

บทที่ 2

การทบทวนเอกสารทางวิชาการ

บทนี้จะกล่าวถึงประวัติการค้นคว้าและพัฒนาสารพิโซอิเล็กทริก พิโซเซรามิก เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต พอลิเอทิลีน วัสดุผสมพิโซอิเล็กทริกและวิธีการเตรียมวัสดุผสมแบบต่างๆ โดยมีรายละเอียดตามลำดับดังต่อไปนี้

2.1 ประวัติการค้นคว้าและพัฒนาสารพิโซอิเล็กทริก (piezoelectrics)

ในปี ค.ศ.1880-1882 Pierre และ Jacques Curie [3] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริกกับโครงสร้างของผลึก จากการตรวจวัดประจุไฟฟ้าที่ผิวของผลึกเมื่อทำการให้แรงกด โดยอาศัยเครื่องมือที่ประกอบด้วยแผ่นดีบุก กาว เส้นลวด และแม่เหล็ก และได้พบความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางไฟฟ้ากับการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและระหว่างแรงกดกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผลึก ซึ่งสมบัติต่างๆ ที่ Pierre และ Jacques Curie ได้ค้นพบนั้นในปัจจุบันเรียกว่า สมบัติพิโซอิเล็กทริก

และในปี ค.ศ.1881 Lippmann [3] ก็ได้ศึกษาถึงสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ของปรากฏการณ์พิโซอิเล็กทริก และค้นพบสมการที่สามารถอธิบายถึงปรากฏการณ์โดยตรง (direct effect) และปรากฏการณ์ย้อนกลับ (converse effect) ในสารพิโซอิเล็กทริก

ต่อมาในปี ค.ศ.1882-1917 [4] กลุ่มนักวิทยาศาสตร์ชาวยุโรปได้ทดลองนำสารพิโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้งาน โดยได้เริ่มทำการค้นคว้าและทดลองเกี่ยวกับสมบัติพิโซอิเล็กทริกทำให้เกิดการจัดแบ่งประเภทของผลึกออกเป็นกลุ่มๆ และพบว่ามีเพียง 20 กลุ่มจากจำนวนทั้งหมด 32 กลุ่มผลึกที่สามารถแสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริก

โดยในปี ค.ศ.1917 Langevin และคณะ [4] ได้คิดค้นการนำสารพิโซอิเล็กทริกมาประยุกต์ใช้ในงานด้านการสืบค้นหาเรือดำน้ำโดยใช้ผลึกบางๆ ของหินเขี้ยวหนุมาน (quartz) มาทำเป็นทรานสดิวเซอร์ (transducer) ต่อกับแผ่นเหล็ก แล้วทำให้เกิดการกำทอนในช่วง 50 กิโลเฮิร์ต ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนางานด้านโซนาร์ (sonar) และวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ต่างๆ

ต่อมาในปี ค.ศ.1920-1940 [3,4] เป็นช่วงที่มีการนำสารพิโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ อย่างมากมาย เช่น การนำหินเขี้ยวหนุมานไปประยุกต์ใช้ในการตรวจหารอยแตก ร้าวในวัสดุ และการวัดความดันเพื่อที่จะหาการจุดระเบิดในเครื่องยนต์ โดยในช่วงสงครามโลก

ครั้งที่ 1 นี้ได้มีการประดิษฐ์คิดค้นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ อีกมากมาย จากการนำสารพิโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ เช่น ไมโครโฟน (microphone) ตัวขับเคลื่อน (actuator) และตัวกรองสัญญาณ (signal filter) เป็นต้น

ในช่วงปี ค.ศ.1940-1965 [5] ซึ่งรวมถึงช่วงสงครามโลกครั้งที่ 2 กลุ่มนักวิจัยต่างๆ ของทั้งสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และสหภาพโซเวียตรัสเซีย ก็ได้ทำการพัฒนาสารไดอิเล็กทริกเซรามิกควบคู่ไปกับการพัฒนาสารพิโซอิเล็กทริกเซรามิก และพอถึงช่วงหลังสงครามโลก งานวิจัยและพัฒนาสารพิโซอิเล็กทริกก็ได้เริ่มเข้าไปสู่วงการอุตสาหกรรมอย่างเปิดเผย โดยสหรัฐอเมริกาและญี่ปุ่นได้ทำหน้าที่เป็นประเทศผู้นำในการนำเอาสารพิโซอิเล็กทริกไปผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางการค้าต่างๆ ออกมาอย่างมากมาย

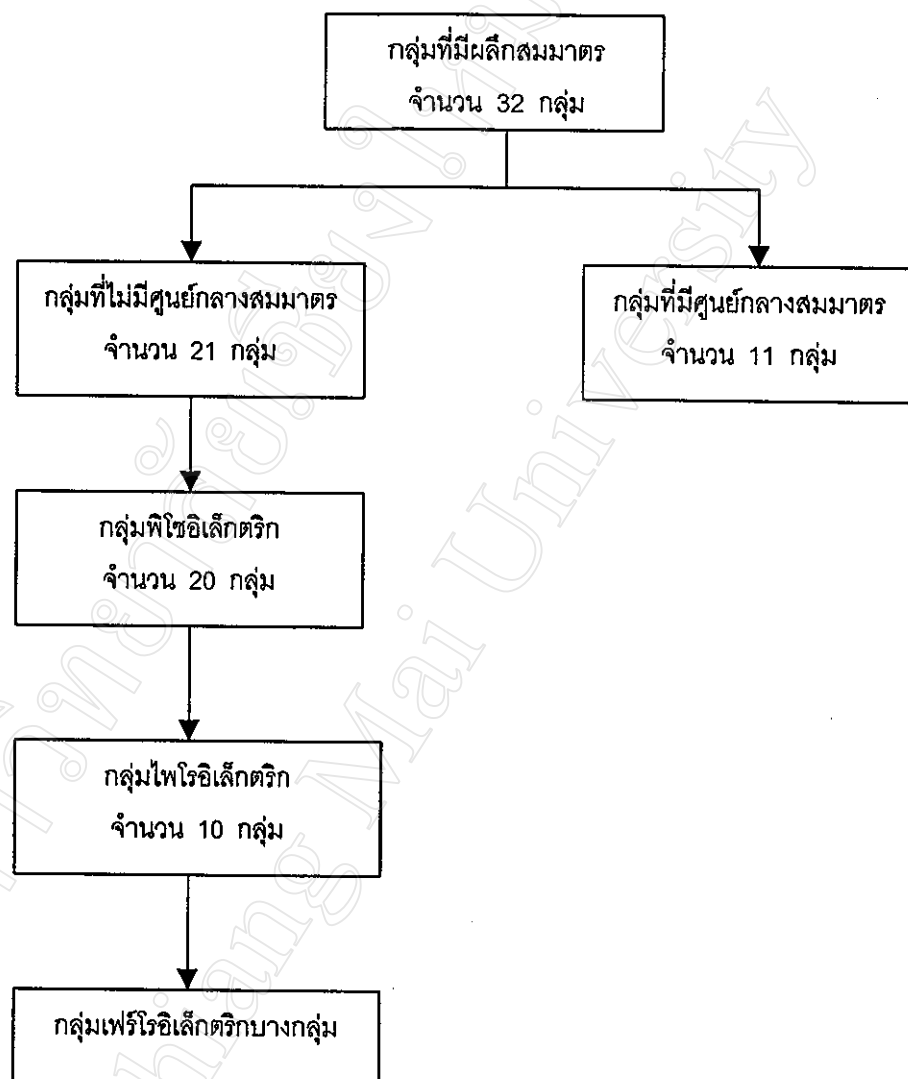


รูป 2.1 ตัวอย่างทรานสดิวเซอร์ที่ผลิตจากสารพิโซอิเล็กทริกแบบต่างๆ [6]

2.2 พิโซเซรามิก (piezoceramics)

วัสดุพิโซอิเล็กทริกคือวัสดุที่สามารถเกิดกระบวนการโพลาไรเซชัน (ความมีขั้วทางไฟฟ้า) ขึ้น เมื่อได้รับแรงกล หรือสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงของขนาดและปริมาตรได้เมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้า ซึ่งสารที่สามารถแสดงสมบัติพิโซอิเล็กทริกได้นั้นจะต้องมีโครงสร้างผลึกของเซลล์หน่วย (unit cell) แบบไม่มีศูนย์กลางสมมาตร (noncentrosymmetric) โดยเมื่อทำการพิจารณาสารจากการใช้ลักษณะทางสมมาตรของผลึกแล้วพบว่าสามารถทำการจัดจำแนกชนิดของสารออกได้เป็น 32 กลุ่มด้วยกัน ซึ่งใน 32 กลุ่มนี้ประกอบด้วยสารพวกที่มีศูนย์กลางสมมาตรจำนวน 11 กลุ่ม และพวกที่ไม่มีศูนย์กลางสมมาตรจำนวน 21 กลุ่ม โดยในจำนวน 21 กลุ่มนี้จะมีอยู่เพียง 20 กลุ่มเท่านั้นที่สามารถแสดงสมบัติทางพิโซอิเล็กทริกได้และเรียกว่ส่ดุกลุ่มนี้ว่าสารพิโซอิเล็กทริก (piezoelectrics) ดังแสดงในรูป 2.2

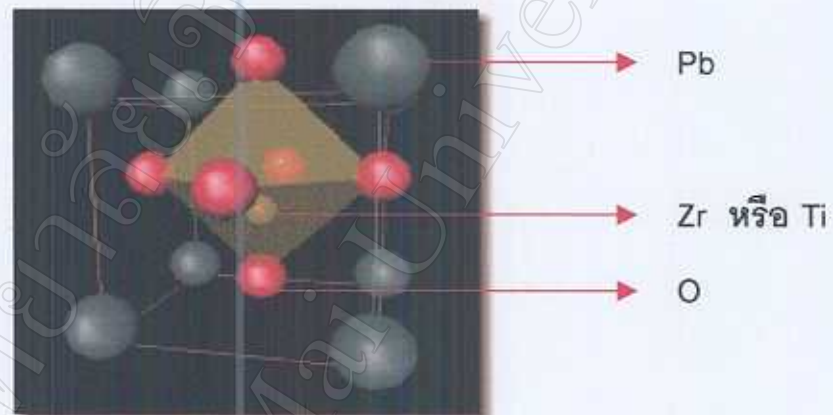
สารที่มีเซลล์หน่วยที่มีศูนย์กลางสมมาตร เมื่อเกิดความเครียดขึ้น ผลของการโพลาไรเซชันภายในเซลล์จะหักล้างกันหมดพอดี ส่งผลทำให้สารประเภทนี้ไม่สามารถแสดงสมบัติทางพิโซอิเล็กทริกได้ และใน 20 กลุ่มที่เป็นสารพิโซอิเล็กทริกนั้นจะมีอยู่เพียง 10 กลุ่มเท่านั้นที่แสดงพฤติกรรมการเกิดโพลาไรเซชันด้วยตัวเอง (spontaneous polarization) ได้ โดยไม่ต้องมีการให้สนามไฟฟ้าเข้าไปช่วยแต่อย่างใด โดยมีการเรียกสาร 10 กลุ่มนี้ว่า สารไพโรอิเล็กทริก (pyroelectrics) ซึ่งสามารถจัดแบ่งย่อยลงไปอีกได้เป็นสารพวกเฟอร์โรอิเล็กทริก (ferroelectrics) โดยการพิจารณาจากความสามารถในการปรับเปลี่ยนทิศทางการเกิดโพลาไรเซชันด้วยสนามไฟฟ้าภายนอก [7]



รูป 2.2 การจัดจำแนกประเภทของวัสดุโดยใช้ลักษณะทางสมมาตรของผลึก [7]

ในปัจจุบันได้มีสารพิโซเซรามิกจำนวนมากที่ได้ถูกพัฒนาขึ้นมา และมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ อย่างมากมาย อาทิเช่น เลดไทเทเนต (PbTiO_3) หรือ PT เลดเมตาไนโอเบต (PbNb_2O_6) หรือ PN เลดแมกนีเซียมไนโอเบต ($\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$) หรือ PMN และ เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$) หรือ PZT เป็นต้น [7]

