

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

#### 4.1. ผลการวิเคราะห์ธาตุผสม

โลหะผสมหลักอะลูมิเนียมสแกนเดียม 2 wt.% นำมาใช้เพื่อศึกษาสมบัติในการปรับสภาพเกรนและปรับรูปร่างและการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนในโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียมซิลิคอน A356 และ โลหะผสมอะลูมิเนียมเซอร์โคเนียมนำมาเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางกลที่เพิ่มขึ้นจากการเติมร่วมกับสแกนเดียมในโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียมซิลิคอน A356 ในการทดลองปรับส่วนผสมทางเคมีให้ได้ตามที่กำหนด โดยมีการกำหนดส่วนผสมการเติมสแกนเดียมและเซอร์โคเนียมลงในโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 อยู่ 5 ส่วนผสม คือ ไม่เติม เติมสแกนเดียม 0.6 wt.% เติมสแกนเดียม 0.4 wt.% เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% และ เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% ร่วมกับ เซอร์โคเนียม 0.2 wt.% เพื่อปรับสภาพเกรนละเอียด(30) ส่วนผสมทางเคมีของทุกตัวอย่างขึ้นงานแสดงในตารางที่ 4-1

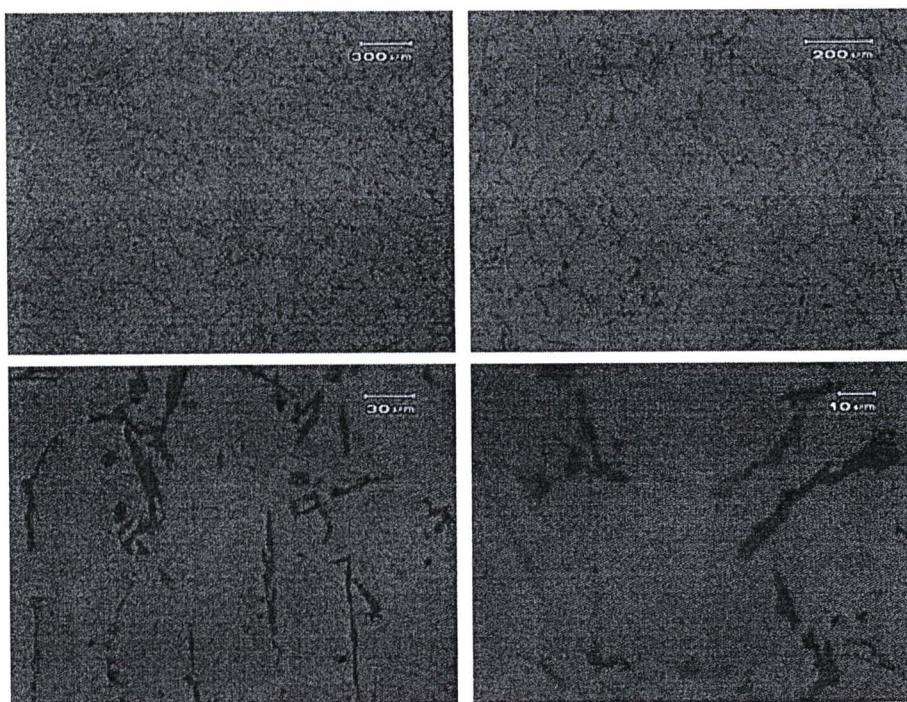
ตารางที่ 4-1 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมหล่ออะลูมิเนียมซิลิคอน A356 (wt. %) ที่เติมสแกนเดียมและเซอร์โคเนียม

Alloys	Element (wt.%)								
	Si	Mg	Zn	Sc	Fe	Mn	Ni	Ti	Zr
A356	7.26	0.35	0.007	0.00	0.20	0.007	0.010	0.13	0.00
0.2% Sc	7.38	0.36	0.009	0.23	0.15	0.006	0.011	0.09	0.00
0.4% Sc	7.19	0.34	0.008	0.393	0.12	0.004	0.006	0.09	0.00
0.6% Sc	7.20	0.31	0.008	0.59	0.06	0.004	0.007	0.07	0.00
0.2%Sc +0.2%Zr	7.21	0.32	0.008	0.22	0.10	0.005	0.006	0.07	0.21

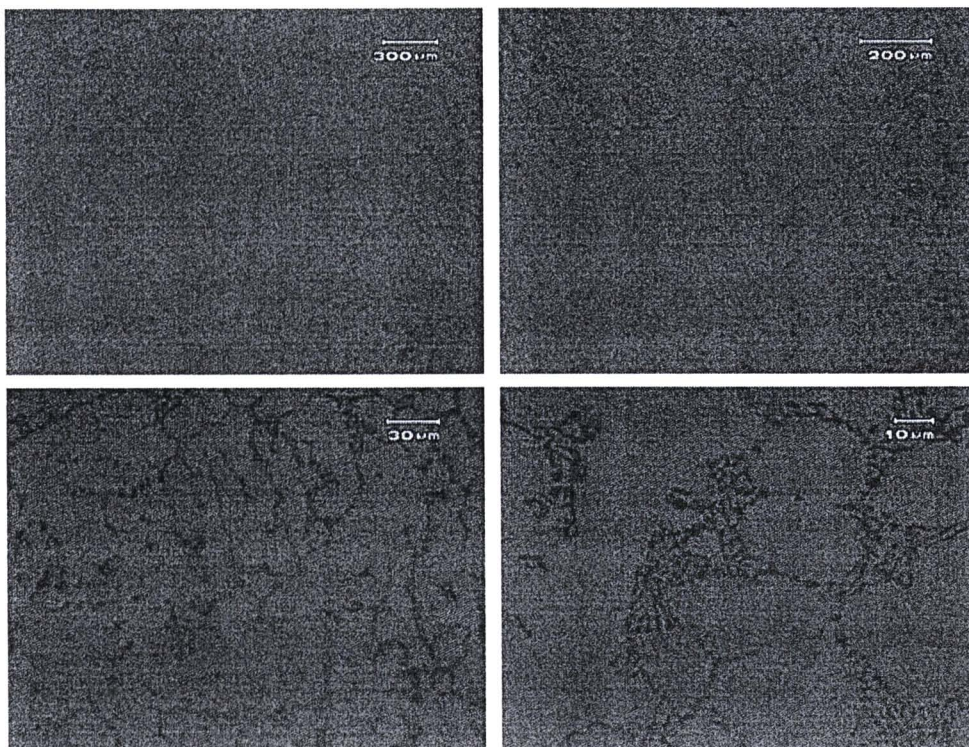
## 4.2 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค

การวิเคราะห์ผลการปรับปรุงรูปร่างและการกระจายตัวของยูเทคตอิดของโลหะผสมอะลูมิเนียมในงานวิจัยจะทำการวิเคราะห์ผลของการเติมสแกนเดียม และไม่เติม จากแบบหล่อทั้งสอง นำไปส่องกล้องจุลทรรศน์วิเคราะห์โครงสร้างภายใน เพื่อหาผลการปรับปรุงรูปร่างและการกระจายตัวของยูเทคตอิดของโลหะผสมอะลูมิเนียม

4.2.1. โครงสร้างรูปร่างการกระจายตัวของยูเทคตอิดของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่ไม่ได้ทำการเติมโลหะผสมหลัก จากแบบหล่อเย็นตัวเร็วและเย็นตัวช้า จากการวิเคราะห์รูปร่างการกระจายตัวของยูเทคตอิดของโลหะผสมอะลูมิเนียมพบว่า โครงสร้างชิ้นงานที่เกิดจากแบบหล่อการเย็นตัวช้าจะมีลักษณะขนาดใหญ่ การกระจายตัวน้อย ปลายมีลักษณะคม เป็น plate like ส่วนโครงสร้างชิ้นงานจากแบบหล่อเย็นตัวเร็วมีการกระจายตัวสม่ำเสมอ มีขนาดเล็ก ปลายมน มีลักษณะเป็น fibrous บางส่วน รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4-1 และ 4-2

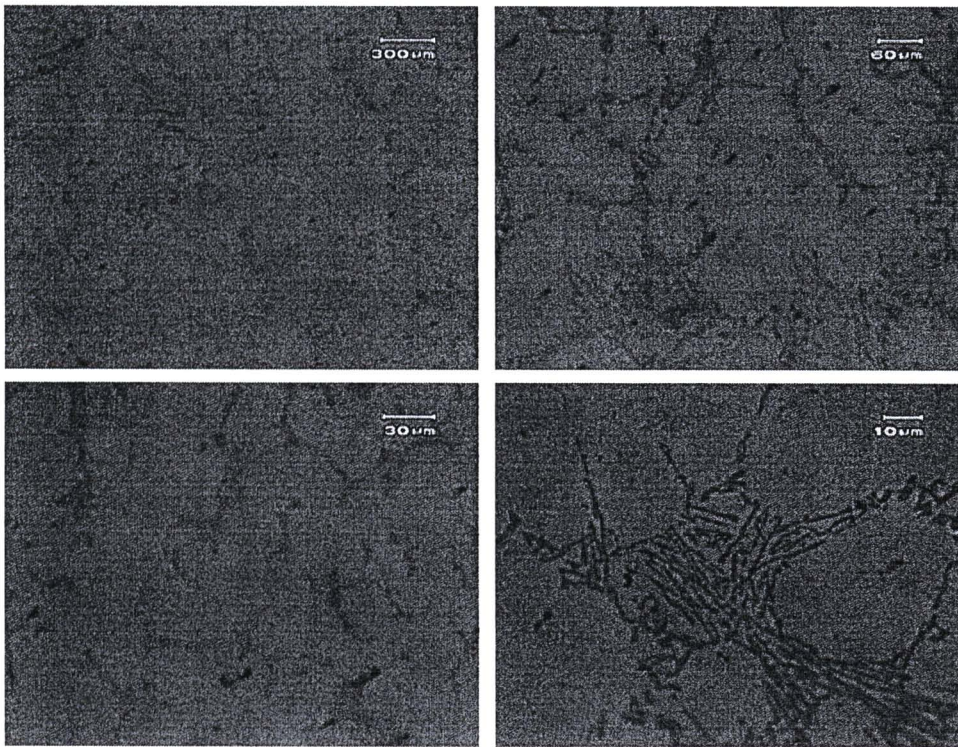


รูปที่ 4-1 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 แบบหล่อเย็นตัวช้าที่กำลังขยายต่างๆ

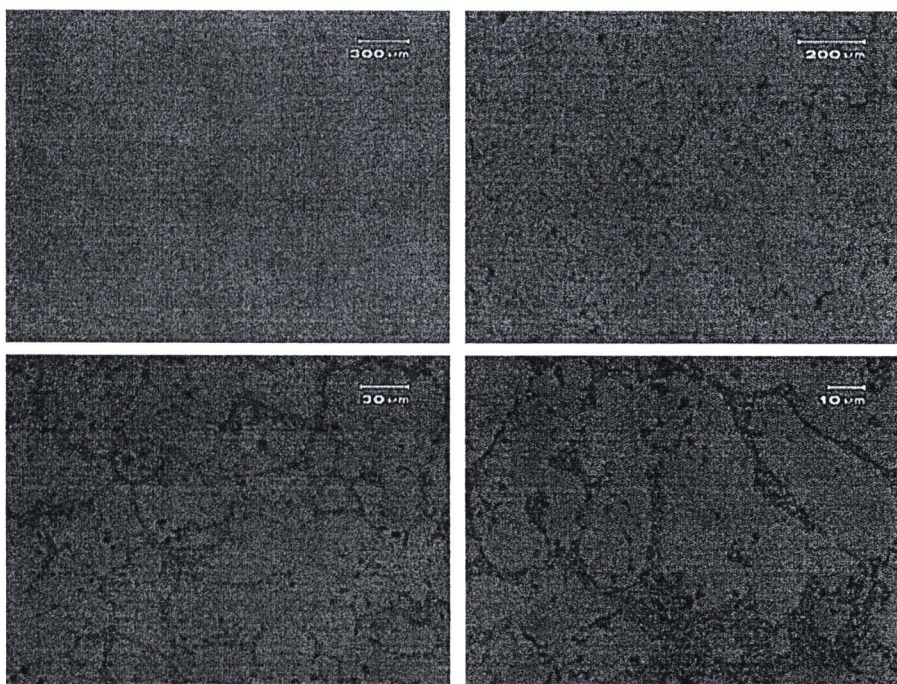


รูปที่ 4-2 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 แบบหล่อเย็นตัวเร็วที่กำลังขยายต่างๆ

4.2.2. โครงสร้างรูปร่างการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่ทำการเติมโลหะผสมหลักสแกนเดียม 0.2wt.% จากแบบหล่อเย็นตัวเร็วและเย็นตัวช้าจากการวิเคราะห์รูปร่างการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนพบว่า โครงสร้างชิ้นงานที่เกิดจากแบบหล่อการเย็นตัวช้าจะมีขนาดเล็กลงเปรียบเทียบกับไม่เติมสแกนเดียม การกระจายตัวน้อย ปลายมีลักษณะคม เป็น plate like บางส่วน ส่วนโครงสร้างชิ้นงานจากแบบหล่อเย็นตัวเร็ว มีการกระจายสม่ำเสมอ มีขนาดเล็กลงเมื่อเทียบกับไม่เติมสแกนเดียม ปลายมน มีลักษณะเป็น fibrous รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4-3 และ 4-4

