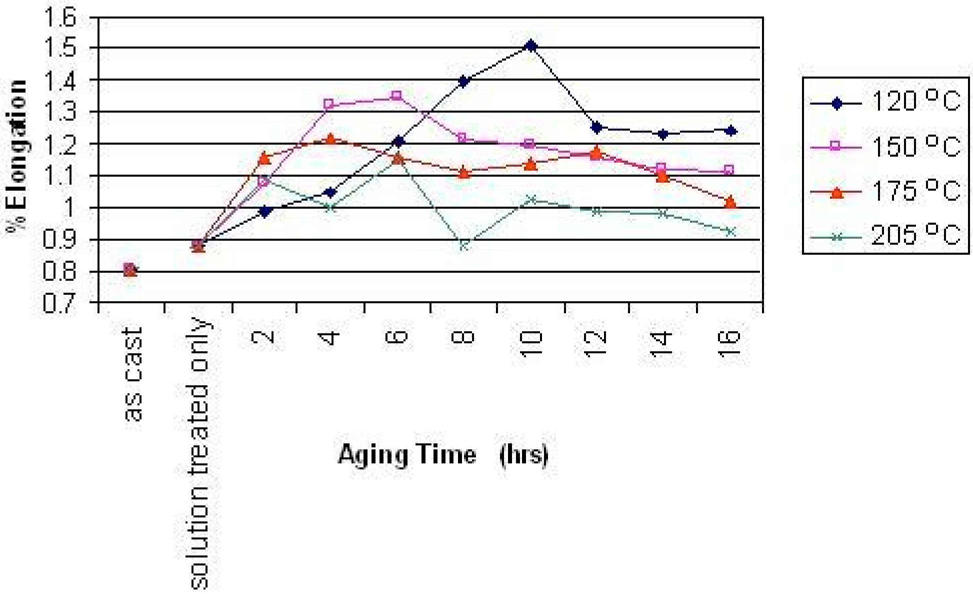
ตารางที่5.6 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็ง ที่อุณหภูมิ 205°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย UTS (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย Elong. (%)
205	2	1	133.5	1.294	136.20	1.087
		2	135.1	1.073		
		3	140.0	0.896		
	4	1	76.3	0.512	132.90	0.998
		2	129.6	0.872		
		3	136.2	1.125		
	6	1	138.6	1.136	140.45	1.149
		2	83.2	0.498		
		3	142.3	1.162		
	8	1	129.3	0.518	133.10	0.879
		2	127.6	1.102		
		3	142.4	1.018		
	10	1	126.8	1.112	136.90	1.025
		2	146	1.067		
		3	137.9	0.896		
	12	1	124.3	0.978	134.33	0.986
		2	136.9	1.083		
		3	141.8	0.896		
	14	1	122.0	0.952	130.87	0.982
		2	137.2	0.983		
		3	133.4	1.012		
	16	1	128.1	1.126	129.03	0.927
		2	121.0	0.891		
		3	138.0	0.764		

*** หมายเหตุตัวเลขที่ทำแรเงาเป็นตัวเลขที่เบี่ยงเบนจากตัวอื่นมาก จะไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงผลทดสอบความต้านแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงเปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ

5.1.3.2 ผลการทดสอบชิ้นงานทดสอบจาก A356

- ชิ้นงานหล่อ A356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเลย

ตารางที่5.7 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อน

ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
1	137.2	1.138	141.13	1.180
2	145.1	1.260		
3	141.1	1.143		

- ชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายเพียงอย่างเดียว

ตารางที่5.8 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายอย่างเดียว

ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
1	143.5	1.321	143.73	1.282
2	148.1	1.318		
3	139.6	1.207		

- ชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายและบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่5.9 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 120°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
120	2	1	142.3	1.191	150.23	1.285
		2	158.3	1.354		
		3	150.1	1.310		
	4	1	152.3	1.391	159.30	1.407
		2	165.3	1.267		
		3	160.3	1.562		
	6	1	158.0	1.682	163.40	1.921
		2	171.2	1.672		
		3	161.0	2.410		
	8	1	154.6	1.793	162.64	1.809
		2	169.3	2.098		
		3	164.0	1.537		
	10	1	156.0	1.780	163.90	2.106
		2	173.4	2.52		
		3	162.3	2.018		
	12	1	163.4	1.789	166.80	1.792
		2	173.8	2.003		
		3	163.2	1.584		
	14	1	169.4	1.912	164.47	1.800
		2	155.8	1.672		
		3	168.2	1.816		
	16	1	163.2	1.803	167.50	1.805
		2	170.3	1.861		
		3	169.0	1.752		