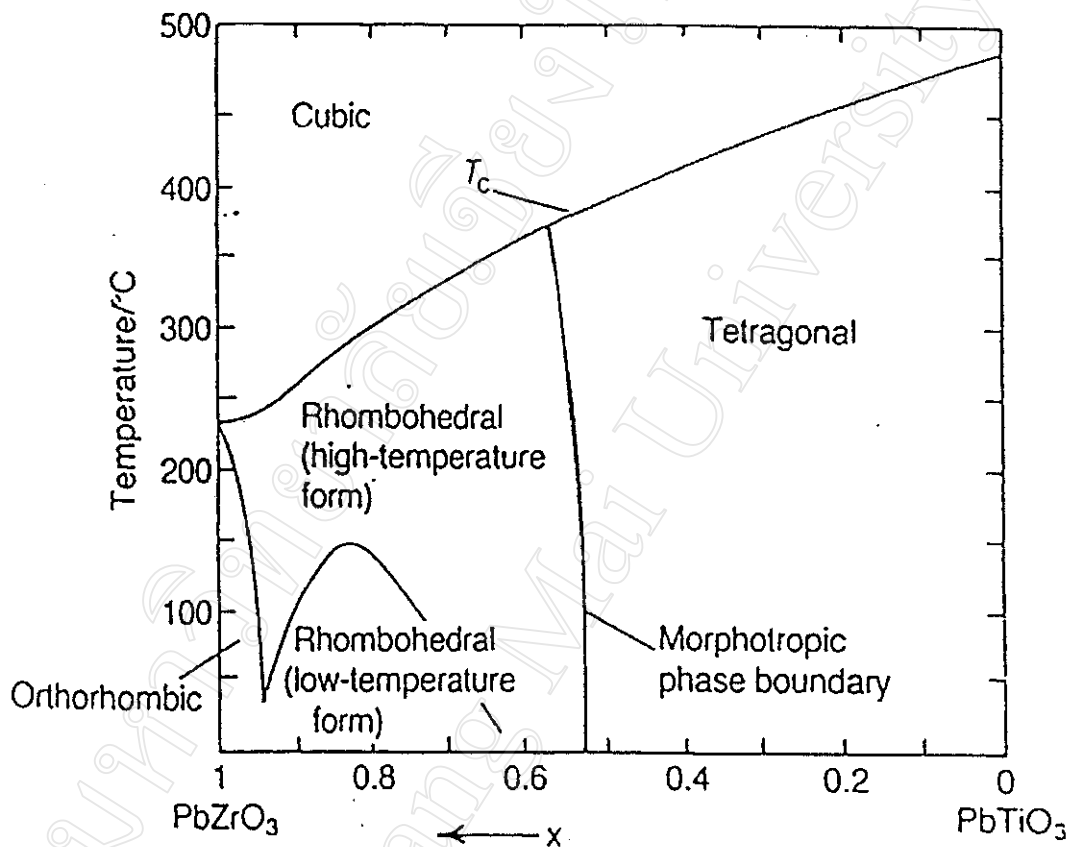
เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต ($\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$) หรือที่เรียกกันว่า พีแซดที (PZT) เป็นสารประกอบของออกไซด์ที่อยู่ในกลุ่มของสารเฟอร์โรอิเล็กตริก (ferroelectrics) ที่มีโครงสร้างผลึกคล้ายกับโครงสร้างของแร่แคลเซียมไทเทเนต (CaTiO_3) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่าเพอโรฟสไกต์ (perovskite) โดยมีลักษณะดังแสดงในรูป 2.3



รูป 2.3 เซลล์หน่วยแบบเพอโรฟสไกต์ของสาร PZT [8]

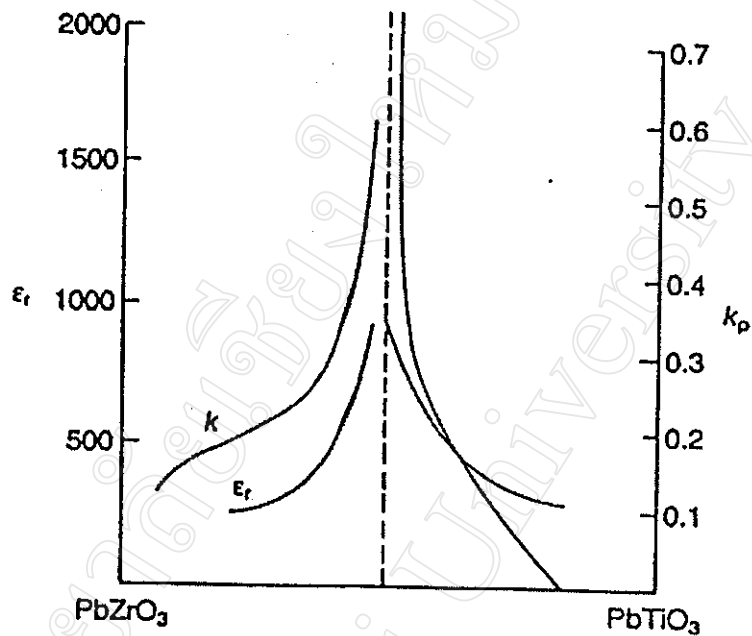
เซรามิก PZT มีอุณหภูมิคูรี (Curie temperature: T_c) อยู่ที่ประมาณ 390°C ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิคูรี PZT จะมีเฟสเป็นคิวบิก (cubic) และแสดงสมบัติพาราอิเล็กตริก (paraelectric) ส่วนที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิคูรีนั้น PZT อาจจะมีเฟสเป็นแบบเตตระโกนอล (tetragonal) หรือรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนระหว่าง Zr/Ti เป็นสำคัญ และสามารถแสดงสมบัติเฟอร์โรอิเล็กตริก (ferroelectric) โดยในกรณีของ PZT ที่มีเฟสเป็นแบบเตตระโกนอลนั้นการเกิดโพลาไรเซชันจะอยู่ในทิศทาง $\langle 100 \rangle$ ส่วนในกรณีของเฟสรอมโบฮีดรอลนั้นการเกิดโพลาไรเซชันจะอยู่ในทิศทาง $\langle 111 \rangle$ โดยสาร PZT ที่มีสัดส่วนขององค์ประกอบ Zr/Ti อยู่ ณ บริเวณที่เรียกว่า มอร์โฟโทรปิกเฟสบาแดรี (Morphotropic Phase Boundary: MPB) ดังรูป 2.4 จะสามารถแสดงสมบัติทางด้านพิโซอิเล็กตริกและไดอิเล็กตริกที่เหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานมากที่สุด [9,10]

โครงสร้างผลึกของสาร PZT นั้นจะเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิและอัตราส่วนของ Zr ต่อ Ti ที่เป็นองค์ประกอบอยู่ จากรูปที่ 2.5 พบว่าอัตราส่วนของ Zr ต่อ Ti เท่ากับ 1 ต่อ 1 จะมีสัมประสิทธิ์คู่ควมพิโซอิเล็กตริก (k) สูงสุดจึงนิยมนำอัตราส่วนนี้มาใช้ในการการค้า [11]

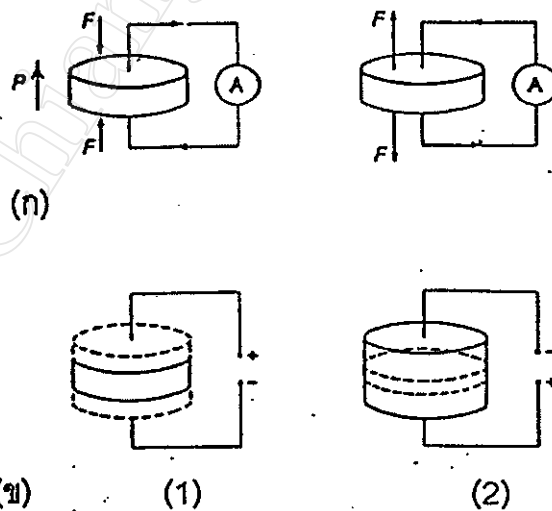


รูป 2.4 เฟสไดอะแกรมของสารในระบบ PbZrO_3 - PbTiO_3 [11]

เป็นที่ทราบกันดีว่าเซรามิก PZT นั้นสามารถแสดงสมบัติพิโซอิเล็กตริก (piezoelectric) ได้ดีมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารตัวอื่นๆ ในกลุ่มเดียวกัน กล่าวคือ เมื่อสาร PZT ถูกแรงกลมากระทำหรือเกิดความเค้น (stress) ขึ้นจะส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโพลาไรเซชัน (polarization) ขึ้นในวัสดุนำไปสู่การผลิตประจุไฟฟ้าขึ้นมา เรียกว่า กระบวนการแบบปรากฏการณ์ตรง (direct effect) และในทำนองกลับกัน ถ้าสาร PZT ได้รับสนามไฟฟ้าจากภายนอกก็จะเกิดการเปลี่ยนแปลงขนาดและรูปร่างในรูปของการยืดและหดตัวที่เรียกว่า กระบวนการแบบปรากฏการณ์ย้อนกลับ (converse effect) [11] ตามลำดับ ดังแสดงในรูป 2.6



รูป 2.5 ค่าสัมประสิทธิ์คู่ความพิโซอิเล็กตริก (k) และค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ของสารในระบบ PbZrO_3 - PbTiO_3 [11]



รูป 2.6 ปรากฏการณ์ (ก) ตรง และ (ข) ย้อนกลับ เมื่อ (1) แทนกรณีที่สารเกิดการหดตัว และ (2) เกิดการขยายตัว [11]

นอกจากเซรามิก PZT จะเป็นวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์ทางพิโซอิเล็กตริก (d) และค่าสัมประสิทธิ์คู่ควมพิโซอิเล็กตริกที่สูงมาก แล้วยังสามารถทำให้เกิดความมีขั้วทางไฟฟ้า (poling) ขึ้นได้ง่ายและมีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r) ที่ค่อนข้างสูงอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่กว้างพอสมควรอีกด้วย จึงทำให้เซรามิก PZT เป็นที่นิยมอย่างมากในการนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น ตัวแปลงไฟฟ้าพลังงาน (piezoelectric transducer) อุปกรณ์ที่มีสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเป็นบวก (Positive Temperature Coefficient device หรือ PTC) ตัวปิดเปิดแสงไฟฟ้า (electrooptics lightvalve) ตัวขับเคลื่อนระดับไมโคร (microactuators) และตัวตรวจรู้ทางไฟฟ้าอุณหภูมิสูง (pyroelectric sensor) เป็นต้น [6,12] ในปัจจุบันนี้การพัฒนาศาสตร์พิโซอิเล็กตริกส่วนใหญ่จะกระทำให้อยู่ในรูปของวัสดุผสม (composite) ด้วยการผสมสารพิโซเซรามิกเข้ากับพอลิเมอร์เมทริกซ์ชนิดต่างๆ แล้วจึงนำมาใช้งาน เช่น ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ ทหรานสดิวเซอร์ [13] สำหรับถ่ายถอดสัญญาณข้อมูลจากกรรมกรมาแสดงผลที่จอภาพภายนอกให้แพทย์วินิจฉัยได้ เป็นต้น [14]

2.3 พอลิเอทิลีน (polyethylene)

พอลิเอทิลีนหรือที่เรียกกันว่า พีอี (PE) เป็นพลาสติกประเภทเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น ขวดพลาสติก ของเด็กเล่น กระเป๋า และอุปกรณ์ในครัวเรือน เนื่องจากเป็นวัสดุที่ขึ้นรูปได้ง่ายเมื่อถูกความร้อน อีกทั้งยังสามารถหลอมนำกลับมาใช้งานได้ใหม่และมีโครงสร้างที่ไม่สลายซับซ้อน [15]

ในปี ค.ศ.1933 Fawcett และ Gibson ได้ทำการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีน (ethylene) และเบนซอลดีไฮด์ (benzaldehyde) ภายใต้ความดันสูงและประสบความสำเร็จในการเปลี่ยนแปลงพอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง การผลิตพอลิเอทิลีนโดยใช้ความดันสูงทางการค้าเริ่มเกิดขึ้นครั้งแรกในปี ค.ศ.1939 ในปี ค.ศ. 1955 บริษัท Ziegler ของเยอรมันได้ทำการผลิตพอลิเอทิลีนโดยใช้ไอน้ำ ที่เรียกว่าวิธี Ziegler ต่อมาบริษัท Phillips Petroleum และบริษัท Standard Oil ของสหรัฐอเมริกา ได้คิดค้นวิธีการผลิตพอลิเอทิลีนแบบใหม่ ได้แก่วิธี Phillips และวิธี Standard Oil ขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1957 และ 1961 ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามวิธีการผลิตพอลิเอทิลีนภายใต้ความดันสูงก็ยังคงเป็นที่นิยมใช้กันในปัจจุบัน [16]

การจำแนกประเภทของพอลิเอทิลีนในทางการค้าจะอาศัยการพิจารณาจากโครงสร้างและคุณสมบัติที่จะนำไปใช้งานด้านต่างๆ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 5 กลุ่ม [17] คือ

1. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (low density polyethylene : LDPE)
2. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (high density polyethylene : HDPE)
3. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น (linear low density polyethylene :LLDPE)
4. พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก (very low density polyethylene : VLDPE) และ
5. พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (high and ultrahigh molecular weight polyethylene : HMWPE, UMWPE)

2.3.1 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำ (LDPE)

พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำหรืออาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนที่มีสาขาไซ (branched polyethylene) เพราะมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยสายโซ่ยาวของ CH_2 ที่มีการแตกกิ่งก้านสาขา หรือเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันสูงเพราะกระบวนการผลิตต้องใช้ความดันสูงนั่นเอง [18] (ดังแสดงในรูป 2.7)



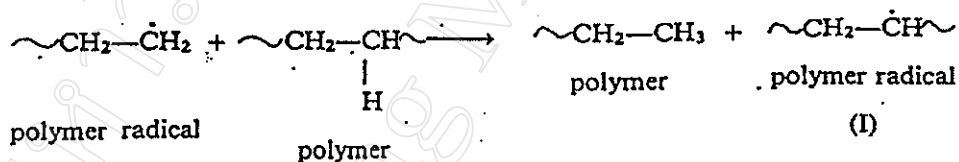
รูป 2.7 รูปแบบจำลองโครงสร้างของพอลิเอทิลีน [19]

โมโนเมอร์ของเอทิลีนและไวนิลที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) เกือบทั้งหมดมาจากแหล่งน้ำมันดิบหรือปิโตรเลียม และก๊าซธรรมชาติอุตสาหกรรมเตรียมพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำสามารถทำได้หลายวิธี โดยแต่ละวิธีจะ

