

บทที่ 5

ผลการวิจัย

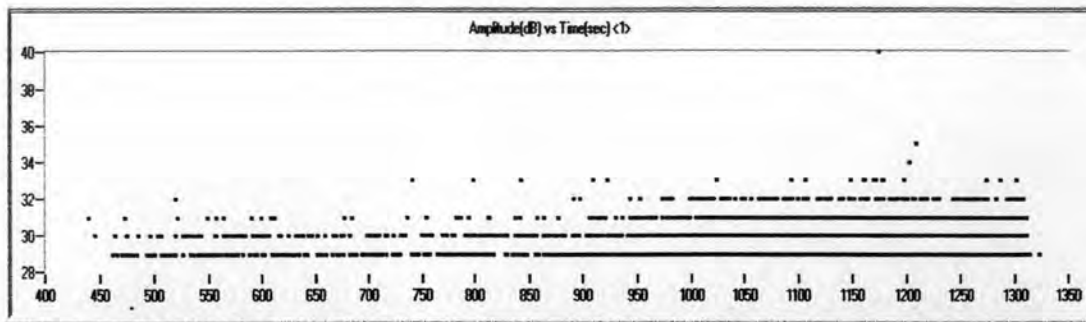
ผลการทดลองจากงานวิจัยนี้จะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ

- ส่วนของการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกจากการกักกรองนึ่งความเค้น
- ส่วนของการทดสอบการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติก

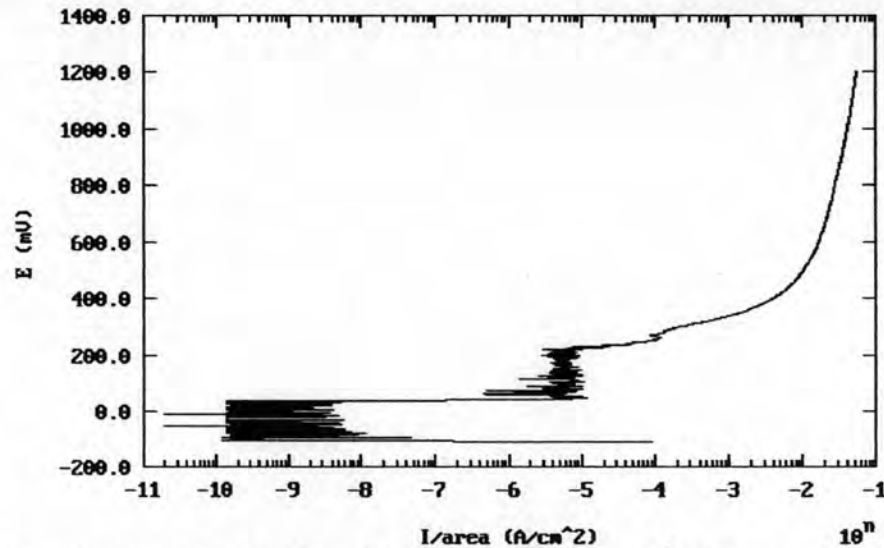
5.1 ผลการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกจากการกักกรองนึ่งความเค้น

การทดสอบวิธีที่ 1 การตรวจจับสัญญาณอะคูสติกพร้อมเทคนิคโพเทนทิโอไดนามิกส์ โพลาริเซชัน

ผลจากการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกจากการทดสอบชิ้นทดสอบที่ได้รับความเค้นจากการพับ พบว่าในการทดสอบเป็นเวลา 1350 วินาที (22 นาที 30 วินาที) สามารถแบ่งการตรวจพบสัญญาณอะคูสติกได้เป็น 3 ช่วง ตามรูปที่ 5.1 คือ ช่วงแรก เวลา 0 - 450 วินาที ไม่พบสัญญาณอะคูสติกเลย ช่วงที่ 2 เวลา 450 - 1320 วินาที พบสัญญาณอะคูสติกเกิดขึ้นอย่างมาก โดยส่วนใหญ่มีค่าแอมพลิจูดอยู่ในช่วง 29 - 33 เดซิเบล และช่วงที่ 3 คือช่วงเวลา 1320 - 1350 วินาที พบว่าสามารถตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้บ้าง แต่มีจำนวนน้อยมาก เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ที่ให้กับกระแสไฟฟ้าจากการกักกรองที่วัดได้ ตามรูปที่ 5.2 พบว่าสามารถแบ่งกระแสที่วัดได้ 3 ช่วงเช่นเดียวกัน คือ ช่วงที่ 1 ที่ความต่างศักย์ -100 ถึง 350 มิลลิโวลต์ จะตรงกับช่วงเวลา 0 - 450 วินาที ซึ่งช่วงนี้กระแสมีค่าต่ำมาก แสดงว่า ฟาสซีฟฟิล์มยังมีสภาพดีอยู่ และยังไม่เกิดการกักกรอง ช่วงที่ 2 คือ ช่วง 350 - 1200 มิลลิโวลต์ ช่วงนี้กระแสมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าตั้งแต่ 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรขึ้นไป แสดงว่าที่ความต่างศักย์ 350 มิลลิโวลต์ ทำให้ฟาสซีฟฟิล์มแตกและเกิดการกักกรองขึ้น ซึ่งจะตรงกับผลจากการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกในช่วงที่ 2 ที่ตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้เป็นจำนวนมากนั่นเอง และช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่สิ้นสุดการทดลอง และหยุดให้ความต่างศักย์ จะพบว่าเกิดสัญญาณอะคูสติกขึ้นบ้าง เนื่องจากผิวของชิ้นทดสอบบางส่วนเกิดการกักกรองขึ้นและเกิดต่อเนื่องไปอีก



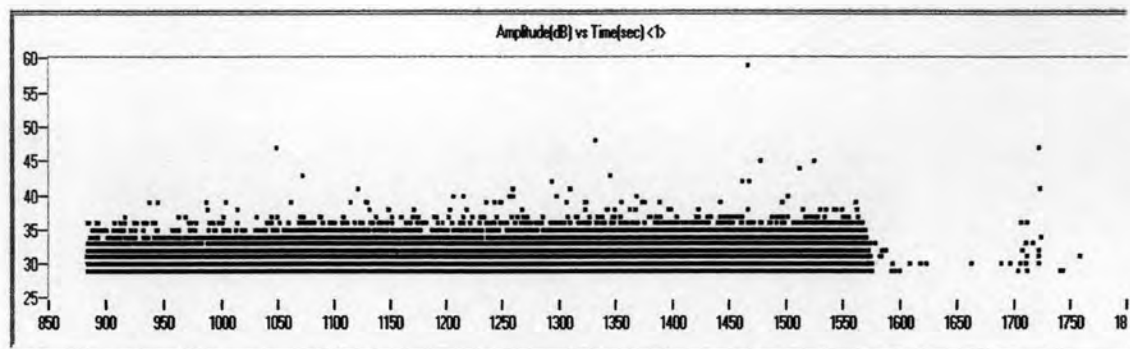
รูปที่ 5.1 ภาพแสดงสัญญาณอะคูสติกของหินทดสอบที่ได้รับความเค้นจากการพับ



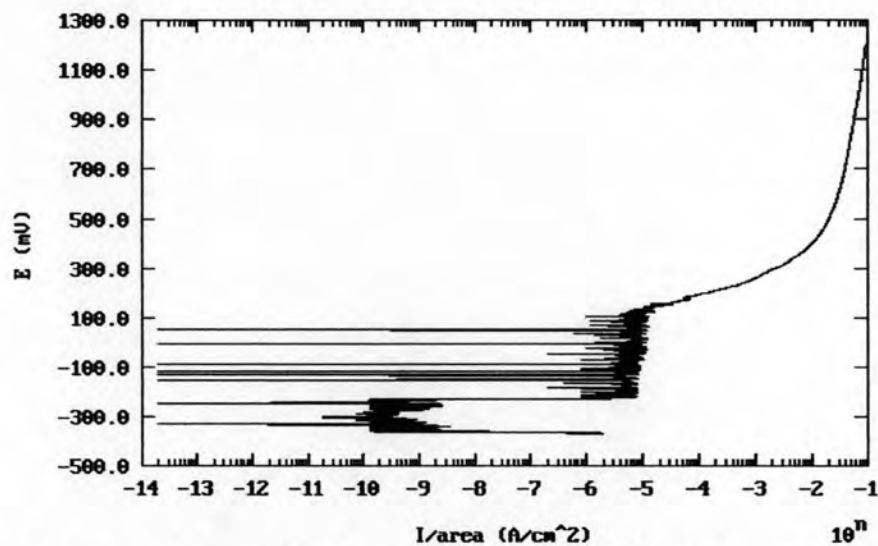
รูปที่ 5.2 กราฟของความต่างศักย์เทียบกับกระแสของหินทดสอบที่ได้รับความเค้นจากการพับ

สำหรับผลจากการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกจากการทดสอบหินทดสอบที่ไม่ได้รับความเค้นจากการพับ พบว่ามีลักษณะเดียวกัน คือจากการทดสอบเป็นเวลา 1770 วินาที (29 นาที 30 วินาที) สามารถแบ่งการตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้เป็น 3 ช่วง ตามรูปที่ 5.3 คือ ช่วงแรก ที่เวลา 0 - 880 วินาที ไม่พบสัญญาณอะคูสติกเลย ช่วงที่ 2 เวลา 880 - 1580 วินาที พบสัญญาณอะคูสติกจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่มีค่าแอมพลิจูดอยู่ในช่วง 29 - 35 เดซิเบล และช่วงที่ 3 คือช่วงเวลา 1580 - 1770 วินาที พบว่าสามารถตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้บ้าง แต่มีจำนวนน้อย เมื่อพิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ของความต่างศักย์ที่ให้กับกระแสที่วัดได้ ตามรูปที่ 5.4 พบว่าสามารถแบ่งกระแสที่วัดได้ 3 ช่วง เช่นกันคือ ช่วงที่ 1 ที่ความต่างศักย์ -380 ถึง 500 มิลลิโวลต์ จะตรงกับช่วงเวลา 0 - 880 วินาที ซึ่งช่วงนี้กระแสมีค่าต่ำมาก แสดงว่ายังไม่เกิดการกัดกร่อน ช่วงที่ 2 คือ ช่วง 500 - 1200 มิลลิโวลต์ ช่วงนี้กระแสมีค่าสูงขึ้น โดยมีค่าตั้งแต่ 10 มิลลิแอมแปร์ต่อตารางเซนติเมตรขึ้นไป แสดงว่าเกิดการกัดกร่อนขึ้นในช่วงเวลานี้ ซึ่งจะตรงกับผลจากการตรวจสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกในช่วงที่ 2 ที่ตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้เป็น

จำนวนมาก และช่วงที่ 3 เป็นช่วงที่สิ้นสุดการทดลองจึงหยุดให้ความต่างศักย์ จะพบว่าเกิดสัญญาณอะคูสติกขึ้นบ้าง