ตารางที่5.10 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 150°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
150	2	1	86.3	0.631	150.23	1.285
		2	150.4	1.56		
		3	148.2	1.421		
	4	1	152.3	1.370	159.30	1.407
		2	168.2	1.873		
		3	162.3	1.613		
	6	1	157.5	1.726	163.40	1.921
		2	172.3	2.013		
		3	163.4	1.876		
	8	1	149.2	1.683	162.64	1.809
		2	175.6	1.989		
		3	167.0	1.793		
	10	1	156.2	1.821	163.90	2.106
		2	177.2	1.916		
		3	157.2	1.728		
	12	1	154.3	1.756	166.80	1.792
		2	166.2	1.912		
		3	158.7	1.548		
	14	1	159.5	1.681	164.47	1.800
		2	163.4	1.725		
		3	165.3	1.751		
	16	1	115.4	0.489	167.50	1.805
		2	167.8	1.812		
		3	155.3	1.614		

*** หมายเหตุตัวเลขที่ทำแรเงาเป็นตัวเลขที่เบี่ยงเบนจากตัวอื่นมาก จะไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

ตารางที่5.11 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 175°C

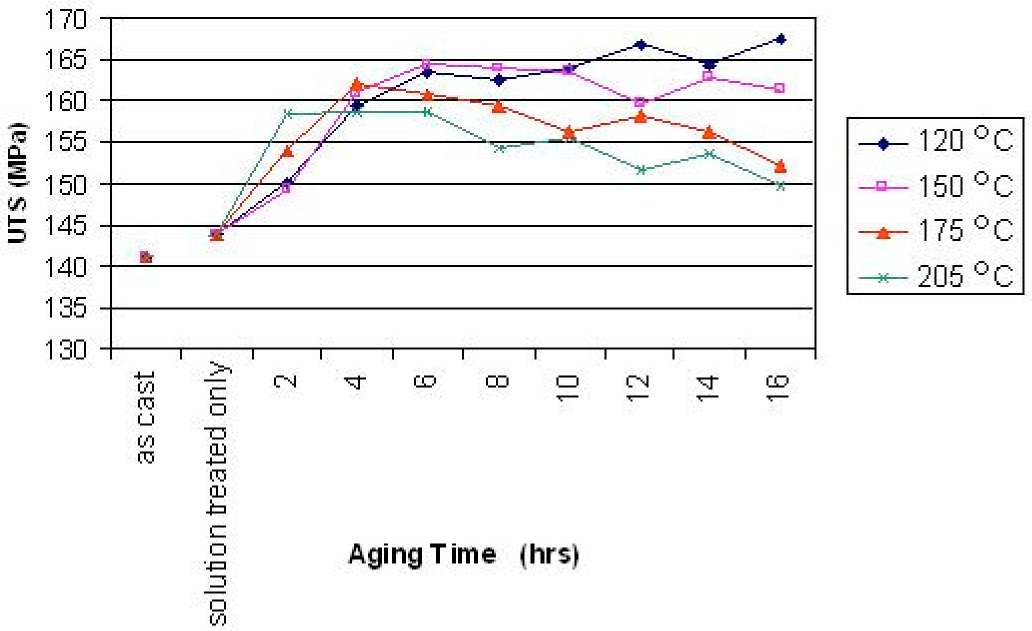
อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
175	2	1	96.4	1.461	154.00	1.662
		2	150.0	1.631		
		3	158.0	1.894		
	4	1	146.7	1.698	162.10	1.817
		2	173.4	1.888		
		3	166.2	1.864		
	6	1	159.0	1.614	160.80	1.763
		2	165.4	2.017		
		3	158.0	1.657		
	8	1	100.2	0.297	159.35	1.809
		2	162.0	1.896		
		3	156.7	1.721		
	10	1	148.0	1.586	156.30	1.752
		2	168.2	1.623		
		3	152.7	1.918		
	12	1	98.6	0.462	158.25	1.682
		2	161.2	1.533		
		3	155.3	1.831		
	14	1	114.1	0.873	156.30	1.581
		2	158.0	1.672		
		3	154.6	1.490		
	16	1	152.0	1.423	152.17	1.562
		2	158.3	1.721		
		3	146.2	1.543		