ต้องใช้ความดันสูงมากๆ เช่น 1,000-3,000 บรรยากาศ และใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 80-300 °ซ ซึ่งโดยทั่วไปจะพบว่ามีการออกซิเจนปนอยู่ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและจะมีความร้อนคายออกมาเป็นจำนวนมาก ถ้าทำการควบคุมได้ไม่ดีก็อาจจะทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ และถ้าต้องการพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงมากๆ ก็ต้องใช้โมโนเมอร์ที่มีความบริสุทธิ์สูงๆ เพราะสารปนเปื้อนเช่น ไฮโดรเจนและอะซิทีลีน (C_2H_2) สามารถจะทำหน้าที่เป็นตัวย่ำลูกโซ่ได้ นอกจากนี้การเตรียมพอลิเอทิลีนก็อาจทำได้ในรูปของสารละลายโดยใช้เบนซีนหรือคลอโรเบนซีนเป็นตัวทำละลาย

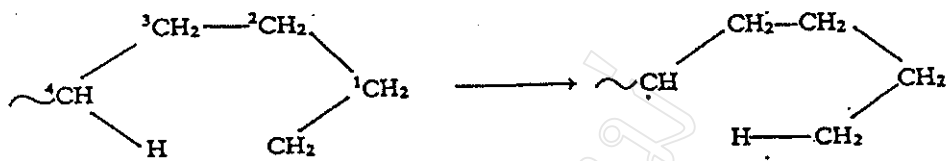
จากการศึกษาโครงสร้างของพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำด้วยการใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (infrared spectroscopy) พบว่าพอลิเมอร์ประเภทนี้มีสาขาโซ่ที่เป็นไฮโดรคาร์บอนที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ โดยที่สาขาของโมเลกุลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี คือ

1) วิธีการย่ำลูกโซ่ระหว่างโมเลกุล (intermolecular chain transfer) วิธีนี้พอลิเมอร์เรดิคัล (polymer radical) จะทำหน้าที่ย่ำลูกโซ่ให้กับพอลิเมอร์ในระบบ

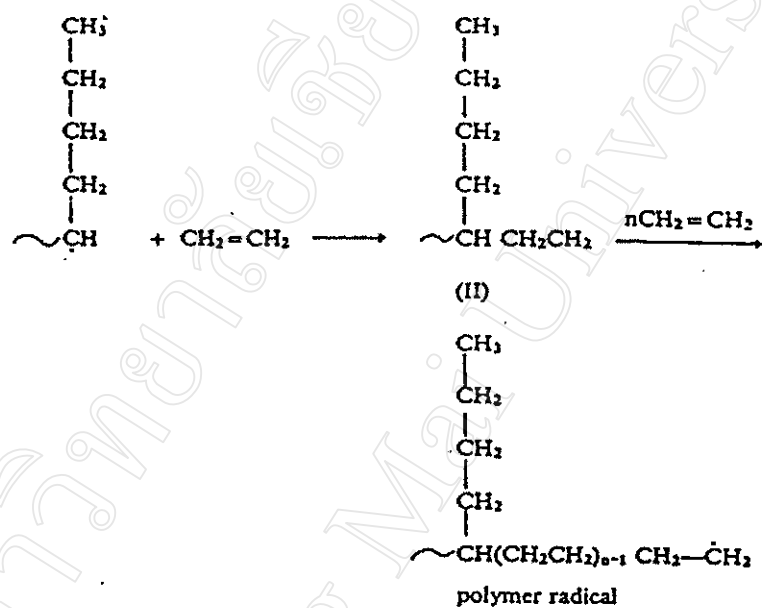


โดยการย่ำลูกโซ่แบบนี้จะทำให้เกิดเรดิคัลใหม่ที่มีอิสระ (I) ซึ่งสามารถจะทำปฏิกิริยาต่อไปได้อีกโดย สายโซ่ของพอลิเมอร์อาจมีความยาวพอๆ กับสายโซ่ที่เป็นสันหลัง (back bone) ของพอลิเมอร์นั้นได้

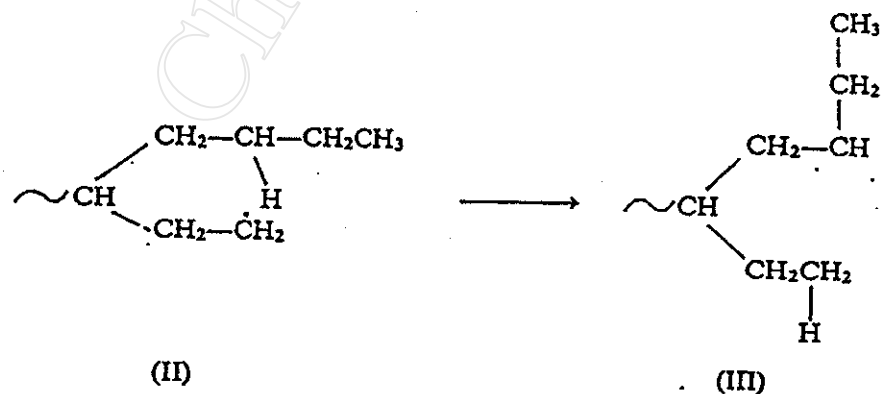
2) การย่ำลูกโซ่ภายในโมเลกุล (intramolecular chain transfer) วิธีนี้สายโซ่พอลิเมอร์เรดิคัลจะทำหน้าที่ย่ำเรดิคัลอิสระที่อยู่ปลายโซ่ให้กับคาร์บอนตัวที่ 4 ซึ่งจะใช้วิธีการนับจากคาร์บอนเรดิคัลที่อยู่ปลายโซ่ จะเกิดขึ้นได้สะดวกเพราะทรานซิชันสเตต (transition state) ของกระบวนการนี้เป็นแบบวงแหวนที่มีจำนวนอะตอมของวงแหวนเท่ากับ 6 ดังนี้



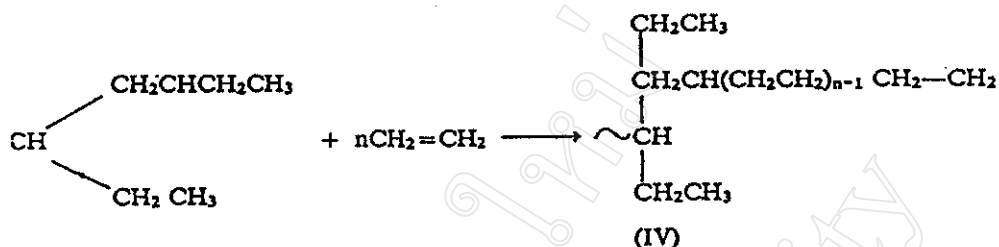
เรดิคอลอิสระใหม่สามารถเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวต่อไปได้อีก



นอกจากนี้พอลิเมอร์เรดิคอล (II) ยังสามารถย้ายเรดิคอลให้กับสายไซ (หมู่บิวทิล) ได้ดังนี้



ซึ่ง (III) สามารถทำปฏิกิริยาสร้างพันธะต่อไปได้อีกเป็นสายยาว



จะเห็นได้ว่าการย้ายลูกโซ่แบบภายในโมเลกุลดังกล่าวก่อให้เกิดได้สาขาโซ่แบบเอทิล ($-\text{CH}_2\text{CH}_3$) และแบบบิวทิล ($-\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_3$) จากการทดลองพบว่าสาขาโซ่ของพอลิเอทิลีนส่วนใหญ่เป็นโซ่สั้นๆ ที่เป็นเอทิลและบิวทิล ดังนั้นจึงเชื่อได้ว่าปฏิกิริยาการย้ายลูกโซ่ที่เกิดขึ้นระหว่างพอลิเมอไรเซชันของเอทิลีนส่วนใหญ่เป็นแบบการย้ายลูกโซ่ภายในโมเลกุลดังกล่าวก่อให้เกิด

สมบัติทางกายภาพของพอลิเอทิลีนจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหรือปริมาณของสาขาโซ่ โดยทั่วไปถ้าโมเลกุลมีสาขาโซ่มาก พอลิเมอร์จะมีความเป็นผลึกต่ำเพราะโอกาสที่จะตอมต่างๆ ในโมเลกุล จะจัดตัวอย่างเป็นระเบียบเพื่อเกิดเป็นผลึกมีน้อยกว่า สมบัติทางกายภาพเช่น ความหนาแน่น จุดหลอมตัว ความแข็งก็ต่ำลงเพราะความหนาแน่นต่ำจึงทำให้การแพร่ผ่านของแก๊ส และความขึ้นต่อพอลิเมอร์จะสูงกว่า อย่างไรก็ตามพอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยกระบวนการที่ใช้ความดันสูงจะมีความเป็นผลึกปานกลาง (ทั่วไปจะประมาณร้อยละ 50-60 ของความเป็นผลึก) มีจุดหลอมตัวประมาณ 115°C มีความหนาแน่น 0.91-0.94 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไม่ละลายในตัวทำละลายจำพวกไฮโดรคาร์บอนและไฮโดรเจนในไตรไฮโดรคาร์บอน เช่น โทลูอีน ไซลีน และไดคลอโรเอทิลีน นอกจากนี้พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีและมีความเฉื่อยต่อปฏิกิริยาเคมีทั่วไป สามารถทนต่อการกัดและเบสได้เป็นอย่างดี ตัวอย่างเช่น แช่ในกรดซัลฟูริกหรือไฮโดรคลอริกที่ 100°C เป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ไม่พบการเปลี่ยนแปลงแต่อย่างใด แต่กับกรดไนตริก ณ สภาวะเดียวกันจะเปลี่ยนเป็นสีดำที่ผิว ดังนั้นพอลิเอทิลีนจึงนิยมใช้ทำภาชนะบรรจุกรดแก่รวมทั้งกรดไฮโดรฟลูออริก (HF)

เมื่อให้พอลิเมอร์สัมผัสกับแสงแดดและออกซิเจนเป็นเวลานาน พอลิเมอร์จะเสื่อมคุณภาพลงได้ เช่น จะสูญเสียความแข็งแรง ความสามารถในการยืดหยุ่นและความสามารถในการต่อต้านการสึกหรอหรือฉีกขาด เพราะเกิดการสูญเสียของอะตอมไฮโดรเจนจากคาร์บอนที่องศา 3 ที่เป็นคาร์บอนที่เกิดสาขาโซ่ ถึงแม้ว่าการเติมสารช่วยทำให้เสถียร (stabilizer) จะช่วยหน่วง

เหนียวการเสื่อมสภาพได้ แต่ก็ช่วยไม่ได้มากนักเพราะว่ามีสารช่วยทำให้เสถียรอยู่จำนวนน้อยมากที่สามารถเข้ากับพอลิเมอร์เหล่านี้ได้ เกือบครึ่งของพอลิเอทิลีนที่ถูกผลิตขึ้นทั้งหมดจะนิยมนำไปผลิตแผ่นฟิล์มสำหรับห่ออาหาร ทำถุงพลาสติก ผ้าม้วนน้ำ ผ้าปูโต๊ะ ส่วนพอลิเอทิลีนที่เหลือนิยมนำไปใช้ทำของใช้ภายในบ้าน ในครัว ของเด็กเล่น ไข่ม้วนสายไฟฟ้า และใช้ในงานก่อสร้าง เป็นต้น [18]

2.3.2 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูง (HDPE)

พอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นสูงมีโครงสร้างเป็นแบบเส้นตรงเกือบตลอด (มีสาขาน้อยมาก) หรืออาจเรียกว่าพอลิเอทิลีนความดันต่ำ เนื่องจากกระบวนการเตรียมใช้ความดันต่ำมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการเตรียม LDPE การผลิต HDPE ในเชิงการค้าเริ่มขึ้นในปี ค.ศ.1955 [16]

วิธีการเตรียมพอลิเมอร์แบบนี้ในอุตสาหกรรมมีหลายวิธี ได้แก่

1) กระบวนการซีเกลอร์ (Ziegler process)

กระบวนการนี้อาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาซีเกลอร์-แนตตา (Ziegler - Natta catalyst) ได้แก่ พวก ไทเทเนียมเตตระคลอไรด์ - อะลูมิเนียมอัลกิล ($TiCl_4 - R_3Al$) ที่ความดันสูงกว่าบรรยากาศเพียงเล็กน้อย (2-4 บรรยากาศ) และใช้อุณหภูมิประมาณ $50-75^{\circ}C$ ในตัวกลางที่เป็นของเหลวเฉื่อยเช่น น้ำมันดีเซล เฮกเซน หรือโทลูอีน หรือในบรรยากาศเฉื่อยเช่น บรรยากาศของไนโตรเจน เนื่องจากพอลิเอทิลีนไม่ละลายในตัวกลางเฉื่อย ดังนั้นเมื่อเกิดพอลิเมอร์แล้วจะเกิดการตกตะกอนลงมา หลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ขั้นสิ้นสุด จะต้องกำจัดตัวเร่งซีเกลอร์-แนตตาออกไปโดยการเติมแอลกอฮอล์ เช่น เอทานอล หรือ โพรพานอล สารทั้งหมดที่เกิดขึ้น (ยกเว้นพอลิเมอร์) สามารถถูกสกัดออกไปโดยกรดไฮโดรคลอริกในแอลกอฮอล์ แล้วนำพอลิเมอร์ที่ได้ไปทำให้แห้ง พอลิเมอร์ที่ได้จะแตกต่างจากพอลิเมอร์ที่เตรียมโดยใช้ความดันสูงมาก คือมีสายโซ่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากการศึกษาโครงสร้างโดยวิธีอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีพบว่า มีหมู่เอทิลเพียง 5-7 หมู่ต่อคาร์บอนอะตอม 1000 อะตอมเท่านั้น และไม่ปรากฏสาขาโซ่ที่เป็นหมู่บิวทิล ($-C_4H_9$) อยู่เลย

