

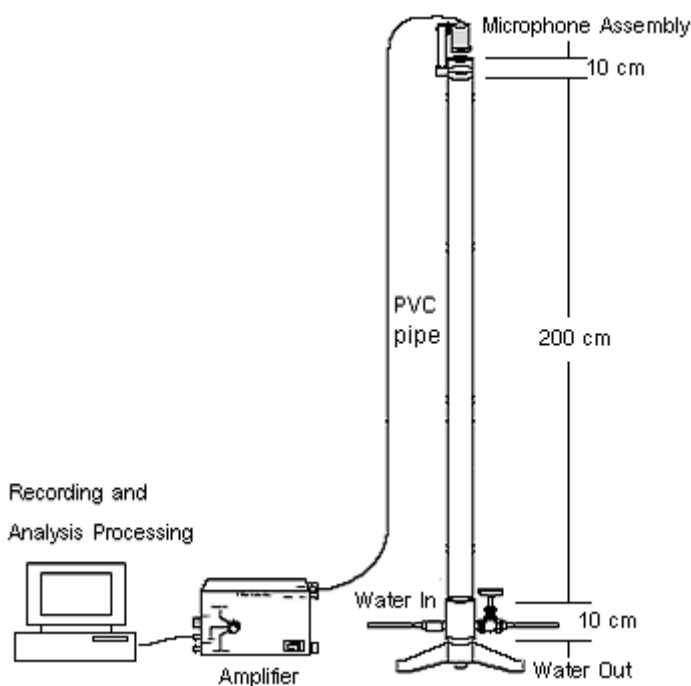
บทที่ 4

วิธีการทดลองและการวิเคราะห์

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอน และวิธีการทดลอง ตลอดจนถึงกระบวนการวิเคราะห์พารามิเตอร์เพื่อบ่งชี้ระดับของของเหลวภายในท่อ ซึ่งสามารถแสดงขั้นตอนดังนี้

4.1 การวัด และการบันทึกข้อมูลสัญญาณคลื่นเสียง

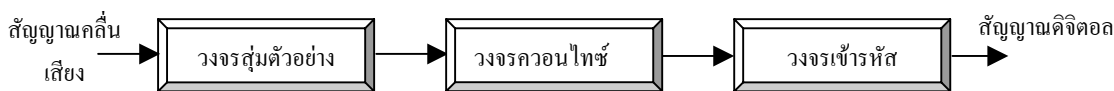
โดยการติดตั้งไมโครโฟนด้านบนของท่อที่มีความยาว 220 เซนติเมตร ในตำแหน่งห่างจากระดับสูงสุดของของเหลว 10 เซนติเมตร และช่วงการติดตั้งวาล์วทางเข้า-ออก ของของเหลว 10 เซนติเมตร ดังภาพประกอบที่ 4-1



ภาพประกอบที่ 4-1 แสดงการติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์

ในงานวิจัยนี้จะกำหนดตำแหน่งการวัด และการบันทึกข้อมูลสัญญาณคลื่นเสียงภายในท่อที่ระดับของเหลว 0, 10, 20, 30, 40, ... 220 เซนติเมตร ตามลำดับ และใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลในแต่ละระดับประมาณ 5-6 วินาที ส่งไปเก็บไว้บนฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์

สัญญาณคลื่นเสียง จัดว่าเป็นสัญญาณอนาลอกประเภทหนึ่งที่มีค่าไม่แน่นอนเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา ดังนั้นการส่งสัญญาณคลื่นเสียงผ่านช่องสัญญาณสื่อสารดิจิทัลเพื่อการบันทึกสัญญาณ และประมวลผลด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ จะต้องมีการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล จึงจำเป็นที่จะต้องนำสัญญาณคลื่นเสียงไปผ่านกระบวนการสุ่มตัวอย่างก่อน เพื่อให้ได้เป็นสัญญาณเชิงเวลาเต็มหน่วย (Discrete Time Signal) จากนั้นจึงนำสัญญาณเชิงเวลาเต็มหน่วย ที่ได้แต่ละการสุ่มตัวอย่างไปผ่าน กระบวนการควอนไทซ์ (Quantization) เพื่อให้ได้สัญญาณเชิงแอมพลิจูดเต็มหน่วย (Discrete Amplitude Signal) ก่อนจะนำไปเข้ารหัส (Binary Encoding) เป็นตัวเลขไบนารี 0 และ 1 เป็นลำดับต่อไป ในการแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล ดังภาพประกอบที่ 4-2



ภาพประกอบที่ 4-2 แผนผังการแปลงสัญญาณคลื่นเสียงเป็นสัญญาณดิจิทัล

ในการสุ่มตัวอย่างความถี่ที่เหมาะสม ต้องมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับสองเท่าของความถี่ f_{max} ก็คือ

$$f_s \geq 2f_{max} \tag{4-1}$$

เมื่อ f_s คือ อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate)
 f_{max} คือ ความถี่สูงสุดของสัญญาณที่ถูกสุ่มตัวอย่าง

ซึ่งจะสามารถสร้างกลับคืนสัญญาณอนาลอกต้นแบบได้ ในทางกลับกัน ถ้าเราสุ่มตัวอย่างที่ $f_s < 2f_{max}$ ก็จะไม่สามารถสร้างกลับคืนสัญญาณอนาลอกต้นแบบได้ หรือสร้างกลับคืนได้แต่จะมีรูปร่าง หรือความถี่ที่เปลี่ยนไป ซึ่งเราเรียกเหตุการณ์เช่นนี้ว่า การเคลือบแฝง (Aliasing) และถ้าเราสุ่มตัวอย่างที่ความถี่ $f_s = 2f_{max}$ เราเรียกว่า อัตราไนควิสต์ (Nyquist Rate) หรือ ความถี่ไนควิสต์ (Nyquist Frequency) ซึ่งอัตราการสุ่มตัวอย่างในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาความถี่ในย่านความถี่คลื่นเสียง (20 เฮิรตซ์ ถึง 20 กิโลเฮิรตซ์) จากสมการ (4-1) โดยให้ความถี่สูงสุด $f_{max} = 20$ กิโลเฮิรตซ์ จะได้ว่า

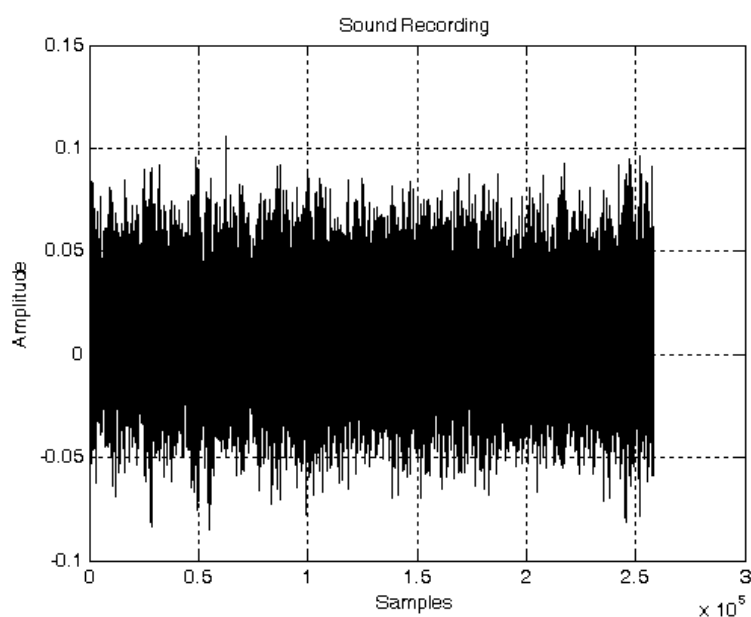
$$f_s \geq 2f_{max} \geq 40,000 \text{ Hz}$$

สำหรับงานวิจัยนี้จะอาศัยโปรแกรม Sound Recorder ของไมโครซอฟต์ในการบันทึกข้อมูลสัญญาณคลื่นเสียง โดยการนำสัญญาณที่ผ่านเครื่องขยายสัญญาณคลื่นเสียงภายในท่อ เข้าทางช่องอินพุตของการ์ดเสียงของระบบคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีวงจรแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล ด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) ได้หลายค่า ซึ่งในการทดลองจะใช้อัตราการสุ่มตัวอย่างที่ 48,000 ตัวอย่างต่อวินาที (Samples/Second) ขนาด 16 บิต ตามเงื่อนไขของสมการ (4-1) ที่อุณหภูมิห้อง (25 องศาเซลเซียส) เพื่อส่งไปเก็บไว้ในฮาร์ดดิสก์ของเครื่องคอมพิวเตอร์ในรูปแบบของไฟล์ข้อมูลที่เป็นนามสกุล .wav

4.2 การประมวลสัญญาณคลื่นเสียงโดยใช้โปรแกรม MATLAB

หลังจากได้ทำการบันทึกสัญญาณเก็บไว้แล้วขั้นตอนต่อไป คือ การประมวลสัญญาณคลื่นเสียงภายในท่อ โดยใช้ฟังก์ชันที่มีในโปรแกรม MATLAB และเขียนฟังก์ชันต่างๆ ขึ้นเอง เพื่อทำประมวลผลสัญญาณดิจิทัลของสัญญาณคลื่นเสียงที่บันทึกเก็บไว้ สามารถแสดงวิธีการประมวลสัญญาณตามลำดับขั้นตอนดังนี้

