

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจัย

เนื้อหาของบทนี้กล่าวถึง ผลการทดลองและวิจัยตามแผนงานที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 3 ได้แก่ ผลการวัดขนาดของช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียม และ Insert Casting ของชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน และไม่หลวมคลอน, ชิ้นงานที่อุณหภูมิ Insert Casting ในช่วงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน, ชิ้นงานที่มีกระบวนการหล่อที่แตกต่างกัน, ชิ้นงานที่มีวิธีการการเย็นตัวหลังกระบวนการหล่อที่แตกต่างกัน และชิ้นงานที่ผ่านการอบ Precipitation Hardening (อบ Solution + Quenching + Artificial Aging) และไม่ผ่านการอบ Precipitation Hardening เพื่อนำข้อมูลผลการทดลองเหล่านี้ มาใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ว่า สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาการหลวมคลอนของ Insert Casting เกิดจากสาเหตุอะไร และกำหนดแนวทางการป้องกันปัญหาดังกล่าว

4.1 วิเคราะห์ชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน และไม่หลวมคลอน

ทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบชิ้นงานเพื่อหาความแตกต่างระหว่างชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน และไม่หลวมคลอน โดยแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็น 2 แบบ คือ การวิเคราะห์ขนาดของช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียม กับ Insert Casting และการวิเคราะห์การยึดเกาะระหว่างผิวของอะลูมิเนียม กับ Insert Casting รวมถึงการวิเคราะห์ลักษณะของผิวอะลูมิเนียมบริเวณที่หุ้ม Insert Casting

4.1.1 วัดขนาดช่องว่างระหว่างอะตุมิเทียบกับคูล้อม

ทำการเปรียบเทียบขนาดของช่องว่างระหว่างชั้นงานที่คูล้อมหลวมคลอน และไม่หลวมคลอน โดยทำการวัดขนาดช่องว่างด้วยกล้อง Microscope ที่กำลังขยาย 200 X

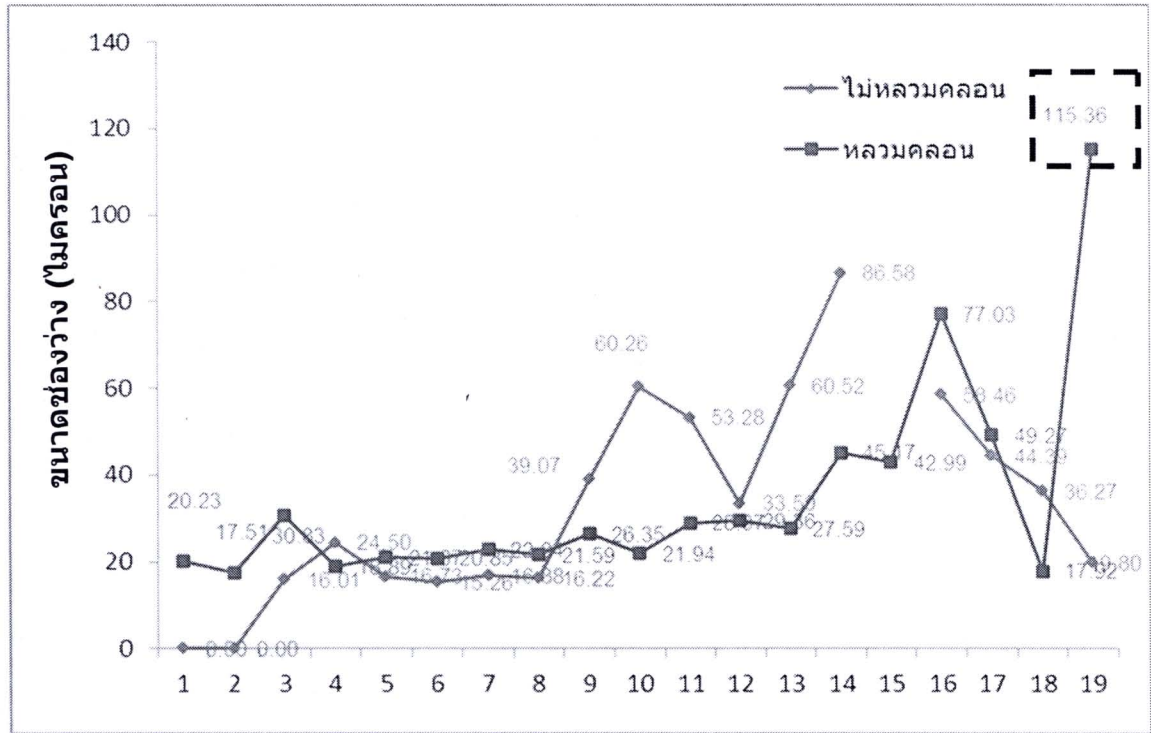
ตารางที่ 4.1 ขนาดของช่องว่างของชั้นงานที่ไม่หลวมคลอน (หน่วย : ไมครอน)

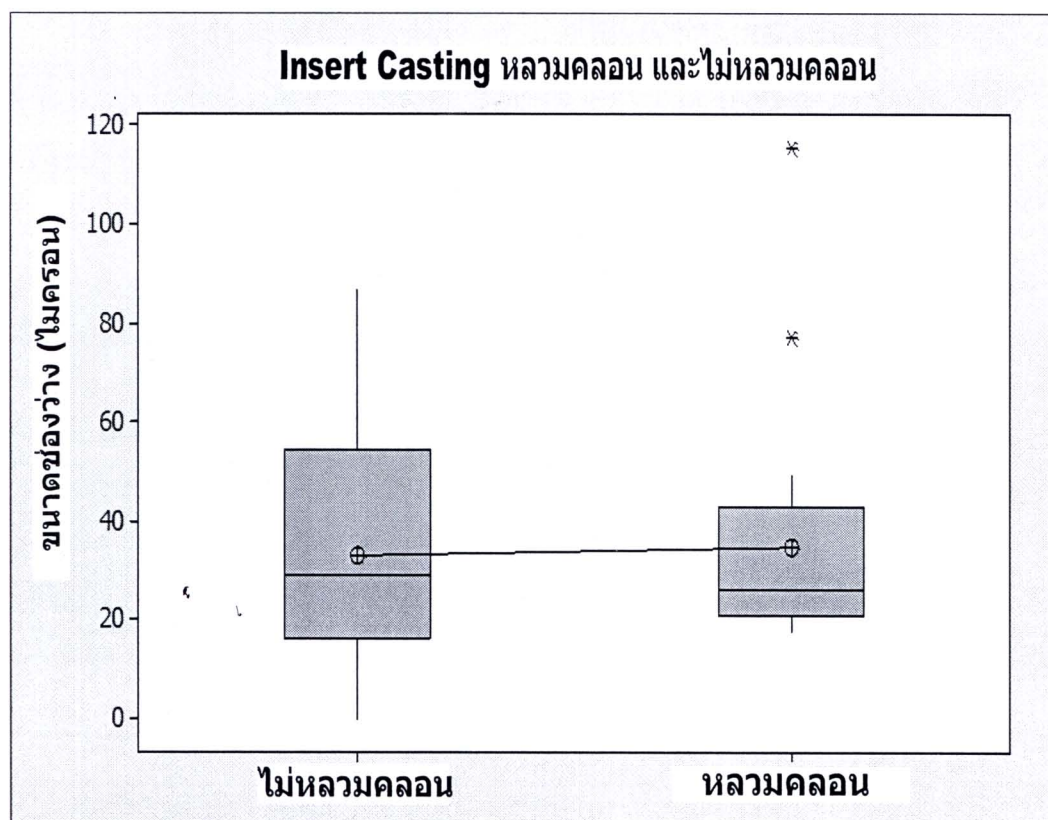
ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (ด้านล่าง)	0										0.00	
2	0										0.00	
3	16.31	11.60	19.16	15.37	19.16	12.39	12.54	14.30	15.25	24.00	15.12	3.83
4	11.60	32.46	23.85			21.50	18.13	24.85	39.09		24.50	9.06
5	20.04	13.48	19.28	21.16	18.13	12.39	11.48	24.50	17.26	9.58	17.52	4.80
6	14.33	19.09	11.44	10.66	13.65	17.16		22.00	17.26	11.79	15.70	3.86
7	28.61	11.44	14.42	19.28	13.48	17.18	15.28	12.72	21.94	14.42	17.15	5.19
8	14.30	16.23	17.39	16.23	15.72	16.89	12.79	16.45	16.20	20.04	15.80	1.89
9	19.09	20.99	35.28	31.51	44.96	37.18	58.64	64.92			39.07	16.42
10	28.43	45.84	30.46	57.39	50.55	66.75	80.95	96.24	85.73		60.26	24.04
11	75.35	69.73	65.51	42.33	34.64	23.19	21.94	40.58	94.36	65.15	51.96	24.16
12	37.28	32.42	35.38	40.31	35.38	35.73	26.96	37.61	22.00	31.97	33.67	5.46
13	51.61	40.58	32.36	48.62	47.89	46.74	59.09	76.97	94.49	106.89	55.37	24.35
14	70.56	66.75	54.40	76.97	108.31	134.10	81.02	62.14	124.96		86.58	28.74
15												
16	80.75	96.39	86.94	49.94	41.26	26.84	70.85	38.70	43.94	49.01	59.51	23.47
17	50.95	37.28	38.15	34.37	37.77	43.56	51.48	51.50	49.73	49.07	43.87	6.90
18	46.71	57.58	29.56	30.52	28.66	25.75	44.84	43.15	20.97	34.96	36.42	11.38
19 (ด้านบน)		15.28		27.64	31.45	25.43	10.31	10.78		17.73	20.15	8.42

ตารางที่ 4.2 ขนาดของช่องว่างของชิ้นงานที่หลวมคลอน (หน่วย : ไมครอน)

ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (ด้านล่าง)	18.33	33.41	31.45	15.72	10.48	18.21	29.61	17.16	13.48	14.42	20.23	8.16
2	10.87	15.37	15.37	16.65	18.51	22.90	36.22	13.88	11.16	14.17	17.51	7.44
3	28.66	35.32	35.47	50.01	32.41	26.70	39.18	19.05	23.19	18.33	30.83	9.76
4	20.11	15.52	19.10	19.28	18.51	31.68	14.33	18.13	17.81	14.42	18.89	4.94
5	28.61	20.38	24.78	19.16	6.94	23.85	24.00	24.78	17.81	20.38	21.07	5.92
6	18.99	24.11	18.51	41.16	27.90	17.18	13.65	15.28	11.60	20.11	20.85	8.59
7	14.30	18.11	20.53	21.31	20.11	17.26	26.84	26.76	25.02	38.14	22.84	6.76
8	22.25	28.85	34.52	17.18	22.00	18.33	15.28	18.21	14.20	25.07	21.59	6.40
9	12.38	22.95	20.02	23.83	26.96	20.58	31.51	33.47	32.91	38.88	26.35	7.92
10	22.66	22.91	19.65	25.24	13.34	16.20	15.37	21.94	27.76	34.31	21.94	6.28
11	35.27	37.28	31.47	32.42	22.88	23.83	30.10	30.07	20.97	25.43	28.97	5.47
12	29.69	31.97	34.79	17.26	27.44	23.05	29.79	24.95	39.08	35.59	29.36	6.49
13	32.46	20.22	34.04	30.63	39.08	46.96	17.18	15.52	16.45	23.37	27.59	10.71
14	33.36	39.37	41.16	54.36	69.81	42.55	38.78	27.04	45.16	60.12	45.17	12.83
15	76.76	36.23	28.94	47.08	16.23	25.93	39.49	44.87	44.10	70.30	42.99	18.77
16	94.94	62.91	67.78	81.16	112.83	65.26	49.57	80.00	78.86		77.03	18.74
17	59.12	32.41	41.00	28.66					67.68	66.75	49.27	17.43
18	17.18	15.98	20.11	12.39	12.43	15.78	32.87	16.65			17.92	6.54
19 (ด้านบน)	77.32	136.41	184.91	125.36	135.67	83.56	100.01	79.61			115.36	37.35

กราฟที่ 4.1 กราฟเปรียบเทียบชิ้นงานที่คุมลือหลวมคลอน และไม่หลวมคลอน





Two-Sample T-Test and CI: OK, MOVE

Two-sample T for OK vs MOVE

	N	Mean	StDev	SE Mean
OK	18	33.2	23.6	5.6
MOVE	19	34.5	24.5	5.6

Difference = μ (OK) - μ (MOVE)

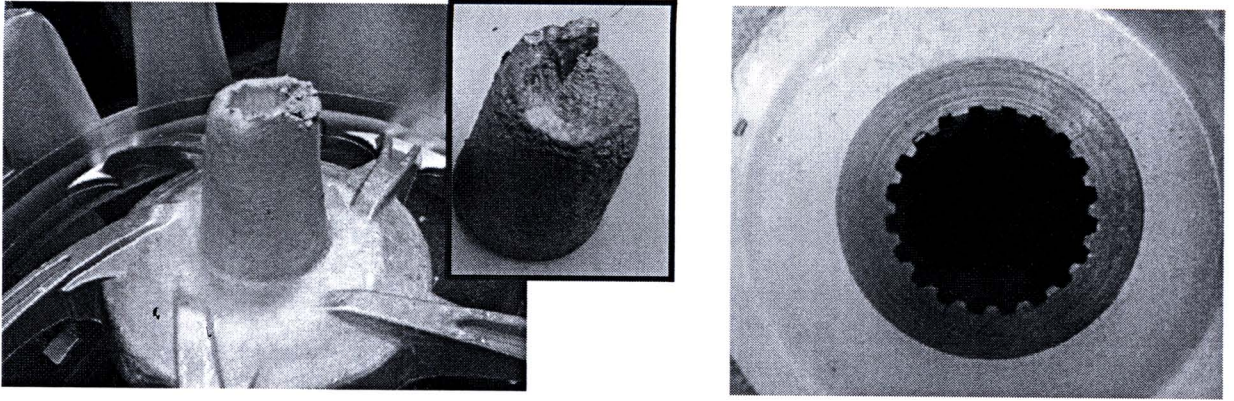
Estimate for difference: -1.31

95% CI for difference: (-17.35, 14.74)