2) กระบวนการฟิลลิปส์ (Phillips process)

กระบวนการนี้ใช้โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) และมีซิลิกาหรืออะลูมินาเป็นตัวเร่งในตัวกลางเฉื่อย เช่น ไซโคลเฮกเซน สภาพของปฏิกิริยาที่ใช้จะอยู่ระหว่างกระบวนการความดันสูงที่ใช้เตรียม LDPE และกระบวนการซีเกลอร์ ความดันที่ใช้ทั่วไปจะอยู่ในช่วง 30-40 บรรยากาศ

และใช้อุณหภูมิประมาณ $90-160^{\circ}\text{C}$ ซึ่งพอลิเอทิลีนที่ได้จะมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์ แต่จากการศึกษาโดยใช้เทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีไม่พบว่ามีหมู่เอทิลหรือบิวทิลเป็นสาขาไซ และมีหมู่เมทิล (CH_3) อยู่เพียง 3 หมู่ต่อคาร์บอนอะตอม 1000 อะตอมเท่านั้น

3) กระบวนการสแตนดาร์ด ออยล์ (Standard Oil Process)

กระบวนการนี้คล้ายคลึงกับกระบวนการฟิลลิปส์มาก ตัวเร่งที่ใช้ได้แก่ออกไซด์ของโลหะ เช่น โมลิบดีนัมไตรออกไซด์ (MoO_3) ที่อยู่บนแผ่นรอง เช่น อะลูมินา ไทเทเนียมออกไซด์ หรือ เซอร์โคเนียมออกไซด์ ความดันที่ใช้จะอยู่ในช่วง 40-100 บรรยากาศ ส่วนอุณหภูมิของปฏิกิริยา จะอยู่ในช่วงประมาณ $200-300^{\circ}\text{C}$ พอลิเมอร์ที่ได้จะเหมือนกับในกรณีที่เตรียมด้วยกระบวนการ ฟิลลิปส์โดยจะมีโครงสร้างเชิงเส้นตรงเกือบสมบูรณ์เช่นกัน

เนื่องจากพอลิเมอร์ที่ได้มีโครงสร้างเป็นเส้นตรงเกือบตลอด ไซพอลิเมอร์จึงมีความเป็น ระเบียบมากเป็นเหตุให้พอลิเมอร์มีความเป็นผลึกสูง (มากกว่าร้อยละ 90) ความหนาแน่นและ จุดหลอมตัวก็สูงกว่าพอลิเอทิลีนที่เตรียมโดยวิธีใช้ความดันสูง ซึ่งโดยทั่วไปจะมีความหนาแน่น ประมาณ 0.95-0.97 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีจุดหลอมตัว 135°C ความเหนียวและความ แข็งสูงกว่าพวก LDPE พอลิเมอร์ที่มีปริมาณ HDPE มากกว่าร้อยละ 40 จะนิยมนำไปใช้ในการ ผลิตพวกขวดพลาสติก ภาชนะบรรจุของ พิล์มสำหรับห่อหุ้มของหรืออาหาร ถุงพลาสติก พลาสติกสำหรับหุ้มสายไฟฟ้า ทำสายยาง และอื่นๆ

2.3.3 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำแบบเส้น (LLDPE)

LLDPE เป็นโคพอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างเอทิลีนและโคโมโนเมอร์ประเภท แอลฟาโอลีฟิน (α -olifin) เช่น 1-butene 1-hexene และ 1-octene เป็นต้น มีความหนาแน่น ประมาณ 0.915-0.935 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ตัวอย่างของการเตรียม LLDPE ได้แก่ การนำบิวเทน (butene) มาผสมกับเอทิลีน ซึ่งหน่วยของบิวเทนจะกระจายตัวอยู่ในเอทิลีนอย่าง ไม่เป็นระเบียบทำให้โคพอลิเมอร์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำกว่าเอทิลีนปกติ

กระบวนการผลิตมีอยู่ 3 วิธี คือ แบบสารละลาย (solution process) แบบสลเลอรี (slurry process) และแบบสถานะก๊าซ (gas process)

2.3.4 พอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำมาก (VLDPE)

VLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าความหนาแน่นต่ำกว่า 0.915 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร VLDPE ทางการค้าจะมีความหนาแน่นประมาณ 0.880-0.912 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร กระบวนการผลิตก็คล้ายคลึงกับการเตรียมพวก LLDPE เช่น การใช้เอทิลีนผสมกับโคพอลิเมอร์ประเภทแอลฟา-โอเลฟิน แต่ถ้าต้องการให้มีความหนาแน่นต่ำมากก็ต้องใช้ปริมาณของโคพอลิเมอร์เพิ่มมากขึ้น การที่ VLDPE มีความหนาแน่นต่ำจะทำให้มีพฤติกรรมความอ่อนตัวได้มากกว่าพอลิเอทิลีนปกติ จึงนิยมนำไปใช้ทำพวกขวดบีบได้ (squeeze bottle) ฟิล์ม หรือหลอดพลาสติก เป็นต้น

2.3.5 พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูง (HMWPE)

HMWPE ทางการค้า มีอยู่ด้วยกัน 2 ชนิด คือ

- 1) พอลิเอทิลีนความหนาแน่นและน้ำหนักโมเลกุลสูง (High Molecular Weight High Density Polyethylene:HMW-HDPE) ซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วงประมาณ 200,000-500,000 นิยมนำไปใช้ทำเป็นท่อ ภาชนะบรรจุของและฟิล์ม เป็นต้น
- 2) พอลิเอทิลีนน้ำหนักโมเลกุลสูงมาก (Ultra High Molecular Weight Polyethylene : UHMWPE) มีมวลโมเลกุลตั้งแต่ 3,000,000 ขึ้นไป นิยมใช้ทำเครื่องใช้ต่างๆ ที่ทนต่อแรงกระแทกได้ดี เช่น พวกท่อลำเลียงผลิตภัณฑ์ เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้ว UHMWPE จะมีข้อดีคือ มีสมบัติในการลื่นไถลดี มีความทนทานต่อการเกิดการกระแทกได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ มีความทนทานต่อการเกิดความล้าได้ดี และยังสามารถนำเข้าไปใส่ในร่างกายของมนุษย์ได้โดยไม่เกิดการต่อต้านที่รุนแรง แต่ก็มีข้อด้อยอยู่ตรงที่ว่า จะมีความคืบ (creep) เกิดขึ้นมาก มีความทนทานต่อการเปลี่ยนรูปต่ำ เกิดการสึกหรอได้ง่ายและนอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อการเกิดออกซิเดชันต่ำอีกด้วย

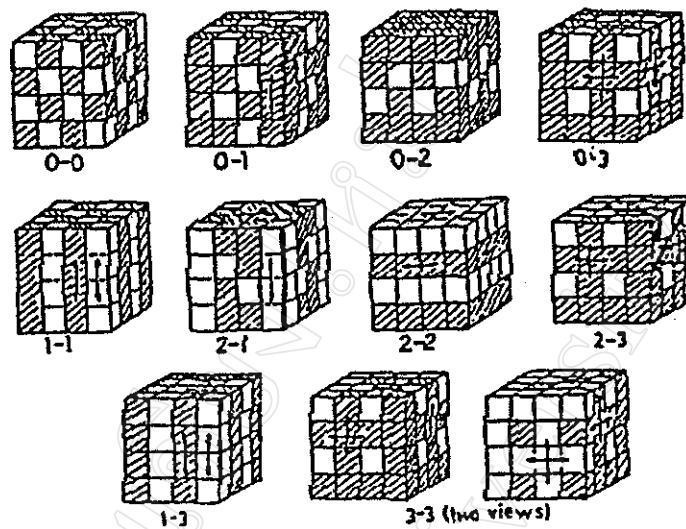
จากที่ได้กล่าวมาในข้างต้นนั้นจะเห็นได้ว่าพอลิเมอร์พอลิเอทิลีนนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายประเภท ซึ่งแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะเด่น และกระบวนการผลิตที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นการเลือกไปใช้งานจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับความต้องการในการใช้ประโยชน์เป็นสำคัญ ส่วนสาเหตุที่พอลิเอทิลีนถูกนำมาใช้งานกันอย่างกว้างขวางนั้นก็เพราะว่าพอลิเอทิลีนเป็นสารที่มีราคาถูก สามารถทำการแปรรูปได้ง่าย มีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม มีความทนทานต่อสารเคมีดีแต่ไม่เหมาะกับกรดไนตริก มีความเหนียวและความอ่อนตัวที่อุณหภูมิต่ำ มี

ความใสเมื่อผลิตเป็นแผ่นฟิล์มบาง ไม่มีกลิ่นและไม่เป็นพิษ นอกจากนี้ยังยอมให้อิออน้ำผ่านได้น้อยทำให้เหมาะกับการใช้งานด้านบรรจุภัณฑ์และการเกษตรนั่นเอง

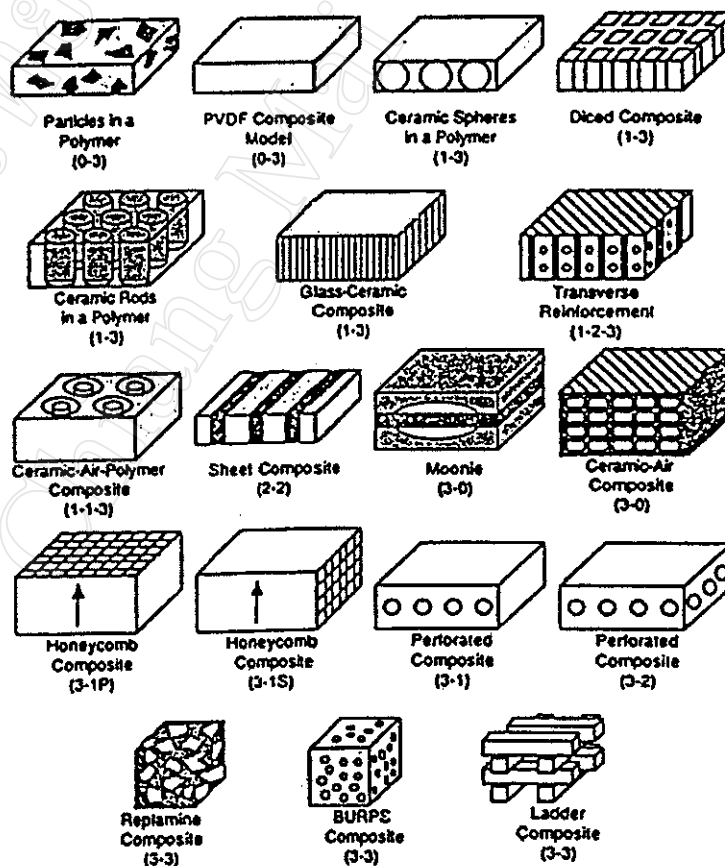
แต่อย่างไรก็ตามการใช้งานพอลิเอทิลีนก็มีข้อจำกัดอยู่หลายประการเช่นกัน เนื่องจากพอลิเอทิลีนเป็นสารที่มีความอ่อนตัวต่ำ สามารถทำปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ (แต่เกิดน้อยกว่าชนิดอื่น) เมื่อมีลักษณะเป็นก้อนจะมีความทึบแสง ถ้าเป็นพอลิเอทิลีนที่มีความหนาแน่นต่ำจะใสมากขึ้น มีลักษณะคล้ายไข กล่าวคือผิวหน้าของพอลิเอทิลีนค่อนข้างมันคล้ายกับว่ามีไขมาเคลือบอยู่ ทำให้ตกแต่งได้ยากเพราะผิวที่คล้ายไขจะไม่มีขั้ว นอกจากนี้พอลิเอทิลีนยังเป็นสารที่มีความต้านทานต่อการดูดซับต่ำ มีความเหนียวและทนต่อแรงดึงปานกลาง และยอมให้ก๊าซบางชนิดผ่านได้ดีอีกด้วย ทำให้จำเป็นต้องมีการเพิ่มความระมัดระวังในการนำไปใช้งานบางประเภทมากขึ้นเป็นพิเศษ

2.4 วัสดุผสม (composite)

