

บทที่ 2 วรรณกรรมปริทัศน์

บทนี้จะนำเสนอข้อมูลที่ได้จากการทบทวนเอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับสมบัติเชิงกลของเซรามิก โครงสร้างจุลภาคและสมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต และเซรามิกเลด-แมกนีเซียมไนโอเบต ดังรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 สมบัติเชิงกลของเซรามิก

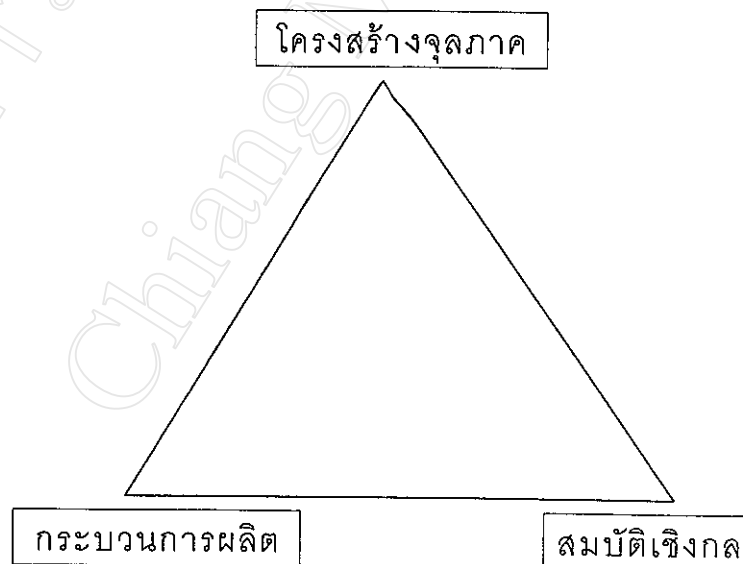
วัสดุที่มีอยู่ในปัจจุบันนั้นสามารถจัดแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆได้สี่กลุ่มดังนี้คือ กลุ่มโลหะ (metals) พอลิเมอร์ (polymers) เซรามิก (ceramics) และ วัสดุผสม (composites) [10] วัสดุแต่ละประเภทก็มีความเหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกันไป ตามสมบัติของวัสดุแต่ละประเภท ดังรายละเอียดแสดงในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 สมบัติเชิงกลของวัสดุประเภทต่างๆ [11]

สมบัติ	โลหะ	พอลิเมอร์	เซรามิก
ความหนาแน่น (density, g/cm ³)	2-20	1-2.5	1-14
ความสามารถในการยืดตัว (ductility or strain-to-fracture ratio, %)	4-40	2-4	<1
ความทนแรงดึง (tensile strength, MPa)	100-1,500	-	100-400
ความทนแรงอัด (compressive strength, MPa)	100-1,500	-	1,000-5,000
ความต้านทานต่อรอยแตก (fracture toughness, MPa.m ^{1/2})	10-30	2-8	1-10
พันธะ (bonding)	พันธะโลหะ	พันธะโคเวเลนต์	พันธะไอออนิก หรือ พันธะโคเวเลนต์

สำหรับวัสดุผสมนั้นจะเป็นการรวมเอาวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปมารวมกัน หรือเป็นการรวมวัสดุประเภทเดียวกันมาจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งเป็นการออกแบบวัสดุเพื่อนำเอาสมบัติที่ดีของวัสดุมารวมกัน และเมื่อมองถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุผสมนั้นจะมีค่าที่แตกต่างกันมากตามลักษณะของวัสดุผสมนั้นๆ โดยสมบัติเชิงกลนั้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของวัสดุที่เป็นเฟสหลัก (matrix phase) เป็นสำคัญ

การอธิบายเกี่ยวกับสมบัติเชิงกลของเซรามิกให้ง่ายแก่การที่จะทำความเข้าใจนั้นจะอธิบายถึงความแข็งแรงของเซรามิกในเทอมของปริมาณในหน่วย เมกะพาสคาล (MPa) สำหรับในกรณีของ ผลึกเดี่ยว (single crystal) นั้นมักจะสมารถทำนายสมบัติที่จะเกิดขึ้นได้ตามลักษณะของการจัดเรียงตัว เพราะผลึกเดี่ยวจะมีองค์ประกอบทางเคมีและการจัดเรียงตัวของผลึกที่แน่นอน แต่สำหรับเซรามิกส่วนใหญ่ในปัจจุบันโดยมากแล้วเป็นพวกผลึกเชิงซ้อน (polycrystalline) สมบัติเชิงกลที่ได้จะขึ้นอยู่กับปัจจัยในกระบวนการเตรียม ทำให้การทำนายสมบัติที่จะเกิดขึ้นนั้นเป็นไปได้ยาก อย่างไรก็ตามการศึกษาที่เกี่ยวกับกระบวนการเตรียมเซรามิก ผลิตภัณฑ์ขั้นกลาง (intermediate product) และ ผงวัสดุตั้งต้น (starting powder) ให้เข้าใจยิ่งขึ้นก็มีส่วนช่วยในการทำนายถึงสมบัติภายในเนื้อเซรามิก (intrinsic properties) ได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากเซรามิกมีองค์ประกอบที่หลากหลายแต่ก็ใช้การอธิบายสมบัติภายในเช่นเดียวกับผลึกเดี่ยวในลักษณะของ ควอนตัมฟิสิกส์ (quantum physics) [11]



รูป 2.1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง โครงสร้างจุลภาค กระบวนการผลิต และ สมบัติเชิงกล ของเซรามิก [11]

แผนภาพความสัมพันธ์ใน รูป 2.1 แสดงถึงกระบวนการผลิตเซรามิกโดยทั่วไปซึ่งจะเริ่มจากการนำผง (powder) มาผสมรวมกัน (batch) ให้มีสัดส่วนตามองค์ประกอบที่ต้องการ โดยวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้นจะต้องมีองค์ประกอบที่แน่นอนและมีความบริสุทธิ์สูง (highly pure) ผงที่นำมาใช้มักจะเป็นสารเฟสเดียว (single phase) ที่มีอนุภาคนาขนาดเล็ก และมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคที่ดี หลังจากผ่านกระบวนการขึ้นรูปแล้วซึ่งโดยมากจะเป็นการขึ้นรูปด้วยการอัด (pressing) จะได้ความหนาแน่นประมาณร้อยละ 50 ของค่าทางทฤษฎี และหลังจากนี้จะต้องใช้พลังงานอย่างมากในการทำให้วัสดุเกิดการแน่นตัว (densification) โดยการให้ความร้อนเพื่อให้เซรามิกเกิดการหดตัว ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญที่ต้องทำการควบคุมให้ดี เพื่อให้เซรามิกที่ได้นั้นมีขนาดใกล้เคียงกับที่ได้ออกแบบไว้สำหรับใช้งานจริงให้มากที่สุด โดยทั่วไปแล้วความหนาแน่นของเซรามิกที่ดีจะอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 96-98 จากค่าทางทฤษฎี ซึ่งการที่เซรามิกจะมีสมบัติเชิงกลที่ดีหรือไม่ส่วนหนึ่งก็เป็นผลมาจากความหนาแน่นที่ได้มาจากกระบวนการผลิตนี้ด้วย

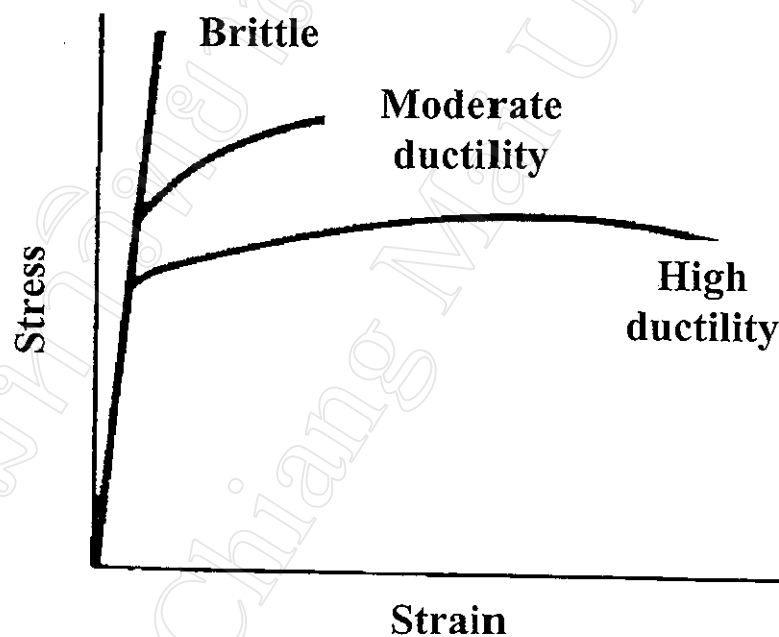
โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกที่เกิดขึ้นนั้น ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการเตรียมเซรามิก และเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เซรามิกที่ได้มีสมบัติเชิงกลที่ดีและเมื่อพิจารณาถึงลงไปจนถึงภายในเนื้อของเซรามิกทำให้สามารถแบ่งลักษณะเฉพาะทางโครงสร้างออกได้เป็นสองส่วนคือ ลักษณะเฉพาะที่เกิดจากความเป็นวัสดุนั้นๆเองซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะตัวที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้เช่นองค์ประกอบทางเคมี และลักษณะของเฟสที่เกิดขึ้น อีกส่วนหนึ่งคือลักษณะเฉพาะที่เกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการผลิตและจากแผนภาพในรูป 2.1 ที่แสดงให้เห็นว่าสมบัติเชิงกลนั้นนอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะเฉพาะตัวของสารนั้นๆแล้วยังขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เป็นผลมาจากกระบวนการผลิตอีกด้วยโดยจะต้องคำนึงถึง

- 1) ขนาด รูปร่าง และ การกระจายตัวของเกรน (grain size, shape and distribution)
- 2) ขนาด รูปร่าง และ การกระจายตัวของรูพรุน (pore size, shape and distribution)
- 3) การกระจายตัวของเฟส (phase distribution) และ
- 4) การจัดเรียงตัวและเนื้อโครงสร้าง (alignment and texture) ของแต่ละองค์ประกอบ

อาจกล่าวได้ว่าการที่เซรามิกจะแสดงสมบัติเชิงกลอย่างไรนั้นสามารถที่จะทำนายได้จากการใช้ข้อมูลเกี่ยวกับสมบัติที่เกิดขึ้นภายในเนื้อของสารและโครงสร้างจุลภาค ซึ่งเกิดจากกระบวนการผลิตเซรามิกเป็นสำคัญ สำหรับสมบัติเชิงกลของเซรามิกนั้นสามารถจัดแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ๆได้ดังนี้คือ

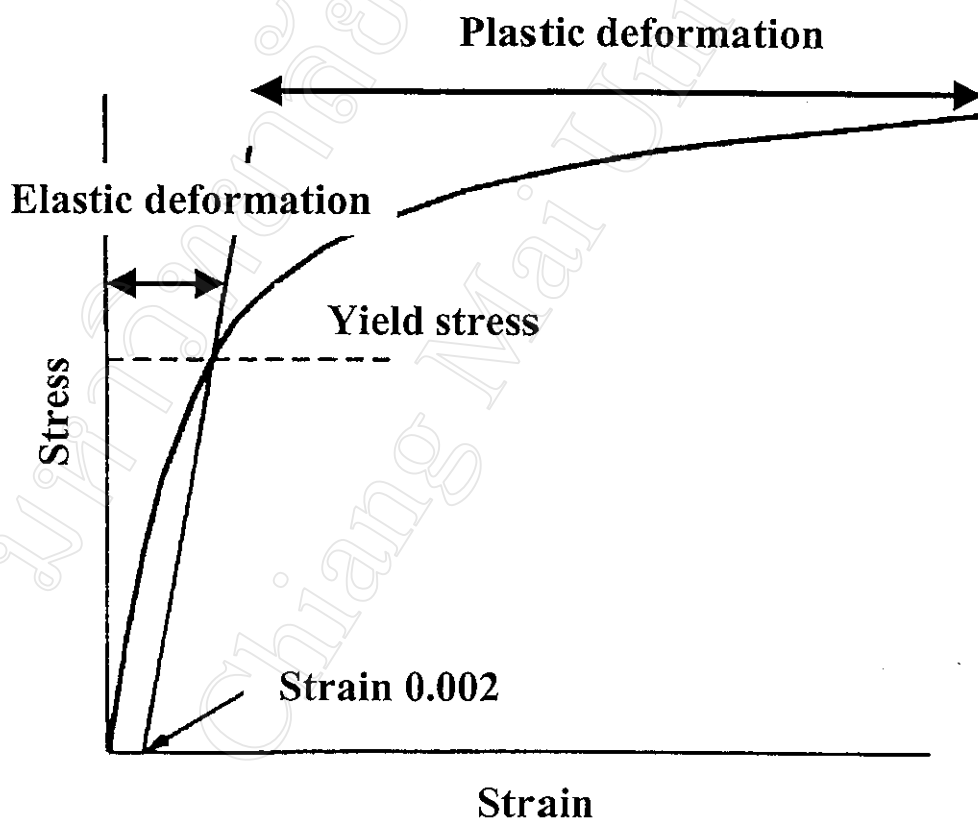
2.1.1 ความแข็งแรง (strength)

สมบัติเชิงกลในลักษณะนี้เป็นการบ่งบอกถึงพฤติกรรมของเซรามิกเมื่อได้รับแรงเชิงกลอย่างต่อเนื่อง (load) ในรูปแบบต่างๆ เช่น แรงกด (compressive) แรงดึง (tensile) แรงกระแทก (impact) และแรงเฉือน (shear) โดยแรงเชิงกลที่ให้แก่เซรามิกนั้นจะทำให้เซรามิกเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทำให้เกิดความเค้น (stress) ที่มีค่าเท่ากับอัตราส่วนของแรงที่ให้กับพื้นที่ที่ได้รับ (F/A) ความเค้นที่ให้นี้จะทำให้เซรามิกเกิดการเปลี่ยนแปลงความยาวหรือปริมาตรขึ้นตามทิศทางของแรงที่ได้รับส่งผลทำให้เกิดความเครียด (strain) ขึ้นภายในเซรามิกโดยจะมีค่าเท่ากับอัตราส่วนของขนาดชิ้นงานที่เปลี่ยนแปลงไปเทียบกับ ขนาดของชิ้นงานในตอนเริ่มต้นที่ยังไม่ได้รับแรง



รูป 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดในวัสดุที่มีพฤติกรรมของสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกัน [12]

ความยืดหยุ่น (elastic) และความเปราะ (brittle) เป็นพฤติกรรมเชิงกลที่สำคัญอย่างหนึ่งของเซรามิกเมื่อได้รับแรงที่แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเปลี่ยนรูป (deformation) ของเซรามิก โดยเซรามิกที่มีความสามารถในการเปลี่ยนรูปที่ดี จะมีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดที่มีความชัน (slope) น้อยกว่าเซรามิกที่เปราะและในช่วงแรกนี้การเปลี่ยนแปลงของความเค้นกับความเครียดจะมีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นซึ่งจะเป็นไปตามกฎของฮุก (Hook's law) [13] และยังพบอีกว่าเซรามิกสามารถคืนรูปได้อย่างสมบูรณ์ในช่วงนี้ ส่วนเซรามิกบางชนิดที่มีพฤติกรรมของความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดไม่เป็นแบบเชิงเส้น แต่ยังสามารถคืนรูปอย่างสมบูรณ์สามารถแสดงได้ดังกราฟรูป 2.3

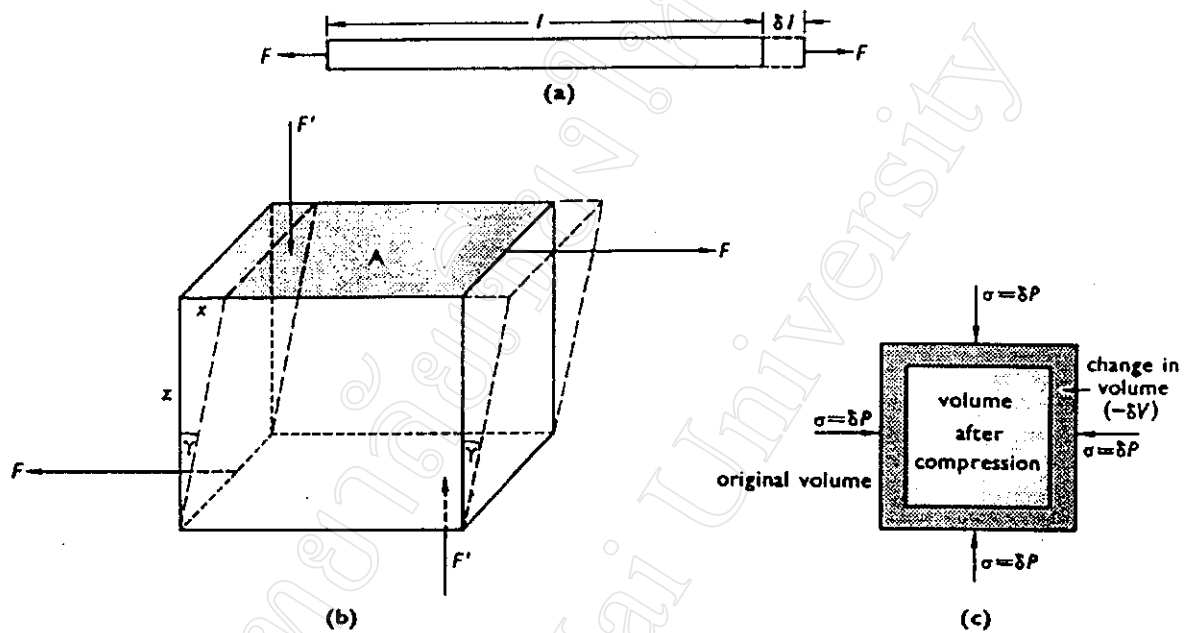


รูป 2.3 กราฟแสดงพฤติกรรมเชิงกลของเซรามิกในช่วงที่มีการยืดหยุ่น [14]

