บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยครั้งนี้เป็นการทดลองแปลงสภาพของโลหะอะลูมิเนียมกระป๋องเครื่องดื่มซึ่งเป็นโลหะอะลูมิเนียมผสมชนิดขึ้นรูปให้เป็นอะลูมิเนียมผสมหล่อ แล้วนำไปทดสอบสมบัติทางกล คือ ทดสอบความต้านแรงดึงและความแข็ง และศึกษาลักษณะโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมที่ผลิตได้ ซึ่งมีทฤษฎีต่างๆที่เกี่ยวข้องที่ควรทราบดังนี้

2.1 โลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะสำคัญที่ได้รับการใช้งานมากที่สุดในกลุ่มโลหะที่มีน้ำหนักเบา (Light Metals) ทั้งนี้เพราะอะลูมิเนียมมีสมบัติเด่นหลายประการ (พยูร 2523) เช่น มีความหนาแน่นน้อย และมีกำลังวัสดุต่อหน่วยน้ำหนักสูงจึงนิยมใช้ทำเครื่องใช้และชิ้นส่วนบางอย่างในเครื่องบิน จรวด และขีปนาวุธ สามารถขึ้นรูปด้วยกรรมวิธีต่างๆได้ง่าย จุดหลอมเหลวต่ำ หล่อหลอมง่าย และมีอัตราการไหลตัวสูง ค่าการนำไฟฟ้าไม่สูงมากนักแต่เนื่องจากน้ำหนักเบาจึงนิยมใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า ไม่เป็นพิษต่อร่างกายมนุษย์ มีดัชนีในการสะท้อนกลับของแสงสูงมาก ทนทานต่อการเกิดสนิมและการกัด-กร่อนในบรรยากาศใช้งานทั่วไปได้ดีมากแต่ไม่ทนการกัดกร่อนต่อกรดและด่าง หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงมากนัก

2.1.1 การจำแนกประเภทของอะลูมิเนียม

โดยทั่วไปแล้วเราสามารถจำแนกโลหะอะลูมิเนียมผสมออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ คือ

1. อะลูมิเนียมผสมประเภทขึ้นรูป (Wrought Aluminum Alloys) เป็นโลหะผสมที่ต้องผ่านการแปลงรูปแบบพลาสติก เช่น การรีดหรือการอัดขึ้นรูปเป็นแผ่นหรือเป็นแท่ง
2. อะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อ (Cast Aluminum Alloys) มีสมบัติในการไหลดี ธาตุผสมที่สำคัญ ได้แก่ ซิลิกอน เนื่องจากซิลิกอนเพิ่มความสามารถในการไหลและต้านทานการแตกร้อนของงานหล่อได้ดี

ในแต่ละประเภทของอะลูมิเนียมผสมข้างต้น เราสามารถแบ่งย่อยแต่ละประเภทออกเป็นเกรดที่สามารถอบชุบแข็งด้วยความร้อนได้ (Heat Treatable) และเกรดที่ไม่สามารถชุบแข็งได้ (Non-Heat Treatable)

2.1.2 อะลูมิเนียมผสมประเภทหล่อ

สามารถจำแนกกลุ่ม อลูมิเนียมหล่อผสม ตามมาตรฐานของ ASM (American Society of Metals) ซึ่งเป็นการจำแนกตาม ระบบตัวเลข 4 หลัก ดังนี้

ตัวเลขตัวที่หนึ่ง เป็นสัญลักษณ์แสดงกลุ่มธาตุที่ผสมธาตุหนึ่งเป็นหลัก ตามตารางที่ 2.1 เช่น 2XX.X เป็นกลุ่มธาตุผสมของอลูมิเนียม ที่มีทองแดงเป็นธาตุผสมหลัก เป็นต้น

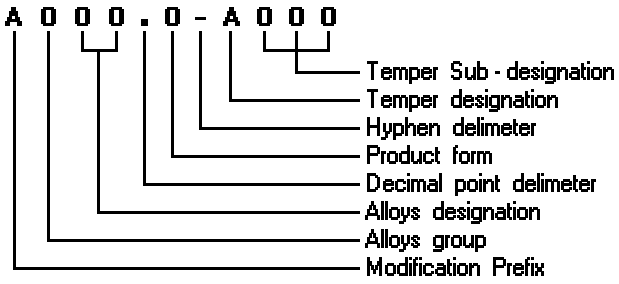
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสัญลักษณ์กลุ่มอะลูมิเนียมหล่อผสมตามมาตรฐานของ ASM (วิจิตร 2542)

1XX.X	อลูมิเนียม ที่มีความบริสุทธิ์ ไม่น้อยกว่า 99.00%
2XX.X	ทองแดง (Copper , Cu)
3XX.X	ซิลิกอน (Silicon , Si) - ทองแดง (Copper , Cu) - แมกนีเซียม (Mg) ซิลิกอน (Silicon , Si) - แมกนีเซียม (Magnesium , Mg) ซิลิกอน (Silicon , Si) - ทองแดง (Copper , Cu)
4XX.X	ซิลิกอน (Silicon , Si)
5XX.X	แมกนีเซียม (Magnesium , Mg)
7XX.X	สังกะสี (Zinc , Zn)
8XX.X	ดีบุก (Tin , Sn)
9XX.X	ธาตุอื่นๆ (Other Element)
6XX.X	ยังไม่มีใช้ (Unused Series)

ตัวเลขตัวที่สองและสาม เป็นสัญลักษณ์ แสดงอลูมิเนียมผสม ที่มีธาตุผสมชนิดอื่นผสมเข้าไป หรือแสดงอลูมิเนียมบริสุทธิ์

ตัวเลขตัวที่สี่ เป็นสัญลักษณ์ซึ่งเป็นการแบ่งตามการผลิตอย่างอื่น โดยจะใช้จุดทศนิยมแสดงการผลิต เป็นต้น เช่น การหล่อ หรือ จากแท่งอินกอท การปรับปรุงจากธาตุผสมเดิม หรือ จำนวนสิ่งที่ปนเข้าไป แสดงโดยตัวอักษรก่อนตัวเลข ตัวอักษร " X " ใหญ่ ใช้สำหรับธาตุผสมที่ทดลองอยู่ อย่างไรก็ตาม อลูมิเนียมหล่อผสมทั่วไปจะใช้ตัวเลข 3 หลัก

อย่างไรก็ตาม American Aluminum Association Casting Alloys ได้กำหนดมาตรฐาน และแยกประเภทอลูมิเนียมหล่อผสม โดยได้จดทะเบียนไว้กับ สำนักงานมาตรฐานแห่งชาติของสหรัฐอเมริกา (American National Standard Institute) หรือ ANSI Standard และยังคงแบ่งกลุ่มได้ 9 กลุ่ม เหมือนกับ ASM (America Society of Metals) ซึ่งการกำหนดอลูมิเนียมหล่อผสมตาม ANSI Standard ได้ ดังนี้



A : **อักษรตัวแรก** หมายถึง สมาชิกของ Alloys ที่เหมือนกันอยู่ ในกลุ่มเดียวกัน (หมายถึง Aluminum Alloy) แม้ว่าส่วนผสม จะแตกต่างกัน

O : **Alloy group** จะเป็นตัวเลขตัวเดียวจาก 1 ถึง 9 ใช้เป็นตัวกำหนด ธาตุหลักของ Alloys หรือ Major Alloying

OO : **Alloys designation** เป็นตัวเลข 2 หลัก กำหนดความแตกต่าง ของสมาชิกในกลุ่ม Alloys เดียวกัน ความหมายของตัวเลข ที่กำหนดเหมือนกับ Major Alloy ในบางครั้งตัวเลข 2 หลัก คือ ปริมาณ % ไม่น้อยกว่าของ Al ที่มีผสมอยู่ เช่น 190.X เท่ากับ Al ผสมอยู่ 99.90%

.O : **ตัวเลขหลังจุดทศนิยม** หมายถึง รูปแบบการผลิต หรือ Product form เป็นตัวเลขหลักเดียว คือ