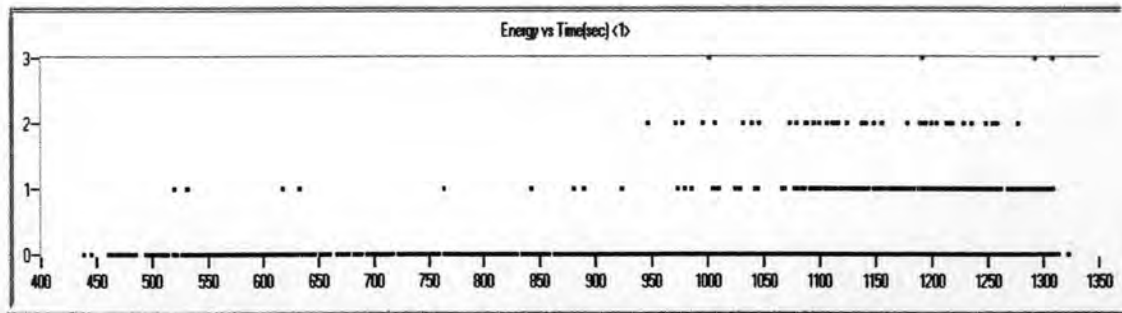


รูปที่ 5.3 ภาพแสดงสัญญาณอะคูสติกของชิ้นทดสอบไม่ได้รับความเค้นจากการพับ

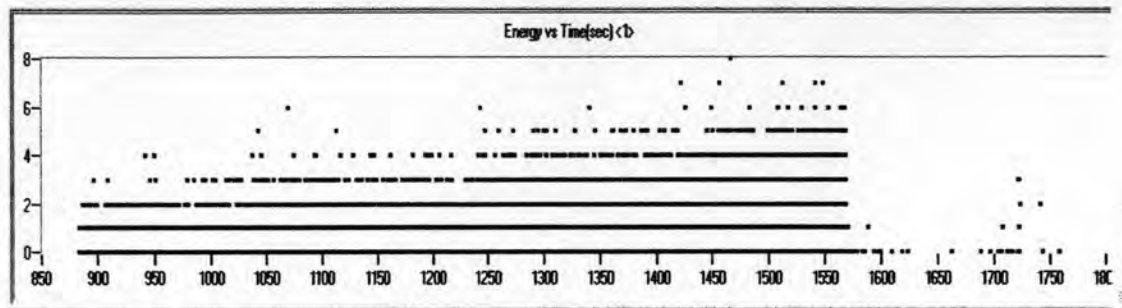


รูปที่ 5.4 กราฟความต่างศักย์เทียบกับกระแสของชิ้นทดสอบที่ไม่ได้รับความเค้นจากการพับ

จากการทดลองทั้งสอง ต่างให้ผลในทิศทางเดียวกันว่าการทดสอบด้วยวิธีการปล่อยคลื่นอะคูสติกสามารถตรวจจับการกักกร่อนได้อย่างถูกต้อง โดยจำนวนสัญญาณอะคูสติกที่ตรวจจับได้ จะมีค่าสูงเมื่อมีการกักกร่อนเกิดขึ้น เมื่อพิจารณาถึงค่าอะคูสติกพารามิเตอร์อื่นๆ ได้แก่ แอมพลิจูด ความถี่ และพลังงาน พบว่า สำหรับวัสดุที่ได้รับความเค้นจากการพับ แอมพลิจูดของสัญญาณส่วนใหญ่จะอยู่ในช่วง 29 – 33 เดซิเบล ส่วนวัสดุที่ไม่ได้รับความเค้นจะมีแอมพลิจูดอยู่ในช่วง 29 – 35 เดซิเบล เมื่อพิจารณาถึงความถี่ พบว่าความถี่ของการทดลองทั้งสองจะมีค่าประมาณ 140 กิโลเฮิรตซ์ เมื่อพิจารณาที่ค่าพลังงานจากการทดลอง พบว่าพลังงานมีแนวโน้มเช่นกับแอมพลิจูด ตามรูปที่ 5.5



(ก) ภาพจากเซ็นเซอร์ที่ได้รับความเค้นจากการพับ



(ข) ภาพจากเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้รับความเค้นจากการพับ

รูปที่ 5.5 แสดงค่าพลังงานของสัญญาณอะคูสติคที่ตรวจจับได้เทียบกับเวลา

เมื่อพิจารณาที่ค่าความต่างศักย์พบว่าเซ็นเซอร์ที่ได้รับความเค้นจากการพับ จะมีค่าความต่างศักย์ประมาณ 350 มิลลิโวลต์ ซึ่งจะต่ำกว่าเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้รับความเค้นจากการพับ ที่มีค่าความต่างศักย์ประมาณ 500 มิลลิโวลต์ แสดงว่าการพับทำให้คุณภาพของพาสซีฟฟิล์มต่ำลง โดยเซ็นเซอร์ที่ไม่ได้รับความเค้นจากการพับจะมีรูจากการกัดกร่อนให้เห็นทั่วไป ในขณะที่เซ็นเซอร์ที่ได้รับความเค้นจากการพับจะเกิดรูจากการกัดกร่อนในบริเวณที่ไม่ใช่รอยพับ โดยบริเวณรอยพับจะไม่เกิดรูขึ้นเลย เมื่อนำรอยพับมาตรวจดูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงที่กำลังขยาย 20 เท่า พบว่ามีการแตกที่ผิวอย่างชัดเจน ตามรูปที่ 5.6 โดยคาดว่าเกิดจากการกัดกร่อนเชิงความเค้นนั่นเอง



(ก) ภาพก่อนการทดลองที่กำลังขยาย 10 เท่า

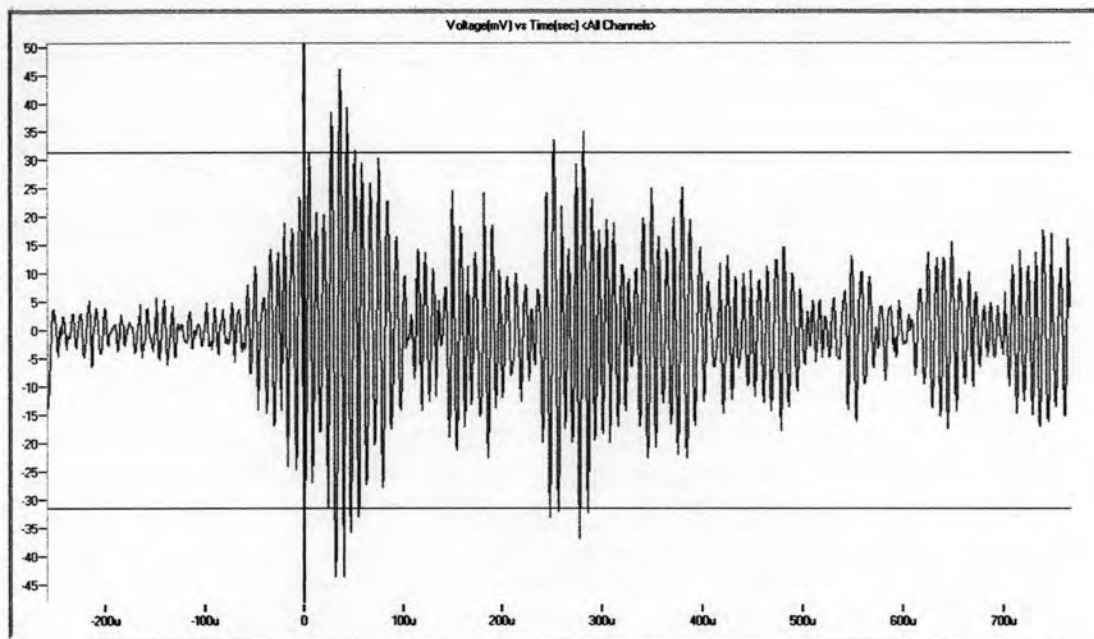


(ข) ภาพหลังการทดลองที่กำลังขยาย 20 เท่า

รูปที่ 5.6 ภาพบริเวณรอยพับของเซ็นเซอร์

การทดสอบวิธีที่ 2 การตรวจจับสัญญาณอะคูสติกโดยการเร่งการกักร้อนด้วยวิธีการ เพิ่มความเป็นกรด

เมื่อทำการทดสอบโดยการแช่ขึ้นทดสอบไว้ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.35 โมล ที่ปรับให้มีค่าพีเอช เท่ากับ 2.32 โดยการผสมกรดไฮโดรคลอริก พบว่าเมื่อแช่ขึ้นทดสอบในสารละลายเป็นเวลาไม่นานนัก จะเกิดฟองแก๊สขึ้นที่ผิวของขึ้นทดสอบทั้งผิวด้านบนและด้านล่าง โดยฟองอากาศที่ผิวด้านล่างจะมีขนาดใหญ่กว่า และพบว่ามีสัญญาณอะคูสติกเกิดขึ้นมาอย่างต่อเนื่อง โดยลักษณะของสัญญาณจะเป็นดังรูปที่ 5.7