จากกราฟ 2.3 จะเห็นได้ว่าขนาดของแรงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการก่อให้เกิดพฤติกรรมเช่นนี้ในเซรามิกและสิ่งที่ต้องให้ความสำคัญต่อมาก็คือระยะเวลาที่วัสดุได้รับแรง ยิ่งถ้ามีการให้แรงแก่เซรามิกด้วยอัตราเร็วที่สูงจะทำให้เกิดพฤติกรรมที่มีลักษณะเป็นแบบแรงกระแทก (impact) โดยแรงเค้นที่ให้จะไปทำให้ขนาดของเซรามิกเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้เกิดมีความเครียดขึ้นภายในเนื้อเซรามิกสูงมากขึ้นภายในช่วงเวลาสั้นๆ เป็นผลทำให้เซรามิกสามารถรับแรงได้น้อยลงกว่าในกรณีที่มีการให้แรงค่อยๆ อย่างช้าๆ เมื่อทำการให้แรงเค้นแก่เซรามิกต่อไปอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราการเพิ่มขึ้นของแรงที่เหมาะสมเซรามิกจะมีจุดสุดท้ายที่สามารถคืนตัวได้อย่างสมบูรณ์อยู่ที่บริเวณ จุดคราก (yield stress) โดยหลังจากจุดนี้ไปแล้วเซรามิกจะเข้าสู่ช่วงของการยืดตัวแบบพลาสติก (plastic deformation) ซึ่งเป็นช่วงที่สั้นมากเมื่อเทียบกับวัสดุกลุ่มอื่นๆ ทำให้เซรามิกดูเหมือนมีลักษณะที่เปราะ (brittle) นั่นเอง

แต่ถ้าให้แรงสูงขึ้นไปอีกเซรามิกจะสามารถรับแรงได้สูงสุดจนถึงจุดหนึ่งที่เรียกว่าจุดแตกหัก (breaking point) โดยปกติแล้วการนำเซรามิกไปใช้งานทางด้านเชิงกลนั้นมักจะใช้งานไม่เกินช่วงการยืดตัว ตามค่าร้อยละของความเค้นที่จุดครากโดยมีการป้องกันการใช้ตามแต่ชนิดของเซรามิกและลักษณะของงานที่ใช้ซึ่งเซรามิกบางชนิดอาจนำไปใช้งานได้สูงถึงร้อยละ 90 ของความเค้นที่จุดคราก แต่บางชนิดก็อาจใช้ได้ไม่เกินร้อยละ 50 เท่านั้น

ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียดของเซรามิกนั้นจะบ่งบอกถึง ความแข็งแรงของวัสดุในรูปของ มอดูลัสของความยืดหยุ่น (moduli of elasticity) (รูป 2.4) ซึ่งหมายถึงค่าอัตราส่วนระหว่างความเค้นกับความเครียด และในกรณีที่มีการพล็อตความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นตามกฎของฮุกจะทำให้สามารถหาค่านี้ได้จากค่าความชันของกราฟซึ่งเป็นค่าคงที่และสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิดตามลักษณะของแรงที่ให้และความเครียดที่เกิดขึ้นดังนี้



รูป 2.4 ลักษณะการทดสอบสมบัติของความยืดหยุ่น [13]

เมื่อ (a) คือความยืดหยุ่นเชิงเส้น (b) คือความยืดหยุ่นเฉือน และ (c) คือความยืดหยุ่นเชิงปริมาตร

ค่าสมบัติของความยืดหยุ่น

- 1) โมดูลัสของยัง (Young's modulus, E)

E = ความเค้น/ความเครียดเชิงเส้น

$$= \sigma / \epsilon$$

$$= (F / A) / (\Delta l / l)$$

(2.1)

- 2) โมดูลัสเฉือน (shear modulus, G)

G = ความเค้นเฉือน/ความเครียดเฉือน

$$= \tau / \gamma$$

$$= (F / A) / \gamma$$

(2.2)

3) มอดุลัสเชิงปริมาตร (bulk modulus, K)

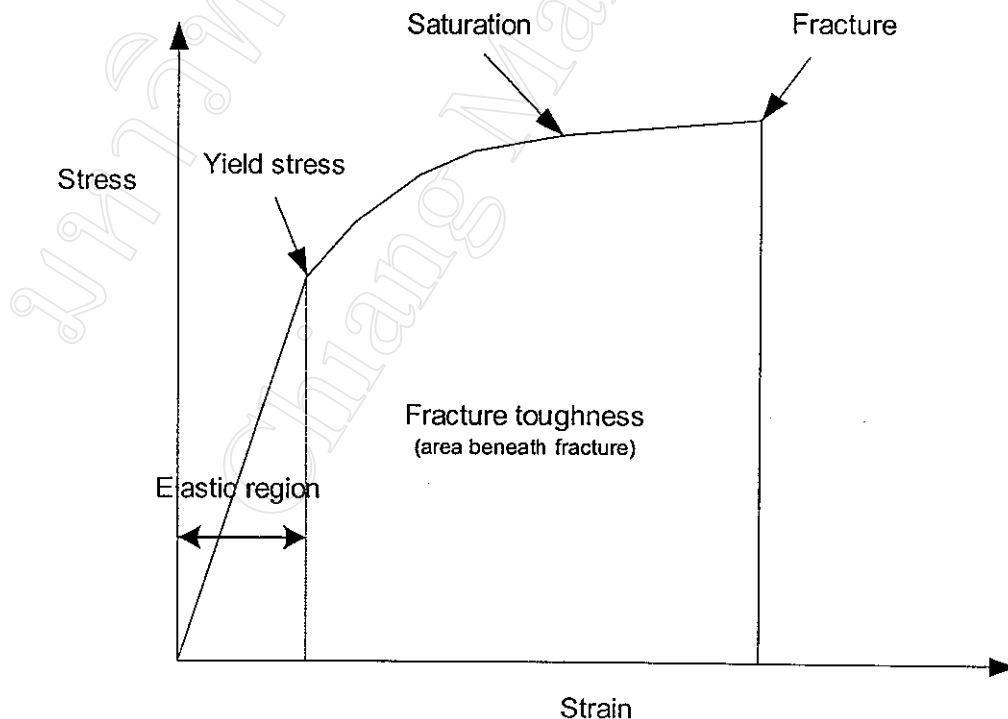
K = ความเค้น/ความเครียดรวม

$$= \sigma / \theta$$

$$= \delta P / (\delta V / V) \quad (2.3)$$

เมื่อ δV คือปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง และ δP คือความดันที่เปลี่ยนแปลง เมื่อความดันมีค่าสูงขึ้น ปริมาตรจะลดลง ค่าทั้ง 3 นี้เป็นการแสดงสมบัติเชิงกลภายใต้แรงกระทำที่มีลักษณะต่าง ๆ กันแต่ค่าที่ได้นั้นจะแสดงในหน่วยเหมือนกันคือ นิวตันต่อตารางเมตร

นอกจากจะได้ค่ามอดุลัสของความยืดหยุ่นจาก กราฟแสดงพฤติกรรมความเค้นกับความเครียดแล้วยังสามารถหาค่าความต้านทานต่อรอยแตก (fracture toughness, K_{Ic}) ได้จากกราฟนี้เช่นเดียวกัน โดยหาค่าได้จากพื้นที่ใต้ กราฟระหว่างความเค้นกับความเครียด ตั้งแต่จุดเริ่มต้นไปจนถึงจุดแตกหัก ดังแสดงในรูป 2.5



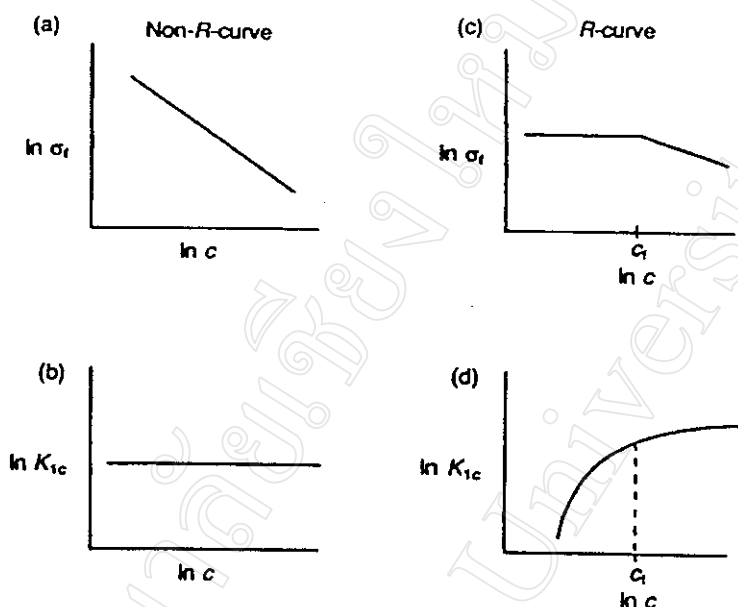
รูป 2.5 ค่าความต้านทานต่อรอยแตกจากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นกับความเครียด [14]

สำหรับเซรามิกแล้วจะมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับวัสดุประเภทอื่น โดยสามารถสังเกตได้จากกราฟแสดงพฤติกรรมความเค้นกับความเครียดของเซรามิกซึ่งจะมีความชันสูง และมีช่วงของการยืดหยุ่นแบบไม่คืนตัว (plastic deformation) ที่สั้นทำให้พื้นที่ใต้กราฟมีค่าน้อยส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อรอยแตกมีค่าน้อยตามไปด้วยและสามารถนำมาคำนวณหาค่าความต้านทานต่อรอยแตกในรูปของค่า K_{Ic} ได้โดยใช้สมการ (2.4)

$$K_{Ic} = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.4)$$

- เมื่อ K_{Ic} คือ ค่าความต้านทานต่อรอยแตก
 Y คือ ตัวแปรที่ขึ้นกับขนาด
 σ คือ ความเค้นที่ให้แก่เซรามิก และ
 a คือ ลักษณะเฉพาะของรอยแตกที่เกิดขึ้นในเซรามิก

โดยปกติเซรามิกนั้นจะมีค่า K_{Ic} ประมาณ $3 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ และสำหรับโลหะนั้นจะมีค่าประมาณ $15 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ [10] การแสดงค่าความต้านทานต่อรอยแตกนั้นมักจะใช้กับวัสดุที่มีพฤติกรรมของความเปราะเพราะถ้าหากทำการทดลองหาค่านี้กับวัสดุที่มีช่วงของการยืดตัวที่ยาวมาก เช่น พลาสติก ยาง หรือ โลหะบางชนิดจะทำให้เกิดการแตกหักได้ยาก หลักการโดยทั่วไปที่จะให้เซรามิกผลึกเชิงซ้อนมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกที่สูงนั้นในกระบวนการผลิตจะต้องทำให้เซรามิกมีรอยแตกภายในน้อยที่สุด หรือแทบจะไม่มีเลยซึ่งสามารถทำได้โดยการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม การใช้ผงวัตถุดิบที่มีความบริสุทธิ์สูงหรือการเผาซ้ำหลายๆครั้ง อย่างไรก็ตาม การที่จะกำจัดรอยแตกที่เกิดขึ้นในเนื้อเซรามิกให้ได้นั้นต้องให้ความสำคัญกับการออกแบบเซรามิกในรูปแบบที่จะเป็นไปได้อย่างดี และแนวคิดเกี่ยวกับความแข็งแรงของเซรามิกที่ขึ้นกับขนาดของรอยแตกนั้นเรียกว่า พฤติกรรมของความต้านทานต่อรอยแตก (Resistant (R)-curve) ที่สืบเนื่องมาจากกระบวนการผลิตดังนั้นการที่จะทำให้เซรามิกมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกสูงจึงต้องอาศัยวิธีการสร้างเซรามิกให้มีโครงสร้างเป็นแบบผสมผสานของเฟสต่างๆ (multiphase or heterogeneous) เข้ามาช่วย



รูป 2.6 พฤติกรรมของกราฟความต้านทานของเซรามิก [11]

จากกราฟจะเห็นได้ว่าเซรามิกโดยทั่วไป (รูป 2.6 (a) และ 2.6 (b)) จะมีพฤติกรรมของสมบัติเชิงกลที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง แรงเค้นที่ให้แก่เซรามิก (σ_f) หรือ ค่าความต้านทานต่อรอยแยก (K_{Ic}) กับ ความยาวของรอยแยก (C) เป็นแบบเชิงเส้นโดยค่าความต้านทานต่อรอยแยกจะมีค่าคงที่ ส่วนเซรามิกที่มีหลายเฟสนั้นจะมีพฤติกรรมของความต้านทานดังรูป 2.6 (c) และ 2.6 (d) โดยเมื่อให้แรงกระทำแก่เซรามิกเพื่อให้เกิดรอยแยกกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแยกกับความยาวของรอยแยกที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นเส้นโค้ง ค่าความต้านทานต่อรอยแยกจะแปรผันตามความยาวของรอยแยกแต่จะมีอยู่จุดหนึ่งคือที่ จุด C_f ที่กราฟความสัมพันธ์จะเริ่มมีลักษณะเป็นเส้นตรง แนวความคิดนี้นำไปสู่การออกแบบวัสดุผสมที่เซรามิกเป็นเมทริกซ์ (ceramic matrix composites, CMCs) เนื่องจากการเติบโตของรอยแยก (crack propagation) ในเซรามิกนั้นมักจะมีการเติบโตตามขอบเกรน ในเซรามิกดังนั้นเซรามิกโดยทั่วไปจึงมีลักษณะโครงสร้างจุลภาคที่เป็นลักษณะของเกรนหลายๆเกรนอัดแน่นรวมกันทำให้เกิดขอบเกรนมากมายและมีลักษณะเป็นเส้นที่ต่อเนื่อง การนำเฟสที่เป็นเส้นใยมาเติมลงไปในเรื่องของเซรามิกนั้นก็เป็นวิธีหนึ่งที่สามารถช่วยขัดขวางการเติบโตของรอยแยกและทำให้เซรามิกมีค่าความต้านทานต่อรอยแยกสูงขึ้นได้

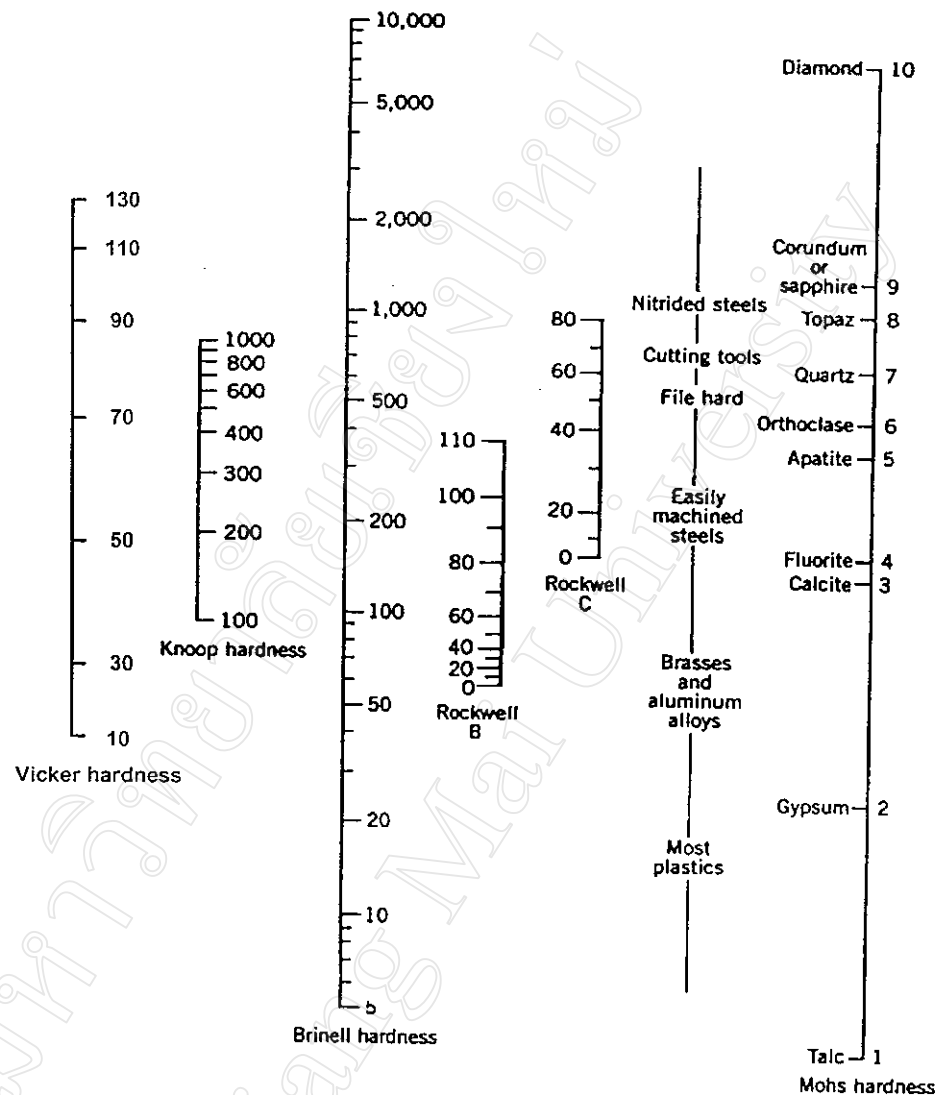
ที่ได้กล่าวมานี้เป็นการพิจารณาความแข็งแรงของเซรามิกจากพฤติกรรมเชิงกล ที่มีผลมาจากการเปลี่ยนแปลงขนาดเมื่อได้รับแรงเชิงกล แต่การแสดงผลพฤติกรรมนี้ของเซรามิกนั้นแรงเชิงกลที่ทำให้จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดที่น้อยมากและมีความเปราะ จึงมีความจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่มีความละเอียดและแม่นยำสูงในการวัดขนาดที่เปลี่ยนแปลงไปของเซรามิก ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาความแข็งแรงของเซรามิกในอีกรูปหนึ่งคือการวัดค่าความแข็ง

