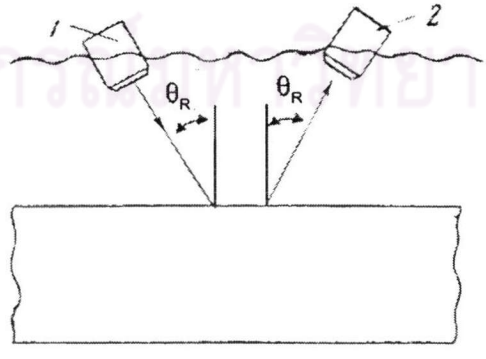
บทที่3

การสร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

หลังจากการค้นพบคลื่นเรย์ลี คลื่นชนิดนี้ก็ได้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์วัสดุแทนคลื่นในเนื้อสาร (bulk wave) ได้แก่คลื่นตามยาวและคลื่นตามขวาง เนื่องจากสมบัติของคลื่นเรย์ลี ที่เคลื่อนที่อยู่เฉพาะบนผิวของวัสดุ ทำให้สามารถใช้ตรวจสอบหาความบกพร่องของวัสดุที่อยู่บนผิวหรือที่ระดับความลึกใกล้ๆผิวได้ดีกว่าคลื่นในเนื้อสาร อีกทั้งยังใช้ได้กับวัสดุรูปทรงต่างๆ เช่น เป็นแผ่นแบนๆ เป็นแท่งทรงกระบอกหรือลักษณะแบบปีกเครื่องบินได้

นอกจากใช้ตรวจสอบความบกพร่องในวัสดุแล้ว คลื่นเรย์ลียังใช้ในการหาค่าคงที่ยืดหยุ่น (elastic constant) ของวัสดุ ได้แก่ ค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) ค่ามอดูลัสเฉือน (shear modulus) และค่ามอดูลัสก้อน (bulk modulus) และใช้ในการตรวจสอบความแข็งของพื้นผิว (surface hardened) โดยดูจากค่าการสูญเสียพลังงานของคลื่นเรย์ลี เมื่อเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวของวัสดุ

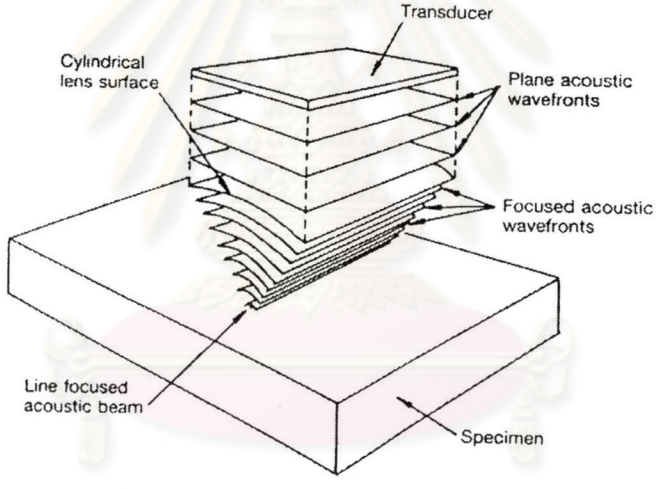
วิธีการที่ทำให้เกิดคลื่นเรย์ลีในวัสดุได้กล่าวไว้แล้วในบทที่ 2 หลักการก็คือใช้ตัวกำเนิดคลื่น (actuator) ส่งคลื่นตามยาวเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่เป็นของเหลว ไปตกกระทบที่ผิวของวัสดุทำมุม $\theta_R = \sin^{-1}\left(\frac{V_l}{V_R}\right)$ กับแนวดิ่ง กระตุ้นให้เกิดคลื่นเรย์ลีขึ้นที่ผิวของวัสดุ จากนั้นคลื่นเรย์ลีจะเสียพลังงานไปเป็นคลื่นตามยาวเคลื่อนที่กลับมาที่ของเหลว เราก็จะใช้ตัวรับรู้ (sensor) วางทำมุม θ_R กับแนวดิ่ง เพื่อรับคลื่นที่เดินทางกลับมาดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 การกระตุ้นให้เกิดคลื่นเรย์ลีที่วัสดุ โดยให้ตัวกำเนิดคลื่น(ตัวที่1) และตัวรับรู้(ตัวที่2) วางทำมุม θ_R กับแนวดิ่ง

จากวิธีการข้างต้นจะต้องใช้อุปกรณ์ 2 ตัว ทำหน้าที่เป็นตัวส่งและรับคลื่น วางอยู่ในตำแหน่งทำมุม θ_R กับแนวดิ่งพอดี ถึงจะทำให้เกิดคลื่นและรับคลื่นเรย์ลีได้ ซึ่งจะเป็นวิธีการที่ยุ่งยากในการหาตำแหน่งที่พอดีกันทั้งตัวส่งและตัวรับ

ต่อมา Kushibiki และ Chunbashi [4] ได้เสนออุปกรณ์แบบใหม่ที่เรียกว่าแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส (line-focus transducer) ดังแสดงในรูปที่ 3.2 หลักการของแทรนสดิวเซอร์นี้จะใช้เลนส์อคูสติกที่ทำจากควอทซ (quartz) โฟกัสคลื่นระนาบจากแทรนสดิวเซอร์ที่ทำจากซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ให้มีลักษณะเป็นเส้นไปตกบนผิวของวัสดุ ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งโฟกัสพอดี จากนั้นจะเลื่อนแทรนสดิวเซอร์เข้าหาวัสดุเรียกวิธีการนี้ว่าวิธีดีโฟกัสซิงเทคนิค (defocusing technique) ทำให้เกิดคลื่นเรย์ลีขึ้นที่ผิวของวัสดุ เนื่องจากคลื่นที่ออกมาจากแทรนสดิวเซอร์จะมีบางส่วนที่ทำมุม θ_R กับแนวดิ่งพอดีจากนั้นคลื่นที่สะท้อนกลับก็จะถูกตรวจวัดได้ด้วยแทรนสดิวเซอร์ตัวเดียวกัน



รูปที่ 3.2 แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสของ Kushibiki และ Chunbashi [4]

แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสของ Kushibiki และ Chunbashi มีข้อดีคือใช้แทรนสดิวเซอร์เพียงตัวเดียว ไม่ยุ่งยากในการหาตำแหน่งการวางเพื่อให้เกิดคลื่นเรย์ลี แต่จะมีปัญหาในเรื่องของการสะท้อนของคลื่นที่รอยต่อระหว่างเลนส์และแทรนสดิวเซอร์ ทำให้ไปลดระดับสัญญาณที่วัดได้หรือทำให้รูปร่างของสัญญาณผิดเพี้ยนไป

Xiang และคณะ [5] ได้เสนอแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสที่ไม่ใช้เลนส์อคูสติกเรียกว่า lens-less line-focus transducer โดยใช้ข้อดีของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกที่เป็นพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่น สามารถโค้งงอให้มีลักษณะเหมือนกับเลนส์และทำหน้าที่เป็นทั้งตัวกำเนิดและรับคลื่นได้เช่นเดียวกับ ZnO แทรนสดิวเซอร์ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ก็ได้สร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์

โฟกัสที่มีโครงสร้างแบบเดียวกับของ Xiang และคณะขึ้นมาแล้วประยุกต์ใช้ในการหาค่าคงที่ยืดหยุ่นและความหนาแน่นของวัสดุ โดยอาศัยการวัดอัตราเร็วของคลื่นตามยาว อัตราเร็วของคลื่นเรย์ลี และสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของคลื่นเรย์ลีในวัสดุ 5 ชนิดได้แก่ อลูมิเนียม อลูมินา สแตนเลสสตีล เหล็ก และกระจกโซดาไลม์ ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการวัดในบทที่ 4

3.1 หลักการสร้างแทรนสดิวเซอร์

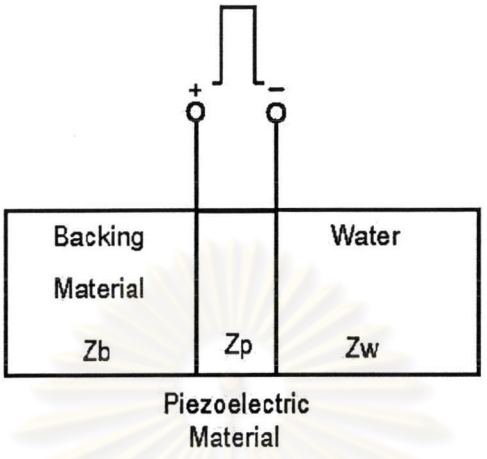
ในการวัดอัตราเร็วเสียงของวัสดุในน้ำนั้น แทรนสดิวเซอร์จะถูกกระตุ้นด้วยแรงดันไฟฟ้าในรูปของพัลส์สั้นๆ เพื่อให้เกิดพัลส์คลื่นเสียงส่งไปในวัสดุที่อยู่ในน้ำ จากนั้นวัดเวลาที่พัลส์ใช้เดินทางในเนื้อวัสดุ แล้วคำนวณหาค่าอัตราเร็วเสียงในวัสดุนั้น ความละเอียดของการวัดจึงขึ้นอยู่กับความกว้างของพัลส์ที่ป้อนให้กับแทรนสดิวเซอร์ และความสามารถของแทรนสดิวเซอร์ในการส่งและรับพัลส์สั้นๆได้

สำหรับแทรนสดิวเซอร์ที่สามารถรับและส่งพัลส์คลื่นเสียงที่มีความกว้างของพัลส์น้อยๆ ได้จะมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 3.3 ประกอบไปด้วยวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกทำหน้าที่กำเนิดพัลส์คลื่นเสียงหลังจากได้รับการกระตุ้นด้วยพัลส์แรงดันไฟฟ้า เพื่อส่งพัลส์คลื่นเสียงไปยังวัสดุที่ต้องการทดสอบ ซึ่งใช้น้ำเป็นตัวกลางในการเคลื่อนที่ของคลื่น เมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางจากวัสดุกลับมาที่แทรนสดิวเซอร์ วัสดุเพียสโซอิเล็กทริกจะทำหน้าที่เป็นตัวรับคลื่นเสียงแล้วเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าเพื่อใช้ในการคำนวณหาค่าอัตราเร็วของคลื่นเสียงในวัสดุต่อไป เพื่อให้แทรนสดิวเซอร์สามารถรับและส่งพัลส์คลื่นเสียงที่มีความกว้างของพัลส์น้อยๆได้ จะต้องมีวัสดุหนุนรอง (backing material) เชื่อมติดที่ผิวด้านหลังของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกทำหน้าที่ในการดูดกลืนพลังงานและลดการสะท้อนกลับของคลื่น เพื่อให้วัสดุเพียสโซอิเล็กทริกหยุดสั่นได้เร็วขึ้นหลังจากได้รับการกระตุ้น ทำให้พัลส์คลื่นเสียงที่รับและส่งจากแทรนสดิวเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบนี้มีความกว้างของพัลส์น้อยๆ สามารถวัดอัตราเร็วเสียงในวัสดุได้ละเอียดขึ้น

ในการเลือกวัสดุที่ใช้เป็นวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกและวัสดุหนุนรองจะต้องคำนึงถึงค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุทั้งสอง โดยมีหลักในการเลือกดังนี้ [6]