4.2.1 การอ่านไฟล์ข้อมูลของสัญญาณคลื่นเสียง ซึ่งถูกเก็บบันทึกไว้ในรูปของข้อมูลสัญญาณเชิงเวลาเต็มหน่วย (Discrete Time Signal) ที่ถูกทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalize) ด้วยค่าแอมพลิจูดที่มากที่สุดของสัญญาณนั้นๆ ดังนั้นค่าแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นเสียงที่อ่านได้จะมีขนาดอยู่ในช่วงไม่เกิน $[-1 \ 1]$ โดยโปรแกรม MATLAB จะมีฟังก์ชัน “wavread” ที่ใช้สำหรับอ่านไฟล์ข้อมูลที่เป็นนามสกุล .wav แสดงบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ดังภาพประกอบที่ 4-3

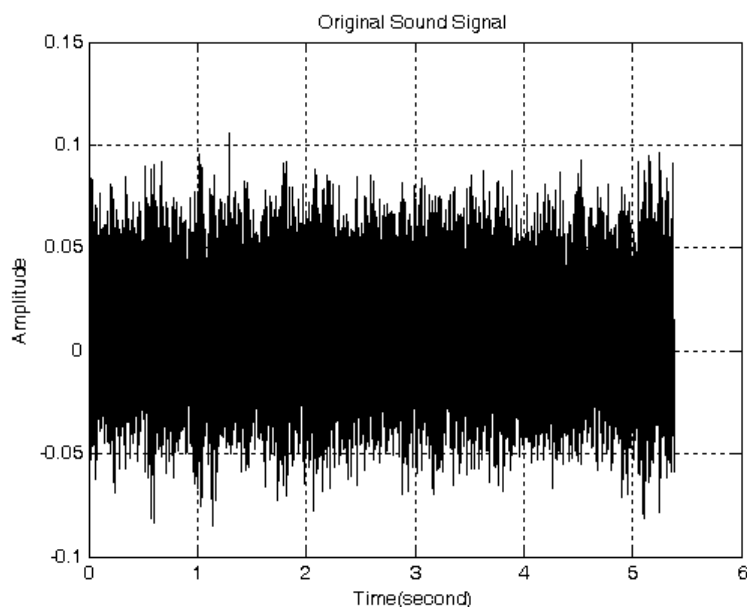


ภาพประกอบที่ 4-3 สัญญาณคลื่นเสียงที่อ่านจากไฟล์ข้อมูล

โดยกำหนดให้ข้อมูลของสัญญาณคลื่นเสียงที่ถูกเก็บบันทึกไว้ คือ $y_i[n]$ และ $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ เป็นตัวเลขบอกลำดับข้อมูลของสัญญาณ y_i ดังนั้นสามารถแสดงค่า $y_i[n]$ ได้ดังต่อไปนี้

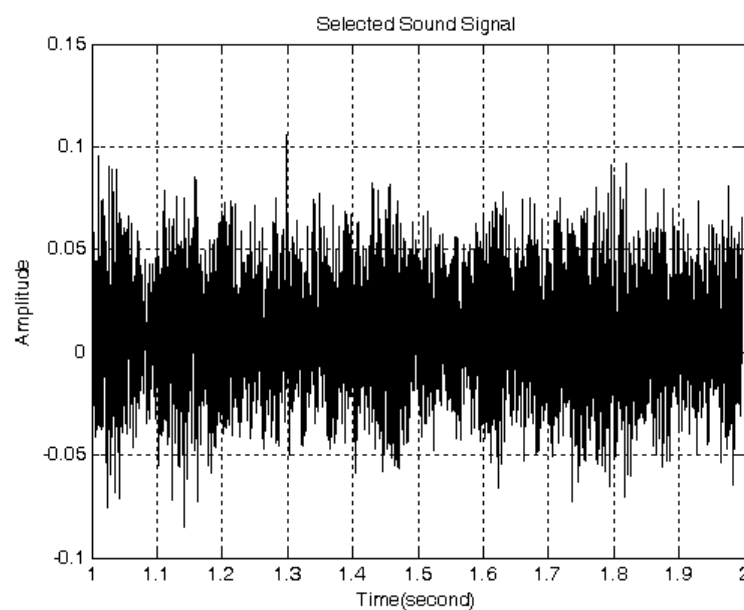
$y_i[n] = [-0.0030, -0.0088, -0.0107, -0.0106, -0.0095, -0.0070, -0.0064, -0.0023, 0.0009, 0.0061, 0.0125, 0.0140, 0.0168, 0.0136, 0.0092, 0.0037, -0.0010, 0.0020, 0.0067, 0.0033, 0.0044, 0.0075, 0.0089, 0.0090, 0.0030, 0.0089, 0.0128, 0.0174, 0.0175, 0.0178, 0.0247, 0.0259, 0.0265, 0.0327, 0.0351, 0.0345, 0.0347, 0.0384, 0.0380, 0.0335, 0.0260, 0.0227, \dots]$

เมื่อพิจารณาในแกนแนวนอนของภาพประกอบที่ 4-3 จะพบว่าสัญญาณคลื่นเสียงที่อ่านได้จะเป็นสัญญาณเชิงเวลาเต็มหน่วยที่มีจำนวนข้อมูลประมาณ 260,000 ตัวอย่าง เนื่องจากในงานวิจัยนี้ใช้อัตราการสุ่มตัวอย่าง (Sample Rate) ในการบันทึกสัญญาณคลื่นเสียง ที่ 48,000 ตัวอย่างต่อวินาที แสดงว่าสัญญาณคลื่นเสียงที่บันทึกอยู่ในไฟล์ข้อมูล จะมีระยะเวลาประมาณ 5.42 วินาที ดังภาพประกอบที่ 4-4



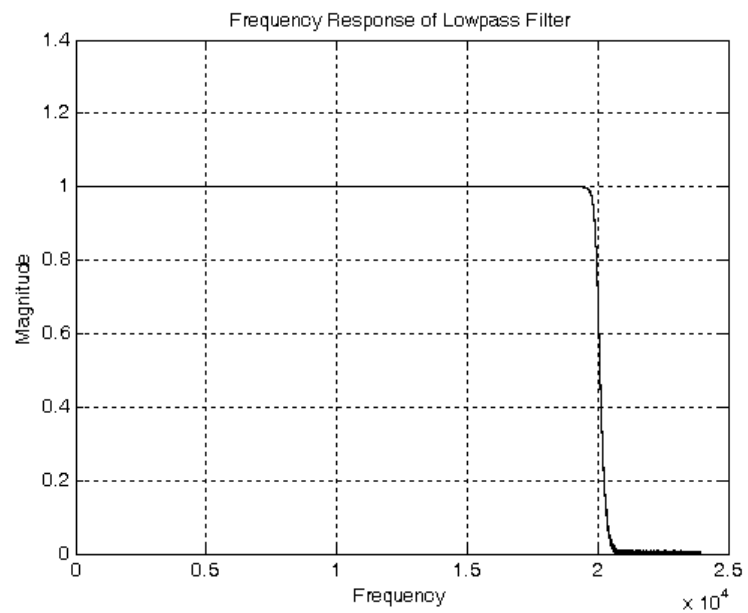
ภาพประกอบที่ 4-4 สัญญาณคลื่นเสียงในโดเมนเวลา (Time Domain)

4.2.2 เลือกช่วงเวลาข้อมูล $y_i[n]$ ของสัญญาณคลื่นเสียงประมาณ 1 วินาที หรือมากกว่า ตามที่ต้องการ เพื่อที่จะนำข้อมูลของสัญญาณคลื่นเสียงในช่วงเวลาดังกล่าว ไปทำการวิเคราะห์คุณสมบัติเฉพาะอย่าง สำหรับการทดลองนี้จะเลือกช่วงเวลาของสัญญาณประมาณ 1 วินาที ตั้งแต่ระยะระหว่างข้อมูลของสัญญาณหลังจาก 1 วินาทีแรก ถึง 2 วินาที (รูปภาพประกอบที่ 4-4) จะได้ข้อมูล $y_i[n]$ ของสัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการเลือกช่วงเวลา ดังภาพประกอบที่ 4-5

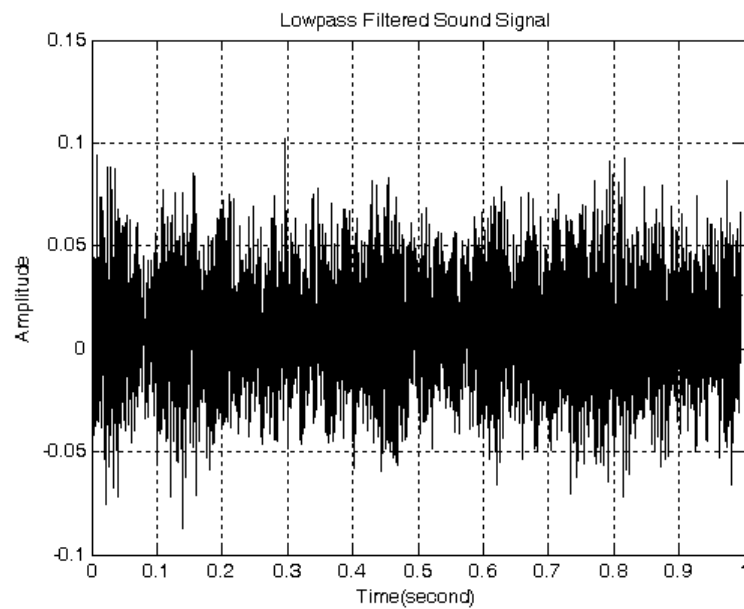


ภาพประกอบที่ 4-5 สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการเลือกช่วงเวลาที่ต้องการ