2.1.2 ความแข็ง (hardness)

ความแข็งเป็นสมบัติเชิงกลที่บ่งบอกถึง ความสามารถในการต้านทานต่อการขีดข่วนที่บริเวณผิวของเซรามิก โดยเซรามิกที่มีค่าความแข็ง (hardness) สูงจะสามารถทนทานต่อการเกิดร่องรอยจากการขีดข่วนในการใช้งานต่างๆ ได้ดี การวัดค่าที่แสดงให้เห็นถึงสมบัติด้านความแข็งนั้นสามารถทำได้ง่ายกว่าในทางปฏิบัติเมื่อเปรียบเทียบกับ การหาค่าความแข็งแรง และค่าที่ได้สามารถนำไปหาค่าสมบัติเชิงกลอื่นๆ ได้คล้ายๆ กับที่ได้จากการวัดค่าความแข็งแรง และเมื่อกล่าวถึงการวัดค่าความแข็งแล้วสามารถแยกออกได้ตามลักษณะของรูปแบบการวัดได้ 2 แบบคือ

- 1) ค่าความแข็งเชิงเปรียบเทียบ เป็นการพยายามหาวิธีบ่งบอกความแข็งของวัสดุโดยในยุคแรกๆ นั้นค่าความแข็งที่ได้จะอยู่ในหน่วยสเกลของ Mohs วิธีการนี้เป็นการเปรียบเทียบค่าความแข็งของวัสดุที่วัดโดยแบ่งออกเป็น 10 ระดับให้วัสดุที่มีความแข็งน้อยที่สุดอยู่ในระดับต่ำที่สุด คือ ทาลค์ (talc มีค่าความแข็งเป็น 1) และเซรามิกที่มีความแข็งสูงขึ้นไปอยู่ในระดับสเกลที่สูงขึ้นมาจนกระทั่งถึงเพชร (diamond) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีความแข็งสูงสุด (เท่ากับ 10) วิธีการหาค่าความแข็งของวัสดุสามารถทำได้โดยการนำวัสดุที่ต้องการวัดค่าความแข็งมาทำให้เกิดรอยขีดด้วยการใช้วัสดุที่มี ค่าความแข็งที่แน่นอน โดยเริ่มจากระดับต่ำขึ้นมาแล้วจึงเทียบว่าวัสดุที่นำมาหาค่านั้นมีค่าความแข็งของวัสดุอยู่ในระดับใด ค่าความแข็งที่วัดโดยวิธีนี้เป็นเพียงค่าที่แสดงให้เห็นถึงระดับของความแข็งแต่ไม่สามารถนำไปใช้ในการคำนวณหาค่าอย่างอื่นได้เนื่องจากมีความไม่แน่นอนและนอกจากนี้ยังเป็นค่าที่ไม่มีหน่วย

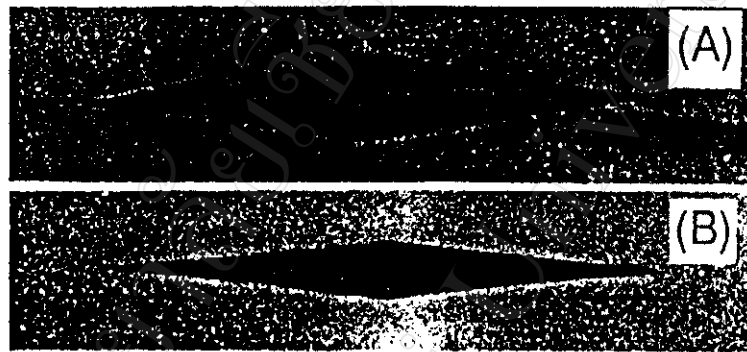
2) ความแข็งที่ได้จากการวัดด้วยการกด เป็นการพัฒนาการวัดค่าความแข็งของวัสดุ เพื่อให้เป็นมาตรฐาน และแสดงถึงสมบัติเชิงกลของวัสดุ การวัดค่าความแข็งลักษณะนี้มีอยู่หลายวิธีแต่อยู่บนหลัก การพื้นฐานเดียวกันคือ อาศัยการหาค่าความแข็งโดยใช้วิธีการกด (indentation) หลักการก็คือเมื่อกด วัตถุที่มีปลายขนาดเล็กใดๆลงบนผิวของวัสดุที่ต้องการวัดค่าความแข็งด้วยน้ำหนักกดที่มีค่าคงที่แล้ว เมื่อนำมาตรวจสอบลักษณะของรอยกดที่เกิดขึ้น ไม่ว่าจะตรวจสอบความกว้างหรือความลึกที่เกิดขึ้นใน วัสดุที่มีความแข็งต่ำจะใหญ่และลึกกว่ารอยที่เกิดขึ้นในวัสดุที่มีความแข็งสูง แต่วิธีการนี้ก็ใช้ได้กับเฉพาะ วัสดุที่มีความเปราะพอสมควร เช่น พวกเซรามิกและโลหะ เพราะถ้าใช้กับวัสดุที่มีความเหนียวสูง เช่น พวกพอลิเมอร์หรือยาง วัสดุเมื่อถูกกด ก็เกิดการยุบตัวและเมื่อคายแรงออกก็จะสามารถกลับคืนสู่ สภาพเดิมได้โดยรอยที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็กกว่าความเป็นจริง ซึ่งลักษณะของหัวกดนั้นในการทดสอบ แบบ บริเนล (Brinell test, HB) จะมีลักษณะเป็นทรงกลมที่มีขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 10 มิลลิเมตร ทำมาจากโลหะผสม (steel) หรือ ทังสเตนคาร์ไบด์ (tungsten carbide) ส่วนในการทดสอบ แบบร็อคเวล (Rockwell test, HRc and HRb) จะเป็นหัวกดเพชรรูปทรงกรวย (diamond cone, c) หรือ ลูกเหล็กทรงกลมขนาดต่างๆกัน (ball, b) และสำหรับวิธีการที่นิยมใช้ในการตรวจสอบค่าความแข็งของ เซรามิกกันมากก็คือ แบบวิกเกอร์ (Vickers test, HV) ที่มีการใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมจัตุรัส และ แบบนูป (Knoop test, HK) ที่มีการใช้หัวกดเพชรรูปปิรามิดฐานสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูน ซึ่งในการ ทดสอบความแข็งจากวิธีที่กล่าวมานี้ค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉพาะของแต่ละวิธีซึ่งจะไม่เท่ากัน ดังนั้นการจะ ทดสอบกับวัสดุชนิดใดนั้น จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมและการวัดค่ามาตรฐานที่ใช้กับวัสดุ ชนิดนั้นๆด้วย ซึ่งความแข็งของเซรามิกนั้นก็เป็นสมบัติเชิงกลอีกอย่างหนึ่งซึ่งขึ้นกับโครงสร้างจุลภาคเช่น เดียวกันและ จากการที่เซรามิกนั้นเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเฉื่อยต่อการทำปฏิกิริยาทางเคมีหากลักษณะโครง สร้างจุลภาคของเซรามิกที่บริเวณผิวมีลักษณะเช่นเดียวกับที่อยู่ภายในเนื้อของเซรามิก การทดสอบ สมบัติเชิงกลที่บริเวณผิวของชิ้นงานก็น่าจะนำมาหาค่าสมบัติเชิงกลอื่นๆของเซรามิกได้เช่นเดียวกันกับ การวัดค่าความแข็งแรง



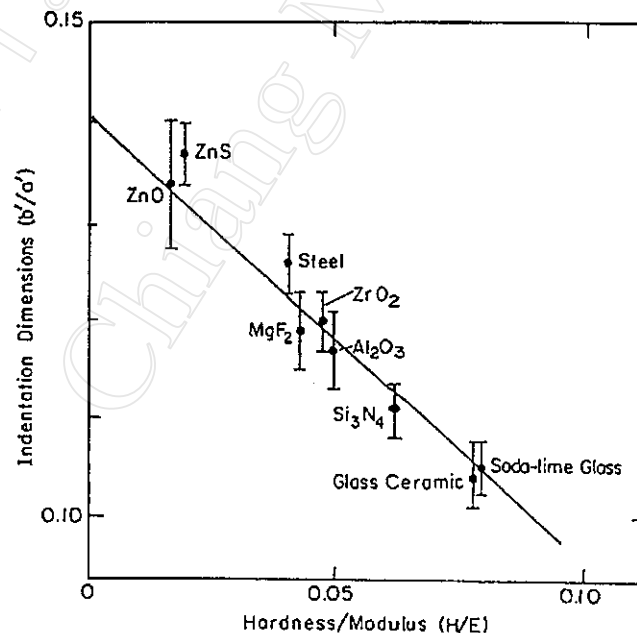
รูป 2.7 ระดับของค่าความแข็งที่ทำการวัดด้วยวิธีต่างๆ [15]

โดยเฉพาะการหาค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์และของนูนนั้นสามารถที่จะนำค่าที่วัดได้มาใช้ในการคำนวณเพื่อหาค่ามอดูลัสของยังและค่าความต้านทานต่อรอยแยก โดยเริ่มจากการวัดค่าความแข็งในหน่วยของนูนจากการทดลองของ Marshall และคณะ [17] ซึ่งได้อธิบายความสัมพันธ์ของค่าความแข็งต่อค่ามอดูลัสของยัง (H/E) โดยการกดหัวกดลงบนผิวของเซรามิกเพื่อให้เกิดรูปสี่เหลี่ยมขนมเปียกปูนซึ่งในขณะที่กำลังกดอยู่นั้นวัสดุจะได้รับแรงกระทำอย่างเต็มที่ที่ทำให้ขนาดของรอยหัวกดด้านยาวต่อด้านสั้นมีค่าเท่ากับหัวกดคือเท่ากับ 7.11 แต่เมื่อถอนหัวกดออกจากผิว วัสดุจะเกิดการคืนตัว

ทำให้รอยที่เห็นมีขนาดเล็กลงและมีผลกระทบต่อรอยตกค้างด้านสั้น (a') อย่างมากกล่าวคือ ความยาวของรอยตกค้างที่เห็นจะสั้นลงมาก เมื่อเทียบกับผลกระทบต่อรอยตกค้างด้านยาว (b') ที่มีการคืบตัวค่อนข้างน้อย การคืบตัวที่เกิดขึ้นนี้จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งกับค่ามอดูลัสของยังวัสดุที่มีค่า H/E สูงจะมีการคืบตัวที่สูง (ขนาดความยาวของด้านสั้นจะน้อย) สำหรับเซรามิกจะมีค่า H/E ประมาณ 0.1 ซึ่งสามารถนำค่าที่ได้จากความสัมพันธ์ดังกล่าวมาหาค่ามอดูลัสของยังได้และความคลาดเคลื่อนจากการวัดจะน้อยกว่า ร้อยละ 10 เมื่อวัสดุนั้นมีค่า H/E น้อยกว่าร้อยละ 0.03

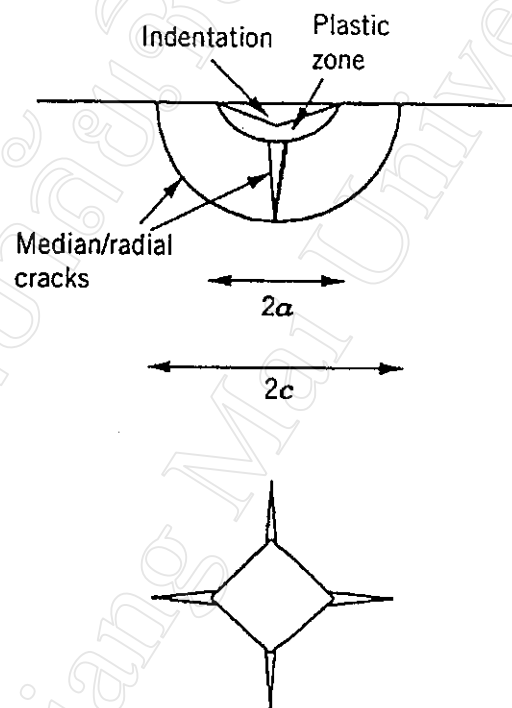


รูป 2.8 รอยกดด้วยหัวกดรูปบน (A) ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งมีค่า H/E ต่ำ และ (B) แก้วโซดาไลม์ (soda-lime glass) ที่มีค่า H/E สูง [17]



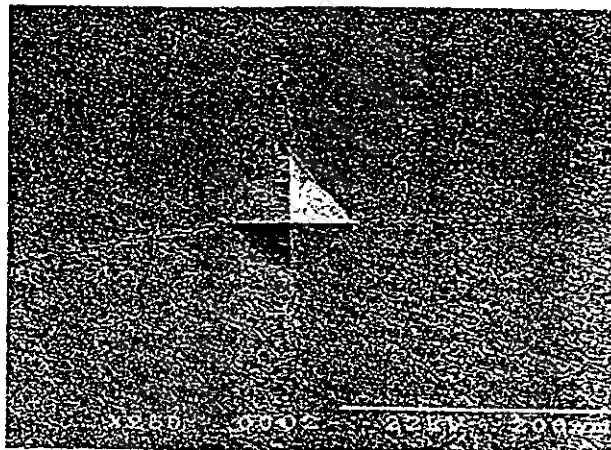
รูป 2.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนขนาดของรอยกด (b'/a') กับ อัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งกับค่ามอดูลัสของยัง (H/E) [17]

สำหรับการหาค่าความต้านทานต่อรอยแยกนั้นเมื่อทำการกดบนผิวของวัสดุด้วยหัวกดวิกเกอร์ เมื่อให้แรงกระทำมากพอ จะทำให้วัสดุนั้นเกิดรอยแตกขึ้นทั้งในลักษณะของรอยแตกจากมุมของหัวกด (radial crack) และรอยแตกที่ลึกลงไปจนถึงบริเวณกึ่งกลางของหัวกด (median crack) โดยการเติบโตของรอยแยกที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดขึ้นทั้งสองแนวโดยเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของความเค้นภายในส่วนบริเวณที่ยืดหยุ่น (plastic zone) กับบริเวณรอบข้างเป็นผลทำให้เกิดความเค้นอันเนื่องมาจากแรงดึง (tensile stress) ระหว่างสองบริเวณดังกล่าว ดังแสดงในรูป 2.10



รูป 2.10 ลักษณะการแตกที่เกิดจากหัวกดวิกเกอร์ [14]

Sakamoto และคณะ [18] ได้ทดสอบสมบัติทางกลของเซรามิกโคบอลออกไซด์ (Co_3O_4) โดยใช้วิธีของ Marshall และคณะ [11] ด้วยหัวกดวิกเกอร์แล้วทำการตรวจสอบลักษณะรอยแตกที่เกิดขึ้นเพื่อใช้คำนวณหาค่าความต้านทานต่อรอยแยกได้ผลดังรูป 2.11



รูป 2.11 รอยแตกเนื่องจากห้วงคึกเกอร์บนเซรามิกโคบอลออกไซด์ [18]

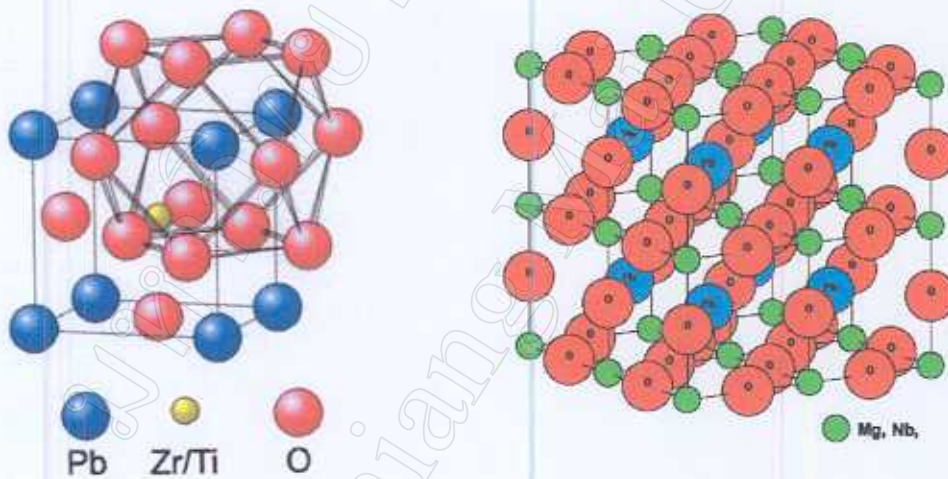
จากรายงานที่ผ่านมานั้นค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิกแต่ละชนิดจะมีค่าที่หลากหลายซึ่งมีความแตกต่างกันตามองค์ประกอบและกระบวนการผลิตดังแสดงในตาราง 2.2

ตาราง 2.2 ค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิกชนิดต่างๆ [11]

เซรามิก	K_{Ic} (MPa.m ^{1/2})
แก้วซิลิเกต (silicate glass)	<1
เครื่องปั้นดินเผา (ถ้วยชา กระจก กระเบื้อง เครื่องสุขภัณฑ์และอื่นๆ)	1-2.5
อะลูมินาเนื้อแน่น (dense alumina)	3-6
เซอร์โคเนียเสถียรบางส่วน (PSZ, zirconia partially-stabilized)	7-15
ผลึกเชิงซ้อนของเซอร์โคเนียที่มีเฟสเป็นแบบเตตระกอนอล (TZP, tetragonal zirconia polycrystals)	<30
ซิลิกอนไนไตรท์ที่ผ่านการอัดขึ้นรูปด้วยความร้อน (HPSN, hot-pressed silicon nitride)	3-8
ซิลิกอนไนไตรท์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพันธะ (RBSN, reaction-bonded silicon nitride)	1-3