1 ค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกต้องใกล้เคียงกับน้ำ เพื่อให้พลังงานของคลื่นเสียงสามารถถูกส่งไปในน้ำได้มากที่สุด

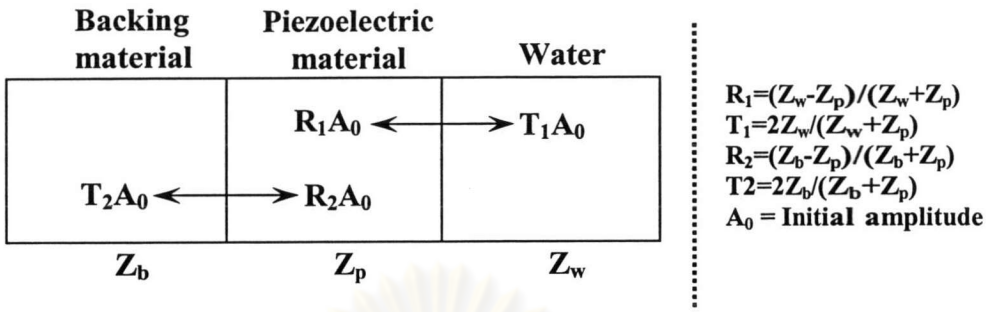
2 ค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรองต้องใกล้เคียงกับวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก เพื่อลดการสะท้อนของคลื่นกลับไปที่วัสดุเพียสโซอิเล็กทริก ทำให้วัสดุเพียสโซอิเล็กทริกหยุดสั่นได้เร็วขึ้น



รูปที่ 3.3 โครงสร้างของแทรนสดิวเซอร์สำหรับส่งและรับพัลส์คลื่นเสียง [6]

3.1.1 เมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ทำหน้าที่ส่งพัลส์คลื่นเสียง

เมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ที่มีโครงสร้างตามรูปที่ 3.3 ทำหน้าที่เป็นตัวส่งคลื่นเสียง โดยกระตุ้นวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกด้วยพัลส์แรงดันไฟฟ้า วัสดุเพียสโซอิเล็กทริกจะสั่นแล้วส่งพัลส์คลื่นเสียงออกทางผิวด้านหน้าและผิวด้านหลัง เมื่อพัลส์คลื่นเสียงเคลื่อนที่จากผิวด้านหน้าไปถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับน้ำจะเกิดการสะท้อนและส่งผ่านของคลื่น โดยที่แอมปลิจูดของคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านจะเท่ากับ R_1A_0 และ T_1A_0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งค่า R และ T คือค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนและสัมประสิทธิ์การส่งผ่านหาได้จากสมการที่ (2.69) และ (2.70) ตามลำดับ เมื่อพัลส์คลื่นเสียงที่เคลื่อนที่จากผิวด้านหลังเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับวัสดุหนุนรองจะเกิดการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่น โดยแอมปลิจูดของคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านจะเท่ากับ R_2A_0 และ T_2A_0 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.4 พิจารณาจำนวนและแอมปลิจูดของพัลส์คลื่นเสียง เมื่อแทรนสดิวเซอร์มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรอง (Z_b) น้อยกว่า มากกว่า และเท่ากับค่าอิมพีแดนซ์ของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก (Z_p)



รูปที่ 3.4 แผนภาพการหาแอมปลิจูดของพัลส์ส่งผ่านและพัลส์สะท้อนกลับ เมื่อแทรนสดิวเซอร์ทำหน้าที่ส่งพัลส์คลื่นเสียง

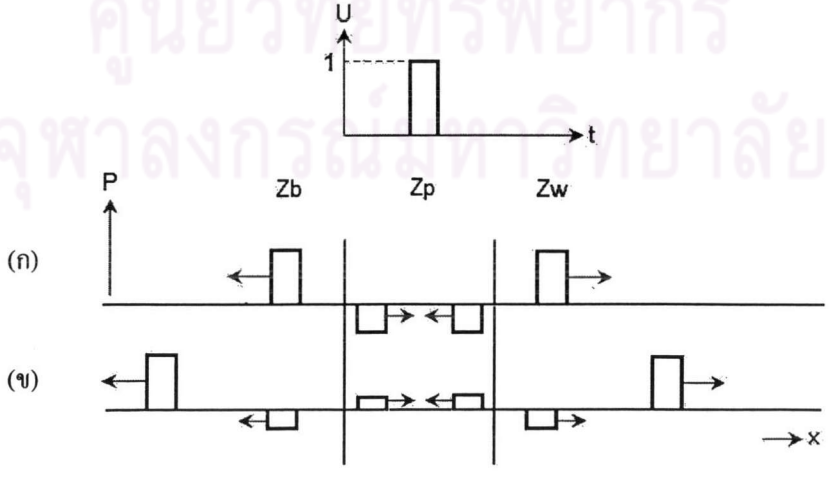
เมื่อกระตุ้นแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b < Z_p$ ด้วยพัลส์แรงดันไฟฟ้า U ดังรูปที่ 3.5 จะเกิดพัลส์คลื่นเสียงเดินทางออกจากผิวทั้งสองด้านของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก พัลส์คลื่นเสียงที่เคลื่อนที่จากผิวด้านหน้าเมื่อเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับน้ำ จะมีคลื่นบางส่วนส่งผ่านเข้าไปในน้ำและบางส่วนสะท้อนกลับกลับเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก โดยที่เฟสของคลื่นจะเปลี่ยนไป 180° เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของน้ำน้อยกว่าวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก ส่วนพัลส์คลื่นเสียงที่เคลื่อนที่จากผิวด้านหลังเมื่อเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับวัสดุหนุนรองจะมีคลื่นบางส่วนส่งผ่านไปในวัสดุหนุนรองและคลื่นบางส่วนสะท้อนกลับไปที่วัสดุเพียสโซอิเล็กทริก โดยที่เฟสของคลื่นจะเปลี่ยนไป 180° เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรองมีค่าน้อยกว่าวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ก) พิจารณาคลื่นที่สะท้อนกลับเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก เมื่อคลื่นเหล่านี้เดินทางมาถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกและน้ำจะมีคลื่นบางส่วนสะท้อนกลับเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกและคลื่นบางส่วนจะส่งผ่านเข้าไปในน้ำทำให้จำนวนของพัลส์คลื่นเสียงที่ส่งลงไปในน้ำมีค่ามากกว่า 1 พัลส์ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 (ข) ทั้งๆที่แทรนสดิวเซอร์ถูกกระตุ้นด้วยพัลส์แรงดันไฟฟ้าเพียง 1 พัลส์ ซึ่งจำนวนของพัลส์คลื่นเสียงที่มากกว่า 1 พัลส์นี้จะทำให้เกิดความยากลำบากในแยกแยะสัญญาณเพื่อวัดช่วงเวลาที่พัลส์คลื่นเสียงใช้เดินทางในวัสดุ แล้วหาค่าอัตราเร็วเสียงในวัสดุนั้น เมื่อพัลส์คลื่นเสียงเหล่านี้สะท้อนกลับจากวัสดุมาที่แทรนสดิวเซอร์

ต่อไปพิจารณาแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b > Z_p$ เมื่อกระตุ้นด้วยพัลส์แรงดันไฟฟ้า U ดังรูปที่ 3.6 ทำให้เกิดพัลส์คลื่นเสียงเคลื่อนที่ออกจากผิวทั้งสองด้านของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก พัลส์คลื่นเสียงจากผิวด้านหน้าเมื่อเดินทางถึงบริเวณรอยต่อของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกและน้ำลักษณะของพัลส์สะท้อนและส่งผ่านจะเหมือนกับกรณีแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b < Z_p$ ส่วนพัลส์คลื่นเสียงจากผิวด้านหลังเมื่อเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุหนุนรองกับวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก จะมี

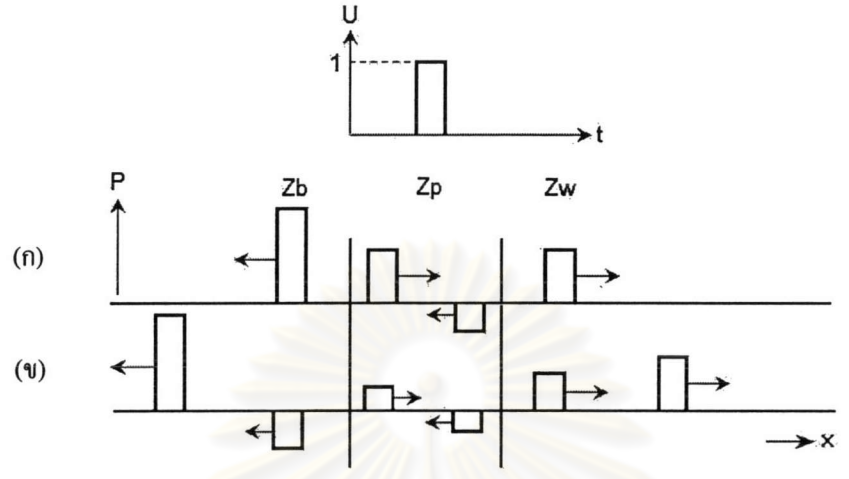
คลื่นบางส่วนส่งผ่านเข้าไปในวัสดุหนุนรองและบางส่วนสะท้อนกลับไปที่วัสดุเพียสโซอิเล็กทริก โดยที่เฟสของคลื่นสะท้อนจะไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรองมีค่ามากกว่าวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) พิจารณาคลื่นที่สะท้อนกลับเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกจะทำให้เกิดพัลส์ที่ส่งไปในน้ำมีค่ามากกว่า 1 พัลส์เหมือนกับกรณีแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b < Z_p$ แต่เฟสของคลื่นในกรณีนี้จะไม่เปลี่ยนแปลงดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข)

สุดท้ายพิจารณาแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b = Z_p$ เมื่อกระตุ้นด้วยพัลส์แรงดันไฟฟ้า U ดังแสดงในรูปที่ 3.7 จะเกิดพัลส์คลื่นเสียงเคลื่อนที่ออกจากผิวทั้งสองด้านของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก พัลส์คลื่นเสียงจากผิวด้านหน้าเมื่อเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับน้ำจะได้ลักษณะของพัลส์ที่ส่งผ่านและสะท้อนกลับเหมือนกับกรณีแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b < Z_p$ ส่วนพัลส์คลื่นเสียงจากผิวด้านหลังเมื่อเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับวัสดุหนุนรอง จะเกิดการส่งผ่านของคลื่นเข้าไปในวัสดุหนุนรองทั้งหมดโดยไม่มีการสะท้อนกลับไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกเลยดังรูปที่ 3.7 (ก) พิจารณาคลื่นจากผิวด้านหน้าที่สะท้อนกลับจากน้ำเดินทางเข้ามาในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกเมื่อถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับน้ำ คลื่นทั้งหมดจะถูกส่งผ่านเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกทั้งหมดทำให้มีพัลส์คลื่นเสียงเพียง 1 พัลส์ ที่ส่งไปในน้ำ ดังรูปที่ 3.7 (ข)