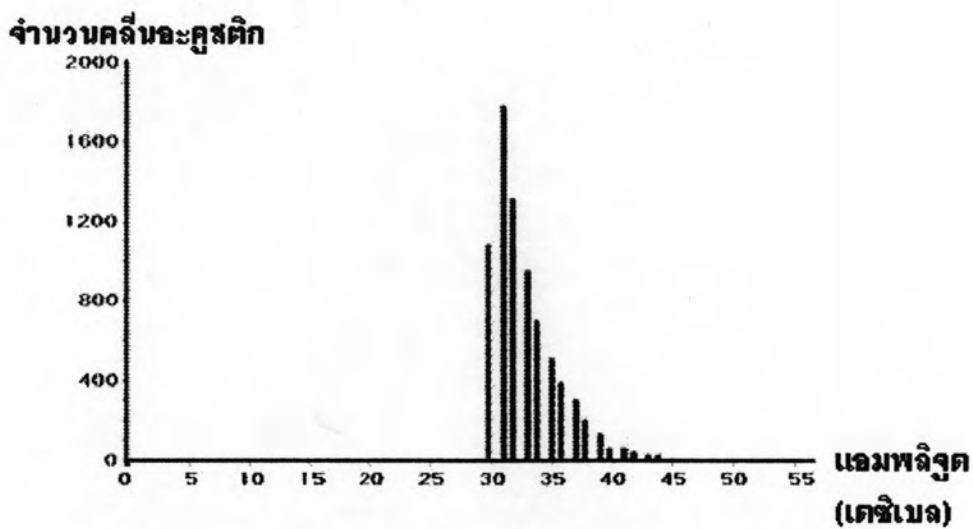


รูปที่ 5.7 ภาพแสดงสัญญาณอะคูสติกจากการกักร้อน

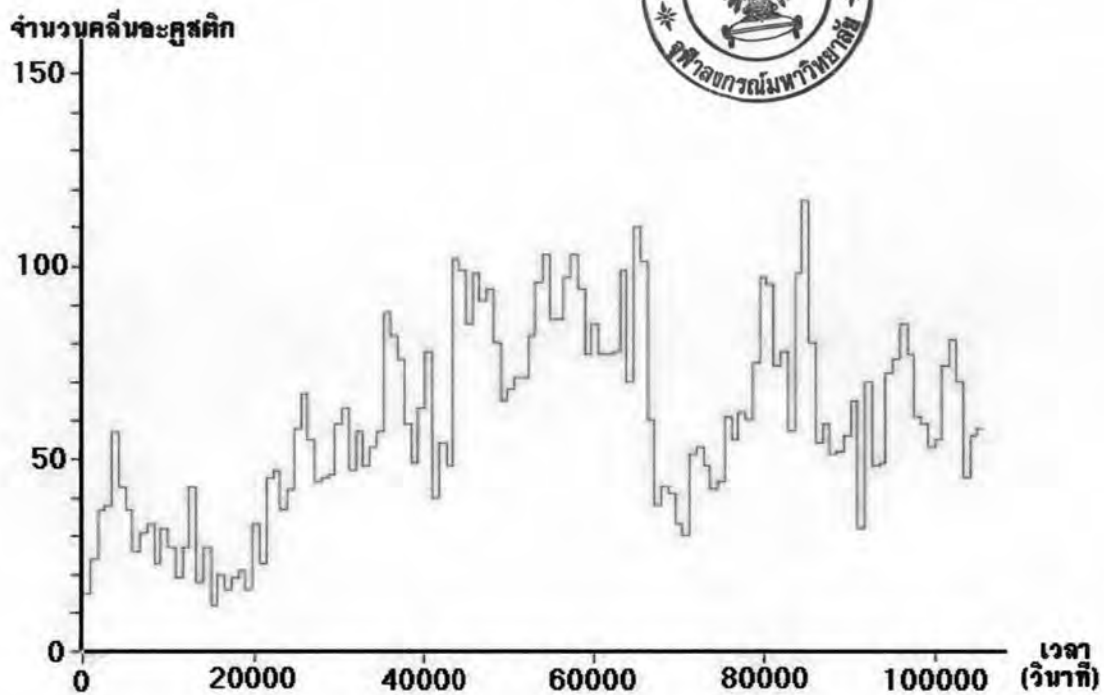
จากการทดลองที่ผ่านมา อะคูสติกพารามิเตอร์ที่สามารถตรวจจับการกักร้อนเชิงความเค้น คือ จำนวนสัญญาณอะคูสติกและแอมพลิจูด จากการทดสอบเป็นเวลาประมาณ 27 ชม. พบว่าสามารถตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้จำนวน 7619 ครั้ง มีค่าแอมพลิจูดตั้งแต่ 25 ถึง 55 เดซิเบล (ประมาณ 18 ถึง 562 ไมโครโวลต์) โดยสัญญาณส่วนใหญ่มีแอมพลิจูดที่ 30 -35 เดซิเบล (ประมาณ 32 ถึง 57 ไมโครโวลต์) ตามรูปที่ 5.8 และตาราง 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงจำนวนสัญญาณอะคูสติคที่มีค่าแอมพลิจูดต่างๆกัน

ช่วงของค่าแอมพลิจูด(เดซิเบล)	จำนวน
25-30	1048
30-35	5266
35-40	1094
40-45	163
45-50	9
50-55	3
รวม	7619



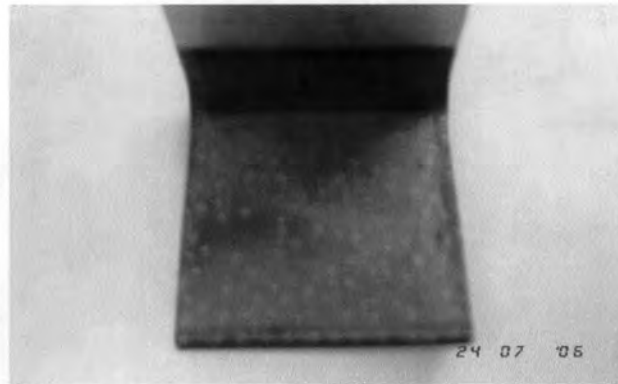
รูปที่ 5.8 ภาพแสดงจำนวนสัญญาณอะคูสติคที่มีค่าแอมพลิจูดต่างๆกัน



รูปที่ 5.9 กราฟของจำนวนสัญญาณอะคูสติคที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาต่างๆ

เมื่อพิจารณาจำนวนสัญญาณอะคูสติคที่ตรวจจับได้ในช่วงเวลาต่างๆ ตามรูปที่ 5.9 จะพบว่าสัญญาณเกิดขึ้นตลอดเวลา โดยสัญญาณช่วง 5 ชั่วโมงครั้งนับจากเริ่มทำการทดลอง (0 - 20,000 วินาที) จำนวนสัญญาณอะคูสติคที่ตรวจจับได้ยังมีค่าต่ำอยู่ ซึ่งจากการสังเกตพบว่า ช่วงนี้เป็นช่วงที่มีฟองแก๊สเกิดขึ้นที่ผิวของชิ้นทดสอบแต่ยังมีจำนวนน้อยอยู่ ส่งผลให้จำนวนสัญญาณอะคูสติคน้อยไปด้วย หลังจากนั้นจะพบว่าสัญญาณเริ่มเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ แม้ว่าไม่ได้เพิ่มขึ้นอย่างโดดเด่นก็ตาม จนถึงช่วง 18.5 ถึง 19.5 ชม. สัญญาณจะลดลงก่อนเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แสดงว่าช่วงเวลาทั้งสองเป็นช่วงการเปลี่ยนแปลงบางอย่าง ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากการซ่อมแซมตัวเองของ พาสซีฟฟิล์ม และสัญญาณอะคูสติคส่วนใหญ่จะมีความถี่ที่ประมาณ 140 กิโลเฮิรตซ์ และเมื่อพิจารณาที่ชิ้นทดสอบพบว่าผิวบริเวณที่แช่ในสารละลายเปลี่ยนเป็นสีคล้ำ โดยเฉพาะบริเวณที่มีการกัดจะมสีคล้ำมากกว่าบริเวณอื่น บริเวณผิวอื่นๆ จะพบลักษณะของรอยต่างสีขาว เนื่องจากเป็นบริเวณที่เกิดฟองแก๊สนั่นเอง ดูรูปที่ 5.10

จากผลการทดลองจะพบว่าสอดคล้องกับผลจากการทดลองครั้งที่ 1 ทั้งช่วงของค่าแอมพลิจูดของสัญญาณที่พบ และค่าความถี่ แสดงว่าการให้ความเค้นตกค้างจากการกัดอเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม เบอร์ 304 สามารถเกิดการกัดกร่อนและสามารถตรวจพบได้โดยวิธีการปล่อยคลิ่นอะคูสติค

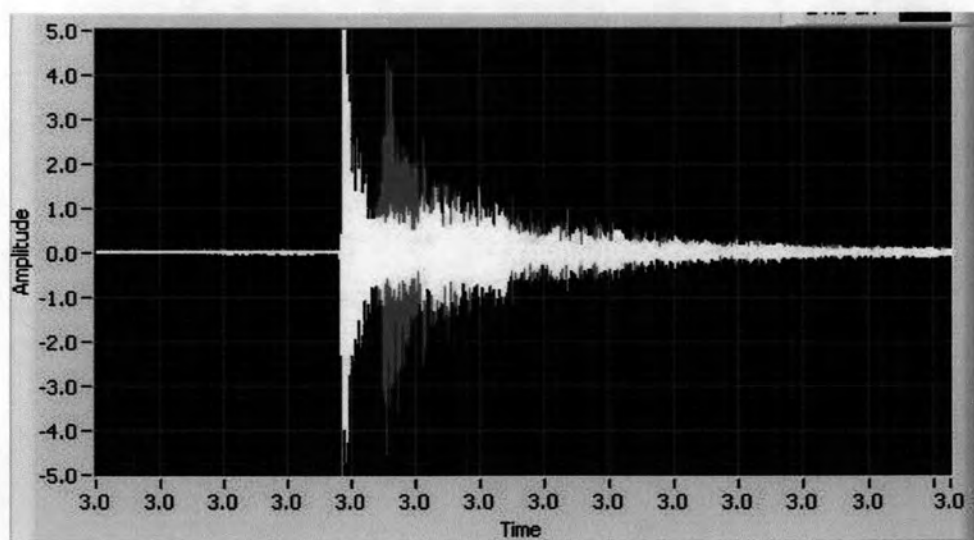


รูปที่ 5.10 ภาพแสดงลักษณะของชิ้นทดสอบหลังการทดลอง

5.2 ผลการทดสอบการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติก

5.2.1 วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับสัญญาณ 2 ตัว

ในการหาตำแหน่ง จำเป็นต้องรู้ความเร็วเสียงที่คลื่นอะคูสติกใช้ในการเดินทางในท่อโลหะที่ทดสอบเสียก่อน ซึ่งในโลหะชนิดเดียวกัน คลื่นอะคูสติกไม่จำเป็นต้องมีความเร็วเสียงที่เท่ากัน โดยจะขึ้นกับรูปร่างและลักษณะของท่อด้วย ในการทดลองนี้จึงเริ่มจากการหาความเร็วเสียงในท่อโลหะที่ทดลอง พบว่าได้ผลดังนี้



รูปที่ 5.11 ภาพสัญญาณอะคูสติกที่เกิดจากการหักใส่ดินสอดที่ระยะ 23.50 ซม.

ตารางที่ 5.2 การหาความเร็วเสียงของท่อโลหะ ยาว 2 เมตร

ครั้งที่	ค่าจากการทดลอง (เมตร/วินาที)	ครั้งที่	ค่าจากการทดลอง (เมตร/วินาที)
1	2786.89	16	2876.48
2	2689.87	17	2915.95
3	3085.30	18	2677.17
4	2664.58	19	2871.62
5	2805.28	20	2891.16
6	2805.29	21	2891.16
7	3107.87	22	2910.96
8	3046.60	23	3041.15
9	2677.17	24	2728.73
10	2759.74	25	2689.87
11	2724.36	26	2809.92
12	3030.30	27	2819.24
13	2694.14	28	2876.48
14	2814.57	29	2891.16
15	2886.25	30	2910.96
ค่าเฉลี่ย (เมตร/วินาที)		2846.01	
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร/วินาที)		127.21	

ตารางที่ 5.3 การทดสอบหาค่าแห่งของท่อโลหะยาว 2 เมตร

ครั้งที่	ระยะ 23.50 ซม.	ระยะ 54.50 ซม.	ระยะ 85.50 ซม.	ระยะ 116.50 ซม.	ระยะ 147.50 ซม.
1	22.25	56.40	85.71	113.18	142.63
2	22.25	55.83	85.85	113.74	142.49
3	23.24	55.69	86.14	113.46	143.2
4	27.65	56.54	86.57	113.6	144.77
5	22.39	55.40	83.15	113.32	142.92
6	22.39	55.40	83.29	114.74	142.06

ตารางที่ 5.3 (ต่อ) การทดสอบหาตำแหน่งของท่อโลหะยาว 2 เมตร

ครั้งที่	ระยะ 23.50 ซม.	ระยะ 54.50 ซม.	ระยะ 85.50 ซม.	ระยะ 116.50 ซม.	ระยะ 147.50 ซม.
7	25.95	57.54	86.28	114.17	148.04
8	25.38	55.40	83.15	114.17	142.63
9	25.80	55.26	86.00	113.03	144.62
10	22.53	50.56	86.14	113.60	142.92
11	25.80	55.26	86.14	113.60	142.06
12	23.25	55.40	83.15	114.60	142.63
13	22.67	55.83	85.57	112.89	141.07
14	24.67	55.40	86.14	114.46	147.75
15	24.67	55.69	83.15	113.60	143.06
16	24.95	55.83	86.14	114.03	143.06
17	24.67	56.26	86.14	112.75	148.32
18	27.51	55.40	86.28	113.18	142.63
19	22.25	55.83	85.14	113.6	142.20
20	24.52	55.83	85.85	113.46	144.62
21	28.51	57.11	85.71	112.89	142.63
22	24.67	56.540	83.72	112.18	141.35
23	23.95	55.26	86.28	113.60	143.20
24	23.10	55.40	83.15	112.18	147.75
25	22.25	55.40	83.15	113.46	142.49
26	22.39	55.26	83.15	114.17	148.04
27	22.10	56.54	83.15	114.17	142.63
28	25.95	57.11	83.72	113.03	144.62
29	25.80	58.25	83.29	113.60	142.92
30	26.80	57.39	86.14	113.60	142.06