2.2 เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) และ เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN)

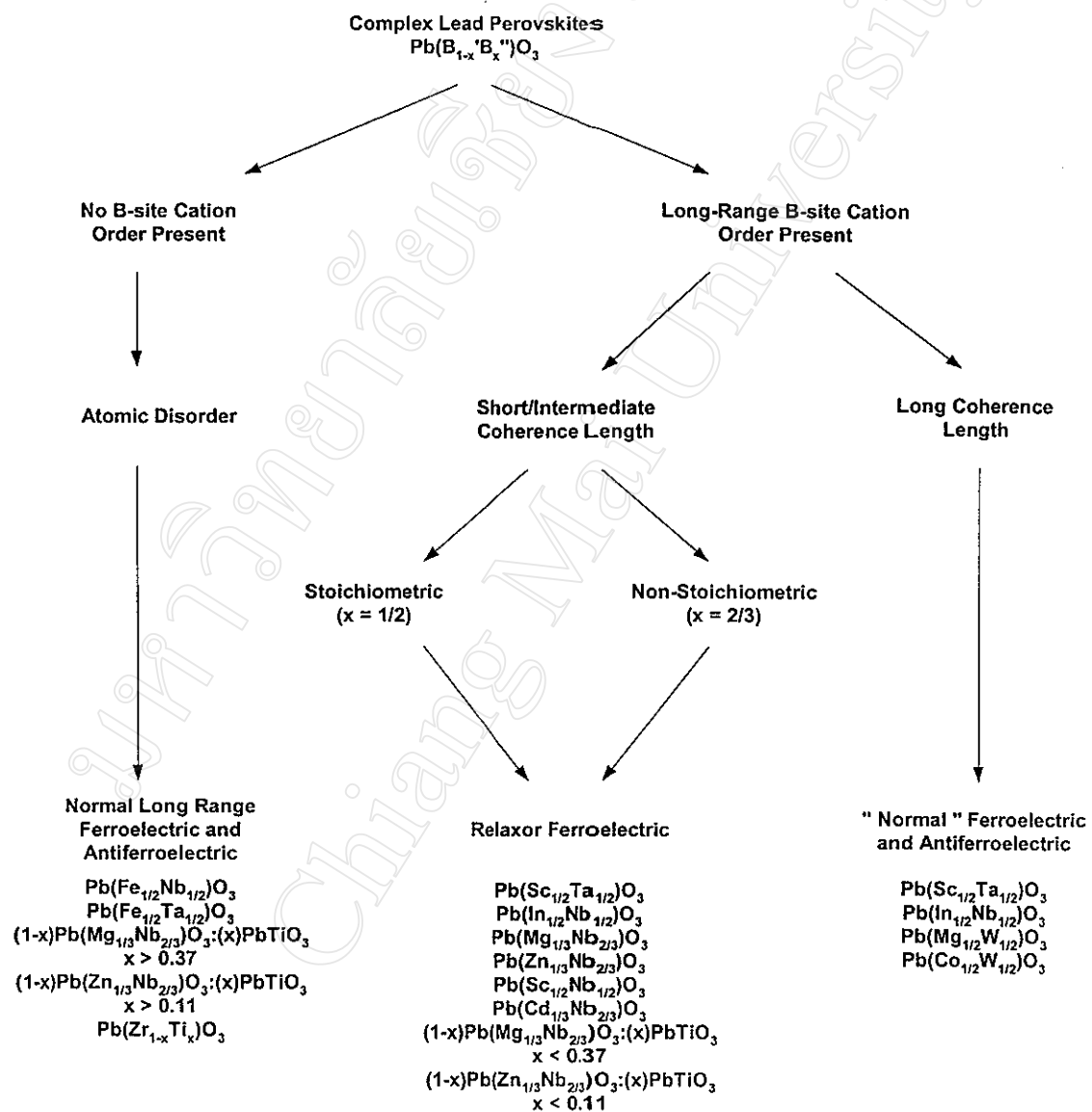
เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเนต (PZT) และ เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PMN) นั้นถูกจัดอยู่ในกลุ่มของเซรามิกที่มีโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ (perovskite) ซึ่งเป็นชื่อของกลุ่มที่มีโครงสร้างผลึกที่คล้ายคลึงกับโครงสร้างของแร่แคลเซียมไททานเนต (CaTiO_3) ที่มีสูตรโดยทั่วไปเป็น ABO_3 แคลเซียมไททานเนตไม่ได้แสดงสมบัติเพโรอิเล็กตริกแต่สารที่ถูกค้นพบภายหลังที่มีสมบัติทางเพโรอิเล็กตริกนั้นหลายๆ ชนิดมีโครงสร้างอยู่ในกลุ่มนี้ เช่น แบเรียมไททานเนต (BaTiO_3) เลดไททานเนต (PbTiO_3 , PT) เลดเซอร์โคเนตไททานเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$, PZT) และ เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$, PMN) เป็นต้น ซึ่งลักษณะโครงสร้างแบบเพอโรฟสไกต์ในอุดมคติ (ideal perovskite) นั้นจะมีลักษณะเป็นโครงสร้างแบบ cubic closed pack และจากสูตรทั่วไป ABO_3 เมื่อดูการจัดเรียงตัวของอะตอมออกซิเจน (O) ที่มีลักษณะเป็นลูกบาศก์โดยมีการจัดเรียงตัวของอะตอม A อยู่ที่ตำแหน่งของ dodecahedral ส่วนอะตอม B นั้นจะอยู่ที่ตำแหน่งของ octahedral ดังตัวอย่างแสดงในรูป 2.12



รูป 2.12 ลักษณะโครงสร้างผลึกแบบเพอโรฟสไกต์ของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเนตและ เลดแมกนีเซียมไนโอเบต [20-21]

ในปัจจุบันได้มีการศึกษาสมบัติทางด้านต่างๆ ของสารประกอบในกลุ่มนี้อย่างแพร่หลายและหนึ่งในนั้นก็คือ การศึกษาสมบัติทางพิโซอิเล็กตริกของเซรามิกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก (lead-base) จำนวนมากที่สามารถแสดงสมบัติเด่นทางด้านเพโรอิเล็กตริกได้ดีและสามารถแบ่งย่อยออกได้

เป็นแบบปกติ (normal) เช่น เซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานेट โดยสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่มากนัก กับพวกรีแลกเซอร์ (relaxor) เช่น เซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต ที่มีสมบัติเฟอร์โรอิเล็กทริกเปลี่ยนแปลงตามความถี่ นอกจากนี้ยังมีเซรามิกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักอีกหลายชนิดที่มีการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันดังแสดงในแผนผังรูป 2.13



รูป 2.13 แผนภาพแสดงการจัดกลุ่มของสารประกอบเฟอร์โรอิเล็กทริก
ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก [22]

สมบัติพิโซอิเล็กตริกนั้นเป็นพฤติกรรมทางไฟฟ้าของสารบางชนิด ที่สามารถสร้างประจุไฟฟ้าบนผิวขึ้นได้เมื่อได้รับแรงกลและในทางกลับกันสามารถแสดงพฤติกรรมเชิงกลได้เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า [1] สมการที่ 2.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงขนาด (S) ของวัสดุ กับค่าสนามไฟฟ้าที่ให้เข้าไป (E) ในกรณีที่เราเรียกว่าปรากฏการณ์แบบย้อนกลับ (inverse piezoelectric effect)

$$S_j = d_{ij} E_i \quad (2.5)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3$ และ $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$

d เป็นค่าคงที่พิโซอิเล็กตริก (piezoelectric constant) ที่มีค่าแตกต่างกันไปตามทิศทางของการเกิดข้อและทิศทางของการเกิดความเค้นโดยจะมีการบอกทิศทางเป็นตัวน้อย (i และ j)

ส่วนในกรณีของปรากฏการณ์ตรง (direct piezoelectric effect) นั้นสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.6

$$P_i = d_{ij} T_j \quad (2.6)$$

เมื่อ $i = 1, 2, 3$ และ $j = 1, 2, 3, 4, 5$

โดยเมื่อให้ความเค้นแก่วัสดุ (T) จะทำให้เกิดการผิดรูปขึ้นภายในโครงสร้าง ส่งผลให้เกิดสภาพของความมีขั้วไฟฟ้าขึ้น (P)

และนอกจากนั้นยังแสดงประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานหรือค่าตัวประกอบคู่ควบทางพิโซอิเล็กตริก (piezoelectric coupling factor, k) [23] ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการที่ 2.7 ก็จัดเป็นค่าสำคัญในการบ่งบอกสมบัติพิโซอิเล็กตริกของวัสดุ

$$k^2 = \frac{\text{พลังงานกลที่กักเก็บ (stored mechanical energy)}}{\text{พลังงานไฟฟ้าที่ให้ (input electrical energy)}} \quad (2.7)$$

วัสดุแต่ละชนิดจะมีค่าตัวประกอบคู่ควมทางพิโซอิเล็กทริกที่แตกต่างกัน วัสดุที่มีค่า k สูงจะมีการสูญเสียพลังงานน้อยซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวัสดุแต่ละชนิดและค่า k นี้ยังมีตัวห้อย ที่แสดงถึงทิศทางการให้แรงเชิงกลหรือสนามไฟฟ้าที่ให้และทิศทางของไฟฟ้าหรือแรงเชิงกลที่ได้รับซึ่งในทิศทางต่างๆก็จะให้ค่าที่ไม่เท่ากันดังเช่นตัวอย่างแสดงในตาราง 2.3

ตาราง 2.3 สมบัติพิโซอิเล็กทริกของเซรามิกกลุ่มที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก [24]

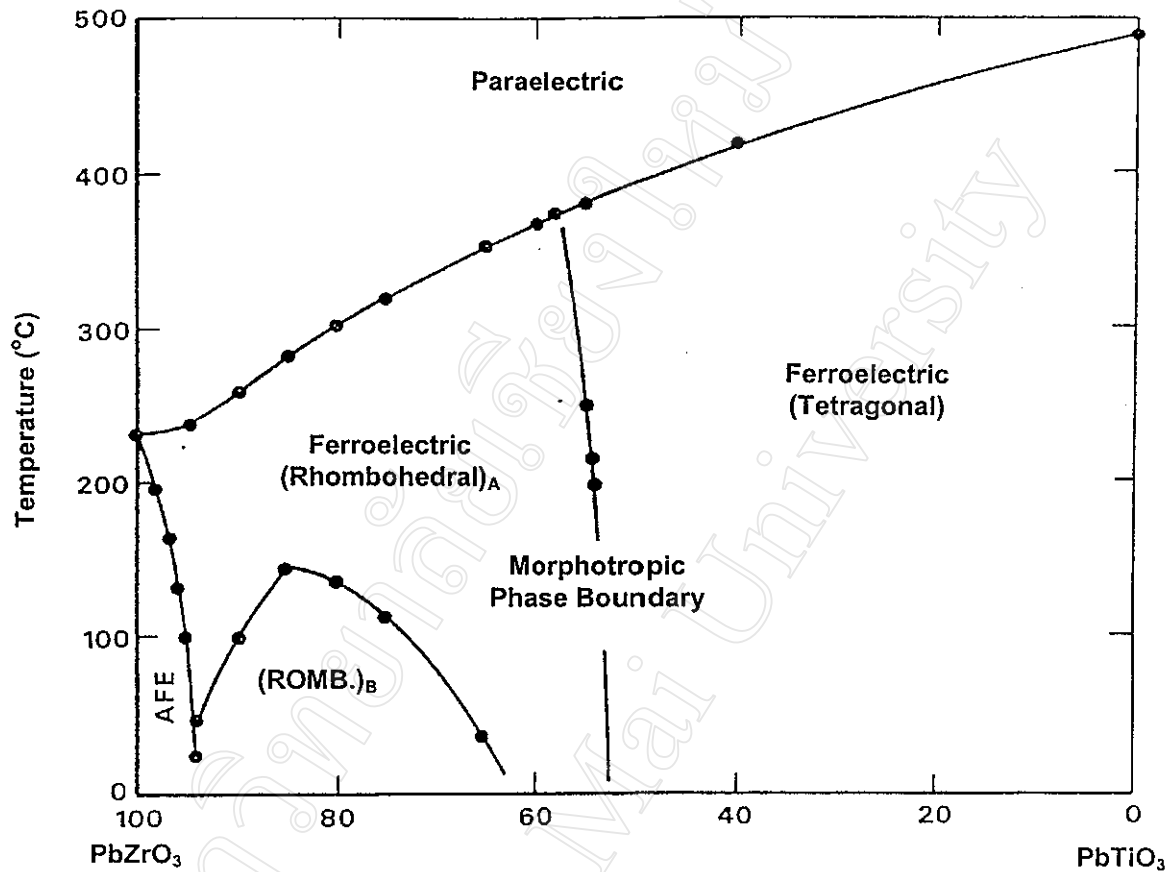
วัสดุ	ลักษณะ	k_p (%)	k_{33} (%)	d_{33} (pC/N)	T_c ($^{\circ}\text{C}$)
PZT 53/47	เซรามิก	0.52	0.67	220	370
PZT 53/47+Nb	เซรามิก	0.67	0.76	400	360
PZNT 88/12	เซรามิก	0.5	0.48	235	222
PZNT 91/9	ผลึกเชิงเดี่ยว	-	0.92	1500	190
PMNT 67/33	เซรามิก	0.63	0.73	690	160
PMNT 70/30	ผลึกเชิงเดี่ยว	-	>0.9	1500	150
PSTT 55/45	เซรามิก	0.61	0.73	655	205
PSNT 58/42	เซรามิก	0.71	0.77	540	260
PSMNT 29/34/37	เซรามิก	0.72	0.78	640	215
PSZNT 29/40/31	เซรามิก	0.60	0.72	480	230

นอกจากการพิจารณาถึงประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานของวัสดุแล้วการนำวัสดุในกลุ่มนี้ไปใช้งานมักจะต้องเจอกับสภาพที่มีความเครียดอันเนื่องมาจากความเค้นภายนอก ดังนั้นการศึกษเพื่อทำความเข้าใจถึงสมบัติเชิงกลของเซรามิกเหล่านี้ จึงเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการนำไปใช้งานจริงให้เกิดประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

2.2.1 สมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต

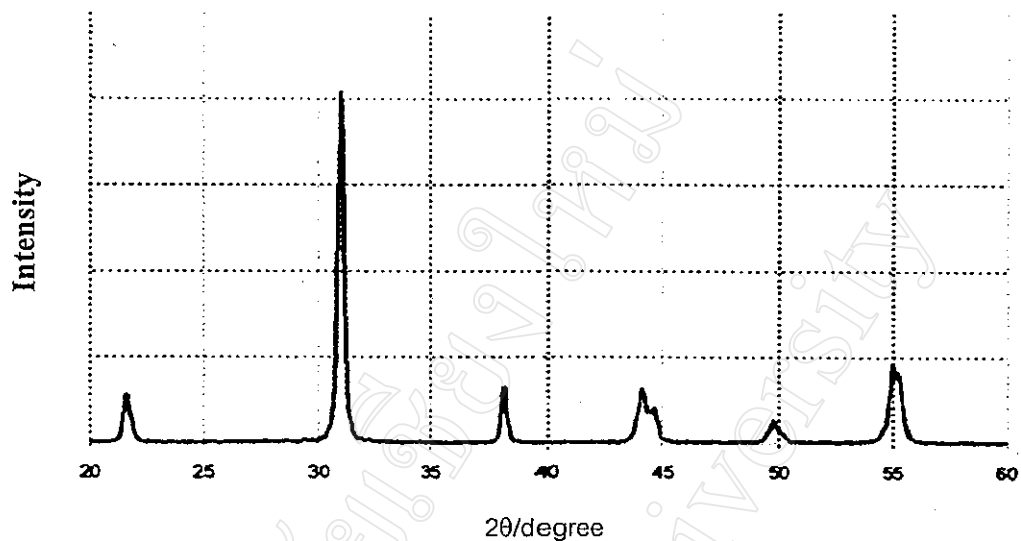
เลดเซอร์โคเนตไททาเนต ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$: PZT) เป็นสารประกอบที่ถูกค้นพบมาตั้งแต่ก่อนปี ค.ศ. 1950 [23] แล้ว โดยถูกจัดอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งระหว่าง เลดเซอร์โคเนต (PbZrO_3) กับ เลดไททาเนต (PbTiO_3) ซึ่งอัตราส่วนระหว่าง Zr/Ti จะมีความสำคัญอย่างมากในการทำให้เซรามิกมีสมบัติพิโซอิเล็กทริกที่ดี ในปัจจุบันนี้การเตรียมผง PZT สามารถกระทำได้หลายวิธีเช่น วิธีมีคส์ออกไซด์ (mixed oxides) ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมที่มีขั้นตอนเรียบง่ายและสามารถเตรียมสารได้ในปริมาณมากๆ โดยอาศัยหลักการนำผงออกไซด์ของสารตั้งต้นมาผสมให้เข้ากันแล้วจึงนำไปเผาแคลไซน์ด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสม ส่วนวิธีการเตรียมแบบมอลเทนซอลท์ (molten salt synthesis) นั้นจะอาศัยหลักการเติมเกลือโซเดียมคลอไรด์-โปแตสเซียมคลอไรด์ (NaCl-KCl) ลงไปคอยช่วยในการทำปฏิกิริยาทำให้สามารถเตรียมผง PZT ที่มีความบริสุทธิ์สูงที่อุณหภูมิต่ำได้ [25] ในขณะที่วิธีการเตรียมด้วยเทคนิคทางเคมีมีข้อดีอยู่ที่สามารถเตรียมผงให้มีสัดส่วนขององค์ประกอบได้หลากหลายสามารถควบคุมสัดส่วนองค์ประกอบได้ดี แต่ข้อเสียคือความยุ่งยากในการเตรียม และการเตรียมแต่ละครั้งนั้นได้ปริมาณน้อยจึงไม่เหมาะสำหรับการผลิตในทางอุตสาหกรรม [27] นอกจากการเตรียมด้วยวิธีต่างๆดังกล่าวมาแล้ว ยังมีวิธีการเตรียมผง PZT แบบอื่นๆ อีกมากมาย