.0 : เป็น Casting Specification

.1 : เป็น Ingot Specification

.2 : เป็น Ingot Specification ที่ควบคุมส่วนผสมน้อยกว่า **.1** Ingot Specification

A : **Temper designation** เป็นตัวกำหนดแทนกรรมวิธี Temper ของกระบวนการ Heat Treatment ที่ใช้กับ Heat Treatable Alloys ดังนี้

F : As Cast Condition หมายถึง งานจากสภาพหล่อ โดยไม่ต้องใช้ กรรมวิธีใดๆ ควบคุมภายหลังการหล่อขึ้นรูป

H : Strain Hardened หมายถึง สภาพของงานแข็งตัวเอง เนื่องจาก ความเครียด จากการทำ Cold working เช่น งานรีดขึ้นรูปต่างๆ

O : Anneal หมายถึง การอบอ่อน ใช้กับงานหล่อ ที่ต้องนำไปอบ เพื่อปรับปรุงขนาด รูปร่าง ให้คงที่ (Stability) ขณะใช้งาน หรือ เพื่อทำให้เพิ่ม ความเหนียว (Ductility)

W : Solution Heat Treat เป็นการอบเพื่อเปลี่ยน โครงสร้างให้เป็น สารละลายของแข็ง เฟสเดียว ใช้กับ Alloys ที่สามารถชุบแข็ง ด้วยตัวเองได้ ในบรรยากาศปกติ

T :เป็นการอบด้วยความร้อน โดยกำหนดกรรมวิธี Temper ที่แน่นอนดีกว่า **F** หรือ **O** การกำหนดกรรมวิธี **"F"** , **"O"** และ **"T"** ทุกกระบวนการ สามารถหล่อด้วย แบบทราย และแบบเหล็ก

OO **Temper Sub-designation** เป็นตัวเลขระบุกรรมวิธีทำ Temper ที่ชัดเจนโดยระบุอุณหภูมิ
O : และ ช่วงเวลาปฏิบัติ การที่แยกละเอียด ไปได้อีก 10 วิธีการ จาก **T1** ถึง **T10** และ ส่วนปลีกย่อยอีก ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสัญลักษณ์การทำ Temper (วิจิตร 2542)

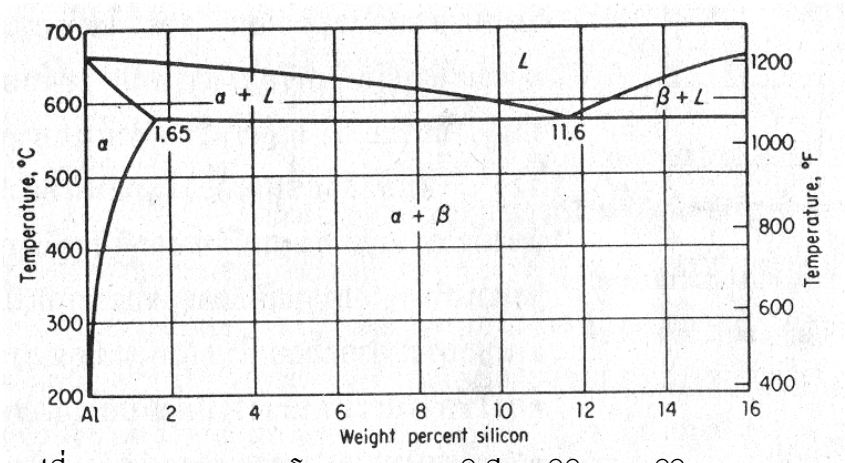
T1	ปล่อยให้งานเย็นตัว ลงตามปกติ ในบรรยากาศปกติ และ บ่มแข็งด้วยตนเอง (Naturally Aged) โดยธรรมชาติ และ สภาพงาน ไม่เปลี่ยนแปลง
T2	ปล่อยให้งานเย็นตัว ลงในบรรยากาศปกติ ความแข็งจะเกิดขึ้น จากการใช้งาน ที่อุณหภูมิปกติ (Cold Worked) โดยธรรมชาติ
T3	นำงานไปทำการอบละลาย (Solution Heat Treated) แล้วปล่อยให้ งานเย็นตัวลง แล้วทำ Naturally Aged โดยทิ้งชิ้นงาน ไว้ในบรรยากาศ จะเกิดความแข็งเอง
T4	ทำ Solution Heat Treated และ Naturally Aged เพื่อให้ความแข็งคงตัว
T42	ทำ Solution Heat Treated จาก **"O"** และ **"F"** Temper เพื่อปรับสภาพของ งานหล่อก่อนทำ Naturally Aged เพื่อให้ ความแข็งคงตัว
T5	ปล่อยให้งานค่อยๆ เย็นตัวลง ในสภาพเดิม แล้วนำไปทำการบ่มแข็งเทียม (Artificially Aged) (โดยนำงานที่ทำ Quenching แล้วกลับมา อบอีกครั้ง ในช่วงอุณหภูมิ ไม่เกิน 200°C เพื่อให้เกิด เฟสใหม่ที่ให้ความแข็งแรงได้ถึงจุดสูงสุด ภายในเวลาไม่เกิน 10ชม.) * Artificially Aging ที่ 450°F เป็นเวลา 8 hrs
T51	เป็นการคลายความเครียด (Stress Relieved) โดยการนำไปดัดตรง หลังจากการทำ Solution Heat Treated หรือ หลังจากการปล่อยให้เย็นตัวลงตามปกติ
T52	เป็นการทำ Stress Relieved โดยการนำไปกดอัดงาน ภายหลังจากการทำ Solution Heat Treated หรือ หลังจากการปล่อยให้เย็นตัวลงจากสภาพเดิม
T54	เป็นการทำ Stress Relieved โดยการใช้แรงดึงและอัดงาน ภายหลังจากการรีดหรือขึ้นรูป
T6	เป็นการทำ Solution Heat Treated , Quenching แล้วทำ Artificially Aged
T61	เป็นการทำ Solution Heat Treated แล้วทำ Quenching ก่อนทำ Artificially Aged เพื่อให้ได้ ความแข็ง และ ความแข็งแรงสูงสุด
T62	เป็นการทำ Solution Heat Treated จาก **"O"** และ **"F"** Temper จากนั้นนำไป Quenching ก่อนแล้วทำ Artificially Aged
T7	เป็นการทำ Solution Heat Treatment และ Stabilized (การทำ Overaged เพื่อปรับปรุง ขนาดให้คงที่แน่นนอน แต่ไม่สูญเสียคุณสมบัติทาง Mechanical Properties) * หรือทำ Solution Heat Treated ที่ 980°F , Overaged ที่ 440°F เป็นเวลา 3-5 hrs.
T71	เป็นการทำ Solution Heat Treated และ Stabilized (คือ การยืดระยะเวลา และ อุณหภูมิ ทำ Overage เพื่อลดความเครียด และ ปรับปรุงให้มี ขนาดคงที่แน่นอน แต่คุณสมบัติทาง Mechanical Properties จะลดลง)
T8	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Age

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสัญลักษณ์การทำ Temper (ต่อ)

T9	เป็นการทำ Solution Heat Treated ต่อด้วย Artificially Aged แล้วนำมาทำ Cold Worked
T10	เป็นการให้งานเย็นตัวตามปกติ แล้วนำไปขึ้นรูป Cold Worked แล้วนำมาทำ Artificially Aged

2.1.3 โลหะผสมหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอน(3xx.xx)

โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนเป็นโลหะผสมที่มีความสามารถในการไหลดี ทำให้งานหล่อเป็นรูปพรรณกระทำได้ง่าย และมีสมบัติต้านการกัดกร่อนที่ดีพอสมควร เหมาะสำหรับใช้ในงานเชื่อมแต่ไม่เหมาะกับงานกลึง โลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่ใช้กันอยู่ทั่วไป ได้แก่ ชนิดไฮเปอร์ยูเทกติก (ปริมาณซิลิกอนต่ำกว่า 12%) พิจารณาจากรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนภาพสมดุลโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน (วิจิตร 2542)

