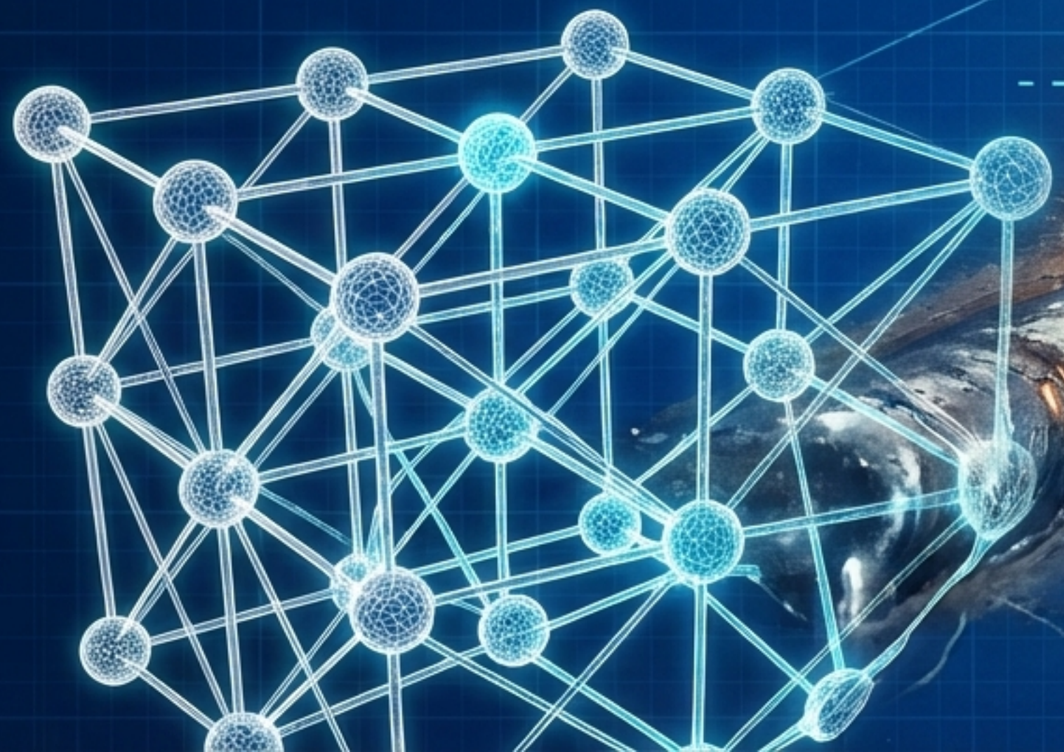
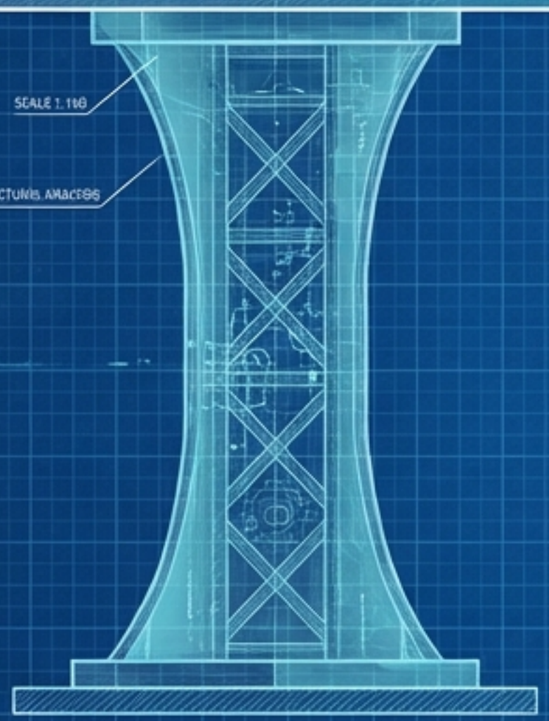
# โลหะวิทยาการเชื่อม:
# สถาปัตยกรรมของโลหะ