วัสดุผสมหมายถึงวัสดุที่เกิดจากการประกอบหรือผสมรวมกันของวัสดุต่างชนิดกัน ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป ให้ยึดติดรวมกันโดยยังสามารถแบ่งแยกวัสดุแต่ละชนิดที่เป็นองค์ประกอบได้ด้วยตาหรือกล้องจุลทรรศน์แสง หรือกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน วัสดุผสมเป็นวัสดุที่มีสมบัติรวมระหว่างสมบัติของวัสดุที่ได้นำมารวมกัน โดยทั่วไปแล้ววัสดุผสมจะมีสมบัติในการนำไปประยุกต์ใช้งานที่เหมาะสมกว่าวัสดุที่เป็นชนิดเดียว วัสดุผสมพิโซอิเล็กทริก (piezoelectric composites) ได้แก่ วัสดุผสมที่ประกอบด้วยเซรามิกที่มีสมบัติพิโซอิเล็กทริกกับพอลิเมอร์ที่มีรูปแบบของการเชื่อมต่อกัน (connectivity) ระหว่างเฟสของเซรามิกกับเฟสของพอลิเมอร์ได้หลายแบบซึ่งแต่ละแบบก็จะมีผลต่อสมบัติพิโซอิเล็กทริกของวัสดุที่แตกต่างกันออกไป สำหรับในกรณีของระบบที่มีเฟสที่เป็นองค์ประกอบอยู่สองชนิด เช่นเซรามิกกับพอลิเมอร์ การเชื่อมต่อกันระหว่างเซรามิกและพอลิเมอร์ที่เป็นไปได้ในทางทฤษฎีของ Newnham [19] จะมีอยู่ด้วยกันถึง 10 แบบ ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 1-3, 2-2, 2-3, และ 3-3 ดังแสดงในรูป 2.8 และ 2.9 โดยตัวเลขตัวแรกจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่กระจายตัวอยู่ในเมตริกซ์ (matrix phase) ในขณะที่เลขตัวหลังจะบอกถึงลักษณะการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นเมตริกซ์ ในช่วงระยะเวลาหลายปีที่ผ่านมาวัสดุผสมประเภทนี้ได้ถูกนำมาใช้ผลิตเป็นทรานสดิวเซอร์ (transducers) โดยอาศัยการเตรียมจากพอลิเมอร์ที่ค่อนข้างเฉื่อย (non-active) เช่น พวกอีพอกซี (epoxy) กับเซรามิกที่เป็นพวกพิโซอิเล็กทริก เช่น เลดเซอร์โคเนตไทเทเนต (PZT) ที่อาจจะอยู่ในรูปของผง เส้นใย แผ่นบางซ้อนกันหลายชั้น หรือแบบที่มีโครงสร้างซับซ้อนใน 3 มิติเป็นต้น [14]



รูป 2.8 รูปแบบดั้งเดิมของการเชื่อมต่อกันระหว่างเพลต 10 รูปแบบ ของวัสดุผสมระหว่าง 2 เฟส ที่เป็นไปได้ [14]



รูป 2.9 การพัฒนารูปแบบของวัสดุผสมแบบต่างๆ [13]

การออกแบบและผลิตวัสดุผสมเพื่อนำไปใช้งานได้กลายเป็นหัวข้อสำคัญของงานวิจัยจำนวนมาก อีกทั้งยังเป็นแรงผลักดันที่ทำให้วัสดุผสมมีการพัฒนาไปอย่างรวดเร็ว เนื่องมาจากความต้องการที่จะรวมสมบัติเด่นๆ ของวัสดุต่างๆ เข้าด้วยกัน ซึ่งโดยปกติแล้วไม่สามารถหาได้จากวัสดุชนิดใดชนิดหนึ่งเพียงชนิดเดียวได้ ทำให้ในปัจจุบันได้มีการมุ่งพัฒนาการผลิตวัสดุผสมที่มีสมบัติหลายๆ อย่างเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานแต่ละประเภทให้มากที่สุด ซึ่งในกรณีของวัสดุผสมพวกเซรามิกพิโซอิเล็กทริกนั้นก็จะเป็นที่เรื่องของการพัฒนาวัสดุให้มีสมบัติพิโซอิเล็กทริกที่ดีขึ้น สามารถทำเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ง่ายและมีความยืดหยุ่นดีและโดยเฉพาะอย่างยิ่งการมีความไวทางพิโซอิเล็กทริก (piezoelectric sensitivity) สูงพร้อมกับมีความหนาแน่นของวัสดุต่ำเพื่อทำให้มีค่าความต้านทานพลังงานเสียงเชิงซ้อน (acoustic impedance หรือ ค่า Z) ใกล้เคียงกับค่าของตัวกลางที่ต้องส่งคลื่นความถี่ผ่านเข้าไปเพื่อใช้ในการตรวจสอบวัสดุในตัวกลางนี้ จะเห็นได้ว่าวัสดุเพียงชนิดเดียวเท่าที่มีปรากฏไม่สามารถให้สมบัติที่ต้องการทั้งสองอย่างนี้พร้อมๆ กันได้ ดังนั้นการหาวิธีรวมสมบัติเด่นของวัสดุแต่ละชนิดเข้าด้วยกันจึงเป็นทางเลือกที่เป็นไปได้ทางหนึ่ง ในปัจจุบันจึงได้มีการพยายามพัฒนาวัสดุผสมเหล่านี้ขึ้น โดยเริ่มจากการพัฒนาวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกอุทกสถิต (hydrostatic piezoelectric coefficients) มากกว่าของเซรามิก PZT เพื่อที่จะนำไปใช้ทำไฮโดรโฟนได้น้ำในช่วงความถี่ต่ำอีกทั้งยังมีค่าความยาวคลื่นน้อยกว่าคลื่นเสียง ซึ่ง Safari [14] ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้วัสดุผสมทำไฮโดรโฟนจะมีความไวมากกว่าการใช้เซรามิก PZT ประมาณ 2-3 เท่า นอกจากนี้วัสดุผสมดังกล่าวยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านอื่นๆ อีกเช่น อัลตราโซนิกทรานสดิวเซอร์ และเทอร์มิสเตอร์ เป็นต้น

เนื่องจากเซรามิกพิโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่เป็นสารที่มีค่าสัมประสิทธิ์ความเครียดพิโซอิเล็กทริก (piezoelectric strain coefficient หรือ d_{33} และ d_{31}) สูง มีค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อพลังงานกล - ไฟฟ้าเชิงความหนา (k_p) สูง มีค่าสภาพยอมสัมพัทธ์หรือ ϵ_r สูงและมีค่าการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก (dielectric loss หรือ $\tan \delta$) ที่ต่ำ [14] งานวิจัยจำนวนมากจึงมุ่งความสนใจไปที่กลุ่มเซรามิกพิโซอิเล็กทริก

แต่อย่างไรก็ตามค่า Z ของเซรามิกพิโซอิเล็กทริกนั้นจะมีค่าสูงกว่าค่า Z ของตัวกลางที่สัญญาณเสียงต้องเคลื่อนที่ผ่านในการใช้งานจริง เช่น น้ำ อากาศ และเนื้อเยื่อมนุษย์ ดังนั้นเมื่อนำมาใช้งานเป็นทรานสดิวเซอร์ในการตรวจจับสัญญาณต่างๆ ผ่านตัวกลางเหล่านี้ส่งผลให้ทรานสดิวเซอร์มีความสามารถในการแยกรายละเอียดได้ต่ำลง นอกจากนี้เซรามิกพิโซอิเล็กทริกส่วนใหญ่ยังมีค่า ϵ_r สูง จึงส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความต่างศักย์พิโซอิเล็กทริก (piezoelectric voltage coefficients หรือ g) ของวัสดุเหล่านี้มีค่าต่ำ ทำให้ความสามารถในการแปลงพลังงาน

กลไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าลดลง นอกจากนี้เซรามิกพีโซอิเล็กทริกยังมีจุดด้อยบางประการ เช่น เปราะและเปลี่ยนแปลงรูปร่างได้ยาก เมื่อทำการพิจารณาถึงพอลิเมอร์พีโซอิเล็กทริก เช่น พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF หรือ PVF_2) พบว่าวัสดุประเภทนี้มีความยืดหยุ่นสูง และมีความหนาแน่นต่ำส่งผลทำให้ค่า Z ของวัสดุนี้มีค่าใกล้เคียงกับของน้ำและเนื้อเยื่อต่างๆ ในร่างกายมนุษย์ ทำให้พอลิเมอร์พีโซอิเล็กทริกสามารถนำมาใช้ทำเป็นทรานสดิวเซอร์สำหรับวัดความสั่นสะเทือนได้น้ำ หรือวัดความดันภายในร่างกายมนุษย์ได้ดีกว่าเซรามิกพีโซอิเล็กทริก แต่อย่างไรก็ตามวัสดุประเภทนี้ก็มีจุดด้อยอยู่ตรงที่มีค่า d_{33} และค่า d_h ที่ค่อนข้างต่ำและต้องมีการใช้สนามไฟฟ้าแรงสูงในการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าอีกด้วย ถึงแม้ว่าจะมีกรรมวิธีในการปรับปรุงวัสดุพอลิเมอร์หลายอย่าง เช่น การปรับปรุงโดยการใส่โคพอลิเมอร์ระหว่างไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (VDF) และไตรฟลูออโรเอทิลีน (TrFE) ซึ่งจะให้สมบัติที่ดีกว่า PVDF และยังสามารถทำการผลิตเป็นวัสดุผสมได้ง่ายกว่าเพราะไม่ต้องผ่านกระบวนการยัดดัดก่อนใช้งานและใช้สนามไฟฟ้าต่ำในการจัดเรียงขั้วไฟฟ้า ส่วนค่า ϵ_r ที่ลดลงของโคพอลิเมอร์จะมีผลต่อค่า g ที่มากขึ้นของพอลิเมอร์ที่มีเฟสเดียวและค่า d_h จะมีค่ามากกว่าเมื่อใช้ PVDF สมบัติที่เห็นได้อย่างชัดเจนของโคพอลิเมอร์ที่ได้รับการปรับปรุงแล้วก็คือ ค่า k_t ซึ่งค่า k_t ที่มากขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ VDF ที่ผสมและอุณหภูมิที่ใช้ในการอบอ่อน (anneal) การอบอ่อนต้องทำก่อนการจัดเรียงขั้วไฟฟ้าที่อุณหภูมิมากกว่าอุณหภูมิคูรี (ประมาณ 120°C) เพื่อให้พอลิเมอร์เกิดเป็นผลึกมากขึ้น โคพอลิเมอร์ที่ดีควรมีปริมาณของ VDF อยู่ประมาณร้อยละ 70–75 โดยโมล [14]

ถึงแม้ว่าโคพอลิเมอร์จะมีข้อดีอยู่หลายประการแต่ก็มีข้อเสียตรงที่มีค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan\delta$) ที่สูงถึงประมาณร้อยละ 10 ในขณะที่มีค่า ϵ_r สูงสุดอยู่ที่ประมาณ 6–10 เท่านั้น และนอกจากนี้ก็ยังมีความยากกับ d_{33} กับ d_h ที่ต่ำเกินไป ถึงแม้ว่าจะมีค่า k_t มากแต่ค่า d_{33} ก็มีค่าไม่สูงนัก ดังนั้นการปรับปรุงแก้ไขปัญหาดังกล่าวจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ เช่นเดียวกับเรื่องของความพยายามที่จะนำสมบัติเด่นของวัสดุแต่ละชนิดมารวมกัน เพื่อให้ได้วัสดุผสมที่มีสมบัติที่ดีขึ้น เช่น มีน้ำหนักที่เบา มีความยืดหยุ่นสูง มีค่า Z และ $\tan\delta$ ต่ำ โดยมีค่า d_{33} กับ d_h และ k_t อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ [14]

วัสดุผสมพีโซอิเล็กทริกพอลิเมอร์ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในเครื่องทรานสดิวเซอร์เพื่อช่วยให้เครื่องมือมีความสามารถในการจำแนกสัญญาณข้อมูลที่สูงขึ้น (high resolution) แต่อย่างไรก็ตามความไวต่ำ (low sensitivity) เนื่องจากวัสดุยังมีการดูดซับคลื่นอะคูสติกไปบางส่วนและยังมีสมบัติบางประการที่ด้อยอยู่ เช่น ประสิทธิภาพในการเชื่อมต่อพลังงานไฟฟ้าเชิงกล เป็นต้น ในทางกลับกันถ้านำวัสดุประเภทพีโซอิเล็กทริกเซรามิกมาใช้ ทรานสดิวเซอร์จะมีความไวสูงขึ้น แต่

จะมีความสามารถในการจำแนกสัญญาณข้อมูลที่ค่อนข้างต่ำอันเนื่องมาจากการไม่เข้ากันของค่าความต้านทานพลังงานเสียงเชิงซ้อนระหว่างพิโซอิเล็กทริกเซรามิกกับตัววัสดุที่ถูกตรวจสอบ ดังนั้นเพื่อให้ได้สมบัติทางทรานสดิวเซอร์ที่ดี คือ มีความไวและมีความสามารถในการจำแนกสัญญาณข้อมูลที่สูง จึงจำเป็นต้องทำการออกแบบทรานสดิวเซอร์ที่ใช้พิโซอิเล็กทริกเซรามิกขึ้นใหม่ให้มีค่าความต้านทานพลังงานเสียงเชิงซ้อนใกล้เคียงกับของตัวกลางที่จะทำการส่งคลื่นสัญญาณผ่านเข้าไปในเนื้อเยื่อร่างกายของมนุษย์ให้ได้ดีที่สุด

การออกแบบลักษณะโครงสร้างภายในของวัสดุ โดยการนำเซรามิกและพอลิเมอร์มาผสมกันเป็นวัสดุผสมพิโซอิเล็กทริก ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนสมบัติของวัสดุที่สำคัญต่อการนำมาใช้งานด้านทรานสดิวเซอร์ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้งานในการสร้างภาพด้วยระบบอัลตราซาวด์ในทางการแพทย์ สำหรับสมบัติต่างๆ ของเซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสม ได้สรุปเปรียบเทียบไว้ดังในตาราง 2.1

ตาราง 2.1 แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของวัสดุระหว่างเซรามิก พอลิเมอร์ และวัสดุผสม [20]

ตัวแปร	เซรามิก	พอลิเมอร์	วัสดุผสม PZT กับพอลิเมอร์
ค่าความต้านทานพลังงานเสียงเชิงซ้อน (Z)	30	4.3	10
ค่าสัมประสิทธิ์คู่ควบ (k)	0.5-0.7	0.1-0.3	0.5-0.7
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r)	200-5000	6-10	ขึ้นอยู่กับปริมาณ PZT
ค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กทริก ($\tan\delta$)	0.02	0.25	0.02
ค่าใช้จ่าย	ถูก	แพง	ปานกลาง

2.4.1 วัสดุผสมแบบ 0-3

วัสดุผสมที่มีรูปแบบของการเชื่อมต่อเฟสแบบ 0-3 ประกอบไปด้วยเฟสของพอลิเมอร์เมตริกซ์ที่เชื่อมต่อกันใน 3 ทิศทาง โดยมีเฟสของเซรามิกกระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์ ข้อดีของการเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 คือ มีความง่ายในการผลิตและขึ้นรูปเพราะมีความยืดหยุ่นสูง สามารถทำให้เป็นแผ่นบางหรือเป็นเส้นใย หรือทำเป็นรูปร่างต่างๆ แล้วแต่แม่พิมพ์ได้ง่าย สามารถทำการผลิตได้ในปริมาณที่มากในแต่ละครั้งและนอกจากนี้ยังสามารถทำการปรับแต่งพื้นผิวได้ง่ายอีกด้วย

การทดลองเตรียมวัสดุผสมที่มีรูปแบบของการเชื่อมต่อเฟสแบบ 0-3 เริ่มเกิดขึ้นมาครั้งแรก โดย Kitayama และ Saguwara ในปี ค.ศ.1972 [21] หลังจากนั้น Pauer [22] ก็ได้ทดลองเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 โดยให้ PZT เป็นเฟสที่กระจายตัวอยู่ในพอลิเมอร์พอลิยูรีเทน (Polyurethane) ต่อมา Banno [23] ได้ทำการเตรียมวัสดุผสมที่มีการใช้ผงเซรามิก PZT ขนาดต่างๆ กัน คือ 3.3, 7.3 และ 31.8 ไมครอน ผสมกับผงเลดไทเทเนต (PT) ที่มีขนาดต่างกัน คือ 7.3 และ 31.8 ไมครอน โดยใช้ความดันประมาณ 0.5 และ 15 เมกะพาสคัล และพบว่าวัสดุผสมที่เตรียมได้จากการใช้อณูภาคที่มีขนาดใหญ่กว่าจะให้ค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกอุทกสถิต (d_h) ที่มากกว่า

ในปี ค.ศ.1986 Giniewicz [24] ได้ทดลองเตรียมวัสดุผสมระหว่างเซรามิก 0.5PbTiO_3 - $0.5\text{Bi}(\text{Fe}_{0.98}\text{Mn}_{0.02})\text{O}_3$ หรือที่เรียกอย่างย่อว่า PT-BF กับพอลิเมอร์แบบ 0-3 ต่อมา Hanner และคณะ [25,26] ได้ทำการพัฒนาวิธีการเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่มีพอลิเมอร์และผงเซรามิกพิโซอิเล็กทริกประมาณร้อยละ 60-70 โดยปริมาตรเป็นองค์ประกอบ นอกจากนี้ยังมีส่วนประกอบอื่นๆ อีก

ถึงแม้ว่าการเตรียมวัสดุผสมแบบ 0-3 จะสามารถกระทำได้ง่ายและเป็นที่ต้องการสูง แต่ก็เป็นการยากที่จะทำให้เฟสของเซรามิกมีการกระจายตัวในเฟสที่เป็นพอลิเมอร์อย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีการเติมเฟสของเซรามิกลงไปปริมาณมากๆ นอกจากนี้การเกิดมีรูพรุนหรือช่องว่างขึ้นภายในเนื้อของวัสดุผสมยังทำให้ค่าของสนามไฟฟ้าสูงสุดในการทำขั้วลดลง และส่งผลทำให้ค่าความต้านทานต่อการพังทลายทางไดอิเล็กทริก (dielectric breakdown strength) ของวัสดุลดลงตามไปด้วย Han และคณะ [27] จึงได้ทำการพัฒนาการผลิตแบบคอลลอยด์ (colloid processing) เพื่อปรับปรุงความเป็นเนื้อเดียวกันของโครงสร้างจุลภาคและลดโอกาสที่จะเกิดช่องว่างภายในวัสดุผสมแบบ 0-3 โดยการนำผงเซรามิกพิโซอิเล็กทริกมาทำให้กระจายตัวอยู่ในสารละลายของพอลิเมอร์ที่เจือจาง ซึ่งพอลิเมอร์จะไปเคลือบอยู่ที่ผิวของผงเซรามิก ทำให้เกิดมีการตกตะกอนลงมา ต่อจากนั้นจึงทำการกรองเพื่อนำเอาตะกอนไปทำการอัดขึ้นรูปให้ได้วัสดุผสมแบบ 0-3 ที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนาแน่นสูงขึ้น ในเวลาต่อมา Han และคณะ [28] ก็ได้ทำการศึกษาผลของขนาดอนุภาคที่มีต่อสมบัติไดอิเล็กทริกและพิโซอิเล็กทริกของวัสดุผสมแบบ 0-3 โดยทำการเตรียมวัสดุผสมระหว่างผง PT ที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันกับ โคพอลิเมอร์ชนิด PVDF ซึ่งมีส่วนผสมระหว่างโวนิลลิดีนฟลูออไรด์ร้อยละ 90 และ เฮกซะฟลูออไรด์ร้อยละ 10 และพบว่าวัสดุผสมที่เตรียมได้จะมีค่า d_{33} ลดลงตามขนาดของอนุภาคที่ใช้ กล่าวคือจะมีค่าลดลงจาก 50 เป็น 33 พิโคคูลอมบ์ต่อนิวตันเมื่อขนาดของอนุภาคที่ใช้เปลี่ยนจาก 3.5 เป็น 0.5 ไมครอน ในขณะที่สมบัติทางไดอิเล็กทริกของวัสดุผสมจะไม่ขึ้น

อยู่กับขนาดของอนุภาคที่ใช้ ยกเว้นในกรณีที่มีการใช้ขนาดอนุภาคที่เล็กมากๆ เท่านั้น ต่อมา Lee และคณะ [29] ได้ทำการยืนยันผลการทดลองดังกล่าวนี้อีกครั้งโดยการเตรียมวัสดุผสมระหว่างผง PT ที่มีขนาดอนุภาคต่างๆ กัน กับพอลิเมอร์เอคโคเจลด้วยวิธีการอัดแห้งแบบดั้งเดิม จากนั้นจึงทำการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของอนุภาคที่ใช้กับสมบัติไดอิเล็กตริกและพิโซอิเล็กตริกของวัสดุ และพบว่าขนาดของอนุภาค PT ที่แตกต่างกันจะไม่มีผลต่อค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ และค่าตัวประกอบการสูญเสียทางไดอิเล็กตริก (dissipation factor) อย่างมีนัยสำคัญแต่จะมีผลต่อค่า d_{33} เท่านั้น

ปัญหาที่สำคัญที่สุดของวัสดุผสมแบบ 0-3 ที่มีต่อสมบัติพิโซอิเล็กตริกคือ เรื่องความลำบากในการทำวัสดุผสมแบบ 0-3 ให้เกิดความมีขั้วขึ้น (poling) เนื่องจากสมบัติพิโซอิเล็กตริกของวัสดุจะถูกบั่นทอนลงด้วยค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของพอลิเมอร์ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าเซรามิกพิโซอิเล็กตริกอยู่มาก เมื่อให้กระแสไฟฟ้าแก่วัสดุผสมกระแสไฟฟ้าจำเป็นจะต้องเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่มีค่าไดอิเล็กตริกต่ำ (พอลิเมอร์) เพื่อไปยังเฟสของเซรามิกที่อยู่ถัดไปนั่นเอง หนึ่งในวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าวนี้นี้สามารถทำได้โดยอาศัยเฟสอื่นมาคั่นระหว่างอนุภาคพิโซอิเล็กตริกอีกที่ ดังตัวอย่างเช่นที่ Sa-Gong [30] ได้ทดลองทำการเติมอนุภาคของคาร์บอน (C) หรือ เจอมาเนียม (Ge) หรือ ซิลิกอน (Si) ลงไปผสมในสาร PZT หรืออีกวิธีที่ช่วยทำให้ง่ายขึ้นในการทำขั้วคือต้องทำการเพิ่มค่าความต้านทานของผงเซรามิก เช่น ทำการเตรียมวัสดุผสมที่ทำจากผง PT แล้วเจือ UO_2 เพื่อที่จะเพิ่มความต้านทาน ทำให้สามารถทำขั้วโดยใช้สนามไฟฟ้าที่สูงได้

2.4.2 วัสดุผสมแบบ 1-3

ในวัสดุผสมที่มีรูปแบบของการเชื่อมต่อเฟสเป็นแบบ 1-3 เฟสของเซรามิกจะมีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องในทิศทางเดียว ในขณะที่เฟสของพอลิเมอร์จะมีการเชื่อมต่อถึงกันทั้ง 3 ทิศทาง ดังภาพแสดงในรูปที่ 2.10 ตัวอย่างของวัสดุผสมแบบ 1-3 ในยุคแรกๆ นั้นส่วนใหญ่จะเป็นผลงานของ Safari [31] และ Harrison [32] โดยในช่วงประมาณปี ค.ศ.1976 นั้น Harrison [32] ได้ทำการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการพัฒนาเซรามิกประเภทแก้วที่มีขั้ว (polar glass) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้เป็นไฮโดรโฟน เนื่องจากแก้วชนิดนี้นั้นเปรียบได้กับวัสดุผสมแบบ 1-3 ที่มีองค์ประกอบอยู่สองเฟส คือ เฟสที่เป็นแก้วซึ่งมีการเชื่อมต่อใน 3 ทิศทาง และเฟสที่เป็นผลึกซึ่งมีการเชื่อมต่อกันอยู่เพียงทิศทางเดียว Harrison [32] พบว่าแก้วชนิดนี้มีค่า g_h และ $d_{33}g_h$ ที่ใกล้เคียงกับพวก PVDF แต่มีน้ำหนักมากกว่า เนื่องจากว่าไม่มีปัญหาเรื่องการ

เสื่อมสภาพตามเวลา (aging) หรือถูกทำให้หมดสภาพของควมมีขั้ว (depoling) ได้ยาก เพราะว่าไม่ได้เป็นสารเพโรอิเล็กทริก และนอกจากนี้ยังสามารถแสดงสมบัติต่างๆ ได้โดยไม่ขึ้นกับอิทธิพลของความดัน

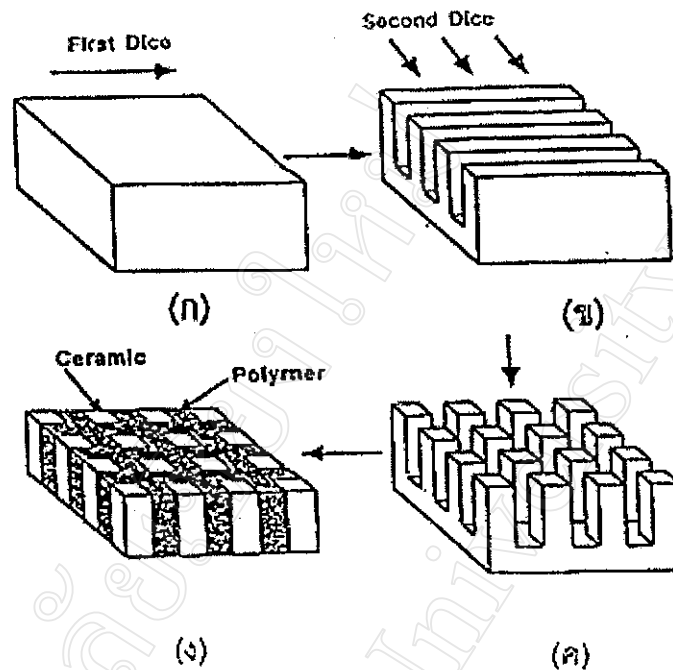
ต่อมาในช่วง ค.ศ.1981-1982 Klicker และคณะ [33,34] ก็ได้พัฒนาวัสดุผสมแบบ 1-3 ที่ประกอบด้วยแท่งเซรามิก PZT ที่ผ่านการอัดรีดและเผาขึ้นเตอร์มาแล้ว ผึ่งเรียงกันอยู่ในพอลิเมอร์ซึ่งในทางอุดมคติแล้วนั้นเฟสของพอลิเมอร์จะมีความหยุ่นตัวได้ดีกว่าแท่งเซรามิก PZT มาก ทำให้สามารถถ่ายเทแรงเค้นไปยังแท่งเซรามิก PZT ได้ง่าย ซึ่งการผสมผสานกันระหว่างความเค้นที่เพิ่มขึ้นกับค่าสภาพยอมลัมพัทธ์ที่ลดลงของระบบ ทำให้วัสดุผสมดังกล่าวนี้มีค่า g ดีขึ้น