*** หมายเหตุตัวเลขที่ทำแรเงาเป็นตัวเลขที่เบี่ยงเบนจากตัวอื่นมาก จะไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย

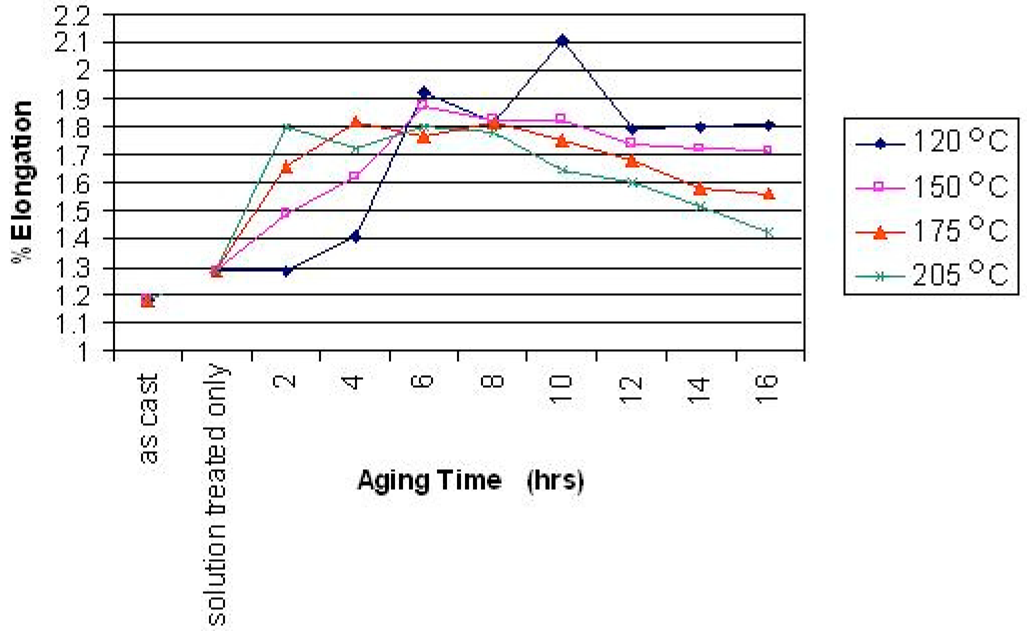
ตารางที่5.12 ผลการทดสอบการดึงของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายและนำไปบ่มแข็งที่อุณหภูมิ 205°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความต้านทานแรงดึง (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัว (%)	ความต้านทานแรงดึงเฉลี่ย (MPa)	เปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ย (%)
205	2	1	158.3	1.724	158.50	1.799
		2	163.2	2.150		
		3	154.0	1.524		
	4	1	73.4	0.521	158.80	1.719
		2	168.4	1.658		
		3	149.2	1.781		
	6	1	165.1	1.912	158.70	1.798
		2	56.2	0.320		
		3	152.3	1.683		
	8	1	152.0	1.962	154.10	1.778
		2	167.5	2.017		
		3	142.0	1.352		
	10	1	148.6	1.324	155.60	1.648
		2	163.0	1.962		
		3	155.2	1.658		
	12	1	150.8	1.597	151.77	1.603
		2	155.2	1.689		
		3	149.3	1.523		
	14	1	74.3	0.476	153.60	1.518
		2	151.2	1.314		
		3	156.0	1.721		
	16	1	142.3	1.258	149.63	1.419
		2	149.4	1.357		
		3	157.2	1.643		

*** หมายเหตุตัวเลขที่ทำแรเงาเป็นตัวเลขที่เบี่ยงเบนจากตัวอื่นมาก จะไม่นำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ย



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความต้านแรงดึงเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ A356
ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ 5.6 กราฟแสดงเปอร์เซนต์การยืดตัวเฉลี่ยของชิ้นงานหล่อ A356
ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ

รูปที่ 5.7 ลักษณะการวิบัติของชิ้นงานทดสอบแรงดึง Al-7%Si

รูปที่ 5.8 ลักษณะการวิบัติของชิ้นงานทดสอบแรงดึง A356

5.2 การทดสอบความแข็ง

5.2.1 ชิ้นงานที่ทำการทดสอบ

นำชิ้นงานทดสอบการดึงที่ดึงแล้วมาตัดเอาส่วนหัวหรือท้ายเพื่อทำเป็นชิ้นงานทดสอบความแข็งแล้วขัดผิวหน้าให้เรียบด้วยกระดาษทรายละเอียดและสักหลาด โดยเตรียมชิ้นงานตัวอย่างทดสอบ 3 ชิ้นต่อ 1 สภาวะเช่นเดียวกับการทดสอบการดึง

5.2.2 ค่าสภาวะการทดสอบ

ในการทดสอบความแข็งนี้ใช้วิธีวัดความแข็งในหน่วย Vickers ด้วยเครื่องทดสอบแบบ Micro Hardness Vickers Test และได้กำหนดน้ำหนักกดของหัวกดคงที่ (Load Fixed) ไว้ที่ 500 กรัม และหาค่าความแข็งของชิ้นงานแต่ละชิ้นโดยการวัดค่าความแข็ง 10 จุดต่อ 1 ชิ้นงานแล้วคำนวณหาค่าเฉลี่ย

5.2.3 ผลการทดสอบสมบัติความแข็ง

5.2.3.1 <u>ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผลิตจากกระป๋อง</u>

- ชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเลย

ตารางที่5.13 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ไม่ผ่านกระบวนการความร้อน

ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
1	87.32	86.19	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
2	85.12		
3	86.13		

- ชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายเพียงอย่างเดียว

ตารางที่5.14 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายอย่างเดียว

ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
1	85.41	84.59	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
2	83.24		
3	85.13		

- ชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่5.15 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 120°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
120	2	1	91.36	88.17	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
		2	86.07		
		3	87.07		
	4	1	93.16	94.56	
		2	95.72		
		3	94.79		
	6	1	99.74	98.08	
		2	101.44		
		3	93.06		
	8	1	99.45	99.96	
		2	105.68		
		3	94.74		
	10	1	98.09	99.99	
		2	99.36		
		3	102.52		
	12	1	97.37	98.47	
		2	99.00		
		3	99.05		
	14	1	96.84	98.25	
		2	98.25		
		3	99.67		
	16	1	97.93	97.81	
		2	94.72		
		3	100.79		

ตารางที่5.16 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 150°C

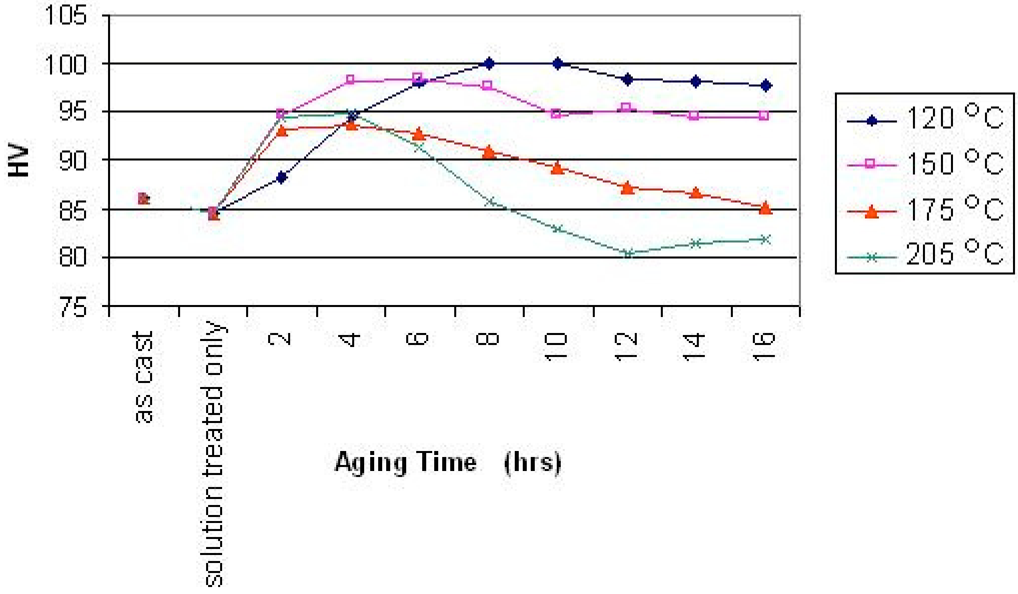
อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
150	2	1	94.84	94.72	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
		2	95.27		
		3	94.05		
	4	1	101.8	98.23	
		2	97.09		
		3	95.81		
	6	1	99.15	98.29	
		2	101.30		
		3	94.41		
	8	1	100.07	97.56	
		2	96.53		
		3	96.07		
	10	1	94.59	94.67	
		2	90.53		
		3	98.88		
	12	1	95.63	95.22	
		2	95.31		
		3	94.71		
	14	1	95.02	94.54	
		2	96.65		
		3	91.95		
	16	1	95.41	94.49	
		2	93.77		
		3	94.30		