ตารางที่ 5.4 การหาความเร็วเสียงของท่อโลหะ ยาว 4 เมตร

ครั้งที่	ค่าจากการทดลอง (เมตร/วินาที)	ครั้งที่	ค่าจากการทดลอง (เมตร/วินาที)
1	2896.22	16	2912.62
2	2682.56	17	2819.11
3	2682.56	18	2684.56
4	2620.09	19	2912.62
5	2582.50	20	2903.23
6	2782.07	21	2769.23
7	2582.50	22	2903.23
8	2584.35	23	2903.23
9	2562.28	24	2799.38
10	2529.87	25	2903.23
11	2588.07	26	2903.23
12	2599.28	27	2662.72
13	2595.53	28	2808.11
14	2808.11	29	2597.40
15	2782.07	30	2606.81
ค่าเฉลี่ย (เมตร/วินาที)		2732.23	
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร/วินาที)		133.95	

ตารางที่ 5.5 การทดสอบหาตำแหน่งของท่อโลหะยาว 4 เมตร

ครั้งที่	ระยะ 120.00 ซม.	ระยะ 150.00 ซม.	ระยะ 180.00 ซม.	ระยะ 210.00 ซม.	ระยะ 240.00 ซม.
1	119.07	147.08	194.48	218.11	231.64
2	118.80	150.22	175.49	221.26	231.23
3	117.43	150.22	191.07	221.12	235.19
4	111.83	152.81	179.59	220.16	233.96
5	125.49	152.68	175.36	213.06	246.39
6	118.80	152.81	174.95	205.96	231.37

ตารางที่ 5.5 (ต่อ) การทดสอบหาตำแหน่งของท่อโลหะยาว 4 เมตร

ครั้งที่	ระยะ 120 ซม.	ระยะ 150 ซม.	ระยะ 180 ซม.	ระยะ 210 ซม.	ระยะ 240 ซม.
7	119.62	145.03	185.46	206.23	233.82
8	126.86	148.17	193.52	202.40	235.19
9	119.62	150.22	194.21	204.59	233.28
10	119.62	146.53	189.84	207.05	233.69
11	118.66	152.27	174.67	210.46	233.96
12	119.75	152.54	193.66	207.46	234.51
13	115.38	152.95	192.16	208.01	234.51
14	119.75	152.68	184.51	216.89	234.37
15	119.75	152.68	194.21	215.66	234.23
16	118.93	152.68	193.66	216.75	234.37
17	117.16	152.68	193.80	219.21	233.28
18	112.24	146.94	175.49	219.48	233.55
19	118.93	148.99	193.93	216.48	233.41
20	117.57	152.54	186.15	218.80	233.96
21	119.07	152.81	194.62	213.06	233.01
22	118.93	152.13	195.03	217.02	243.66
23	118.93	150.77	179.73	216.89	235.19
24	118.80	152.68	194.75	219.21	234.23
25	117.16	152.27	175.49	222.21	234.10
26	112.24	149.95	192.02	221.94	233.69
27	119.62	145.03	185.46	206.23	233.82
28	126.86	148.17	193.52	202.40	235.19
29	119.62	150.22	194.21	204.59	233.28
30	119.62	146.53	189.84	207.05	233.69

การวิเคราะห์ความแม่นยำของการหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติกจากการหักได้ดินสอเทียบกับระยะที่วัดได้จริง

เพื่อเป็นการหาประสิทธิภาพของวิธีการนี้ จากการทดลองทั้งสองครั้งจะนำค่าเฉลี่ยของทุกๆแต่ละระยะมาเปรียบเทียบกับค่าจริงที่วัดได้ เพื่อหาความแม่นยำของการทดสอบ และหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนตามความสัมพันธ์

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \left| \frac{\text{ระยะที่วัดได้จริง} - \text{ระยะจากการคำนวณของโปรแกรม}}{\text{ระยะที่วัดได้จริง}} \right| \times 100$$

โดยความคลาดเคลื่อนนี้อาจจะมีผลมาจากหลายปัจจัย นอกเหนือจากความสามารถของวิธีการทดสอบก็ได้ เช่น การติดตั้งหัวทดสอบที่ไม่สมบูรณ์ ค่าความเร็วของเสียงที่ใช้ในการทดลอง ความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ รูปร่างของวัสดุที่อาจต่างกันบ้าง ความแข็งของได้ดินสอแต่ละแท่งแรงที่ใช้ในการหักได้ดินสอแต่ละครั้ง ซึ่งผลที่ได้มีดังนี้

ตารางที่ 5.6 ตารางแสดงค่าจากการวัดและการทดลองของท่อยาว 2 เมตร

ระยะ (ซม.)	ค่าเฉลี่ยของระยะที่คำนวณได้ (ซม.)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
23.50	24.34	1.88	3.58
54.50	55.83	1.27	2.45
85.50	84.91	1.40	0.69
116.50	113.48	0.61	2.59
147.50	143.51	1.98	2.70

ตารางที่ 5.7 ตารางแสดงค่าจากการวัดและการทดลองของท่อยาว 4 เมตร

ระยะ (ซม.)	ค่าเฉลี่ยของระยะที่คำนวณได้ (ซม.)	ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน
120	118.30	3.71	1.42
150	150.91	2.24	0.61
180	187.73	7.73	4.29
210	215.32	6.03	2.53
240	234.52	3.04	2.28

จากการทดลองกับทั้งสองท่อ พบว่าค่าที่คำนวณได้จากวิธีการนี้ มีความแม่นยำสูง โดยท่อสั้นจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.69 % ถึง 3.58 % และท่อยาวจะมีค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนอยู่ระหว่าง 0.61 % ถึง 4.30 % โดยค่าความแม่นยำนี้ จะขึ้นอยู่กับค่าความเร็วเสียงในวัสดุที่ใช้ในการคำนวณ เพราะระยะที่ทดลองคือ 1.7 และ 3.6 เมตร เมื่อเทียบกับความเร็วเสียงที่มีค่า 2846.01 และ 2732.23 เมตรต่อวินาที ตามลำดับ จะเห็นว่าการทดสอบต้องสามารถจับเวลาได้อย่างละเอียด และถ้าความเร็วเสียงผิดพลาด ก็จะส่งผลต่อค่าที่คำนวณได้เป็นอย่างมาก ดังนั้นในการทดลองนี้ จึงทำการทดลองถึง 30 ครั้ง เพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากที่สุด

เมื่อพิจารณาค่าแอมพลิจูดที่วัดได้จากการทดลองในระยะต่างๆ พบว่าค่าแอมพลิจูดจากการทดลองด้วยท่อสั้น ที่ตำแหน่งต่างๆ ส่วนใหญ่มีค่าสูงเกินกว่าที่การ์ดเก็บสัญญาณจะสามารถรับได้ เนื่องจากระยะที่ทดสอบอยู่ใกล้ตัวรับสัญญาณมากเกินไป ดังนั้นจะพิจารณาเฉพาะผลจากการทดลองกับท่อยาว โดยตำแหน่งที่ทดสอบจะอยู่บริเวณตรงกลางของท่อและอยู่ห่างจากตัวรับสัญญาณทั้งสองพอสมควร พบว่าได้ผลดังตารางที่ 5.8 , 5.9 และ 5.10 และรูปที่ 5.12

ตารางที่ 5.8 แสดงค่าความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับระยะทางของตัวรับสัญญาณตัวที่ 1

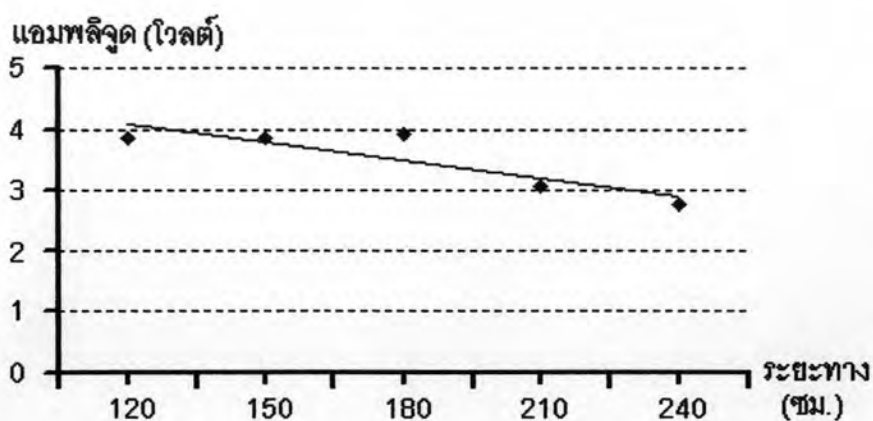
ครั้งที่	ระยะ 120.00 ซม.	ระยะ 150.00 ซม.	ระยะ 180.00 ซม.	ระยะ 210.00 ซม.	ระยะ 240.00 ซม.
1	3.43	4.10	3.56	2.25	2.04
2	3.70	3.94	3.38	2.90	3.22
3	3.69	4.16	2.89	2.38	2.42
4	3.15	2.77	3.62	2.51	2.6
5	3.50	3.09	4.11	2.60	2.79
6	3.68	3.22	3.97	2.41	2.00
7	4.51	3.26	3.57	2.46	2.21
8	3.63	4.07	3.41	2.90	2.40
9	3.20	4.68	4.28	4.39	3.17
10	4.34	4.56	4.92	4.54	3.28
11	4.52	4.65	4.76	2.76	3.13
12	4.94	4.55	4.57	3.82	3.91
13	4.88	4.35	4.34	3.51	2.88
14	3.67	4.00	3.71	3.90	3.12
15	3.16	2.50	3.85	2.88	2.69

ตารางที่ 5.9 แสดงค่าความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดกับระยะทางของตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2

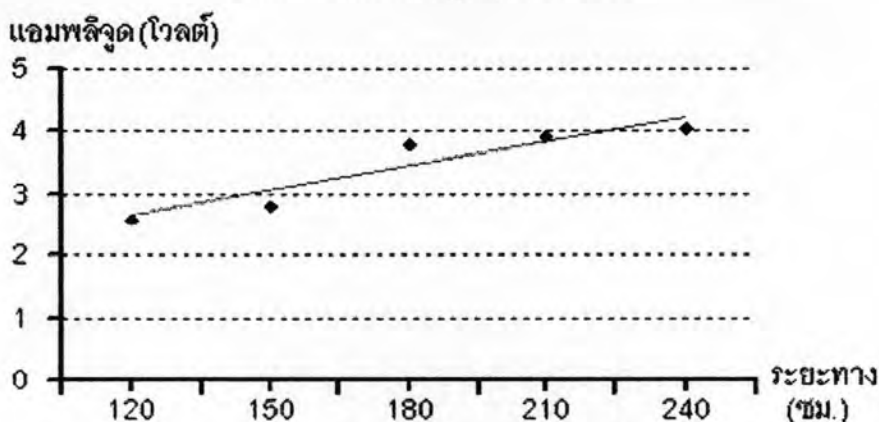
ครั้งที่	ระยะ 120.00 ซม.	ระยะ 150.00 ซม.	ระยะ 180.00 ซม.	ระยะ 210.00 ซม.	ระยะ 240.00 ซม.
1	2.44	3.26	3.53	2.89	3.43
2	2.38	2.40	3.02	3.17	4.45
3	2.60	2.12	2.85	3.44	4.05
4	2.10	2.30	3.06	3.81	4.17
5	2.51	2.29	3.38	3.50	4.31
6	2.39	2.65	3.90	3.84	3.23
7	3.20	2.03	4.11	4.11	3.65
8	2.84	3.34	3.94	4.05	3.26
9	2.52	2.53	4.86	4.79	4.65
10	1.97	3.60	3.73	4.92	4.45
11	2.29	3.21	4.83	3.05	4.39
12	3.47	4.06	3.46	4.61	4.76
13	2.85	4.00	4.31	4.22	3.87
14	2.79	2.01	4.51	4.28	4.43
15	2.52	2.44	3.39	4.04	3.60