เราพบว่าความสามารถในการละลายของซิลิกอนในอะลูมิเนียมค่อนข้างต่ำมาก เนื่องจากซิลิกอนมีคุณลักษณะหลายประการที่แตกต่างจากอะลูมิเนียม เช่น โครงสร้างผลึก และจุดหลอมเหลว ดังนั้นที่อุณหภูมิยูเทกติก (577^0C) ปริมาณซิลิกอนสามารถละลายในสารละลายของแข็ง (เฟส α) กับอะลูมิเนียมได้สูงสุดเพียง 1.65% ซิลิกอนที่เกินจะแยกตัวไม่ละลายในอะลูมิเนียมโดยฟอร์มเป็นเฟส β ในชิ้นงานหล่ออะลูมิเนียม-ซิลิกอนที่มีอัตราการแข็งตัวช้า เฟส β จะเป็นแผ่นหรือเข็มที่มีขนาดใหญ่และต่อเนื่องในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม มีผลทำให้อะลูมิเนียมผสมนั้นมีความแข็งแรงต่ำและเปราะ การปรับปรุงสมบัติทางกลของโลหะผสมสามารถกระทำได้หลายวิธี เช่น การเพิ่มอัตราการเย็นตัวภายในแบบหล่อให้สูงขึ้น เพิ่มปริมาณนิวเคลียสของการแข็งตัวเพื่อลดขนาดเกรนให้เล็กลง หรือใช้เทคนิคโมดิฟิเคชัน (Modification) โดยทั่วไปแล้วโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอน ไม่สามารถเพิ่มความแข็งแรงให้สูงขึ้นได้ด้วยวิธีการอบชุบด้วยความร้อน แต่เมื่อเติมแมกนีเซียม หรือทองแดง จะเกิดการรวมตัวให้เฟสกึ่งโลหะ เช่น Mg_2Si , Mg_2Al_3 หรือ $CuAl_2$ ซึ่งทำให้สามารถปรับปรุงสมบัติทางกลได้โดยนำมาผ่านกระบวนทางความร้อนแบบ T5 หรือ T6 ที่ประกอบไปด้วย 3 กระบวนการ ดังนี้

1. การอบละลาย (Solution Treatment) เป็นการอบเพื่อละลายเฟสที่สอง เช่น Mg_2Si หรือ $CuAl_2$ ให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็งและมีการแพร่อย่างทั่วถึงทั้งชิ้นงาน โดยอุณหภูมิและเวลาของการอบละลายขึ้นอยู่กับเกรดและขนาดของโลหะผสมเป็นหลัก

2. การชุบเย็น (Quenching) เพื่อให้ธาตุ Mg และ Cu ที่ละลายเป็นสารละลายของแข็งในกระบวนการแรก ยังคงอยู่ในสภาวะสารละลายของแข็งที่อุณหภูมิต่ำ โดยนำโลหะผสมจากกระบวนการที่ 1. มาทำให้เกิดการเย็นตัวลงมาอย่างรวดเร็ว ธาตุเหล่านี้จะอยู่ในรูปสารละลายของแข็งที่มีสภาวะอิ่มตัวยิ่งยวดและพร้อมที่จะตกตะกอนออกมาเมื่อนำมาผ่านกระบวนการขั้นที่ 3

3. การบ่มแข็ง (Aging) กระบวนการนี้ทำให้เกิดการตกตะกอนของเฟสกึ่งโลหะที่มีความละเอียดมาก และช่วยเพิ่มความแข็งได้ การบ่มแข็งอาจทำได้โดยการวางชิ้นงานไว้ ณ อุณหภูมิห้อง เรียกว่า การบ่มแข็งธรรมชาติ (Natural aging) หรือนำชิ้นงานไปอบที่อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอน เ รียกว่า การบ่มแข็งเทียม (Artificial aging) โดยอุณหภูมิของการบ่มแข็งขึ้นอยู่กับเกรดของโลหะผสม และเวลาของการบ่มแข็งที่ให้ ความแข็งสูงสุดขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการบ่มแข็ง

2.1.4 อะลูมิเนียมหล่อเกรด A356

อะลูมิเนียมหล่อเกรด A356 เป็นโลหะผสมอะลูมิเนียม-ซิลิกอนแบบไฮโปยูเทกติก สามารถหล่อได้ดีทั้งในแบบทรายและแบบโลหะ มีความสามารถในการไหลตัวได้ดีและการหดตัวน้อยมาก มีความแตกต่างจากอะลูมิเนียมหล่อเกรด 356 ตรงที่มีปริมาณเหล็กที่ลดลง ซึ่งมีผลทำให้สมบัติการต้านแรงดึงสูงขึ้นและมีความอ่อนเหนียวมากขึ้น การยืดตัวสูง ทนต่อแรงกระแทกได้สูง ส่วนผสมทางเคมีของอะลูมิเนียมผสมเกรด A356 เป็น Al, 7%Si, 0.35%Mg, 0.20%Fe, 0.20%Cu, 0.10%Mn, 0.10%Zn และ 0.230%Ti การเติมแมกนีเซียมลงไปเล็กน้อย ทำให้สมบัติทางกลของอะลูมิเนียม- ซิลิกอนเกรดนี้สามารถปรับปรุงได้ด้วยกรรมวิธีทางความร้อน โดยการฟอร์มเฟส Mg_2Si ในเมตริกซ์ของอะลูมิเนียม กระบวนการทางความร้อนที่ใช้เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้มากที่สุด ได้แก่ ชนิด T6 คือ การนำชิ้นงานไปอบละลายแล้วนำไปชุบน้ำ จากนั้นจึงนำไปทำการบ่มแข็งเทียม(ใช้กับการหล่อในแบบหล่อทราย) การนำไปใช้งานเหมาะที่สุดกับงานที่ต้องการความทนทานต่อการผุกร่อน และความแข็งแรงสูง ใช้งานอย่างกว้างขวางกับอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์ชิ้นส่วนยานยนต์ต่างๆ เช่น เสื้อสูบ ฝาสูบ ท่อไอดี ไอเสีย กระทะล้อรถต่างๆ ชิ้นส่วนเครื่องจักร ล้อเครื่องบิน โครงสร้างเครื่องบิน เสื้อปั๊มพ์ และโบลเวอร์ความเร็วสูง และใบพัดปั๊มต่างๆ

2.2 ปัญหาความไม่สมบูรณ์ของชิ้นงานหล่อ

จะเห็นว่าอะลูมิเนียมทำปฏิกิริยากับความชื้น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในบรรยากาศของเตาหลอมได้ง่าย ดังสมการต่อไปนี้

$$2Al + 3H_2O = Al_2O_3 + 3H_2 \quad (1)$$

$$6Al + 3CO = Al_2O_3 + Al_4C_3 \quad (2)$$

$$8Al + 3CO_2 = 2Al_2O_3 + Al_4C_3 \quad (3)$$

$$6Al + 3SO_2 = 2Al_2O_3 + Al_2C_3 \quad (4)$$

ไฮโดรเจนที่ละลายในโลหะผสมทำให้เกิดรูพรุนในชิ้นงานหล่อ ในขณะที่สารประกอบอื่นที่เกิดขึ้นมีผลเสียต่อคุณภาพของชิ้นงาน ดังนั้นจึงต้องใช้สารเชื้อคลุมผิวหน้าน้ำโลหะเพื่อ ป้องกันไม่ให้โลหะสัมผัสกับแก๊ส ทำให้ชิ้นงานหล่อสะอาดและมีเนื้อแน่น การหล่ออะลูมิเนียมสามารถหล่อได้ในแบบหล่อทราย (แบบทรายชื้นและแบบทรายแห้ง) ซึ่งมีหีบแบบเป็นโลหะ การหล่อแบบถาวรและการหล่อด้วยแม่พิมพ์ (Die) ในการหล่อด้วยแบบทราย ทรายที่ใช้หล่อเป็นทรายผสมดินเหนียว เช่น ทรายทำแบบที่มีความแข็งแรงปานกลาง (มีดินเหนียว 10-20%) และทรายทำแบบที่มีความแข็งแรงสูง (มีดินเหนียว 20-30%) แบบทรายจะใช้ได้เพียงครั้งเดียว ในขณะที่การหล่อแบบถาวรจะผลิตได้เป็นแสนๆ ชิ้น การยืดอายุของแบบถาวรทำได้โดยการเคลือบผิวแบบด้วยสีตรงบริเวณที่สัมผัสกับน้ำโลหะ การหล่อด้วยแม่พิมพ์สามารถใช้หล่อชิ้นงานที่ซับซ้อนได้ โดยใช้แรงดันบังคับน้ำโลหะให้ไหลเข้าไปในแบบเหล็กกล้า