4.2.3 นำข้อมูล $y_i[n]$ ของสัญญาณคลื่นเสียงที่ได้ไปผ่าน วงจรกรองแบบโอไออาร์ (Infinite Impulse Response : IIR) เพราะวงจรกรองสัญญาณดิจิทัลประเภทนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ สัญญาณตอบสนองจะไม่สิ้นสุดแต่จะมีไปจนถึงอนันต์ โดยโปรแกรม MATLAB ได้มีฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้สำหรับการออกแบบวงจรกรองแบบ IIR คือ ฟังก์ชัน “Butter” ซึ่งเป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำชนิดบัตเตอร์เวิร์ธ อันดับที่ N (N^{th} -order Butterworth Low Pass Filter) สำหรับงานวิจัยนี้ได้ออกแบบวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำชนิดบัตเตอร์เวิร์ธ อันดับที่ 24 ที่มีความถี่คัตออฟ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยสามารถแสดงคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำดังภาพประกอบที่ 4-6 และสัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ จะได้ข้อมูลของสัญญาณคลื่นเสียงใหม่ คือ $f_i[n]$ แสดงดังภาพประกอบที่ 4-7



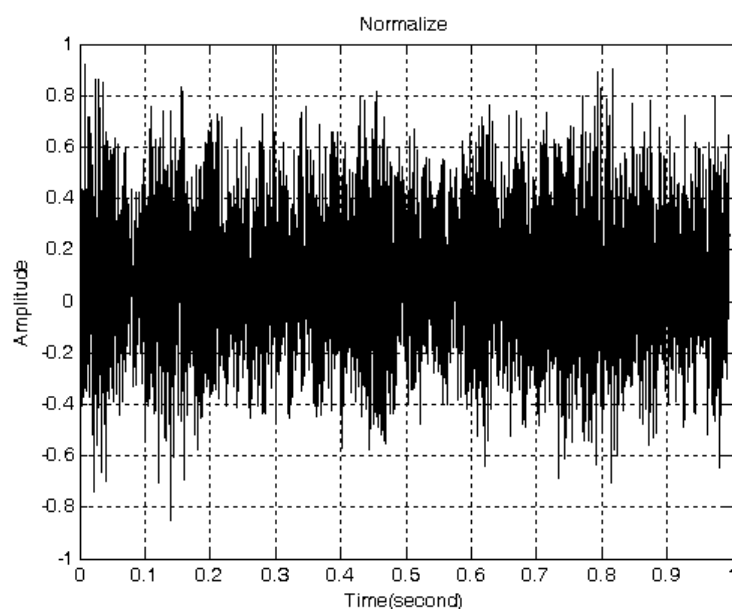
ภาพประกอบที่ 4-6 แสดงคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ



ภาพประกอบที่ 4-7 สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำแล้ว

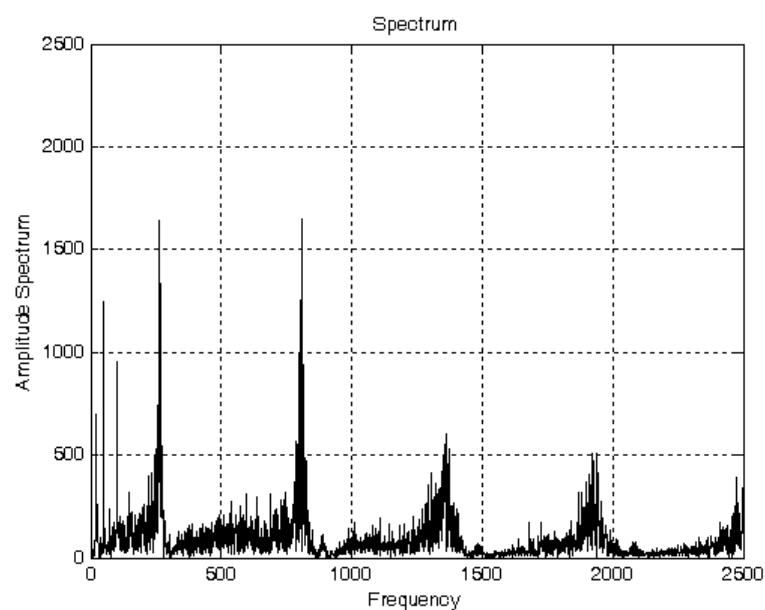
4.2.4 นำข้อมูล $f_f[n]$ ของสัญญาณคลื่นเสียง ทำการนอร์มอลไลซ์ (Normalize) สัญญาณคลื่นเสียงอีกครั้ง เพื่อให้ค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่มากที่สุดมีค่าไม่เกิน $[-1 \ 1]$ โดยหารทุกๆ พจน์ของข้อมูลด้วยค่า Absolute ที่ใหญ่ที่สุดของข้อมูล ดังสมการ โดย $YI[n]$ คือ ข้อมูลของสัญญาณที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์แล้ว แสดงดังประกอบที่ 4-8

$$YI[n] = \frac{f_f[n]}{\text{Max}(|f_f[n]|)} \quad (4-2)$$



ภาพประกอบที่ 4-8 สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์ (Normalize)

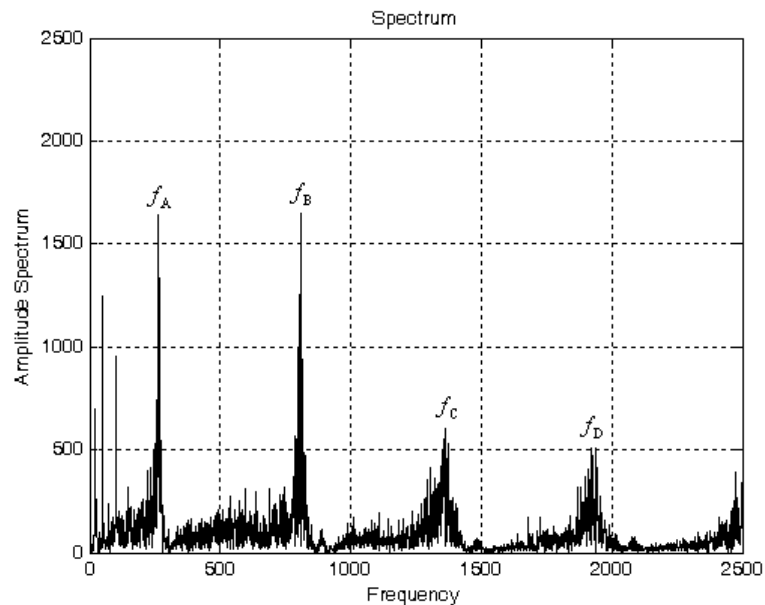
4.2.5 นำข้อมูล $YI[n]$ ของสัญญาณคลื่นเสียงทำการแปลงฟูรีเยร์ เพื่อแปลงสัญญาณดิจิทัลซึ่งอยู่ในโดเมนเวลา (Time Domain) ไปเป็นการวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนความถี่ (Frequency Domain) โดยใช้วิธีการแปลงฟูรีเยร์แบบเร็ว (Fast Fourier Transform : FFT) โดยโปรแกรม MATLAB ได้มีฟังก์ชันที่ใช้สำหรับการคำนวณหาค่าการแปลงฟูรีเยร์เต็มหน่วย คือ ฟังก์ชัน “fft” เพื่อแปลงข้อมูลของสัญญาณคลื่นเสียงในโดเมนเวลาไปเป็นสเปกตรัมในโดเมนความถี่ (Spectrum Frequency Domain) ดังภาพประกอบที่ 4-9



ภาพประกอบที่ 4-9 แสดงข้อมูลของสัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการแปลงฟูรีเยร์

4.2.6 นำข้อมูลของสัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการแปลงฟูรีเยร์ มาทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์เพื่อบ่งชี้ระดับของของเหลวภายในท่อ ในระหว่างดำเนินการวิจัย โดยทดลองวิเคราะห์สัญญาณในแต่ละระดับช่องว่างอากาศภายในของสัญญาณคลื่นเสียง พบว่าที่สเกลของความถี่สเปกตรัมของสัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการประมวลสัญญาณ ด้วยโปรแกรม MATLAB เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับผลการคำนวณความถี่คลื่นนิ่งของคลื่นเสียงที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ ในแต่ละระดับช่องว่างอากาศภายในท่อปลายหนึ่งเปิดปลายหนึ่งปิด ตามตารางที่ 2-3 มีความถี่ที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพประกอบที่ 4-10 ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการประมวลสัญญาณคลื่นเสียง ในระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ 30 เซนติเมตร ที่ระยะไมโครโฟนห่างจากระดับของของเหลว หรือที่ระดับของเหลว 190 เซนติเมตร

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการทดลองประมวลสัญญาณบางช่วง ที่ระดับของช่องว่างอากาศต่างๆ ไม่สามารถบอกตำแหน่งเริ่มต้นของความถี่สเปกตรัมได้ แต่จากการสังเกตจะพบว่าความถี่ของสเปกตรัมที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง จะมีช่วงระยะห่างที่ใกล้เคียงกัน



ภาพประกอบที่ 4-10 แสดงผลที่ได้จากการประมวลสัญญาณคลื่นเสียงที่ระดับช่องว่างอากาศ ภายในท่อ 30 เซนติเมตร หรือที่ระดับของเหลว 190 เซนติเมตร