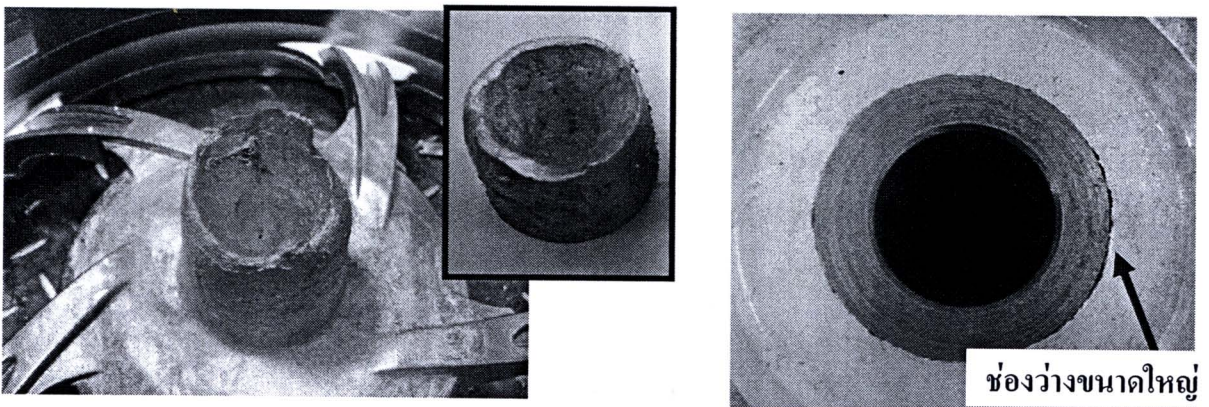
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -0.17 P-Value = 0.870 DF = 35

จากการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของช่องว่างระหว่างชิ้นงานที่ OK กับชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน โดยการพิสูจน์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของช่องว่างด้วย T-Test ภายความเชื่อมั่น 95% พบว่าค่า P-Value = 0.875 มีค่ามากกว่า 0.05 แสดงว่าค่าเฉลี่ยของช่องว่างมีขนาดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าเกิดช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียม กับ Insert Casting ทั้งชิ้นงานที่หลวมคลอน และไม่หลวมคลอน มีขนาดที่ไม่แตกต่างกัน แต่จากข้อมูลขนาดของช่องว่างของชิ้นงานที่หลวมคลอน จะพบว่าช่วงบนสุดของชิ้นงานจะมีขนาดของช่องว่างที่กว้างที่สุด ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้สามารถตรวจสอบพบการหลวมคลอนได้อย่างชัดเจน โดยสาเหตุที่ทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ด้านบนสุดของ Insert Cast เนื่องจากการหล่อชิ้นงานเป็นแบบ Top Gate และเป็นการควบคุมปริมาณการเติมน้ำอะลูมิเนียมโดยคน ทำให้ปริมาณที่ป้อนน้ำอะลูมิเนียมเข้าแบบหล่อ แต่ครั้งมีความแปรผันมาก ซึ่งในบางครั้งของการหล่อการป้อนเติมปริมาณน้ำอะลูมิเนียมไม่เพียงพอกับอัตราการหดตัว จากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอะลูมิเนียมจากของเหลวเป็นของแข็ง จึงทำให้เกิดปัญหา ซึ่งได้ทำการทดลอง

และแสดงในรูปที่ 4.1 จะพบว่าปริมาณการหดตัวของรูส้นไม่ลึกมาก และยังมีระยะห่างจากผิวของชิ้นงานอยู่มาก ส่วนรูปที่ 4.2 จะพบว่าปริมาณการหดตัวของรูส้นจะค่อนข้างลึก และมีระยะห่างผิวของชิ้นงานน้อยมากส่งผลทำให้โพรงหดตัวลึกเข้าไปในผิวของชิ้นงาน ทำให้เกิดเป็นช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่าง Insert Casting และอะลูมิเนียม



รูปที่ 4.2 การป้อนเติมน้ำอะลูมิเนียมที่เพียงพอกับอัตราการหดตัวของน้ำอะลูมิเนียม

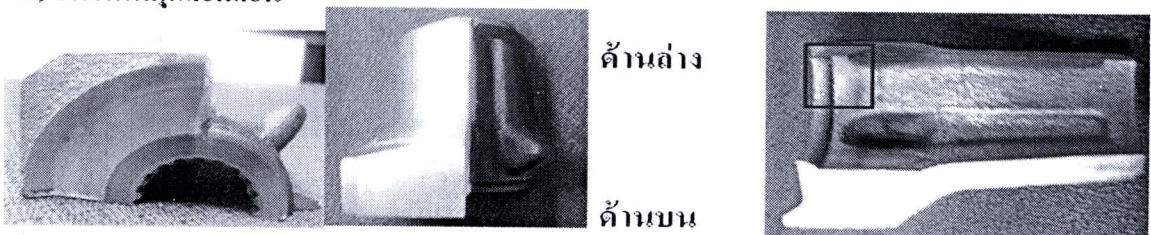


รูปที่ 4.3 การป้อนเติมน้ำอะลูมิเนียมที่ไม่เพียงพอกับอัตราการหดตัวของน้ำอะลูมิเนียม

4.1.2 เปรียบเทียบผิวอะลูมิเนียมระหว่างชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน และไม่หลวมคลอน

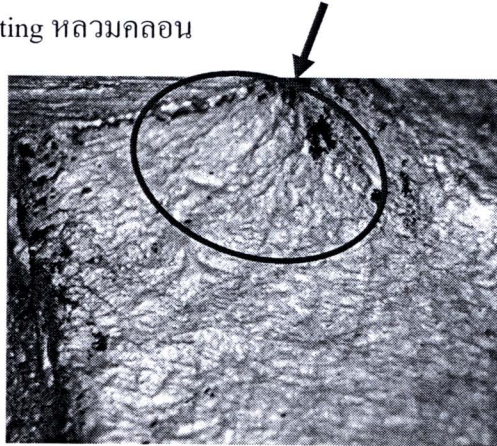
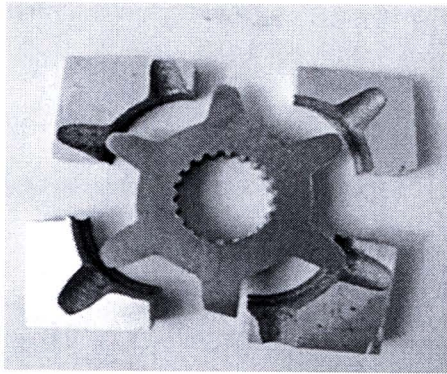
ทำการเปรียบเทียบลักษณะของผิวอะลูมิเนียมบริเวณที่หุ้ม Insert Casting เพื่อดูการยึดเกาะระหว่างผิวทั้งสอง ในแต่ละช่วงของชิ้นงาน

1.) ชิ้นงานที่คุมล้อกลอน



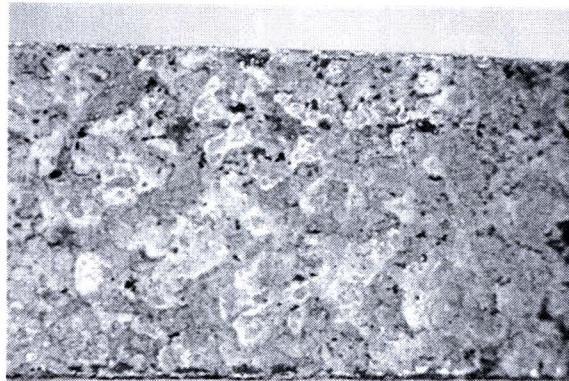
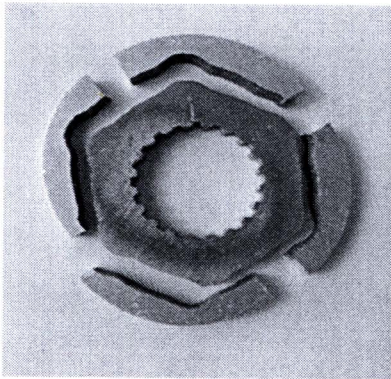
ตัดขวางเพื่อดูการยึดเกาะของอะลูมิเนียมกับ Insert Casting

ก) ชิ้นงานส่วนบนของชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน



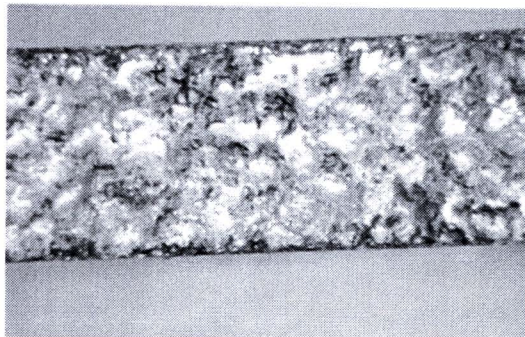
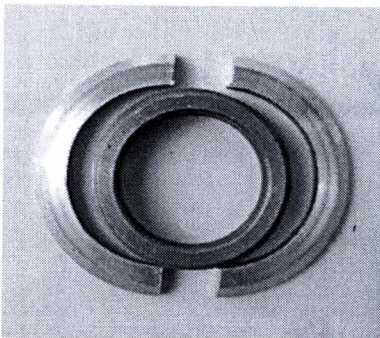
รูปที่ 4.4 ตัดขวางส่วนบน และผิวของอะลูมิเนียมส่วนบนชิ้นงานที่หลวมคลอน

ข) ชิ้นงานส่วนกลางของชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน



รูปที่ 4.5 ตัดขวางส่วนกลาง และผิวของอะลูมิเนียมส่วนกลางชิ้นงานที่หลวมคลอน

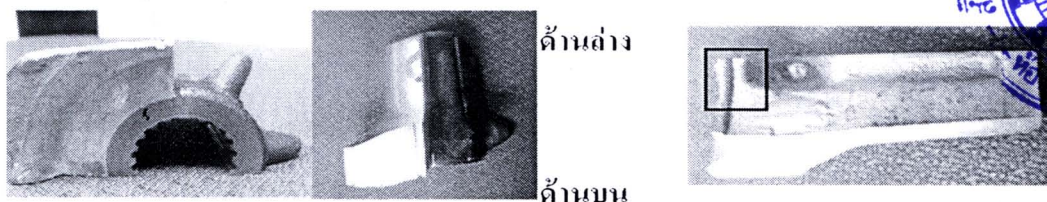
ค) ชิ้นงานส่วนล่างของชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน



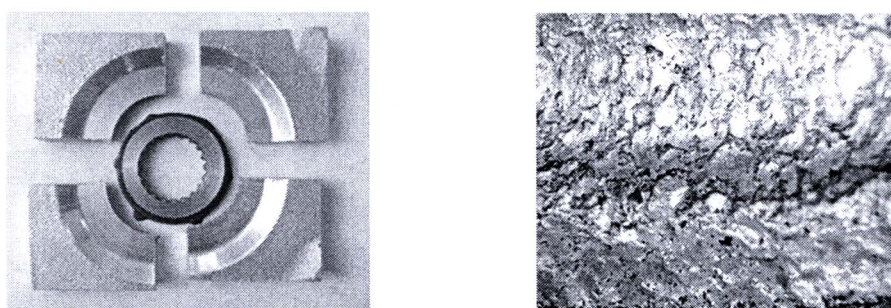
รูปที่ 4.6 ตัดขวางส่วนล่าง และผิวของอะลูมิเนียมส่วนล่างชิ้นงานที่หลวมคลอน

จากการตัดชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอนตามแนวยาวและแนวนอน จะพบว่าไม่มีการยึดเกาะระหว่างผิวอะลูมิเนียม และ Insert Casting ในทุกส่วนของชิ้นงาน ตามภาพที่ 4.4 – 4.6 และจากการสังเกตที่ผิวของอะลูมิเนียมส่วนด้านบน จะพบว่าลักษณะของผิวอะลูมิเนียมที่มีลักษณะของผิว และสีที่แตกต่างจากส่วนอื่น ซึ่งเป็นบริเวณเดียวกับที่ตรวจสอบพบว่ามีขนาดของช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียมกับ Insert Casting กว้างที่สุด สาเหตุที่ทำให้เกิดลักษณะดังกล่าวคือ การป้อนเติมน้ำอะลูมิเนียมไม่เพียงพอ ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 4.1.1