ในปัจจุบันสำหรับสาร PZT สูตรที่นิยมเตรียมกันมากคือผงที่มีสัดส่วนองค์ประกอบระหว่าง เซอร์โคเนียมต่อไทเทเนียม (Zr:Ti) เป็น 0.52:0.48 ซึ่งเป็นสัดส่วนองค์ประกอบที่อยู่ในบริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary (MPB)) ระหว่างเฟสเตตระโกนอล (tetragonal) กับ เฟสรอมโบอีเดรอล (rhombohedral) ทำให้ง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างที่มีชีวิตเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอกและเป็นสัดส่วนองค์ประกอบที่แสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริกได้ดีที่สุด



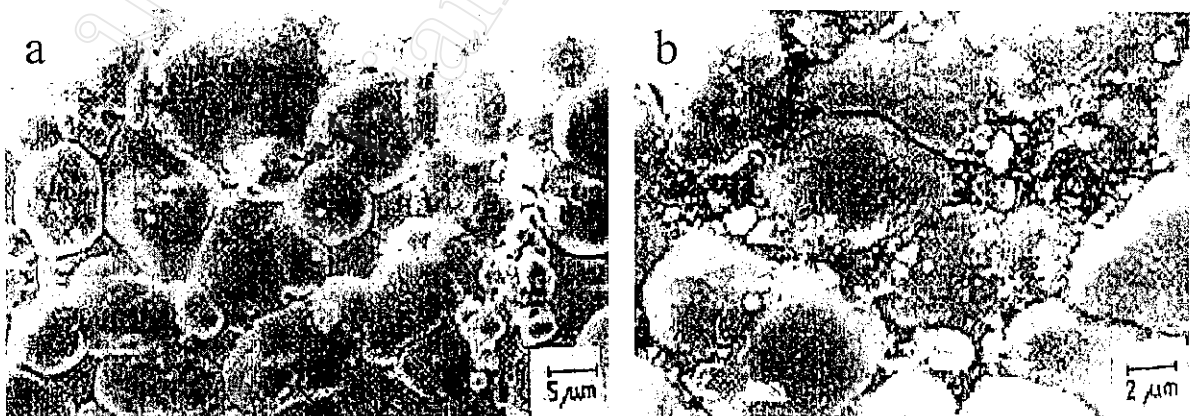
รูป 2.14 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบเลดเซอร์โคเนต-เลดไททานเต [26]

จากรายงานของบริษัท ecertec [20] ซึ่งผลิตผง PZT ที่มีสูตร $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ โดยใช้หม้อบดพลังงานสูง (high energy bead milling) เพื่อป้องกันการระเหยของตะกั่ว และควบคุมสัดส่วนองค์ประกอบระหว่างเกิดปฏิกิริยาให้ถูกต้อง และผง PZT ที่เตรียมได้นั้นเป็นสารประกอบเฟสเดียว (single phase) ซึ่งมีผลการตรวจสอบด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูป 2.15 ซึ่งจะมีพีคหลักที่มีความเข้มสูงสุดอยู่ที่ค่ามุม 2θ ประมาณ 31.0 55.2 และ 38.3 องศา ตามลำดับ



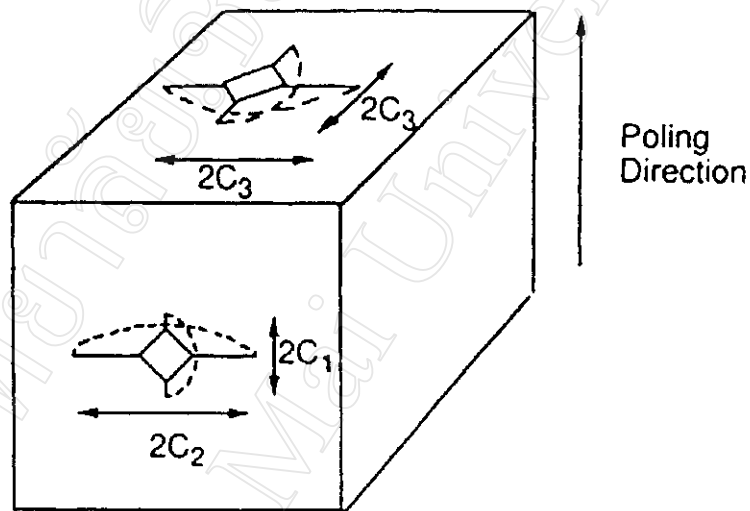
รูป 2.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเลดเซอร์โคเนตไททานเนต [20]

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเผาซินเตอร์ (sintering) เซรามิก PZT ที่ผ่านมานั้นพบว่ามีการศึกษาโดยใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่หลากหลาย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1100-1300°C [27-29] โดยในการเผานั้นจำเป็นจะต้องเผาในบรรยากาศที่มีตะกั่ว (PbO) เพื่อที่จะป้องกันการระเหยของตะกั่วในรูปของ PbO ออกไปจากชิ้นงานเซรามิก จึงเป็นการควบคุมให้สัดส่วนของเซอร์โคเนียมต่อไทเทเนียมให้มีความคงที่ตามต้องการได้ ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PZT สามารถสังเกตได้จากรูป 2.16 [29]



รูป 2.16 โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเนตที่มีการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของตะกั่วในองค์ประกอบโดย (a) เพิ่มจากปริมาณสารสัมพัทธ์ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ร้อยละ 1.05 โดยโมล และ (b) ลดจากปริมาณสารสัมพัทธ์ $\text{Pb}(\text{Zr}_{0.52}\text{Ti}_{0.48})\text{O}_3$ ร้อยละ 1.80 โดยโมล [29]

สำหรับสมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเนตนั้นมีการศึกษากันอย่างกว้างขวางทั้งในลักษณะของการทดสอบเชิงกลในชิ้นงานตัวอย่างที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้แข็งและชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทำให้แข็งแล้วดังแสดงในงานวิจัยของ Calderon และคณะ [30] ที่ได้ทำการศึกษาการเกิดรอยแตกของเซรามิก PZT ด้วยการใช้หัวกดวิกเกอร์กดลงบนผิวของชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เกิดแข็งและยังไม่ได้ผ่านการทำให้เกิดแข็งในทิศทางที่อยู่ในแนวขนานและตั้งฉากกับทิศทางทางการเกิดแข็งดังแสดงในรูป 2.17

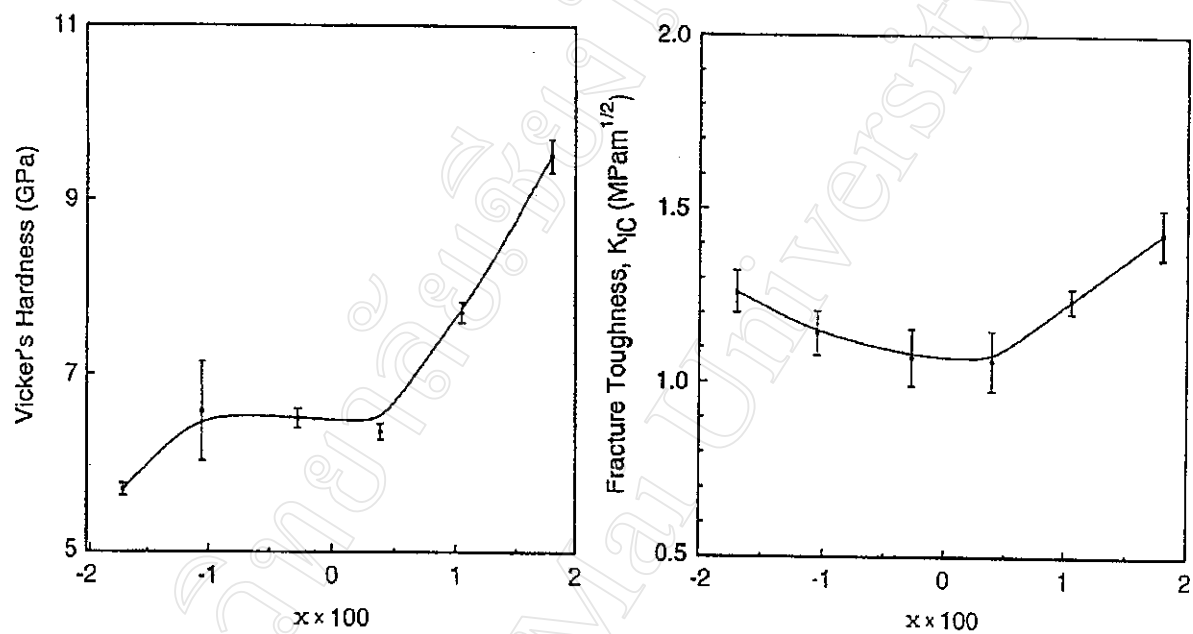


รูป 2.17 การทดสอบด้วยหัวกดวิกเกอร์ลงบนผิวของชิ้นงานตัวอย่าง [27]

Calderon และคณะ [30] ได้ทดลองใช้แรงกดขนาดต่างๆกันด้วยหัวกดวิกเกอร์ นอกจากนั้นยังใช้หัวกดรูปหาค่ามอดูลัสของยัง เพื่อนำไปใช้คำนวณหาค่าความต้านทานต่อรอยแตก จากการทดลองพบว่าเซรามิก PZT มีค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์เท่ากับ 3.0 GPa มีค่าความต้านทานต่อรอยแตกเท่ากับ $1.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ สำหรับสารตัวอย่างที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้แข็ง พบว่ามีค่าความต้านทานต่อรอยแตกประมาณ $0.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ในแนว C_2 มีค่าประมาณ $0.9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ในแนว C_3 และประมาณ $1.7 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ในแนว C_1 ซึ่งเป็นผลมาจากทิศทางของการเกิดแข็งที่ทำให้รอยแตกในแนวตั้งฉากยาวขึ้นทำให้ค่าความต้านทานต่อรอยแตกลดลง

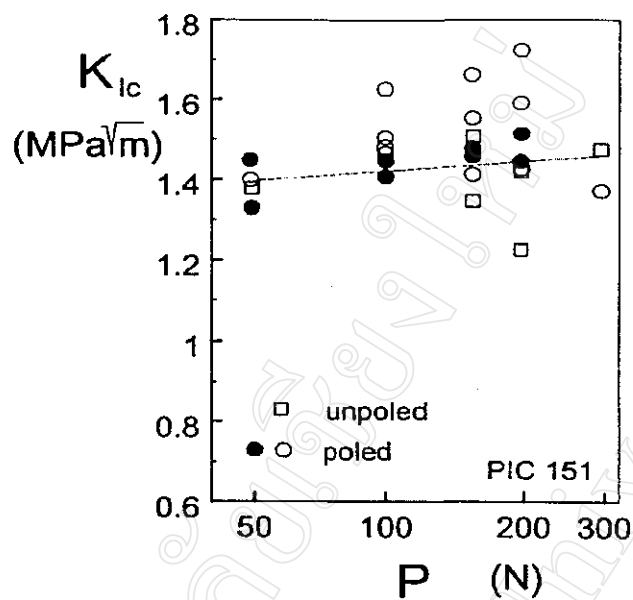
Garg และ Agrawal [29] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณตะกั่วต่อสมบัติเชิงกลของเซรามิก PZT และพบว่าสมบัติเชิงกลของเซรามิก PZT ที่เผาขึ้นเตอร์ด้วยอุณหภูมิ 1220°C

เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาณสัดส่วนของตะกั่วที่ลดลงหรือเพิ่มขึ้นจากเดิมซึ่งส่งผลอย่างมากต่อค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์ แต่ไม่ค่อยจะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานต่อรอยแตกดังแสดงในรูป 2.18



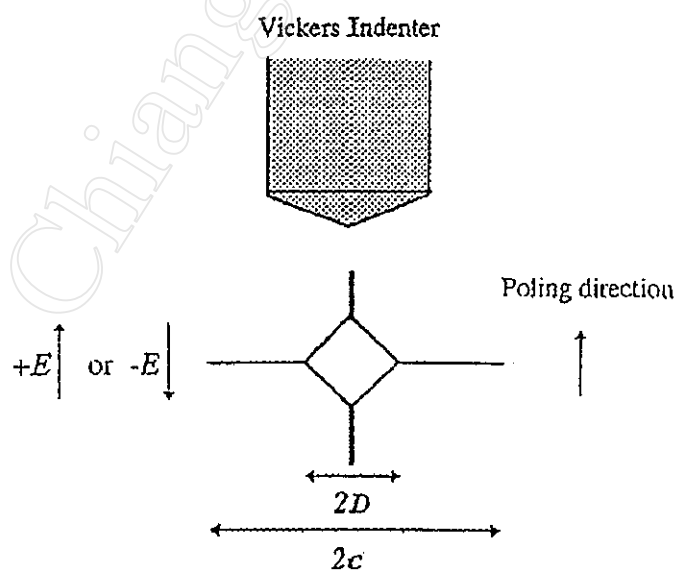
รูป 2.18 กราฟแสดงอิทธิพลของปริมาณตะกั่ว (X : ร้อยละโดยโมล) ต่อสมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานต [29]

Felt และคณะ [5] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานตทางการค้าของบริษัท PI Ceramic (Lederhose, Germany) โดยในการทดลองนั้นสามารถวัดค่าความแข็งในหน่วยของวิกเกอร์ได้เท่ากับ 3 GPa และมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกเท่ากับ 1.5 MPa.m^{1/2} นอกจากนี้ยังพบอีกว่าชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการทำให้เกิดข้อแล้วจะมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกสูงกว่าในกรณีของชิ้นงานตัวอย่างที่ยังไม่ได้ผ่านการทำให้เกิดข้อเล็กน้อยดังแสดงในรูป 2.19



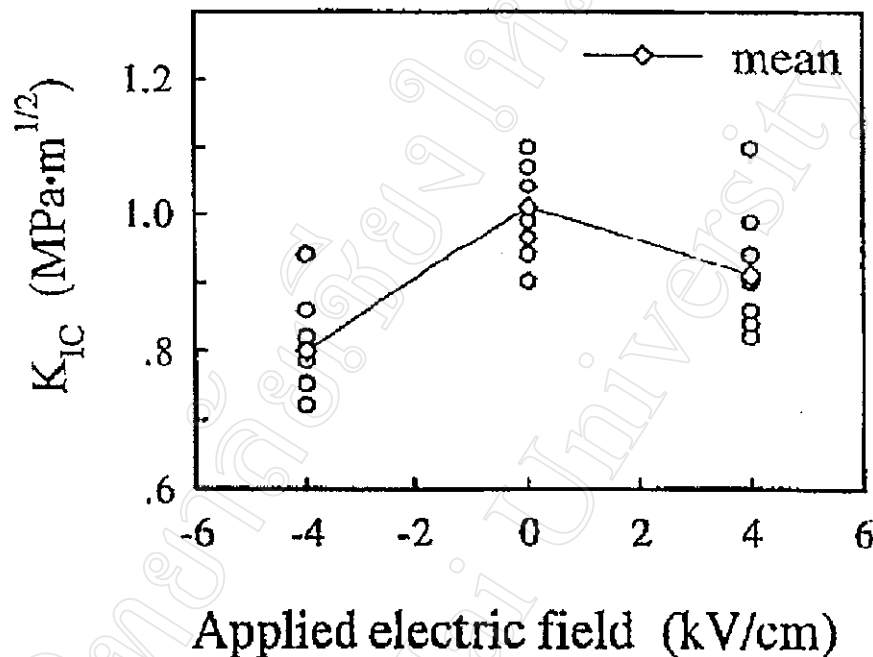
รูป 2.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแยก (K_{Ic}) กับ น้ำหนักของหัวกด (P) ของชิ้นงานเซรามิกทางการค้า [5]

Fu และ Zhang [6] ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของชิ้นงานเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PZT-841) ของบริษัท American Piezo Ceramics (Mackeyville, USA) โดยใช้หัวกดวิกเกอร์ด้วยแรง ขนาด 49.0 นิวตัน ภายใต้สนามไฟฟ้า 4 kV/cm ดังแสดงในรูป 2.20