พิจารณาภาพประกอบที่ 4-10 ที่ตำแหน่งความถี่สเปกตรัม f_A กับ f_B โดยใช้หลักการตามทฤษฎีของบทที่ 2 ในหัวข้อ 2.5.2 จากเงื่อนไขตามสมการ (2-25) สามารถเขียนสมการได้ ดังนี้

$$f_A = n_A \frac{v}{4L} \quad (4-3)$$

$$f_B = n_B \frac{v}{4L} \quad (4-4)$$

ดังนั้นสามารถหาความถี่ f_{new} ซึ่งเป็นค่าของความถี่ ที่ได้จากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างความถี่สเปคตรัม f_A กับ f_B สามารถเขียนสมการดังนี้

$$f_{\text{new}} = f_B - f_A = (n_B - n_A) \frac{v}{4L} \quad (4-5)$$

$$\text{และ } n = n_B - n_A = (n_A + 2) - n_A = 2$$

จะได้ว่า

$$f_{\text{new}} = \frac{v}{2L} \quad (4-6)$$

จากการสังเกตพบว่าสมการ (4-6) มีรูปแบบสมการที่คล้ายคลึงกับสมการ ของความถี่ฮาร์โมนิกส์ที่ 1 (First Harmonic) ของคลื่นนิ่งภายในท่อปลายเปิดทั้งสองข้าง ในบทที่ 2 หัวข้อ 2.5.1 ดังนั้นสามารถนำหลักการและเงื่อนไขดังกล่าวมาพิจารณาประกอบเป็นแนวการวิจัยรวมด้วย และเนื่องจากค่าความถี่ f_{new} ที่ได้จากการทดลองประมวลสัญญาณนี้ เป็นค่าของระยะห่างระหว่างไมโครโฟนกับระดับของเหลวหรือระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าที่ต้องการทราบนั้น คือ ค่าของระดับของของเหลวภายในท่อ จึงจำเป็นต้องหาค่าความยาวของระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ คือ L_{air} โดยใช้เงื่อนไขตามสมการ (4-6) เขียนสมการใหม่ จะได้

$$L_{\text{air}} = \left(\frac{v}{2f_{\text{new}}} \right) \quad (4-7)$$

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้กำหนดความยาวของท่อไว้แล้ว ดังนั้นสามารถเขียนสมการ การหาระดับของของเหลวภายในท่อ จะได้ว่า เมื่อ L_{pipe} คือ ความยาวของท่อ

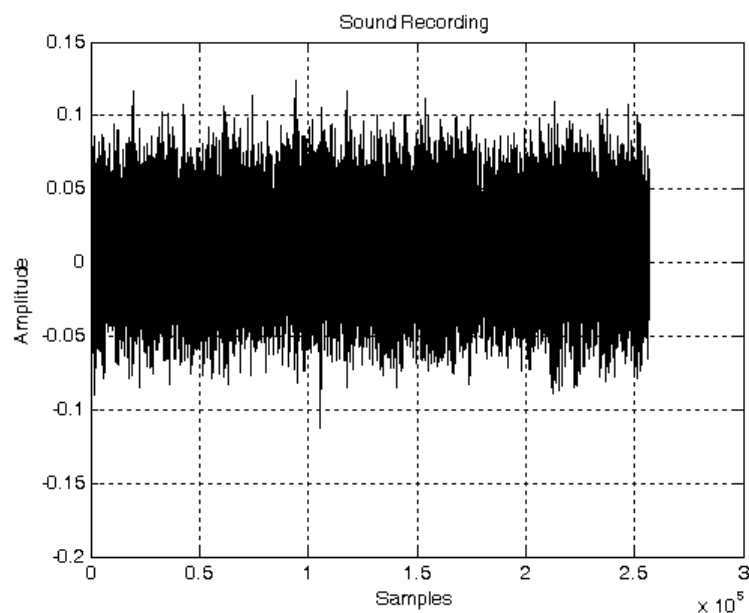
$$L_{\text{Liquid}} = L_{\text{pipe}} - L_{\text{air}} \quad (4-8)$$

4.3 แสดงตัวอย่างที่ได้ในแต่ละขั้นตอนของการประมวลผลสัญญาณคลื่นเสียง

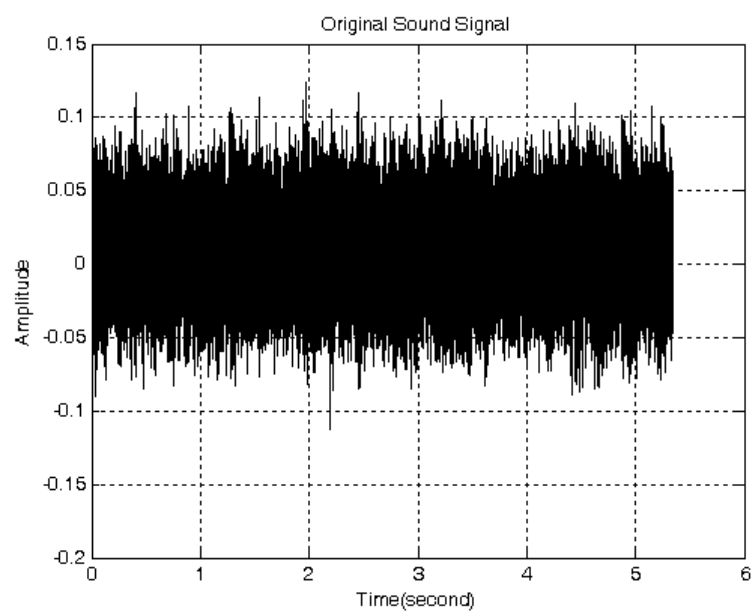
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลของการวิเคราะห์ และภาพของสัญญาณคลื่นเสียงที่ได้ในแต่ละขั้นตอนบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ โดยใช้โปรแกรมการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงที่ได้พัฒนาขึ้น เพื่อหาค่าระดับของของเหลวดังต่อไปนี้

4.3.1 ผลการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงที่ระดับของเหลว 50 เซนติเมตร หรือที่ระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ 150 เซนติเมตร ดังภาพประกอบที่ 4-11 จะได้ผลดังต่อไปนี้

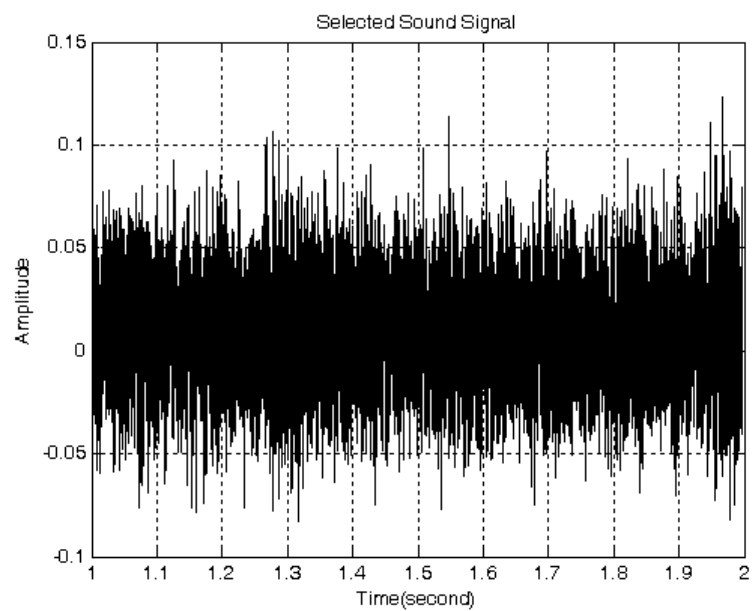
| | |
|---|---------------------------|
| การบันทึกสัญญาณคลื่นเสียงด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่าง | = 48000 ตัวอย่างต่อวินาที |
| การบันทึกสัญญาณคลื่นเสียงด้วยจำนวนบิตข้อมูล | = 16 บิต |
| ข้อมูลการเลือกสัญญาณคลื่นเสียง | = 47780 ตัวอย่าง |
| ความถี่คลื่นเสียงภายในท่อ | = 103 เฮิรตซ์ |
| ระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ | = 168 เซนติเมตร |
| ระดับของเหลวภายในท่อ | = 52 เซนติเมตร |



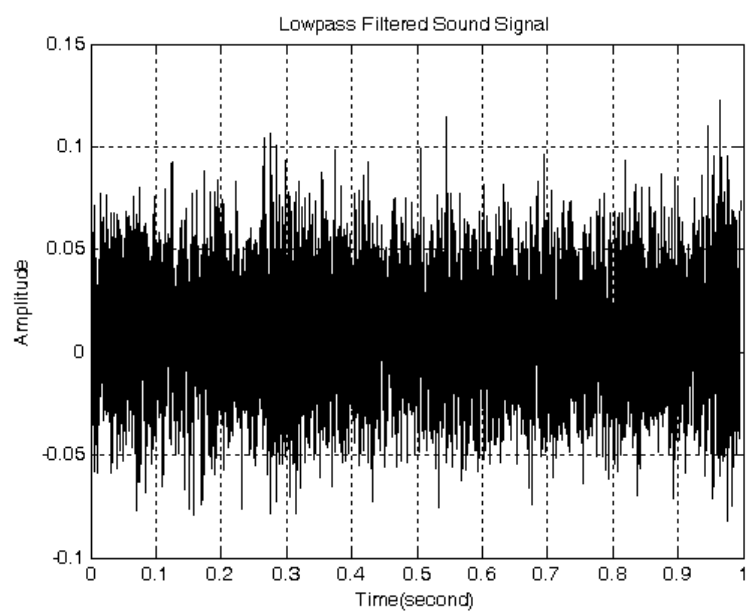
(ก)