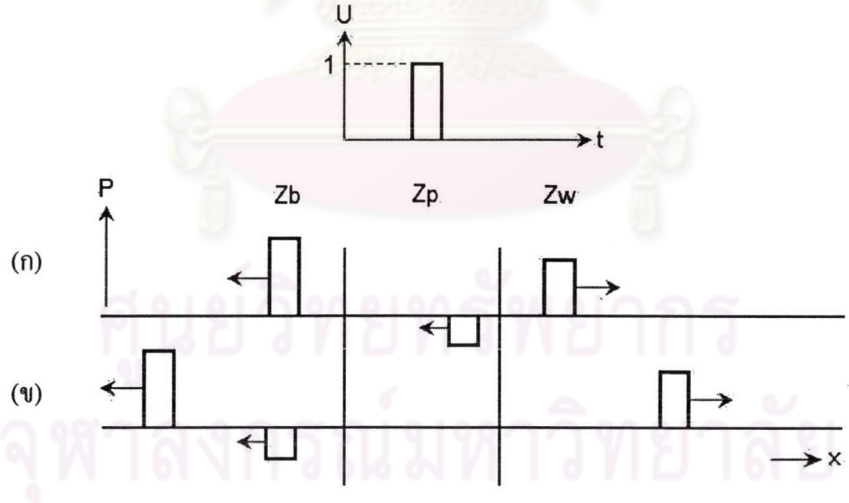
เมื่อพิจารณารูปที่ 3.5 3.6 และ 3.7 เมื่อ $Z_b < Z_p$, $Z_b > Z_p$ และ $Z_b = Z_p$ ตามลำดับ พบว่าจำนวนพัลส์คลื่นเสียงที่ได้จากแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b = Z_p$ จะมีจำนวนพัลส์น้อยที่สุด ดังนั้นแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรองใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกสามารถส่งคลื่นเสียงที่มีความกว้างของพัลส์ต่ำๆได้ดีกว่า จึงเหมาะที่จะนำแทรนสดิวเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบนี้ไปใช้งาน



รูปที่ 3.5 แผนภาพการส่งพัลส์ของแทรนสดิวเซอร์ เมื่อ $2Z_b = Z_p = 2Z_w$



รูปที่ 3.6 แผนภาพการส่งพัลส์ของแทรนสดิวเซอร์ เมื่อ $\frac{Z_b}{2} = Z_p = 2Z_w$

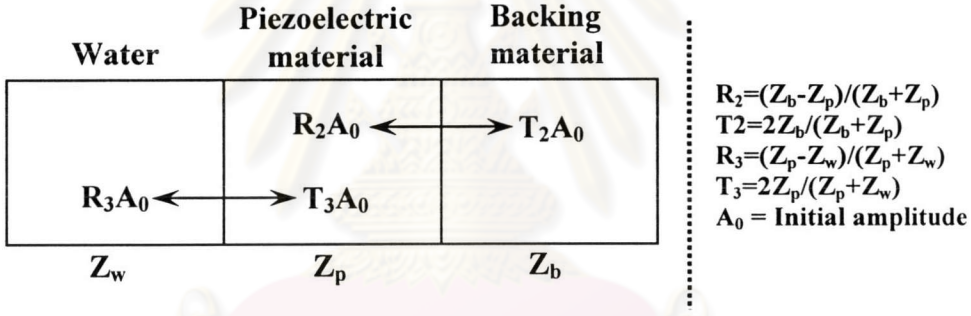


รูปที่ 3.7 แผนภาพการส่งพัลส์ของแทรนสดิวเซอร์ เมื่อ $Z_b = Z_p = 2Z_w$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1.2 เมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ทำหน้าที่รับพัลส์คลื่นเสียง

เมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ตามโครงสร้างในรูปที่ 3.3 ทำหน้าที่รับพัลส์คลื่นเสียง ที่เคลื่อนที่จากน้ำมาที่วัสดุเพียสโซอิเล็กทริก เมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางมาถึงบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก จะเกิดการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่น โดยที่แอมปลิจูดของคลื่นสะท้อนและคลื่นส่งผ่านจะเท่ากับ R_3A_0 และ T_3A_0 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.8 เมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางมาถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับวัสดุหนุนรองจะเกิดการสะท้อนและการส่งผ่านของคลื่น โดยที่แอมปลิจูดของคลื่นจะเท่ากับ R_2A_0 และ T_3A_0 ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 3.8 พิจารณาลักษณะของพัลส์สะท้อนกลับของแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรองน้อยกว่า มากกว่าและเท่ากับวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก



รูปที่ 3.8 แผนภาพการหาแอมปลิจูดของพัลส์ส่งผ่านและพัลส์สะท้อนกลับ เมื่อแทรนสดิวเซอร์ทำหน้าที่รับพัลส์คลื่นเสียง

เมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b < Z_p$ ทำหน้าที่รับคลื่นเสียง เมื่อพัลส์คลื่นเสียงที่เดินทางจากน้ำมาถึงบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก คลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับเข้าไปในน้ำ (ส่วนที่ไม่ได้แรเงา) และคลื่นบางส่วนจะส่งผ่านเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก (ส่วนที่แรเงา) ดังรูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ 1 ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งขนาดของแรงดันไฟฟ้า U จะเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของพัลส์ที่ส่งผ่านเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีความชันของกราฟเป็นบวก จนเมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกทั้งหมดดังรูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ 2 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ใต้กราฟของพัลส์คลื่นเสียงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จึงคงที่มีความชันของกราฟเป็นศูนย์ เมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับวัสดุหนุนรอง คลื่นบางส่วนจะส่งผ่านเข้าไปใน

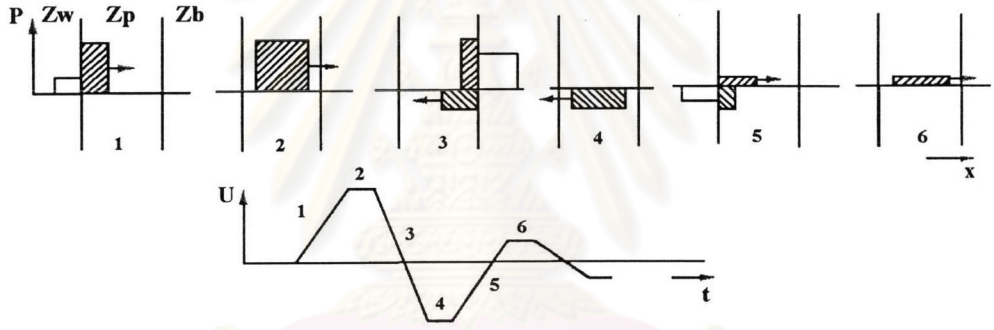
วัสดุหนุนรอง(ส่วนที่ไม่ได้แรเงา) และบางส่วนจะสะท้อนกลับมาที่วัสดุเพียสโซอิเล็กทริก (ส่วนที่แรเงา) โดยที่เฟสของคลื่นจะเปลี่ยนไป 180° ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะลดลงจนเป็นค่าลบดังแสดงในรูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ 3 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่อยู่ภายในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ 4 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกและน้ำ คลื่นที่สะท้อนกลับมาที่วัสดุเพียสโซอิเล็กทริกจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นจนเป็นค่าบวกดังแสดงในรูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ 5 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่อยู่ภายในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ตำแหน่งที่ 6

ต่อไปเมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b > Z_p$ ทำหน้าที่รับคลื่นเสียง เมื่อพัลส์คลื่นเสียงที่เดินทางจากน้ำมาถึงบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก คลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับเข้าไปในน้ำ (ส่วนที่ไม่ได้แรเงา) และคลื่นบางส่วนจะส่งผ่านเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก (ส่วนที่แรเงา) ดังรูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ 1 ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งขนาดของแรงดันไฟฟ้า U จะเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของพัลส์ที่ส่งผ่านเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีความชันของกราฟเป็นบวก จนเมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกทั้งหมดดังรูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ 2 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ใต้กราฟของพัลส์คลื่นเสียงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จึงคงที่ มีความชันของกราฟเป็นศูนย์ เมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับวัสดุหนุนรอง คลื่นบางส่วนจะส่งผ่านเข้าไปในวัสดุหนุนรอง(ส่วนที่ไม่ได้แรเงา) และบางส่วนจะสะท้อนกลับมาที่วัสดุเพียสโซอิเล็กทริก (ส่วนที่แรเงา) โดยที่เฟสของคลื่นจะคงเดิมแต่แอมปลิจูดมีค่าลดลง ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะลดลงแต่ยังเป็นค่าบวกดังแสดงในรูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ 3 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่อยู่ภายในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ 4 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่มาถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็ก ทริกและน้ำ คลื่นที่สะท้อนกลับมาที่วัสดุเพียสโซอิเล็กทริกจะมีเฟสเปลี่ยนไป 180° ทำให้แรงดันไฟฟ้าจะลดลงจนเป็นค่าลบดังแสดงในรูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ 5 เมื่อคลื่นเคลื่อนที่อยู่ภายในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกแรงดันไฟฟ้าที่ได้จะคงที่ดังแสดงในรูปที่ 3.10 ตำแหน่งที่ 6

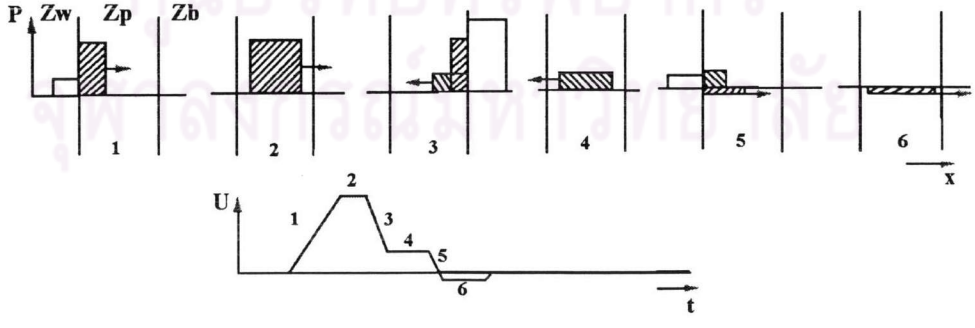
สุดท้ายเมื่อให้แทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b = Z_p$ ทำหน้าที่รับคลื่นเสียง เมื่อพัลส์คลื่นเสียงที่เดินทางจากน้ำมาถึงบริเวณรอยต่อระหว่างน้ำและวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก คลื่นบางส่วนจะสะท้อนกลับเข้าไปในน้ำ (ส่วนที่ไม่ได้แรเงา) และคลื่นบางส่วนจะส่งผ่านเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก (ส่วนที่แรเงา) ดังรูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่ 1 ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งขนาดของแรงดันไฟฟ้า U จะเท่ากับพื้นที่ใต้กราฟของพัลส์ที่ส่งผ่านเข้าไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกซึ่งจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้มีความชันของกราฟเป็นบวก จนเมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางเข้าไปในวัสดุเพียส

โซอิเล็กทริกทั้งหมดดังรูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่ 2 จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ใต้กราฟของคลื่นเสียงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จึงคงที่ มีความชันของกราฟเป็นศูนย์ เมื่อพัลส์คลื่นเสียงเดินทางถึงบริเวณรอยต่อระหว่างวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกกับวัสดุหนุนรอง คลื่นทั้งหมดจะส่งผ่านเข้าไปในวัสดุหนุนรองทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ได้จะลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ตำแหน่งที่ 3