ตารางที่5.17 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 175°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
175	2	1	96.77	93.10	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
		2	94.15		
		3	88.39		
	4	1	95.38	93.67	
		2	94.28		
		3	91.37		
	6	1	95.44	92.68	
		2	89.63		
		3	92.97		
	8	1	90.19	90.92	
		2	89.36		
		3	93.22		
	10	1	89.06	89.27	
		2	92.86		
		3	85.91		
	12	1	84.70	87.34	
		2	87.62		
		3	89.70		
	14	1	87.76	86.77	
		2	86.06		
		3	86.50		
	16	1	82.71	85.11	
		2	86.42		
		3	86.21		

ตารางที่5.18 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน Al-7%Si ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 205°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
205	2	1	95.19	94.45	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
		2	88.28		
		3	99.88		
	4	1	99.81	94.92	
		2	91.57		
		3	93.38		
	6	1	93.87	91.45	
		2	94.29		
		3	86.20		
	8	1	86.93	85.67	
		2	81.20		
		3	88.90		
	10	1	82.42	82.99	
		2	83.06		
		3	83.50		
	12	1	82.41	80.45	
		2	72.65		
		3	86.29		
	14	1	83.52	81.39	
		2	84.40		
		3	76.27		
	16	1	83.07	81.80	
		2	82.81		
		3	79.54		



รูปที่ 5.9 กราฟแสดงความแข็งของชิ้นงานหล่อ Al-7%Si ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ

5.2.3.2 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356

- ชิ้นงานหล่อ A356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการทางความร้อนเลย (3ชิ้น)

ตารางที่5.19 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ไม่ผ่านกระบวนการความร้อน

ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
1	64.13	64.97	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
2	62.34		
3	68.46		

- ชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายเพียงอย่างเดียว (3ชิ้น)

ตารางที่5.20 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายอย่างเดียว

ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
1	65.31	65.29	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
2	63.12		
3	67.44		

- ชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่สภาวะต่างๆ (สภาวะละ3ชิ้น)

ตารางที่5.21 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 120°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
120	2	1	69.94	69.32	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
		2	67.45		
		3	70.57		
	4	1	75.10	74.94333	
		2	72.88		
		3	76.85		
	6	1	81.76	80.72333	
		2	78.30		
		3	82.11		
	8	1	82.00	82.82333	
		2	82.02		
		3	84.45		
	10	1	85.57	85.55333	
		2	84.74		
		3	86.35		
	12	1	87.84	88.438	
		2	89.70		
		3	87.77		
	14	1	88.25	87.9	
		2	87.43		
		3	88.02		
	16	1	88.90	89.83667	
		2	87.86		
		3	92.75		