2.) ชิ้นงานที่ดูหลวมไม่กลอน

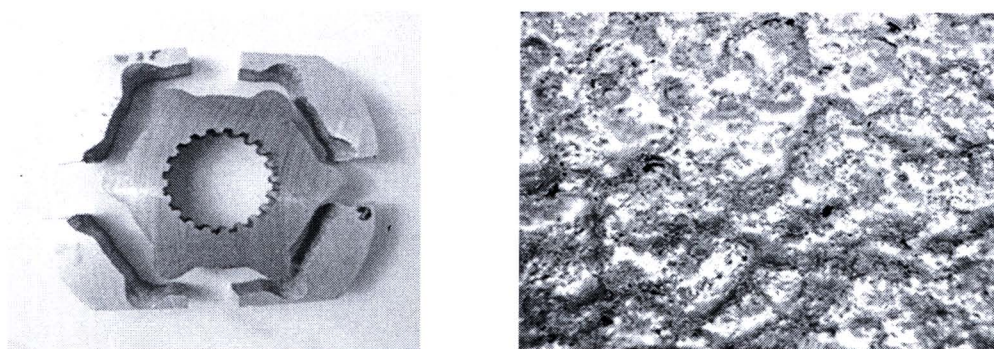


ง) ชิ้นงานส่วนบนของชิ้นงานที่ Insert Casting ไม่หลวมคลอน



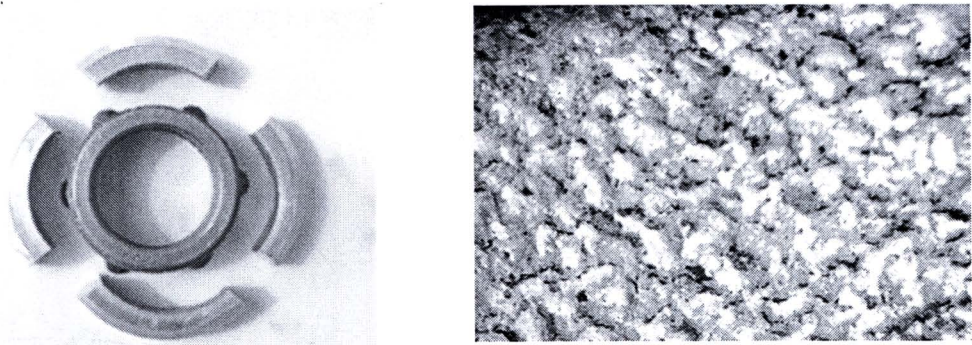
รูปที่ 4.7 ตัดขวางส่วนบน และผิวของอะลูมิเนียมส่วนบนชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน

จ) ชิ้นงานส่วนกลางของชิ้นงานที่ Insert Casting ไม่หลวมคลอน



รูปที่ 4.8 ตัดขวางส่วนกลาง และผิวของอะลูมิเนียมส่วนกลางชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน

ฉ) ชิ้นงานส่วนล่างของชิ้นงานที่ Insert Casting ไม่หลวมคลอน



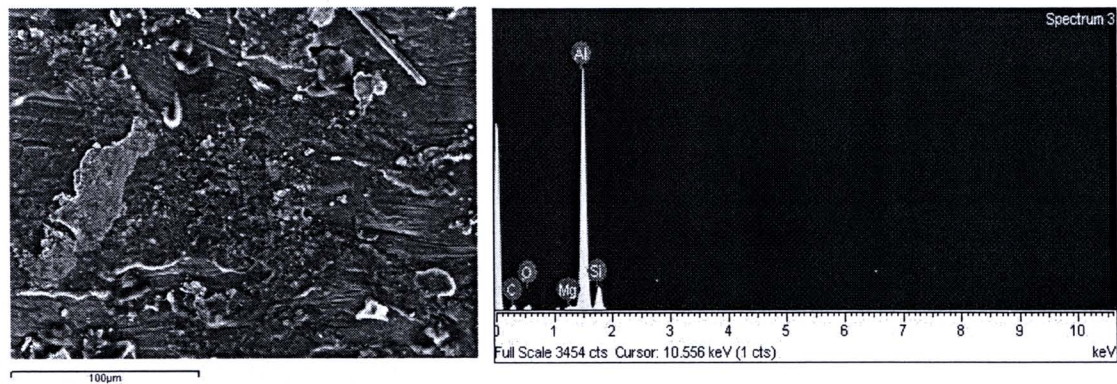
รูปที่ 4.9 ตัดขวางส่วนล่าง และผิวของอะลูมิเนียมส่วนล่างชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน

จากการตัดชิ้นงานที่ Insert Casting ไม่หลวมคลอนตามแนวยาวและแนวขวาง ตั้งแต่รูปที่ 4.7 – 4.9 จะพบว่าไม่มีการยึดเกาะระหว่างผิวอะลูมิเนียม กับ Insert Casting เหมือนกับชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน และจากการวิเคราะห์ผิวของอะลูมิเนียมในทุกช่วงจะพบว่ามี การป้อนเติมน้ำอะลูมิเนียม ที่สมบูรณ์ แต่จะเห็นว่ากระบวนการผลิตที่ใช้อยู่นี้ไม่ทำให้เกิดการยึดเกาะระหว่างผิวของอะลูมิเนียม กับ Insert Casting

4.1.3 วิเคราะห์ลักษณะผิวของอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน และไม่หลวมคลอน

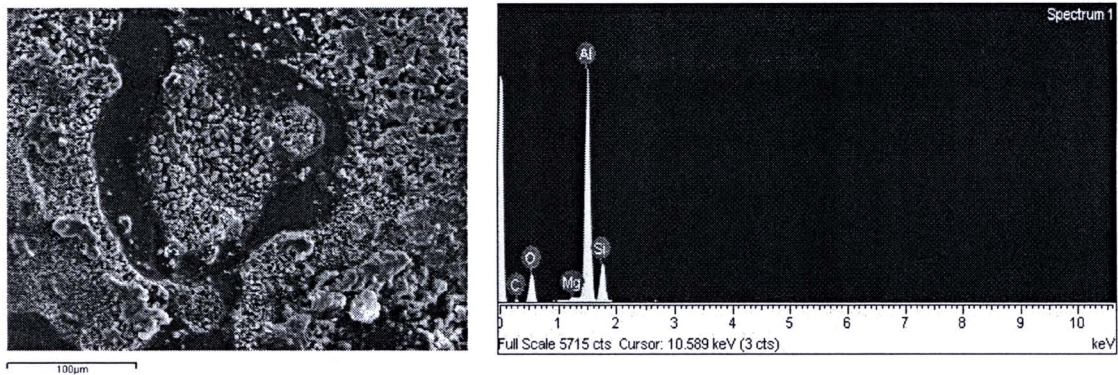
ทำการเปรียบเทียบคุณลักษณะของผิวของอะลูมิเนียม บริเวณที่หุ้ม Insert Casting เพื่อดูความแตกต่างของ ผิวของอะลูมิเนียม โดยทำการตรวจสอบสภาพผิวของอะลูมิเนียมด้วย SEM และตรวจสอบส่วนประกอบทางเคมีที่ผิวด้วย EDS ด้วยสมมุติฐานที่ว่าผิวของอะลูมิเนียมของชิ้นงานที่หลวมคลอนอาจจะมีลักษณะผิว ที่เป็นออกไซด์ทำให้ไม่เกิดการยึดเกาะระหว่างผิวของ Insert Cast และอะลูมิเนียม

ก) ชิ้นงานที่ Insert Casting หลวมคลอน



รูปที่ 4.10 ผิวของอะลูมิเนียม และส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่หลวมคลอน

ข) ชิ้นงานที่ Insert Casting ไม่หลวมคลอน

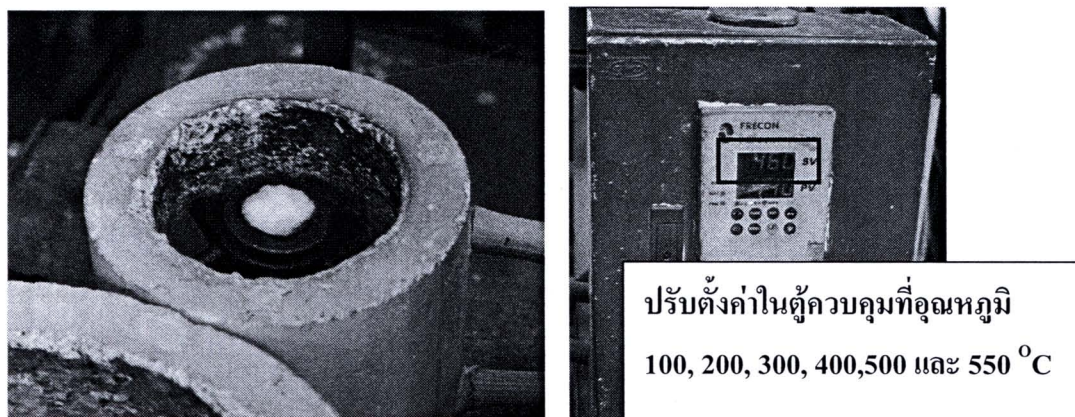


รูปที่ 4.11 ผิวของอะลูมิเนียม และส่วนประกอบทางเคมีของชิ้นงานที่ไม่หลวมคลอน

จากผลการตรวจสอบผิวของอะลูมิเนียมด้วย EDS ซึ่งจะตรวจสอบพบออกซิเจนที่ผิวของชิ้นงานทั้งสองแบบ ซึ่งออกซิเจนที่พบที่ผิวแสดงให้เห็นว่าบริเวณผิวของชิ้นงานทั้งสอง มีคุณลักษณะของอะลูมิเนียมออกไซด์ที่ผิว ซึ่งอะลูมิเนียมออกไซด์นี้จะเป็น Bi-film ป้องกันไม่ให้เกิดการยึดเกาะกันระหว่างผิวของอะลูมิเนียม กับ Insert Casting

4.2 วิเคราะห์ผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting

ทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting ก่อนทำการหล่อจากทฤษฎีในการออกแบบกระบวนการหล่อหุ้มได้กล่าวไว้ว่า อุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting ที่เหมาะสมที่สุด คือต้องทำการอุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิสูง เพื่อป้องกันการแยกออกจากกันระหว่าง Insert Casting กับวัสดุหล่อหุ้ม ดังนั้นในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการวางแผนในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting ก่อนทำการหล่อ โดยจะทำการทดลองเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting ตั้งแต่อุณหภูมิ 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C และ 550 °C ตามลำดับ โดยอุณหภูมิของ Insert Cast ที่อุ่นจะทำการตรวจสอบอุณหภูมิโดย Sensor ที่ควบคุมขนาด Induction ตามรูปที่ 4.12

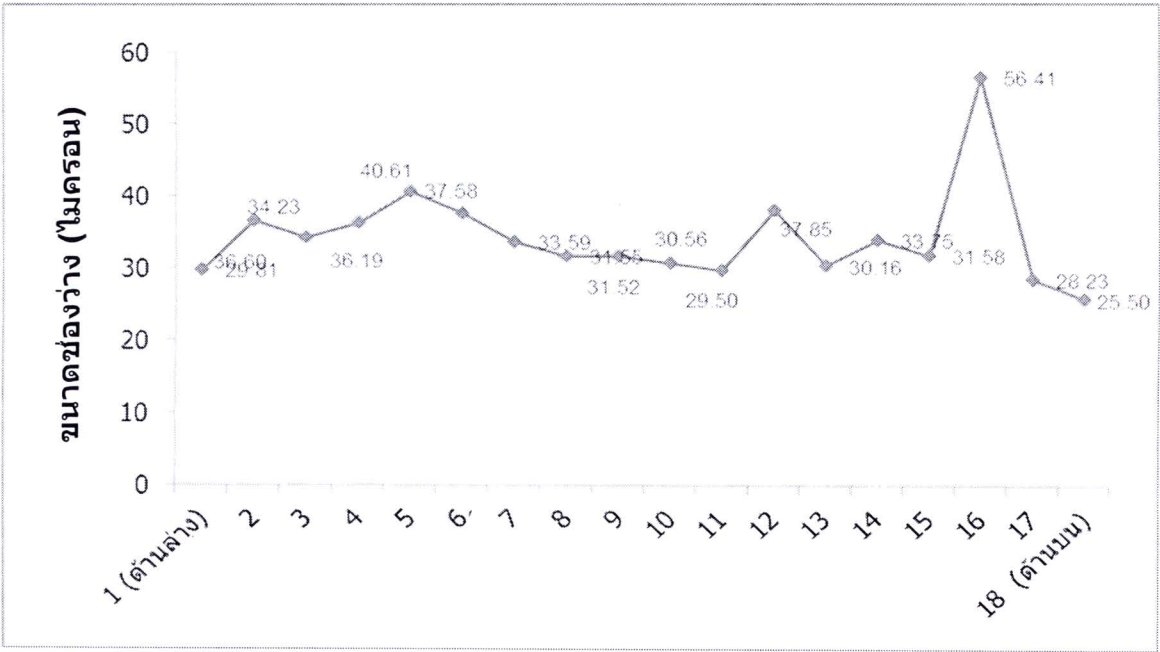


รูปที่ 4.12 Sensor ควบคุมอุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting

หลังจากที่ทำการอุ่นดุมล้อยได้ตามที่กำหนดไว้แล้ว จึงทำการวางในแบบหล่อเพื่อทำการหล่อ และ หลังจากนั้นนำชิ้นงานหล่อไปผ่านกระบวนการอบ Precipitation Hardening (T6) แล้วจึงนำชิ้นงานไปทำการผ่าครึ่ง และเตรียมผิวโดยการขัดด้วยกระดาษ และผงอะลูมินา ก่อนนำมาตรวจสอบขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมด้วย กล้อง Microscope ที่กำลังการขยายที่ 200 เท่า และทำการวัดขนาดของช่องว่างด้วย Software ในเครื่องของ KEYENCE ซึ่งจะทำการแบ่งชิ้นงานออกเป็น 18 ส่วน และทำการวัดส่วนและ 10 จุด เพื่อหาค่าเฉลี่ยของช่องว่างในแต่ละส่วน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในตารางที่ 4.13 – 4.18

ตารางที่ 4.3 ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 100 °C (หน่วย : ไมครอน)