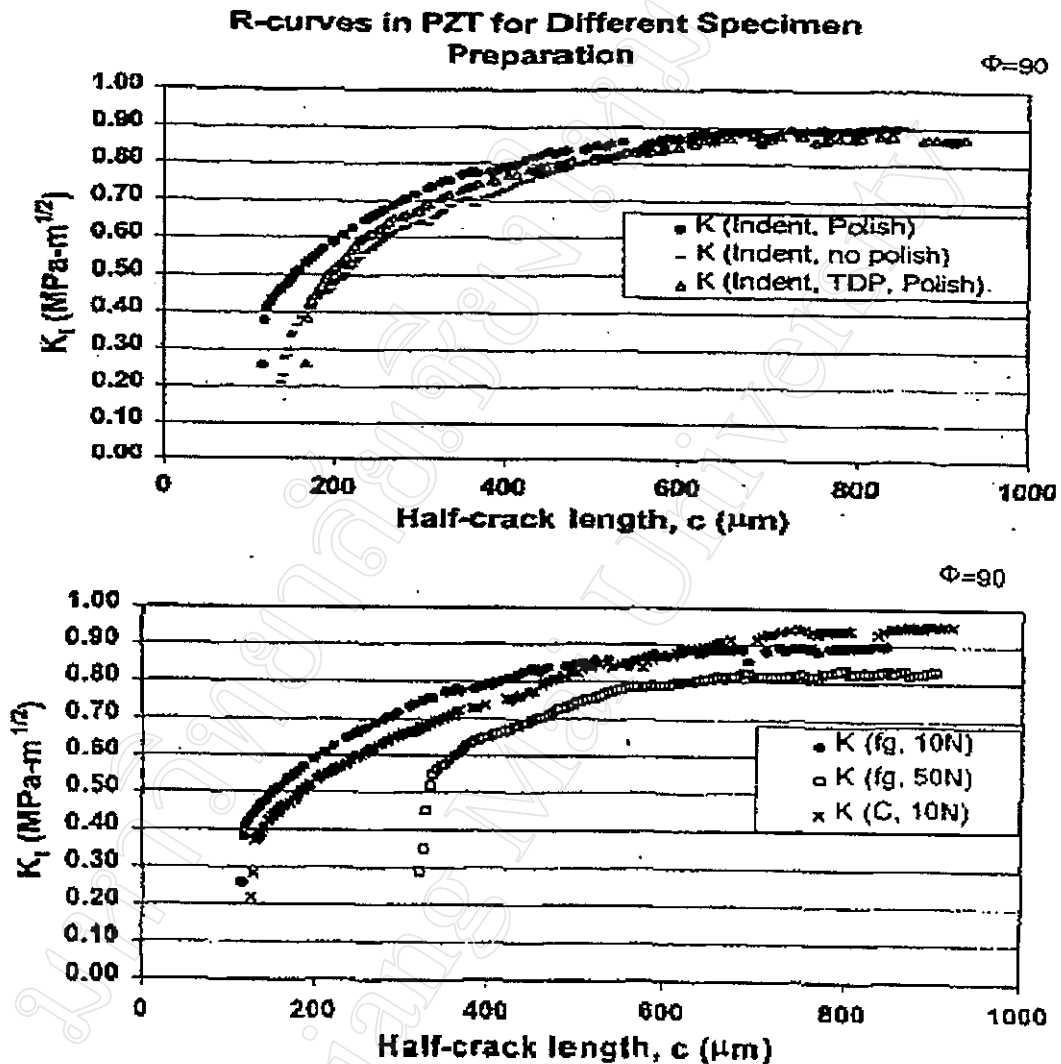
รูป 2.20 ลักษณะการกดด้วยหัวกดวิกเกอร์ภายใต้สนามไฟฟ้า [6]

จากผลการทดลองพบว่า การให้สนามไฟฟ้าในทิศทางดังกล่าวจะมีผลทำให้รอยแตกมีการเติบโตมากยิ่งขึ้น ทำให้ค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิกลดลง ดังแสดงในรูป 2.21



รูป 2.21 กราฟแสดงค่าความต้านทานต่อรอยแตก (K_{IC}) ที่ลดลงเนื่องจากการให้สนามไฟฟ้า (E) [6]

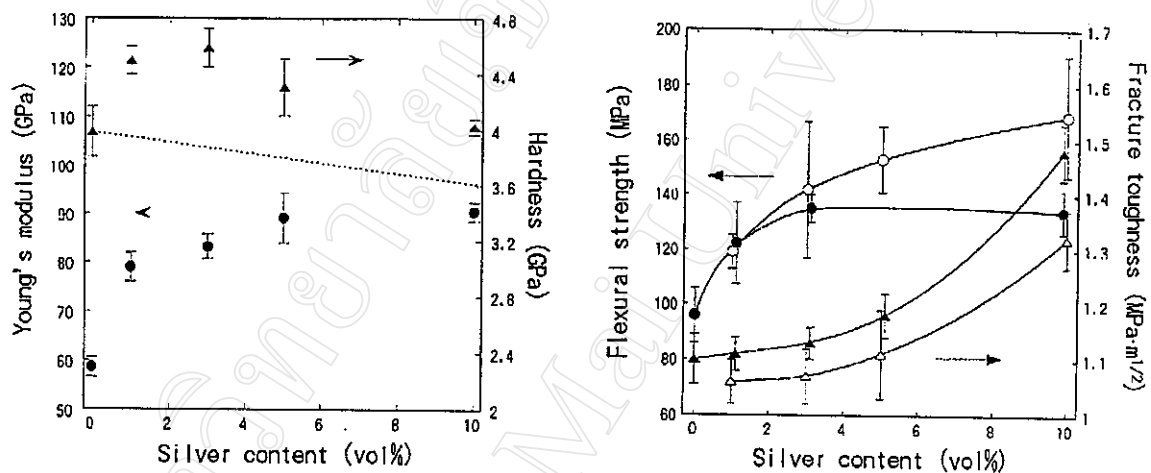
Karatamasti และคณะ [31] ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมของค่าความต้านทานต่อรอยแตกในเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททาเนต โดยได้ทำการทดสอบชิ้นงานเซรามิกที่มีขนาดเกรนเฉลี่ยแตกต่างกัน โดยใช้แรงกดขนาด 10 และ 50 นิวตัน ด้วยการให้หัวกดนูนกดลงบนชิ้นงานตัวอย่างที่ผ่านการขัดผิวแล้ว เปรียบเทียบกับในกรณีที่ยังไม่ได้ผ่านการขัดผิว และพบว่าแม้ชิ้นงานตัวอย่างจะมีขนาดของเกรนที่แตกต่างกัน แต่ก็มีพฤติกรรมของค่าความต้านทานต่อรอยแตกเป็นไปในทางเดียวกัน และค่าความต้านทานต่อรอยแตก (K_{IC}) ที่วัดด้วยแรงกดขนาดต่างกันนั้นก็มีค่าที่ต่างกันไม่มาก (ประมาณร้อยละ 8) และไม่ว่าชิ้นงาน PZT จะผ่านการขัดผิวมาหรือไม่ก็แทบจะไม่มี ความแตกต่างกันเลย โดยพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.82-0.90 MPa·m^{1/2} Karatamasti และคณะ จึงได้เสนอว่าการที่จะหาค่าความต้านทานของรอยแตกให้ถูกต้องและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นนั้นควรที่จะทำการวัดขนาดของรอยที่เกิดขึ้นด้วยการใช้กล้องที่มีกำลังขยายสูงๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เข้ามาช่วยในการศึกษา



รูป 2.22 กราฟแสดงพฤติกรรมความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก PZT [31]

ตัวอย่างของความพยายามที่จะพัฒนาสมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดเซอร์โคเนตไททานเตสามารถพบได้ จากงานวิจัยของ Tajima และคณะ [7] ที่พยายามทดลองเตรียมวัสดุผสมเลดเซอร์โคเนตไททานเต/อะลูมินา ($\text{PZT}/\text{Al}_2\text{O}_3$) โดยการเติมผงอะลูมินาขนาดอนุภาค 0.1 ไมโครเมตร ปริมาณร้อยละ 0.5 และ 1.0 โดยปริมาตรลงไปผสมกับผง PZT ก่อนแล้วจึงนำไปเผาขึ้นเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200 °C เป็นเวลานาน 2 ชั่วโมง ในบรรยากาศที่มีตะกั่วมาก ๆ พบว่าเซรามิกที่เตรียมได้มีค่าความหนาแน่นสูงขึ้นและมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกสูงขึ้นตามปริมาณของเฟสอะลูมินาในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติพิโซอิเล็กทริกไปจากเดิมเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

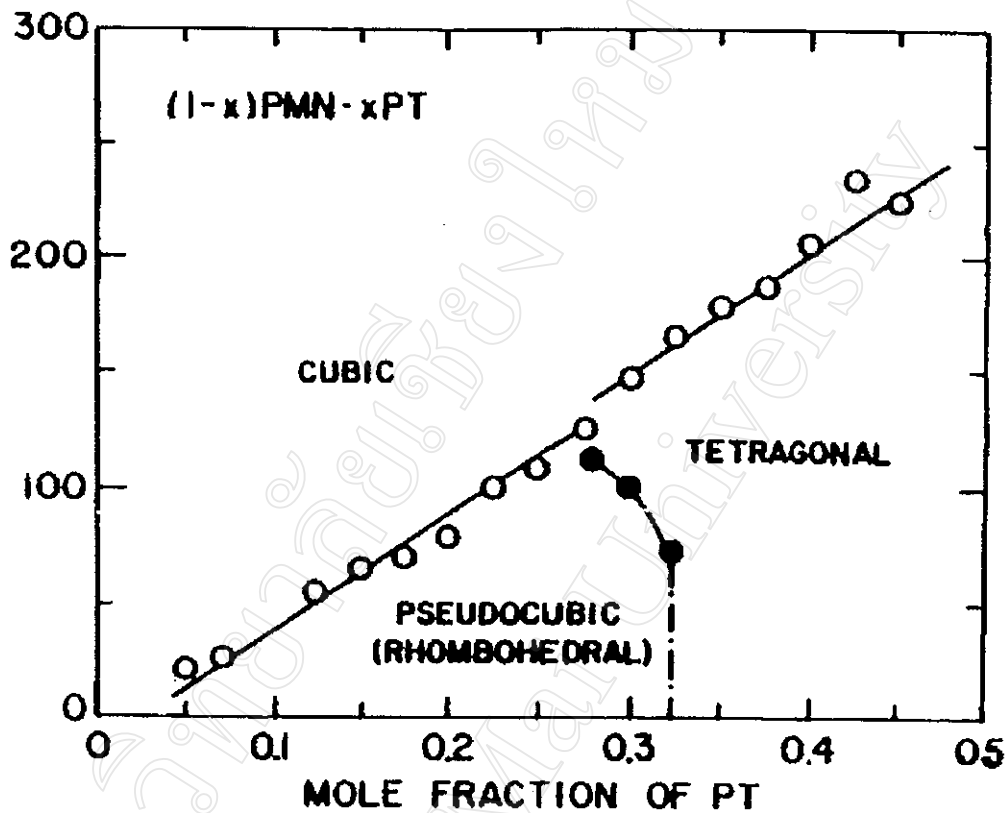
ส่วน Hwang และคณะ [8] ก็ได้ทำการทดลองปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเซรามิก PZT เช่นกัน โดยอาศัยการให้อยู่ในรูปของวัสดุผสมระหว่างเลดเซอร์โคเนตไททาเนตกับเงิน (PZT/Ag) โดยการเติม ออกไซด์ของเงิน (Ag_2O_3) ที่มีอนุภาคขนาดประมาณ 1 ไมโครเมตร ลงไปในผง PZT ก่อนทำการอัดด้วยความดันสูง (200 MPa) แล้วจึงนำมาเผาขึ้นเตอรที่อุณหภูมิในช่วง 700 ถึง 1100 °C พวกเขาพบว่าเซรามิกที่เตรียมได้จะมีค่าความหนาแน่นสูงขึ้นและมีสมบัติเชิงกลเพิ่มขึ้นตามปริมาณของเงิน ดังแสดงในรูป 2.23



รูป 2.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติเชิงกลกับปริมาณของเงินที่เพิ่มขึ้นในเซรามิก PZT [8]

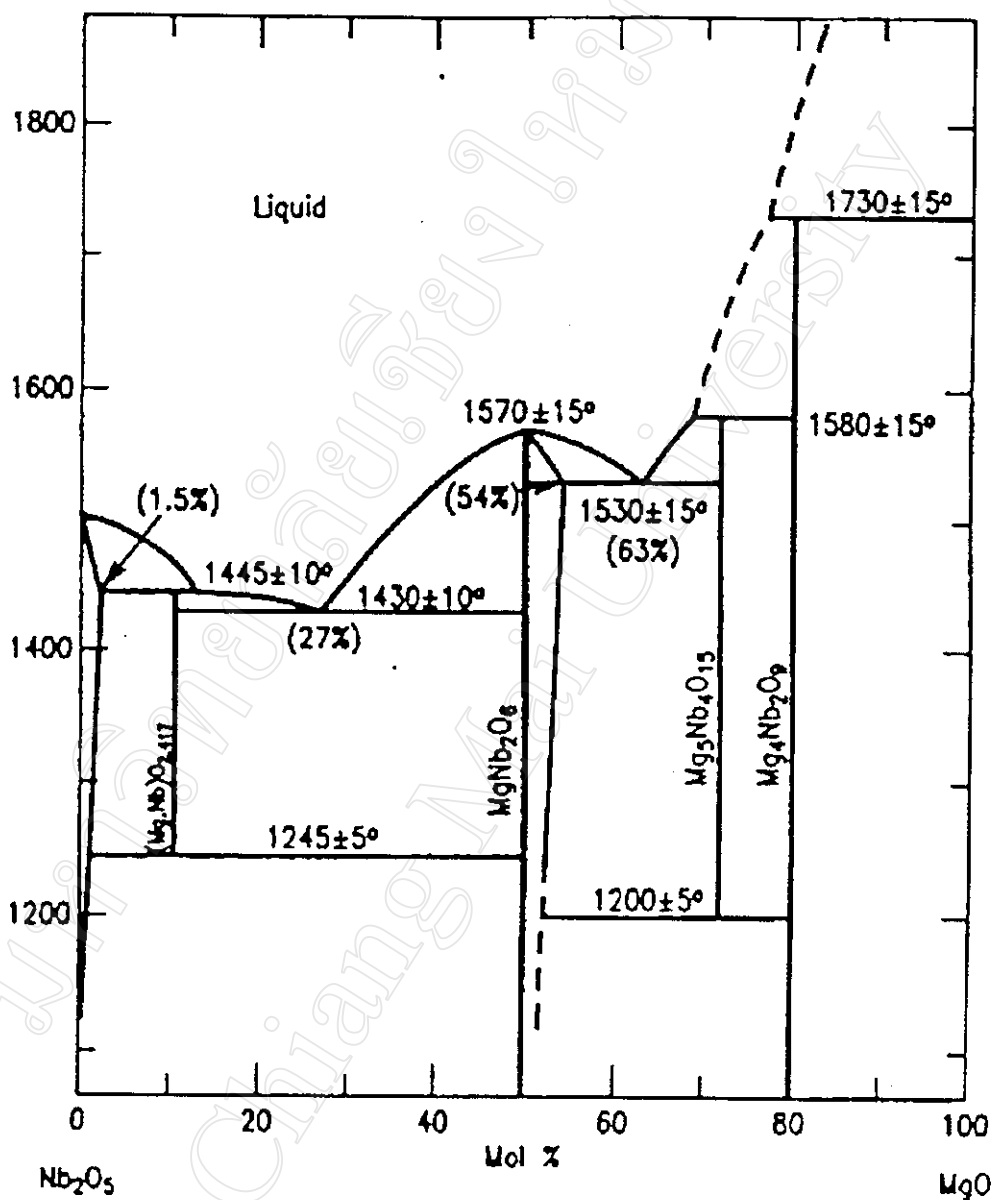
2.2.2 สมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต

เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$; PMN) ในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเตรียมอยู่สองลักษณะคือ สารประกอบเลดแมกนีเซียมไนโอเบตเฟสเดียว (PMN) และสารประกอบที่เป็นสารละลายของแข็งระหว่างเลดแมกนีเซียมไนโอเบตกับเลดไททาเนต (PMN-PT) ที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบเลดแมกนีเซียมไนโอเบตต่อเลดไททาเนต (PMN:PT) เป็น $(1-x):x$ โดยที่ x อยู่ในช่วง 0.1-0.5 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่อยู่ในบริเวณรอยต่อเฟส (morphotropic phase boundary (MPB)) [32-35] และ ถ้าหาก $x < 0.37$ จะแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกที่แบบรีแลกเซอร์ แต่ถ้า $x > 0.37$ จะแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริกแบบปกติ [22]



รูป 2.24 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบเลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไททาเนต [33]

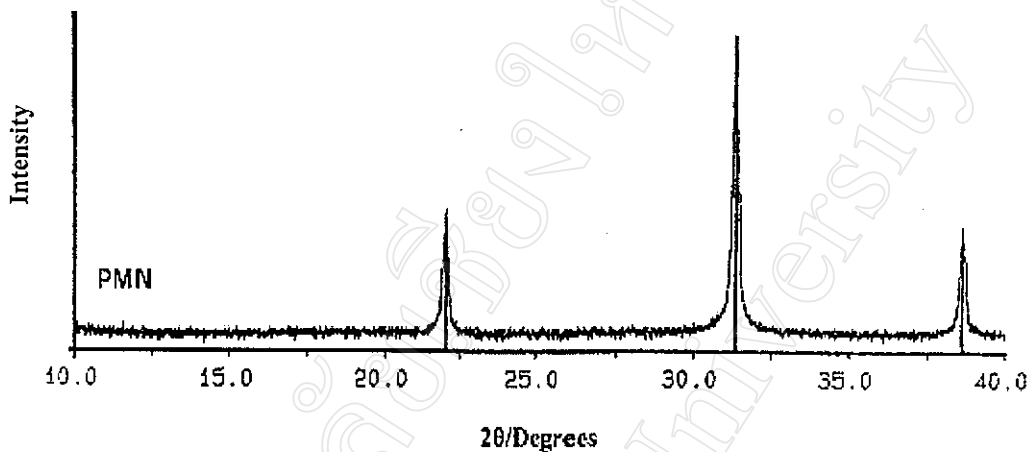
ในปัจจุบันสามารถเตรียมผง PMN ได้หลายวิธี ดังเช่น วิธีการเตรียมด้วยเทคนิคทางเคมี ยกตัวอย่างเช่น วิธีโซลเจล (sol-gel method) [35] สารละลายไนเตรต (nitrate solution) และ ไฮดรอกไซด์พรีเคอร์เซอร์ (hydroxide precursor) [36] เป็นต้น ผง PMN ที่เตรียมด้วยเทคนิคทางเคมีเป็นผงที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่กระบวนการเตรียมนั้นยุ่งยาก และการเตรียมแต่ละครั้งได้ปริมาณของสารน้อยจึงไม่เหมาะกับการเตรียมในเชิงอุตสาหกรรม ในปัจจุบันวิธีที่นิยมใช้ในการเตรียมผง PMN คือ วิธีโคลัมไบต์ (columbite method) ซึ่งเป็นวิธีการเตรียมแบบสองขั้นตอนโดยเริ่มจากการเผาเตรียม (pre-reaction) ผงแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ ผงไนโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) ให้อยู่ในรูปของผงโคลัมไบต์ที่มีสูตรเป็น MgNb_2O_6 ซึ่งเฟสไดอะแกรมแสดงในรูป 2.25