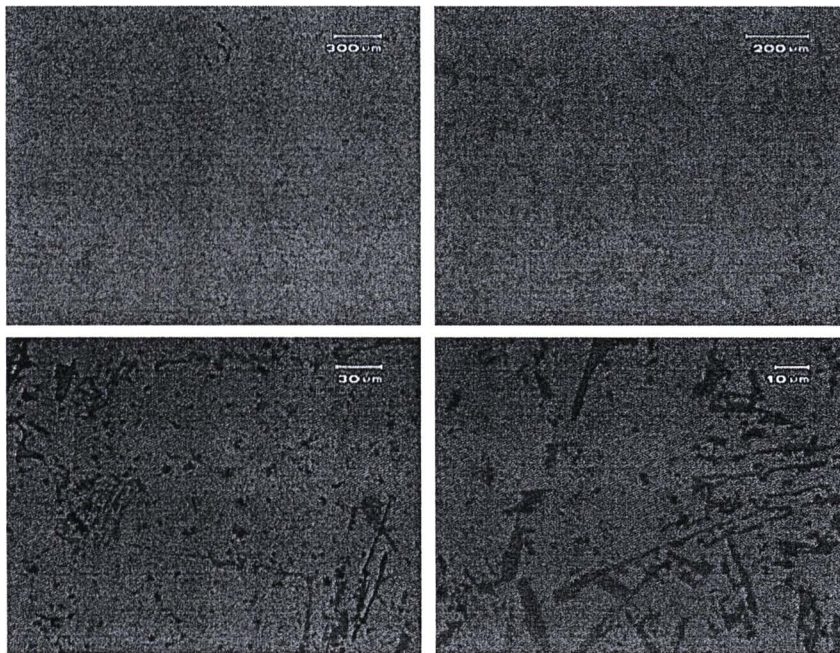


รูปที่ 4-3 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติม 0.2wt.% Sc แบบหล่อเย็นตัวช้าที่กำลังขยายต่างๆ

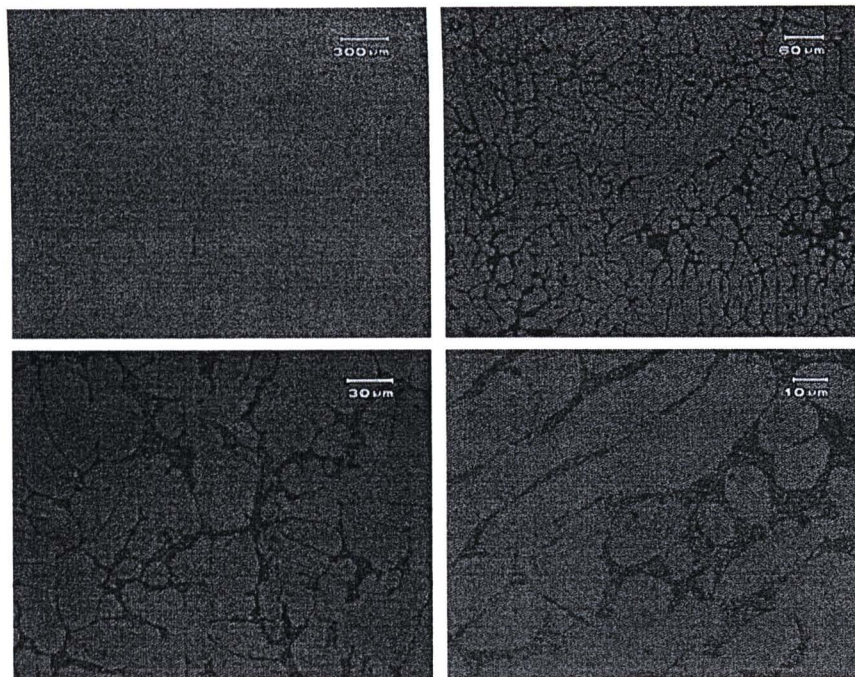


รูปที่ 4-4 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติม 0.2wt.% Sc แบบหล่อเย็นตัวเร็วที่กำลังขยายต่างๆ

4.2.3. โครงสร้างรูปร่างการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่ทำการเติมโลหะผสมหลักสแกนเดียม 0.4wt.% จากแบบหล่อเย็นตัวเร็วและเย็นตัวช้าจากการวิเคราะห์รูปร่างการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนพบว่า โครงสร้างชิ้นงานที่เกิดจากแบบหล่อการเย็นตัวช้าจะมีขนาดเล็กลงมากกว่าเปรียบเทียบกับที่เติมสแกนเดียม 0.2wt.% การกระจายตัวน้อยกว่า ปลายกลมมน ลักษณะ plate like ลดลง ส่วนโครงสร้างชิ้นงานจากแบบหล่อเย็นตัวเร็ว มีการกระจายสม่ำเสมอ มีขนาดเล็กลงมากเมื่อเทียบกับไม่เติมสแกนเดียม ปลายมน มีลักษณะเป็น fibrous อย่างสมบูรณ์ รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4-5 และ 4-6

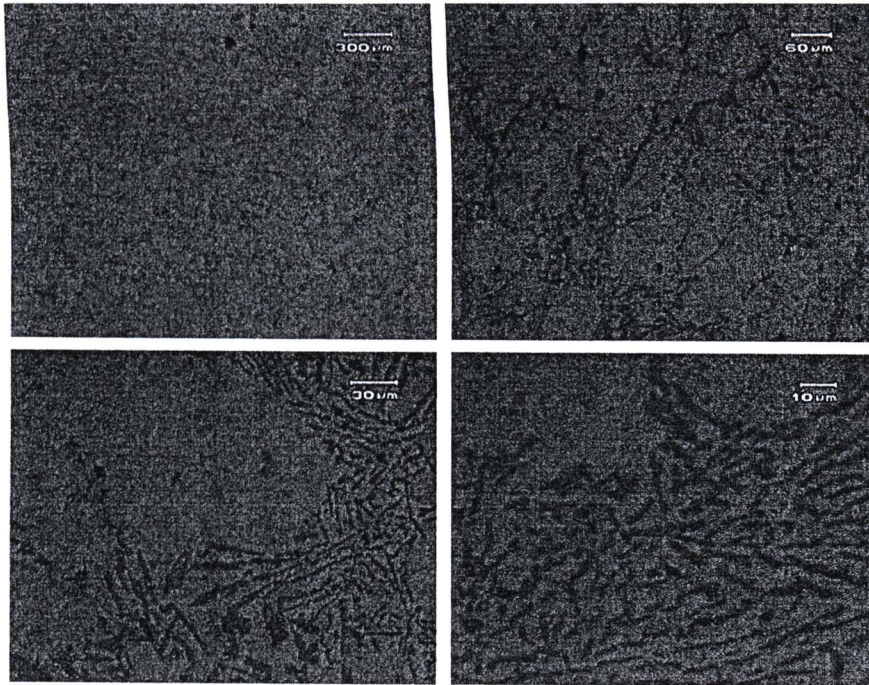


รูปที่ 4-5 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติม 0.4 wt.% Sc แบบหล่อเย็นตัวช้าที่กำลังขยายต่างๆ