2.3 การทำโมดิฟิเคชั่น (Modification) สำหรับอะลูมิเนียมผสมหล่อชนิด Hypoeutectic Al-Si Alloys

Modification หมายถึง กระบวนการทำให้ Silicon Crystal ที่เป็นองค์ประกอบในโครงสร้างจุลภาค Eutectic กระจายเล็กละเอียดแทนที่จะจับตัวกันเป็นก้อนใหญ่แทรกฝังในเนื้อเมตริกซ์ กระบวนการโดยทั่วไปจะใช้โลหะ Sodium หรือ Strontium ผสมเติมลงในน้ำโลหะก่อนเทลงแบบ ซึ่งโลหะทั้งสองชนิดนี้จะมีผลทำให้ความตึงผิวของน้ำโลหะในระหว่างองค์ประกอบโครงสร้าง Eutectic ลดลง แรงตึงผิวของน้ำโลหะที่ลดลงดังกล่าวจะทำให้มุมสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิกอนเพิ่มขึ้น ทำให้อะลูมิเนียมสามารถโอบล้อมและสกัดกั้นการพอกโตของซิลิกอนได้เป็นอย่างดี

2.3.1 Sodium Modification

ในระหว่างการแข็งตัวของน้ำโลหะ Al-Si ชนิด Hypoeutectic กระบวนการแข็งตัวจะดำเนินต่อเนื่องไปในระหว่างช่วงอุณหภูมิ โดยมีสารละลายของแข็ง Al-Si แยกตัวออกมาจากน้ำโลหะและ

พอกโตขึ้น ยาวขึ้นเป็น Dendrite ตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้นและอุณหภูมิที่ลดลง การแข็งตัวดังกล่าวจะมีผลึกของ Si และสารละลายของแข็งที่เรียกว่า Al(α)phase แยกออกจากน้ำโลหะมาพร้อมๆกัน ในสภาวะที่ไม่ได้ทำการ Modification ผลึกของ Si จะเติบโตขึ้นมีขนาดใหญ่ เปราะ มีลักษณะเป็นแถบ แผ่น หรือเข็มชิ้นใหญ่ ทำให้เนื้อโลหะดังกล่าวมีความอ่อนเหนียว (Ductility) ต่ำ เมื่อนำไปทดสอบรับแรงดึงจึงทำให้มีการยืดตัวได้น้อย พร้อมกับรอยขาดมีลักษณะแข็งเปราะและมีเนื้อหยาบ อย่างไรก็ตามเมื่อผสมเติม Sodium หรือ Strontium ลงในน้ำโลหะก่อนการเทลงแบบ จะทำให้ผลึก Si ที่จะเกิดขึ้นเติบโตได้น้อยจึงมีลักษณะเป็นแถบแผ่นขนาดเล็กละเอียดคล้ายเส้นใยเล็กๆแยกกันอย่างอิสระ แต่ในความเป็นจริงเส้นใยเล่านี้ไม่ได้แยกอิสระต่อกันแต่ต่อเนื่องกันในลักษณะคล้ายสาหร่าย จากการที่ผลึกของ Si มีขนาดเล็กละเอียดและกระจายอย่างสม่ำเสมอนี้จะทำให้โลหะมีความสามารถในการรับแรงดึงและมีการยืดตัวได้สูงขึ้น และทำให้ Machinability ของเนื้อโลหะสูงขึ้น

แต่ในทางปฏิบัติการใช้ Sodium ทำ Modification จะเกิดปฏิกิริยา ทำให้เกิดการกวนบริเวณผิวหน้าของน้ำโลหะและเกิดควันสีขาวปริมาณมาก และหลังจากเติม Sodium แล้วหากทิ้งน้ำโลหะไว้เป็นเวลานานเกินไปจะทำให้ผลในการ Modification ของ Sodium ลดน้อยลงตามระยะเวลาที่ทิ้งไว้ ดังนั้นเพื่อให้ได้ผลการทำ Modification ที่ดีที่สุด หลังจากการเติม Sodium ลงในน้ำโลหะแล้วทันทีที่ปฏิกิริยาสิ้นสุดลงควรรีบเทน้ำโลหะลงแบบทันที ปริมาณ Sodium ที่ใช้ควรจะไม่น้อยกว่า 0.15% โดยน้ำหนัก

2.3.2 Strontium Modification

จุดมุ่งหมายของการใช้ Strontium เพื่อเป็น Modified Agent เพื่อแก้ไขปัญหาความไม่แน่นอนและทำให้เกิดความสะดวกมากกว่าการใช้ Sodium จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่า Strontium ปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้นก็เพียงพอที่จะมีผลให้เกิด Modification ได้ดีและมีผลยาวนานกว่า Sodium และมีรายงานว่าในการเติม Strontium ลงในน้ำโลหะเพื่อทำ Modification ครั้งแรกจะมีการสูญเพลิงของ Strontium สูงถึง 50% แต่เมื่อนำอะลูมิเนียมผสมที่ผ่านการ Strontium มาแล้วมาทำการหลอมใหม่ปริมาณการสูญเพลิงจะน้อยมาก การเติม Strontium ในปริมาณเพียง 0.01-0.02% โดยน้ำหนักก็เพียงพอจะมีผลให้เกิด Modification มีประสิทธิภาพสูงเพียงพอ นอกจากนี้ Strontium ยังสามารถคงอิทธิพลตกค้างในการทำ Modification ได้เมื่อนำกลับมาหลอมใหม่ถ้าปริมาณตกค้างของ Strontium ในเนื้อโลหะหลังการแข็งตัวมีสูงกว่า 0.008% โดยน้ำหนัก

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าประสิทธิภาพในการทำ Modification ของ Sodium และ Strontium เท่าเทียมกัน การที่มีธาตุทั้งสองตกค้างในน้ำโลหะพร้อมๆกันจะไม่มีผลหักล้างใดๆ

การใช้ก๊าซคลอรีนเป็น Flux เพื่อกำจัดไฮโดรเจนออกจากน้ำโลหะหลังการทำ Modification จะมีผลทำให้อิทธิพลของทั้ง Sodium และ Strontium หมดสิ้นไป ดังนั้นหลังจากการทำ

Modification ถ้าต้องการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนออกควรใช้ก๊าซไนโตรเจนหรืออาร์กอนเป็นพาหะในการกำจัดก๊าซไฮโดรเจนแทนก๊าซคลอรีน

2.4 สมบัติเชิงกลของวัสดุและการทดสอบสมบัติเชิงกล

สมบัติเชิงกลของวัสดุ เช่น ความแข็ง (Hardness) ความแข็งแรง (Strength) ความเหนียว (Ductility) ฯลฯ เป็นสิ่งที่จะบอกว่าวัสดุนั้นๆ สามารถที่จะรับหรือทนทานแรง หรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากระทำได้ดีมากน้อยเพียงใด ในงานวิศวกรรมคุณสมบัติเชิงกลมีความสำคัญมากที่สุด เพราะเมื่อเราจะเลือกใช้วัสดุใดๆ ก็ตาม สิ่งแรกที่จะนำมาพิจารณาก็คือ คุณสมบัติเชิงกลของวัสดุนั้น การที่เครื่องจักรหรืออุปกรณ์ใดๆ จะสามารถทำงานได้อย่างปลอดภัยขึ้นอยู่กับคุณสมบัติเชิงกลของวัสดุที่ใช้ทำเครื่องจักร อุปกรณ์นั้นๆ เป็นสำคัญ