คู่มือฉบับสมบูรณ์ว่าด้วยความสัมพันธ์
ระหว่างโครงสร้าง สมบัติ และความร้อน

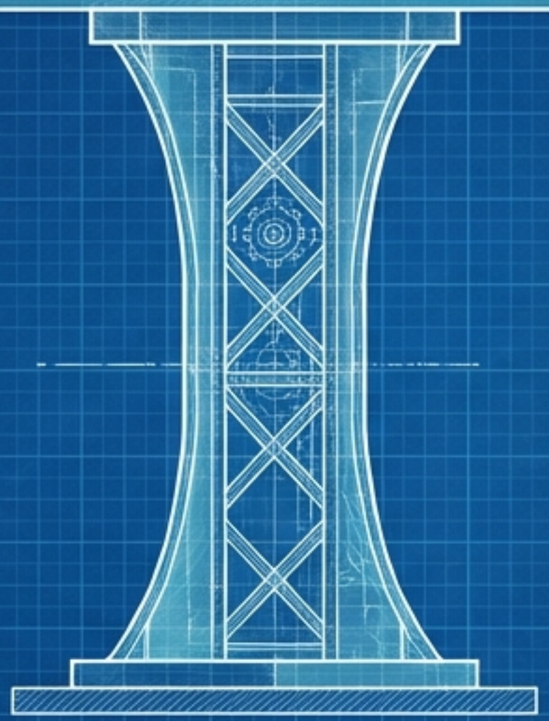


NotebookLM

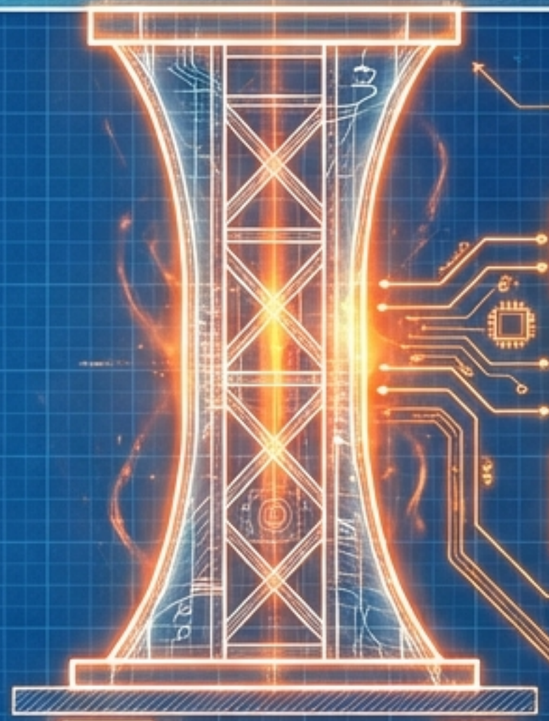
# จักรวาลของวัสดุศาสตร์และโลหะวิทยา



**โลหะวิทยาการแยกแร่ (Extractive)**
การสกัดโลหะออกจากแร่ธาตุ



**โลหะวิทยาเชิงกล (Mechanical)**
การขึ้นรูปและพฤติกรรมทางกล



**โลหะวิทยากายภาพ (Physical)**
ศึกษาอิทธิพลของ 'โครงสร้าง' ที่มีต่อ 'สมบัติ' ของโลหะ

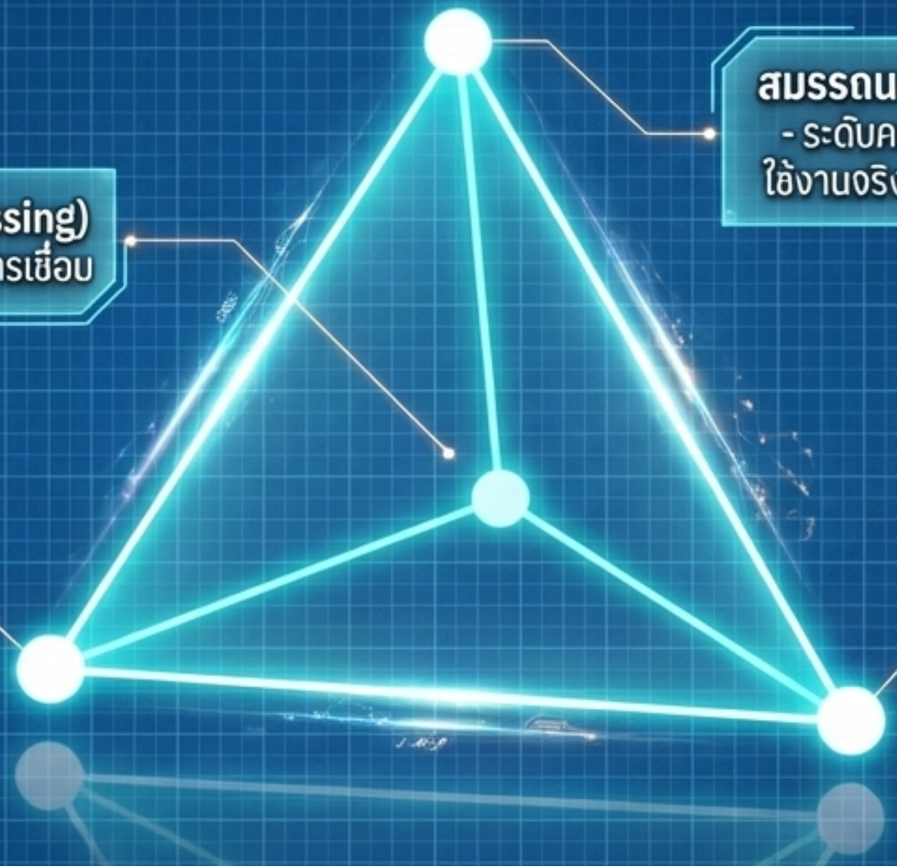
**โลหะวิทยาการเชื่อม (Welding Metallurgy)**
คือการศึกษาผลกระทบของกระบวนการเชื่อม (ความร้อน) ที่มีต่อ โครงสร้าง และ สมบัติ ของชิ้นงานอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้

MATERIAL SCIENCE DEPARTMENT

NotebookLM

# กระบวนทัศน์หลัก: ทรงสี่หน้าแห่งโลหะวิทยา

ภาพรวมกระบวนทัศน์



**สมรรถนะ (Performance)**
- ระดับความสามารถในการใช้งานจริงภายใต้สภาวะวิกฤต

**กระบวนการผลิต (Processing)**
- การสังเคราะห์, การขึ้นรูป, การเชื่อม

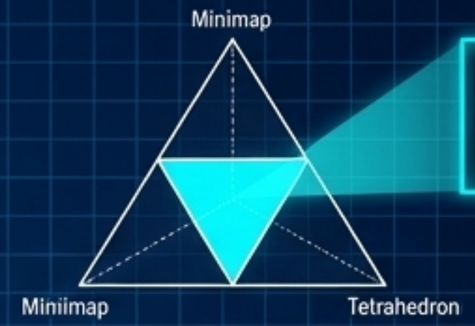
**โครงสร้าง (Structure)**
- อะตอม, ผลึก, โครงสร้างจุลภาค