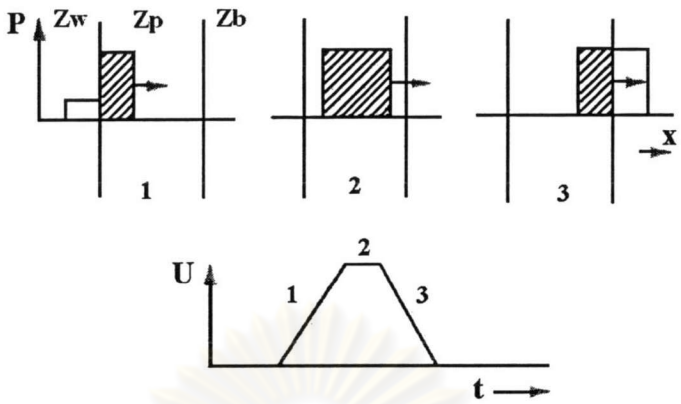
เมื่อพิจารณารูปที่ 3.9 3.10 และ 3.11 เมื่อ $Z_b < Z_p$ $Z_b > Z_p$ และ $Z_b = Z_p$ ตามลำดับ พบว่าแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b = Z_p$ จะมีความกว้างของพัลส์น้อยที่สุด ดังนั้นแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรองใกล้เคียงกับอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกสามารถรับคลื่นเสียงที่มีความกว้างของพัลส์ต่ำๆ ได้ดีกว่า จึงเหมาะที่จะนำแทรนสดิวเซอร์ที่มีโครงสร้างแบบนี้ไปใช้งาน



รูปที่ 3.9 แผนภาพการรับพัลส์ของแทรนสดิวเซอร์ เมื่อ $2Z_w = Z_p = 2Z_b$



รูปที่ 3.10 แผนภาพการรับพัลส์ของแทรนสดิวเซอร์ เมื่อ $2Z_w = Z_p = Z_b / 2$



รูปที่ 3.11 แผนภาพการรับพัลส์ของแทรนสดิวเซอร์ เมื่อ $2Z_w = Z_p = Z_b$

จากหลักการสร้างแทรนสดิวเซอร์ที่ได้กล่าวมา ฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (polyvinylidene fluoride) หรือเรียกว่า ฟิล์ม PVDF เหมาะที่จะใช้เป็นวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกของแทรนสดิวเซอร์ (ข้อมูลของฟิล์ม PVDF ได้แสดงไว้ในภาคผนวก ก) เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของฟิล์ม PVDF (เท่ากับ 3.92 Mrayl) มีค่าใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของน้ำ (เท่ากับ 1.5 Mrayl) มากที่สุดเมื่อเทียบกับวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกอื่นๆและยังมีความยืดหยุ่นสามารถโค้งงอได้เหมาะกับการทำแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสอีกด้วย ส่วนวัสดุหนุนรองนอกจากจะต้องค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกใกล้เคียงกับฟิล์ม PVDF แล้วยังต้องทำหน้าที่ยึดฟิล์ม PVDF ให้อยู่ในรูปร่างโค้งตามที่ต้องการและยึดติดกับกรอบนอกของแทรนสดิวเซอร์ที่เป็นอลูมิเนียมได้อีกด้วย วัสดุที่มีคุณสมบัติแบบนี้ก็คือกาวอีพ็อกซี (epoxy resin) เพราะความสามารถในการติดวัสดุได้เกือบทุกชนิดและมีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกประมาณ 2.6 ถึง 3.0 Mrayl สามารถที่จะเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของกาวอีพ็อกซีให้ใกล้เคียงกับฟิล์ม PVDF ได้ โดยการเติมผงทังสเตนลงไป ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อที่ 3.2.2

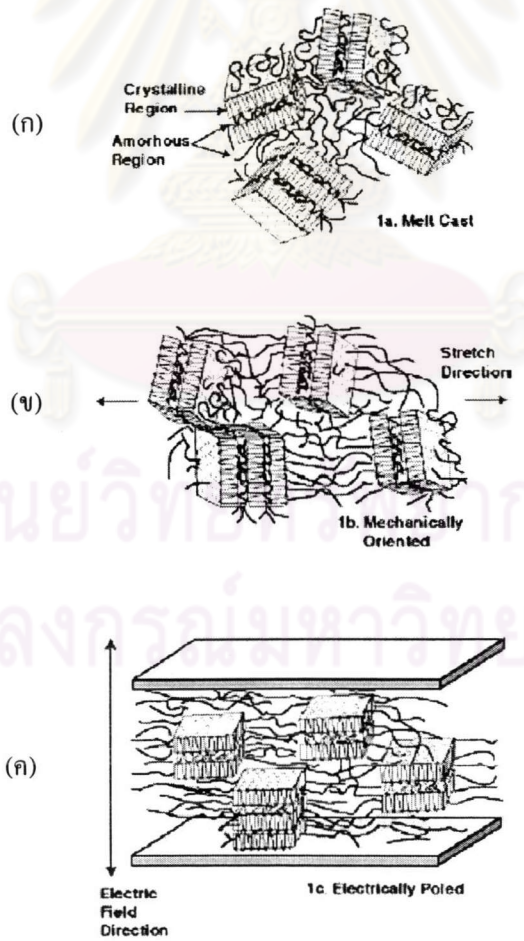
3.2 ส่วนประกอบของแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

3.2.1 ฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

เนื่องจากฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์หรือฟิล์ม PVDF มีสมบัติเพียสโซอิเล็กทริกจึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นแทรนสดิวเซอร์ได้ ในหัวข้อนี้เราจะกล่าวถึงโครงสร้างและสมบัติเพียสโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF

3.2.1.1 โครงสร้างของฟิล์มพอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์

พอลิเมอร์ PVDF จัดเป็นพอลิเมอร์กึ่งผลึก (semicrystalline) คือมีส่วนที่มีโครงสร้างแบบ อสัณฐาน (amorphous) และแบบผลึกปนกันดังรูปที่ 3.12 (ก) ประกอบด้วยมอนอเมอร์ – (CH_2CF_2) – เรียงตัวเป็นสายโซ่ยาว ฟิล์ม PVDF ถูกเตรียมโดยวิธีทำให้อยู่ในรูปของเหลวก่อนแล้วเอาไปหล่อ (casting) ลงบนพิมพ์ จากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลง จะได้ฟิล์ม PVDF ที่มีโครงสร้างแบบเฟส α ที่มีการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนดังรูปที่ 3.13 (ก) และมีเซลล์หน่วย (unit cell) แบบออร์โทรอมบิก (orthorhombic) ที่มีค่า a = 4.96 $A°$ b = 9.64 $A°$ c = 4.62 $A°$ ดังรูปที่ 3.14 (ก) พิจารณาโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole) ของแต่ละสายโซ่โมเลกุลจะมีทิศตรงข้ามกันทำให้ผลึกแบบนี้เป็นผลึกแบบไม่มีขั้วและมีโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิเป็นศูนย์ ดังนั้นฟิล์มแบบเฟส α จึงไม่แสดงสมบัติเพียสโซอิเล็กทริก

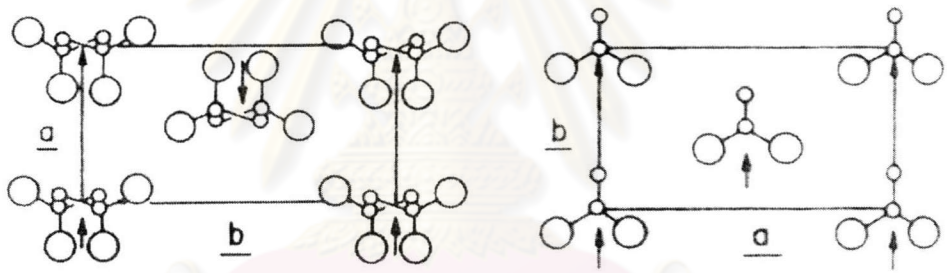


รูปที่ 3.12 กระบวนการเตรียมฟิล์ม PVDF ให้มีสมบัติเพียสโซอิเล็กทริก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

(ก) (ข)

รูปที่ 3.13 โครงสร้างการเรียงตัวของสายโซ่โมเลกุลของฟิล์ม PVDF แบบ (ก) เฟส α และ แบบ (ข) เฟส β [7]



(ก) (ข)

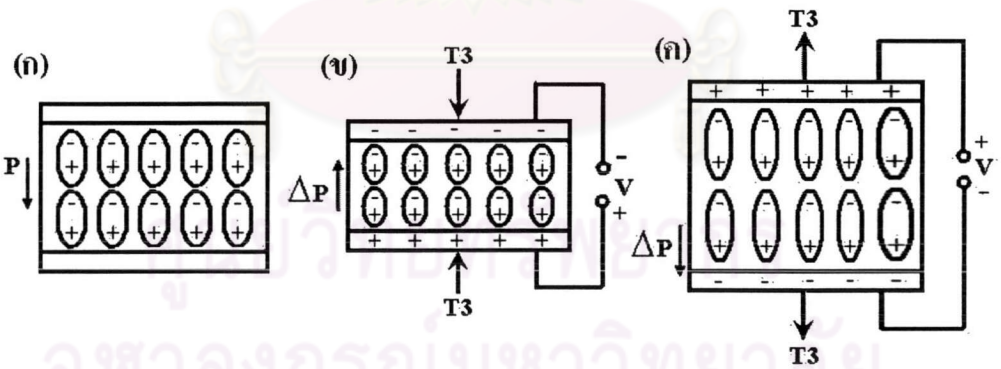
รูปที่ 3.14 เซลล์หน่วยของ PVDF แบบ (ก) เฟส α และ แบบ (ข) เฟส β [7]

ถ้าดึงฟิล์มแบบเฟส α ให้ยืดออกจากความยาวเดิมประมาณ 4-5 เท่า ดังรูปที่ 3.12 (ข)จะได้โครงสร้างผลึกแบบเฟส β ที่มีการเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนดังรูป 3.13(ข) และมีเซลล์หน่วย (unit cell) แบบออร์โทรอมบิก (orthorhombic) ที่มีค่า a = 8.47 $A°$, b = 4.90 $A°$, c = 2.56 $A°$ ดังรูปที่ 3.14 (ข) พิจารณาโมเมนต์ขั้วคู่ของสายโซ่โมเลกุลจะมีทิศเดียวกัน ทำให้ค่าโมเมนต์ขั้วคู่สุทธิไม่เป็นศูนย์ ผลึกแบบนี้จึงเป็นผลึกแบบมีขั้ว แต่การเรียงตัวของแต่ละผลึกในฟิล์มเป็นแบบสุ่มทำให้ค่าโพลาไรเซชันของฟิล์มเป็นศูนย์ จึงต้องมีการจัดเรียงตัวของผลึกใหม่ โดยป้อนสนามไฟฟ้าให้กับฟิล์มเรียกว่าการจัดขั้ว (polling) ดังรูปที่ 3.12 (ค) เพื่อให้ฟิล์มมีค่าโพลาไรเซชันและสามารถแสดงสมบัติเพียสโซอิเล็กทริก

3.2.1.2 สมบัติเพียสโซอิเล็กทริกของฟิล์ม PVDF

สมบัติเพียสโซอิเล็กทริกจะเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า (direct effect) หรือในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าไปเป็นพลังงานทางกลได้ (indirect effect)