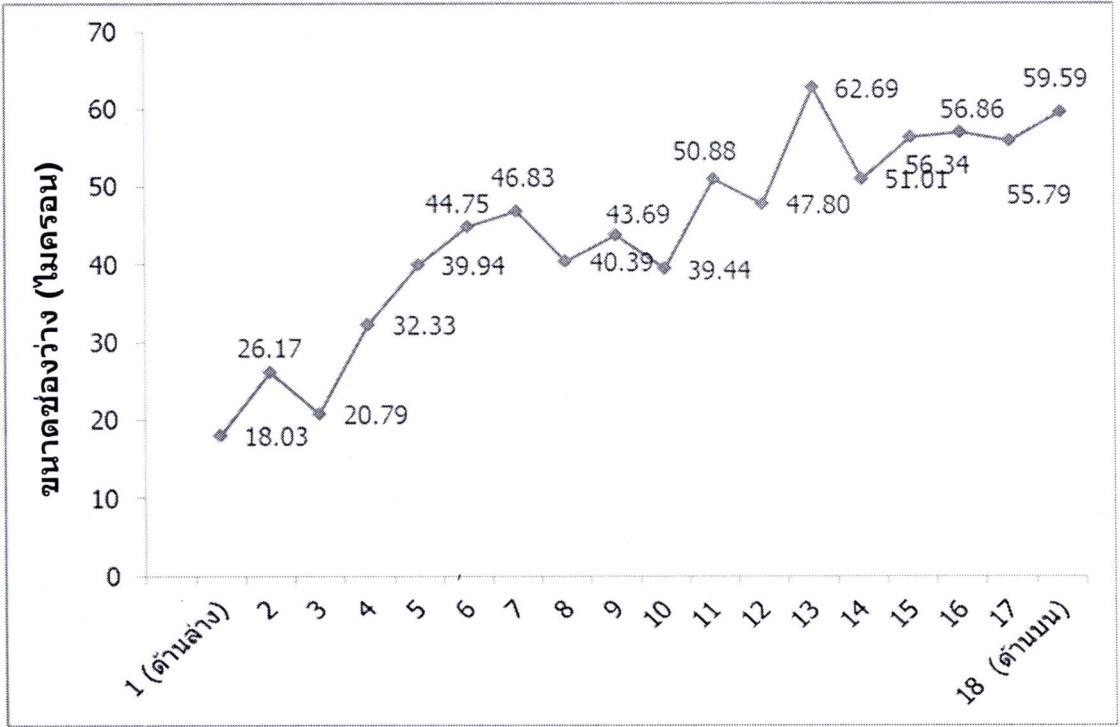
ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (ด้านล่าง)	35.15	30.74	29.69	29.93	34.79	19.09	9.53	26.17	30.56	52.46	29.81	11.09
2	20.38	39.82			36.67	43.1	41.91	28.66	35.88	46.38	36.60	8.48
3	53.68	50.74	22.95	27.66	38.17	26.69	30.74	26.69	32.46	32.53	34.23	10.37
4			23.05	26.69	44.08	40.08		32.46	45.79	41.16	36.19	8.86
5	42.99	38.13	41.98	41.98	27.71	34.52	50.84	40.21	39.08	48.62	40.61	6.59
6	44.8	27.29	46.73	40.08	29.04	31.47	33.85	44.07	43.15	35.28	37.58	7.08
7	34.79	28.59	32.91	28.66	31.95	41.95	33.47	37.38	36.42	29.79	33.59	4.22
8	36.86	30.14	26.84	27.71	26.96	32.46	42.08	25.81	34.52	32.15	31.55	5.19
9	34.17	48.2	40.08		19.06	29.16	26.7	32.63	27.29	26.36	31.52	8.58
10	38.6	41.95	37.98	24.3	24.5	15.25			27.64	34.22	30.56	9.12
11	33.52	35.15	37.61	22.88	25.33	18.99	33.7	23.05	26.76	37.98	29.50	6.87
12	40.94	42.63	54.59	33.85	27.71	40.94	29.04	32.87	34.06	41.91	37.85	7.99
13	37.95	32.36	39.49	31.97	23.85	31.97	22.11	26.96	24.85	30.1	30.16	5.79
14	42.2	47.4	22	25.66	32.91	35.88	46		27.66	24	33.75	9.67
15	27.51	21.92	35.38	23.58	28.34	44.84	38.17	30.29	32.38	33.35	31.58	6.86
16	38.42	37.01	63	86.74	59.26	91.12	55.16	44.64	42.9	45.8	56.41	19.18
17	37.09	18.51	20.04	22.6	22.31	33.85	52.85	29.69	25.18	20.2	28.23	10.65
18 (ด้านบน)	20.2	21.5	15.72	18.51	27.9		47.67	23.19	12.72	42.08	25.50	11.88



รูปที่ 4.13 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 100 °C

ตารางที่ 4.4 ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 200 °C (หน่วย : ไมครอน)

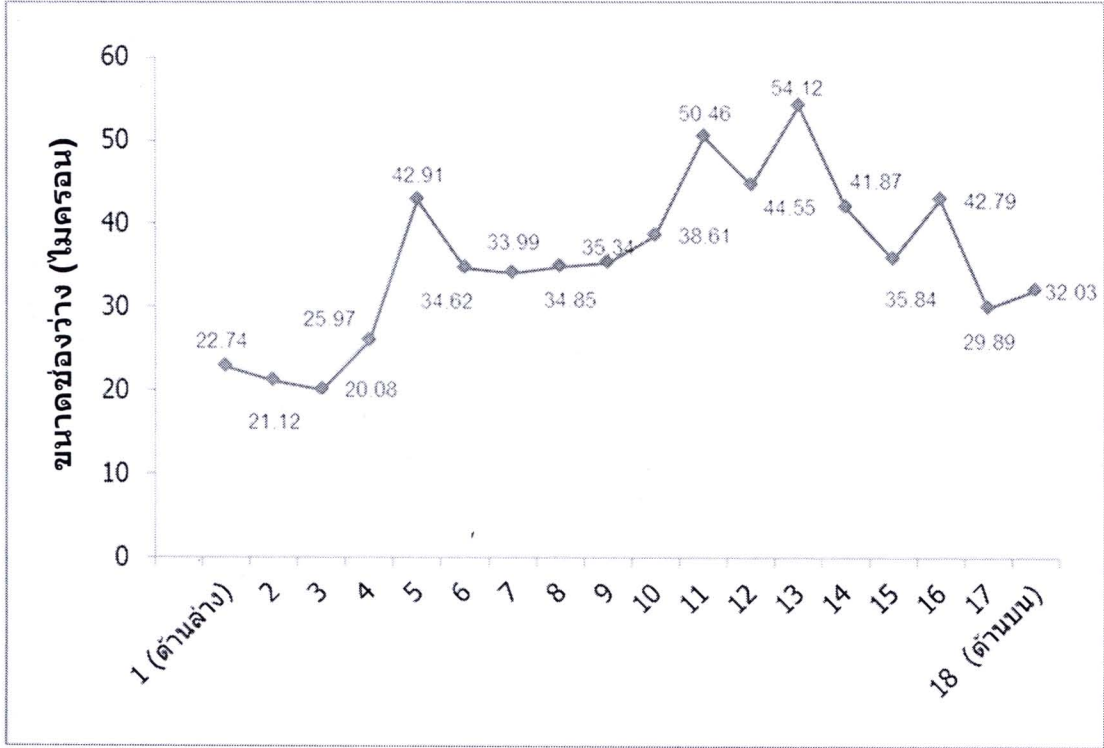
ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (ด้านล่าง)	20.02	19.06	18.21	19.28	21.92				13.38	14.33	18.03	3.08
2		12.43	15.25	19.16	18.11	26.69	43.84	37.61		36.23	26.17	11.75
3	18.11	18.21	14.3	17.16	19.06	14.33	21.92	27.76	36.29		20.79	7.11
4	25.07	45.61	49.89	59.37	41.95	18.13	16.2	28.61	16.2	22.25	32.33	15.63
5	35.27	29.56	55.41	63.89	48.65	24.13	28.05	59.16	20.97	34.31	39.94	15.53
6	26.69	27.71	46.73	57.2	31.47	38.42	42.47	38.55	76.26	61.95	44.75	16.07
7	38.13	40.08	71.51	73.4	40.08	37.17	44.96	42.9	33.37	46.74	46.83	14.04
8	38.17	31.51	32.42	47.69	48.76	38.42	28.59	41.38	45.16	51.79	40.39	7.94
9	44.81	38.14	53.38	50.52	50.52	48.61	35.47	40.08	44.84	30.52	43.69	7.44
10	33.48	37.18	51.5	42.9	38.17	42.89	31.68	40.04	39.26	37.28	39.44	5.55
11	45.75	45.84	37.18	41.94	54.34	54.33	53.51	52.73	55.49	67.73	50.88	8.56
12	45.76	52.64	51.48	43.41	39.37	38.17	41.52	52.18	56.23	57.2	47.80	7.01
13	36.23	52.43	60.05	56.63	59.16	76.46	91.51	73.39	71.49	49.57	62.69	15.80
14	54.36	52.46	45.76	55.28	45.75	47.69	35.28	53.38	55.28	64.88	51.01	7.90
15	65.77	67.7	61.95	56.24	36.22	58.14	47.67	61.96	56.27	51.48	56.34	9.36
16	61.07	53.38	55.31	55.28	70.53	61.95	56.23	60.08	49.89	44.84	56.86	7.08
17	69.59	65.88	54.34	59.09	53.45	45.75	46.79	55.31	57.2	50.52	55.79	7.62
18 (ด้านบน)	59.09	53.38	79.13	60.08	53.38	65.88	61.79	51.79	58.52	52.85	59.59	8.24



รูปที่ 4.14 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 200 °C

ตารางที่ 4.5 ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 300 °C (หน่วย : ไมครอน)

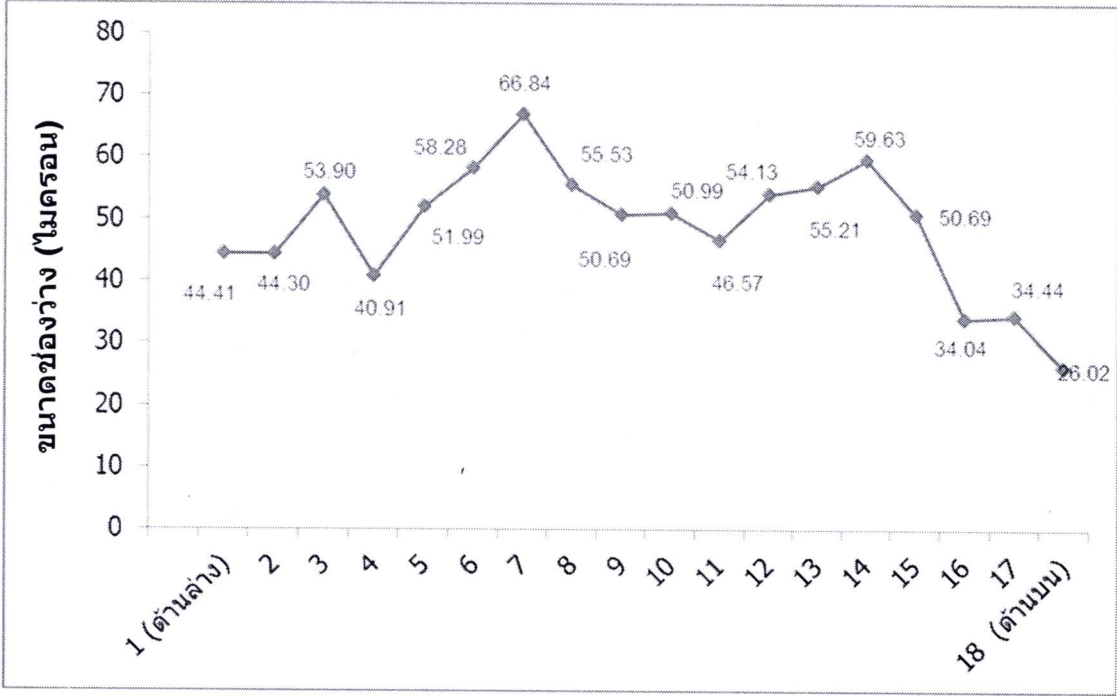
ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (ด้านล่าง)	23.9	33.29	32.6	18.33	15.28	16.23	31.44	19.09	20.11	17.16	22.74	7.11
2	30.56	27.13	28.74	15.37	12.43	13.65		27.9	15.28	19.06	21.12	7.35
3	20.02	20.04	15.37	30.56	18.08	28.05	20.02	16.23	16.2	16.2	20.08	5.21
4		27.64			32.53	25.81	18.11	24.3	22.89	30.52	25.97	4.84
5	39.12	35.27	42.89	47.67	72.59	67.68	40.03	21.92	14.3	47.67	42.91	17.89
6	37.45	36.22	40.75	17.18	16.31	16.23	32.36	50.66	78.99	20.04	34.62	19.63
7	31.16	31.22	30.74	34.43	44.15	36.27	33.29	42.99	22.11	33.58	33.99	6.30
8	45.61	38.32	22.88	20.04	49.56	30.74	41.95	25.75	46.7	26.96	34.85	10.85
9	26.59	34.22	36.68	29.16	43.01	32.46	41.98	38.17	39.64	31.44	35.34	5.48
10	24.78	24.85	33.36	26.69	35.27	53.38	56.23	49.24	38.42	43.84	38.61	11.69
11	44.98	50.52	43.89	54.22	61.98	52.46	47.67	59.09	56.52	36.22	50.46	8.08
12	36.23	40.58	35.59	38.55	45.79	40.39	46.94	48.65	58.27	54.54	44.55	7.68
13	82.11	53.41	54.34	63.26	50.55	48.84	56.27	33.37	43.73	55.31	54.12	12.70
14	37.28	36.22	38.14	42.99	30.5	47.89	36.53	41.38	55.29	52.5	41.87	7.86
15		34.31	56.18	40.75	43.47	39.08	31.81	25.93	26.7	24.3	35.84	10.25
16	49.75	48.86	38.94	28.99	45.56	69.91	53.05	23.37	28.43	41.03	42.79	13.85
17	33.29	32.75	29.36	34.64	30.52	32.36	24.43	27.13	23.83	30.63	29.89	3.71
18 (ด้านบน)	34.33	26.36	35.32	22.95	31.05	43.85	17.5	33.52	40.08	35.32	32.03	7.89