**สมบัติ (Properties)**
- ทางกล, ทางกายภาพ, ทางเคมี

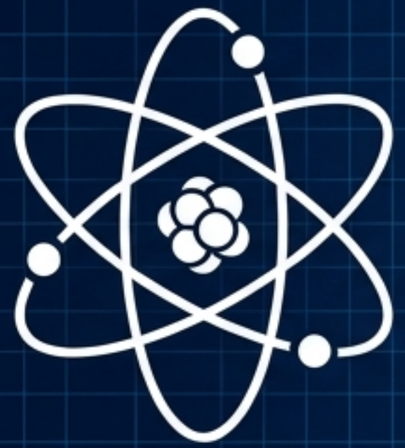
การเปลี่ยนแปลงที่โหนดใดโหนดหนึ่ง จะส่งผลกระทบลูกโซ่ต่อระบบทั้งหมด กระบวนการเชื่อมคือการป้อน ‘ความร้อน’ (Processing) ที่จะไปสลายและสร้าง ‘โครงสร้าง’ ใหม่ ซึ่งจะชี้ชะตา ‘สมรรถนะ’ ของชิ้นงาน

NotebookLM

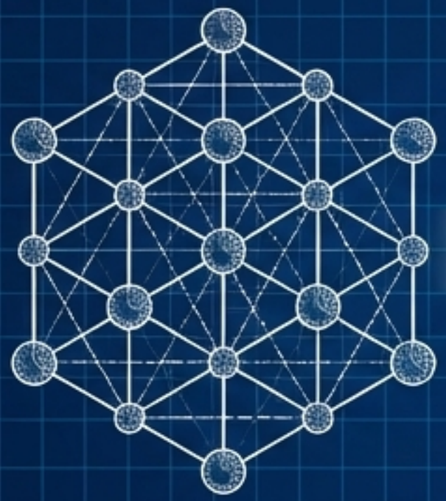
# โครงสร้าง (Structure): จากอะตอมสู่จักรกล




**โครงสร้าง (Structure)**
โครงสร้างของโลหะไม่ได้มีเพียงระดับเดียว สมบัติทางวิศวกรรมถูกกำหนดตั้งแต่ชนิดของพันธะ การเรียงตัวของผลึก (Crystal Structure) ไปจนถึงขนาดของเกรน (Grains) ในระดับจุลภาค

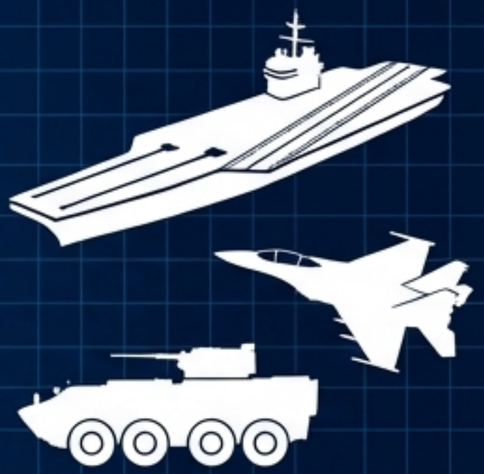


ระดับอะตอม
(พันธะ)



ระดับผลึก
(Crystal Lattices)

ระดับจุลภาค
(Microstructure)

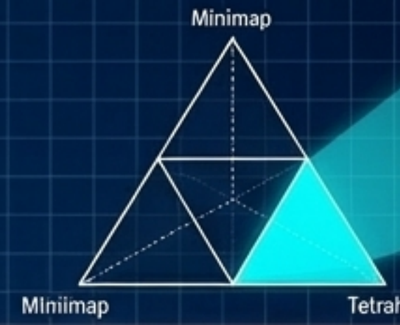


ระดับมหภาค
(Macro Objects)

โครงสร้างของโลหะไม่ได้มีเพียงระดับเดียว สมบัติทางวิศวกรรมถูกกำหนดตั้งแต่ชนิดของพันธะ
การเรียงตัวของผลึก (Crystal Structure) ไปจนถึงขนาดของเกรน (Grains) ในระดับจุลภาค

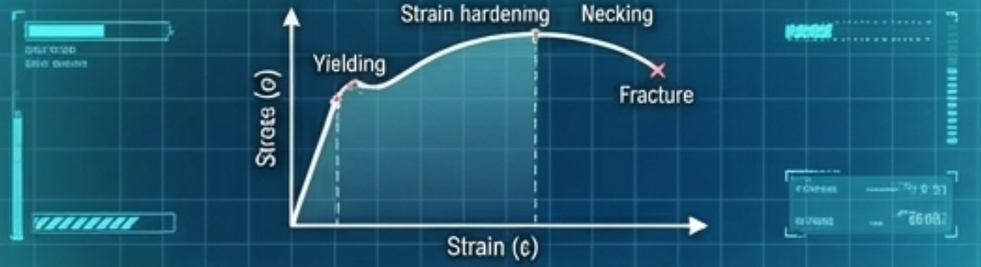
NotebookLM

# สมบัติ (Properties): ตัวชี้วัดความอยู่รอด




**สมบัติ (Properties)**
ใครสสาร ยอดโลกเขียวอิฐเพื่อระดับดีดวก
กาลเวลาตัดออกลึก (Crystal Sovcture)
โปรบโอนาดอนกรบ (Graina) ในยอดบุลภาก

## สมบัติทางกล (Mechanical)




Yield Strength, Ultimate Strength, Hardness, Toughness
- ตัวชี้วัดความแข็งแกร่งของโครงสร้าง

## สมบัติทางความร้อน (Thermal)

Melting point, Thermal conductivity, Thermal expansion
- ตัวแปรสำคัญที่กำหนดพฤติกรรมระหว่างการเชื่อม