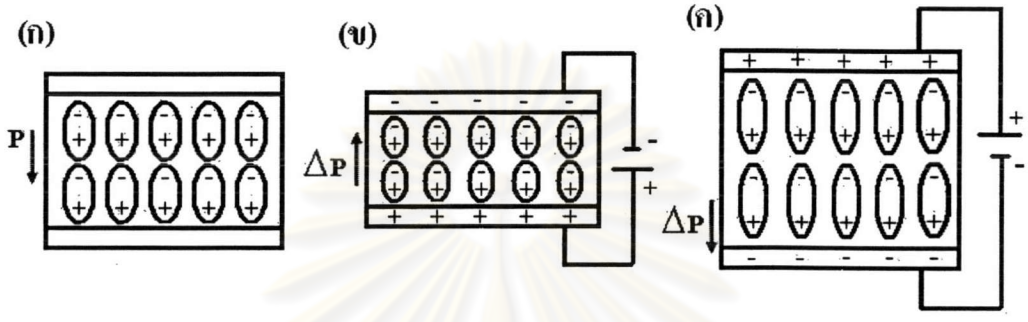
3.2.1.2.1 ปรากฏการณ์โดยตรง (direct effect) เมื่อฟิล์ม PVDF ได้รับความเค้นแล้ว จะเกิดความเครียดมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงพลาไรเซชัน ทั้งนี้เราสามารถวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้นได้ พิจารณารูปที่ 3.15 (ก) ฟิล์ม PVDF ที่ผ่านการยืดและจัดขั้วมีค่าโพลาไรเซชัน P ซึ่ง $P \neq 0$ เมื่อให้ความเค้นกดลงจนความหนาของฟิล์มลดลงทำให้โมเมนต์ขั้วคู่มีขนาดสั้นลง ค่าโพลาไรเซชันจะลดลงเหลือ $P - \Delta P$ ค่าโพลาไรเซชัน $-\Delta P$ ที่เกิดขึ้นทำให้มีประจุโพลาไรเซชันที่เป็นลบที่ผิวด้านบนและบวกที่ผิวด้านล่าง ประจุโพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นนี้จะเหนี่ยวนำให้เกิดประจุอิสระที่ขั้วไฟฟ้าด้านบนเป็นลบและขั้วไฟฟ้าด้านล่างเป็นบวก สามารถวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าด้านบนต่อด้านล่างเป็นลบดังรูปที่ 3.15 (ข) ในทางกลับกันถ้าให้ความเค้นดึงฟิล์มให้จนความหนาเพิ่มขึ้น ความต่างศักย์ต่อผิวบนและผิวล่างจะเป็นบวก ดังรูป 3.15 (ค) จากสมบัติดังกล่าวทำให้เราสามารถนำฟิล์ม PVDF ไปประยุกต์ทำเป็นตัวรับคลื่นเสียงได้



รูปที่ 3.15 การเกิดโพลาไรเซชันเมื่อฟิล์ม PVDF ได้รับความเค้น

3.2.1.2.2 ปรากฏการณ์โดยอ้อม (indirect effect) เมื่อป้อนสนามไฟฟ้ากับฟิล์ม PVDF โพลาไรเซชันที่เกิดขึ้นจะทำให้ขนาดของฟิล์ม PVDF เปลี่ยนไป พิจารณารูปที่ 3.16 (ก) ฟิล์ม PVDF ที่ผ่านการยืดและจัดขั้วแล้ว เมื่อให้สนามไฟฟ้าโดยป้อนแรงดันให้ขั้วลบต่อกับขั้วไฟฟ้าด้านบนของฟิล์มและขั้วบวกต่อกับขั้วไฟฟ้าด้านล่างของฟิล์ม ประจุ

อิสระบนขั้วไฟฟ้าจะผลักประจุโพลาไรเซชันทำให้โมเมนต์ขั้วคู่หดสั้นลง เกิดความเครียดขึ้นกับฟิล์ม PVDF ทำให้ความหนาของฟิล์มลดลง ดังรูปที่ 3.16 (ข) ในทางกลับกันถ้ากลับขั้วของแรงดันไฟฟ้าจะทำให้โมเมนต์ขั้วคู่ยาวขึ้น ดังรูปที่ 3.16 (ค) จากสมบัติดังกล่าวทำให้เราสามารถนำฟิล์ม PVDF ไปประยุกต์ทำเป็นตัวกำเนิดคลื่นเสียงได้



รูปที่ 3.16 เมื่อได้รับสนามไฟฟ้าทำให้ความหนาของฟิล์มเปลี่ยนแปลง

3.2.2 วัสดุหนุนรอง

หน้าที่ของวัสดุหนุนรองก็คือ ดูดกลืนพลังงานของคลื่นจากด้านหลังของแทรนสดิวเซอร์ให้ส่งผ่านเข้าไปในตัวเอง โดยให้มีการสะท้อนของคลื่นน้อยที่สุด เพื่อให้พัลส์ที่รับและส่งจากแทรนสดิวเซอร์มีความกว้างของพัลส์น้อยๆ จากที่ได้กล่าวไปแล้วว่าวัสดุที่ใช้ทำหน้าที่นี้ก็คือกาวอีพ็อกซีเพราะสามารถที่จะยึดติดกับวัสดุได้เกือบทุกชนิด และยังอยู่ในรูปของของเหลวก่อนที่กาวจะแข็งตัว ทำให้ง่ายต่อการสร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส เพราะสามารถโค้งฟิล์ม PVDF ให้ได้รัศมีความโค้งที่เรากำหนดก่อนแล้วค่อยเทกาวลงไป เมื่อกาวแข็งตัวเราก็จะได้แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส แต่ค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของกาวอีพ็อกซีโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 2.6 ถึง 3.0 Mrayl ซึ่งค่าที่เราต้องการคือประมาณ 3.92 Mrayl จึงต้องมีวิธีการในการเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของกาวอีพ็อกซีนี้

วิธีการที่เป็นที่นิยมก็คือการเติมผงโลหะที่มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกสูงๆลงไปในสัดส่วนที่จะทำให้ได้ค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกที่ต้องการ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้ผงทังสเตน ที่มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกเท่ากับ 100 Mrayl [12] เติมลงในกาวอีพ็อกซีของบริษัท Loctite รุ่น Epx-1 ที่มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกเท่ากับ 2.69 Mrayl โดยหาปริมาณสัดส่วนของทังสเตนที่เติมลงไปตามวิธีการของ Wang และคณะ [8] ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1 คำนวณหาค่ามอดูลัสก้อนและมอดูลัสเฉือนของวัสดุผสม 2 ชนิด คือกาวอีพ็อกซีและผงทังสเตน โดยใช้แบบจำลองของ Devaney และ Levine [8] ดังนี้

$$K = K_1 + V_2 \frac{(3K + 4G)(K_2 - K_1)}{3K + 4G + 3(K_2 - K_1)}$$

$$G = G_1 + V_2 \frac{5(3K + 4G)G(G_2 - G_1)}{(15K + 20G)G + 6(K + 2G)(G_2 - G_1)}$$

เมื่อ K และ G คือ ค่ามอดูลัสก้อนและมอดูลัสเฉือนของวัสดุผสม

K_1 G_1 และ V_1 คือ ค่ามอดูลัสก้อน มอดูลัสเฉือนและสัดส่วนปริมาตรของกาวอีพ็อกซี

K_2, G_2 และ V_2 คือ ค่ามอดูลัสก้อน มอดูลัสเฉือนและสัดส่วนปริมาตรของผงทังสเตน

จากนั้นหาค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมจากสมการ

$$\rho = V_1\rho_1 + V_2\rho_2$$

เมื่อ ρ_1 และ ρ_2 คือ ความหนาแน่นของกาวอีพ็อกซีและทังสเตนตามลำดับ

สุดท้ายคำนวณหาค่าอัตราเร็วเสียงและค่าอิมพีแดนซ์อคูสติก จากสมการ (2.35) และ (2.62)

2 เตรียมชิ้นตัวอย่าง 5 ตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ซึ่งชิ้นตัวอย่างตัวที่ 1-5 ผสมผงทังสเตนในสัดส่วนปริมาตร 0% 5.5% 11% 16.5% และ 22% ตามลำดับ เพื่อหาสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนที่เหมาะสมในการทำวัสดุหนุนรอง สัดส่วนปริมาตรของทังสเตนหาได้จากมวลของทังสเตนและมวลของอีพ็อกซีดังสมการ

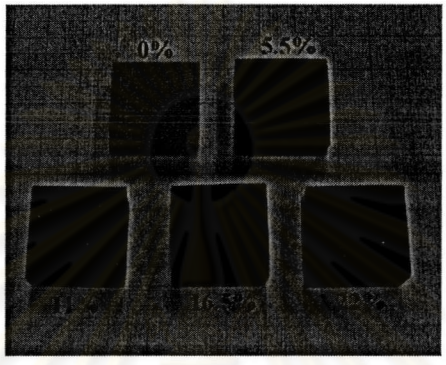
$$V = \frac{(M/\rho)}{M/\rho + M'/\rho'}$$

เมื่อ V คือ สัดส่วนปริมาตรของทังสเตน

M และ M' คือ มวลของทังสเตนและมวลของกาวอีพ็อกซีตามลำดับ

ρ และ ρ' คือ ความหนาแน่นของทังสเตนและกาวอีพ็อกซีตามลำดับ

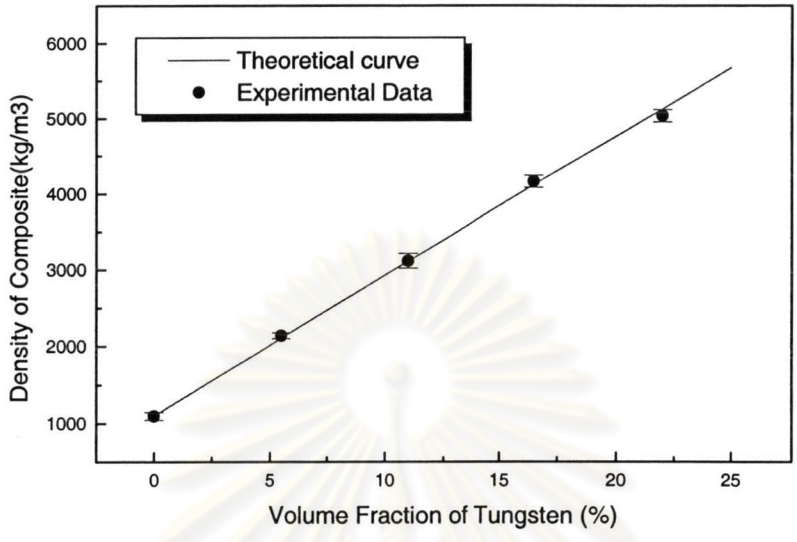
จากนั้นหาค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมทั้ง 5 ตัว จากค่ามวลต่อปริมาตร และหาค่าอัตราเร็วเสียงในวัสดุผสม โดยใช้แทรนสดิวเซอร์มาตรฐานของบริษัท Panametric รุ่น v109 ได้แสดงผลการวัดไว้ในภาคผนวก ข