Savakus และคณะ [35] ได้ร่วมกันพัฒนาระบบการเตรียมวัสดุผสมแบบ 1-3 อย่างง่ายขึ้นเป็นครั้งแรก โดยการหั่นชิ้นงานเซรามิก PZT ให้มีขนาดคล้ายกับตารางบนกระดานหมากรุกจะได้ชุดของแท่ง PZT ที่มีขนาดและระยะห่างระหว่างแท่งตามต้องการ เรียงกันเป็นแถวดังภาพแสดงในรูปที่ 2.10 จากนั้นจึงเทพอลิเมอร์ลงไปให้เต็มช่องว่าง จากนั้นจึงใช้แผ่นเหล็กหรือแผ่นทองเหลืองบางๆ มาปิดที่ปลายทั้งสองด้านของชิ้นงาน เพื่อช่วยให้มีการกระจายตัวของความเค้นไปตามทิศทางการเกิดข้ออย่างสม่ำเสมอและทำให้มีสมบัติพิโซอิเล็กทริกที่ดีขึ้นด้วย ซึ่งค่า g_n ของชิ้นงานประเภทนี้จะดีขึ้นแต่จะขึ้นกับความดันเป็นอย่างมากเนื่องจากแผ่นโลหะอาจจะเกิดการแยกออกที่ความดันสูงๆ ได้

ในวัสดุผสมแบบ 1-3 ทุกชนิด จะมีความเค้นภายในเกิดขึ้นมาด้านแรงเค้นที่ให้เข้าไปจากภายนอกเสมอ เนื่องจากพอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีค่าอัตราส่วนของปัวซองส์ (Poisson's ratio คือ อัตราส่วนระหว่างการเปลี่ยนแปลงตามแนวยาวต่อการเปลี่ยนแปลงตามแนวขวาง เมื่อวัสดุได้รับความเค้นจากแรงดึงหรือแรงกด กับการเปลี่ยนแปลงตามขวางที่เกิดขึ้นพร้อมกัน [36]) ที่สูงมากนั่นเอง ด้วยเหตุผลดังกล่าวค่าสัมประสิทธิ์พิโซอิเล็กทริกของชิ้นงานจึงไม่สูงอย่างที่คาดเอาไว้ ต่อมา Lynn [37] จึงได้ทดลองเพิ่มความพรุนในพอลิเมอร์ด้วยการเติมแก้วทรงกลม หรือสารก่อฟองอากาศ ลงไปเพื่อลดค่าอัตราส่วนของปัวซองส์ลง ทำให้วัสดุมีสมบัติพิโซอิเล็กทริกดีขึ้น แต่ก็ทำให้สมบัติพิโซอิเล็กทริกของวัสดุแปรผัน ตามการเปลี่ยนแปลงของความดันมากยิ่งขึ้นด้วยเช่นกัน และบางทีก็เรียกวัดผสมดังกล่าวว่าเป็นแบบ 1-3-0 โดยตัวเลขตัวที่สามแสดงพฤติกรรมการเชื่อมต่อกันของเฟสที่สาม (ซึ่งหมายถึงรูพรุน หรือลูกแก้วทรงกลมนั่นเอง)

หนทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มสัญญาณความเค้นในวัสดุผสมแบบ 1-3 ก็คือการใช้วิธีเสริมแรงในแนวขวาง [38,39] โดยการวางแท่ง PZT ให้เรียงตัวกันในแนวเดียวกับทิศทางของการทำซ้ำ ในขณะที่เดียวกันก็วางเส้นใยแก้วที่เหนียวให้เรียงตัวในแนวที่ตั้งฉากกับแนวของแท่ง PZT ในลักษณะของการสานวัสดุทั้งสองสลับกันไปมา ซึ่งพวกเส้นใยแก้วจะช่วยถ่ายเทแรงเค้นไปในทิศทางตามขวางกับแนวของแท่ง PZT เป็นผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์ d_{31} ของวัสดุลดลง แต่จะไม่มีผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์ d_{33}

การพัฒนาโครงสร้างของวัสดุผสมแบบ 1-3 เพื่อลดปัญหาเรื่องอัตราส่วนของผิวของสีกวิธีหนึ่งก็คือ การป้องกันไม่ให้เมทริกซ์ที่เป็นพอลิเมอร์สัมผัสกับแท่งเซรามิก PZT ในแนวด้านข้างเพื่อไม่ให้เกิดมีประจุไฟฟ้าในแนวด้านข้างขึ้นนั่นเอง [40] ซึ่งในวัสดุผสมลักษณะนี้ความเค้นจะถูกถ่ายเทผ่านทางคู่แผ่นโลหะที่เป็นทั้งขั้วไฟฟ้า และตัวเสริมแรงให้กับพอลิเมอร์เมทริกซ์ ในทิศทางตามแนวขวางได้อีกด้วย สำหรับการเตรียมวัสดุผสมในลักษณะดังกล่าวนี้ เมทริกซ์ที่นิยมใช้กันจะทำมาจากพวกพอลิยูรีเทน (Flexcomet 94SA) โดยจะนำพอลิเมอร์มาตัดให้ได้รูปร่างตามที่ต้องการแล้วเจาะให้เป็นช่องรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส หรือบางทีก็เป็นรูปหกเหลี่ยมให้มีอัตราส่วนเชิงปริมาตรตามที่กำหนดไว้ นำแผ่นเหล็กมาตัดให้มีขนาดหนานานต่างกัน แล้วจัดเรียงแท่งเซรามิก PZT โดยให้ปลายด้านล่างยึดติดอยู่กับแผ่นเหล็กที่เตรียมไว้ด้วยพวกสารยึดเหนี่ยวที่เป็นตัวนำไฟฟ้า (เช่น อีพอกซี หรือเงิน) จากนั้นจึงนำแผ่นพอลิเมอร์ที่เจาะรูไว้มาวางสวมบนปลายของชุดแท่งเซรามิก PZT แล้วเลื่อนลงมาเรื่อยๆ จนกระทั่งสัมผัสกับแผ่นโลหะที่รองอยู่ด้านล่างแล้วยึดเอาไว้ จะทำให้ชิ้นงานที่ประกอบด้วยแท่งเซรามิกวางตั้งเรียงอยู่บนแผ่นโลหะโดยมีพอลิเมอร์ล้อมรอบ แต่ไม่สัมผัสกับแท่งเซรามิก จากนั้นจึงนำชิ้นงานไปขัดให้มีความหนาตามต้องการ แล้วจึงนำแผ่นโลหะอีกอันหนึ่งมายึดติดที่ปลายด้านบนในแนวขนานกับแผ่นโลหะที่เป็นฐานรองเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าต่อไป ซึ่งในบางกรณีก็มีการนำเอาชิ้นงานดังกล่าวไปทำการเสริมแรงด้วยการหุ้มด้วยอีพอกซีอีกที จากนั้นจึงค่อยนำชิ้นงานทั้งชุดไปฝังให้จมอยู่ในพอลิยูรีเทนอีกที จึงมีการเรียกวัสดุผสมแบบนี้กันว่า 1-3-1 โดยเลขตัวที่สามจะแสดงแนวการเชื่อมต่อกันของเฟสที่เป็นอากาศที่อยู่ภายในวัสดุนั่นเอง วัสดุผสมที่มีแผ่นโลหะหนากว่า จะมีความเสถียรของค่า $d_n g_n$ (figure of merit) มากกว่า ในกรณีที่ใช้อีพอกซีหุ้ม แต่ว่าทั้งสองสิ่งนี้ก็ล้วนแต่เป็นข้อดีที่สำคัญที่ไปทำให้ความเค้นที่แนวขอบของเมทริกซ์รองรับอยู่มีค่าลดลง และส่งผลกระทบต่อการจัดความเครียดในแนวด้านข้างของวัสดุ



รูป 2.10 วิธีการเตรียมวัสดุผสมระหว่างเซรามิกพีโซอิเล็กทริก / พอลิเมอร์ ด้วยวิธี Dice และ Fill (ก) ชิ้นงานเซรามิก (ข) หลังการตัดครั้งแรก (ค) หลังการตัดครั้งที่ 2 และ(ง) เมื่อเทพอลิเมอร์ลงไปจนได้เป็นวัสดุผสมแบบ 1-3 [13]

Kim และคณะ [41] ได้ทดลองเตรียมวัสดุผสมที่ประกอบด้วยแท่งเซรามิก PZT และพอลิเมอร์หรือฟอกซีอย่างอ่อน ที่มีลักษณะคล้ายกับรังผึ้งขึ้นโดยในการออกแบบผลิตภัณฑ์ได้คำนึงถึงการเลือกใช้วัสดุซึ่งทำจากอีพอกซี เช่น พอลิคาร์บอเนต (polycarbonate) เพื่อนำมาทำการขึ้นรูป ให้มีลักษณะคล้ายกับรังผึ้ง แท่ง PZT ที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.08-0.13 เซนติเมตร สามารถปรับเปลี่ยนปริมาตรของ PZT ได้โดยการปรับเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเซรามิก หรือการใส่แท่งเซรามิกเพิ่มขึ้น หรือการนำแท่งเซรามิกหลายขนาดมาใช้รวมกัน ซึ่งสองวิธีหลังที่กล่าวมานี้จะทำให้การเรียงตัวของแท่งเซรามิกไม่เป็นระเบียบจึงช่วยลดการเกิดกำทอน (resonance) ในแนวขวางที่ไม่ต้องการได้ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบรังผึ้งในวัสดุผสมประเภทนี้จะช่วยเสริมแรงเชิงกลที่ไปช่วยลดการกระจายของ ค่า d_{31} ในแนวขวางในขณะที่อีพอกซีแบบอ่อนจะช่วยลดค่าอัตราส่วนของปัวซองส์ลงและช่วยให้แท่งเซรามิกสามารถเกิดการขยายตัวหรือหดตัวได้ วัสดุผสมต้นแบบนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งเซรามิกเท่ากับ 0.08 เซนติเมตร และมีปริมาณเซรามิกร้อยละ 17 โดยปริมาตร มี Lexan (ตัวที่ทำรังผึ้ง) ร้อยละ 70 และอีพอกซีร้อยละ 13 โดยปริมาตร วัสดุผสมชนิดนี้มีค่า ϵ_r เท่ากับ

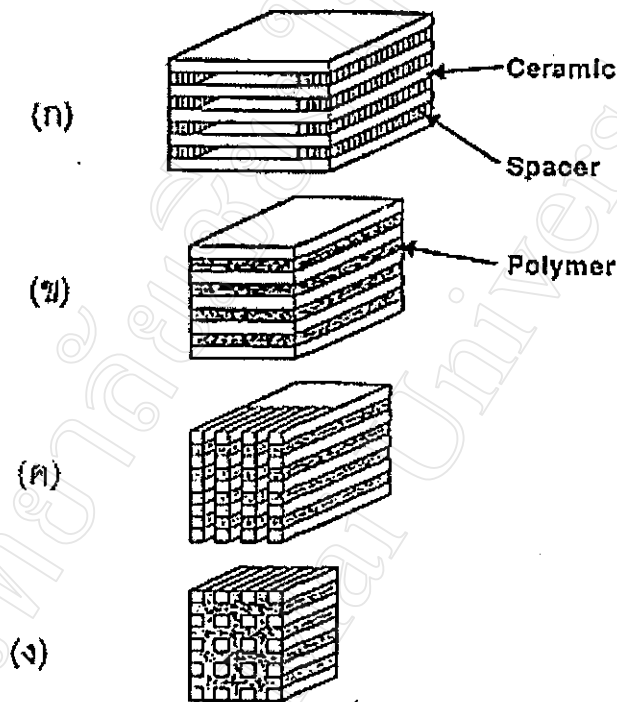
406 ค่า d_{33} เท่ากับ 564 พิโคคูลอมบ์ต่อนิวตันและค่า g_{33} เท่ากับ 157 มิลลิโวลท์·เมตร ต่อนิวตัน ส่วนค่า d_h , g_h และ $d_h g_h$ ที่วัดโดยไม่มีแผ่นโลหะมาปิดจะได้เท่ากับ 135 พิโคคูลอมบ์ต่อนิวตัน 45 มิลลิโวลท์·เมตร ต่อนิวตัน และ 6075×10^{-15} ตารางเมตรต่อนิวตัน ตามลำดับ

การขึ้นรูปชิ้นงานเซรามิกโดยใช้วิธีการอัดแบบฉีด (injection molding) เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตเซรามิก PZT เนื่องจากสามารถช่วยให้ทำการเตรียมชิ้นงานที่มีรูปร่างซับซ้อนได้ดี ใช้เวลาในการผลิตน้อยมาก สามารถควบคุมกระบวนการผลิตได้ง่าย มีการสูญเสียของเนื้องานน้อยและยังสามารถปรับเปลี่ยนเพื่อทำเป็นทรานสดิวเซอร์ที่มีรูปแบบต่างๆ ได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตประเภทนี้ก็มีราคาที่สูงมาก ซึ่งในปี ค.ศ.1992 Bowen และคณะ [33] ได้ทดลองใช้วิธีนี้ในการผลิตวัสดุผสมระหว่างเซรามิกกับพอลิเมอร์แบบ 1-3 ที่มีพื้นที่กว้าง เทคนิคนี้ใช้เตรียมวัสดุผสมที่ประกอบด้วยเส้นใยเซรามิกกับพอลิเมอร์ที่มีความละเอียดสูง ซึ่งนิยมใช้ทำอัลตราซาวด์ที่มีความถี่สูง ไฮโดรโฟนที่ใช้ได้น้ำ และทรานสดิวเซอร์ นอกจากนี้วิธีการนี้ยังช่วยให้ได้ทรานสดิวเซอร์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นในลักษณะสมมาตร ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีคุณภาพดีกว่าวิธีอื่นที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยกระบวนการนี้จะประกอบด้วยการอัดฉีดส่วนผสมของผงเซรามิก เทอร์โมพลาสติก และสารยึดเหนี่ยวเข้าไปในแม่พิมพ์ ทั้งนี้ต้องคำนึงถึงพื้นผิวของโลหะไม่ให้มีการปนเปื้อนสารอื่น หลังจากนั้นจึงทำการขับไล่สารยึดเหนี่ยวออกโดยการนำไปเผา และทำการเติมพอลิเมอร์เพื่อให้ได้วัสดุผสมแบบ 1-3 เส้นใยเซรามิกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.5 -1 มิลลิเมตร จะมีค่า d_{33} และค่า ϵ ประมาณ 800 พิโคคูลอมบ์ต่อนิวตัน และ 3600 ตามลำดับ วิธีนี้สามารถเตรียมวัสดุผสมที่มีเส้นใย PZT ที่มีขนาด 30 ไมโครเมตรได้