## สมบัติทางไฟฟ้า (Electrical)

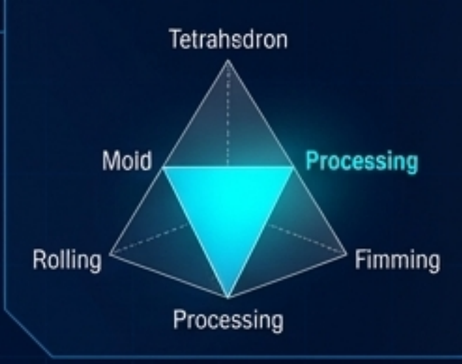
Electrical resistivity

## สมบัติทางสิ่งแวดล้อม (Eco & Environmental)

Corrosion rates, Energy to extract

NotebookLM

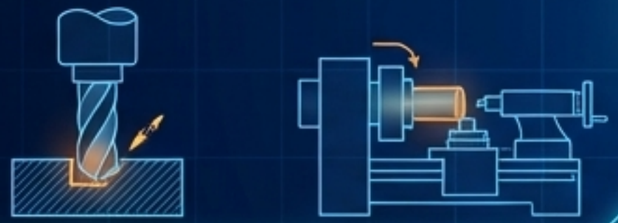
# กระบวนการผลิต (Processing): แผนที่จักรวาลการขึ้นรูป



การหล่อ (Casting)

การขึ้นรูป (Forming)

**Manufacturing**



การตัดปาด (Machining)

การต่อประสาน (Joining)

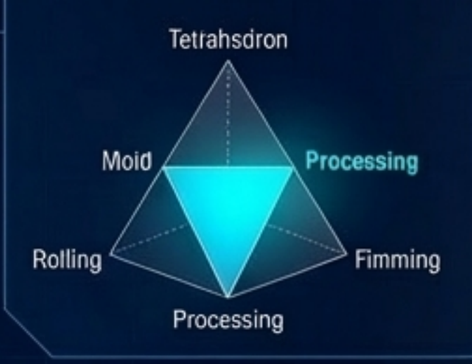
โลหะวิทยาการเชื่อม (Fusion Welding)

**Insight Box**

โลหะวิทยาการเชื่อม (Fusion Welding) ไม่ใช่แค่การประกอบชิ้นส่วน แต่คือกระบวนการหลอมรวมโลหะด้วยความร้อนสูง ซึ่งทำหน้าที่เสมือน “โรงหล่อขนาดจิ๋ว” ที่เคลื่อนที่ไปตามรอยต่อ

NotebookLM

# เส้นทางแห่งอุณหภูมิ (Heat Treatment Pathways)



Furnace Cool -> เพิร์ลไลต์หยาบ (Coarse Pearlite) เหนียวและอ่อนที่สุด

Air Cool -> เพิร์ลไลต์ละเอียด (Fine Pearlite)

Oil Quench/Mar-temper -> เบไนต์ (Bainite)

Water Quench -> มาร์เทนไซต์ (Martensite) แข็งแต่เปราะบางที่สุด

**‘อัตราการเย็นตัว’ (Cooling Rate) คือกุญแจสำคัญที่ล็อกโครงสร้างผลึกไว้**

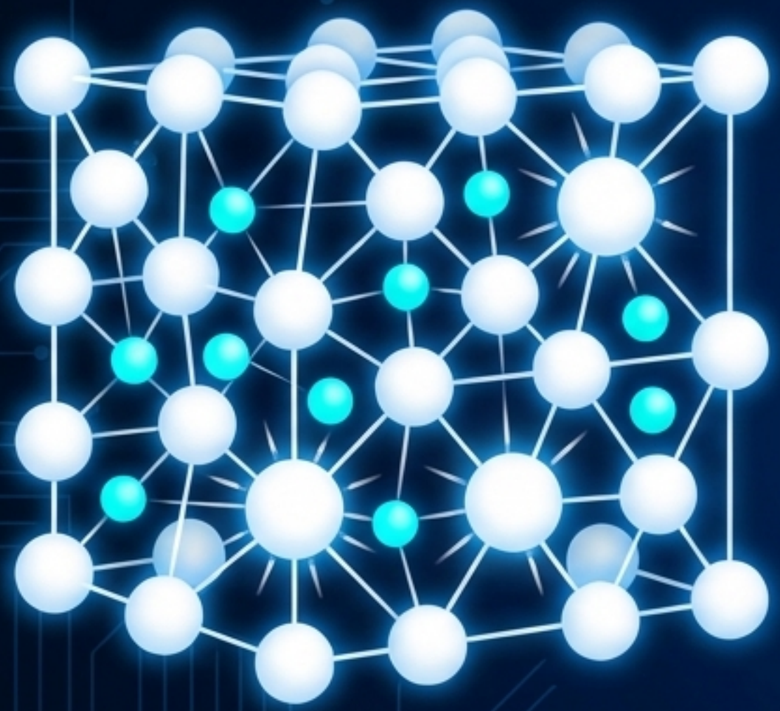
NotebookLM

# กลไกการเพิ่มความแข็งแรง (The Strengthening Matrix)

| กลไก (Mechanism) | วิธีการ (The Manipulator) | ปฏิกิริยาระดับจุลภาค (Micro-Reaction) |
|---|---|---|
| Solid Solution (การละลายของแข็ง) | เติมอะตอมธาตุอื่น (Alloying) | อะตอมแปลกปลอมขัดขวางการเลื่อนไถลของระนาบผลึก |
| Grain Refinement (การลดขนาดเกรน) | ควบคุมการเย็นตัวให้เกรนเล็ก | เพิ่มขอบเกรน (Grain Boundaries) เพื่อสกัดกั้นการเคลื่อนที่ของผลึก |
| Work Hardening (การขึ้นรูปเย็น) | รีดหรือบีบอัดที่อุณหภูมิห้อง | เกรนยืดตัวและเพิ่มความหนาแน่นของความบกพร่อง (Dislocations) |
| Precipitation Hardening (การตกตะกอน) | อบชุบและทิ้งไว้ให้เกิดตะกอน (Aging) | สร้างอนุภาคตะกอนขนาดจิ๋วเพื่อล็อกโครงสร้างหลัก |