ตารางที่ 5.10 แสดงค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดที่ตำแหน่งต่างๆของตัวรับรู้สัญญาณทั้งสองตัว

ระยะ (ซม.)	ค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูด (โวลต์)	
	ตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1	ตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2
120.00	3.87	2.59
150.00	3.86	2.82
180.00	3.93	3.79
210.00	3.08	3.92
240.00	2.79	4.05



(ก) กราฟจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1



(ข) กราฟจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2

รูปที่ 5.12 กราฟความสัมพันธ์ของแอมพลิจูดเทียบกับระยะทาง

จากกราฟทั้งสอง พบว่าแอมพลิจูดที่วัดได้จากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 มีค่าลดลง ในขณะที่แอมพลิจูดที่วัดได้จากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 มีค่าเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องระยะทางนี้เป็นระยะที่วัดจากตำแหน่งที่ทดสอบถึงตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 ดังนั้น เมื่อเพิ่มระยะทาง ทำให้ระยะห่างจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แอมพลิจูดที่วัดได้ลดลง ในทางกลับกัน ระยะที่เพิ่มขึ้น จะเข้าใกล้ตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 เพิ่มมากขึ้น ทำให้แอมพลิจูดที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง การลดลงและเพิ่มขึ้นของกราฟทั้งสองมีลักษณะเป็นความสัมพันธ์แบบเชิงเส้น โดยมีลักษณะดังนี้

$$\text{ค่าความต่างศักย์} = \text{ความชัน} \times \text{ระยะทาง} - \text{ค่าจุดตัดแกน y}$$

โดย สมการที่ได้ของกราฟรูปที่ 1 และ 2 คือ

$$Y = -0.293X - 4.3846 \quad (5.1)$$

$$Y = 0.4009X + 2.2292 \quad (5.2)$$

จากความสัมพันธ์ที่ (5.1) จะเห็นว่าความต่างศักย์จะลดลงเรื่อยๆ เมื่อระยะทางมากขึ้น หมายความว่า การทดสอบด้วยวิธีการนี้จะถูกจำกัดระยะทางไว้ที่ค่าหนึ่ง เช่นในการทดลองนี้ กำหนดค่าขีดเริ่มเปลี่ยนไว้ที่ 1 โวลต์ เมื่อแทนค่าในความสัมพันธ์ที่ (5.1) จะได้ว่า

$$1 = -0.293X - 4.3846$$

$$X = 11.55$$

แสดงว่า ถ้าแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติคอยู่ห่างจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 มากกว่า 11.55 เมตร ตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 จะไม่สามารถตรวจจับสัญญาณนั้นได้ เพราะสัญญาณเมื่อเดินทางมาถึงตัวรับรู้สัญญาณจะมีค่าแอมพลิจูดต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ เมื่อพิจารณาที่ตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 ที่ทำการเรียงข้อมูลใหม่ โดยคิดจากระยะห่างที่วัดเทียบกับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 แทนค่าเดิมที่เป็นระยะห่างที่วัดเทียบกับตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 นั่นคือ ระยะ 120 ซม. ในการทดลอง จะเป็นระยะ 240 ซม. ห่างจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 2 เมื่อทำครบทุกค่าและหาความสัมพันธ์ พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นสมการเส้นตรงที่มีความชันเป็นค่าบวก ตามความสัมพันธ์

$$Y = -0.4009x + 4.6348 \quad (5.3)$$

เมื่อแทนค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่ใช้ในการทดลอง คือ 1 โวลต์ ลงไป จะได้ระยะทางเท่ากับ 9.12 เมตร ดังนั้นในการทดลอง ไม่ควรให้ระยะห่างระหว่างตัวรับรู้สัญญาณมากกว่า 9.12 เมตร ในกรณีที่ต้องการทดสอบกับระบบที่ยาวมากกว่านี้ จำเป็นต้องติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณเพิ่มอีกอย่างน้อยหนึ่งตัว โดยให้ตัวรับรู้สัญญาณทุกตัวอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน เพื่อให้ครอบคลุมระยะทางมากขึ้น และเลือกใช้ผลต่างของเวลาจากตัวรับรู้สัญญาณ 2 ตัวแรกที่ตรวจจับสัญญาณได้ก่อนตัวอื่น โดยใช้วิธีการคำนวณเช่นเดิม

เมื่อพิจารณาค่าแอมพลิจูดของแต่ละตำแหน่ง ที่ระยะ 180 ซม. ซึ่งเป็นจุดกึ่งกลางระหว่างตัวรับรู้สัญญาณทั้งสอง พบว่าค่าเฉลี่ยที่ได้ต่างกัน ทั้งที่ควรจะเท่ากัน ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากหลายสาเหตุ เช่น ประสิทธิภาพของเครื่องมือ หรือ ความสมบูรณ์ของการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณและชนิดของสารช่วยสัมผัส หรือ รูปร่างและโครงสร้างภายในของวัสดุที่ทดสอบ ความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุ รวมถึงการหักได้ดินสอดแต่ละครั้งก็จะให้ผลที่ต่างกันไป ทั้งจากแรงที่กดและความแข็งของไส้ดินสอด ซึ่งปัจจัยเหล่านี้ก็ส่งผลต่อระยะทางมากที่สุดของการทดสอบที่คำนวณได้ด้วย ดังนั้นในการทดสอบแต่ละครั้งไม่จำเป็นที่จะได้เท่ากัน ควรมีการหาใหม่ทุกครั้ง

5.2.2 วิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว

การหาตำแหน่งจากการหักไล่ดินสอ

เพื่อเป็นการทดสอบประสิทธิภาพและข้อจำกัดของวิธีการนี้ จึงเริ่มทดสอบด้วยการหาตำแหน่งจากการหักไล่ดินสอ ซึ่งเป็นการสร้างสัญญาณอะคูสติกที่มีประสิทธิภาพ คือมีแอมพลิจูดสูง และเกิดแบบจับพลาซ่า ไม่เกิดสัญญาณแบบต่อเนื่อง ซึ่งเหมาะสมในการใช้ทดสอบประสิทธิภาพของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมา โดยเริ่มจากหักไล่ดินสอตรงตำแหน่งที่อยู่ด้านนอกของตัวรับรู้สัญญาณ 1 และ 2 เพื่อหาความเร็วเสียงก่อน แล้วจึงหักไล่ดินสอในตำแหน่งต่างๆ ตามที่กำหนดไว้เพื่อทดสอบการหาตำแหน่ง ตามรูปที่ 4.7 หน้า 65 โดยใช้ความเร็วเสียงของวัสดุจะได้อ้างอิงตารางที่ 5.11 และผลการทดสอบหาตำแหน่งต่างๆ จะได้อ้างอิงตารางที่ ตารางที่ 5.12 และ 5.13

ตารางที่ 5.11 การหาความเร็วเสียงของแผ่นเหล็กกล้าไม่เป็นสนิม เบอร์ 304

ครั้งที่	ค่าจากการทดลอง (เมตร/วินาที)	ครั้งที่	ค่าจากการทดลอง (เมตร/วินาที)
1	1123.79	11	1394.80
2	1348.34	12	1344.81
3	1363.88	13	1321.70
4	1374.85	14	1343.63
5	1249.77	15	1345.99
6	1398.6.0	16	1249.77
7	1398.6.0	17	1234.72
8	1369.96	18	1254.86
9	1348.34	19	1368.74
10	1326.26	20	1322.84
ค่าเฉลี่ย (เมตร/วินาที)		1324.21	
ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (เมตร/วินาที)		69.12	

ตารางที่ 5.12 ผลการหาดำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว ที่ตำแหน่งที่ 1 ถึง 5

ครั้งที่	ตำแหน่งที่ 1		ตำแหน่งที่ 2		ตำแหน่งที่ 3		ตำแหน่งที่ 4		ตำแหน่งที่ 5	
	50.50 ซม.	30.0 องศา	43.70 ซม.	0.0 องศา	75.60 ซม.	30.0 องศา	43.70 ซม.	60.0 องศา	60.00 ซม.	45.0 องศา
1	51.05	30.3	43.43	-2.5	78.60	29.9	46.75	48.5	57.43	43.0
2	53.16	30.4	43.27	-2.6	77.35	30.5	44.40	50.2	56.88	44.5
3	51.58	30.2	43.17	-2.6	79.46	29.0	44.07	66.9	56.39	45.0
4	51.58	30.3	43.27	-2.6	78.39	29.8	44.51	50.5	57.40	42.5
5	51.45	30.3	43.19	-3.1	79.10	30.0	44.27	68.8	57.51	43.0
6	50.87	30.3	43.33	-2.6	77.90	30.3	42.96	47.9	57.28	43.0
7	50.87	30.3	43.29	-3.1	78.18	29.7	44.29	69.0	57.26	43.0
8	50.92	30.1	43.88	-9.2	78.25	30.0	46.57	49.5	56.74	44.0
9	50.88	30.5	42.94	-2.6	76.67	30.5	46.24	52.5	56.49	44.0
10	50.92	30.4	43.07	-2.6	78.04	30.4	42.51	72.3	56.37	46.0
ค่าเฉลี่ย	51.33	30.3	43.28	-3.3	78.20	30.0	44.66	57.6	56.97	43.8
ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)	0.71	0.1	0.25	2.1	0.80	0.5	1.44	10.2	0.46	1.1
เปอร์เซ็นต์ ความคลาดเคลื่อน	1.64	1.1	0.95	2.5	3.43	0.0	2.19	4.0	5.05	2.7

ตารางที่ 5.13 ผลการหาดำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว ที่ตำแหน่งที่ 6 ถึง 11

ครั้งที่	ตำแหน่งที่ 6		ตำแหน่งที่ 7		ตำแหน่งที่ 8		ตำแหน่งที่ 9		ตำแหน่งที่ 10		ตำแหน่งที่ 11	
	50.50 ซม.	-30.0 องศา	101.00 ซม.	30.0 องศา	51.00 ซม.	90.0 องศา	59.50 ซม.	-112.0 องศา	70.00 ซม.	76.0 องศา	135.00 ซม.	40.0 องศา
1	49.29	-31.4	92.30	29.0	44.29	78.0	36.30	-66.8	69.50	66.0	87.69	34.5
2	47.57	-26.5	80.49	29.3	44.02	77.9	35.65	-69.4	69.50	66.0	105.06	36.5
3	47.38	-25.6	81.28	29.3	43.41	80.0	35.59	-65.8	76.32	67.0	82.84	37.5
4	47.78	-26.6	82.49	29.2	45.90	94.1	43.81	-100.9	69.76	65.5	83.32	37.5
5	48.06	-27.1	80.50	29.2	44.17	80.0	36.68	-100.0	69.61	67.0	101.87	37.0
6	47.98	-26.7	88.75	28.1	52.39	96.9	24.35	-66.1	69.53	66.5	89.52	34.5
7	47.97	-27.3	80.90	29.2	52.56	98.0	86.93	-97.7	69.64	67.0	81.90	37.0
8	49.01	-30.1	88.09	27.7	44.02	77.9	33.49	-67.9	69.07	65.0	87.52	35.0
9	46.33	-26.7	88.84	28.0	43.93	78.0	22.22	-49.4	69.79	64.5	87.22	34.5
10	46.58	-27.9	81.07	28.3	44.16	78.0	39.05	-49.2	69.26	65.5	87.22	34.5
ค่าเฉลี่ย	47.8	-27.6	84.47	28.7	45.89	83.9	39.41	-73.3	70.20	66.0	89.42	35.9
ค่าส่วนเบี่ยงเบน มาตรฐาน (SD)	0.92	1.8	4.50	0.6	3.53	8.7	17.89	19.5	2.16	0.9	7.84	1.4
%ความคลาดเคลื่อน	5.36	8.0	16.37	4.2	10.03	6.8	33.77	34.6	0.28	13.2	33.77	10.4

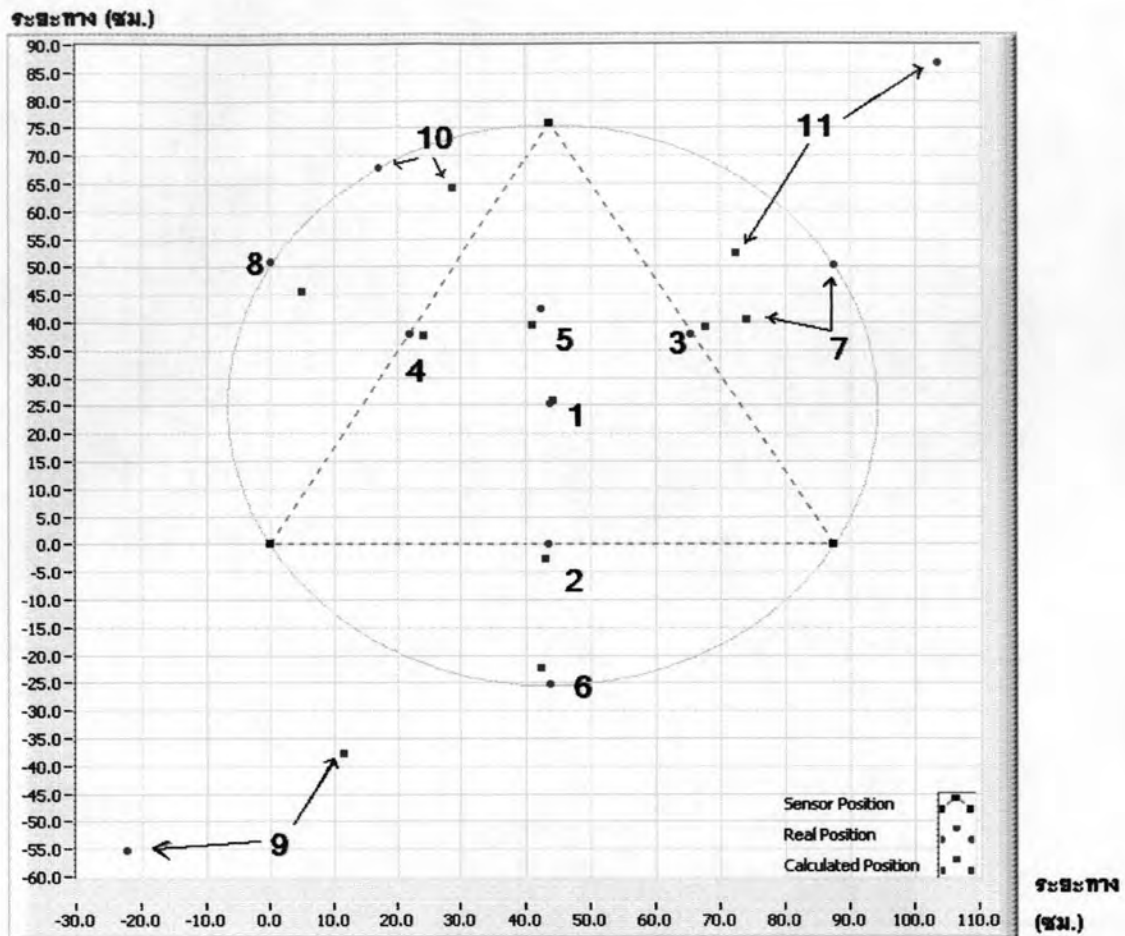
จากการทดลองต่างๆ ในงานวิจัยส่วนใหญ่ จะทำการทดลองเพียงตำแหน่งที่อยู่ภายในพื้นที่ที่ติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณ ทั้งกรณี 3 ตัวและ 4 ตัว โดยไม่ได้กล่าวถึงตำแหน่งอื่นๆ ดังนั้นการทดลองนี้จึงสนใจที่จะทดสอบตำแหน่งที่ไม่ได้อยู่ในพื้นที่ที่ติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณด้วย โดยกำหนดตำแหน่งสำหรับทดสอบ 11 ตำแหน่ง โดยแบ่งออกเป็นสามกลุ่ม คือ

กลุ่มที่ 1 เป็นตำแหน่งที่อยู่ภายในสามเหลี่ยมจากการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณ ได้แก่ ตำแหน่งที่ 1, 2, 3, 4, และ 5 พบว่ามีค่าที่ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะทางอยู่ระหว่าง 0.595 % ถึง 5.05 % และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของมุมอยู่ระหว่าง 0% ถึง 4.0%

กลุ่มที่ 2 เป็นตำแหน่งที่อยู่นอกสามเหลี่ยม แต่อยู่ในวงกลมรอบสามเหลี่ยมที่เกิดจากการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณ (ดูรูปที่ 5.13) ได้แก่ ตำแหน่งที่ 6, 7 และ 8 พบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาดมากขึ้น โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะทางอยู่ระหว่าง 5.36% ถึง 16.37 % และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของมุมอยู่ระหว่าง 4.2% ถึง 8.0 %

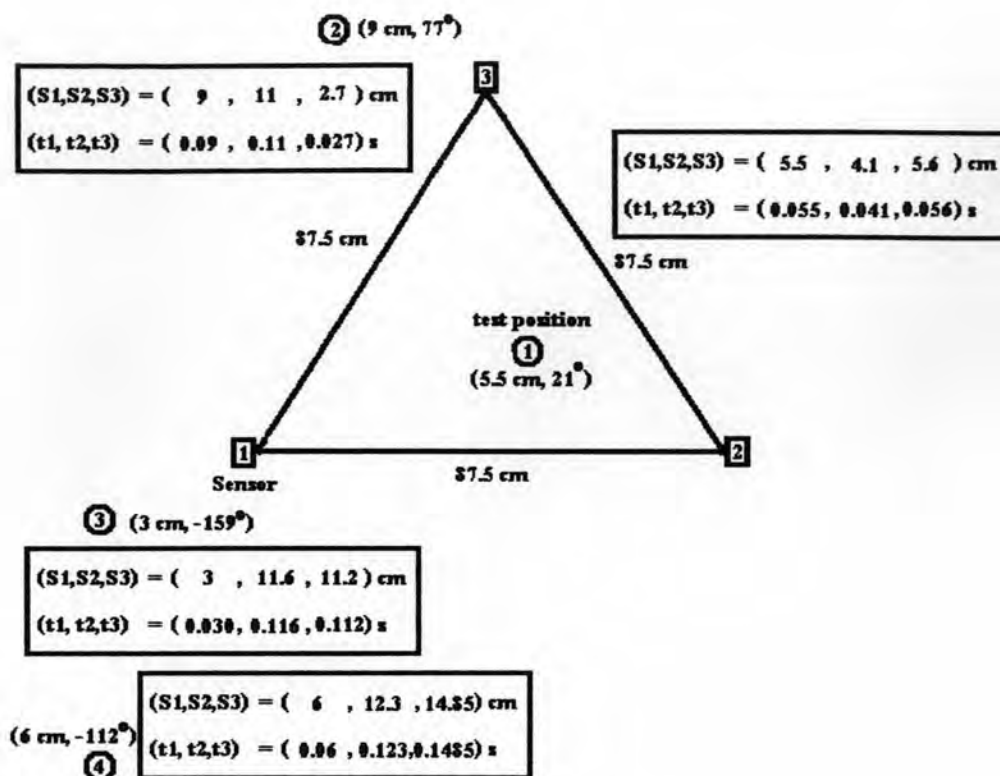
กลุ่มที่ 3 เป็นตำแหน่งที่อยู่นอกวงกลม ได้แก่ ตำแหน่งที่ 9, 10 และ 11 พบว่าค่าที่คำนวณได้มีค่าผิดพลาดมากที่สุด โดยมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะทางอยู่ระหว่าง 0.28% ถึง 33.77 % และมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของมุมอยู่ระหว่าง 10.4% ถึง 34.6 %

เมื่อนำผลที่ได้มาเขียนกราฟแสดงตำแหน่งที่ได้จากการทดลองเทียบกับตำแหน่งจริงจะได้ดังรูปที่ 5.13 โดยในรูปจะกำหนดให้เส้นประแทนระยะระหว่างตัวรับรู้สัญญาณ ที่จุดยอดทั้งสามจะเป็นตำแหน่งของตัวรับรู้สัญญาณซึ่งแทนด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีดำ ส่วนสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมสีน้ำเงิน แทนตำแหน่งที่หาได้จากการทดลอง และ สัญลักษณ์วงกลมสีแดงแทนตำแหน่งจริงที่ได้จากการวัด



รูปที่ 5.13 ผลการหาตำแหน่งด้วยวิธีการหาตำแหน่งจากตัวรับรู้สัญญาณ 3 ตัว

จากผลการทดลองพบว่า การทดสอบวิธีนี้เหมาะสมที่จะใช้หาตำแหน่งที่อยู่ภายในพื้นที่สามเหลี่ยมจากการติดตั้งตัวรับรู้สัญญาณ ซึ่งจะมีเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนค่อนข้างต่ำ แต่ในตำแหน่งอื่นจะยังไม่สามารถหาได้ถูกต้องมากนัก และเพื่อเป็นการตรวจสอบว่า ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นมาจากสาเหตุใด ระหว่างข้อจำกัดของวิธีการที่ใช้ หรือมาจากความผิดพลาดของโปรแกรม จึงทำการจำลองตำแหน่งเพื่อทดสอบ 4 ตำแหน่ง โดยกำหนดความเร็วเสียงที่ 1 ซม.ต่อวินาที และระยะห่างระหว่างตัวรับรู้สัญญาณเป็น 1 ใน 10 ของระยะจริง คือเท่ากับ 8.75 ซม. ระยะของแต่ละตำแหน่งหาจากการวัดระยะจริง โดยสามารถหาค่าต่างๆ ตามรูปที่ 5.14 โดย S1, S2 และ S3 คือระยะจากจุดที่ทดลองถึงตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ ส่วนค่า t1, t2 และ t3 คือเวลาที่สัญญาณใช้เดินทางจากแหล่งกำเนิดสัญญาณไปยังตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1, 2, และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 5.14 รูปแสดงตำแหน่งที่กำหนดสำหรับแบบจำลอง