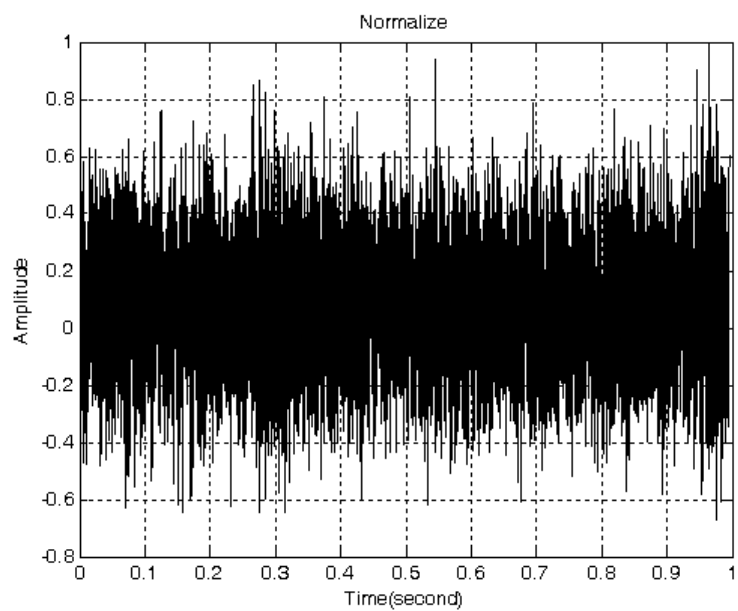
(a)



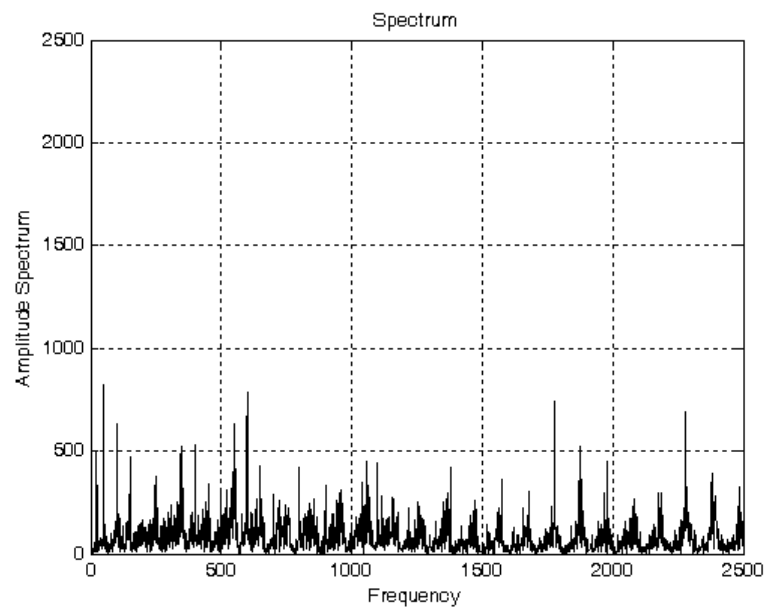
(b)



(3)



(4)



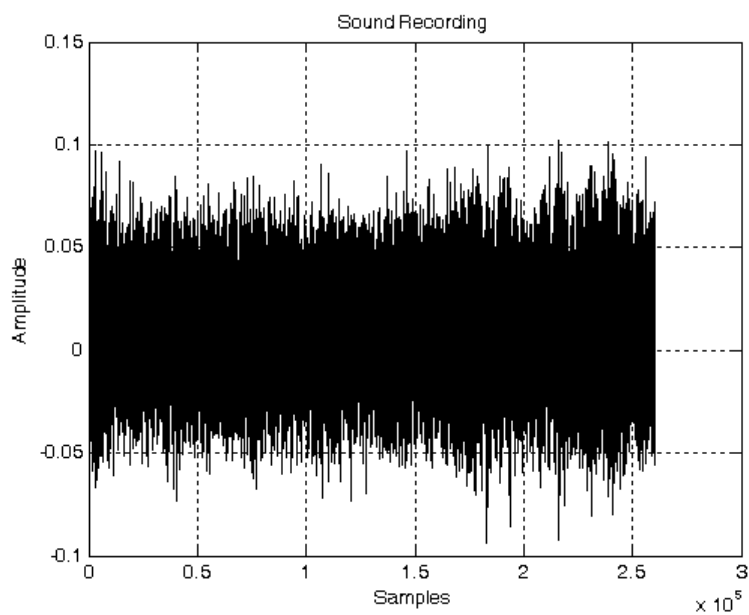
(ก)

ภาพประกอบที่ 4-11 (ก) สัญญาณคลื่นเสียงที่อ่านจากไฟล์ข้อมูล

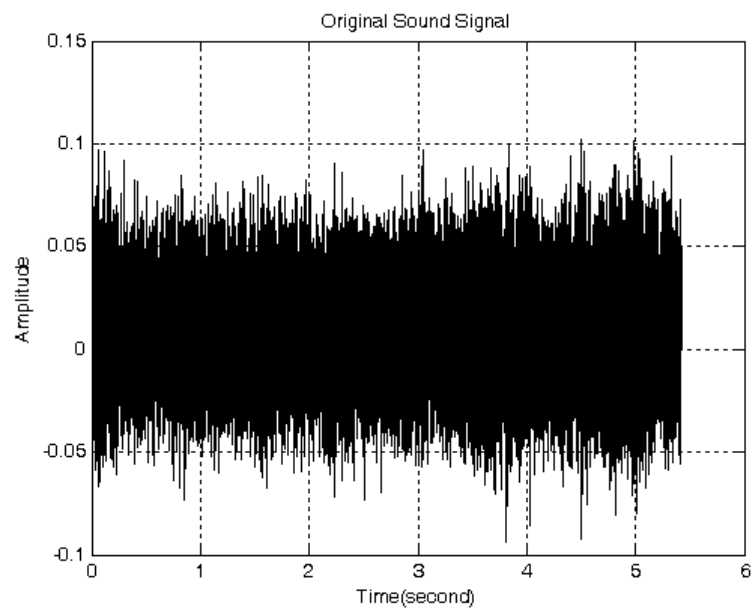
- (ข) สัญญาณคลื่นเสียงในโดเมนเวลา
- (ค) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการเลือกช่วงเวลาที่ต้องการ
- (ง) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ
- (จ) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์
- (ฉ) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการแปลงฟูรีเยร์

4.3.2 ผลการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงที่ระดับของเหลว 100 เซนติเมตร หรือที่ระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ 120 เซนติเมตร ดังภาพประกอบที่ 4-12 จะได้ผลดังต่อไปนี้

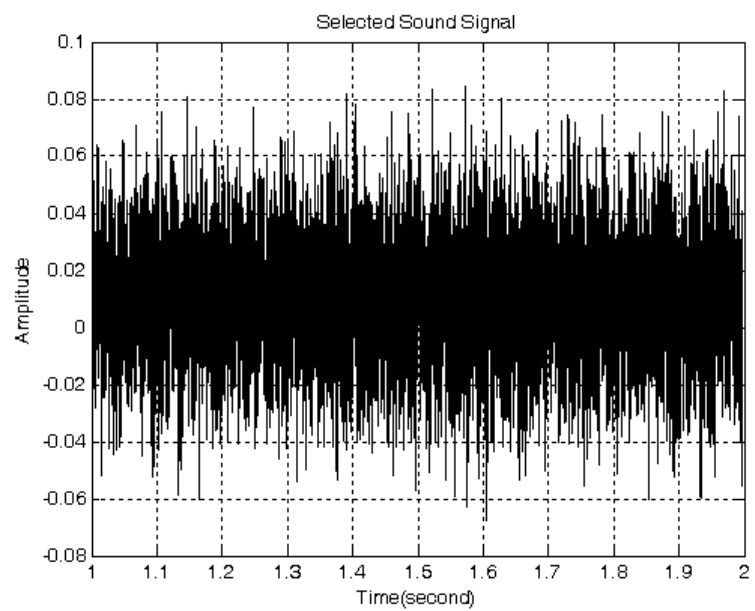
| | |
|---|---------------------------|
| การบันทึกสัญญาณคลื่นเสียงด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่าง | = 48000 ตัวอย่างต่อวินาที |
| การบันทึกสัญญาณคลื่นเสียงด้วยจำนวนบิตข้อมูล | = 16 บิต |
| ข้อมูลการเลือกสัญญาณคลื่นเสียง | = 47780 ตัวอย่าง |
| ความถี่คลื่นเสียงภายในท่อ | = 144 เฮิรตซ์ |
| ระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ | = 120 เซนติเมตร |
| ระดับของเหลวภายในท่อ | = 100 เซนติเมตร |



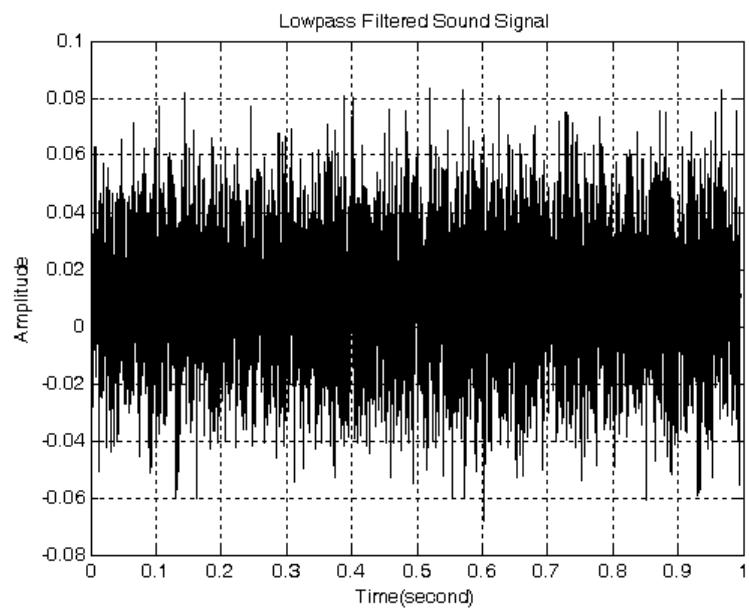
(ก)