รูปที่ 4.15 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 300 °C

ตารางที่ 4.6 ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 400 °C (หน่วย : ไมครอน)

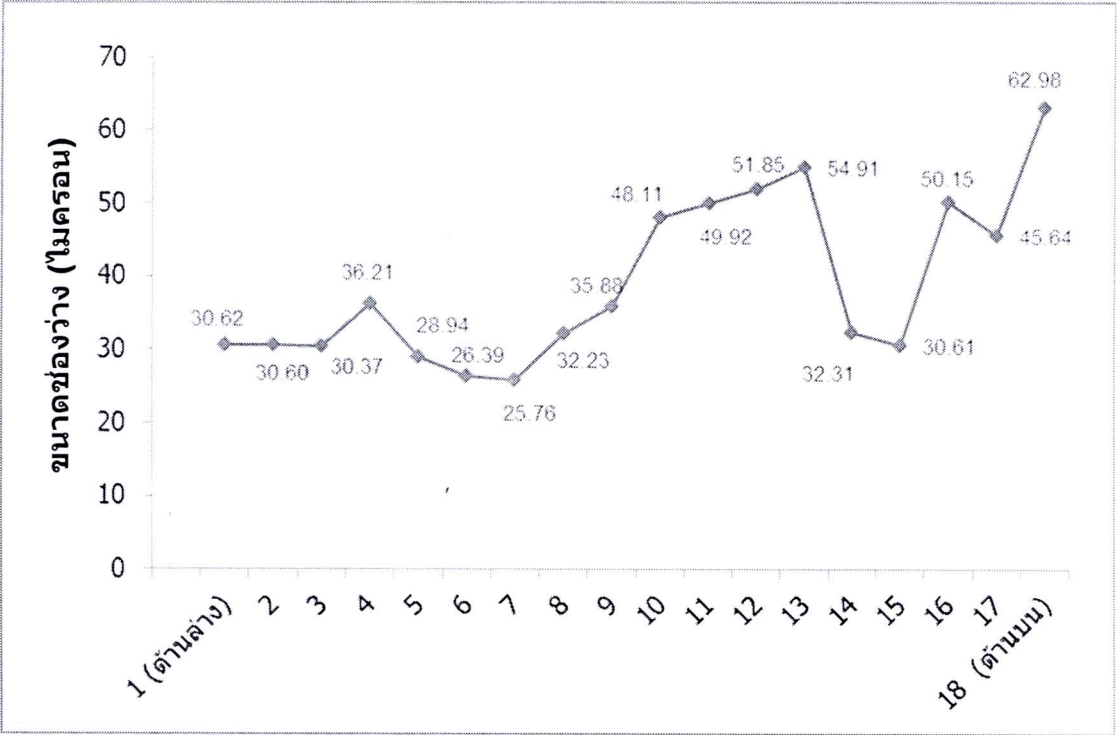
ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (ด้านล่าง)	43.89	40.94	39.49		35.27	47.81	52.03	32.41	56.27	51.61	44.41	8.11
2	39.08	21.94	44.80	31.45	33.52	59.22	49.20	52.34	68.63	42.81	44.30	13.80
3		41.00	43.85	41.03	65.83			60.05	58.34	67.21	53.90	11.62
4		27.66	38.55	57.47	50.30	33.41	39.12	51.69	45.16	24.80	40.91	11.16
5	55.58	57.22	46.23	34.96	59.86	64.84		36.33	50.01	62.91	51.99	10.95
6	71.48	59.12	49.57	44.81	86.02	89.84	55.33	42.55	51.59	32.46	58.28	18.75
7	60.96	59.16	90.73	98.34	77.30	57.20	63.92	76.87	39.09	44.80	66.84	18.93
8	59.71	71.23	79.93	37.48	58.95	53.45	39.18	59.12	53.35	42.89	55.53	13.52
9	54.54	54.33	57.22	43.85	35.32	59.86	41.03	51.47	61.48	47.81	50.69	8.54
10	45.76	41.00	75.37	51.48	61.51	42.99	47.69	40.04	49.60	54.46	50.99	10.76
11	41.98	44.35	47.89	40.03			45.80	56.18	42.90	53.45	46.57	5.66
12		47.81	57.26	47.74	50.52	52.46	56.63	60.12	60.53		54.13	5.20
13	73.40		52.03	93.82	52.56	49.56	64.81	36.22	39.08	35.38	55.21	19.29
14	58.34	79.11	76.26	59.12	49.56	45.79	48.62	48.32	57.26	73.89	59.63	12.51
15	71.48	56.31	44.22	34.79	54.40	46.11	54.74	53.59	51.09	40.13	50.69	10.16
16	36.08	28.43	31.97	21.16	19.65	28.23	43.23	38.17	36.22	57.22	34.04	11.01
17	35.89	18.21	45.80	39.82	31.81	52.53	25.75	44.80	20.11	29.69	34.44	11.39
18 (ด้านบน)	23.58	22.66	23.90	20.38	22.31	15.37	28.67	34.79	42.55		26.02	8.20



รูปที่ 4.16 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 400 °C

ตารางที่ 4.7 ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 500 °C (หน่วย : ไมครอน)

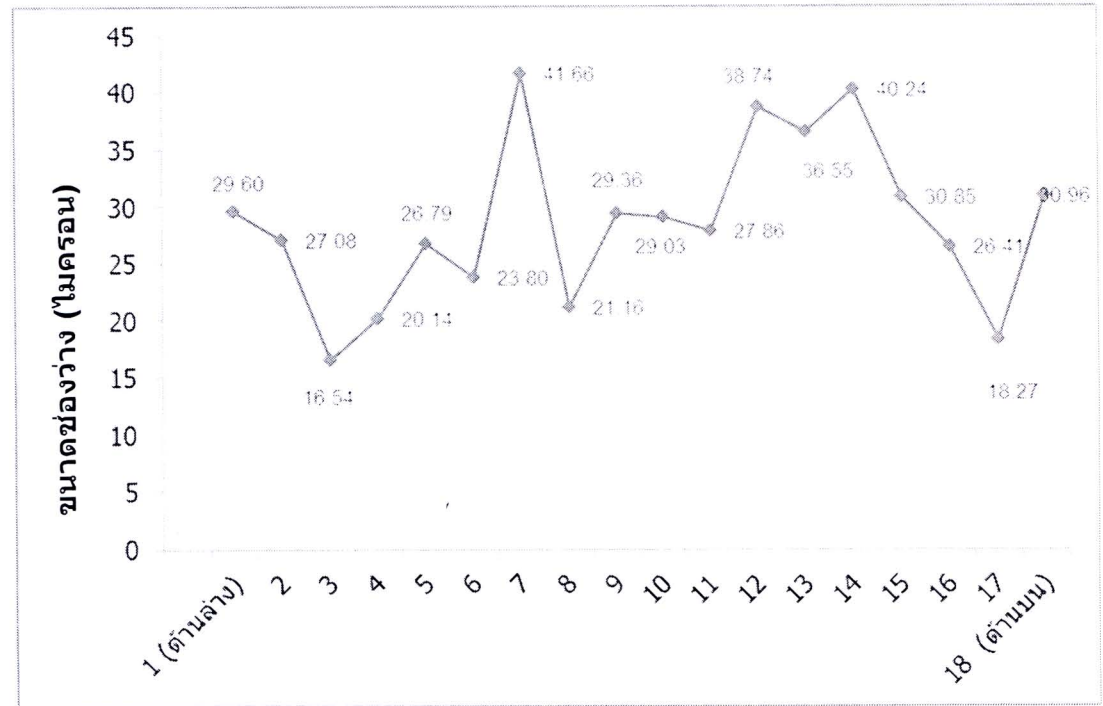
ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (ด้านล่าง)		40.58	33.41	34.52	25.75	23.85	31.45	24.78			30.62	6.14
2	35.38	32.42	28.84	25.75							30.60	4.19
3		31.68	30.5	33.09		18.99	40.13	33.41	24.8		30.37	6.76
4	24.8	32.42	28.59	30.52	36.53	44.22	30.52	46.71	46.71	41.08	36.21	8.00
5	24.13	28.43	26.22	22.88	34.22	38.37	49.79	25.75	22.43	17.18	28.94	9.49
6	40.09	38.42	26.7	25.75	18.73	24.5	15.37	28.23	24.13	22	26.39	7.78
7	22.11	18.65	29.04	27.76	27.79	31.51	22.95	27.29	20.04	30.5	25.76	4.49
8	37.71	33.52	44.8	30.29	35.89	23.83	28.59	27.71	27.71		32.23	6.44
9	34.64	35.15	46.86		45.76	36.22	41.94	27.29	23.58	31.47	35.88	7.92
10	39.8	39.18	48.8		50.66	52.34	45.44	53.79	59.16	43.84	48.11	6.65
11	25.66	28.23	44.22	33.48	47.18	79.25	90.57	59.69	38.42	52.45	49.92	21.39
12	97.22	52.46	47.4	63	64.04	52.85	27.71	34.37	38.32	41.16	51.85	19.83
13	77.91	62.22	38.23	35.28			41.08		47.69	81.96	54.91	19.24
14	26.86	27.76	31.44	37.71	29.56	27.79	40.03		38.17	31.45	32.31	5.04
15	34.33	30.5	29.55		33.35		32.36	23.54			30.61	3.89
16	48.94	60.24	53.51	42.93	48.26	47.66	47.89	50.6	53.68	47.81	50.15	4.71
17	29.59	37.01	54.4	23.19	47.32	51.79	58.15	60.17	39.09	55.72	45.64	12.76
18 (ด้านบน)	83.8	64.96	69.63	69.81	50.67	53.17	46.74	63.94	63.58	63.49	62.98	10.76



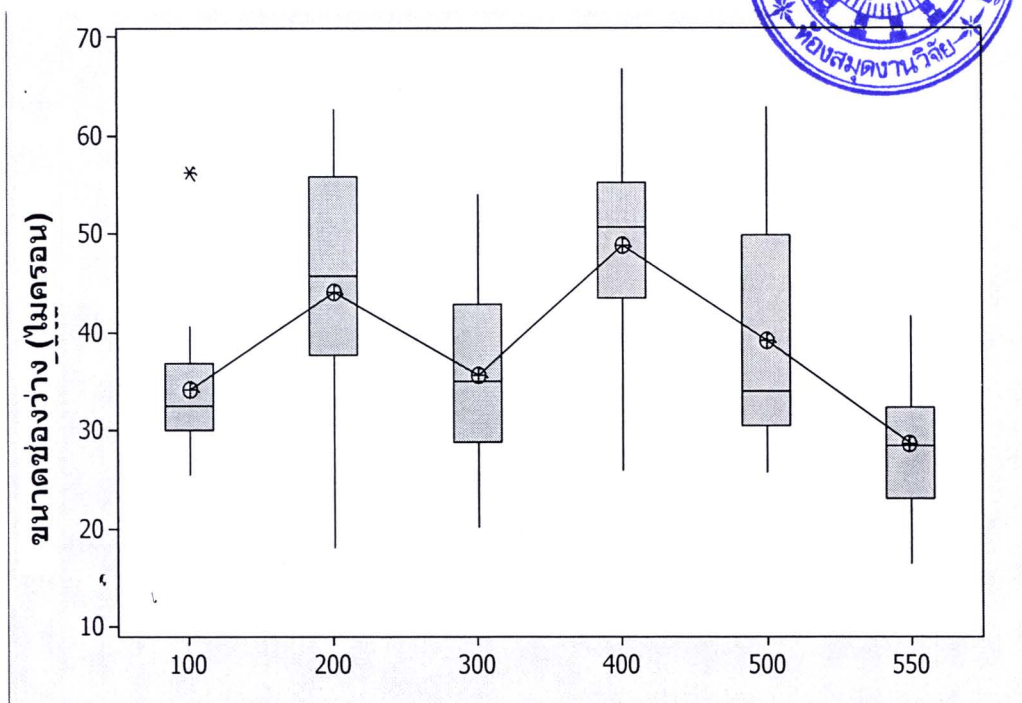
รูปที่ 4.17 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 500 °C

ตารางที่ 4.8 ขนาดของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 550 °C (หน่วย : ไมครอน)

ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1 (ด้านล่าง)	42.99	26.70	38.17	23.85	26.70		23.83		27.90	26.69	29.60	7.04
2	26.69	23.85	29.16	24.13	33.37	23.85	28.59	23.90	25.75	31.51	27.08	3.45
3	22.43	13.88	25.07	21.42	10.27	18.21	11.44	15.98	13.34	13.34	16.54	5.02
4	19.09	15.37			17.26	25.38	24.00	27.26	12.72	20.04	20.14	5.07
5	37.17	22.00	38.32	26.17	25.81	24.85	19.65	20.38			26.79	7.18
6	33.48	27.51	17.18	28.59	23.85	26.76	39.18	13.65	12.96	14.80	23.80	8.95
7	41.98	76.26	33.68	45.21	62.39	43.84	27.66	27.29	31.68	26.59	41.66	16.46
8	16.20	30.50	19.16	21.42	17.26	24.80	22.00	15.98	25.24	19.06	21.16	4.63
9	26.76	25.33	13.34	46.86	32.46	44.81	47.40	12.39	19.44	24.80	29.36	13.19
10	33.58	22.91	26.76	26.59	26.69	28.43	34.44	28.99	31.45	30.50	29.03	3.53
11	0.00	39.82	35.15	36.08	42.30	30.52	26.70	22.88	20.38	24.80	27.86	12.23
12	26.69	24.73	24.50	59.87	44.31	40.72	41.81	30.87	47.18	46.71	38.74	11.70
13	38.42	46.19	40.31	36.48	35.73	31.68		29.56	40.03	30.52	36.55	5.39
14	45.31	36.27	31.95	45.21		41.16	35.32	45.75	46.79	34.44	40.24	5.78
15	39.26	24.78	43.01	28.85	41.16	20.46	28.15		24.36	27.66	30.85	8.16
16	24.43	38.37	35.32	17.16	25.65	24.78	20.99	29.24	26.98	21.16	26.41	6.50
17	17.52	18.51	20.90	21.78	21.94	16.67	14.92	15.07	18.73	16.65	18.27	2.59
18 (ด้านบน)	20.40	32.82	27.79	37.60	40.09	26.86	26.02	33.25	34.66	30.14	30.96	5.90

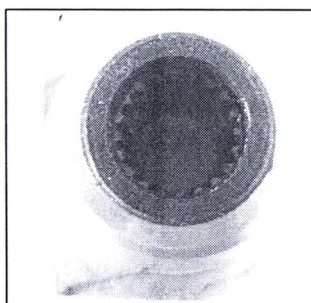


รูปที่ 4.18 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่อุณหภูมิการอุ่น Insert Casting ที่ 550 °C



รูปที่ 4.19 กราฟ Box Pot เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยช่องว่างในแต่ละอุณหภูมิ

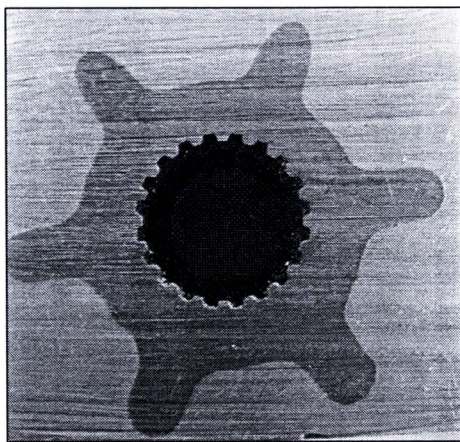
จากการวัดค่าเฉลี่ยของช่องว่างระหว่าง Insert Casting และอะลูมิเนียม โดยเปรียบเทียบทุกช่วงอุณหภูมิในการอุ่น Insert Casting พบว่าแนวโน้มของช่องว่างที่เกิดขึ้นไม่ได้มีขนาดความกว้างน้อยไปมาก จากด้านล่างไปด้านบนเสมอไป และการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของขนาดช่องว่างในแต่ละอุณหภูมิการอุ่น Insert Casting พบว่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไม่มีความสัมพันธ์กับขนาดของช่องว่าง เนื่องจากการหล่อเป็นแบบ Top Gate และตำแหน่งของทางเข้าน้ำอะลูมิเนียม Gate จะอยู่ตำแหน่งที่ตรงกับ Insert Casting ทำให้น้ำอะลูมิเนียมไหลมาบน Insert Casting พอดี ซึ่งเป็นการอุ่นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของ Insert Casting ระหว่างกระบวนการหล่อ แต่จากการทดลองพบว่า การอุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นอุณหภูมิต่ำเกินไป ทำให้ Insert Casting ขยายตัวจากการอุ่น Insert Casting ไม่เพียงพอและไม่เหมาะสมกับขนาดของแกนที่สวด Insert Casting ในแบบหล่อ ทำให้ใส่ Insert Casting ไม่สุด และเกิดปัญหาการลึงผิวงานหล่อไม่หมดดังรูปที่ 4.28 และช่วงที่ทำให้ค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่น้อยที่สุดคือการอุ่น Insert Casting ที่อุณหภูมิ 550 °C ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงที่สุด



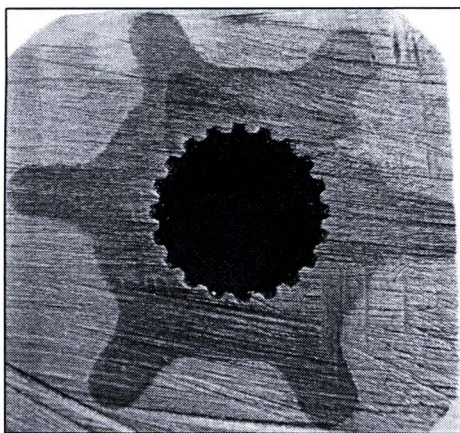
รูปที่ 4.20 ดุมล้อยที่กลึงผิวงานหล่อของดุมล้อ (Insert) ไม่หมด

4.2.1 การวิเคราะห์การ Design ของ Insert Casting

ทำการวิเคราะห์ Design ของ Insert Casting เพื่อดูความเหมาะสมในของ Design โดยวิเคราะห์จากกระบวนการหล่อ ซึ่งถ้า Design ของ Insert Casting ไม่เหมาะสม เมื่อหล่อหุ้มจะพบจุดบกพร่องแบบหล่อไม่เต็ม (Misrun) ในบริเวณของพื้นที่การหล่อหุ้ม โดยทำการวิเคราะห์ด้วยวิธีการตัดขวาง Insert Casting และอะลูมิเนียม ที่อุณหภูมิ 100°C และ 550°C ดังรูปที่ 4.21 และ 4.22



รูปที่ 4.21 ตัดขวางคูล็อตที่อุณหภูมิ 100°C



รูปที่ 4.22 ตัดขวางคูล็อตที่อุณหภูมิ 550°C

จากการตรวจสอบด้วยสายตาหลังจากตัดขวางผ่าน Insert Casting และอะลูมิเนียม ในชิ้นงานที่ทำการหล่อหุ้ม Insert Casting ที่อุณหภูมิที่ต่ำ 100°C และที่อุณหภูมิสูง 550°C ซึ่งจากการตรวจสอบไม่พบจุดบกพร่องแบบหล่อไม่เต็ม (Misrun) บริเวณที่หล่อหุ้ม Insert Casting จึงสามารถสรุปได้ว่า Design ของ Insert Casting ออกแบบเหมาะสมกับการหล่อหุ้มด้วยอะลูมิเนียมแล้ว

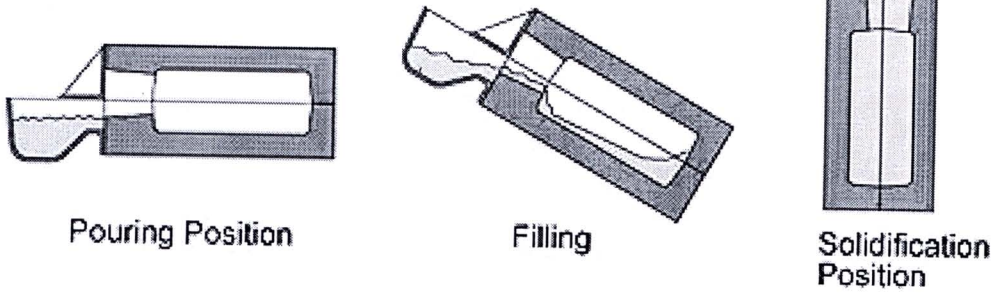
4.3 วิเคราะห์ความแตกต่างของกระบวนการหล่อหุ้ม

จากบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการวางแผนในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของกระบวนการหล่อที่แตกต่างกันระหว่างกระบวนการหล่อที่ตักน้ำอะลูมิเนียมเทด้านบน (Top Gate) ซึ่ง Gate จะอยู่ตรงกลางของแบบหล่อ ตรงกับตำแหน่งของ Insert Casting ตามรูปที่ 4.23 การหล่อการออกแบบ Gate แบบนี้ จะทำให้มีโอกาสเกิดออกไซด์ในระหว่างการเทมากกว่าแบบ Tilting และกระบวนการหล่อที่สองเป็นกระบวนการหล่อแบบ Tilting ซึ่งเป็นการหล่อเทแบบค่อยๆ รินน้ำอะลูมิเนียมเข้าแบบหล่อ โดยการค่อยๆ เอียงแบบหล่อ ซึ่งการหล่อแบบนี้จะมี Gate ทางเข้าของน้ำอะลูมิเนียมอยู่ด้านข้าง ตามรูปที่ 4.24 กระบวนการหล่อแบบนี้จะมีโอกาสเกิดออกไซด์ได้น้อยกว่าแบบ Top Gate โดยจะทำการวัดขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting และอะลูมิเนียมของกระบวนการหล่อทั้ง 2 แบบนี้ หลังจากผ่านกระบวนการทำให้เย็นหลังกระบวนการหล่อด้วยน้ำ และผ่านกระบวนการ Solution + บ่มแข็ง ซึ่งผลการวิเคราะห์ขนาดของช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียมกับ Insert Casting สำหรับการหล่อแบบ Top Gate อ้างอิงตามผลการทดลองในหัวข้อที่ 4.2 ตารางที่ 4.8 และสำหรับการหล่อแบบ Tilting แสดงในตารางที่ 4.9 ตามลำดับ



รูปที่ 4.23 การหล่อแบบเทด้านบน (Top Gate)

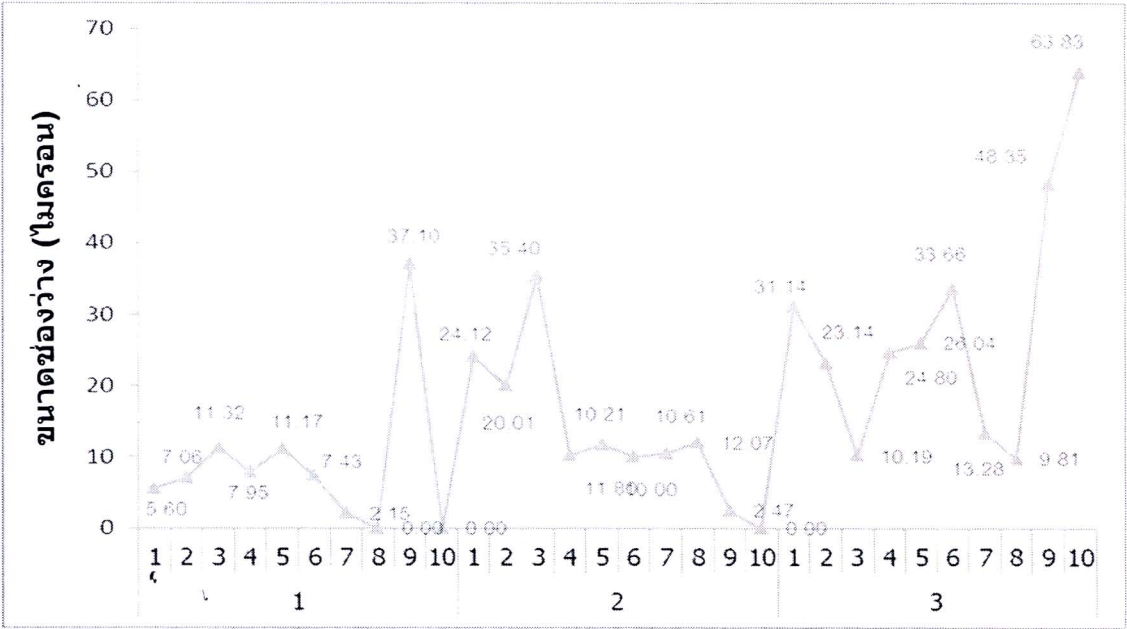
Traditional Tilt Pouring



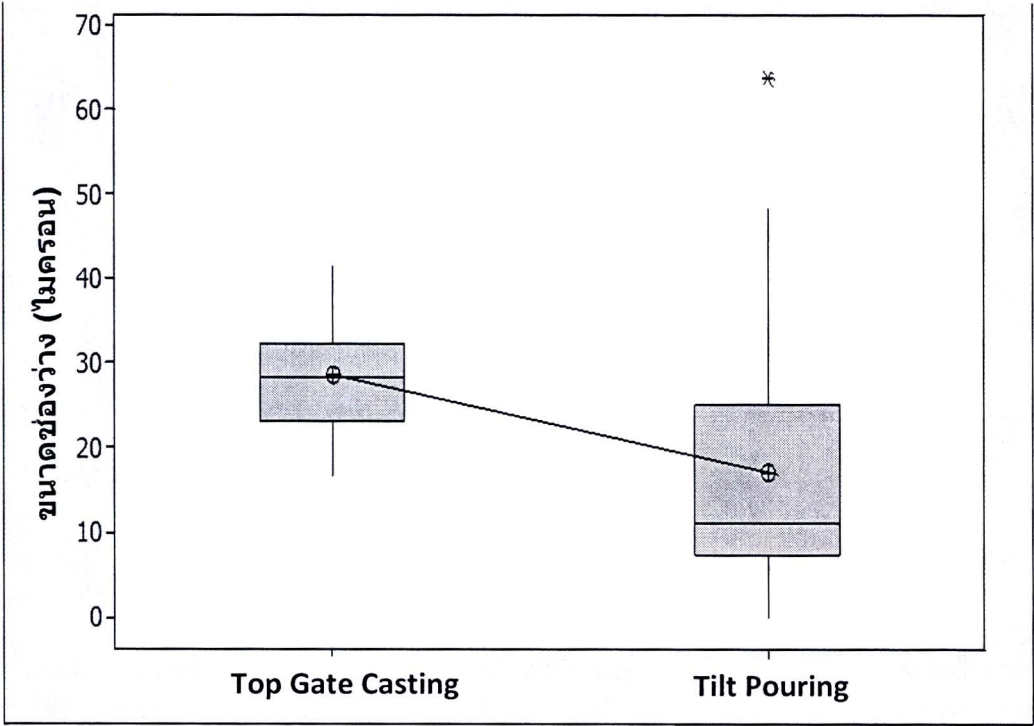
รูปที่ 4.24 การหล่อแบบรินน้ำอะลูมิเนียม (Tilting)