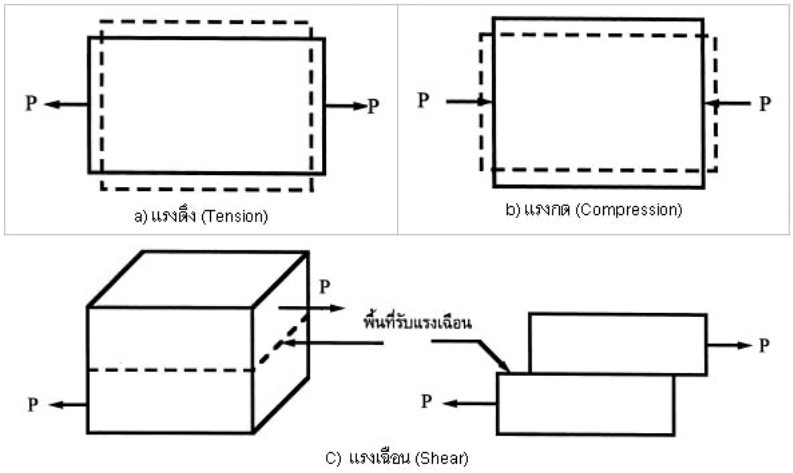
2.4.1 ความเค้น (Stress)

ตามความเป็นจริงความเค้นหมายถึง แรงต้านทานภายในเนื้อวัสดุที่มีต่อแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่

แต่เนื่องจากความไม่เหมาะสมทางปฏิบัติ และความยากในการวัดหาค่านี้ เราจึงมักจะพูดถึงความเค้นในรูปของแรงภายนอกที่มากระทำต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (ความเค้น=แรง (F) / พื้นที่หน้าตัด (A_o)) ด้วยเหตุผลที่ว่า แรงกระทำภายนอกมีความสมดุลกับแรงต้านทานภายใน

โดยทั่วไปความเค้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของแรงที่มากระทำ

1. ความเค้นแรงดึง (Tensile Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงดึงมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง โดยพยายามจะแยกเนื้อวัสดุให้แยกขาดออกจากกัน ดังรูปที่ 2.2 a
2. ความเค้นแรงอัด (Compressive Stress) เกิดขึ้นเมื่อมีแรงกดมากระทำตั้งฉากกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อพยายามอัดให้วัสดุมีขนาดสั้นลง ดังรูปที่ 2.2 b
3. ความเค้นแรงเฉือน (Shear Stress) ใช้สัญลักษณ์ t เกิดขึ้นเมื่อมีแรงมากระทำให้ทิศทางขนานกับพื้นที่ภาคตัดขวาง เพื่อให้วัสดุเคลื่อนผ่านจากกันดังรูปที่ 2.2 c มีค่าเท่ากับแรงเฉือน (Shear Force) หารด้วยพื้นที่ภาคตัดขวาง A ซึ่งขนานกับทิศทางของแรงเฉือน ในทางปฏิบัติความเค้นที่เกิดจะมีทั้ง 3 แบบนี้พร้อม ๆ กัน



รูปที่ 2.2 ลักษณะความเค้นแบบต่างๆ (แม้น 2544)

2.4.2 ความเครียดและการเปลี่ยนรูป (Strain and Deformation)

ความเครียด (Strain) คือ การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของวัสดุ (Deformation) เมื่อมีแรงภายนอกมากระทำ (ความเครียด = ความยาวที่เปลี่ยนไป (ΔL) / ความยาวเดิม (L_o))

การเปลี่ยนรูปของวัสดุนี้เป็นผลมาจากการเคลื่อนที่ภายในเนื้อวัสดุ ซึ่งลักษณะของมันสามารถแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

1. การเปลี่ยนรูปแบบอิลาสติกหรือความเครียดแบบคืนรูป (Elastic Deformation or Elastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปในลักษณะที่เมื่อปลดแรงกระทำ อะตอมซึ่งเคลื่อนไหวเนื่องจากผลของความเค้นจะเคลื่อนกลับเข้าตำแหน่งเดิม ทำให้วัสดุคงรูปร่างเดิมไว้ได้ ตัวอย่างได้แก่ พวกยางยืด, สปริง ถ้าเราดึงมันแล้วปล่อยมันจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม
2. การเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกหรือความเครียดแบบคงรูป (Plastic Deformation or Plastic Strain) เป็นการเปลี่ยนรูปที่ถึงแม้ว่าจะปลดแรงกระทำนั้นออกแล้ววัสดุก็ยังคงรูปร่างตามที่ถูกเปลี่ยนไปนั้น โดยอะตอมที่เคลื่อนที่ไปแล้วจะไม่กลับไปตำแหน่งเดิม

วัสดุทุกชนิดจะมีพฤติกรรมการเปลี่ยนรูปทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับแรงที่มากระทำ หรือความเค้นว่ามีมากน้อยเพียงใด หากไม่เกินพิกัดการคืนรูป (Elastic Limit) แล้ว วัสดุนั้นก็จะมีพฤติกรรมคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) แต่ถ้าความเค้นเกินกว่าพิกัดการคืนรูปแล้ววัสดุก็จะเกิดการเปลี่ยนรูปแบบถาวรหรือแบบพลาสติก (Plastic Deformation)

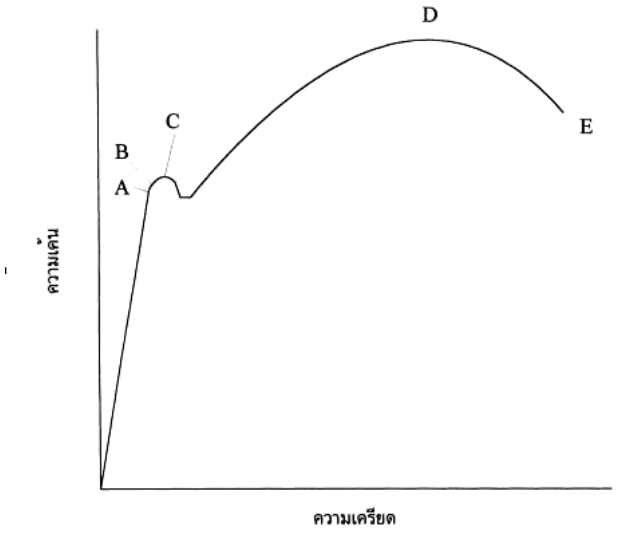
นอกจากความเครียดทั้ง 2 ชนิดนี้แล้ว ยังมีความเครียดอีกประเภทหนึ่งซึ่งพบในวัสดุประเภทโพลีเมอร์ เช่น พลาสติก เรียกว่าความเครียดกึ่งอิลาสติกจะมีลักษณะที่เมื่อปราศจากแรง

กระทำวัสดุจะมีการคืนรูป แต่จะไม่กลับไปจนมีลักษณะเหมือนเดิม การวัดและคำนวณหาค่าความเครียดมีอยู่ 2 ลักษณะคือ

- แบบเส้นตรง ความเครียดที่วัดได้จะเรียกว่า ความเครียดเชิงเส้น (Linear Strain) จะใช้ได้เมื่อแรงที่มากระทำมีลักษณะเป็นแรงดึงหรือแรงกด ค่าของความเครียดจะเท่ากับความยาวที่เปลี่ยนไปต่อความยาวเดิม
- แบบเฉือน เรียกว่า ความเครียดเฉือน (Shear Strain) ใช้กับกรณีที่แรงที่กระทำมีลักษณะเป็นแรงเฉือน ค่าของความเครียดจะเท่ากับระยะที่เคลื่อนที่ไปต่อระยะห่างระหว่างระนาบ