ตารางที่5.22 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 150°C

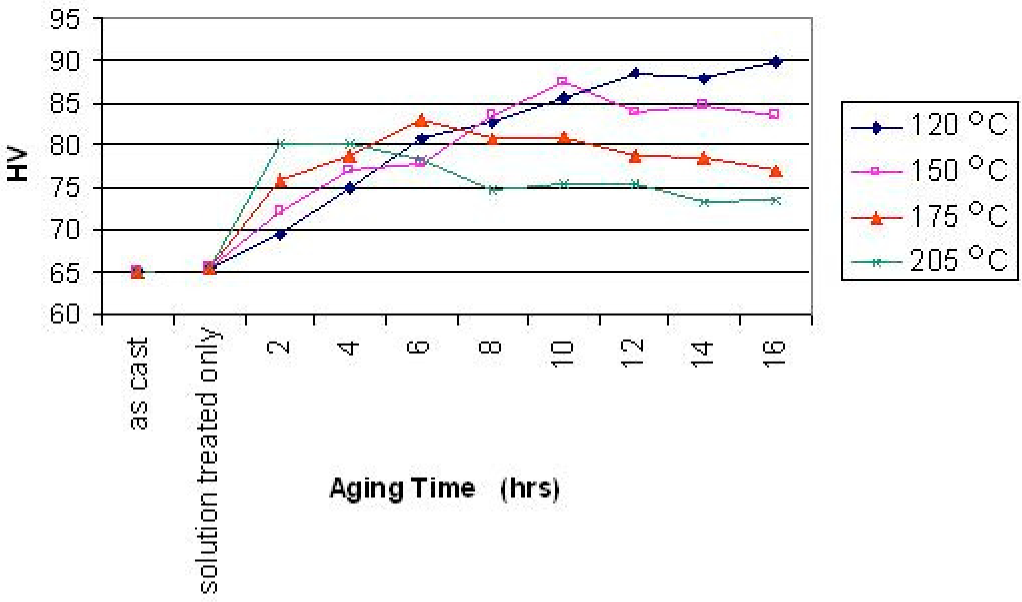
อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
150	2	1	73.16	71.95	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
		2	70.89		
		3	71.81		
	4	1	76.55	76.96	
		2	76.64		
		3	77.70		
	6	1	74.41	77.89	
		2	78.79		
		3	80.48		
	8	1	86.26	83.34	
		2	83.43		
		3	80.34		
	10	1	84.95	87.46	
		2	86.98		
		3	90.46		
	12	1	82.91	83.86	
		2	84.13		
		3	84.55		
	14	1	84.88	84.83	
		2	85.99		
		3	83.61		
	16	1	81.61	83.46	
		2	83.02		
		3	85.75		

ตารางที่5.23 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 175°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
175	2	1	74.48	75.77	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
		2	75.17		
		3	77.67		
	4	1	78.26	78.71	
		2	79.60		
		3	78.27		
	6	1	83.23	82.87	
		2	82.72		
		3	82.67		
	8	1	79.82	80.73	
		2	81.23		
		3	81.15		
	10	1	81.17	80.93	
		2	80.83		
		3	80.78		
	12	1	78.91	78.84	
		2	77.09		
		3	80.51		
	14	1	77.53	78.40	
		2	78.89		
		3	78.79		
	16	1	78.74	76.85	
		2	75.79		
		3	76.03		

ตารางที่5.24 ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงาน A356 ที่ผ่านการอบละลายแล้วนำไปบ่มแข็งต่อที่อุณหภูมิ 205°C

อุณหภูมิบ่มแข็ง (°C)	เวลาบ่มแข็ง (ชั่วโมง)	ชิ้นที่	ความแข็งของชิ้นงาน* (HV)	ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ** (HV)	หมายเหตุ
205	2	1	80.63	80.15	*ความแข็งของชิ้นงาน หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็ง 10 จุดบนหนึ่งชิ้นงาน **ความแข็งเฉลี่ยของสภาวะ หมายถึง ค่าเฉลี่ยของค่าความแข็งของชิ้นงาน 3 ชิ้นใน 1 สภาวะ
		2	82.20		
		3	77.62		
	4	1	78.34	80.05	
		2	79.36		
		3	82.46		
	6	1	77.71	78.26	
		2	77.97		
		3	79.10		
	8	1	75.76	74.61	
		2	72.55		
		3	75.52		
	10	1	73.40	75.41	
		2	76.73		
		3	76.09		
	12	1	74.21	75.29	
		2	74.56		
		3	77.10		
	14	1	73.29	73.08	
		2	71.77		
		3	74.18		
	16	1	72.58	73.45	
		2	75.13		
		3	72.63		