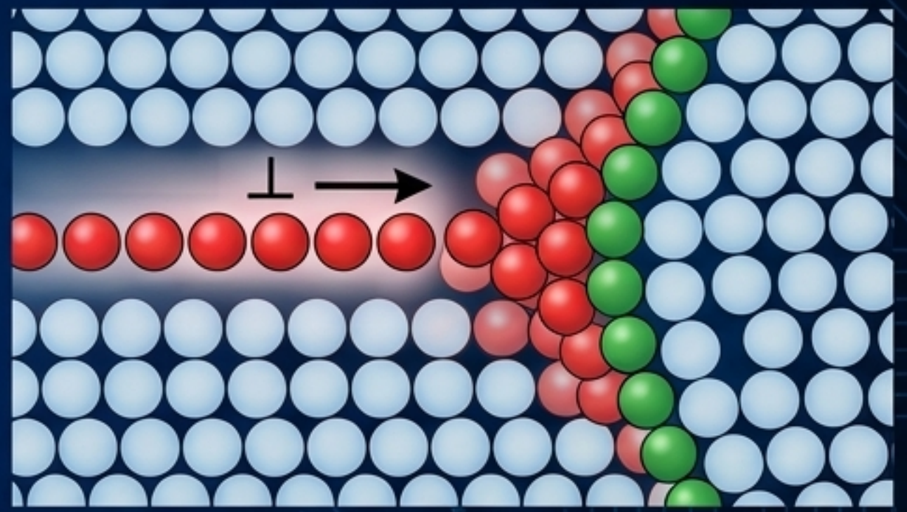
NotebookLM

# เจาะลึก: สกัดกั้นการเลื่อนไถลระดับอะตอม



**Solid Solution:** อะตอมผสมสร้างสนามความเค้น (Stress field) ภายในโครงสร้างผลึก ทำให้ความบกพร่องเคลื่อนที่ยากขึ้น

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{d^{1/2}}$$

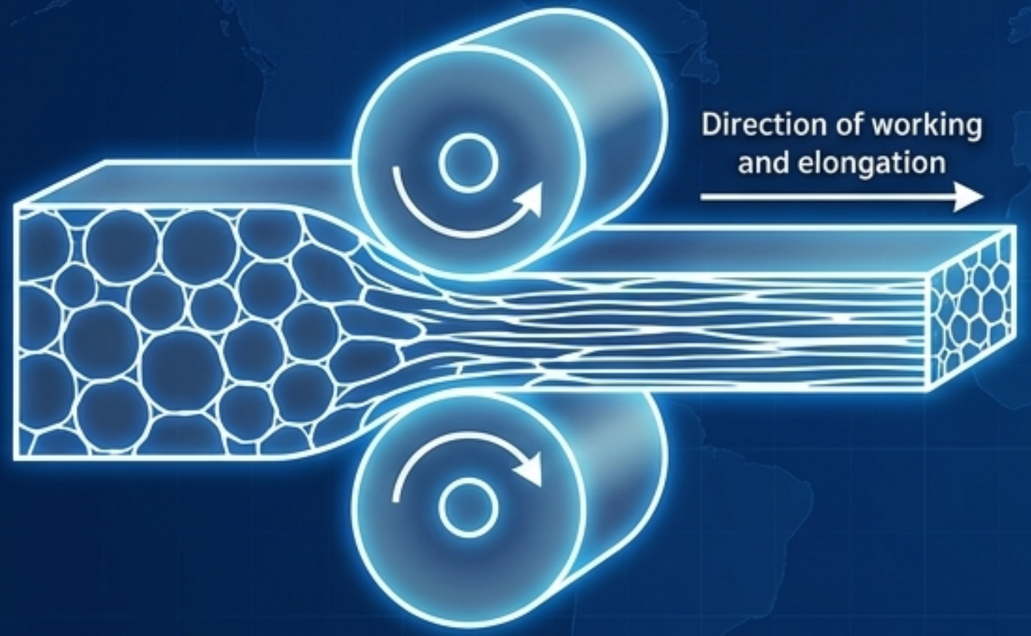


**Grain Refinement:** สมการ Hall-Petch พิสูจน์ว่าเกรนยิ่งเล็ก พื้นที่ “ขอบเกรน” ยิ่งมาก ซึ่งทำหน้าที่เสมือนกำแพงสกัดกั้นไม่ให้เกิดการเสียรูปพลาสติก

NotebookLM

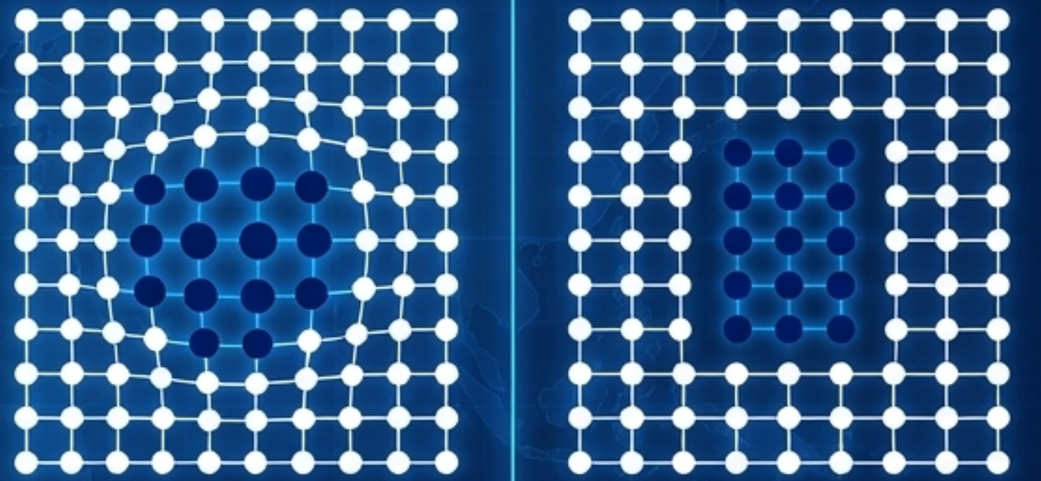
# เจาะลึก: แรงกดทับและการตกตะกอน

## Work Hardening




**Work Hardening:** การบีบอัดโลหะ (Plastic deformation) ทำให้เกรนยืดตัว ความเครียดสะสมตัวจนโครงสร้างล็อกเข้าด้วยกัน แข็งขึ้นแต่เปราะลงอย่างเห็นได้ชัด