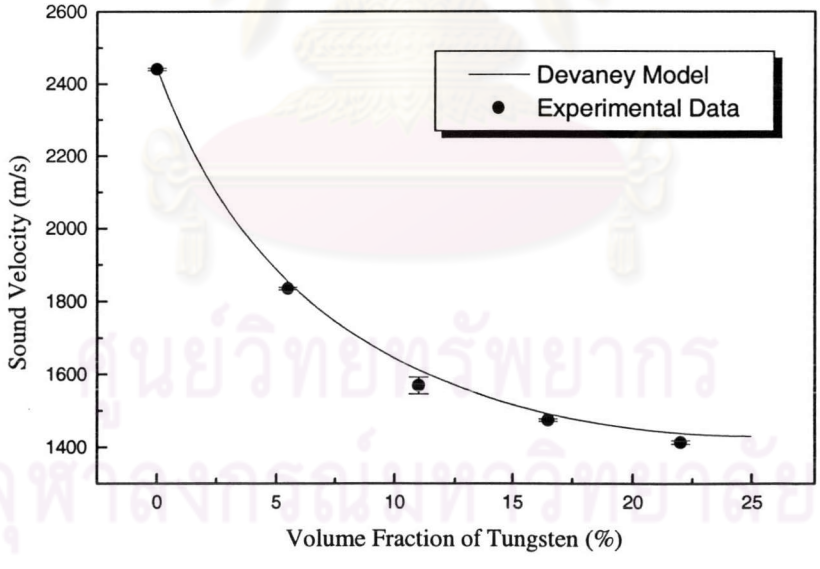
รูปที่ 3.17 รูปถ่ายชิ้นตัวอย่าง 5 ตัว ที่ผสมผงทังสเตนในสัดส่วนปริมาตร 0% 5.5% 11% 16.5% และ 22% เพื่อหาค่าสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนที่เหมาะสม

ค่าความหนาแน่น อัตราเร็วเสียงและค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุผสมที่มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนตั้งแต่ 0-25 % ที่ได้จากการคำนวณโดยใช้แบบจำลองของ Devaney และ Levine และค่าที่ได้จากการทดลองโดยเตรียมชิ้นตัวอย่าง 5 ตัวอย่างที่มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตน 0% 5.5% 11% 16.5% และ 22% ได้แสดงผลที่ได้จากการคำนวณและการทดลองเปรียบเทียบในรูปที่ 3.18 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ

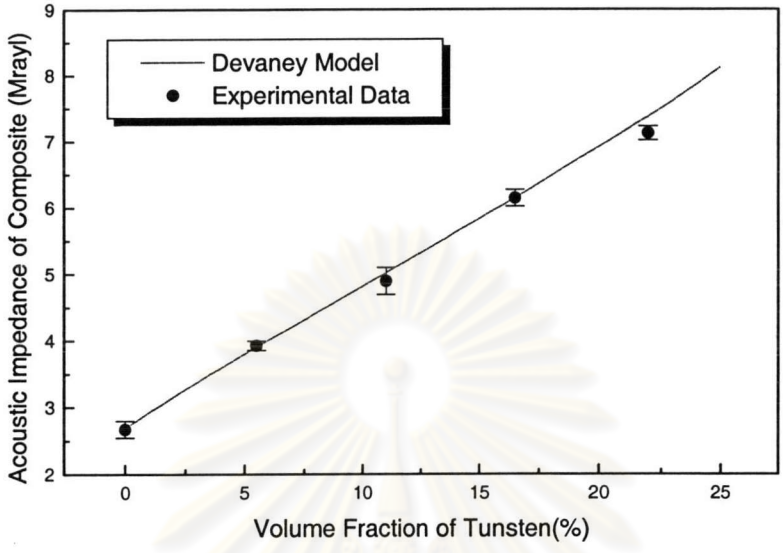
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.18 กราฟความสัมพันธ์ของค่าความหนาแน่นของวัสดุผสมกับสัดส่วนปริมาตรของทังสเตน



รูปที่ 3.19 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอัตราเร็วเสียงของวัสดุผสมกับสัดส่วนปริมาตรของทังสเตน



รูปที่ 3.20 กราฟความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุผสมกับสัดส่วนปริมาตรของทังสเตน

จากรูปที่ 3.20 ค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุผสม ที่ใช้สัดส่วนปริมาตรของทังสเตน 5.5 % มีค่าเท่ากับ 3.91 Mrayl ซึ่งใกล้เคียงกับค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของฟิล์ม PVDF ดังนั้นจึงเลือกวัสดุผสมที่มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนเท่ากับ 5.5 % ในการทำวัสดุหนุนรองของแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

3.3 ขั้นตอนการสร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

การสร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสสามารถอธิบายขั้นตอนการสร้างจากรูปที่ 3.21 ได้ดังนี้

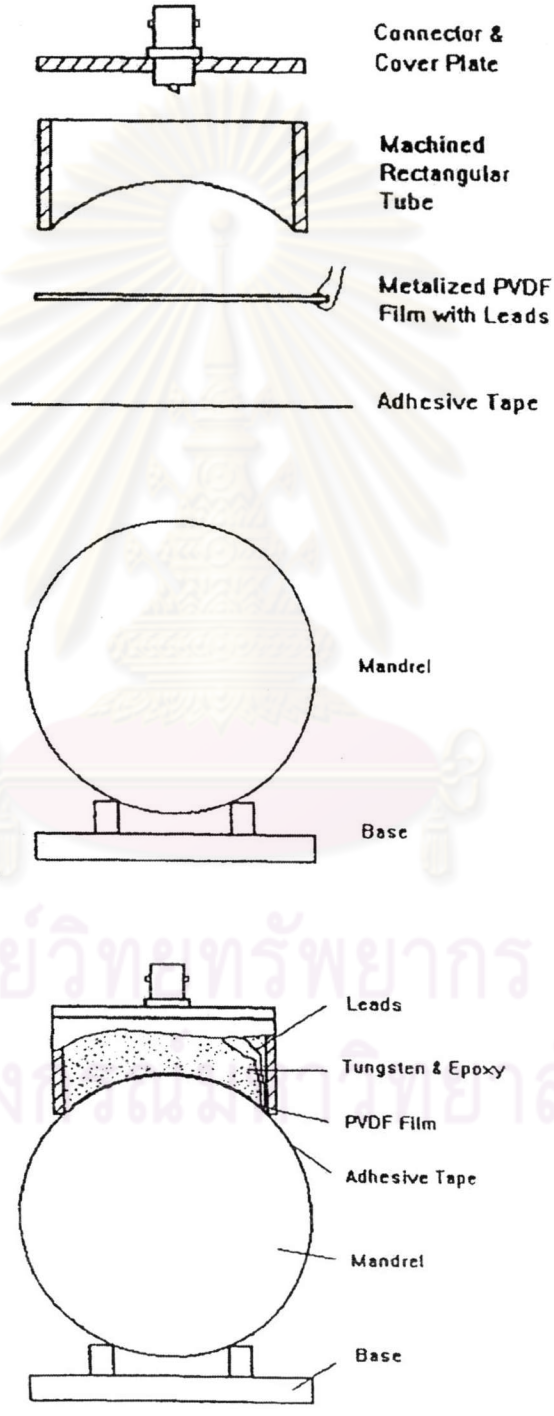
1โค้งฟิล์ม PVDF ที่ติดสายไฟแล้วลงบนเทปกาวสองหน้าที่ติดอยู่บนพื้นผิวของฐานรูปทรงกระบอก มีรัศมีความโค้ง 25.4 มิลลิเมตร เท่ากับระยะโฟกัสของแทรนสดิวเซอร์ที่ต้องการ

2 วางกล่องอลูมิเนียม ที่ด้านหนึ่งเจาะเว้าเข้าไปพอดีกับรัศมีความโค้งที่ใช้ ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นผิวเรียบ โดยให้ฟิล์ม PVDF อยู่ตรงกลางกล่อง

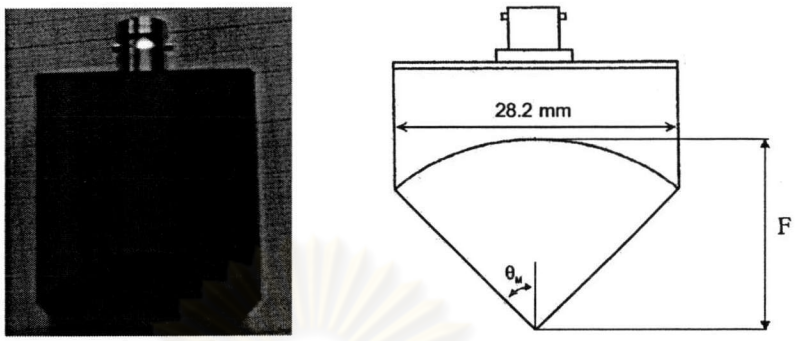
3 เทกาวอีพ็อกซี ที่ผสมผงทังสเตนแล้วลงไปในกล่องอลูมิเนียม ให้ท่วมฟิล์ม PVDF จนได้ความหนาที่ต้องการ

4 รอจนกาวอีพ็อกซีแข็งตัวใช้เวลาประมาณ 12 ชั่วโมง ดึงกาวสองหน้าออกจากฟิล์ม แล้วบัดกรีสายไฟที่ต่อกับฟิล์ม PVDF เข้ากับขั้วต่อ BNC ที่ติดอยู่ที่ฝากล่อง

5 สุดท้ายติดฝากล่องเข้ากับตัวกล่องแล้วนำไปทดสอบการทำงานได้แสดงรูปถ่ายและแผนภาพโครงสร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสที่สร้างขึ้นไว้ในรูปที่ 3.22



รูปที่ 3.21 ขั้นตอนการสร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส [5]



รูปที่ 3.22 รูปถ่ายและแผนภาพโครงสร้างของแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสที่สร้างขึ้น

ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้างแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสทั้งหมด 5 ตัว ซึ่งทั้ง 5 ตัวมีระยะโฟกัสเท่ากับ 25.4 มิลลิเมตร มีหน้ากว้าง 28.2 มิลลิเมตรและมีมุม $\theta_{max} = 34°$ เท่ากันทุกตัว

แทรนสดิวเซอร์ 3 ตัวแรกมีความหนาของวัสดุหนุนรองเท่ากับ 6 มิลลิเมตรทุกตัว แต่มีค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกแตกต่างกัน โดยผสมผงทังสเตนในสัดส่วนปริมาตร 0% 5.5% และ 22% ตามลำดับ เพื่อทดสอบดูผลของค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรองกับลักษณะของพัลส์ที่ได้

ส่วนแทรนสดิวเซอร์ 2 ตัวที่เหลือ มีสัดส่วนปริมาตรของทังสเตนเท่ากับ 5.5% ทั้งสองตัวแต่มีความหนาของวัสดุหนุนรองไม่เท่ากัน โดยจะมีความหนา 9 และ 12 มิลลิเมตร ตามลำดับ เพื่อทดสอบดูผลของลักษณะของพัลส์กับความหนาของวัสดุหนุนรอง คุณสมบัติของแทรนสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัวแสดงไว้ในตารางที่ 3.1