โดยกำหนดตำแหน่งที่ 1 เป็นตัวแทนของข้อมูลที่อยู่ภายในสามเหลี่ยม ตำแหน่งที่ 2, 3 และ 4 เป็นตัวแทนของข้อมูลที่อยู่ภายนอกวงกลม โดยตำแหน่งที่ 4 จะเป็นตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่ 9 ในการทดลองจริง เมื่อหาค่าระยะ R จากมุมต่างๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 360 องศา ตามความสัมพันธ์ที่ (2.10) และ (2.11) แล้ว พบว่าความสัมพันธ์มีลักษณะดังกราฟในรูปที่ 5.15 – 5.18 โดยกราฟทั้งสองเส้นจะแทนด้วยสัญลักษณ์สี่เหลี่ยมและสามเหลี่ยม และได้ผลดังนี้

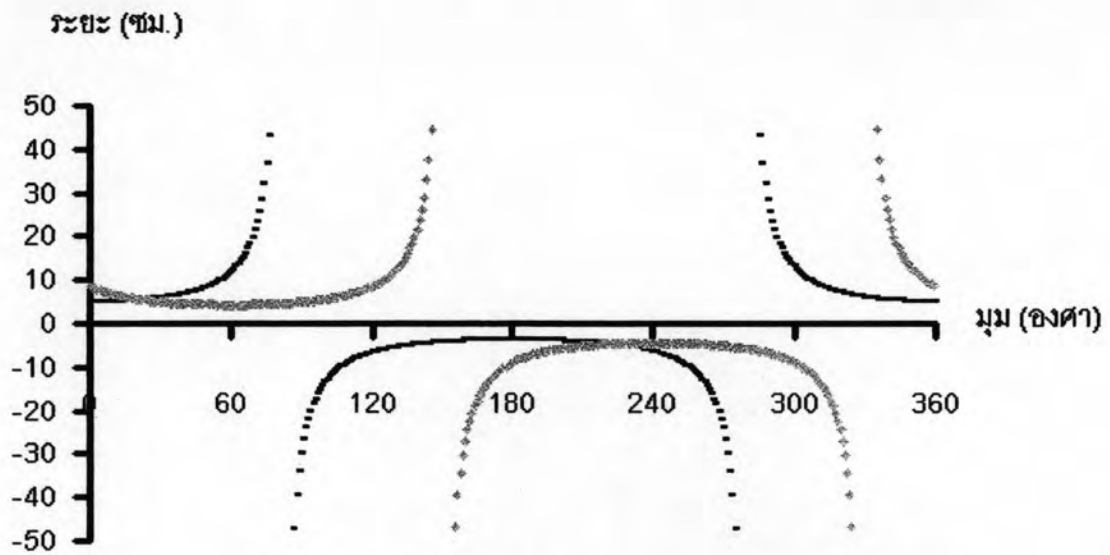
ตำแหน่งที่ 1 (5.50 ซม. ทำมุม 21 องศา) มีจุดตัดเกิดขึ้น 2 ตำแหน่งคือที่ 5.50 ซม. มุม 21 องศา และตำแหน่ง -4.63 ซม. มุม 223 องศา แต่ในความเป็นจริง ระยะทางไม่สามารถเป็นลบได้ คำตอบที่ได้จึงมีค่าเดียว และค่าที่ได้ตรงตามที่วัดได้จริง

ตำแหน่งที่ 2 (9.00 ซม. ทำมุม 77 องศา) มีจุดตัดเกิดขึ้นเพียงจุดเดียวคือที่ตำแหน่ง 8.70 ซม. มุม 76 องศา คำตอบที่ได้คลาดเคลื่อนไปเล็กน้อยจากค่าที่วัดได้จริง

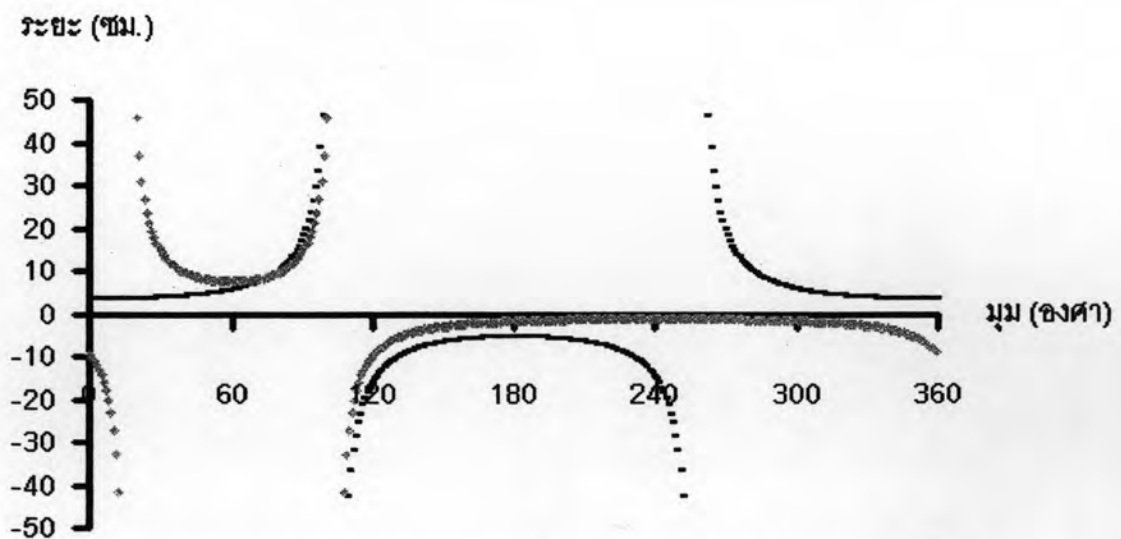
ตำแหน่งที่ 3 (3.00 ซม. ทำมุม -159 องศา หรือ 201 องศา) พบว่ามีจุดตัดเกิดขึ้น สองจุดคือที่ตำแหน่ง 0.40 ซม. มุม 128 องศา และที่ตำแหน่ง 3.22 มุม 201 องศา ซึ่งทั้งคู่เป็นค่าบวก แสดงว่าคำตอบของวิธีการนี้อาจมีมากกว่าหนึ่งตำแหน่ง

ตำแหน่งที่ 4 (6.00 ซม. ทำมุม -112 องศา หรือ 248 องศา) พบว่ากราฟไม่ตัดกันเลย เนื่องจากความสัมพันธ์ที่ใช้อยู่นี้ กำหนดให้ตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 เป็นตัวอ้างอิง โดยใช้ผลต่าง

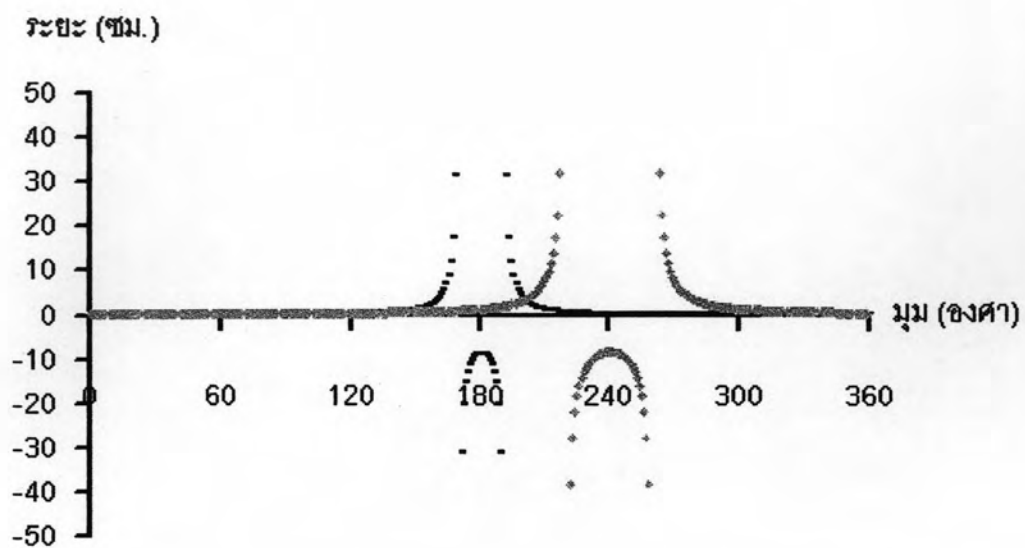
ของเวลาที่สัญญาณเดินทางมาถึงตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 กับ 2 และของตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 กับ 3 ในการคำนวณ เมื่อลองเปลี่ยนตัวรับสัญญาณอ้างอิงเป็นตัวรับสัญญาณตัวที่ 2 และใช้ผลต่างของเวลาระหว่างตัวรับสัญญาณตัวที่ 1 และ 2 และของตัวรับสัญญาณตัวที่ 2 กับ 3 พบว่ากราฟที่ได้ไม่ตัดกัน และเมื่อเลือกตัวรับสัญญาณตัวที่ 3 เป็นตัวรับสัญญาณอ้างอิงบ้าง พบว่ากราฟไม่ตัดกันเช่นเดิม แสดงว่าวิธีการนี้จะมีระยะทางที่เป็นข้อจำกัดอยู่ โดยการแก้ไขจะต้องติดตั้งตัวรับสัญญาณเพิ่มขึ้น โดยติดตั้งให้ได้รูปสามเหลี่ยมด้านเท่ากับตัวรับสัญญาณที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะทำให้ครอบคลุมพื้นที่มากขึ้น



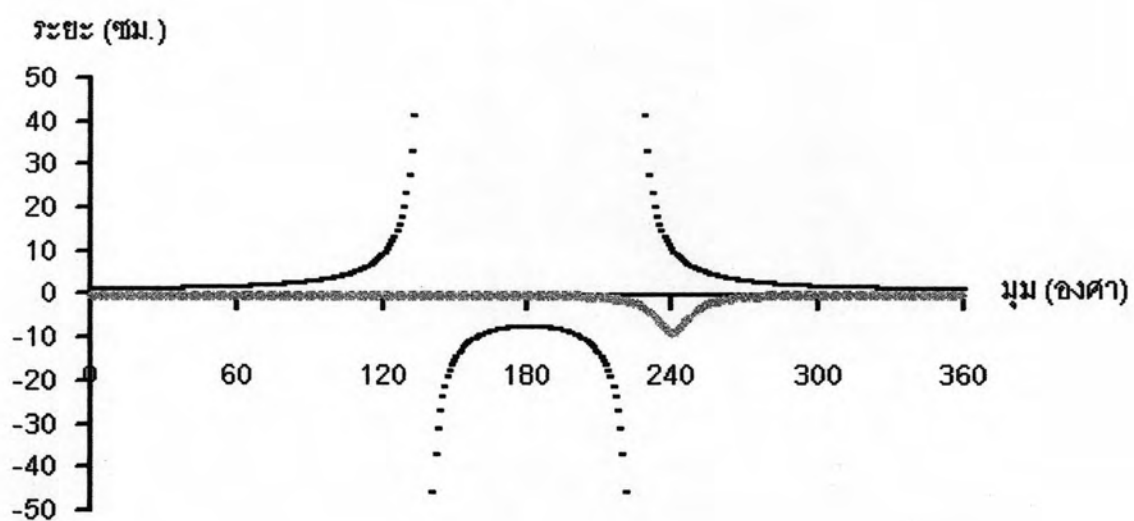
รูปที่ 5.15 รูปแสดงกราฟที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งทดสอบที่ 1