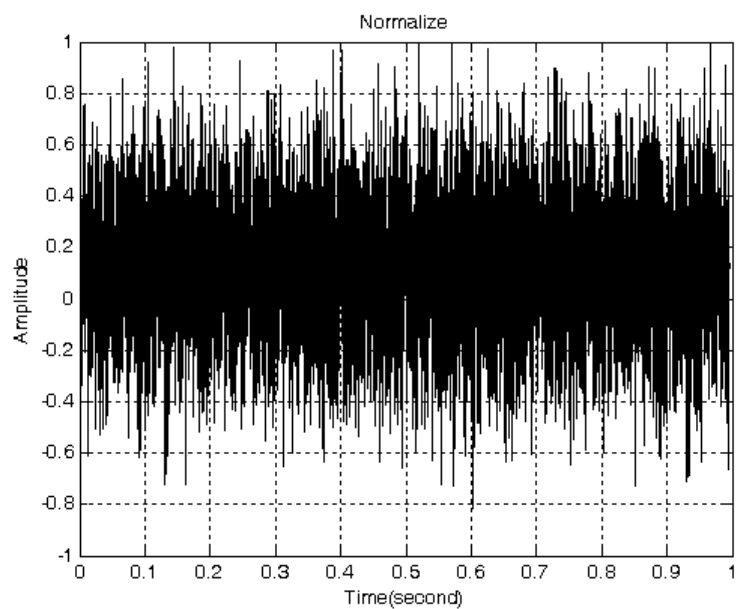
(g)



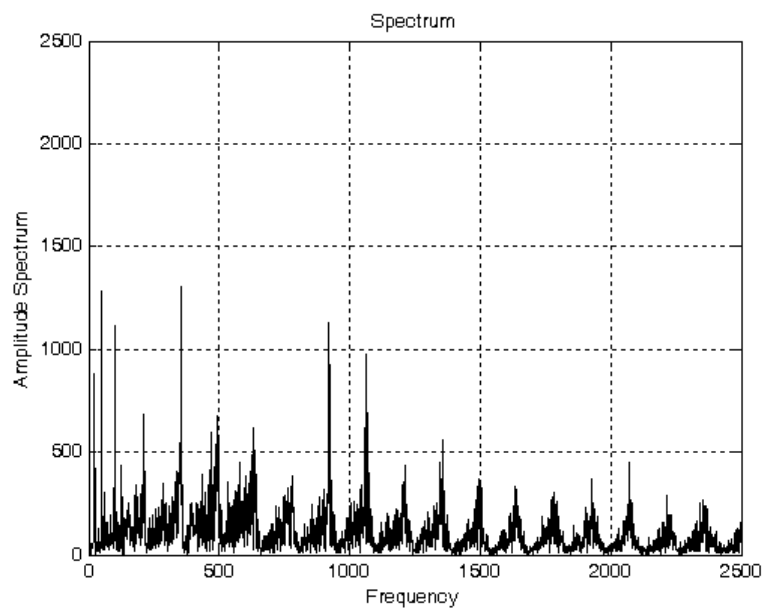
(h)



(3)



(1)



(ก)

ภาพประกอบที่ 4-12 (ก) สัญญาณคลื่นเสียงที่อ่านจากไฟล์ข้อมูล

(ข) สัญญาณคลื่นเสียงในโดเมนเวลา

(ค) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการเลือกช่วงเวลาที่ต้องการ

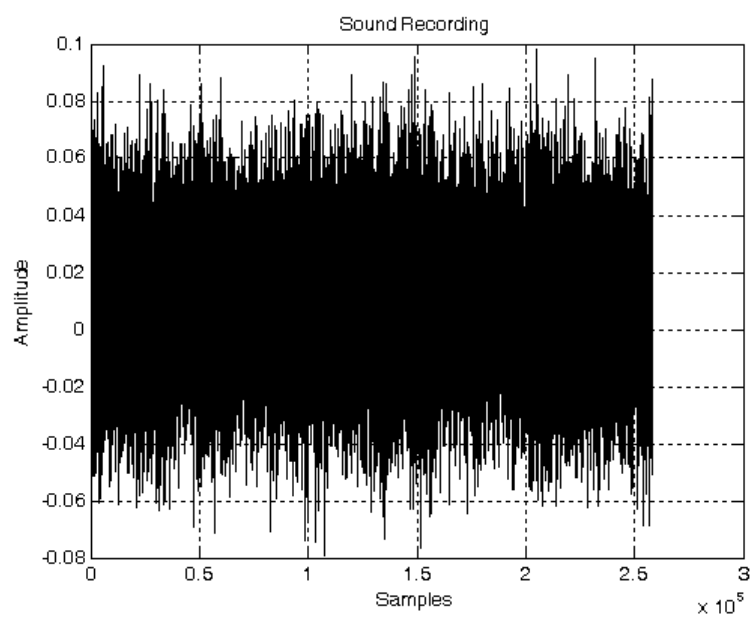
(ง) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

(จ) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์

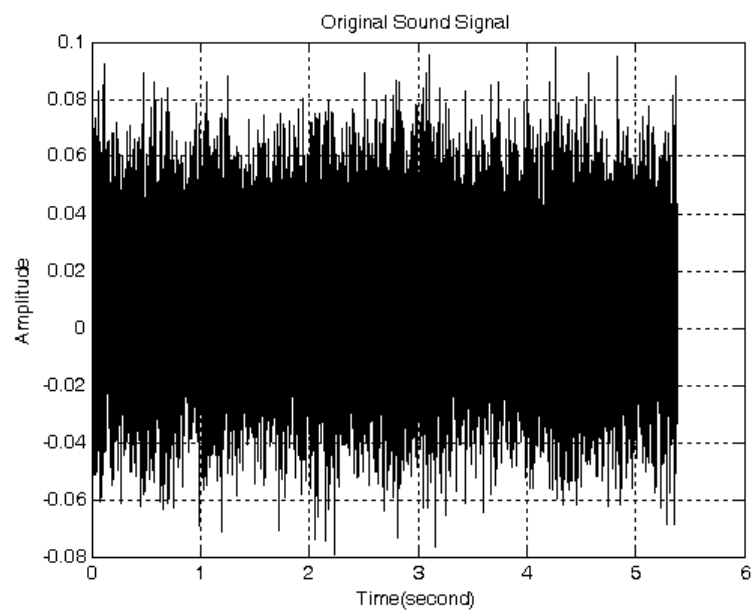
(ฉ) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการแปลงฟูรีเยร์

4.3.3 ผลการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงที่ระดับของเหลว 150 เซนติเมตร หรือที่ระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ 70 เซนติเมตร ดังภาพประกอบที่ 4-13 จะได้ผลดังต่อไปนี้

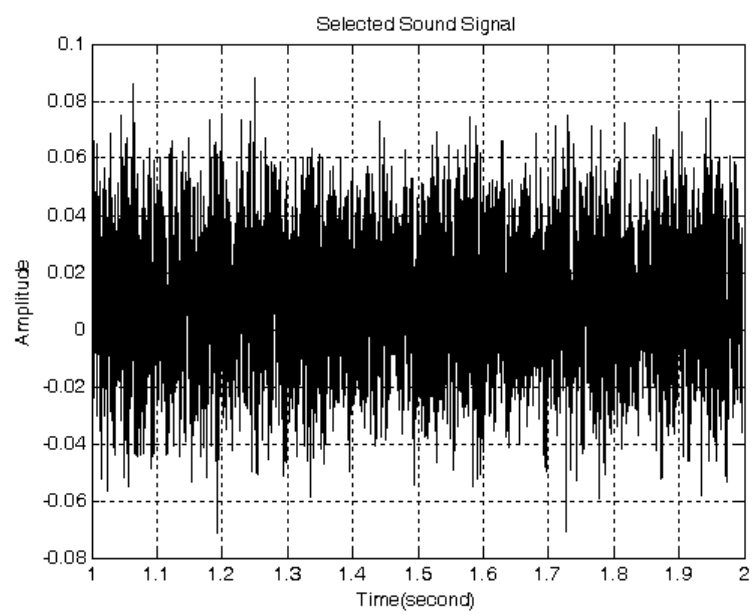
| | |
|---|---------------------------|
| การบันทึกสัญญาณคลื่นเสียงด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่าง | = 48000 ตัวอย่างต่อวินาที |
| การบันทึกสัญญาณคลื่นเสียงด้วยจำนวนบิตข้อมูล | = 16 บิต |
| ข้อมูลการเลือกสัญญาณคลื่นเสียง | = 47780 ตัวอย่าง |
| ความถี่คลื่นเสียงภายในท่อ | = 242 เฮิรตซ์ |
| ระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ | = 71 เซนติเมตร |
| ระดับของเหลวภายในท่อ | = 149 เซนติเมตร |



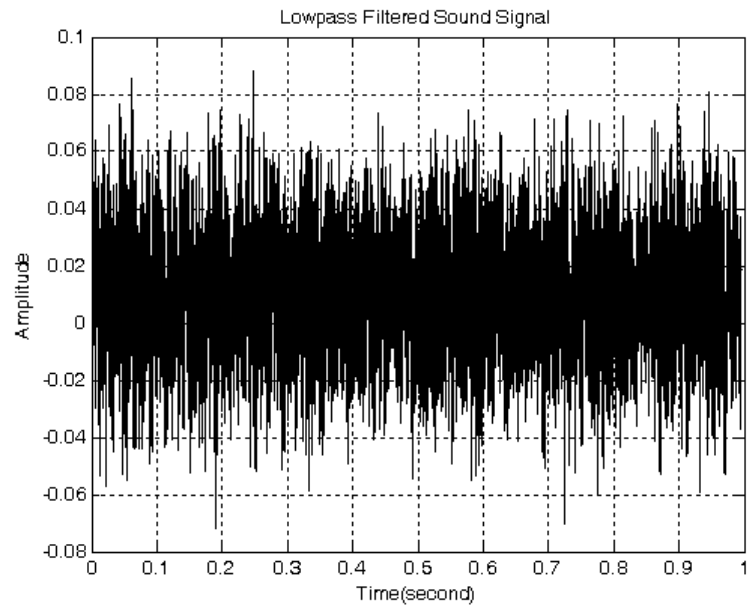
(ก)