รูป 2.25 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบแมกนีเซียมออกไซด์-ไนโอเบียมออกไซด์ [36]

เมื่อได้ผงโคลัมไบต์แล้วจึงนำผงที่ได้มาทำการเผาแคลไซต์อีกครั้งร่วมกับตะกั่ว (PbO) เพื่อให้เกิดปฏิกิริยารวมตัวกันเป็น ผง PMN ที่มีสูตรเป็น $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ การเตรียมผงด้วยวิธีดังกล่าวนี้แสดงในงานวิจัยของ Supon และ Noel [37] ที่ทำการเตรียมผง PMN ที่มีความบริสุทธิ์สูงได้จาก

วิธีโคลัมไบต์ โดยมีรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูป 2.26 ซึ่งจะมีพีคหลักที่มีความเข้มสูงสุดอยู่ที่ค่ามุม 2θ ประมาณ 32.3 22.7 และ 38.5 องศา ตามลำดับ

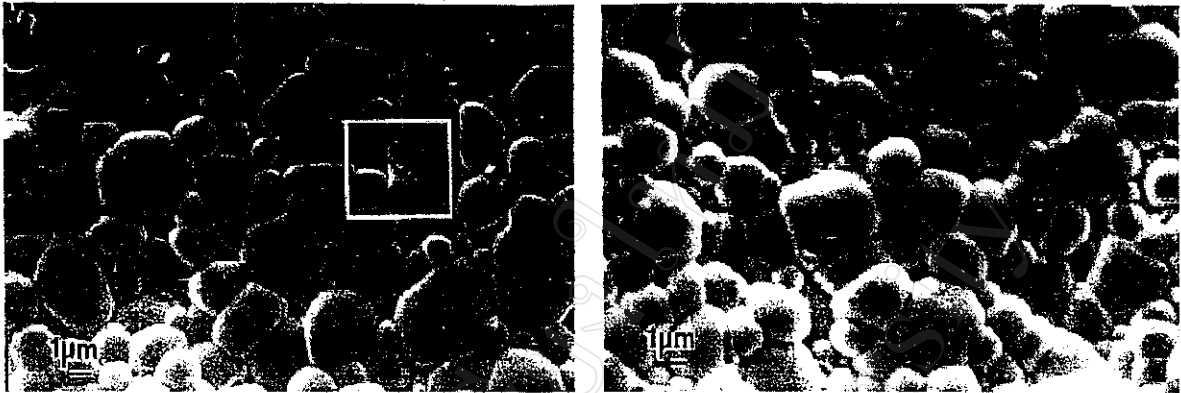


รูป 2.26 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของเลดแมกนีเซียมไนโอเบต [37]

ส่วนการเตรียมด้วยวิธีใช้ตัวช่วยหลอม (flux method) [34] เป็นวิธีการที่สามารถเตรียมผง PMN ให้มีความบริสุทธิ์สูงที่อุณหภูมิต่ำได้ ส่วนวิธีมิกซ์ออกไซด์แบบดั้งเดิมนั้น จากรายงานที่ผ่านมาไม่สามารถเตรียม ผง PMN ที่มีความบริสุทธิ์สูงได้ เนื่องจากจะเกิดเฟสของไพโรคลอรั ($\text{Pb}_2\text{Nb}_2\text{O}_7$, $\text{Pb}_3\text{Nb}_4\text{O}_{13}$) ขึ้นอันเนื่องมาจากการทำปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ และเป็นผลมาจากการระเหยของตะกั่วทำให้เกิดสภาวะการขาดตะกั่ว (PbO-loss) และในการที่จะทำการเตรียม ผง PMN ให้มีความบริสุทธิ์สูงและได้ปริมาณสารสัมพัทธ์ที่ถูกต้อง นอกจากกระบวนการเตรียมที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นจำเป็นต้องมีการเพิ่มตะกั่ว (excess PbO) จากปริมาณสารสัมพัทธ์ในปริมาณที่เหมาะสม และต้องใช้อัตราการขึ้น/ลงอุณหภูมิการเผาที่เร็ว [33]

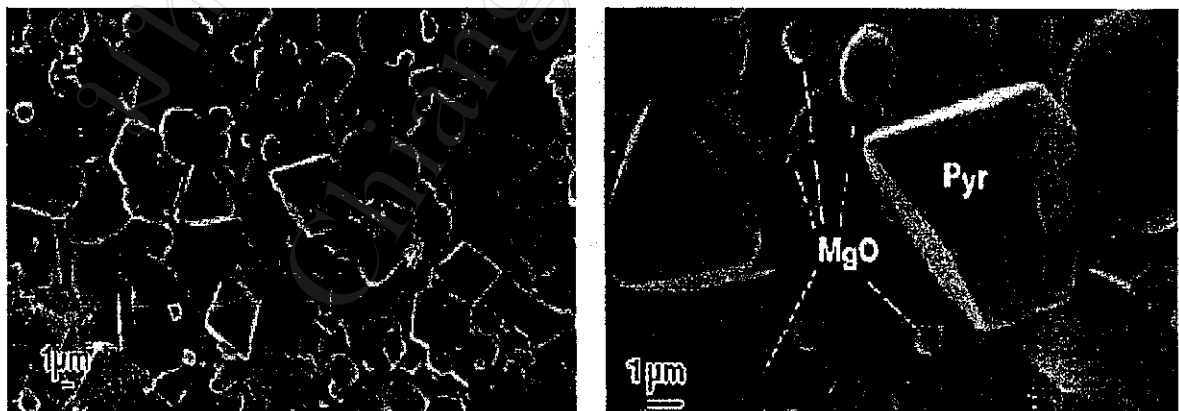
สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเผาซินเตอร์เซรามิก PMN ที่ผ่านมานั้นพบว่ามีการศึกษาโดยใช้อุณหภูมิในการเผาซินเตอร์ที่หลากหลาย โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วงระหว่าง 1000-1250°C [34-39] ถือว่าเป็นเซรามิกที่สามารถซินเตอร์ได้ที่อุณหภูมิต่ำ โดยในการเผาซินเตอร์นั้นจำเป็นต้องเผาในบรรยากาศที่มีตะกั่วมาก (PbO) เพื่อที่จะป้องกันไม่ให้เกิดเฟสไพโรคลอรัเนื่องการระเหยของตะกั่วในรูปของ PbO ออกไปจากชิ้นงานเซรามิก ตัวอย่างโครงสร้างจุลภาคของเซรามิก PMN สามารถสังเกตได้จาก

รูป 2.27

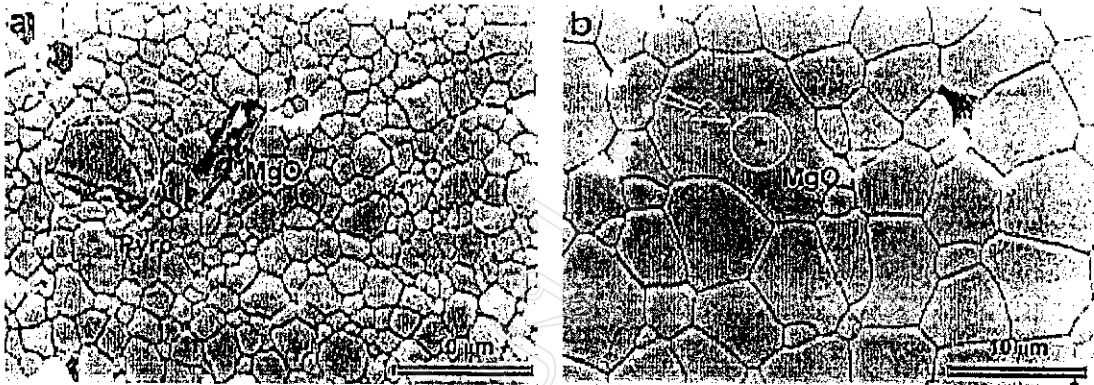


รูป 2.27 โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต [37]

แต่เนื่องจากเซรามิก PMN เป็นเซรามิกที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักจึงยากที่จะป้องกันการระเหยของตะกั่วในรูป PbO ออกจากชิ้นงานเซรามิก ดังนั้นเมื่อทำการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคแล้วจึงพบเฟสไพโรคลอไรต์เกิดขึ้นเสมอโดยเฉพาะที่บริเวณผิวหน้า (free surface) นอกจากนั้นแล้วยังพบเฟสของแมกนีเซียมออกไซด์อยู่ในบริเวณใกล้เคียงกันซึ่งก็เป็นผลมาจากการระเหยของตะกั่วเช่นเดียวกัน เฟสไพโรคลอไรต์ที่เกิดขึ้น และลักษณะของเฟสไพโรคลอไรต์สามารถตรวจสอบได้จากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูป 2.28 และ 2.29



รูป 2.28 โครงสร้างจุลภาคของเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต
บริเวณที่มีเฟสไพโรคลอไรต์และแมกนีเซียมออกไซด์ [37]



รูป 2.29 ลักษณะเฟสไพโรคลอรัลและแมกนีเซียมออกไซด์ในเซรามิกเลดแมกนีเซียมไนโอเบต [39]

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับสมบัติเชิงกลของเซรามิก PMN มีค่อนข้างน้อย งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับเซรามิก PMN ส่วนใหญ่มุ่งเน้นที่จะทำการศึกษาไปยังสมบัติเด่นทางด้านอื่นเช่น สมบัติพิโซอิเล็กทริก สมบัติไดอิเล็กทริก เป็นต้น แต่ก็ได้แสดงสมบัติเชิงกลไว้อย่างคร่าวๆดังในงานวิจัยของ Victor และคณะ [40] ที่ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบวัสดุที่มีความสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวขับเคลื่อน ที่ได้อตัวอย่างทางการค้ามาจากบริษัทต่างๆแล้วจึงนำมาทดสอบสมบัติทางด้านต่างๆเปรียบเทียบกัน จากผลการทดลองพบว่า สมบัติเชิงกลของเซรามิก PMN ที่ผลิตโดยบริษัท EDO corp. (New York, USA) มีค่ามอดูลัสของยัง อยู่ในช่วง 26-28 GPa ส่วนเซรามิก PMN ที่ผลิตโดยบริษัท AVX corp. (Myrtle Beach, USA) นั้นมีค่ามอดูลัสของยังสูงถึง 91.0 GPa แต่ในรายงานดังกล่าวไม่ได้บอกถึงองค์ประกอบทางเคมีของเซรามิกที่ทำการทดสอบ

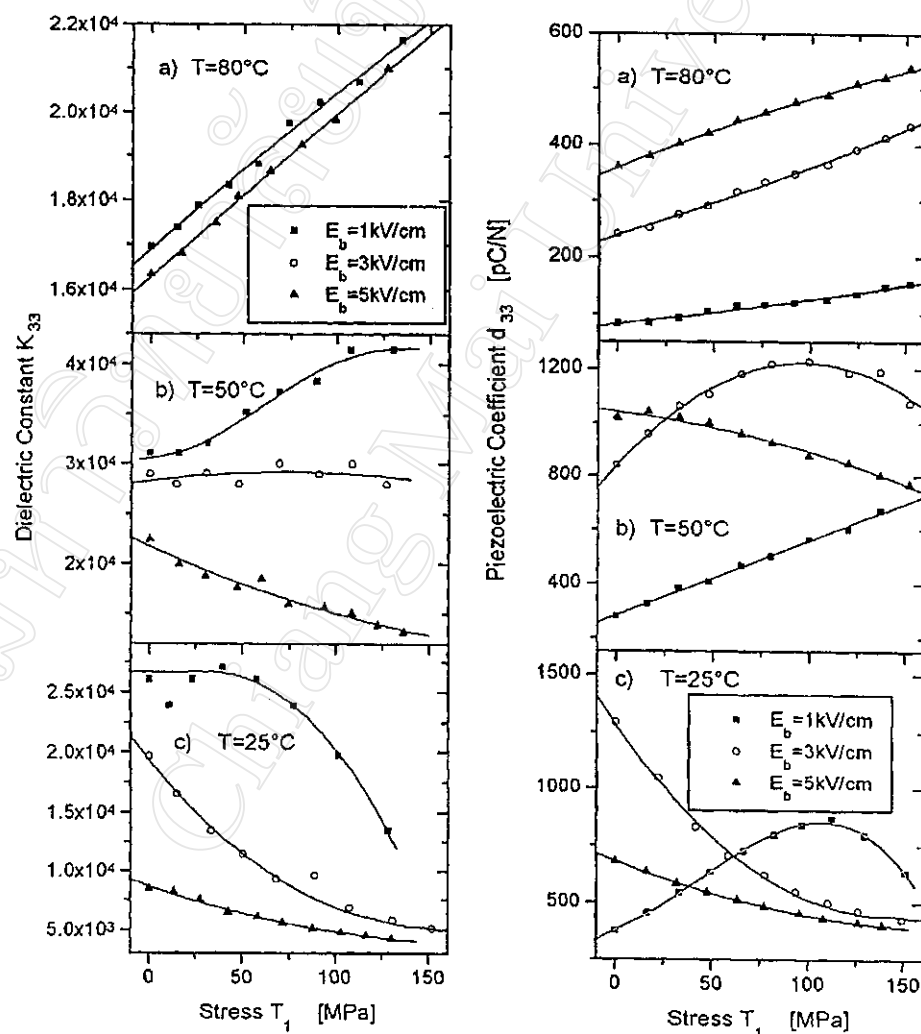
ในงานวิจัยของ Fletcher [3] ที่ทำการเปรียบเทียบสมบัติเชิงกลของกลุ่มวัสดุที่มีสมบัติพิโซอิเล็กทริก จากผลการทดลองพบว่าเซรามิก PMN มีค่าความเค้นสูงสุด (maximum stress) ที่ 72 MPa และมีค่ามอดูลัสของยังเท่ากับ 120 GPa

งานวิจัยของ Megherhi และคณะ [41] ได้ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกในระบบ PMN-PT ด้วยวิธีการกดด้วยหัวกดวิกเกอร์ จากผลการทดลองพบว่าเซรามิก 0.9PMN-0.1PT มีค่าความแข็งแรงอยู่ในช่วง 2.8-3.1 GPa และมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกอยู่ในช่วง $0.8-0.9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$

และงานวิจัยของ Nijmeijer และคณะ [9] เป็นตัวอย่างในความพยายามที่จะทำการปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเซรามิก PMN โดยทำการเตรียมเซรามิก PMN ให้อยู่ในรูปสารละลายของแข็งที่มีสูตรเป็น $\text{Pb}(\text{Mg}_{0.3}\text{Nb}_{0.6}\text{Zr}_{0.1})\text{O}_3$ (PMNZ/10) และ $\text{Pb}(\text{Mg}_{0.32}\text{Nb}_{0.65}\text{Zr}_{0.03})\text{O}_3$ (PMNZ/3) โดยใช้อุณหภูมิการเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 850-1000 °C เป็นเวลา 10 ชั่วโมงในบรรยากาศที่มีตะกั่วสูง เมื่อนำเซรามิก

PMNZ ที่เตรียมได้มาทดสอบสมบัติเชิงกลเพื่อหาค่าความต้านทานต่อรอยแตกด้วยวิธีการหัก จากผลการทดลองพบว่าเซรามิก PMNZ ที่เตรียมได้มีค่าความต้านทานต่อรอยแตกเท่ากับ $2.0 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับค่าความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก PMN ทั่วไป

ส่วนงานวิจัยของ Zhao และคณะ [42,43] เป็นการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลที่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางด้านอื่น โดยทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลที่อยู่ในรูปของความเค้นเชิงกล (mechanical stress) ที่ส่งผลถึงสมบัติไฟฟ้า ในเซรามิก PMN-PT จากผลการทดลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเชิงกลนั้นกับสมบัติทางไฟฟ้าได้ดังรูป 2.30



รูป 2.30 กราฟการเปลี่ยนแปลงของค่าคงที่ไดอิเล็กตริก (dielectric constant, K_{33}) และค่าคงที่พิโซอิเล็กตริก (piezoelectric constant, d_{33}) ที่เป็นผลมาจากความเค้นเชิงกลภายใต้สนามไฟฟ้าของเซรามิก PMN-PT [43]