## Precipitation Hardening



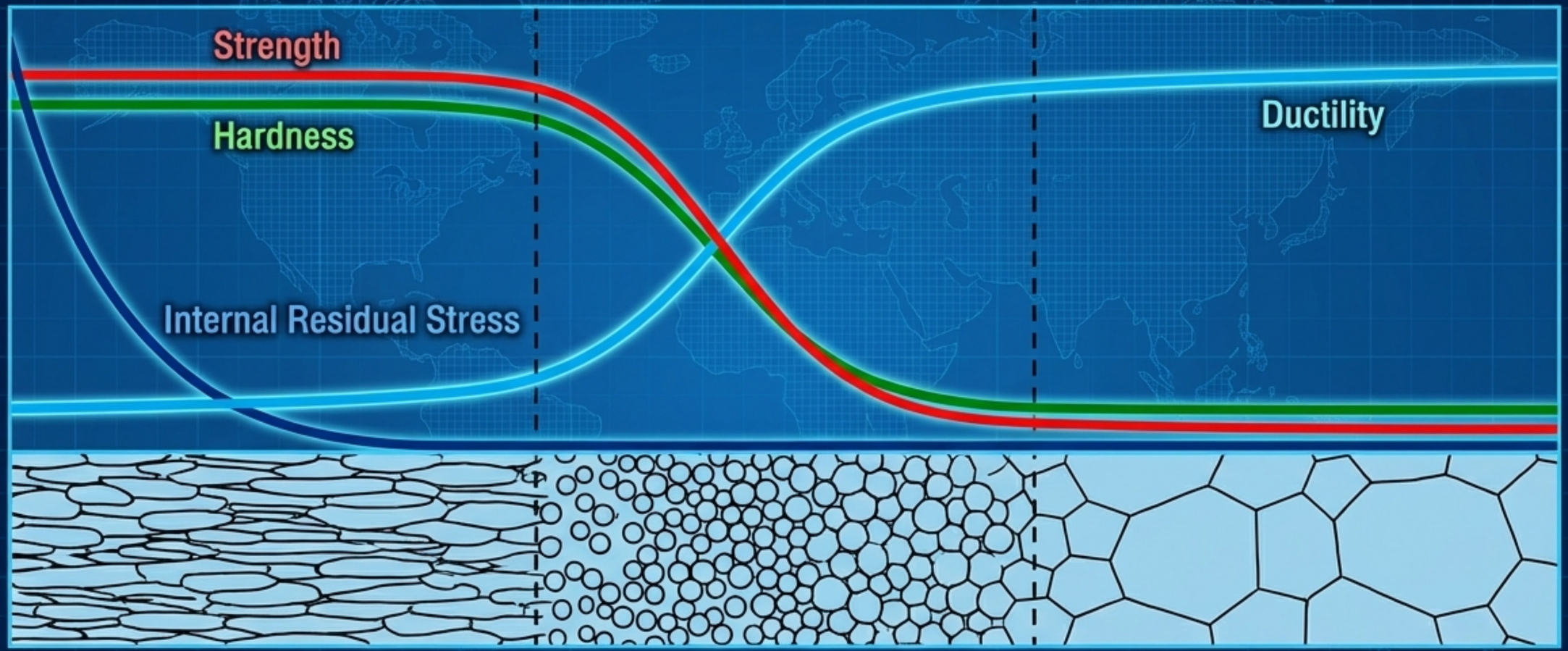
Coherent Precipitation

Non-Coherent Precipitation

**Precipitation Hardening:** การใช้กระบวนการทางความร้อนดึงให้ธาตุผสมตกตะกอน (Precipitates) ออกมาแทรกขัดขวางอยู่ในระนาบผลึกหลัก