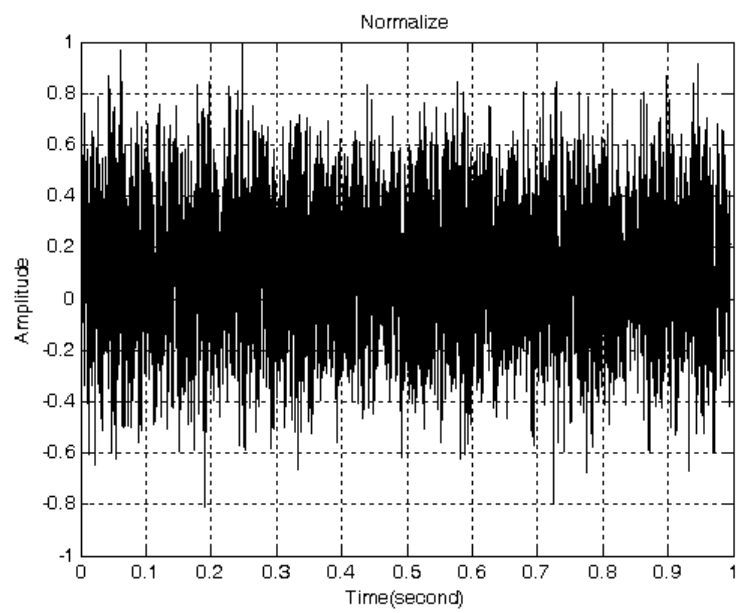
(a)



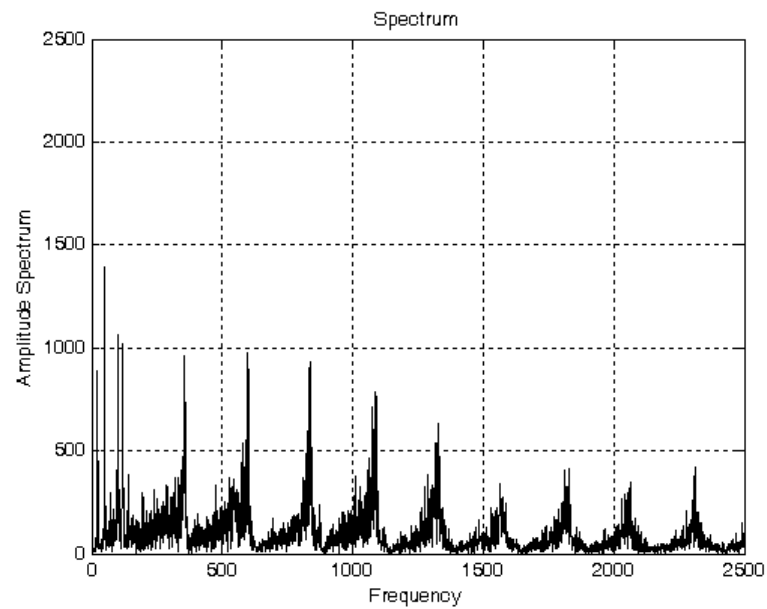
(b)



(j)



(i)



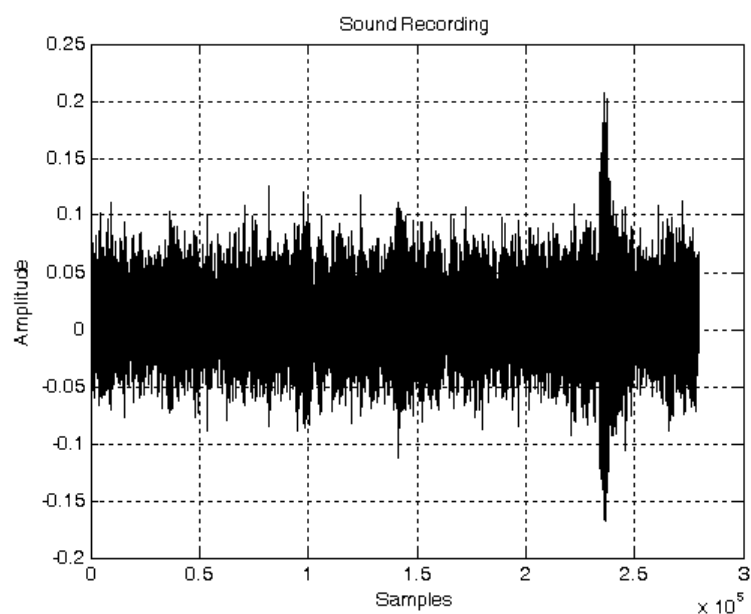
(ก)

ภาพประกอบที่ 4-13 (ก) สัญญาณคลื่นเสียงที่อ่านจากไฟล์ข้อมูล

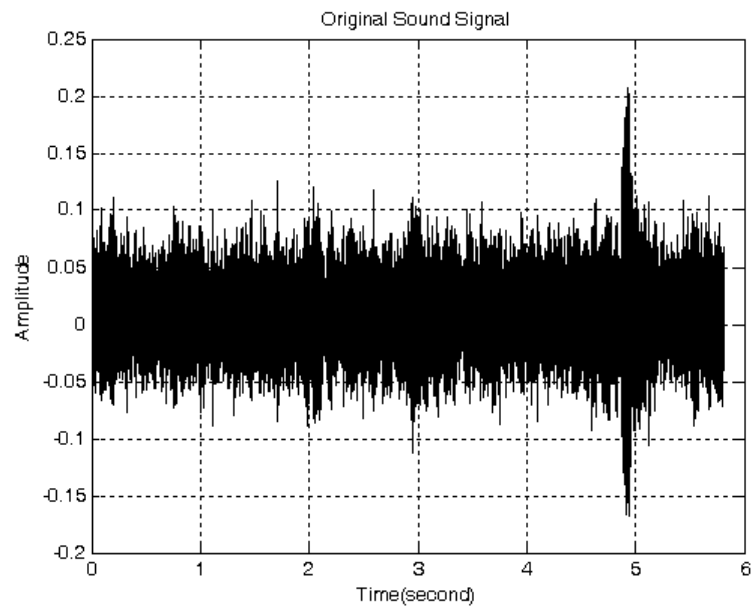
- (ข) สัญญาณคลื่นเสียงในโดเมนเวลา
- (ค) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการเลือกช่วงเวลาที่ต้องการ
- (ง) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ
- (จ) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์
- (ฉ) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการแปลงฟูรีเยร์

4.3.4 ผลการวิเคราะห์สัญญาณคลื่นเสียงที่ระดับของเหลว 200 เซนติเมตร หรือที่ระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ 20 เซนติเมตร ดังภาพประกอบที่ 4-14 จะได้ผลดังต่อไปนี้

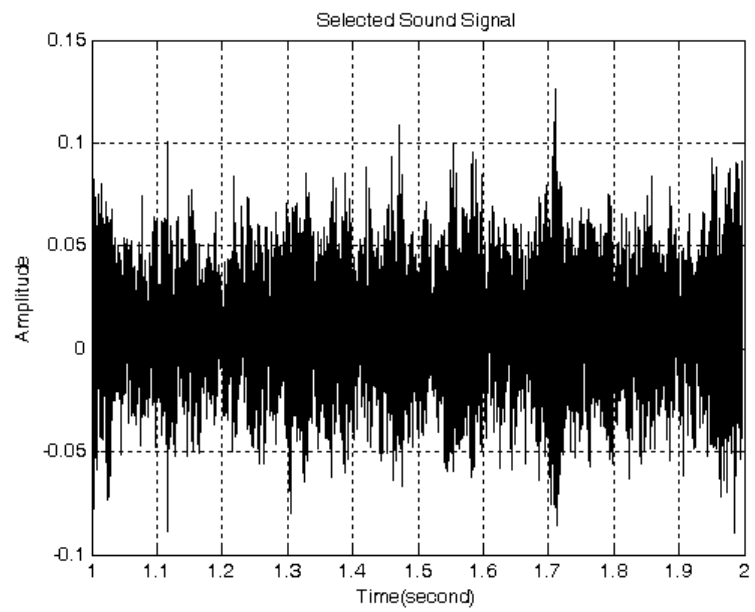
| | |
|---|---------------------------|
| การบันทึกสัญญาณคลื่นเสียงด้วยอัตราการสุ่มตัวอย่าง | = 48000 ตัวอย่างต่อวินาที |
| การบันทึกสัญญาณคลื่นเสียงด้วยจำนวนบิตข้อมูล | = 16 บิต |
| ข้อมูลการเลือกสัญญาณคลื่นเสียง | = 47780 ตัวอย่าง |
| ความถี่คลื่นเสียงภายในท่อ | = 800 เฮิรตซ์ |
| ระดับช่องว่างอากาศภายในท่อ | = 22 เซนติเมตร |
| ระดับของเหลวภายในท่อ | = 198 เซนติเมตร |