รูปที่ 5.10 กราฟแสดงความแข็งของชิ้นงานหล่อ A356 ที่ผ่านการบ่มแข็งที่สภาวะต่างๆ

วิจารณ์ผลการทดสอบสมบัติทางกล

จากผลการทดสอบแรงดึงและการทดสอบความแข็งพบว่า การอบละลายแล้วบ่มแข็งทำให้ความต้านแรงดึงและความแข็งของชิ้นงานหล่อทั้งสองเพิ่มสูงขึ้นได้โดยเมื่อบ่มแข็งเป็นเวลานานขึ้นความแข็งแรงและความแข็งของชิ้นงานจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ จนถึงจุดๆหนึ่งความแข็งแรงจะเพิ่มขึ้นมีค่าสูงสุดเรียกว่าสภาวะ Optimum Aged หลังจากนั้นแม้จะใช้เวลาบ่มแข็งต่อไปความแข็งแรงและความแข็งก็จะไม่เพิ่มขึ้นอีกแต่กลับจะมีค่าลดลงเรื่อยๆเรียกว่าสภาวะ Over Aged และเมื่อเปรียบเทียบความต้านแรงดึงและความแข็งจากการบ่มแข็งที่อุณหภูมิต่างๆ พบว่าการบ่มแข็งที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ชิ้นงานทดสอบสามารถถึงจุดที่ความต้านแรงดึงสูงสุดได้เร็วขึ้นแต่ความต้านแรงดึงสูงสุดที่ได้รับมีค่าน้อยกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ อุณหภูมิการบ่มแข็งที่ทำให้อะลูมิเนียมทั้งสองชนิดมีความต้านแรงดึงสูงสุดในการทดลองนี้ คือ 120°C แต่อะลูมิเนียม 7%Si ที่ผลิตจากกระป๋องจะใช้เวลาบ่มน้อยกว่าในการถึงความต้านแรงดึงสูงสุดคือประมาณ 8-12 ชั่วโมง ในขณะที่อะลูมิเนียมชนิด A356 ใช้เวลาประมาณ 12-16 ชั่วโมง และพบว่าในทุกๆอุณหภูมิบ่มแข็ง อะลูมิเนียม Al7%Si ที่ผลิตเองจะใช้เวลาในการบ่มน้อยกว่า

จากการที่ Al-7%Si ที่ผลิตได้มีส่วนผสมของ Mg Fe และ Mn อยู่สูงกว่า A356 มากจึงสันนิษฐานว่าความแข็งแรงและความแข็งของ Al-7%Si ควรจะมากกว่า A356 แต่ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงที่ได้ของอะลูมิเนียม 7%Si ต่ำกว่าของอะลูมิเนียมชนิด A356 และการยืดตัวก็ต่ำกว่าเช่นกันซึ่งต่างจากข้อสันนิษฐาน ในขณะที่ผลการทดสอบความแข็งของชิ้นงานทดสอบพบว่าอะลูมิเนียม 7%Si มีความแข็งสูงกว่าอะลูมิเนียมชนิด A356 เป็นไปตามสันนิษฐาน ซึ่งต้องทำการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียมทั้งสองต่อไปเพื่ออธิบายผลการทดสอบที่ได้ และจากการสังเกตพบว่าอะลูมิเนียมผสมทั้งสองชนิดมีลักษณะการวิบัติแบบเปราะเหมือนกัน

เมื่อพิจาณาถึงอิทธิพลของกระบวนการทางความร้อนที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกลของชิ้นงานสามารถอธิบายได้ดังนี้ กระบวนการทางความร้อนที่ใช้ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ การอบละลาย (Solution Treatment) การชุบด้วยน้ำ (Quenching) และการบ่มแข็งเทียม (Artificial Aging)

ในส่วนของการอบละลายจะมีปรากฏการณ์เกิดขึ้นสามอย่าง คือ 1) เกิดการละลายของธาตุผสมเข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียม(Dissolution of Elements) 2) เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจุลภาคของเฟสสารประกอบที่ไม่ละลายเข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียมมีการแตกตัวเป็นชิ้นย่อยที่มีขนาดเล็กกว่าเดิมและมีลักษณะกลมมนมากขึ้น(Spherodization) 3) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานในส่วนต่างๆจะมีความสม่ำเสมอเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้น(Homoginization) ในการอบละลายนั้นเฟสต่างๆจะละลายเข้าไปในเนื้ออะลูมิเนียม (เฟส α) กลายเป็นสารละลายของแข็ง โดยเฟส α นั้นจะยอมให้

ธาตุ Mg ทั้งหมดและธาตุ Si ประมาณ 1% ละลายเข้าไปได้ เมื่อทำการอบละลายเป็นเวลานานพอ อะตอมของธาตุที่ละลายเข้าไปในโครงสร้างจะแพร่กระจายไปทั่วทั้งชิ้นงานอย่างสม่ำเสมอมากขึ้น