NotebookLM

# ปรากฏการณ์คืนสภาพทางความร้อน (The Thermal Reset)



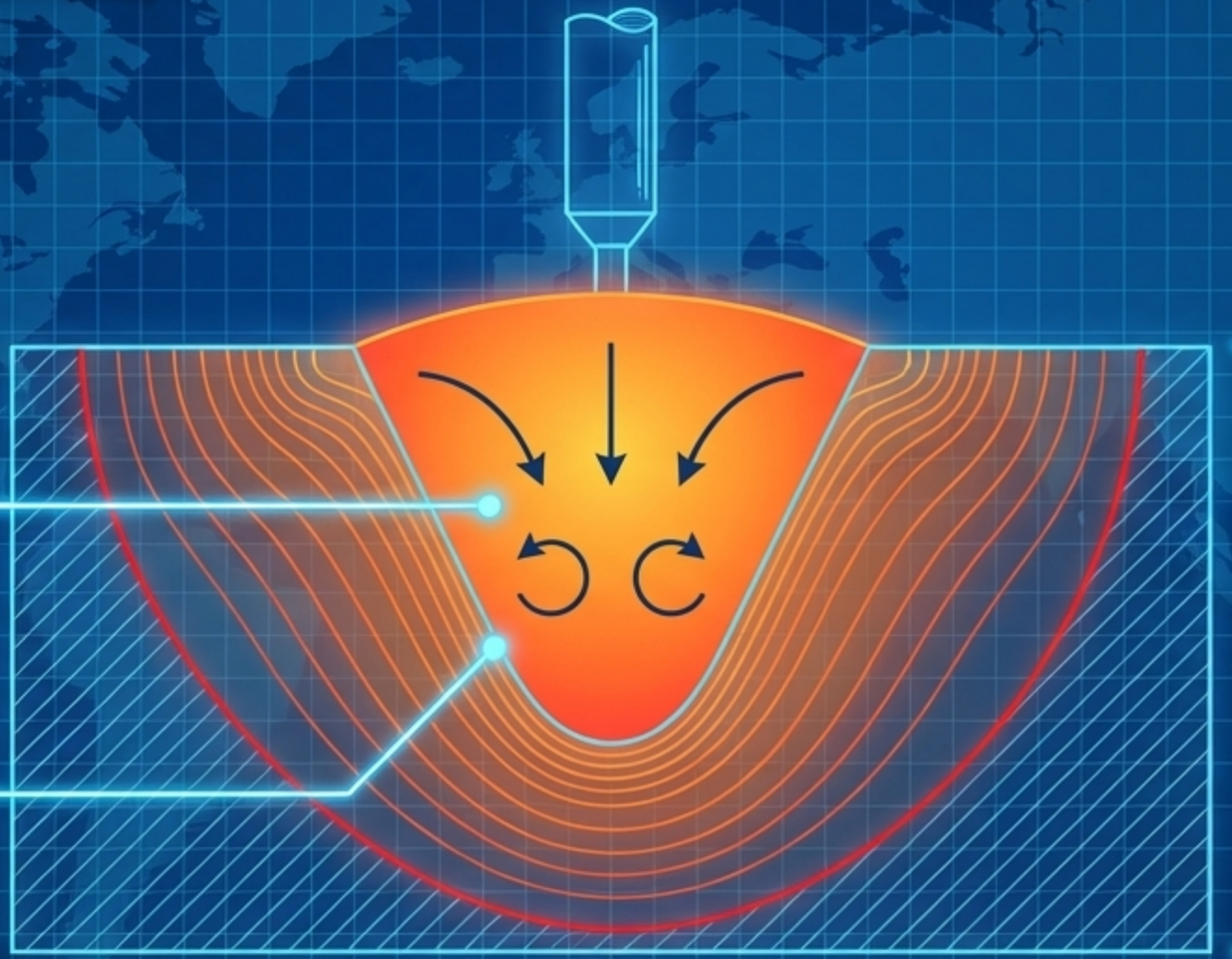

Zone 1: Recovery (การฟื้นตัว):
ความเค้นตกค้างลดลง
แต่ความแข็งแรงและโครงสร้างเกรนยังคงเดิม

Zone 2: Recrystallization
(การสร้างเกรนใหม่):
เกิดเกรนใหม่ที่ปราศจากความเครียด
ความแข็งแรงดิ่งลงฉับพลัน
ความเหนียวเพิ่มขึ้น (Critical phase)

Zone 3: Grain Growth
(การขยายตัวของเกรน):
เกรนใหม่กลืนกินกันเองจนมีขนาดใหญ่ขึ้น
ความแข็งแรงตกต่ำที่สุด

NotebookLM

# โครงสร้างรอยเชื่อมและบริเวณกระทบร้อน
# (The Heat-Affected Zone)



**Fusion Zone (บริเวณหลอมละลาย):** หลอมเหลวและแข็งตัวใหม่คล้ายงานหล่อ

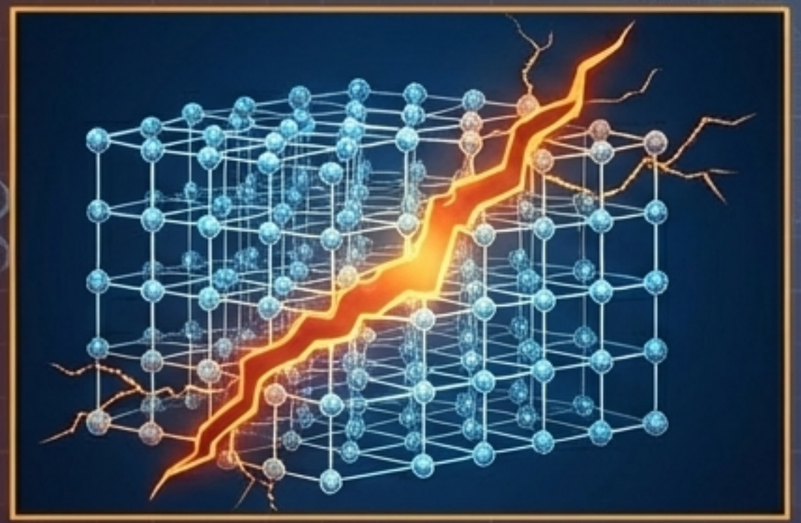
**Partially Melted Zone (บริเวณหลอมละลายบางส่วน):** จุดวิกฤตที่อาจเกิดรอยร้าว

**HAZ (บริเวณกระทบร้อน):** ไม่หลอมละลาย แต่รับความร้อนสูงพอที่จะเกิดการขยายตัวของเกรน (Grain Growth) ในจุดที่ติดรอยเชื่อม และการสร้างเกรนใหม่ (Recrystallization) ในจุดที่ห่างออกไป ทำให้บริเวณนี้มักเป็นจุดที่อ่อนแอที่สุดในโครงสร้าง