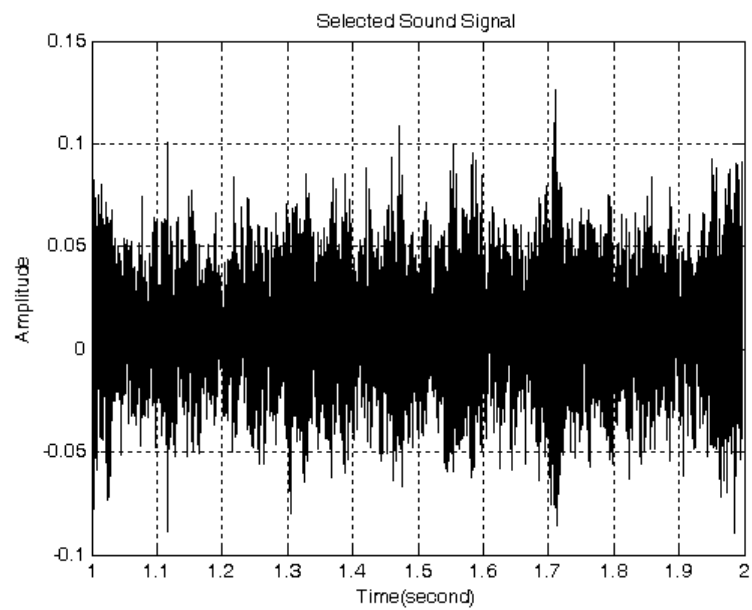
(ก)



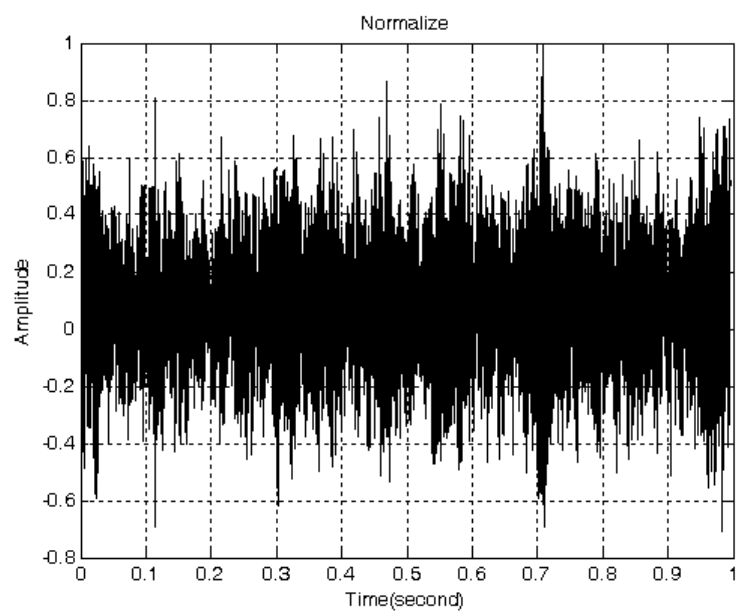
(a)



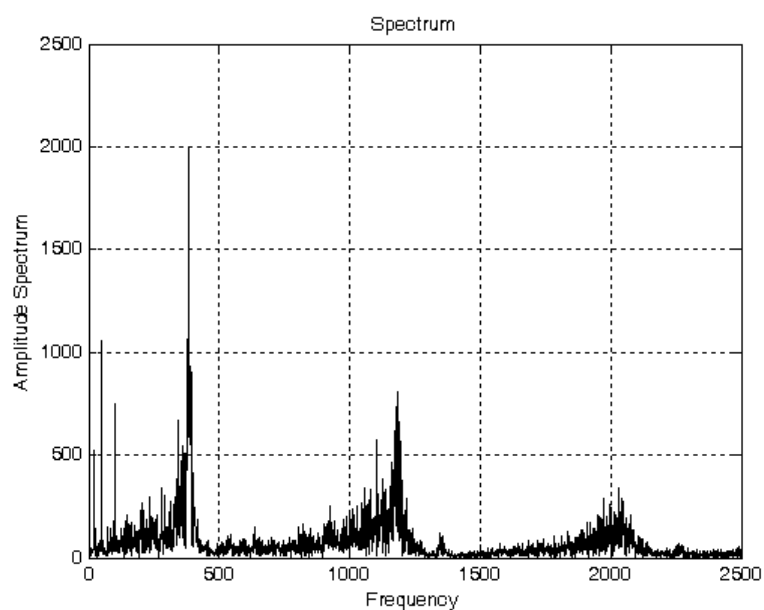
(b)



(3)



(1)



(ก)

ภาพประกอบที่ 4-14 (ก) สัญญาณคลื่นเสียงที่อ่านจากไฟล์ข้อมูล

(ข) สัญญาณคลื่นเสียงในโดเมนเวลา

(ค) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการเลือกช่วงเวลาที่ต้องการ

(ง) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านวงจรกรองสัญญาณความถี่ต่ำ

(จ) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการนอร์มอลไลซ์

(ฉ) สัญญาณคลื่นเสียงที่ผ่านการแปลงฟูเรียร์

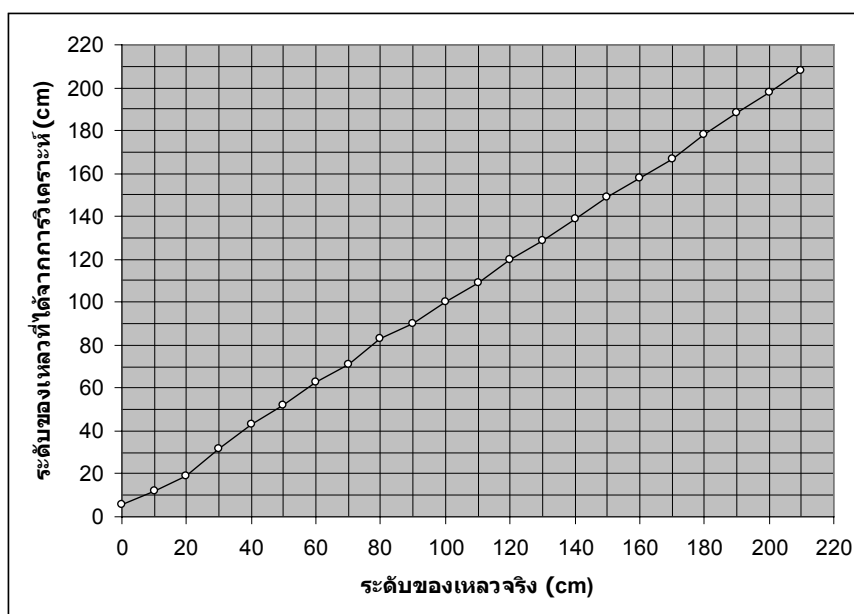
นำผลจากการวิเคราะห์ระดับของเหลวมาเปรียบเทียบกับระดับของเหลวจริง และหาค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถแสดงผลดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 แสดงผลการเปรียบเทียบระหว่างระดับของเหลวจริงกับระดับของเหลวที่ได้จากการวิเคราะห์ และค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% Error)

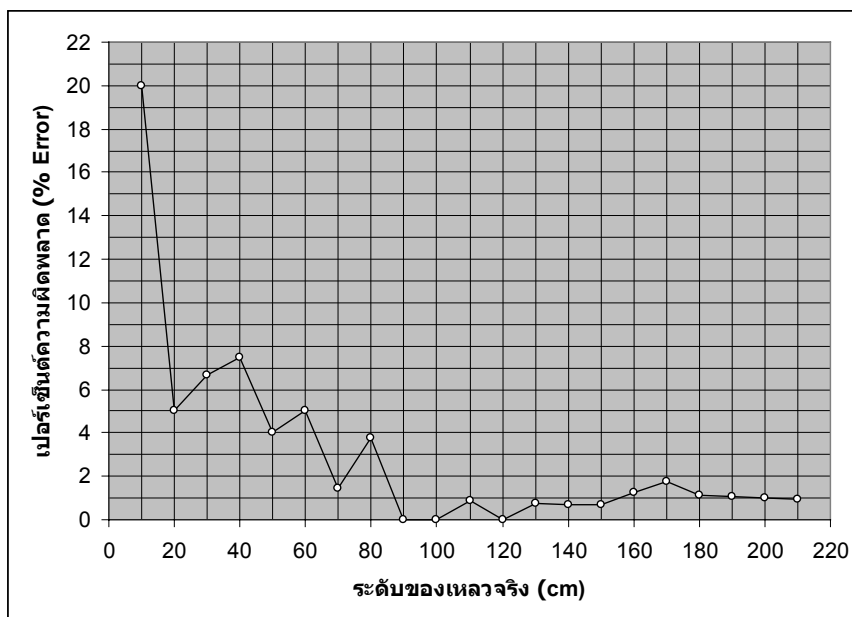
| ระดับของเหลวจริง (cm) | ระดับของเหลวที่ได้จากการวิเคราะห์ (cm) | ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (%) |
|--------------------------|---|----------------------------------|
| 0 | 6 | - |
| 10 | 12 | 20 |
| 20 | 19 | 5 |
| 30 | 32 | 6.67 |
| 40 | 43 | 7.50 |
| 50 | 52 | 4.00 |
| 60 | 63 | 5.00 |
| 70 | 71 | 1.43 |
| 80 | 83 | 3.75 |
| 90 | 90 | 0.00 |
| 100 | 100 | 0.00 |
| 110 | 109 | 0.91 |
| 120 | 120 | 0.00 |
| 130 | 129 | 0.77 |
| 140 | 139 | 0.71 |
| 150 | 149 | 0.67 |
| 160 | 158 | 1.25 |
| 170 | 167 | 1.76 |
| 180 | 178 | 1.11 |

| | | |
|-----|-----|------|
| 190 | 188 | 1.05 |
| 200 | 198 | 1.00 |
| 210 | 208 | 0.95 |

เมื่อนำค่าจากตารางที่ 4-1 มาแสดงความสัมพันธ์กันในรูปแบบของกราฟจะได้กราฟดังต่อไปนี้



ภาพประกอบที่ 4-15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของเหลวจริงกับระดับของเหลวที่ได้จากการวิเคราะห์



ภาพประกอบที่ 4-16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระดับของเลวจริงกับ
ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาด (% Error)