2.4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด (Stress-Strain Relationship)

ในการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นและความเครียด ในที่นี้เราจะใช้เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) ซึ่งได้จากการทดสอบแรงดึง (Tensile Test) เป็นหลัก โดยจะพลอตค่าของความเค้นในแกนตั้งและความเครียดในแกนนอน ดังรูป 2.3 การทดสอบแรงดึง นอกจากจะให้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดแล้ว ยังจะแสดงความสามารถในการรับแรงดึงของวัสดุ ความเปราะ เหนียวของวัสดุ (Brittleness and Ductility) และบางครั้งอาจใช้บอกความสามารถในการขึ้นรูปของวัสดุ (Formability) ได้อีกด้วย



รูปที่2.3 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียด (Stress-Strain Curve) แบบมีจุดคราก (Yield Point) (แม้น 2544)

2.4.4 การทดสอบแรงดึง (Tension Test)

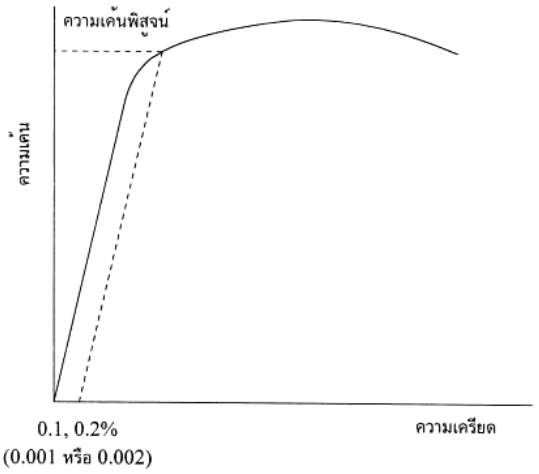
วิธีการทดสอบนั้น เราจะนำตัวอย่างที่จะทดสอบมาดึงอย่างช้า ๆ แล้วบันทึกค่าของความเค้นและความเครียดที่เกิดขึ้นไว้ แล้วมาพลอตเป็นเส้นโค้งดังรูปที่ 2.3 ขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบมีต่าง ๆ กัน ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุนั้น ๆ มาตรฐานต่าง ๆ ของการทดสอบ เช่น มาตรฐานของ ASTM (American Society of Testing and Materials), BS (British Standards), JIS (Japanese Industrial Standards) หรือแม้แต่ มอก. (มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมไทย) ได้กำหนดขนาดและรูปร่างของชิ้นทดสอบไว้ ทั้งนี้เพื่อให้ผลของการทดสอบเชื่อถือได้ พร้อมกับกำหนดความเร็วในการเพิ่มแรงกระทำเอาไว้ด้วย

จากการศึกษาเส้นโค้งความเค้น-ความเครียด เราพบว่า เมื่อเราเริ่มดึงชิ้นทดสอบอย่างช้า ๆ ชิ้นทดสอบจะค่อยๆยืดออก จนถึงจุดจุดหนึ่ง (จุด A) ซึ่งในช่วงนี้ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้น-ความเครียดจะเป็นสัดส่วนคงที่ ทำให้เราได้กราฟที่เป็นเส้นตรง ตามกฎของฮุค (Hook's law) ซึ่งกล่าวว่าความเค้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเครียด จุด A นี้ เรียกว่าพิกัดสัดส่วน (Proportional Limit) และภายใต้พิกัดสัดส่วนนี้ วัสดุจะแสดงพฤติกรรมการคืนรูปแบบอิลาสติก (Elastic Behavior) นั่นคือเมื่อปล่อยแรงกระทำ ชิ้นทดสอบจะกลับไปมีขนาดเท่าเดิม

เมื่อเราเพิ่มแรงกระทำต่อไปจนเกินพิกัดสัดส่วน เส้นกราฟจะค่อย ๆ โค้งออกจากเส้นตรง วัสดุหลายชนิดจะยังคงแสดงพฤติกรรมการคืนรูปได้อีกเล็กน้อยจนถึงจุด ๆ หนึ่ง (จุด B) เรียกว่าพิกัดยืดหยุ่น (Elastic Limit) ซึ่งจุดนี้จะเป็นจุดกำหนดว่าความเค้นสูงสุดที่จะไม่ทำให้เกิดการแปรรูปถาวร (Permanent Deformation or Offset) กับวัสดุนั้น เมื่อผ่านจุดนี้ไปแล้ววัสดุจะมีการเปลี่ยนรูปอย่างถาวร (Plastic Deformation) ลักษณะการเริ่มต้นของความเครียดแบบพลาสติกนี้เปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของวัสดุในโลหะหลายชนิด เช่น พวกเหล็กกล้าคาร์บอนต่ำ (Low Carbon Steel) จะเกิดการเปลี่ยนรูปอย่างรวดเร็ว โดยไม่มีการเพิ่มความเค้น (บางครั้งอาจจะลดลงก็มี) ที่จุด C ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการเปลี่ยนรูปแบบพลาสติก จุด C นี้เรียกว่าจุดคราก (Yield Point) และค่าของความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า ความเค้นจุดคราก (Yield Stress) หรือ Yield Strength ค่า Yield Strength นี้มีประโยชน์กับวิศวกรมาก เพราะเป็นจุดแบ่งระหว่างพฤติกรรมการคืนรูปกับพฤติกรรมการคงรูป และในกรณีของโลหะจะเป็นค่าความแข็งแรงสูงสุดที่เราคงใช้ประโยชน์ได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

วัสดุหลายชนิดเช่น อะลูมิเนียม ทองแดง จะไม่แสดงจุดครากอย่างชัดเจน แต่เราก็มีวิธีที่จะหาได้โดยกำหนดความเครียดที่ 0.10 - 0.20% ของความยาวกำหนดเดิม (Original Gage Length) แล้วลากเส้นขนานกับกราฟช่วงแรกไปจนตัดเส้นกราฟที่โค้งไปทางด้านขวา ดังรูปที่ 2.4

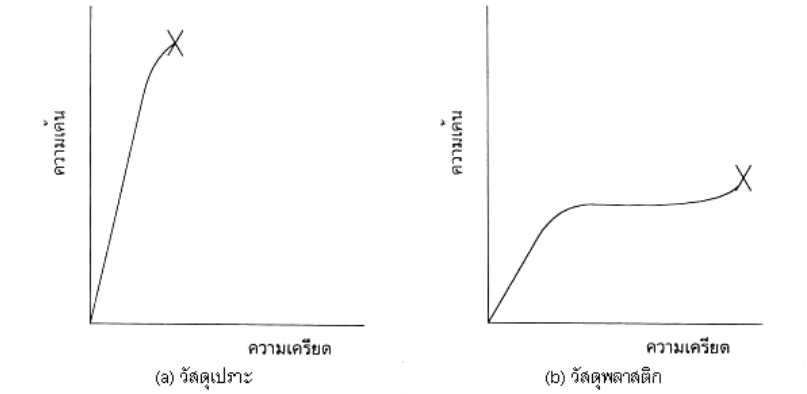
ค่าความเค้นที่จุดตัดนี้จะนำมาใช้แทนค่าความเค้นจุดครากได้ ความเค้นที่จุดนี้บางครั้งเรียกว่า ความเค้นพิสูจน์ (Proof Stress) หรือความเค้น 0.1 หรือ 0.2% offset ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดแบบที่ไม่มีจุดคราก (แม้น 2544)