NotebookLM

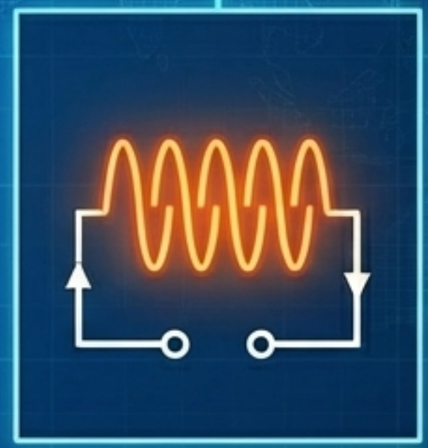
# การจัดการความเค้นตกค้าง (Stress Management & Preheating)

**The Threat:**
ความร้อนที่ไม่สม่ำเสมอทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (Residual Stresses) นำไปสู่ปัญหาใหญ่คือ การแตกร้าวจากไฮโดรเจน (Hydrogen-Induced Cracking) และ Stress Corrosion Cracking



**The Solution: การอุ่นชิ้นงาน (Preheating):**
การให้ความร้อนชิ้นงานล่วงหน้า ช่วยชะลอ “อัตราการเย็นตัว” ของบริเวณ HAZ ป้องกันไม่ให้โครงสร้างเปลี่ยนรูปเป็นมาร์เทนไซต์ (Martensite) ที่เปราะบางและเสี่ยงต่อการปริแตก

แผ่รังสี
(Radiant Heat)



ขดลวดไฟฟ้า
(Electric Resistance)

แก๊สเผา
(Gas Torch)

NotebookLM

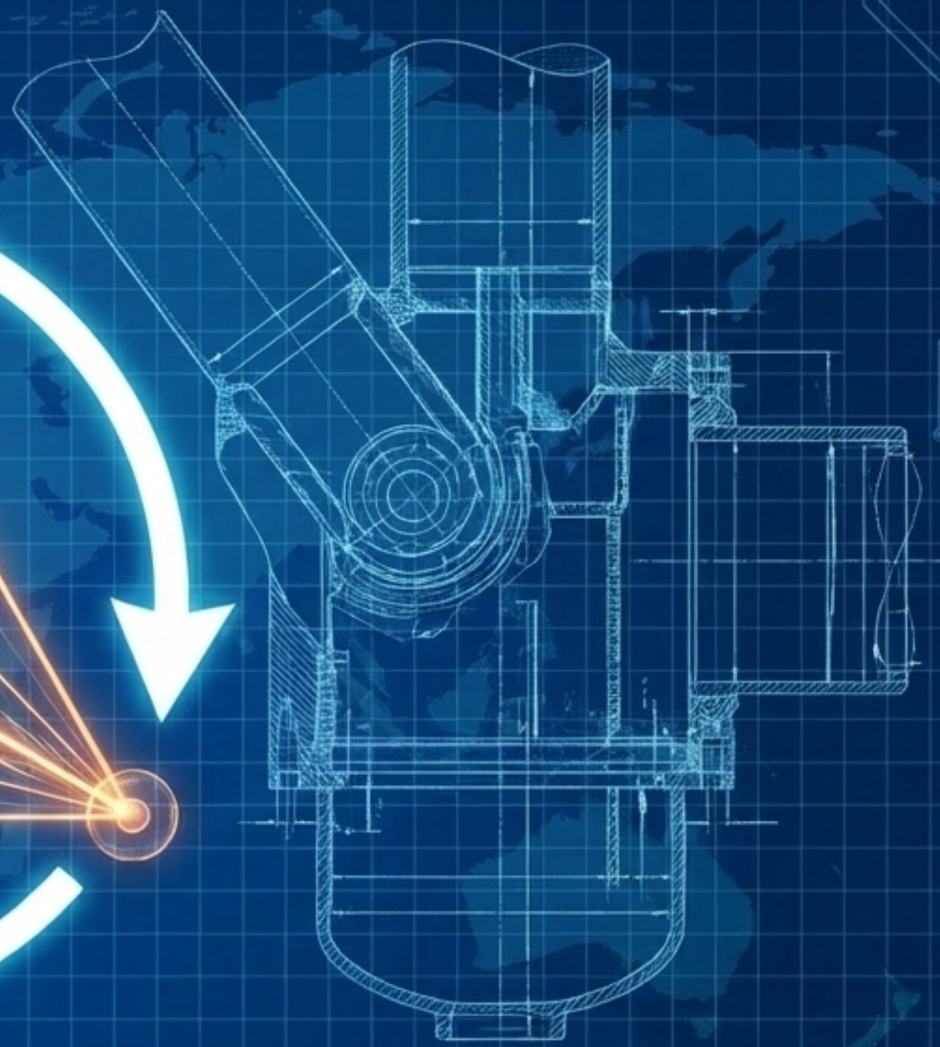
# บทสรุป: สถาปัตยกรรมแห่งรอยเชื่อม
## (Synthesis: The Architecture of a Weld)

เราใช้ความร้อนสูงใน
กระบวนการเชื่อม (Processing)...

...ซึ่งไปทำลายและจัดเรียง
โครงสร้างผลึก (Structure)
ใหม่ในบริเวณ HAZ...

...โครงสร้างใหม่นี้กำหนด
สมบัติทางกล (Properties)
เช่น ความแข็งและความเปราะ..

...ซึ่งในท้ายที่สุด จะเป็นตัวตัดสินว่า
สมรรถนะ (Performance) ของชิ้นส่วนนี้
จะอยู่รอดหรือล้มเหลวภายใต้แรงดันจริง



**โลหะวิทยาการเชื่อมไม่ใช่แค่ทักษะการหลอมโลหะ แต่คือการควบคุมพฤติกรรมของอะตอมด้วยความร้อน เพื่อค้ำจุนสถาปัตยกรรมของโลกใบนี้**

NotebookLM