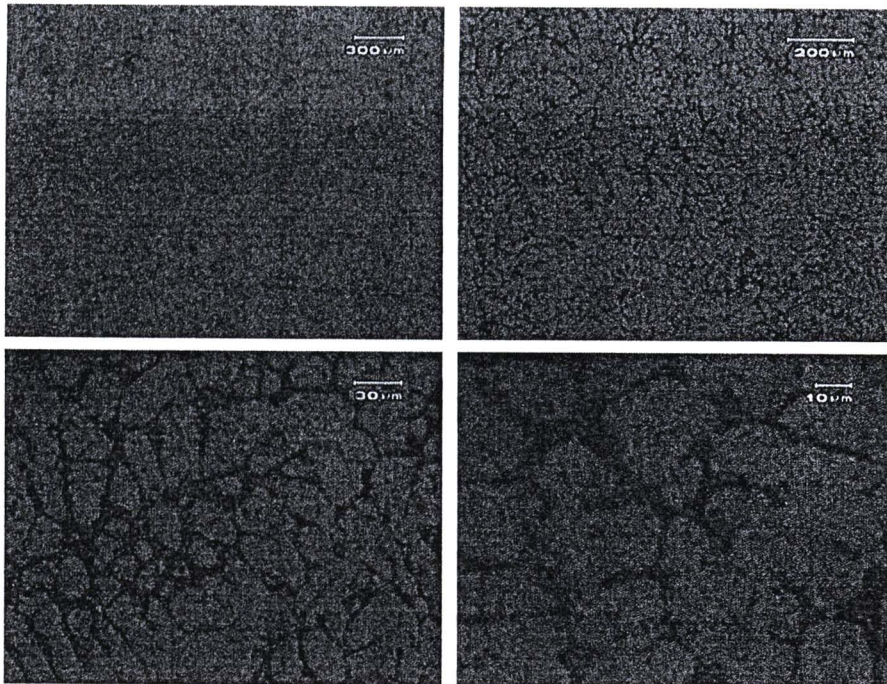


รูปที่ 4-6 โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติม 0.4 wt.% Sc แบบหล่อเย็นตัวเร็วที่กำลังขยายต่างๆ

4.2.4. โครงสร้างรูปร่างการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่ทำการเติมโลหะผสมหลักสแกนเดียม 0.6wt.% จากแบบหล่อเย็นตัวเร็วและเย็นตัวช้าจากการวิเคราะห์รูปร่างการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนพบว่า โครงสร้างชิ้นงานที่เกิดจากแบบหล่อการเย็นตัวช้าจะมีขนาดเล็กที่สุดในงานวิจัย การกระจายตัวดี ปลายกลมมน ลักษณะ plate like ลดน้อยลง ส่วนโครงสร้างชิ้นงานจากแบบหล่อเย็นตัวเร็ว มีการกระจายสม่ำเสมอ มีขนาดเล็กมากที่สุด เมื่อเทียบกับทุกการทดลอง มีลักษณะปลายมน มีลักษณะเป็น fibrous อย่างสมบูรณ์ รายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 4-7 และ 4-8

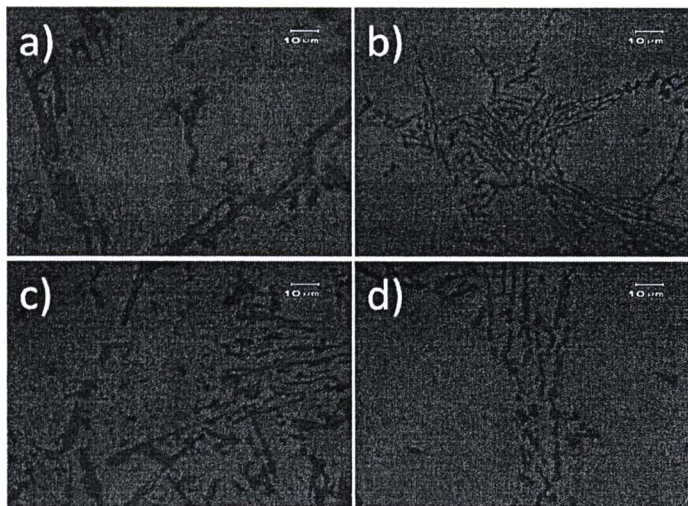


รูปที่ 4-7 โลหะผสมอะลูมิเนียมA356ที่เติม 0.6 wt.%Sc แบบหล่อเย็นตัวช้าที่กำลังขยายต่างๆ



รูปที่ 4-8 โลหะผสมอะลูมิเนียมA356ที่เติม 0.6 wt.%Sc แบบหล่อเย็นตัวเร็วที่กำลังขยายต่างๆ

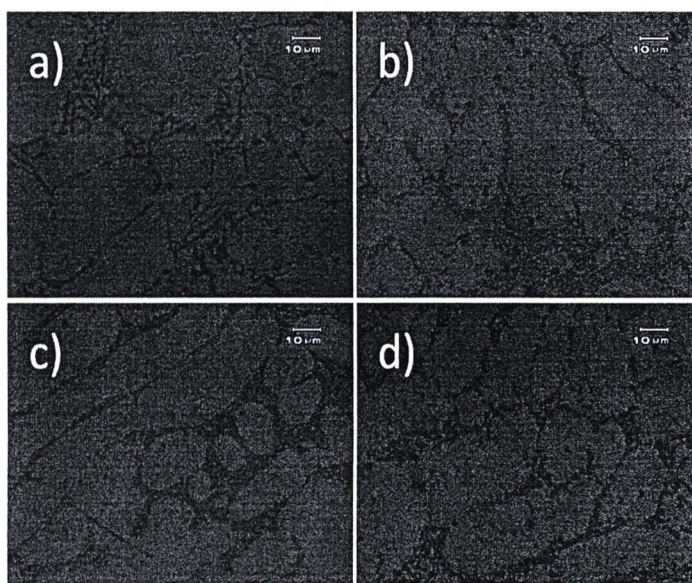
จากผลการวิเคราะห์การปรับสภาพรูปร่างและการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนจากแบบหล่อเย็นตัวช้าพบว่า โลหะผสมอะลูมิเนียมA356 ส่วนใหญ่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ การกระจายตัวน้อย ปลายมีลักษณะคม มีลักษณะเป็น flake และ เป็น plate like เมื่อเติมสแกนเดียม 0.2 wt.% พบว่า โครงสร้างยูเทคติกซิลิคอนมีขนาดเล็กอย่างมาก มีการกระจายสม่ำเสมอ ปลายกลมมนบางส่วน มีลักษณะเป็น fibrous บางส่วน เติมสแกนเดียมปริมาณเพิ่มขึ้นที่ 0.4 wt.% การปรับสภาพยูเทคติกซิลิคอนมีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับไม่ได้เติม ปลายกลมมน และเมื่อเติมสแกนเดียม 0.6 wt.% การปรับสภาพยูเทคติกซิลิคอนมีลักษณะเป็น fibrous ขนาดเล็ก ปลายกลมมนเช่นเดียวกับที่สแกนเดียมที่ส่วนผสมทางเคมีอื่นๆ ดังรายละเอียดในรูปที่ 4-9 ซึ่งการปรับรูปร่างและการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนจากสแกนเดียมจะสอดคล้องการเกิด twin-plane re-entrant (TPRE)ของยูเทคติกซิลิคอน [37]



รูปที่ 4-9 โครงสร้างภายในของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน A356เย็นตัวช้าที่ส่วนผสมเคมีต่างๆ a) ไม่เติมสแกนเดียม b) เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% c) เติมสแกนเดียม 0.4 wt.% และ d) เติมสแกนเดียม 0.6 wt.%

ส่วนการวิเคราะห์ผลการปรับปรุงร่างและการกระจายตัวของโลหะผสม A356 ในแบบหล่อเย็นตัวเร็วในรูปที่ 4-10 พบว่า โครงสร้างขึ้นงานจากแบบหล่อเย็นตัวเร็ว มีการกระจายสม่ำเสมอค่อนข้างดี มีขนาดเล็ก ปลายมน มีลักษณะเป็น fibrous บางส่วน เมื่อเติมสแกนเดียมที่ส่วนผสมต่างๆพบว่า การปรับปรุงร่างการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนดีมาก โครงสร้างมีขนาดเล็กมาก มีลักษณะกลมมน สม่ำเสมอกัน และมีลักษณะเป็น fibrous อย่างสมบูรณ์ ส่วนลักษณะของยูเทคติกซิลิคอนของโลหะที่ไม่ได้ทำการปรับปรุง โลหะผสม A356 มีโครงสร้างหยาบมีโครงสร้างเป็น plate like และมีปลายแหลม จากผลการเติม 0.2 wt.% Sc ยูเทคติกซิลิคอนมีการกระจายตัวและมีขนาดเล็ก การเติม 0.4 wt.% Sc ส่งผลให้มีโครงสร้างเป็น fibrous อย่างสมบูรณ์ และการเติม 0.6 wt.% Sc รูปร่างการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนเป็นโครงสร้าง fibrous ใกล้เคียงกับที่เติม 0.4 wt.% Sc จากการที่สแกนเดียมมีขนาดอะตอมที่โตกว่าอะตอมของซิลิคอนทำให้เกิดการขวางการโตของ ซิลิคอน จนเกิดการปรับสภาพ

~ โครงสร้างยูเทคติกซิลิคอน

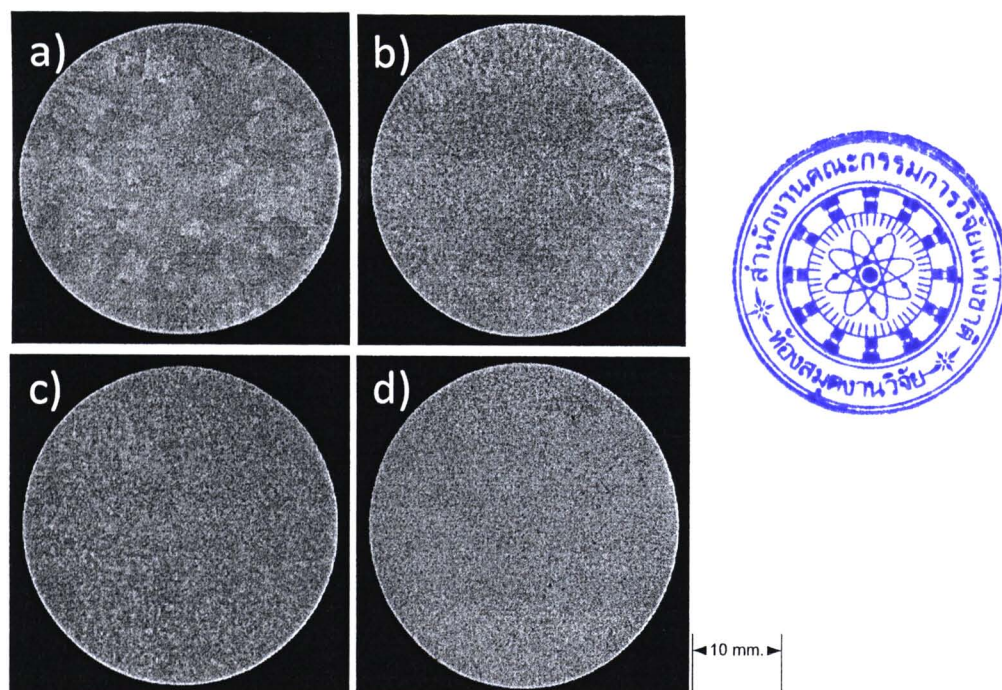


รูปที่ 4-10 โครงสร้างภายในของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน A356เย็นตัวเร็วที่ส่วนผสมเคมีต่างๆ a) ไม่เติมสแกนเดียม b) เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% c) เติมสแกนเดียม 0.4 wt.% และ d) เติมสแกนเดียม 0.6 wt.%

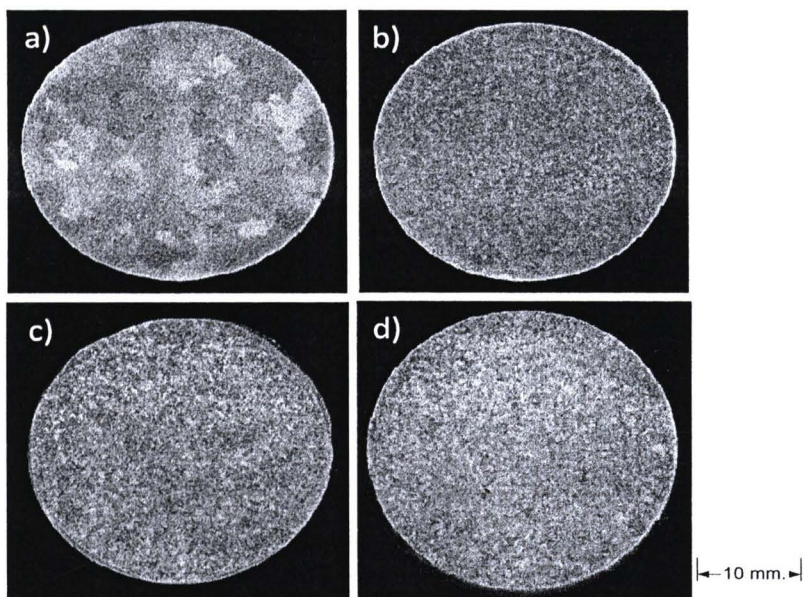
จากผลการวิเคราะห์การปรับปรุงร่างและการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนจากแบบหล่อเย็นตัวช้า และเย็นตัวเร็วพบว่า แบบหล่อเย็นตัวช้าจะแสดงให้เห็นผลของการปรับปรุงร่างยูเทคติกซิลิคอนได้อย่างชัดเจน ในงานวิจัยนี้จึงใช้ชิ้นงานจากแบบหล่อเย็นตัวช้าเป็นชิ้นงานที่ทดสอบความแข็ง

#### 4.3. การวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคทางโลหะวิทยาโลหะผสมอะลูมิเนียม

โครงสร้างมหภาคทางโลหะวิทยาโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 และที่ทำการเติมสแกนเดียมในแบบหล่อการเย็นตัวช้า แสดงในรูปที่ 4-11 จากการทดลองพบว่า โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่ไม่เติมสแกนเดียมมีโครงสร้างเกรนขนาดใหญ่ เกรนหยาบ บริเวณขอบชิ้นงานมีเกรน columnar บางส่วน ตรงกลางมีเกรน equiaxed ขนาดใหญ่ ส่วนชิ้นงานที่เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% จะมีโครงสร้างเกรนขนาดเล็ก เกรนละเอียด บริเวณขอบชิ้นงานมีเกรน columnar บางส่วนเช่นกัน ส่วนตรงกลางชิ้นงานมีเกรน equiaxed ขนาดเล็ก เมื่อเพิ่มปริมาณสแกนเดียม 0.4 wt.% โครงสร้างเกรนส่วนใหญ่จะเป็นเกรน equiaxed เหลือเกรน columnar เล็กน้อยบริเวณขอบชิ้นงาน และเมื่อเพิ่มปริมาณสแกนเดียมเป็น 0.6 wt.% พบว่าโครงสร้างเกรนทั้งหมดเป็นเกรน equiaxed และมีขนาดเกรนเล็กมาก เกรนละเอียด และเมื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่ไม่เติม และเติมสแกนเดียมในแบบหล่อการเย็นตัวเร็ว แสดงในรูปที่ 4-12 พบว่า มีผลการปรับเกรนละเอียด เช่นเดียวกันกับแบบหล่อการเย็นตัวช้า คือ สแกนเดียมส่งผลต่อการปรับสภาพเกรนจากเกรนหยาบเป็นเกรนละเอียด ซึ่งเกิดจากการที่สแกนเดียมเป็นธาตุที่มีจุดหลอมละลายสูง และมีระยะอะตอมใกล้เคียงกับอะลูมิเนียม จึงทำให้เกิดอนุภาคเริ่มต้นของเกรนขึ้น เปลี่ยนลักษณะเกรนที่เป็น columnar เป็นเกรน equiaxed ซึ่งสอดคล้อง Norman [30] กลไกการปรับสภาพเกรนของสแกนเดียมจะเพิ่มประสิทธิภาพในการเกิด Heterogeneous เป็นหลักในการลดขนาดเกรน



รูปที่ 4-11 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน A356 เป็นตัวซ้ำที่ส่วนผสมเคมีต่างๆ a) ไม่เติมสแกนเดียม b) เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% c) เติมสแกนเดียม 0.4 wt.% และ d) เติมสแกนเดียม 0.6 wt.%



รูปที่ 4-12 โครงสร้างมหภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมซิลิคอน A356เย็นตัวเร็วที่ส่วนผสมเคมีต่างๆ a) ไม่เติมสแกนเดียม b) เติมสแกนเดียม 0.2 wt.% c) เติมสแกนเดียม 0.4 wt.% และ d) เติมสแกนเดียม 0.6 wt.%

จากการศึกษาคุณสมบัติทางด้านปรับปรุงลักษณะและการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนจากการวิเคราะห์โครงสร้างภายในพบว่า สแกนเดียมส่งผลให้ชิ้นงานเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างส่วนใหญ่เป็น fibrous ที่มีโครงสร้างขนาดเล็ก ปลายมนกลม มีการกระจายตัวสม่ำเสมอทำให้มีความแข็งแรงมากขึ้น ประกอบกับจากการดูโครงสร้างมหภาคทางโลหะวิทยา คือ สแกนเดียมเปลี่ยนโครงสร้างเกรนขนาดใหญ่ ทำให้เป็นเกรนละเอียด ทำให้ออยบคพร่องจากรูพรุน และโพรงอากาศของการหล่อลดลงทำให้คุณสมบัติทางกลดีขึ้น จากการศึกษาเบื้องต้นนี้ จึงได้ทำการทดลองผลคุณสมบัติทางกลที่ได้ต่อไป

#### 4.4. ผลการของการเติมสแกนเดียม และสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมที่มีต่อความแข็ง

ชิ้นงานหลังจากทำการหล่อ จะถูกนำไปทดสอบหาค่าความแข็งชิ้นงาน as-cast เพื่อยืนยันผลกับการปรับสภาพเกรนและปรับรูปร่างและการกระจายตัวของยูเทคติกซิลิคอนซึ่งพบว่า ค่าความแข็งของชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสแกนเดียมมีค่าต่ำที่สุดในการทดลองคือ 53.4 HB ค่าความแข็งมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเติมสแกนเดียม 0.2wt.% ที่ 58.4 HB ค่าความแข็งของชิ้นงานที่เติมสแกนเดียม 0.2wt.% ร่วมกับ

0.2 wt.% เซอร์โคเนียมมีความแข็งที่ 60.1 HB และค่าความแข็งจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อปริมาณสแกนเดียมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 4-2 จากนั้นทำการเพิ่มสมบัติทางกลบ่มแข็งกระบวนการ T6 ด้วยความร้อนโดยนำไปอบในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 540 °C โดยใช้เวลาทำการ solution treatment ที่เวลา 5 ชั่วโมง ก่อนทำการชุบเย็นตัวในอ่างน้ำอุณหภูมิ 30 °C หลังจากนั้นขึ้นงานจากการชุบทำการอบ artificial ageing ที่อุณหภูมิ 155 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงของอุณหภูมิที่ตั้งระหว่างกระบวนการ solution treatment และ ageing ทำการควบคุมอุณหภูมิขึ้นงานระหว่างกระบวนการโดยใช้ เทอร์โมคัปเปิล ชนิด K สอดเข้าไปขึ้นงานต่อเชื่อมกับระบบ data acquisition

ผลการวัดค่าความแข็งของขึ้นงานหลังจากผ่านกระบวนการ T6 พบว่า ความแข็งของขึ้นงานโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 หลังจากผ่านกระบวนการ T6 ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 53.4HB เป็น 75.8 HB เพิ่มขึ้น 41.9% เนื่องมาจากผลของการ precipitation ของ  $Mg_2Si$  [38] ทำให้ต้านทานการเสียรูปขึ้นงานได้ดี ความแข็งขึ้นงานที่เติมสแกนเดียม 0.2wt.% ความแข็งเพิ่มขึ้นจาก 58.4 เป็น 90.1 HB เพิ่มขึ้น 54.1% เมื่อเติมสแกนเดียมในปริมาณเพิ่มมากขึ้นเป็น 0.4wt.% 0.6wt.% และ สแกนเดียม 0.2wt.% ร่วมเซอร์โคเนียม 0.2wt.% ขึ้นความแข็งเพิ่มขึ้นเป็น 87.6 87.2 และ 90 HB คิดเป็น % เพิ่มขึ้น 41.2 38 และ 49.7 ความแข็งเพิ่มขึ้นจากผลของ  $Mg_2Si$  และเกิด precipitation อนุภาค  $Al_3Sc$  ช่วยเสริมทำให้ค่าความแข็งเพิ่มสูงขึ้น และเกิด Precipitation ของ  $Al_3Sc$  ร่วมกับ  $Al_3Zr$  ในขึ้นงานที่เติมสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียม ความแข็งเพิ่มขึ้นนี้ สอดคล้องกับ Toropova [39]

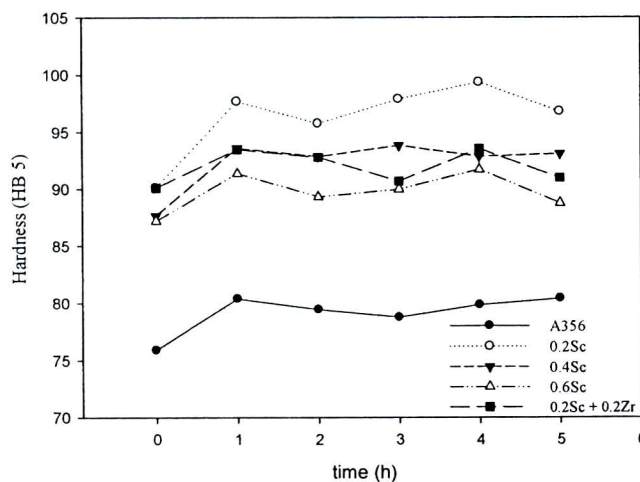
ตารางที่ 4-2 ค่าความแข็งก่อนนำขึ้นงาน as-cast ก่อนนำไปอบกระบวนการ T6 (HB)

วัสดุ	A356	A356+0.2Sc	A356+0.4Sc	A356+0.6Sc	A356+0.2Sc+0.2Zr
ก่อนอบ T6	53.4	58.4	62.1	63.2	60.1
หลังอบ T6	75.8	90.1	87.6	87.2	90
%เพิ่มขึ้น	41.9	54.1	41.2	38	49.7

#### 4.5. ผลความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและเวลาในการอบ

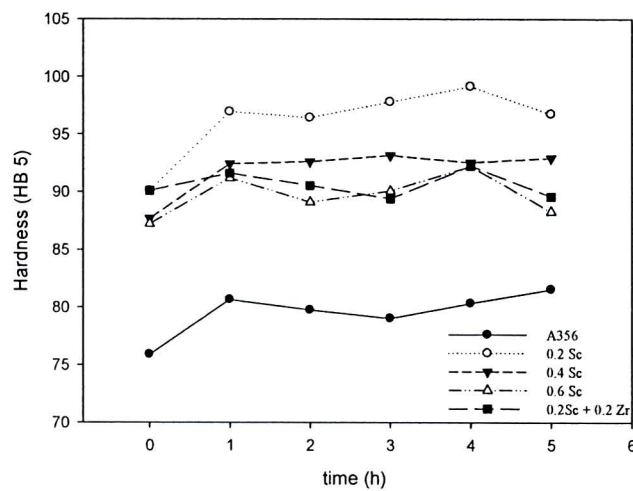
หลังจากทำการอบ artificial ageing จะนำขึ้นงานเข้าไปอบที่อุณหภูมิ 150, 250, and 350 °C สำหรับการรับภาระทางความร้อนภายหลังการอบ ที่เวลา 1, 2, 3, 4, และ 5 ชั่วโมง ทุกการทดลอง จะทำการทดลองซ้ำ 5 ครั้ง การทดสอบความแข็งบนขึ้นงานจะทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง ผลการวัดค่าความแข็งของขึ้นงานทั้งหมดในงานวิจัยแสดงอยู่ในภาคผนวก ก

ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่านการรับภาระที่ 150 °C ที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4-13 พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสแกนเดียม ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งที่อุณหภูมินี้ เมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมงยังส่งผลต่อการเสริมสภาพความแข็ง หรือ เกิด overageing เกิดขึ้น ผลการเติมสแกนเดียมเพิ่มความแข็ง โดยที่ยังไม่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพความแข็งเมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่ 1 ชั่วโมง จนถึง 5 ชั่วโมงซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่รับภาระยังไม่สูงเพียงพอที่จะเกิด double aging หรือ เวลานั้นยังไม่เพียงพอการเกิด overageing



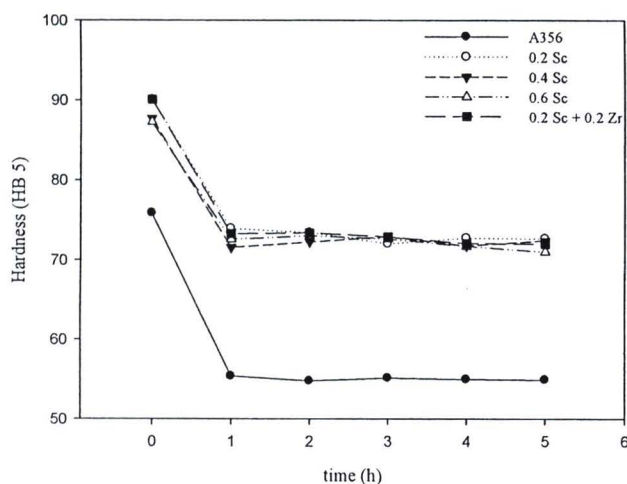
รูปที่ 4-13 ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่านการรับภาระที่ 150 °C ที่เวลาต่างๆ

ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่านการรับภาระที่ 250 °C ที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4-14 พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสแกนเดียม ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ซึ่งที่อุณหภูมินี้ เมื่อเวลาผ่านไป 5 ชั่วโมงยังส่งผลต่อการเพิ่มความแข็งมากขึ้นเล็กน้อย หรือ ไม่เกิด overageing ขึ้น ผลการเติมสแกนเดียมเพิ่มความแข็ง โดยที่ยังไม่ส่งผลต่อการเสื่อมสภาพความแข็งเมื่อเวลาผ่านไปตั้งแต่ 1 ชั่วโมง จนถึง 5 ชั่วโมงซึ่งเป็นผลมาจากอุณหภูมิที่รับภาระยังไม่สูงเพียงพอที่จะเกิด double aging หรือ เวลานั้นยังไม่เพียงพอการเกิด overaged



รูปที่ 4-14 ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่านการรับภาระที่ 250°C ที่เวลาต่างๆ

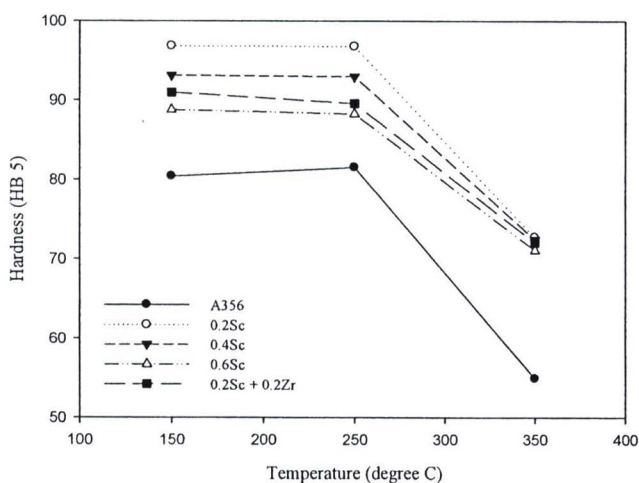
ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่านการรับภาระที่ 350 °C ที่เวลาต่างๆ แสดงในรูปที่ 4-15 พบว่าชิ้นงานที่ไม่ได้เติมสแกนเดียม ค่าความแข็งลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาเริ่มต้นที่ 1 ชั่วโมงความแข็งลดลงจาก 75.8 HB เหลือ 55.4 HB เมื่อเวลาผ่านไป 2 ชั่วโมง จนถึง 5 ชั่วโมง ค่าความแข็งค่อนข้างคงที่หลังจากที่ลดลงตอนแรก โดยมีค่าความแข็งเฉลี่ย 55 HB ซึ่งเป็นผลจากการเกิด overageing ส่วนผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียม 0.2wt.% ผ่านภาระการอบที่เวลา 1 ชั่วโมงความแข็งลดลงอย่างรวดเร็วจาก 90.1 HB เป็น 74 HB เมื่อเวลาผ่านไป 2 จนถึง 5 ชั่วโมงความแข็งมีค่าค่อนข้างคงที่ ซึ่งความแข็งที่ยังคงเหลืออยู่ยังมีผลของการ precipitation ของ  $Al_3Sc$  ยังคงอยู่ ส่วนผสมที่เติมสแกนเดียมปริมาณอื่นๆ และเติมสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมมีแนวโน้มเหมือนกับชิ้นงานที่เติมสแกนเดียม 0.2wt.%



รูปที่ 4-15 ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่านการรับภาระที่ 350°C ที่เวลาต่างๆ

#### 4.6. ผลความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและอุณหภูมิในการอบ

ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่านการรับภาระ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆกัน พบว่า ชิ้นงานทุกส่วนผสมทางเคมีมีความแข็งที่อุณหภูมิ 150 °C เพิ่มขึ้นเล็กน้อย 4.5-7.6 HB ค่าความแข็งค่อนข้างคงที่เมื่ออบที่อุณหภูมิ 250 °C และมีการลดค่าความแข็งอย่างมากชิ้นงานที่ทำการรับภาระ 350°C โดยร้อยละของความแข็งที่ลดลงแสดงในตารางที่ 4-3



รูปที่ 4-16 ผลค่าความแข็งจากการเติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมผ่านการรับภาระ 5 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่างๆกัน

ตารางที่ 4-3 ค่าเปอร์เซ็นต์ความแข็งที่ลดลงหลังจากผ่านการรับภาระ 5 ชั่วโมงที่อุณหภูมิแตกต่างกัน

Alloys	ค่าความแข็งที่ลดลงหลังผ่านการรับภาระความร้อน 5 ชั่วโมง		
	150 °C	250 °C	350 °C
A356	5.97	7.45	-27.60
0.2Sc	7.46	7.39	-19.27
0.4Sc	6.18	6.01	-17.35
0.6Sc	1.77	1.20	-18.52
0.2Sc+0.2Zr	0.97	-0.57	-20.02

ผลการเติม สแกนเดียม และสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมใน โลหะผสมอะลูมิเนียม A356 มีผลการเพิ่มความแข็งอย่างชัดเจนที่ 11.3-14.2 HB ขึ้นอยู่กับส่วนผสมทางเคมี แม้ว่าผลการรับภาระที่อุณหภูมิสูงทำให้ความแข็งลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลงที่อุณหภูมิห้อง จากการทดลองพบว่า ความเสถียรภาพความแข็งหลังรับภาระที่อุณหภูมิสูงของ A356 ที่เติมด้วยสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียม จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญแสดงในรูป 4-15 รูปที่ 4-16 แสดงความแข็งที่ลดลงหลังผ่านภาระที่อุณหภูมิสูง 5 ชั่วโมง ซึ่งเป็นกรณีจำลองสถานะการรับภาระความร้อนที่เลวร้าย ในการทดลอง เราพบว่า A356 มีความแข็งลดลง 27.60% สำหรับโลหะผสมอะลูมิเนียม A356 ที่เติมสแกนเดียม และสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียม จะสูญเสียความแข็งน้อยกว่า ผลในตารางที่ 2 นำเสนอการเพิ่มความแข็งหลังจากอบที่อุณหภูมิสูงซึ่งเปรียบเสมือนการอบ aging ต่อไป ซึ่งแสดงให้เห็นผลว่าโลหะผสม A356 ที่เติมสแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียม จะมีผลต่อการ aging ช้ากว่าทั้งที่อุณหภูมิ 150 และ 250 °C การเติม สแกนเดียมและสแกนเดียมร่วมกับเซอร์โคเนียมจะเพิ่มเสถียรภาพความแข็งของโลหะผสม A356 หลังผ่านการรับภาระที่อุณหภูมิสูง (350 °C) การเพิ่มความแข็งหลังจากการอบ artificial aging และการเพิ่มการทนต่อภาระที่อุณหภูมิสูงของโลหะผสมที่เติมด้วยสแกนเดียม เปรียบเทียบกับ โลหะผสม A356 น่าจะเกิดจากผลของการเกิด secondary precipitates ของเฟส (AlScSi) และ (AlScZr)[40]