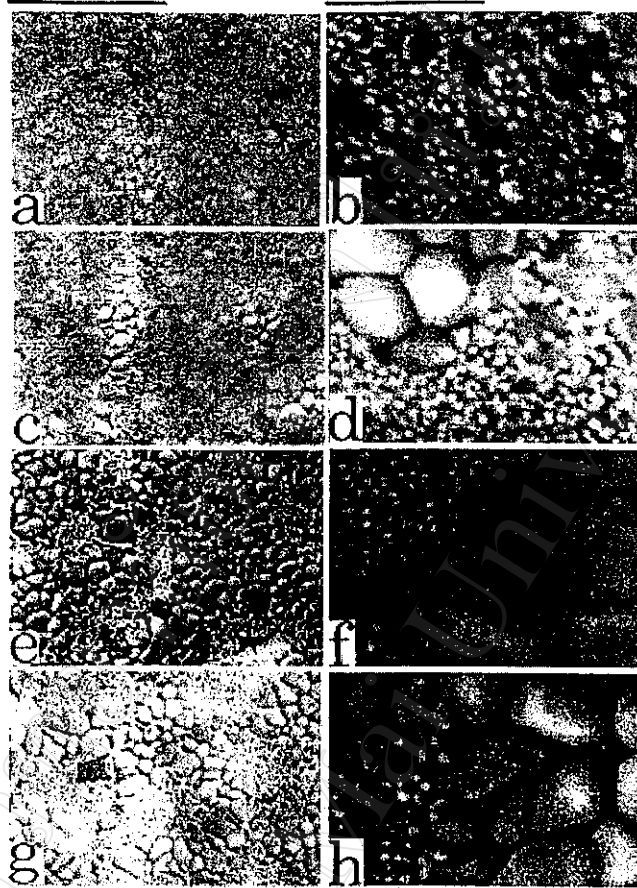
2.3 สมบัติเชิงกลของเซรามิกผสมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก

เซรามิกผสมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก จากรายงานที่ผ่านมาได้มีการเตรียมเซรามิกในระบบ PZT-PMN ค่อนข้างน้อย แต่ก็มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกในกลุ่มนี้พอสมควร ซึ่งกระบวนการเตรียมผงมีได้หลายแบบแต่ส่วนใหญ่จะเตรียมด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์ในระบบอื่น ดังเช่นในงานวิจัยของ Jun และ Kim [44] ที่ทำการศึกษาเซรามิกในระบบ เลดไอรอนทังสเตน-เลดแมกนีเซียมไนโอเบต (PFW-PMN) โดยการนำสารตัวที่อยู่ในตำแหน่ง B ของสูตร ABO_3 มาทำเป็นสารตั้งต้น (B-site precursor method) ซึ่งเริ่มจากการเตรียมผงแมกนีเซียมไอรอนไนโอเบียมทังสเตนออกไซด์ ($Mg_{x/3}Fe_{2(1-x)/3}Nb_{2x/3}W_{(1-x)/3}O_2$) ซึ่งอยู่ในรูปของสารละลายของแข็งที่มีสูตรเป็นของ $(1-x)(Fe_{2/3}W_{1/3})O_2-x(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_2$ ก่อนแล้วจึงนำผงที่ได้มาทำการเผาอีกครั้งร่วมกับตะกั่ว (PbO) เพื่อให้ได้เกิดเป็นผง PFW-PMN โดยมีสูตรเป็น $Pb(Fe_{2/3}W_{1/3})O_3-Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$ เพื่อใช้ในการเตรียมให้เป็นเซรามิกต่อไป

งานวิจัยของ Yoo และคณะ [45] ทำการศึกษาเซรามิกในระบบเลดนิเกิลทังสเตน-เลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลดเซอร์โคเนตไททาเนต (PNW-PMN-PZT) การทดลองเริ่มจากการเตรียมผงด้วยวิธีมิกซ์ออกไซด์ที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบสารตั้งต้นที่มีสูตรเป็น $Pb_{1-a}Sr_a(Ni_{1/2}W_{1/2})_{0.02}(Mn_{1/3}Nb_{2/3})Pb(Zr_xTi_{1-0.02-b})O_3 + 0.5wt\%PbO + 0.3wt\%Fe_2O_3 + 0.25\%CeO_2$ โดยทำการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 850°ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วจึงนำผงที่เตรียมมาทำการขึ้นรูปและเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 1200°ซ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

งานวิจัยของ Murty และคณะ [46] ทำการศึกษาเซรามิกผสมเลดเซอร์โคเนตไททาเนต-เลดแมกนีเซียมไนโอเบตที่เจือเงิน (Ag) (PZT-PMN) เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้ทำหม้อแปลงไฟฟ้า โดยเตรียมเซรามิกจากผงตั้งต้นที่เตรียมโดยวิธีโคลัมไบต์ เริ่มจากการเผาแคลไซน์ แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) และ ไนโอเบียมออกไซด์ (Nb_2O_5) ให้อยู่ในรูปของโคลัมไบต์ ($MgNb_2O_6$) แล้วจึงผสมตะกั่ว (PbO) และ ผงเงิน (Ag) ลงไป หลังจากนั้นจึงนำไปเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิ 950°ซ เพื่อใช้เตรียมเซรามิกโดยเผาซินเตอร์ที่อุณหภูมิระหว่าง 1225-1250°ซ

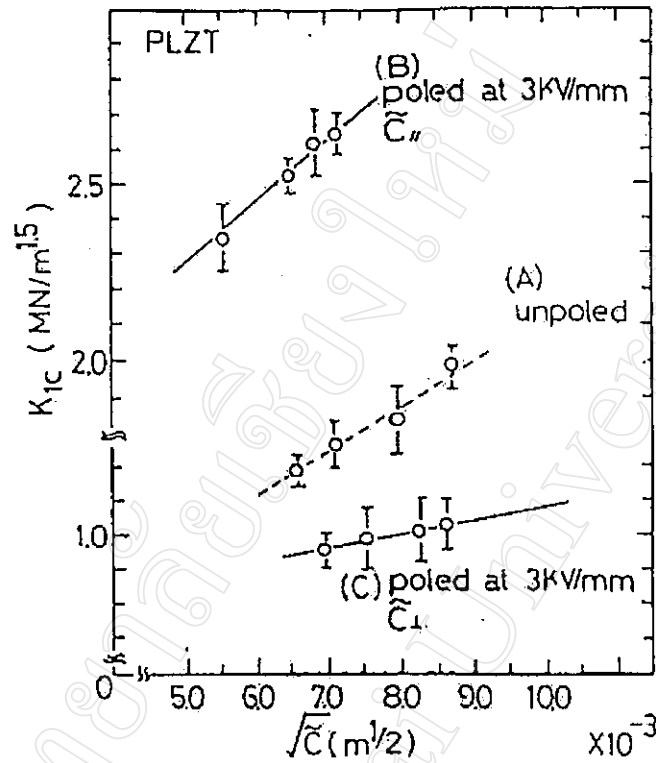
ส่วนในงานวิจัยของ Sumi และคณะ [48] เป็นการเตรียมเซรามิกในระบบ PZT-PMN ที่อยู่ในรูปของฟิล์มบาง (thin film) ที่มีสูตรโมเลกุลเป็น $Pb(Zr_{0.56}Ti_{0.44})_{0.90}(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.10}O_3$ ด้วยวิธีโซลเจล จากผลการทดลองพบว่าขนาดของเกรนที่ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้อง SEM แปรผันตามความหนาของแผ่นฟิล์ม PZT-PMN ดังแสดงในรูป 2.31



รูป 2.31 โครงสร้างจุลภาคของฟิล์ม PZT-PMN (a,b) ความหนาของแผ่นฟิล์ม 0.22 ไมโครเมตร (c,d) ความหนา 0.44 ไมโครเมตร (e,f) ความหนา 0.66 ไมโครเมตร และ (g,h) ความหนา 0.73 ไมโครเมตร[48]

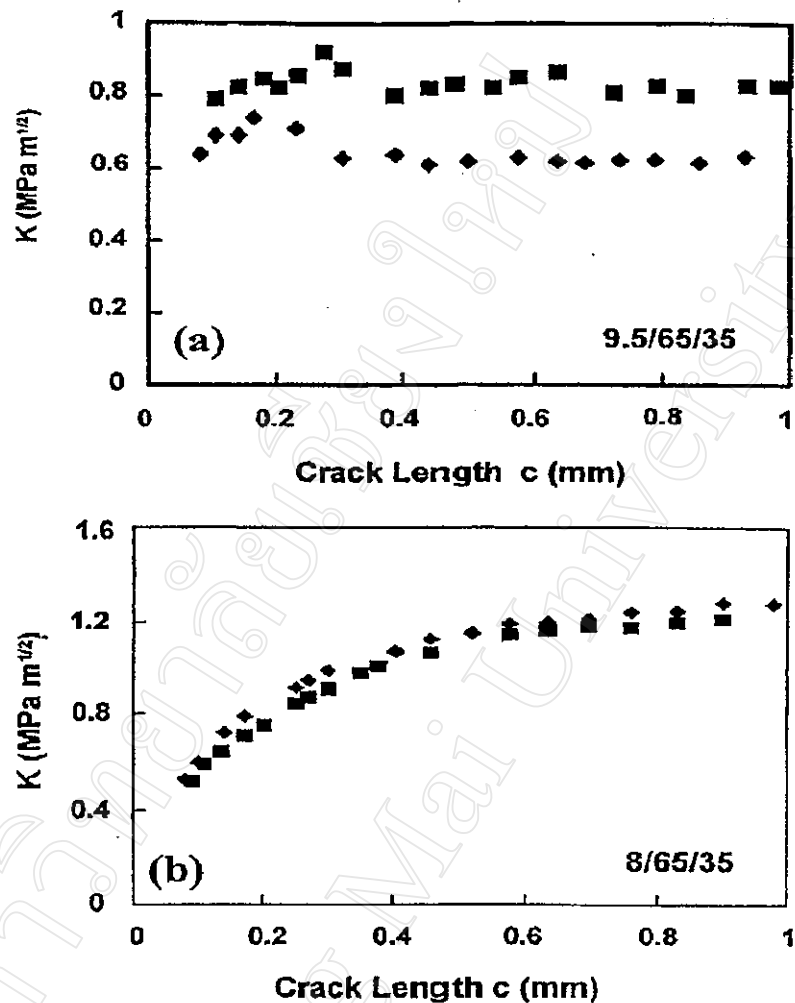
สมบัติเชิงกลของเซรามิกผสมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักนั้นได้มีการศึกษาอยู่พอสมควรโดยเซรามิกที่ทำการศึกษาล้วนใหญ่อยู่ในรูปของสารละลายของแข็ง (solid solution) ดังเช่น

งานวิจัยของ Okazaki [50] เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดแลนทานัมเซอร์โคเนตไททาเนต $((\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$: PLZT) ที่เตรียมโดยวิธีการอัดด้วยความร้อนสูง (hot pressing) โดยทำการศึกษาสมบัติเชิงกลที่อยู่ในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแตก (K_{Ic}) กับรากที่สองของความยาวรอยแตก ($\sqrt{c}$) จากผลการทดลองพบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง K_{Ic} กับ $\sqrt{c}$ เป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้นโดยมีลักษณะของกราฟความสัมพันธ์แตกต่างกันตามสถานะในการทดสอบของเซรามิก (การทำซ้ำ และสนามไฟฟ้า) ดังแสดงในรูป 2.32



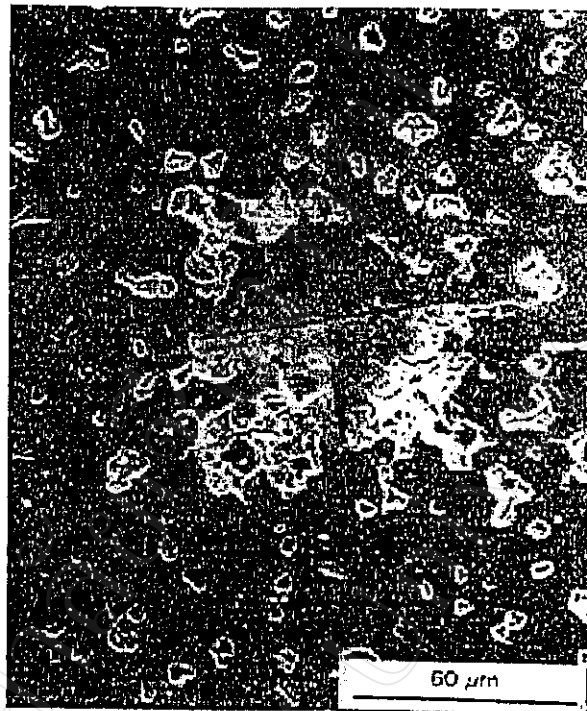
รูป 2.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานต่อรอยแตก (K_{Ic}) กับรากที่สองของความยาวรอยแตก ($\sqrt{c}$) ของเซรามิก PLZT [50] (A) ชิ้นงานที่ยังไม่ผ่านการทำให้ขั้ว (B) ชิ้นงานที่ผ่านการทำให้ขั้วภายใต้สนามไฟฟ้าขนาด 3 KV/mm ทิศทางขนานกับรอยแตก (C) ชิ้นงานที่ผ่านการทำให้ขั้วภายใต้สนามไฟฟ้าขนาด 3 KV/mm ทิศทางตั้งฉากกับรอยแตก

จากงานวิจัยของ Chen และคณะ [51] เป็นการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิก PLZT ในรูปของกราฟพฤติกรรมความต้านทาน โดยทำการเตรียมเซรามิกที่มีสัดส่วนองค์ประกอบ ร้อยละของแลนทานัม/เลดเซอร์โคเนต/เลดไททาเนต (%La/PZ/PT) เท่ากับ 8/65/35 และ 9.5/65/35 หลังจากทำการทดสอบสมบัติเชิงกลด้วยวิธีการหัก (bending) ที่อุณหภูมิห้อง พบว่าเซรามิก PLZT 9.5/65/35 มีค่าความต้านทานต่อรอยแตกสูงสุดเท่ากับ $0.9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ และ เซรามิก PLZT 8/65/35 นั้นมีค่าความต้านทานต่อรอยแตกสูงสุดประมาณ $1.2 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ ซึ่งมีลักษณะของกราฟพฤติกรรมความต้านทานแสดงดังรูป 2.33



รูป 2.33 กราฟพฤติกรรมความต้านทานต่อรอยแตกของเซรามิก PLZT [51]

ในงานวิจัยของ Ricote และคณะ [52] ที่ทำการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกในระบบเลดแคลเซียมไททาเนต (PTC) โดยทำการเตรียมเซรามิกให้อยู่ในรูปของสารละลายของแข็งโดยมีสูตรเป็น $Pb_{1-x}Ca_x[(Co_{0.5}W_{0.5})_{0.05}Ti_{0.95}] + 1\%MnO$ เมื่อ x เท่ากับ 0.24 0.26 และ 0.35 (PTC 24/76 PTC26/74 และ PTC 35/65) ที่ผ่านการเผาซินเตอร์ในช่วงอุณหภูมิ 1000-1100 $^{\circ}$ C แล้วจึงทำการทดสอบสมบัติเชิงกลของเซรามิกโดยใช้วิธีการกดด้วยหัวกดวิกเกอร์ ลักษณะรอยกดของเซรามิกผ่านการทดสอบสมบัติเชิงกลแล้วแสดงดังรูป 2.34 และเซรามิกมีค่าสมบัติเชิงกลดังแสดงในตาราง 2.4



รูป 2.34 รอยกัดด้วยน้ำฟลูออโรโบรอนบนเซรามิก PTC [52]

ตาราง 2.4 สมบัติเชิงกลของเซรามิกเลดแคลเซียมไททาเนต (PTC) [52]

เซรามิก PTC	อุณหภูมิซินเตอร์ ($^{\circ}\text{C}$)	มอดุลัสของยัง (GPa)	ความแข็ง (GPa)	ความต้านทานต่อรอยแตก $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$
24/76	1000 (3 ชั่วโมง)	142	3.4	3.9
24/76	1050 (3 ชั่วโมง)	65	2.8	-
26/74	1000 (5 ชั่วโมง)	137	2.3	4.3
26/74	1050 (5 ชั่วโมง)	109	3.3	3.1
26/74	1100 (5 ชั่วโมง)	107	2.5	3.6
35/65	1000 (3 ชั่วโมง)	115	3.3	3.0
35/65	1050 (3 ชั่วโมง)	96	1.7	-

และจากรายงานที่ผ่านมาสามารถสรุปสมบัติเชิงกลของเซรามิกผสมที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลักได้ดังตาราง 2.5

ตาราง 2.5 สมบัติเชิงกลของเซรามิกกลุ่มที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบหลัก

วัสดุ	ความแข็งวิกเกอร์ (H_V , GPa)	ค่าความต้านทานต่อรอยแตก (K_{Ic} , MPa.m ^{1/2})	เอกสารอ้างอิง
PCT (0.7Pb0.3Ca)	4.8	1.5	[30]
PLZT (2/50/50) (อัดด้วยความร้อนสูง)	4.7	-	[50]
PZFTU	2.6-3.2	0.6-0.7	[49]
PMN-10PT	2.8-3.1	0.8-0.9	[41]

สมบัติเชิงกลของเซรามิกดังที่ได้กล่าวมาในบทนี้ สามารถทำการทดสอบได้หลายรูปแบบทั้งในลักษณะของการทดสอบด้วยการหัก การอัด และวิธีการทดสอบด้วยหัวกดเป็นต้น ซึ่งการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกแทบทั้งหมดมุ่งเป้าที่จะทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง องค์ประกอบทางเคมีและโครงสร้างจุลภาค กับ สมบัติเชิงกล จะเห็นได้จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้พยายามอธิบายค่าสมบัติเชิงกลที่เปลี่ยนแปลงตามองค์ประกอบทางเคมีหรือลักษณะโครงสร้างทางจุลภาค แต่ข้อควรระวังที่สำคัญในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาสมบัติเชิงกลของเซรามิกคือ ต้องให้ความสำคัญกับการเตรียมชิ้นงานตัวอย่างโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ต้องพยายามควบคุมปัจจัยอื่นๆ ที่นอกเหนือจากปัจจัยหลักที่จะทำการศึกษาเพื่อลดผลกระทบที่จะเกิดขึ้นจากปัจจัยเหล่านั้น และทำให้สามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่ทำการศึกษาได้อย่างถูกต้อง