หลังจากจุดครากแล้ว วัสดุจะเปลี่ยนรูปแบบพลาสติกโดยความเค้นจะค่อย ๆ เพิ่มอย่างช้า ๆ หรืออาจจะคงที่จนถึงจุดสูงสุด (จุด D) ค่าความเค้นที่จุดนี้เรียกว่า Ultimate Strength หรือความเค้นแรง-ดึง (Tensile Strength) ซึ่งเป็นค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุจะทนได้ก่อนที่จะขาดหรือแตกออกจากกัน (Fracture) เนื่องจากวัสดุหลายชนิดสามารถเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกได้มาก ๆ ค่าความเค้นสูงสุดนี้สามารถนำมาคำนวณใช้งานได้ นอกจากนี้ ค่านี้ยังใช้เป็นดัชนีเปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุได้ด้วย คำว่า ความแข็งแรงของวัสดุ หรือ กำลังวัสดุนั้น โดยทั่วไปจะหมายถึงค่าความเค้นสูงสุดที่วัสดุทนได้นี้เอง

ที่จุดสุดท้าย (จุด E) ของกราฟ เป็นจุดที่วัสดุเกิดการแตกหรือขาดออกจากกัน (Fracture) สำหรับโลหะบางชนิด เช่น เหล็กกล้าคาร์บอนต่ำหรือโลหะเหนียว ค่าความเค้นประลัย (Rupture Strength) นี้จะต่ำกว่าความเค้นสูงสุด เพราะเมื่อเลยจุด D ไป พื้นที่ภาคตัดขวางของตัวอย่างทดสอบลดลง ทำให้พื้นที่จะต้านทานแรงดึงลดลงด้วย ในขณะที่เรายังคงคำนวณค่าของความเค้นจากพื้นที่หน้าตัดเดิมของวัสดุก่อนที่จะทำการทดสอบแรงดึง ดังนั้นค่าของความเค้นจึงลดลง ส่วนโลหะอื่น ๆ เช่น โลหะที่ผ่านการขึ้นรูปเย็น (Cold Work) มาแล้ว มันจะแตกหักที่จุดความเค้นสูงสุด โดยไม่มีการลดขนาดพื้นที่ภาคตัดขวาง ดังรูป 2.5 a ทำนองเดียวกับพวกวัสดุเปราะ (Brittle Materials) เช่น เซรามิก ที่มีการเปลี่ยนรูปอย่างพลาสติกน้อยมากหรือไม่มีเลย ส่วนกรณีของวัสดุที่เป็นพลาสติกจะเกิดแตกหักโดยที่ต้องการความเค้นสูงขึ้น ดังรูป 2.5 b



รูปที่ 2.5 เปรียบเทียบเส้นโค้งความเค้น-ความเครียดของวัสดุเปราะและวัสดุพลาสติก (แม้น 2544)

เส้นโค้งความเค้น-ความเครียดนี้ นอกจากจะใช้บอกค่าความแข็งแรง ณ จุดคราก (Yield Strength) ความเค้นสูงสุดและความเค้นประลัยแล้ว ยังจะใช้บอกค่าต่าง ๆ ได้อีกดังนี้ คือ

- ความเหนียว (Ductility) คือ ค่าที่ใช้วัดจะบอกเป็นเปอร์เซนต์ การยืดตัว (Percentage Elongation) และการลดพื้นที่ภาคตัดขวาง (Reduction of Area) โดยที่

$$\text{เปอร์เซนต์การยืดตัว } (\%El) = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100\%$$

เมื่อ L_f = ความยาวของเกจหลังจากดึงจนขาด

L_o = ความยาวของเกจเริ่มต้น

$$\text{การลดพื้นที่ภาคตัดขวาง } (\%R.A.) = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100\%$$

เมื่อ A_o = พื้นที่หน้าตัดก่อนดึง

A_f = พื้นที่หน้าตัดหลังจากดึงขาด

ในทางปฏิบัติเรามักใช้ค่า %El มากกว่าเพราะสะดวกในการวัด ความเหนียวของวัสดุนี้จะเป็นตัวบอกความสามารถในการขึ้นรูปของมัน คือถ้าวัสดุมีความเหนียวดี (%El สูง) ก็สามารถนำไปขึ้นรูป เช่น รีด ตีขึ้นรูป ดึงเป็นลวด ฯลฯ ได้ง่าย แต่ถ้ามีความเหนียวต่ำ, เปราะ (Brittle) ก็จะนำไปขึ้นรูปยาก หรือทำไม่ได้ เป็นต้น

- Modulus of Elasticity or Stiffness

ภายใต้พิกัดสัดส่วนซึ่งวัสดุมีพฤติกรรมเป็นอิลาสติก อัตราส่วนระหว่างความเค้นต่อความเครียดจะเท่ากับค่าคงที่ ค่าคงที่นี้เรียกว่า Modulus of Elasticity (E) หรือ Young's Modulus หรือ Stiffness

$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{PL}{A\Delta L}$ มักมีหน่วยเป็น ksi (1 ksi=1000 psi) หรือ kgf/mm^2 หรือ GPa (สังเกตว่าเป็นหน่วยเดียวกับหน่วยของความเค้น)

ถ้าแรงที่มากระทำเป็นแรงเฉือนเราเรียกค่าคงที่นี้ว่า Shear Modulus หรือ Modulus of Rigidity (G)

$$G = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{Ph}{Aa}$$

ค่า E และ G ของวัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าเฉลี่ยคงที่ และเป็นตัวบอกความสามารถคงรูป (Stiffness, Rigidity) ของวัสดุ นั่นคือ ถ้า E และ G มีค่าสูง วัสดุจะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้น้อย แต่ถ้า E และ G ต่ำ มันก็จะเปลี่ยนรูปอย่างอิลาสติกได้มาก ค่า E และ G นี้มีประโยชน์มากสำหรับงานออกแบบวัสดุที่ต้องรับแรงต่าง ๆ

2.4.5 ความแข็ง (Hardness)

ความแข็งเป็นความต้านทานการเจาะทะลุ (Penetration) หรือการเสียดสี (Abrasion) ของวัสดุ ความแข็งของวัสดุเกี่ยวพันกับการจับตัวของอะตอมและโมเลกุลภายในเนื้อวัสดุ เช่นเดียวกันกับความแข็งแรง ดังนั้นความแข็งมักจะเพิ่มเมื่อวัสดุมีความแข็งแรงสูงขึ้นนั่นคือ พวกโลหะและเซรามิคจะแข็งกว่าพวกโพลีเมอร์

การทดสอบความแข็ง มีอยู่หลายวิธี แต่ที่ใช้กันมากที่สุดมี 3 วิธี คือ

1. การทดสอบความแข็งแบบบริเนล (Brinell Hardness Test) วิธีการ คือ ใช้ลูกบอลเหล็กที่ผ่านการชุบแข็งมาอย่างดี ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มม. กดลงบนผิวเรียบของวัสดุที่จะวัด โดยใช้แรง 3000 กก. สำหรับวัสดุแข็ง และ 500 กก. สำหรับวัสดุอ่อน โดยใช้เวลา 30 วินาที เป็นมาตรฐาน จากนั้นวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยบุ๋ม (Indentation) นำค่าที่ได้ไปคำนวณ จะได้ค่าความแข็งแรงแบบบริเนล (Brinell Hardness Number) การทดสอบความแข็งแบบบริเนลนี้ ไม่เหมาะสมกับวัสดุแข็ง เนื่องจากความแข็งของหัวกดไม่มากนัก นอกจากนี้ยังไม่เหมาะกับชิ้นทดสอบที่บางกว่าขนาดของรอยบุ๋ม
2. การทดสอบความแข็งแบบร็อคเวล (Rockwell Hardness Test) การทดสอบแบบนี้คล้ายกับการทดสอบแบบบริเนล แต่ใช้หัวกดเล็กกว่าและแรงน้อยกว่า ค่าของแรงที่ใช้และชนิด หรือขนาดของหัวกดจะเปลี่ยนได้ ขึ้นกับสเกลของความแข็งแบบรอคเวลที่เราจะเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบ การอ่านค่าความแข็งจะอ่านโดยตรง

จากเครื่อง กล่าวคือ ถ้าความลึกของรอยกดลงไปตื้น ค่าของตัวเลขจะสูง แสดงว่าวัสดุมีความแข็งมาก วิธีการทดสอบจะให้แรงกระทำเล็กน้อยคือ 10 กก. จากนั้นจะเพิ่มแรงกระทำขึ้น ซึ่งอาจจะมีตั้งแต่ 60-100 กก. ขึ้นอยู่กับขนาดและชนิดของหัวกด นอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะทดสอบด้วย หัวกดที่ใช้อาจจะเป็นลูกบอลเหล็กหรือเพชรที่มีรูปกรวย การทดสอบแบบรอคเวลนี้ ใช้อย่างกว้างขวางเพราะสามารถใช้วัดความแข็งของวัสดุชนิดต่าง ๆ ได้มากกว่า สามารถวัดความแข็งของวัสดุที่การทดสอบแบบบริเนลวัดไม่ได้ การใช้งานสะดวกอ่านค่าได้รวดเร็ว เพราะอ่านโดยตรงจากเครื่อง และเนื่องจากรอยบุ๋มมีขนาดเล็กจึงไม่ทำลายผิวของชิ้นทดสอบ

3. การทดสอบความแข็งแบบวิคเกอร์ (Vickers Hardness Test) การทดสอบแบบวิคเกอร์นี้คล้ายกับบริเนลในแง่ที่ว่า ค่าที่ได้เป็นอัตราส่วนระหว่างแรงที่ใช้ต่อพื้นที่ของรอยกด แต่ต่างกันที่หัวกดที่ใช้เป็นเพชรรูปปิระมิด แรงที่ใช้มีตั้งแต่ 5-120 กก. ขึ้นอยู่กับความแข็งของวัสดุ

2.4 งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องที่มีมาก่อน

สันติรัฐ นันสะอาง (2546) ได้ศึกษาอิทธิพลของสทรอนเซียมที่มีผลต่อสมบัติของอะลูมิเนียม-ซิลิกอน เกรด A356 โดยการเติมสตรอนเซียมลงใน A356 ขณะหลอมและแปรค่าปริมาณสตรอนเซียมกับอุณหภูมิเท พบว่าปัจจัยร่วมระหว่างอุณหภูมิเทและปริมาณสทรอนเซียมเป็นตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อ ค่าความแข็งแรง โดยจะส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรง คือ ที่อุณหภูมิเท 700°C และปริมาณสทรอน-เซียม 0.15% เป็นจุดที่ทำให้ได้ค่าความแข็งแรงสูงสุด อุณหภูมิเท และปริมาณสทรอนเซียมมีผลต่อโครงสร้างจุลภาคของอะลูมิเนียม-ซิลิกอนหล่อ โดยลักษณะของโครงสร้างมีการเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งเมื่ออุณหภูมิสูงและปริมาณของสทรอนเซียมที่มากจะทำให้สทรอนเซียมมีการกระจายตัวและตกผลึกที่บริเวณระหว่างเดนไดรท์ได้ดี และยังช่วยให้มีการแข็งตัวอย่างรวดเร็วจึงเป็นผลทำให้ขนาดของเกรนมีขนาดที่เล็กลง

P.A. Rometsch และ G.B. Schaffer (2002) ได้ทำนายพฤติกรรมการ age hardening ของอะลูมิเนียมผสม A356 และ A357 โดย ใช้ Model ทางคณิตศาสตร์ คือ

$$YS_t = YS_0 + \Delta YS_{Si} + \Delta YS_{Fe} + \Delta YS_{ss,Si} + \Delta YS_{ss,Mg} + \Delta YS_{ppt,Si} + \Delta YS_{ppt,Mg-Si}$$

พบว่าการบ่มที่อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความแข็งแรงเพิ่มขึ้นถึงจุดสูงสุดได้อย่างรวดเร็วขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ได้จะมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับสภาวะการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมจริง

S.A.Kori (2000) และคณะได้ทำการศึกษาการทำ Grain Refining ใน Al และ Al-7%Si ด้วย Refiner Master Alloy 3 ตัวคือ Al-Ti, Al-B และ Al-Ti-B ผลปรากฏว่า Al ไม่สามารถทำ Grain Refining ด้วย Al-B และ Al-Ti-B ได้ ในขณะที่ Al-7%Si สามารถใช้ refiner ทั้ง 3 ตัวทำ Grain Refining ได้ โดยปริมาณสูงสุดของ Ti และ B ที่เติมลงไปแล้วสามารถทำ Grain Refining ได้ คือ 0.3% ถ้าเกินจากนี้ก็ไม่มีผลต่อโครงสร้างจุลภาคอีก

Choong Do Lee (2005) ได้ทำการศึกษา Damping Properties หลังจากการบ่มแข็งของ A356 แบบ T6 โดยการอบละลายที่อุณหภูมิ 550°C และเพิ่มเวลาการอบละลายที่ค่าต่างๆ แล้วนำไปบ่มที่ 150°C แล้วนำไปทดสอบ Tensile Test และ Damping Test ผลคือ การอบละลายแช่ไว้เป็นเวลานานๆแล้วนำไปบ่มแข็งจะทำให้ Tensile Strength และ Specific Damping Capacity สูงขึ้นมากกว่าการอบละลายเป็นเวลาสั้นๆ เพราะการอบเป็นเวลานานจะทำให้ Interface ของ Precipitate ต่างๆ ภายในโครงสร้างมีความเป็น Coherent ลดลง

S. Shankar (2004) และคณะ ได้ศึกษาบทบาทของเหล็กในการตกผลึกของ Eutectic Silicon ใน Al-Si alloys ชนิด Hypoeutectic ได้อธิบายว่าลำดับการ Precipitation ในระหว่างการแข็งตัวของโลหะผสมเป็นดังนี้ Dendrite ของ Primary Al จะเริ่มเกิดขึ้นก่อนที่อุณหภูมิ Liquidus และ β (Al, Si, Fe) phase จะตกผลึกในบริเวณที่ยังเป็นแอ่งสารละลายอยู่และ หลังจากนั้น β (Al, Si, Fe) phase จะเป็นตัว Nucleant สำหรับการตกผลึกของ Eutectic Silicon ในลำดับถัดมาด้วยด้วย

Cameron M. Dinnis (2005) ได้กล่าวว่า Intermetallic แบบ β ซึ่งตามปกติปรากฏรูปร่างเป็นแผ่น(Plate-like) จะส่งผลในด้านลบต่อสมบัติทางกลของของชิ้นงานหล่อ Al-Si ส่วน Intermetallic แบบ α ซึ่งปกติปรากฏเป็นรูปตัวหนังสือจีน (Chinese Script) จะส่งผลในด้านบวกต่อสบบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ Al-Si และได้ทำการศึกษารูปร่าง 3 มิติของ Iron-Intermetallic Phase ในชิ้นงานหล่อ Al-Si Alloys โดยการตัด Section หลายๆแกนและได้สร้างแบบจำลอง 3 มิติของ Intermetallic แบบ β และ แบบ α ขึ้นมา

M.V.Kral (2005) ได้กล่าวเช่นกันว่า Intermetallic แบบ α รูปตัวหนังสือจีน (Chinese Script) จะส่งผลดีต่อสมบัติทางกลของชิ้นงานหล่อ Al-Si Alloys ในขณะที่ Intermetallic แบบ β ซึ่งมักเป็นรูปเข็ม (Needle) หรือแผ่น (Plate or Blocky) จะส่งผลเสียต่อสมบัติทางกลของชิ้นงาน ซึ่งได้ระบุว่า Intermetallic แต่ละแบบเกิดขึ้นได้จากหลากหลาย Compound และได้ศึกษาทดลองหา Crystallographic ของ Intermetallic แต่ละแบบ พบว่า Intermetallic แบบ α จะเป็นผลึกแบบ Cubic มากกว่าแบบ Hexagonal และ Intermetallic แบบ β จะเป็นผลึกแบบ Tetragonal มากกว่า Monoclinic หรือ Othorhombic