ปัจจุบันบริษัท Fiber Mats Inc ได้ทำการสาธิตการใช้เครื่องอัลตราลูม (ultraloom) ในการกำหนดตำแหน่งของแท่ง PZT ในวัสดุผสมแบบ 1-3 โดยการใส่แท่ง PZT เข้าไปในวัสดุที่มีลักษณะคล้ายไม้คอร์ค (cork) จากนั้นเส้นใยแก้วจะถูกทอในทิศทางที่สลับกัน แล้วชิ้นงานทั้งหมดจะถูกเคลือบด้วยพอลิเมอร์ที่เป็นเรซิน วิธีนี้สามารถเตรียมชิ้นงานที่มีความยาว 20-25 เซนติเมตร และวัสดุผสมที่มีรูปร่างทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอย่างน้อย 25-30 เซนติเมตร และสูง 50 เซนติเมตร ความพยายามในปัจจุบันได้มุ่งเน้นในการปรับปรุงการใส่แท่งเซรามิก โดยออกแบบให้อัลตราลูมใส่แท่งเซรามิกได้หลายแท่งในเวลาเดียวกัน จึงได้มีแนวคิดที่จะใช้ถาดที่สามารถบรรจุแท่งเซรามิกได้ถึง 30 แท่งเข้าไปครั้งเดียวโดยใช้เครื่องจักรเข้ามาช่วย

Runk และ Andrejco [42] ได้เสนอวิธีเตรียมวัสดุผสมเซรามิกกับพอลิเมอร์ แบบ 1-3 และ 2-2 ด้วยวิธีการเตรียมแผ่น PZT บางๆ โดยอาศัยกระบวนการเทปคาสติง (tape casting) แล้วนำไปวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยมีการเว้นช่องว่างระหว่างแผ่นเอาไว้ จากนั้นจึงทำการ

แทรกพอลิเมอร์เข้าไประหว่างแผ่นเซรามิกดังกล่าวจะได้วัสดุผสมแบบ 2-2 ส่วนการเตรียมวัสดุผสมแบบ 1-3 นั้นทำโดยการตัดชุดของแผ่นวัสดุที่วางเรียงซ้อนกันในแนวตั้งฉากให้เกิดเป็นช่องว่างในแนวขนานสลับกันไป แล้วจึงนำมาจัดเรียงเข้าไปใหม่ในแนวแบบ 1-3 แสดงดังรูป 2.11



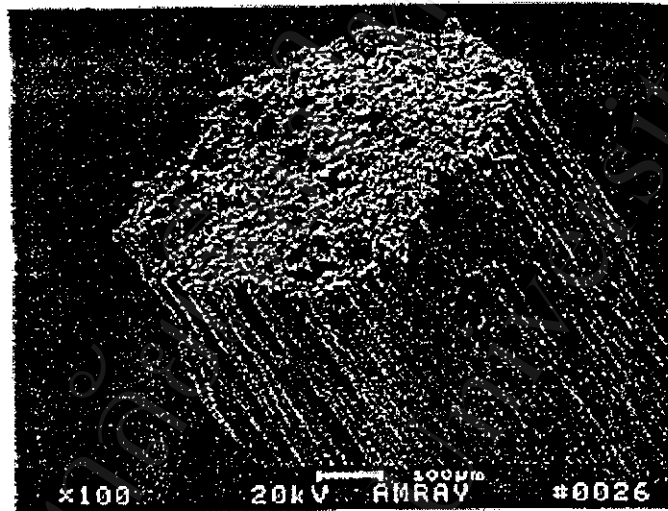
รูป 2.11 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2 และ 1-3 โดยวิธีเทปคาสต์ [13]

Eyett และคณะ [43] ได้เสนอวิธีการเตรียมวัสดุผสมแบบ 1-3 ด้วยการกัดเซาะเซรามิกให้เป็นร่องในแนวขนานโดยเหลือเพียงส่วนที่เป็นฐานรองไว้ แล้วจึงทำการตัดในแนวตั้งฉากกับแนวแรกอีกครั้ง จากนั้นจึงเติมซิลิโคนลงไปตามร่องจะทำให้ได้วัสดุผสมแบบ 1-3 ออกมา

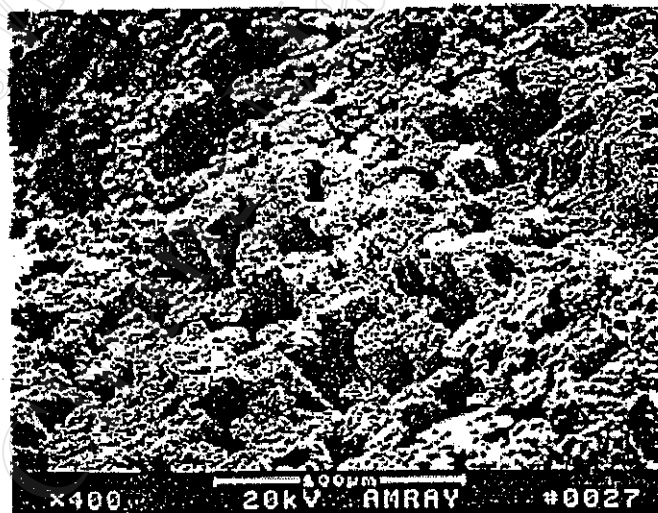
Ohara และคณะ [44] ได้ทดลองเตรียมวัสดุผสมแบบ 1-3 โดยการตัดเซรามิก PZT ให้มีลักษณะเป็นแผ่นกลมแบนโดยอาศัยการสั่นใบมีดด้วยคลื่นอัลตราโซนิกส์ทำให้เกิดการขาดสั แล้วจึงทำการเติมอีพอกซีลงไปเพื่อให้ได้วัสดุผสมแบบ 1-3 ออกมา

Cass [45] ได้ทำการผลิตเส้นใยของ PZT โดยอาศัยกระบวนการปั่นให้สาร PZT เหลวมีความหนืดสูงแล้วจึงทำการรีดให้เป็นเส้นลงในภาชนะที่บรรจุกรดซัลฟุริก จากนั้นทำการล้างและทำให้แห้งจะได้เส้นใย PZT ออกมา แสดงดังรูป 2.12 ซึ่งเส้นใยที่เตรียมได้นี้จะสามารถนำไป

ผลิตเป็นวัสดุผสมระหว่างเซรามิกกับพอลิเมอร์ แบบ 1-3 2-3 และ 3-3 ได้ด้วยการเติมอีพอกซีลงไปอีกที่



(a)



(b)

รูป 2.12 ภาพถ่าย SEM ของเส้นใย PZT ที่ผ่านการเผาแล้ว [13]

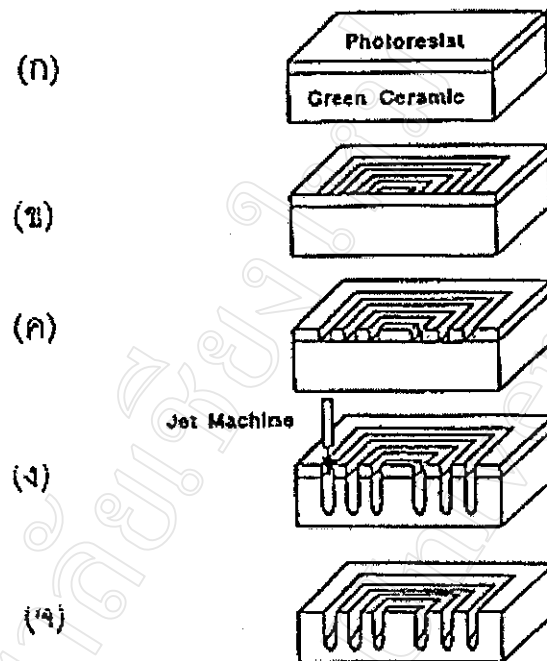
2.4.3 วัสดุผสมแบบ 2-2

ในวัสดุผสมที่มีรูปแบบของการเชื่อมต่อเฟสแบบ 2-2 จะมีเฟสของเซรามิกและเฟสของพอลิเมอร์ที่มีทิศทางการเชื่อมต่อกันเพียง 2 ทิศทาง ในแต่ละเฟสหรือมีลักษณะเป็นชั้นของเฟสเซรามิกวางสลับกันกับชั้นของเฟสพอลิเมอร์ซ้อนกันไปเรื่อยๆ

Bowen และ French [46] เสนอวิธีการเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2 โดยอาศัยวิธี injection molding ในการผลิตแผ่นเซรามิกแล้วนำไปผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อให้ตัวประสานระเหยออก หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการซินเตอร์แล้วจะทำการเติมพอลิเมอร์ภายหลัง

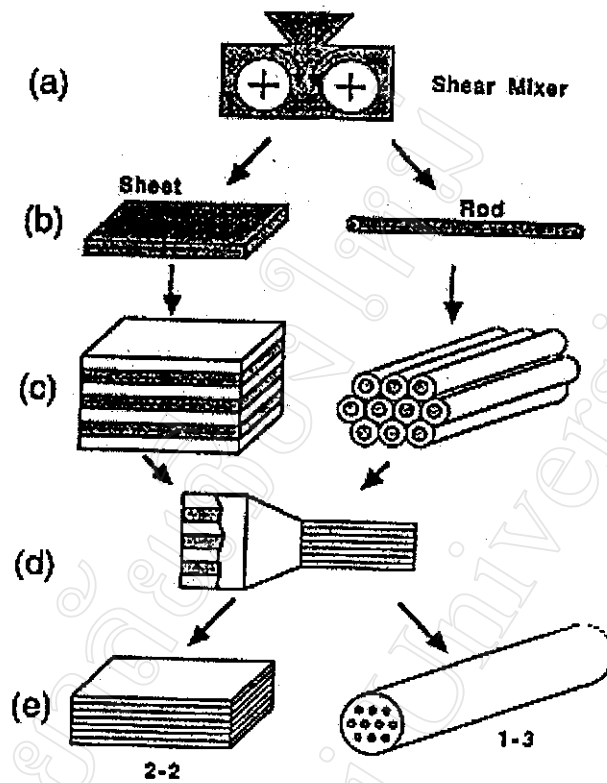
Rung และ Andrejco [42] ได้ทดลองเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2 โดยอาศัยการเตรียมแผ่นบางของ PZT โดยอาศัยกระบวนการเทปคาสติง (tape casting) แล้วนำไปวางเรียงซ้อนกันเป็นชั้นๆ โดยเว้นช่องว่างระหว่างแต่ละแผ่นเอาไว้เพื่อให้พอลิเมอร์เข้าไปแทรก ดังแสดงในรูป 2.11

Lubitz และคณะ [47] ได้ทดลองเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2 โดยอาศัยวิธี jet - machining โดยเริ่มจากการเตรียมชิ้นงาน PZT ที่ผสมตัวประสานแล้วผ่านการอัดขึ้นรูปมาทำการฉาบด้วยน้ำยาไวแสงเพื่อผ่านกระบวนการโฟโตเรซิสต์ (photoresist) แล้วใช้ jet machine ฉีดกาวของชิ้นงานออกเป็นร่องหลังจากนั้นจึงทำการเติมพอลิเมอร์ลงไปตามช่องว่างที่กัดเซาะเอาไว้ดังแสดงในรูป 2.13



รูป 2.13 ขั้นตอนการเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2 โดยอาศัยวิธี jet-machining [13]

Griffith และคณะ [48] ได้ทำการทดลองเตรียมวัสดุผสมแบบ 2-2 โดยอาศัยกระบวนการอัดรีดร่วม (co-extrusion) โดยการนำผงเซรามิกผสมกับเทอร์โมพลาสติก แล้วทำการรีดเป็นแผ่น หลังจากนั้นจึงนำแผ่นเซรามิกไปวางเรียงกับแผ่นเทอร์โมพลาสติกที่ได้เติมผงคาร์บอนลงไป แล้วจึงทำการอัดรีดอีกครั้งเพื่อลดขนาดของชิ้นงานลงโดยมีขั้นตอนการเตรียมแสดงดังในรูป 2.14



รูป 2.14 การเตรียมวัสดุผสมเซรามิกไฟเบอร์เล็กตรึงกับพอลิเมอร์ โดยวิธีอัดรีดร่วม [13]