และเมื่อนำชิ้นงานที่ยังร้อนรีบไปชุบน้ำอย่างรวดเร็ว จะทำให้ธาตุซึ่งละลายอยู่ภายในเนื้ออะลูมิเนียมไม่สามารถตกตะกอนออกจากเนื้อโลหะได้ทัน ทำให้ชิ้นงานถูกบังคับให้ยังคงอยู่ในสภาพสารละลายของแข็งซึ่งมีปริมาณสารละลายสูงกว่าปริมาณที่ควรจะมีได้ในสภาวะสมดุลซึ่งเราเรียกว่า Super Saturated Solid Solution α ซึ่งไม่เสถียร ถ้าเราปล่อยชิ้นงานไว้เฉยๆที่อุณหภูมิปกติต่อไปชิ้นงานจะเกิดการบ่มตัวเองตามธรรมชาติ(Natural Aging) คือ ธาตุ Mg และ Si จะค่อยๆเคลื่อนตัวออกจากเฟส α เพื่อมารวมตัวกันตกผลึกเป็นสารประกอบ Mg_2Si อยู่กระจายเป็นจุดๆเล็กๆขนาดนาโนเมตร เป็นจำนวนมากทั่วทั้งชิ้นงาน ซึ่งผลึกดังกล่าวยังไม่สมบูรณ์และยังมีขอบเขตเชื่อมประสานกันอยู่กับโครงสร้าง α พื้นฐานเดิม เรียกว่าการตกผลึกแบบ Coherent Precipitation การเรียงตัวของอะตอมบริเวณที่มีการตกผลึกดังกล่าวจะบิดเบี้ยวมีผลทำให้การเคลื่อนไหวของ Slip Plane และ Dislocation เคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีสารประกอบ Mg_2Si ขวางอยู่ได้ยากเมื่อมีแรงกระทำส่งผลให้สมบัติทางกลของชิ้นงานสูงขึ้น กระบวนการที่ความแข็งแรงของชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้นนี้เรียกว่า Precipitation Hardening

กระบวนการ Precipitation Hardening ดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติแต่จะใช้เวลาค่อนข้างนานหลายสัปดาห์ ซึ่งเราสารมารถเร่งกระบวนการให้เกิดขึ้นได้ภายในระยะเวลาสั้นๆไม่กี่ชั่วโมงได้ด้วยการนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิปกติ เรียกว่าการบ่มแข็งเทียม ซึ่งจะทำให้เกิดการตกผลึกของ Mg_2Si ได้เร็วขึ้น ส่งผลให้ความแข็งแรงและความแข็งของชิ้นงานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อบ่มไปนานถึงช่วงเวลาหนึ่งความแข็งแรงและความแข็งของชิ้นงานจะไม่เพิ่มขึ้น และถ้ายังคงบ่มต่อไปความแข็งแรงและความแข็งของชิ้นงานจะกลับลดลง เนื่องมาจากผลึกของ Mg_2Si จะมีขนาดโตขึ้น มีความสมบูรณ์และมีความเสถียรมากขึ้นจึงทำให้ลักษณะการเชื่อมประสานของเฟส Mg_2Si กับโครงสร้าง α พื้นฐานเดิมหมดไปเกิดเป็นขอบเขตผลึกที่ชัดเจนเรียกว่า Non Coherent Precipitation ทำให้การบิดเบี้ยวของการเรียงตัวของอะตอมหมดไปความต้านทานต่อแรงกระทำจึงลดลง สภาพที่ความแข็งแรงลดลงเช่นนี้เรียกว่า Over Aging และเมื่อพิจารณาถึงการบ่มแข็งเทียมที่อุณหภูมิต่างๆพบว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงและความแข็งของชิ้นงานเพิ่มถึงจุดสูงได้รวดเร็วกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า เพราะที่อุณหภูมิสูงการเคลื่อนตัวของอะตอมของธาตุเพื่อมารวมตัวกันตกผลึกจะเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แต่ความแข็งแรงสูงสุดและความแข็งสูงสุดของชิ้นงานที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิสูงกว่าจะมีค่าต่ำกว่าชิ้นงานที่ผ่านการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า เพราะการบ่มที่อุณหภูมิสูงการเคลื่อนตัวของอะตอมเกิดขึ้นได้ง่ายจึงเกิดเป็นผลึกที่ใหญ่กว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