รูปที่ 5.16 รูปแสดงกราฟที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งทดสอบที่ 2



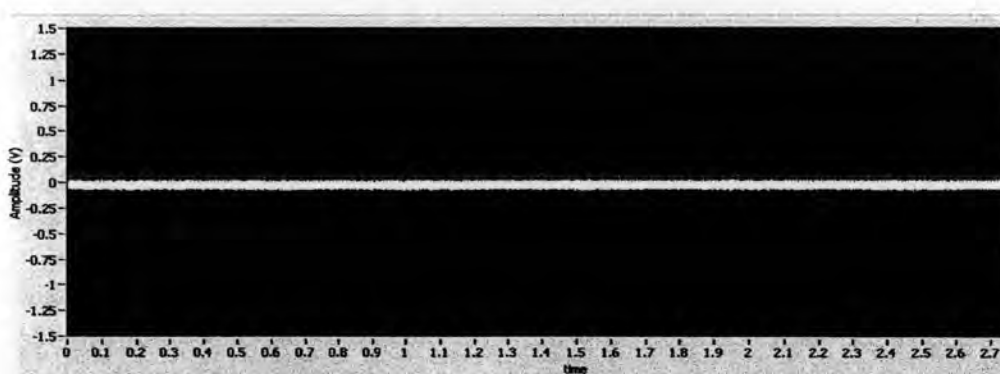
รูปที่ 5.17 รูปแสดงกราฟที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งทดสอบที่ 3



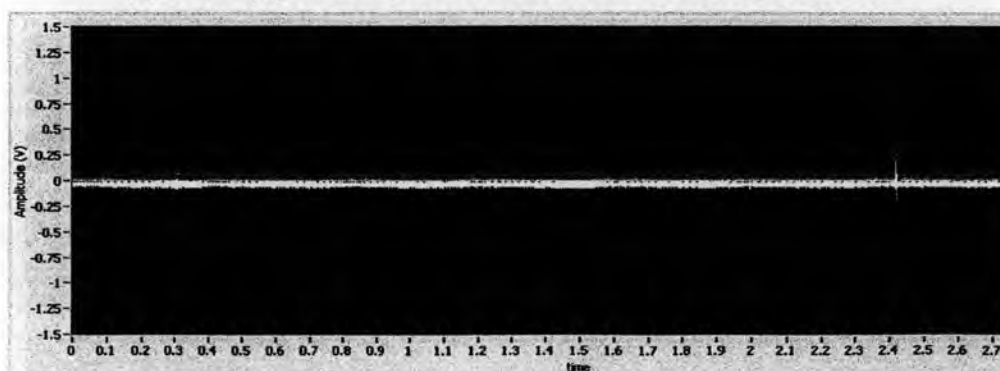
รูปที่ 5.18 รูปแสดงกราฟที่ได้จากการคำนวณตำแหน่งทดสอบที่ 4

การหาตำแหน่งด้วยการกักร้อน

เพื่อเป็นการทดสอบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาสามารถใช้หาตำแหน่งจากการกักร้อนได้จริง จึงทำการทดสอบกับการกักร้อนด้วย โดยเลือกใช้ตำแหน่งเดียวกับการทดลองที่ใช้การหักได้ดินสอเพื่อเปรียบเทียบผลจากทั้งสองวิธี เมื่อทำการทดลองจะพบว่าค่าสัญญาณอะคูสติคจากการกักร้อนที่เกิดขึ้นจะมีค่าแอมพลิจูดต่ำกว่าสัญญาณจากการหักได้ดินสอมาก ดังรูปที่ 5.19 (สัญญาณจากการหักได้ดินสอในการทดลองส่วนใหญ่จะสูงกว่า 5 โวลต์ ซึ่งเป็นค่าสูงสุดที่การ์ดสามารถรับได้) และเฉพาะตำแหน่งที่ 1 เท่านั้นที่สามารถหาตำแหน่งของแหล่งกำเนิดสัญญาณอะคูสติคได้ (ย้อนกลับไปดูรูปที่ 4.7 หน้า 65) โดยตำแหน่งอื่นตัวรับรู้สัญญาณจะไม่สามารถตรวจจับสัญญาณได้ครบทั้งสามตัว ทั้งนี้เนื่องจากค่าแอมพลิจูดจากการกักร้อนมีค่าต่ำมาก เมื่อระยะห่างมากขึ้น แอมพลิจูดก็จะลดลงมาก จนไม่สามารถตรวจจับได้ สำหรับตำแหน่งที่ 1 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่อยู่ห่างจากตัวรับรู้สัญญาณทั้งสามตัวเท่าๆกัน เป็นระยะ 50.50 ซม. ทำให้ตัวรับรู้สัญญาณทุกตัวสามารถตรวจจับสัญญาณได้ แต่ตำแหน่งที่ 2 ซึ่งอยู่ห่างจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 1 และ 2 อยู่ 43.70 ซม. จะอยู่ห่างจากตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 3 ถึง 75.60 ซม. ทำให้ตัวรับรู้สัญญาณตัวที่ 3 ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณเพื่อใช้หาตำแหน่งได้



(ก) ภาพสัญญาณที่ตรวจจับได้ก่อนทำการทดลองด้วยการหยดกรด



(ข) ภาพสัญญาณที่ตรวจจับได้ขณะทำการทดลองด้วยการหยดกรด

รูปที่ 5.19 แสดงสัญญาณในการทดลองด้วยการหยดกรด

ในการทดลองจะเริ่มต้นด้วยการทำลายพาสซีฟฟิล์มที่ปกป้องการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไม่เป็นสนิมออกก่อน และสร้างความเค้นตกค้างให้กับตำแหน่งที่จะทำการทดสอบ โดยการใช้กระดาษทรายขัดผิวเบาๆ เช็ดคราบไขมันและสิ่งสกปรกด้วยอะซิโตน แล้วหยดกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 12 โมล 1 หยด เป็นลักษณะวงกลมรัศมีประมาณ 0.80 ซม. แล้วทำการสังเกตผล พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 นาที จะเกิดฟองแก๊สเกาะที่ผิวหน้าจำนวน 15 – 20 ฟอง ดังรูปที่ 15.20 โดยช่วงนี้จะสามารถตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้ หลังจากนั้นเมื่อเวลาผ่านไปอีก 10 นาที พบว่าฟองแก๊สจะหมดไป และจะสังเกตเห็นหลุมเล็กๆปรากฏขึ้น เมื่อทำการเก็บสัญญาณต่อไปอีก 45 นาที พบว่ายังสามารถตรวจจับสัญญาณอะคูสติกได้อีกแต่ใช้เวลานานขึ้น โดยสัญญาณแต่ละครั้งนั้นจะมีค่าแอมพลิจูดสูงกว่าสัญญาณที่เกิดในช่วง 10 นาทีแรก โดยผลการทดลองได้ดังตารางที่ 5.14

ตารางที่ 5.14 แสดงผลการเก็บสัญญาณจากการกัดกร่อนที่ตำแหน่งที่ 1

ครั้งที่	ตำแหน่งจากการทดลอง		แอมพลิจูด (โวลต์)		
	ระยะ (ซม.) 50.50 ซม.	มุม (องศา) มุม 30.0 องศา	ตัวรับรู้ สัญญาณ 1	ตัวรับรู้ สัญญาณ 2	ตัวรับรู้ สัญญาณ 3
1	50.52	30.0	0.15	0.22	0.23
2	50.52	30.0	0.15	0.22	0.23
3	50.52	30.0	0.14	0.2	0.21
4	50.52	30.0	0.15	0.21	0.21
5	50.52	30.0	0.27	1.27	0.54
6	50.52	30.0	0.12	0.54	0.26
7	50.52	30.0	0.35	0.81	0.41
8	50.52	30.0	0.12	0.2	0.21
9	50.52	30.0	0.28	0.25	0.18
ค่าเฉลี่ย	50.52	30.0	0.19	0.44	0.28
% ความคลาดเคลื่อน	0	0	-	-	-

ตารางที่ 5.15 แสดงค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูด

ค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูด (โวลต์)	ตัวรับรู้สัญญาณ 1	ตัวรับรู้สัญญาณ 2	ตัวรับรู้สัญญาณ 3
ครั้งที่ 1-4	0.22	0.22	0.23
ครั้งที่ 5-9	0.32	0.22	0.23

จากผลการทดลองพบว่า ในช่วง 10 นาทีแรก มีสัญญาณอะคูสติคที่เกิดขึ้น 4 ครั้ง ซึ่งในช่วงนี้จะสังเกตเห็นฟองแก๊สเกาะที่ผิวหน้า ซึ่งค่าแอมพลิจูดจากตัวรับสัญญาณทั้งสามจะค่อนข้างต่ำ ในช่วง 45 นาทีหลังซึ่งไม่พบฟองแก๊สแต่จะพบมีหลุมเล็กๆ ปรากฏที่ผิวอย่างชัดเจน ในช่วงนี้ เกิดสัญญาณอะคูสติคขึ้น 5 ครั้ง โดยที่ค่าเฉลี่ยของแอมพลิจูดจากตัวรับสัญญาณแต่ละตัวจะสูงขึ้น ดังตารางที่ 5.15 แสดงว่าสัญญาณอะคูสติคในช่วงแรกเกิดจากการแตกของฟองแก๊ส และในช่วงหลังเกิดจากการกัดกร่อนภายในรู ซึ่งอาจเป็นการกัดกร่อนเชิงความเค้นหรือการกัดกร่อนแบบหลุมลึกก็ได้ ซึ่งการกัดกร่อนเชิงความเค้นนั้น สามารถเกิดจากการขยายตัวของรูที่ผิวซึ่งเกิดจากการกัดกร่อนแบบหลุมลึก หรือการเกิดรอยแตกภายในเนื้อสารก็ได้ ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าสัญญาณอะคูสติคที่เกิดจากการกัดกร่อนทั้งสองประเภทจะมีค่าใกล้เคียงกัน

เมื่อพิจารณาที่ผลการหาตำแหน่งพบว่าค่าที่ได้เป็นค่าเดียวกัน แสดงว่าน่าจะมาจากตำแหน่งเดียวกัน โดยจากการสังเกตจะพบว่า หลายครั้งที่ตรวจพบสัญญาณแต่สัญญาณนั้นมีค่าแอมพลิจูดต่ำกว่าค่าขีดเริ่มเปลี่ยนที่กำหนดไว้ ซึ่งพบมากในช่วง 10 นาทีแรก โดยคาดว่าน่าจะเกิดจากการแตกตัวของฟองแก๊ส แต่เพราะแอมพลิจูดต่ำเกินไป โปรแกรมจึงไม่นำมาคำนวณ ดังนั้นสัญญาณส่วนใหญ่จะมาจากเพียงตำแหน่งเดียวที่มีแอมพลิจูดสูงมากพอ โดยน่าจะมาจากรูที่ใหญ่ที่สุดจากซึ่งสามารถจะมองเห็นได้หลังการทดลอง และเกิดสนิมขึ้นในเวลา 2 วันหลังการทดลอง



(ก) ภาพขณะทำการทดลอง



(ข) เป็นภาพหลังจากการทดลองประมาณ 2 วัน

รูปที่ 5.20 แสดงการทดลองด้วยวิธีการหยดกรด