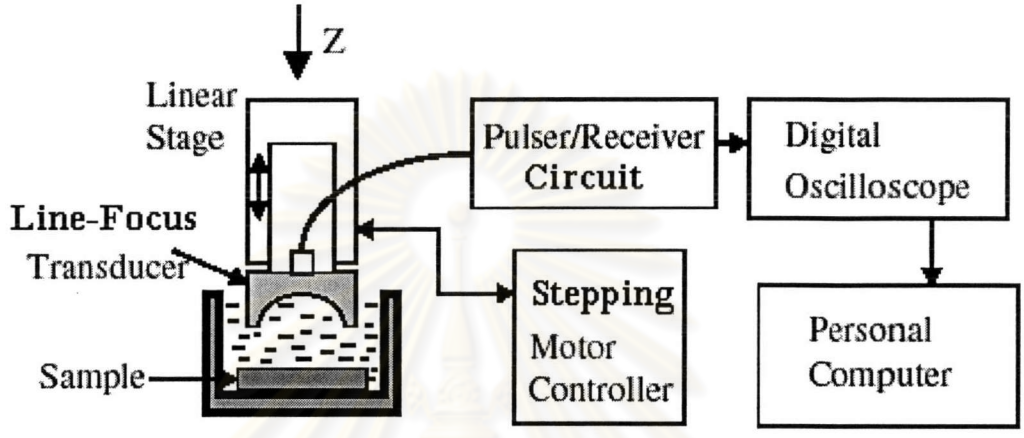
ตารางที่ 3.1 สมบัติของแทรนสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัว

ตัวที่	วัสดุหนุนรอง	
	อิมพีแดนซ์อคูสติก(Mrayl)	ความหนา (mm)
1	2.69	6
2	3.91	6
3	7.37	6
4	3.91	9
5	3.91	12

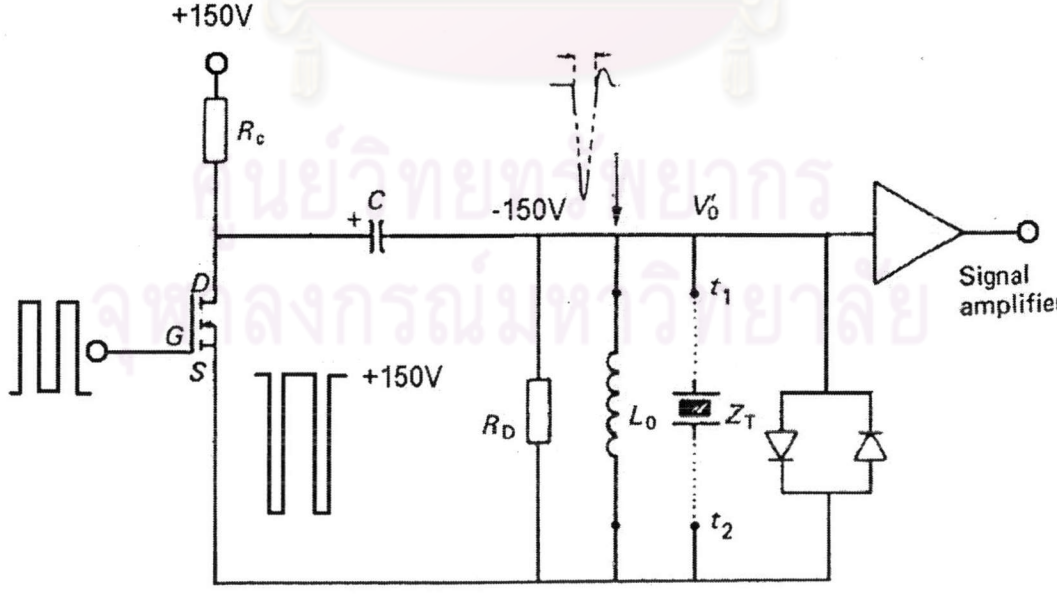
3.4 ระบบวัดอัตราเร็วของคลื่นเรย์ลีโดยใช้แทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

การทำงานของระบบวัดอัตราเร็วของคลื่นเรย์ลี จะต้องมีการป้อนพัลส์แรงดันไฟฟ้า (pulse) ให้กับแทรนสดิวเซอร์ เพื่อให้แทรนสดิวเซอร์ส่งคลื่นเสียงผ่านน้ำไปยังวัสดุ จากนั้นคลื่นเสียงจะสะท้อน (echo) กลับมาที่แทรนสดิวเซอร์ เปลี่ยนเป็นพัลส์แรงดันไฟฟ้า เข้าสู่ส่วนขยายสัญญาณแล้วจึงแสดงผล เพื่อคำนวณหาอัตราเร็วเสียงในวัสดุนั้น จะเห็นได้ว่าแทรนสดิวเซอร์ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวส่งและตัวรับสัญญาณในตัวเดียวกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีระบบที่สามารถแยกแยะสัญญาณในภาครับและภาคส่งของแทรนสดิวเซอร์ ระบบที่สามารถทำหน้าที่แบบนี้ได้ แสดงไว้ในรูปที่ 3.23 ประกอบไปด้วย วงจรพัลเซอร์รีซีฟเวอร์ (pulser-receiver) วงจรควบคุมมอเตอร์ และออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ส่วนประกอบที่ทำหน้าที่แยกแยะสัญญาณก็คือ วงจรพัลเซอร์รีซีฟเวอร์ ซึ่งในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้สร้าง วงจรพัลเซอร์รีซีฟเวอร์ขึ้นเอง โดยใช้วิธีการของ Ramos และคณะ [9] ดังแสดงแผนผังของวงจรในรูปที่ 3.24 หลักการของวงจรคือใช้มอสเฟต (MOSFET) เป็นสวิทช์เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 150 โวลท์ ไปเป็นพัลส์แรงดัน แล้วอาศัยวงจร RLC เพื่อปรับความกว้างของพัลส์ สำหรับป้อนให้กับแทรนสดิวเซอร์ โดยระหว่างแทรนสดิวเซอร์กับส่วนขยายสัญญาณ (amplifier) จะมีคู่ไดโอด (diode pair) ที่ต่อขนานสลับขั้วลงกราวด์ ทำหน้าที่กันแรงดันไฟฟ้าสูง ๆ โดยจะยอมให้แรงดันไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูดน้อยกว่า 0.6 โวลต์ผ่านได้เท่านั้น [10] เพื่อป้องกันความเสียหายของส่วนขยายสัญญาณ ในขณะที่แทรนสดิวเซอร์ทำหน้าที่ส่งคลื่นเสียง หลังจากที่คลื่นเสียงสะท้อนกลับจากวัสดุจะเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้น ซึ่งแรงดันที่มีประมาณ 10 มิลลิโวลต์ จึงสามารถผ่านคู่ไดโอดเข้าสู่ส่วนขยายสัญญาณ แล้วนำกลับไปแสดงผลที่ออสซิลโลสโคป

ส่วนวงจรควบคุมมอเตอร์ที่สร้างขึ้นเอง สามารถควบคุมอัตราเร็วได้ โดยปรับความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ วงจรนี้ทำหน้าที่เลื่อนแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัสจากระยะโฟกัสเข้าหาวัสดุ เพื่อวัดอัตราเร็วของคลื่นเรย์ลีของวัสดุ ที่ระยะต่าง ๆ กัน เรียกวิธีนี้ว่าดีโฟกัสซิงเทคนิค (defocusing technique) [5] ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการวัดอย่างละเอียดในบทที่ 4



รูปที่ 3.23 ระบบวัดอัตราเร็วของคลื่นเรย์เลก์ โดยใช้ไลน์โฟกัสแทรนสดิวเซอร์



รูปที่ 3.24 แผนผังของวงจรพัลเซอร์-รีซีฟเวอร์

3.5 ผลทดสอบการทำงานของแทรนสดิวเซอร์ไลน์โฟกัส

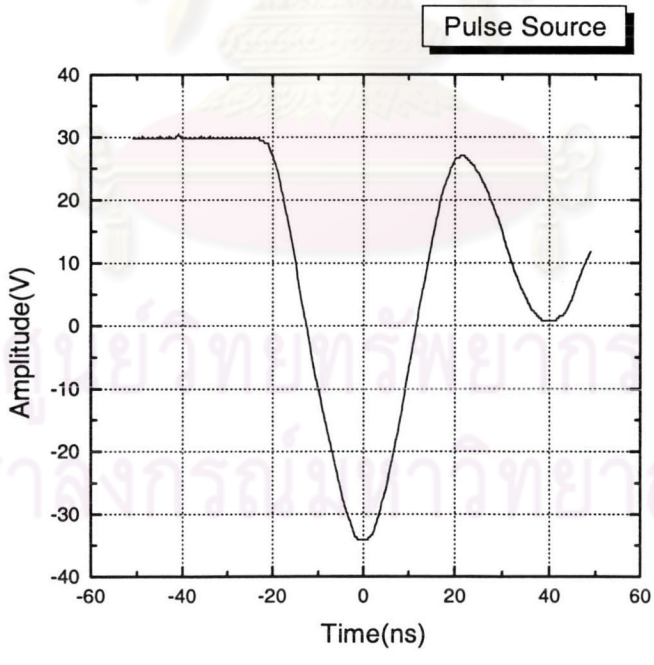
ทดสอบการทำงานของแทรนดิวเซอร์ไลน์โฟกัสที่สร้างขึ้น ตามขั้นตอนในหัวข้อที่ 3.3 โดยใช้วงจรพัลส์เซอร์รีซีฟเวอร์ที่สร้างขึ้น และจัดระบบทดสอบตามรูปที่ 3.23 แทรนดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัวถูกทดสอบโดยให้พัลส์แรงดันไฟฟ้า ที่ได้จากวงจรพัลส์เซอร์รีซีฟเวอร์ ที่มีแอมปลิจูด 65 โวลต์ และความกว้างพัลส์ 25 นาโนวินาที ดังรูปที่ 3.25 แล้วพิจารณารูปร่างของพัลส์สะท้อนกลับจากกระจกโซดาไลม์ ซึ่งวางอยู่ในน้ำที่ระยะโฟกัส