ตารางที่ 4.9 ขนาดของช่องว่างจากกระบวนการหล่อแบบ Tilting (หน่วย : ไมครอน)

ชั้นที่	ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	1	0	0	36.41	0	0	0	0	19.61	0	0	5.60	12.46
	2	0	0	41.6	0	29.01	0	0	0	0	0	7.06	15.18
	3	24.51	0	0	0	34.55	33.61	0	0	20.54	0	11.32	15.14
	4	0	0	19.61	0	14.94	0	12.28	10.93	10.06	11.7	7.95	7.33
	5	16.81	14.28	15.98	0	12.46	25.21	0	7.53	0	19.43	11.17	8.94
	6	14.13	0	12.14	11.24	10.44	0	0	13.11	0	13.2	7.43	6.47
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	8.46	13.01	2.15	4.65
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	9	43.17	46.06	30.81	39.39	40.42	44.39	27.86	13.59	35.16	50.15	37.10	10.74
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
2	1	30.81	21.29	0	42.02	0	0	0	21.07	126.1	0	24.12	38.99
	2	0	0	25.21	31.16	26.74	0	33.16	35.48	0	48.35	20.01	18.30
	3	46.69	32.24	35.55	53.22	18.67	0	32.68	54.16	51.35	29.48	35.40	17.12
	4	0	14.01	18.77	0	24.72	0	31.04	0	13.59	0	10.21	11.85
	5	17.96	16.83	0	0	0	0	45.84	0	0	37.35	11.80	17.35
	6	15.2	0	14.79	13.11	20.67	14.61	12.28	9.34	0	0	10.00	7.46
	7	0	0	16.83	0	15.2	0	0	0	74.05	0	10.61	23.27
	8	0	0	120.7	0	0	0	0	0	0	0	12.07	38.16
	9	24.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.47	7.80
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
3	1	55.1	56.65	47.63	40.15	28.96	0	0	0	41.81	41.08	31.14	22.86
	2	28.26	35.48	19.61	0	24.24	11.2	16.12	40.15	26.14	30.17	23.14	11.87
	3	31.5	29.08	0	21.68	0	19.61	0	0	0	0	10.19	13.56
	4	28.01	33.61	28.01	0	30.81	41.44	22.72	0	38.21	25.21	24.80	14.24
	5	36.41	32.68	27.08	28.26	28.4	0	31.96	25.21	28.01	22.41	26.04	9.97
	6	61.62	19.61	27.08	34.55	26.95	32.68	23.8	36.41	42.02	31.87	33.66	11.77
	7	13.2	0	11.2	12.14	13.11	25.21	15.06	0	18.6	24.28	13.28	8.52
	8	0	26.57	40.19	0	31.3	0	0	0	0	0	9.81	16.12
	9	0	98.04	88.7	105.5	47.63	0	110	0	0	33.61	48.35	48.00
	10	42.28	56.96	72.64	117.6	116.7	94.77	69.09	0	40.15	28.01	63.83	38.28



รูปที่ 4.25 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่หล่อหุ้มแบบ Tilting



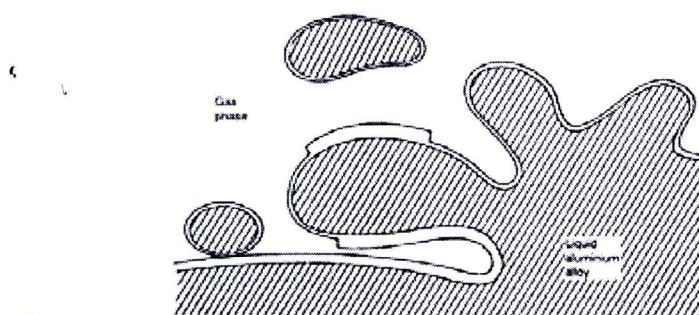
Two-sample T for Top Gate Casting vs Tilt Pouring

	N	Mean	StDev	SE Mean
Top Gate Casting	18	28.61	7.27	1.7
Tile Casting	30	17.0	15.2	2.8

Difference = μ (Top Gate Casting) - μ (Tile Casting)
Estimate for difference: 11.59
95% CI for difference: (3.88, 19.30)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 3.02 P-Value = 0.004 DF = 46
Both use Pooled StDev = 12.8536

รูปที่ 4.26 กราฟ Box Pot เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยช่องว่างการหล่อทั้ง 2 แบบ

จากการเปรียบเทียบขนาดช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม ของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการหล่อที่แตกต่างกันระหว่างการหล่อแบบดัดเทโดยออกแบบ Gate แบบ Top Gate และการหล่อแบบ Tilting ที่มี Gate อยู่ด้านข้างของชิ้นงาน ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้ t-test เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของช่องว่าง พบว่าค่าเฉลี่ยช่องว่างของการหล่อแบบ Top Gate มีค่าที่สูงกว่าการหล่อแบบ Tilting อย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาจากค่า P-Value ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.004 ต่ำกว่า 0.05 ภายใต้อัตราความเชื่อมั่น 95% ซึ่งค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอยู่ประมาณ 11.53 ไมครอน ซึ่งสาเหตุที่ทำให้การหล่อแบบ Top Gate มีขนาดของช่องว่างที่กว้างกว่าแบบ Tilting เนื่องจากการหล่อแบบ Top Gate จะส่งผลทำให้เกิดออกไซด์ของอะลูมิเนียมที่มากกว่าการหล่อแบบ Tilting



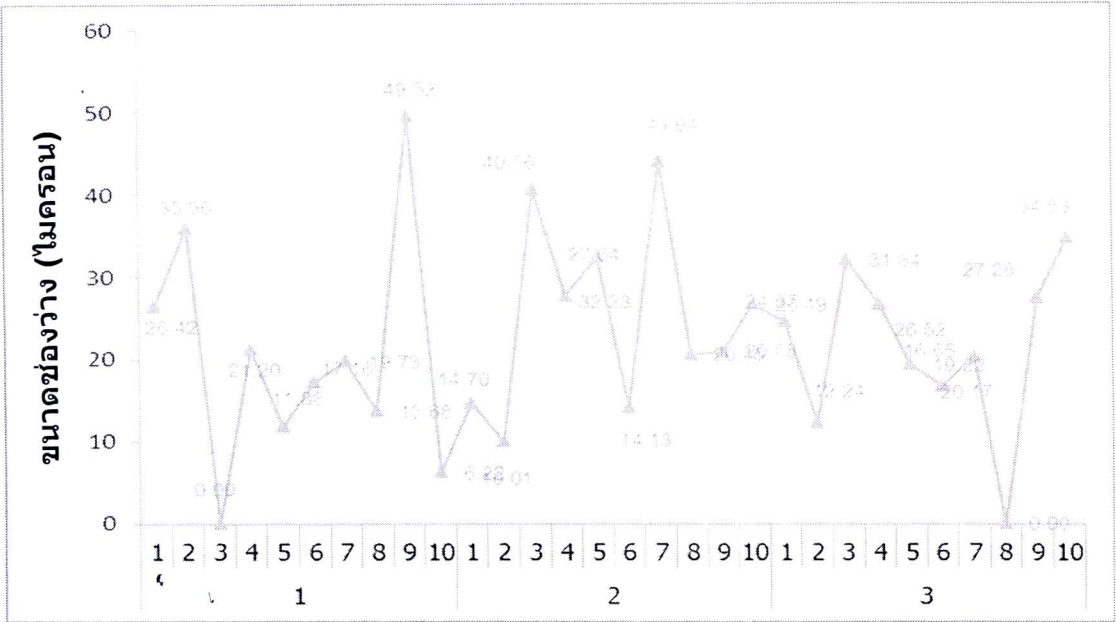
แต่จากการหล่อแบบ Tilting มีค่าความผันแปรของขนาดของช่องว่างที่มากกว่า เนื่องจากจำนวนของชิ้นงานของการหล่อแบบ Tilting มากกว่าชิ้นงานที่หล่อแบบ Top Gate

4.4 วิเคราะห์ความแตกต่างของกระบวนการเย็นตัวหลังการหล่อ

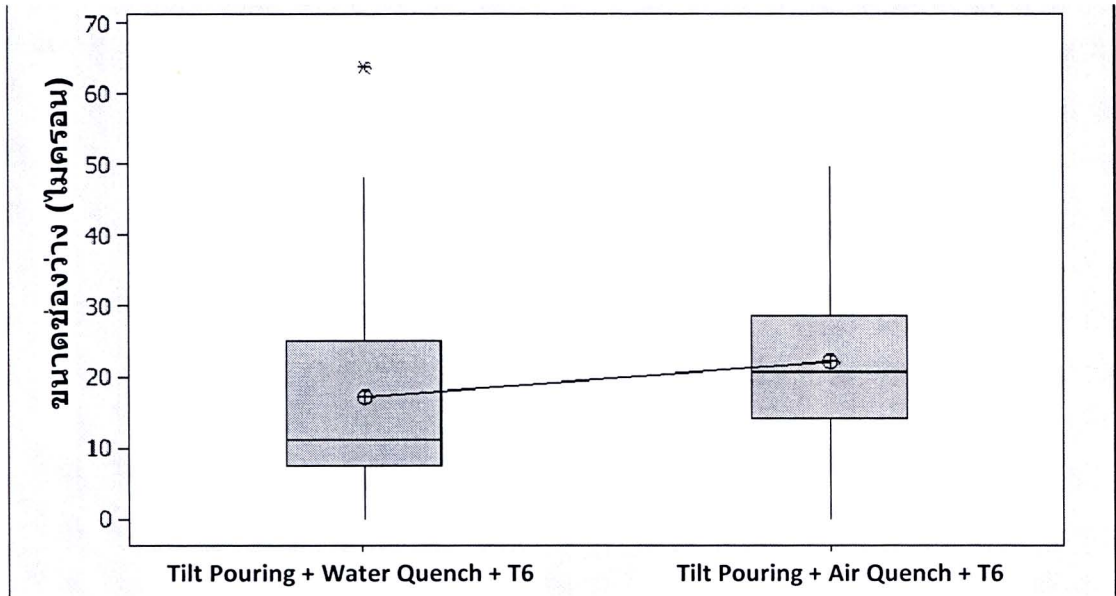
จากบทที่ 3 ทางผู้วิจัยได้ออกแบบการวิเคราะห์ความแตกต่างของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม จากกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานหล่อหุ้มเย็นตัวหลังจากกระบวนการหล่อ โดยกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานเย็นตัวจะมีตัวกลางอยู่ 2 ชนิดด้วยกัน คือ น้ำ กับอากาศ ซึ่งตัวกลางทั้ง 2 ชนิดนี้ มีความสามารถในการพาความร้อนไม่เท่ากัน จะส่งผลให้อัตราการเย็นตัวของชิ้นงานไม่เท่ากัน และจะส่งผลต่อความเค้นตกค้างที่แตกต่างกัน หมายถึง โอกาสการเกิดการบิดตัวของชิ้นงานที่ไม่เท่ากัน โดยค่าขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมของกระบวนการเย็นตัวด้วยน้ำจะอ้างอิงข้อมูลตามตารางที่ 4.9 และกระบวนการเย็นตัวด้วยอากาศจะแสดงในตารางที่ 4.10 และกราฟแสดงการเปรียบเทียบข้อมูลทั้ง 2 กระบวนการตามรูปที่ 4.28

ตารางที่ 4.10 ขนาดของช่องว่างจากกระบวนการหล่อแบบ Tilting ที่เย็นตัวด้วยอากาศ + T6
(หน่วย : ไมครอน)

ชิ้นที่	ส่วนที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	1	0	48.55	42.95	0	0	71.9	67.23	0	33.61	0	26.42	29.89
	2	34.55	46.69	28.94	0	47.63	50.59	56.8	40.23	22.41	31.75	35.96	16.54
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	4	0	0	0	49.49	42.96	28.01	18.67	30.81	16.81	25.21	21.20	17.65
	5	0	0	0	0	17.74	41.09	25.69	14.5	19.78	0	11.88	14.35
	6	0	56.43	34.55	33.52	9.75	16.81	0	0	0	20.56	17.16	19.31
	7	10.27	8.4	39.22	10.44	52.3	15.87	0	15.96	21.48	23.34	19.73	15.56
	8	13.37	14.13	0	0	13.07	31.76	31.76	32.68	0	0	13.68	14.00
	9	68.17	67.23	53.22	52.59	26.14	0	46.69	0	43.88	137.3	49.52	39.26
	10	0	0	25.89	36.26	0	0	0	0	0	0	6.22	13.33
2	1	35.48	21.88	0	19.61	0	28.94	21.48	0	0	19.61	14.70	13.52
	2	27.22	0	0	0	0	27.08	0	15.87	0	29.88	10.01	13.41
	3	72.55	22.41	34.55	60.7	41.08	38.28	31.75	50.42	53.86	0	40.56	20.54
	4	36.41	49.49	29.24	37.77	0	17.74	45.75	0	60	0	27.64	22.17
	5	23.34	32.61	26.16	20.54	36.41	28.94	58.65	21.86	44.82	28.94	32.23	11.81
	6	12.26	9.52	16.81	0	25.21	0	0	14.94	40.15	22.41	14.13	12.91
	7	0	0	52.56	72.19	92.44	0	121.4	54.16	0	46.69	43.94	43.54
	8	48.92	12.7	25.21	15.87	13.37	19.5	0	24.56	23.8	20.54	20.45	12.52
	9	30.93	54.8	27.65	0	25.21	44.82	0	0	25.21	0	20.86	20.14
	10	0	26.14	48.55	0	29.89	28.94	33.16	28.94	17.74	51.5	26.49	17.19
3	1	0	68.67	46.69	0	62.08	0	0	32.68	33.61	0	24.37	27.90
	2	0	22.41	0	27.86	54.36	0	0	17.74	0	0	12.24	18.41
	3	0	0	0	51.35	0	123.3	143.8	0	0	0	31.84	56.14
	4	0	46.69	0	0	113.9	70.03	0	0	34.55	0	26.52	39.75
	5	40.54	20.16	22.56	0	20.98	0	0	28.96	58.96	0	19.22	20.06
	6	0	27.86	32.48	20.37	30.24	0	0	0	30.14	25.37	16.65	14.69
	7	24.01	10.44	28.76	18.79	21.98	20.54	19.96	0	37.39	19.78	20.17	9.96
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	9	0	0	0	0	0	163.4	83.25	25.94	0	0	27.26	54.64
	10	0	37.39	0	27.22	0	84.97	85.91	77.09	0	32.68	34.53	36.25



รูปที่ 4.27 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่หล่อหุ้มแบบ Tilting ที่เย็นตัวด้วยอากาศ



Two-sample T for Tilt pouring + Water Quench + T6 vs Tilt pouring + Air Quench + T6

	N	Mean	StDev	SE Mean
Tile Casting+Water Quench	30	17.0	15.2	2.8
Tile Casting + Air Quench	30	22.2	11.9	2.2

Difference = μ (Tile Casting+Water Quench +T6) - μ (Tile Casting + Air Quench + T6)

Estimate for difference: -5.16

95% CI for difference: (-12.21, 1.88)

T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -1.47 P-Value = 0.148 DF = 58

Both use Pooled StDev = 13.6324

รูปที่ 4.28 กราฟ Box Pot เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยช่องว่างการเย็นตัวทั้ง 2 แบบ

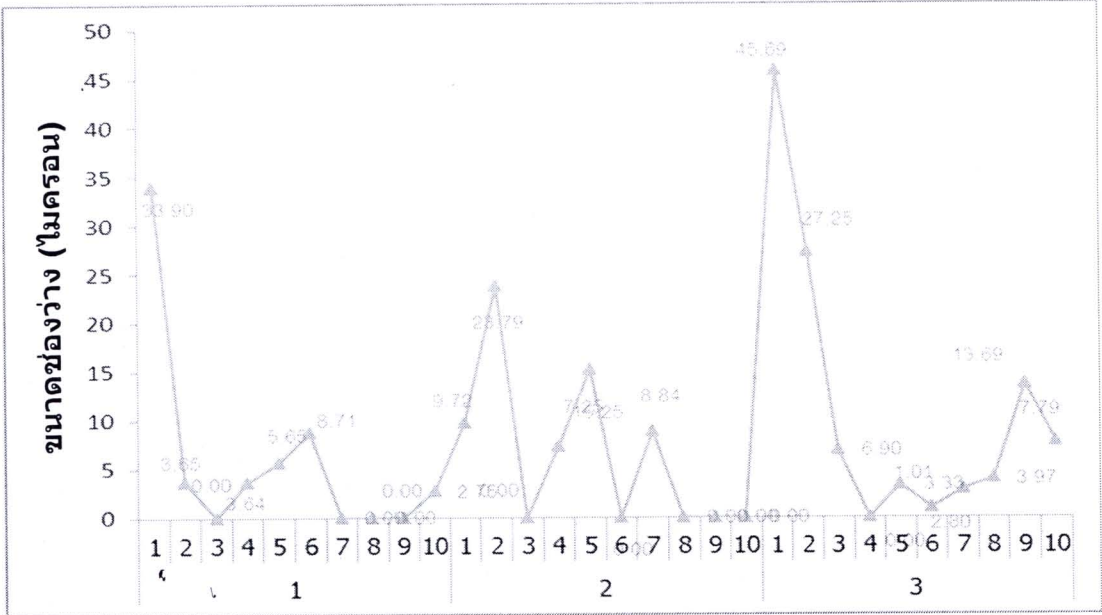
จากการเปรียบเทียบกระบวนการเย็นตัวหลังจากการหล่อ พบว่าขนาดของช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียมกับ Insert Casting ของชิ้นงานหล่อที่ทำให้เย็นตัวหลังการหล่อด้วยน้ำ และการเย็นตัวด้วยอากาศตามข้อมูลทางสถิติ ซึ่งเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของข้อมูลโดยใช้ t-test พบว่าค่า P-Value มีค่า 0.148 สูงกว่า 0.05 สรุปได้ว่าขนาดของช่องว่างระหว่างอะลูมิเนียม กับ Insert Casting ของการเย็นตัวทั้ง 2 แบบ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ภายใต้ความเชื่อมั่น 95% สาเหตุที่ขนาดของช่องว่างของชิ้นงานทั้ง 2 ไม่แตกต่างกัน เนื่องจากความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นจากการเย็นตัวหลังการหล่อน้อยกว่าความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นหลังกระบวนการ Precipitation Hardening เนื่องจาก Difference Thermal Expansion ของกระบวนการเย็นตัวหลังการหล่อที่แตกต่างกัน มีผลต่อขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting และอะลูมิเนียมน้อยกว่า เนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นประมาณ (250°C) มีความแตกต่างกันน้อยกว่า ผลจากอุณหภูมิที่แตกต่างกันของกระบวนการ Quench หลังจาก Solution (465°C) ในกระบวนการ Precipitation Hardening จึงทำให้ผลการวิเคราะห์กระบวนการเย็นตัวหลังการหล่อ ไม่แตกต่างกัน

4.5 วิเคราะห์ความแตกต่างของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการ T6 และผ่านกระบวนการ T6

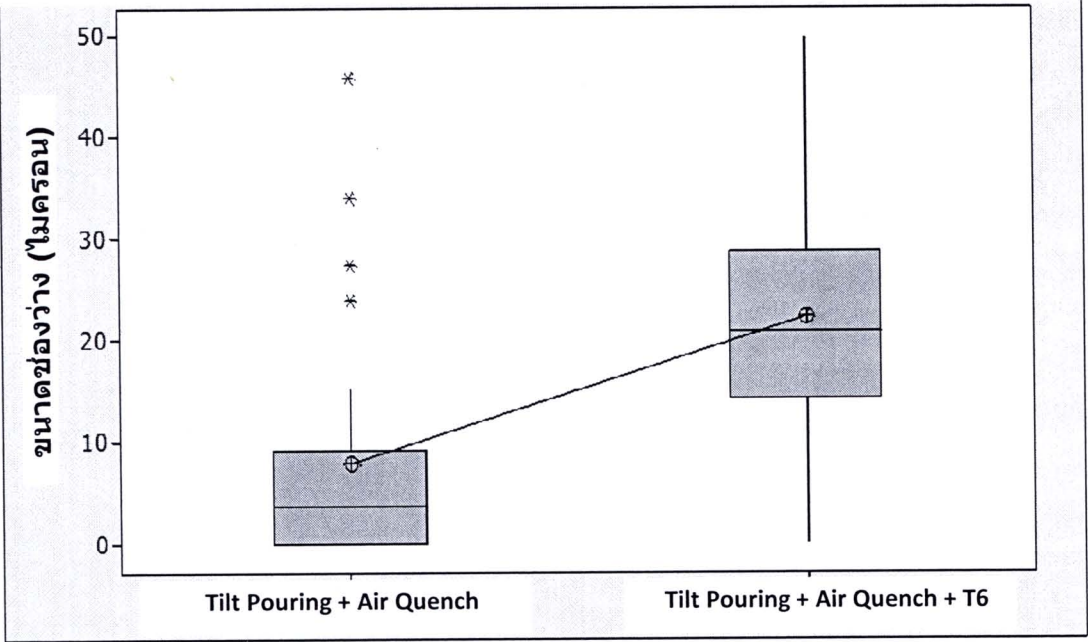
จากบทที่ 3 ผู้วิจัยได้ทำการวางแผนในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม ของชิ้นงานที่ผ่านการอบ T6 และไม่ผ่านการอบ T6 โดยทางผู้วิจัยมีสมมุติฐานว่า กระบวนการอบ T6 อาจจะส่งผลทำให้ขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นจากความเค้นตกค้างที่เกิดขึ้นในกระบวนการ Quenching ด้วยน้ำหลังจากอบ Solution ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงทำการทดลองเปรียบเทียบเพื่อดูความแตกต่างของชิ้นงานทั้ง 2 โดยขนาดของช่องว่างของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบ T6 อ้างอิงตามตารางที่ 4.10 ส่วนช่องว่างของชิ้นงานที่ไม่ผ่านกระบวนการอบ T6 แสดงในตารางที่ 4.11 และการเปรียบเทียบความแตกต่างของขนาดช่องว่างของชิ้นงานทั้ง 2 แบบ จะแสดงในรูปที่ 4.30

ตารางที่ 4.11 ขนาดของช่องว่างจากระบวนการหล่อแบบ Tilting ที่เย็นตัวด้วยอากาศ
(หน่วย : ไมครอน)

ชนิด ชนก	ส่วน ที่	จุดที่										เฉลี่ย	SD Error
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	1	35.48	0	0	41.09	0	0	0	57.98	169	35.48	33.90	52.32
	2	0	0	0	0	8.4	0	0	0	28.09	0	3.65	8.98
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	4	0	0	0	0	0	0	17.72	0	18.67	0	3.64	7.67
	5	14.94	0	11.55	0	0	19.61	0	0	10.44	0	5.65	7.68
	6	15.87	15.9	14.28	21.48	0	0	0	0	19.61	0	8.71	9.40
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	10	0	0	27.46	0	0	0	0	0	0	0	2.75	8.68
2	1	0	0	28.03	40.16	28.96	0	0	0	0	0	9.72	15.96
	2	0	45.99	28.09	53.22	31.76	29.88	0	29.88	19.04	0	23.79	18.96
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	4	0	0	0	0	14.04	0	14.94	25.21	18.34	0	7.25	9.81
	5	16.31	11.24	8.46	8.46	0	31.75	31.75	25.83	18.67	0	15.25	11.75
	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	7	0	0	0	0	29.24	0	35.55	23.64	0	0	8.84	14.51
	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
3	1	28.99	0	73.77	0	70.97	75.58	97.15	34.55	0	75.87	45.69	37.34
	2	33.63	41.02	0	34.55	29.89	34.55	0	50.28	48.56	0	27.25	19.88
	3	0	0	29.83	0	0	0	23.34	0	0	15.87	6.90	11.59
	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00
	5	13.59	0	7.53	0	0	12.14	0	0	0	0	3.33	5.56
	6	0	0	10.06	0	0	0	0	0	0	0	1.01	3.18
	7	0	0	0	0	0	0	18.67	0	9.34	0	2.80	6.30
	8	0	0	0	0	21.86	0	7.53	0	10.27	0	3.97	7.32
	9	52.85	41	0	0	0	0	43.01	0	0	0	13.69	22.24
	10	18.67	29.88	0	0	0	14.13	0	0	15.2	0	7.79	10.88



รูปที่ 4.29 แนวโน้มค่าเฉลี่ยของช่องว่างที่หล่อหุ้มแบบ Tilting ที่เย็นตัวด้วยอากาศ



Two-sample T for Tilt pouring + Air Quench vs Tilt pouring + Air Quench + T6

Tile Casting + Air Quenc	30	7.9	11.2	2.0
Tile Casting + Air Quenc	30	22.2	11.9	2.2

Difference = mu (Tile Casting + Air Quench) - mu (Tile Casting + Air Quench + T6)
Estimate for difference: -14.33
95% CI for difference: (-20.29, -8.38)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = -4.82 P-Value = 0.000 DF = 58
Both use Pooled StDev = 11.5242

รูปที่ 4.30 กราฟ Box Pot เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยช่องว่างชิ้นงานที่ T6 และไม่ T6

จากการเปรียบเทียบข้อมูลขนาดของช่องว่างระหว่าง Insert Casting กับอะลูมิเนียม ของชิ้นงานหล่อแบบ Tilting ที่เย็นตัวในอากาศ และไม่ผ่านกระบวนการ T6 กับชิ้นงานหล่อแบบ Tilting ที่เย็นตัวในอากาศ และผ่านกระบวนการ T6 ซึ่งจากการเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของช่องว่างโดยใช้เครื่องมือทางสถิติ t-test พบว่าค่า P-Value = 0.000 ซึ่งต่ำกว่า 0.05 (95% ความเชื่อมั่น) จึงสรุปได้ว่าค่าเฉลี่ยของช่องว่างของชิ้นงานที่ไม่ได้อบ T6 มีค่าน้อยกว่าชิ้นงานที่อบ T6 อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสาเหตุที่ทำให้ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบ T6 มีขนาดช่องว่างที่กว้างกว่าชิ้นงานที่ไม่ได้อบ T6 เนื่องจากชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการอบ T6 จะเกิดการบิดตัวจากความเค้นตกค้างที่มาจากกระบวนการ Quenching ด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 70 °C หลังจากกระบวนการ Solution ที่อุณหภูมิ 535 °C ซึ่งมีความแตกต่างของอุณหภูมิประมาณ 465 °C และสาเหตุดังกล่าวนี้ทำให้เกิดการบิดตัวจากความเค้นตกค้าง และทำให้เกิดช่องว่างขนาดใหญ่ระหว่าง Insert Casting และอะลูมิเนียม