ทดสอบแทรนดิวเซอร์ตัวที่ 1 2 และ 3 เพื่อเปรียบเทียบผลของค่าอิมพิแดนซ์อคูสติก ของวัสดุหนุนรอง ต่อความกว้างของพัลส์สะท้อนกลับ (pulse width, PW) ซึ่งผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.26 จะเห็นว่าแทรนดิวเซอร์ที่มีค่า Z_b เท่ากับ 2.69 Mrayl จะมีจำนวนลูกคลื่น(cycle)ของพัลส์สะท้อนกลับมากที่สุด ทำให้ความกว้างของพัลส์มากที่สุดด้วย ส่วนแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า Z_b เท่ากับ 7.37 Mrayl จะมีจำนวนลูกคลื่นน้อยกว่า ความกว้างของพัลส์สะท้อนกลับจึงน้อยกว่า สุดท้ายแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า Z_b เท่ากับ 3.91 Mrayl จะมีจำนวนลูกคลื่นน้อยที่สุด ทำให้ความกว้างของพัลส์สะท้อนกลับน้อยที่สุด เป็นไปตามหลักการสร้างแทรนสดิวเซอร์ในหัวข้อที่ 3.1 เมื่อค่าอิมพีแดนซ์อคูสติกของวัสดุหนุนรองมีค่าเท่ากับวัสดุเพียสโซอิเล็กทริก จะลดการสะท้อนของคลื่นกลับไปในวัสดุเพียสโซอิเล็กทริกทำให้วัสดุเพียสโซอิเล็กทริกหยุดสั่นเร็วขึ้น ทำให้ความกว้างของพัลส์น้อยที่สุด โดยเปรียบเทียบผลการวัดกับแผนภาพการเกิดพัลส์สะท้อนกลับตามรูปที่ 3.9 3.10 และ 3.11 เมื่อ $Z_b < Z_p$ $Z_b > Z_p$ และ $Z_b = Z_p$ ตามลำดับ ส่วนแอมปลิจูดของพัลส์สะท้อนกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Z_b เพิ่มขึ้น โดยแทรนสดิวเซอร์ตัวที่ 2 มีค่า Z_b มากที่สุด แอมปลิจูดของพัลส์สะท้อนกลับจะมากที่สุด เท่ากับ 7.96 โวลต์ ทั้งนี้สามารถอธิบายได้ โดยพิจารณาแผนภาพการส่งพัลส์ของแทรนสดิวเซอร์ ในหัวข้อที่ 3.1 รูปที่ 3.6 พัลส์ที่ส่งออกจากแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b > Z_p$ จะมีจำนวนพัลส์มากกว่า 1 พัลส์และทุกพัลส์จะมีเฟสตรงกัน ทำให้เมื่อพัลส์เหล่านี้สะท้อนกลับมาที่แทรนสดิวเซอร์ จะเกิดการรวมกันของคลื่น (superposition) ทำให้แอมปลิจูดของพัลส์เพิ่มขึ้น ส่วนแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b = Z_p$ ตามรูปที่ 3.7 จะมีจำนวนพัลส์เพียง 1 พัลส์ แอมปลิจูดจึงน้อยกว่าแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b > Z_p$ สุดท้ายแทรนสดิวเซอร์ที่มีค่า $Z_b < Z_p$ ตามรูปที่ 3.5 ถึงแม้ว่าจะมีจำนวนพัลส์มากกว่า 1 ลูก แต่เฟสของพัลส์จะต่างกัน 180 องศา ทำให้เมื่อพัลส์ที่สะท้อนกลับจากวัสดุมาที่แทรนสดิวเซอร์ จะเกิดการหักล้างกันของคลื่น แอมปลิจูดของพัลส์สะท้อนกลับจึงน้อยที่สุด

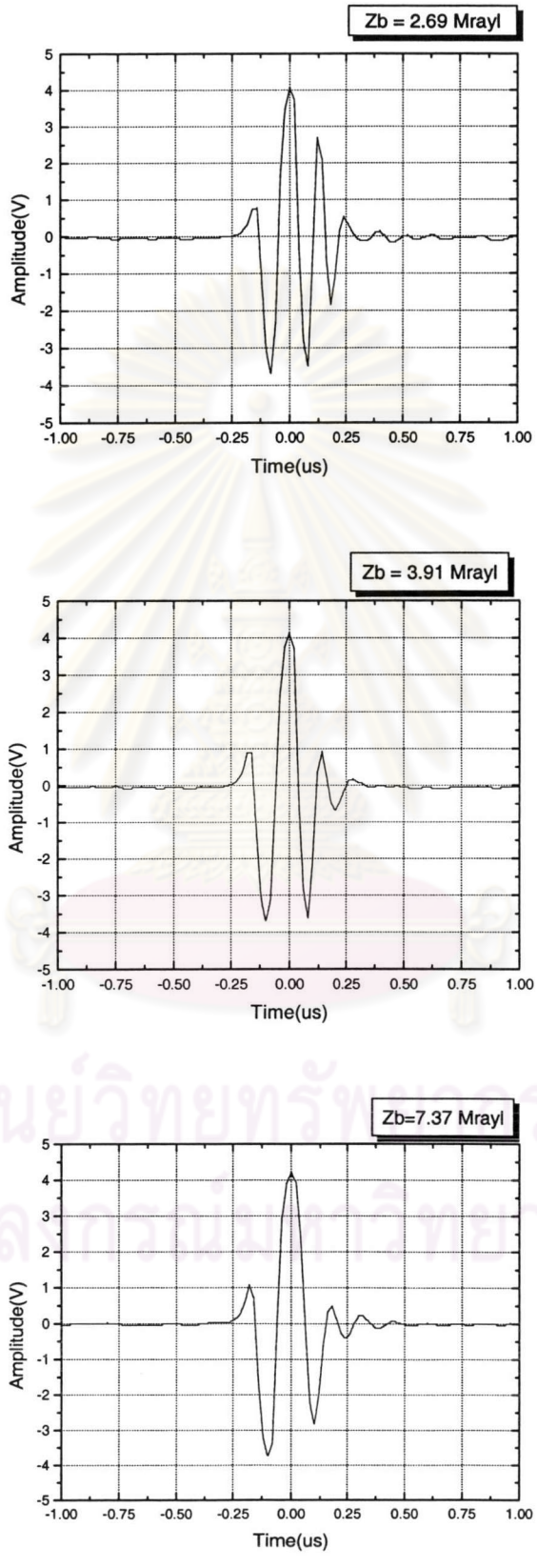
ต่อไปทดสอบการทำงานของแทรนสดิวเซอร์ตัวที่ 2 4 และ5 ที่มีค่า Z_b= 3.91Mrayl เท่ากันแต่มีความหนาของวัสดุหนุนรองเท่ากับ 6 9 และ 12 มิลลิเมตรตามลำดับ เพื่อเปรียบเทียบผล

ของความหนาของวัสดุหนุนรองกับรูปร่างของพัลส์ที่ได้จากแทรนสดิวเซอร์ทั้ง 3 ตัว ผลการทดสอบแสดงรูปร่างของพัลส์ของแทรนสดิวเซอร์ทั้ง 3 ตัว ในรูปที่ 3.27 จะเห็นว่าความกว้างและแอมปลิจูดของพัลส์จะลดลงเมื่อความหนาของวัสดุหนุนรองเพิ่มขึ้น สามารถอธิบายได้โดยคำนึงถึงค่าสัมประสิทธิ์การสูญเสียพลังงานของวัสดุหนุนรอง ซึ่งจะทำให้แอมปลิจูดของคลื่นที่เคลื่อนที่ผ่านมีค่าลดลง ดังนั้นเมื่อพัลส์คลื่นเสียงเคลื่อนที่เข้าไปในวัสดุหนุนรองที่มีความหนาเพิ่มขึ้น แอมปลิจูดของพัลส์จะลดลง ฟิล์ม PVDF จึงหยุดสั่นได้เร็วขึ้น สังเกตได้จากส่วนปลายของพัลส์ (ringing) จะลดลงเมื่อความหนาของวัสดุหนุนรองเพิ่มขึ้นทำให้ความกว้างของพัลส์ลดลงไปด้วย

จากผลการทดสอบแทรนสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัว ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 3.2 พบว่าแทรนสดิวเซอร์ตัวที่ 5 ที่มีค่า Z_b = 3.91 Mrayl และมีความหนา 12 มิลลิเมตร เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานที่สุด เนื่องจากความกว้างของพัลส์น้อยที่สุดเมื่อเทียบกับแทรนสดิวเซอร์อีก 4 ตัว ถึงแม้ว่าแอมปลิจูดของพัลส์สะท้อนกลับจะน้อยกว่าตัวที่ 2 และ 4 แต่เมื่อเทียบกันแล้วแอมปลิจูดก็น้อยกว่าไม่มาก และเมื่อคำนึงความละเอียดในการวัดอัตราเร็วของคลื่นเสียงแล้ว จำเป็นต้องเลือกแทรนสดิวเซอร์ที่มีความกว้างของพัลส์น้อยที่สุด เพื่อประสิทธิภาพในการใช้งาน

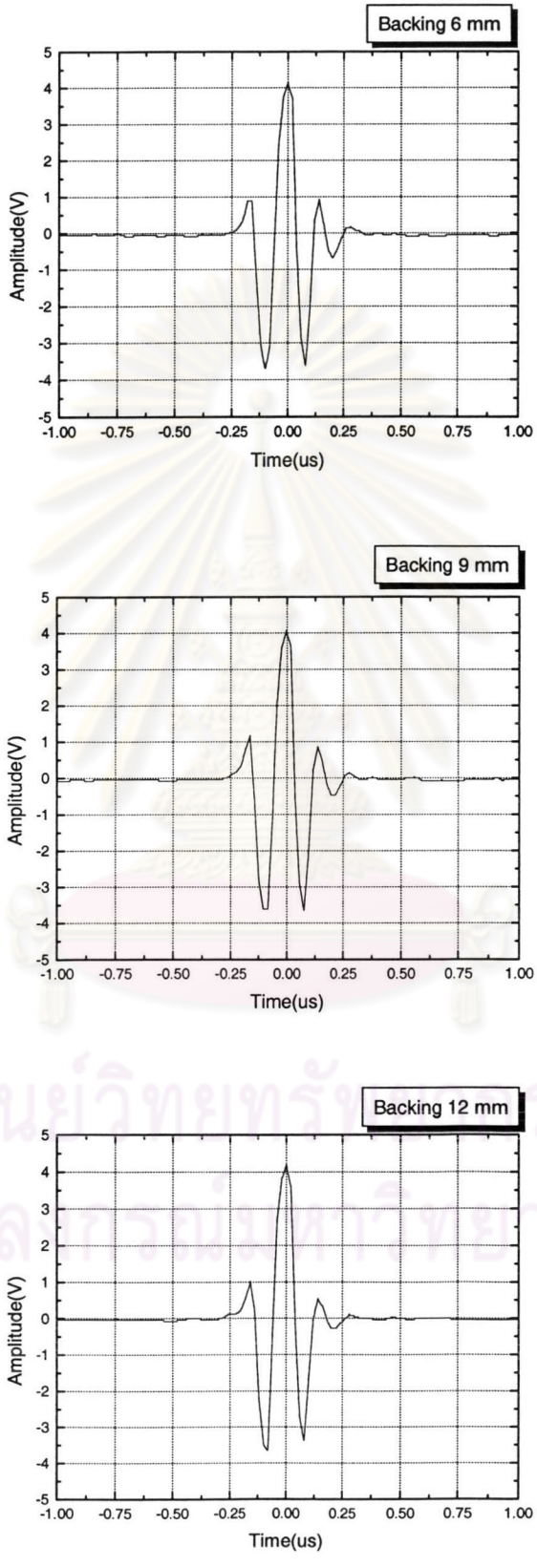


รูปที่ 3.25 พัลส์แรงดันไฟฟ้าขนาด 65 โวลต์ 25 นาโนวินาที ที่ได้จากวงจรพัลส์เซอร์รีซีฟเวอร์



รูปที่ 3.26 พัลส์สะท้อนกลับของแทรนสดิวเซอร์ตัวที่ 1 2 และ 3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.27 พัลส์สะท้อนกลับของแทรนสดิวเซอร์ตัวที่ 2 4 และ5

ตารางที่ 3.2 ข้อมูลของพัลส์สะท้อนกลับที่ได้จากแทรนสดิวเซอร์ทั้ง 5 ตัว

ตัวที่	ลักษณะของพัลส์สะท้อนกลับ	
	ความกว้างของพัลส์ (μs)	แอมปลิจูด (V)
1	0.88	7.72
2	0.66	7.82
3	0.79	7.96
4	0.62	7.79
5	0.60	7.76

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย