

บทที่ 4

ผลการทดลอง

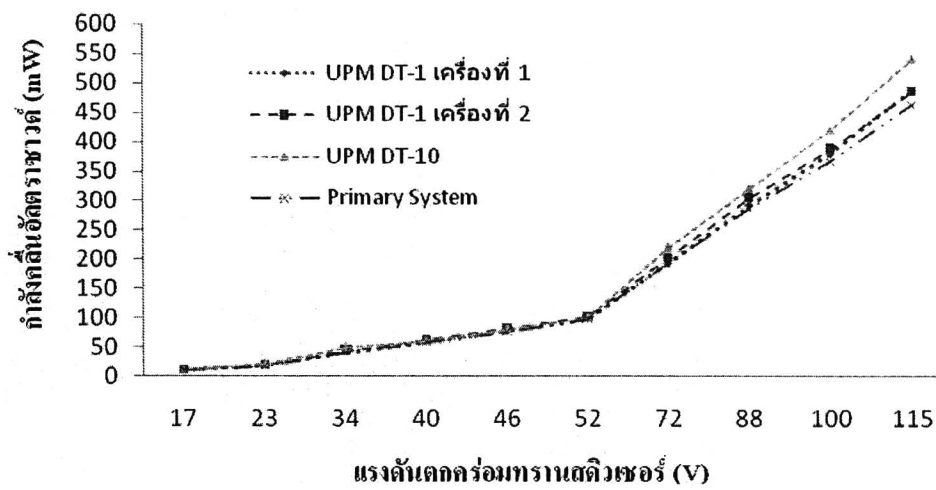
ผลการทดลองวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ได้จากการวัดหัวทรานสดิวเซอร์ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์, 5 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ระดับกำลัง (Ultrasound Power) ในช่วง 10 มิลลิวัตต์ - 500 มิลลิวัตต์ โดยใช้เครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ (Ultrasound Power Meter) จำนวน 3 เครื่อง ซึ่งมาจาก สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1 เครื่องที่ 1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) และ บริษัท อินทิเกรทเต็ด เมดิคอล เซอร์วิส จำกัด (UPM DT-1 เครื่องที่ 2) โดยทำการเปรียบเทียบค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดได้จาก ระบบปฐมภูมิ (Primary System) ที่พัฒนาโดยสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ ดังตารางที่ 4-1 ถึง ตารางที่ 4-3 ซึ่งแสดงการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ โดยใช้ทรานสดิวเซอร์ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์, 5 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ และกราฟในภาพที่ 4-1 ถึง ภาพที่ 4-3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดได้กับแรงดันตกคร่อมบนหัวทรานสดิวเซอร์ และผลการวัดค่า กำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ได้จากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด ดังตารางที่ 4-4 ถึง ตารางที่ 4-15 แสดงการวัดค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ระดับความเข้มค่าต่างๆ เมื่อเลือกค่าความถี่ ทรานสดิวเซอร์ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์, 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ และกราฟในภาพที่ 4-4 ถึง ภาพที่ 4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดได้ที่ระดับความเข้มต่างๆ

ตารางที่ 4-1 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์

Frequency (MHz)	Ultrasound Power (mW)	Primary System (mW)	UPM-DT-1 (mW) เครื่องที่ 1	UPM-DT-1 (mW) เครื่องที่ 2	UPM-DT-10 (mW)
1	10	10	10	10	10
1	20	17	19	19	20
1	40	40	41	43	50
1	60	58	59	62	60
1	80	76	77	81	80

ตารางที่ 4-1 (ต่อ)

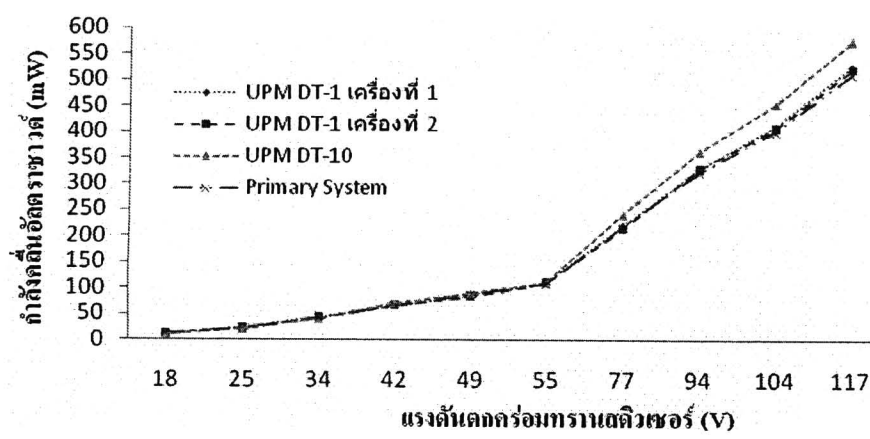
Frequency (MHz)	Ultrasound Power (mW)	Primary System (mW)	UPM-DT-1 (mW) เครื่องที่ 1	UPM-DT-1 (mW) เครื่องที่ 2	UPM-DT-10 (mW)
1	100	98	98	102	100
1	200	192	193	202	220
1	300	287	292	304	320
1	400	367	380	388	420
1	500	465	487	485	540



ภาพที่ 4-1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมทรานสดิวเซอร์ ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ กับกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1 เครื่องที่ 1) บริษัท อินทิเกรตเต็ด เมคคัล เซอร์วิส จำกัด (UPM DT-1 เครื่องที่ 2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) และระบบปฐมภูมิของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (Primary System)

ตารางที่ 4-2 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ ที่ความถี่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์

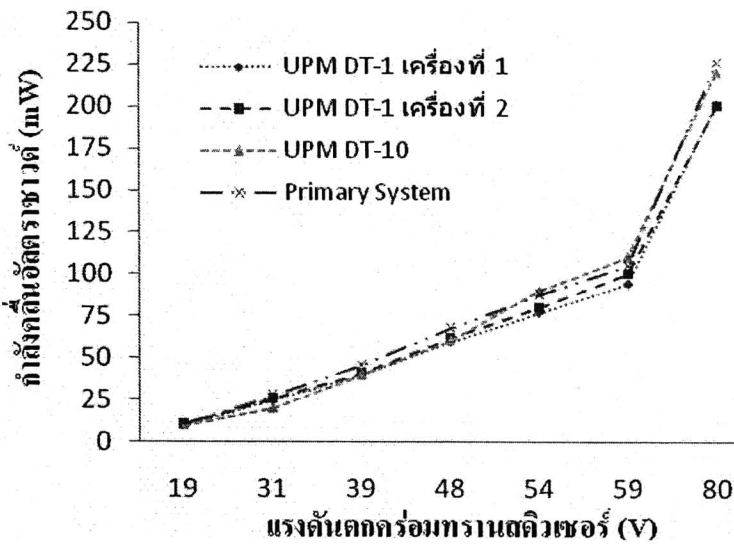
Frequency (MHz)	Ultrasound Power (mW)	Primary System (mW)	UPM-DT-1 (mW) เครื่องที่ 1	UPM-DT-1 (mW) เครื่องที่ 2	UPM-DT-10 (mW)
5	10	12	11	11	10
5	20	22	24	22	20
5	40	42	43	42	40
5	60	65	65	66	70
5	80	86	86	84	90
5	100	108	111	110	110
5	200	216	219	214	240
5	300	320	328	327	360
5	400	398	409	406	450
5	500	506	523	517	570



ภาพที่ 4-2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมทรานสดิวเซอร์ ความถี่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ กับกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1 เครื่องที่ 1) บริษัท อินทิเกรตเต็ด เมดิคอล เซอร์วิส จำกัด (UPM DT-1 เครื่องที่ 2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) และระบบปฐมภูมิของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (Primary System)

ตารางที่ 4-3 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ ที่ความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์

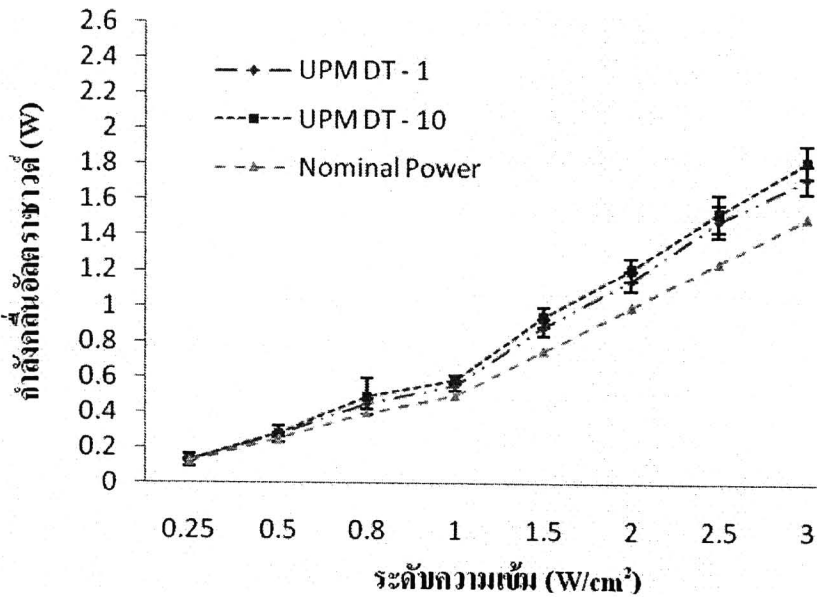
Frequency (MHz)	Ultrasound Power (mW)	Primary System (mW)	UPM-DT-1 (mW) เครื่องที่ 1	UPM-DT-1 (mW) เครื่องที่ 2	UPM-DT-10 (mW)
10	10	11	10	11	10
10	20	28	25	26	20
10	40	46	40	41	40
10	60	68	59	62	60
10	80	88	77	80	90
10	100	105	94	100	110
10	200	226	201	200	220



ภาพที่ 4-3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันตกคร่อมทรานสดิวเซอร์ ความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ กับกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1 เครื่องที่ 1) บริษัท อินทิเกรตเต็ด เมคคอลล เซอร์วิส จำกัด (UPM DT-1 เครื่องที่ 2) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) และระบบปฐมภูมิของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (Primary System)

ตารางที่ 4-4 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1: 10

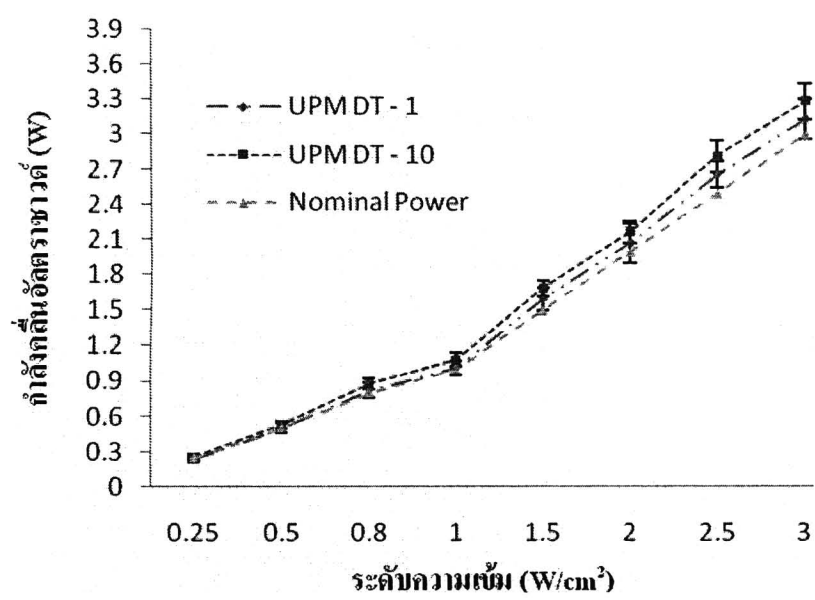
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
0.86	1:10	0.25	0.13	0.13	0.13
0.86	1:10	0.50	0.25	0.37	0.28
0.86	1:10	0.80	0.40	0.45	0.49
0.86	1:10	1.00	0.50	0.55	0.59
0.86	1:10	1.50	0.75	0.88	0.91
0.86	1:10	2.00	1.00	1.15	1.21
0.86	1:10	2.50	1.25	1.48	1.53
0.86	1:10	3.00	1.50	1.72	1.82



ภาพที่ 4-4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 10 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-5 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 5

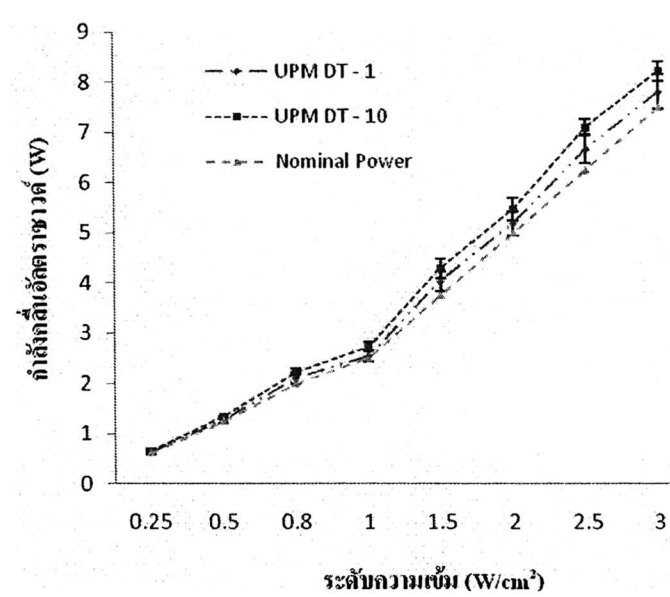
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
0.86	1:5	0.25	0.25	0.24	0.26
0.86	1:5	0.50	0.50	0.50	0.53
0.86	1:5	0.80	0.80	0.83	0.88
0.86	1:5	1.00	1.00	1.01	1.08
0.86	1:5	1.50	1.50	1.59	1.69
0.86	1:5	2.00	2.00	2.07	2.17
0.86	1:5	2.50	2.50	2.67	2.82
0.86	1:5	3.00	3.00	3.14	3.29



ภาพที่ 4-5 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 5 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-6 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 2

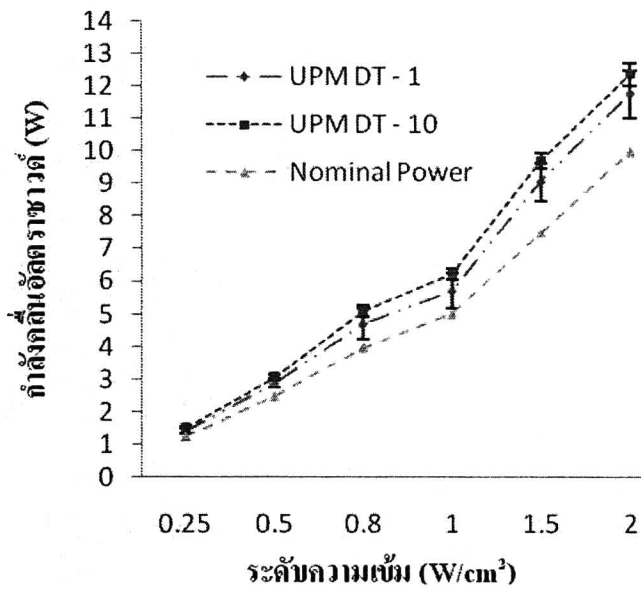
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
0.86	1:2	0.25	0.63	0.64	0.66
0.86	1:2	0.50	1.25	1.27	1.34
0.86	1:2	0.80	2.00	2.11	2.23
0.86	1:2	1.00	2.50	2.55	2.73
0.86	1:2	1.50	3.75	4.03	4.29
0.86	1:2	2.00	5.00	5.18	5.47
0.86	1:2	2.50	6.25	6.67	7.10
0.86	1:2	3.00	7.50	7.81	8.22



ภาพที่ 4-6 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 2 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-7 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบคลื่นต่อเนื่อง

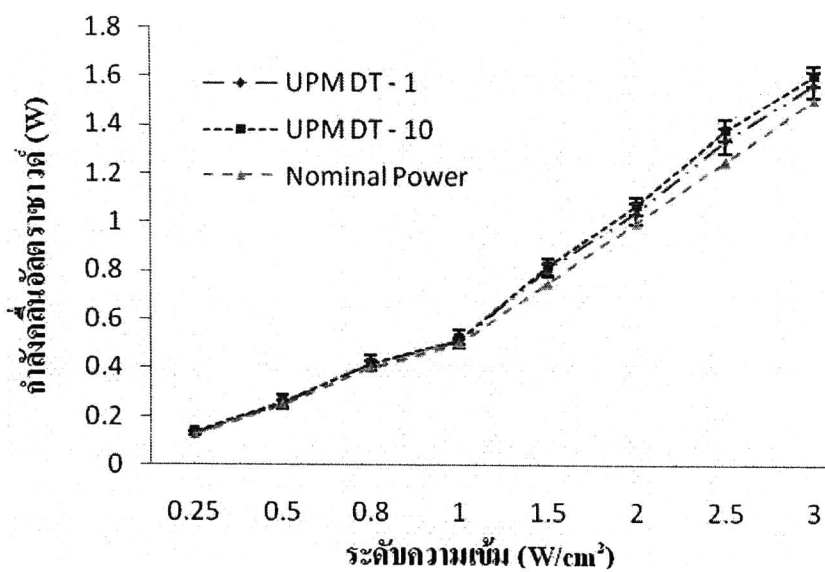
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
0.86	CW	0.25	1.25	1.42	1.52
0.86	CW	0.50	2.50	2.90	3.09
0.86	CW	0.80	4.00	4.71	5.10
0.86	CW	1.00	5.00	5.73	6.23
0.86	CW	1.50	7.50	9.07	9.70
0.86	CW	2.00	10.00	11.77	12.39



ภาพที่ 4-7 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบคลื่นต่อเนื่อง ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-8 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 10

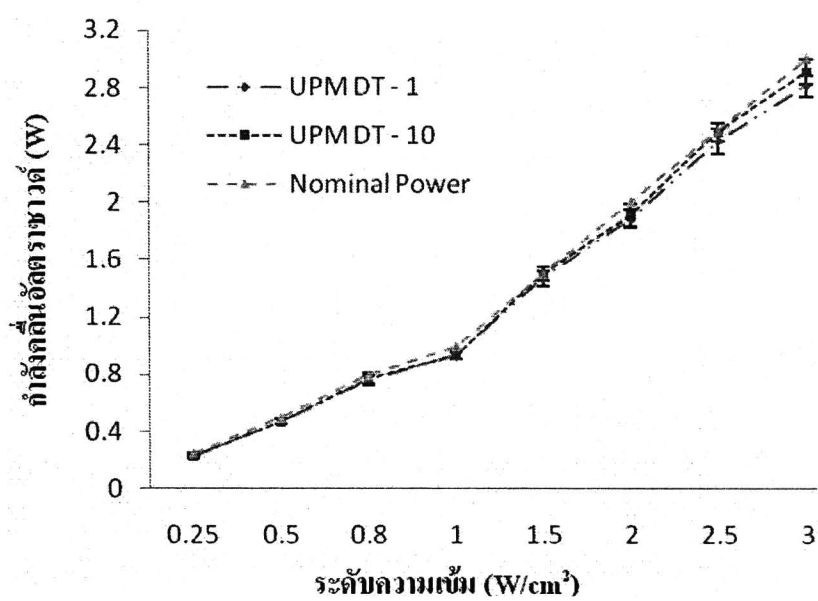
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
2	1:10	0.25	0.13	0.13	0.14
2	1:10	0.50	0.25	0.25	0.26
2	1:10	0.80	0.40	0.42	0.42
2	1:10	1.00	0.50	0.51	0.52
2	1:10	1.50	0.75	0.80	0.82
2	1:10	2.00	1.00	1.04	1.07
2	1:10	2.50	1.25	1.34	1.38
2	1:10	3.00	1.50	1.56	1.60



ภาพที่ 4-8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1:10 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-9 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 5

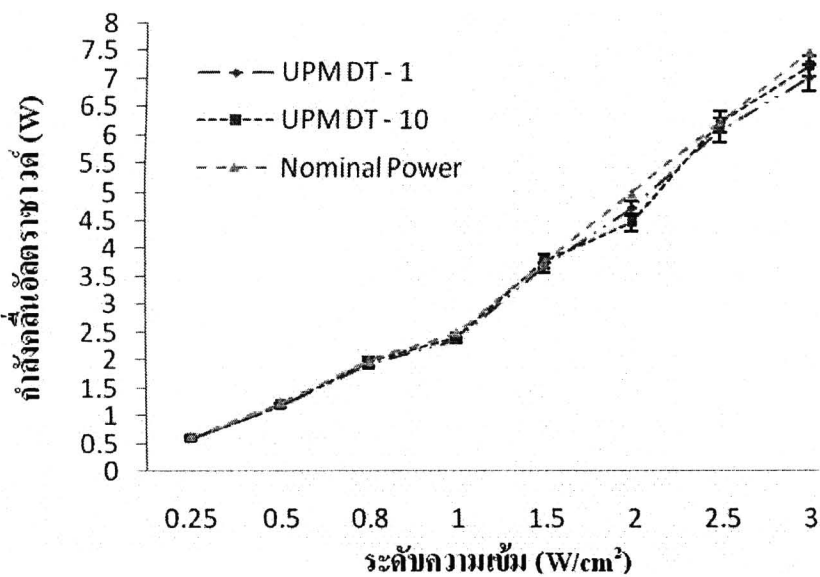
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
2	1:5	0.25	0.25	0.23	0.23
2	1:5	0.50	0.50	0.47	0.47
2	1:5	0.80	0.80	0.76	0.77
2	1:5	1.00	1.00	0.93	0.94
2	1:5	1.50	1.50	1.47	1.50
2	1:5	2.00	2.00	1.88	1.91
2	1:5	2.50	2.50	2.43	2.49
2	1:5	3.00	3.00	2.81	2.91



ภาพที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 5 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-10 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 2

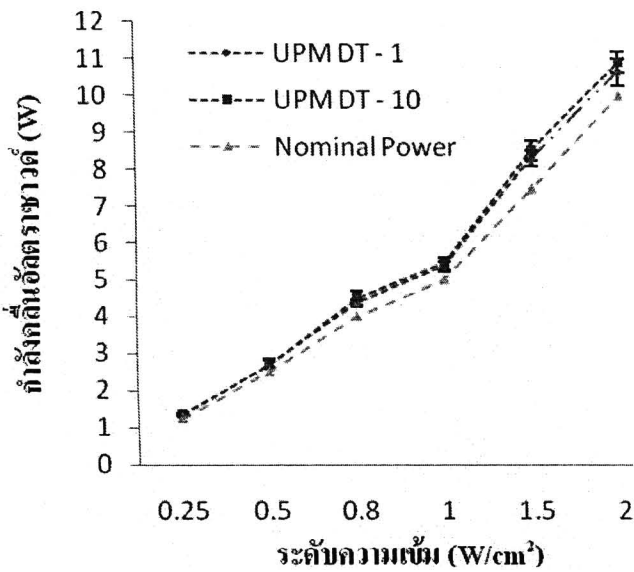
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
2	1:2	0.25	0.63	0.59	0.60
2	1:2	0.50	1.25	1.19	1.20
2	1:2	0.80	2.00	1.93	1.98
2	1:2	1.00	2.50	2.36	2.42
2	1:2	1.50	3.75	3.67	3.78
2	1:2	2.00	5.00	4.73	4.84
2	1:2	2.50	6.25	6.11	6.26
2	1:2	3.00	7.50	7.05	7.25



ภาพที่ 4-10 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 2 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-11 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบคลื่นต่อเนื่อง

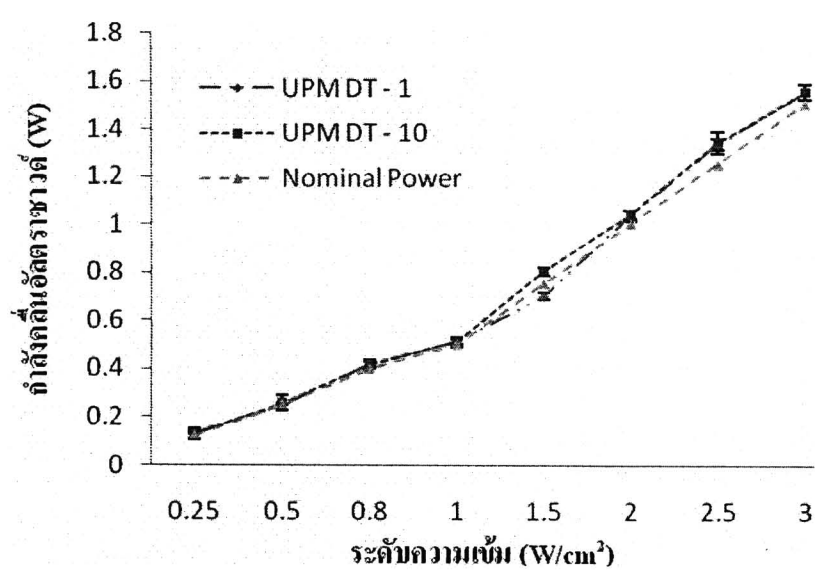
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
2	CW	0.25	1.25	1.35	1.36
2	CW	0.50	2.50	2.70	2.72
2	CW	0.80	4.00	4.37	4.50
2	CW	1.00	5.00	5.37	5.45
2	CW	1.50	7.50	8.32	8.55
2	CW	2.00	10.00	10.68	10.92



ภาพที่ 4-11 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบคลื่นต่อเนื่อง ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-12 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 10

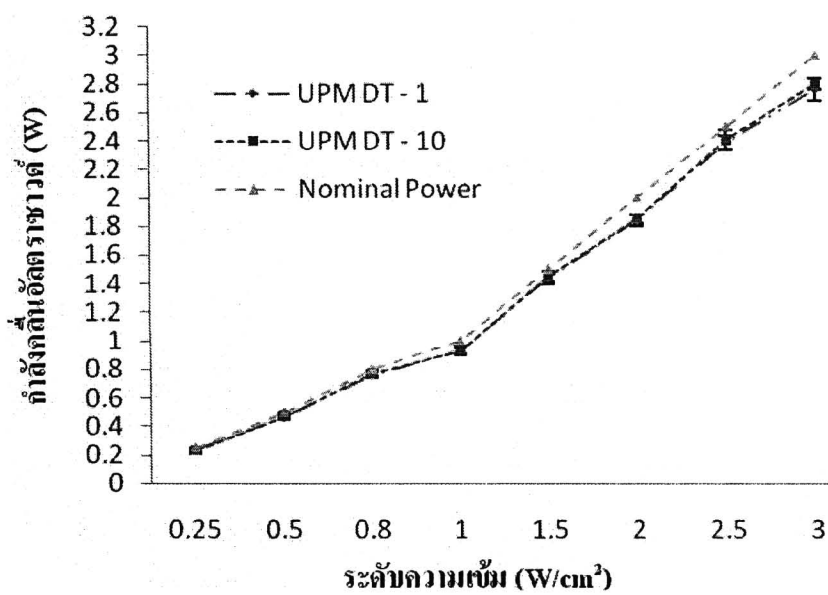
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
3	1:10	0.25	0.13	0.14	0.13
3	1:10	0.50	0.25	0.25	0.26
3	1:10	0.80	0.40	0.42	0.42
3	1:10	1.00	0.50	0.51	0.51
3	1:10	1.50	0.75	0.70	0.80
3	1:10	2.00	1.00	1.03	1.04
3	1:10	2.50	1.25	1.33	1.34
3	1:10	3.00	1.50	1.55	1.55



ภาพที่ 4-12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 10 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-13 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 5

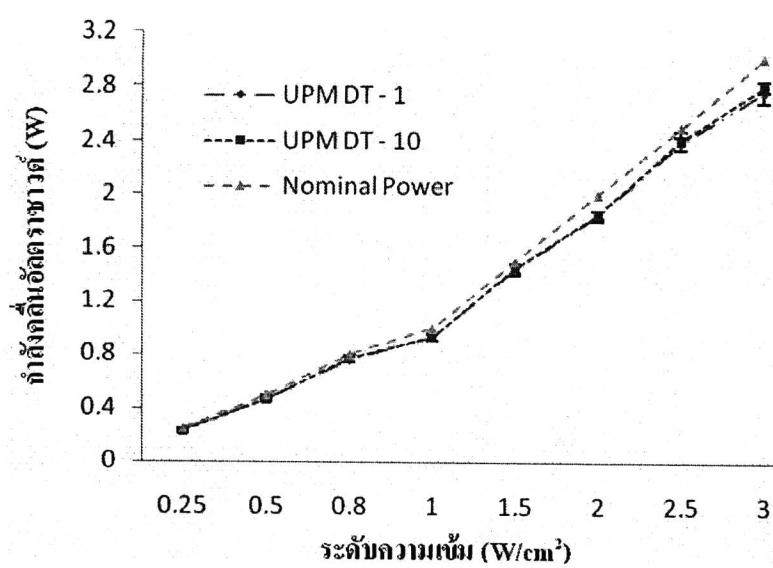
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
3	1:5	0.25	0.25	0.24	0.23
3	1:5	0.50	0.50	0.46	0.47
3	1:5	0.80	0.80	0.76	0.77
3	1:5	1.00	1.00	0.93	0.93
3	1:5	1.50	1.50	1.44	1.45
3	1:5	2.00	2.00	1.84	1.85
3	1:5	2.50	2.50	2.39	2.40
3	1:5	3.00	3.00	2.76	2.80



ภาพที่ 4-13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 5 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-14 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1 : 2

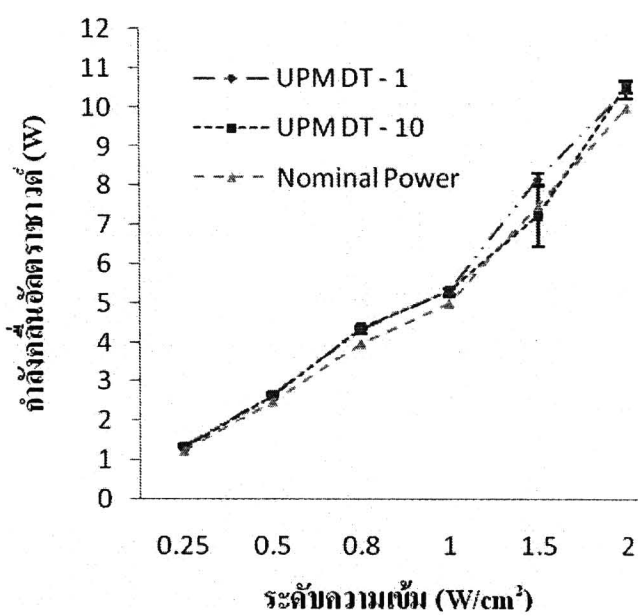
Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
3	1:2	0.25	0.63	0.60	0.60
3	1:2	0.50	1.25	1.19	1.17
3	1:2	0.80	2.00	1.92	1.94
3	1:2	1.00	2.50	2.34	2.35
3	1:2	1.50	3.75	3.63	3.66
3	1:2	2.00	5.00	4.63	4.68
3	1:2	2.50	6.25	5.98	6.02
3	1:2	3.00	7.50	6.93	7.03



ภาพที่ 4-14 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบช่วงคลื่น 1 : 2 ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

ตารางที่ 4-15 ผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบคลื่นต่อเนื่อง

Frequency (MHz)	Intensity		Nominal Power (Watts)	UPM-DT-1 (Watts)	UPM-DT-10 (Watts)
	Pulse	W/cm ²			
3	CW	0.25	1.25	1.35	1.34
3	CW	0.50	2.50	2.67	2.65
3	CW	0.80	4.00	4.33	4.38
3	CW	1.00	5.00	5.29	5.32
3	CW	1.50	7.50	8.19	7.25
3	CW	2.00	10.00	10.44	10.55



ภาพที่ 4-15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ กับระดับความเข้ม แบบคลื่นต่อเนื่อง ที่วัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ (UPM DT-1) และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ (UPM DT-10) เปรียบเทียบกับค่ากำลังที่ตั้งจากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Nominal Power)

4.1 วิเคราะห์ผลการสอบเทียบ

จากการสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ด้วยหัวทรานสดิวเซอร์ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ตั้งแต่ 10 มิลลิวัตต์ – 500 มิลลิวัตต์ ด้วยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1 และ UPM DT-10 และนำมาเปรียบเทียบกับผลการสอบเทียบกับค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์โดยใช้เครื่องปฐมภูมิของสถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ แสดงดังตารางที่ 4-1 ถึง 4-3 ซึ่งแสดงค่าความถี่ที่ใช้ในการสอบเทียบ (Frequency) ค่ากำลังที่ใช้ในการสอบเทียบ (Ultrasound Power) ค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดจากระบบปฐมภูมิ (Primary System) และค่ากำลังที่วัดจากเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ (Ultrasound Power Meter) รุ่น UPM DT-1 และ UPM DT-10 และกราฟที่แสดงในภาพที่ 4-1 ถึง 4-3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ และค่าแรงดันที่เกิดขึ้นบนหัวทรานสดิวเซอร์ พบว่าการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ค่ากำลังสูงขึ้น จะเกิดแรงดันตกคร่อมที่หัวทรานสดิวเซอร์สูงขึ้น โดยแรงดันตกคร่อมที่หัวทรานสดิวเซอร์ความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ จะมีค่าสูงกว่าหัวทรานสดิวเซอร์ความถี่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ โดยแกน y แสดงถึงกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ทำการวัด และแกน x แสดงถึงแรงดันที่ตกคร่อมที่หัวทรานสดิวเซอร์ ซึ่งจากการสอบเทียบพบว่าทรานสดิวเซอร์ความถี่ 10 เมกะเฮิร์ตซ์ จะสามารถวัดกำลังคลื่นอัลตราซาวด์ได้ถึง 200 มิลลิวัตต์ อันเนื่องมาจากขีดความสามารถของทรานสดิวเซอร์ที่นำมาใช้และเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ ซึ่งสามารถรองรับความถี่ของทรานสดิวเซอร์ได้สูงสุด 10 เมกะเฮิร์ตซ์ นอกจากนี้กราฟยังแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดได้จากระบบปฐมภูมิและที่วัดได้จากเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ให้ค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่มีค่าใกล้เคียงกัน

จากนั้นนำเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ที่ผ่านการสอบเทียบมาทำการทดสอบซ้ำกับเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด (Ultrasound Therapy) ที่ผ่านการสอบเทียบแล้ว เพื่อเป็นการสอบย้อนความถูกต้อง (Cross Check) ของการสอบเทียบโดยใช้เทคนิคแรงการแผ่รังสี โดยจะนำเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์มาวัดค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ ที่ได้จากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัดที่ระดับความเข้มต่างๆ ดังตารางที่ 4-4 ถึง ตารางที่ 4-15 ซึ่งแสดงผลการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัดที่ความถี่ 0.86 เมกะเฮิร์ตซ์ 2 เมกะเฮิร์ตซ์ และ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่ระดับความเข้มต่างๆ ซึ่งแสดงให้เห็นค่าความถี่ของหัวทรานสดิวเซอร์ (Frequency) ระดับความเข้ม (Intensity) ค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่ได้จากการคำนวณ (Norminal Power) และค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดได้จากเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ (Ultrasound Power Meter) รุ่น UPM DT-1 และ UPM DT-10 ซึ่งพบว่า ที่ความถี่หัวทรานสดิวเซอร์สูงมากขึ้น และที่ระดับความเข้มสูงขึ้น จะทำให้ค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์มีค่า

สูงขึ้นตามไปด้วย และ ภาพที่ 4-4 ถึง ภาพที่ 4-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ความถี่ต่างๆ ที่ระดับความเข้มที่แตกต่างกัน โดยกราฟแสดงให้เห็นว่าค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดโดยใช้เครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์สามารถวัดค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ได้ค่าใกล้เคียงกับค่ากำลังที่ตั้งที่ตัวเครื่อง ซึ่งเป็นการช่วยยืนยันการสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์โดยเทคนิคแรงการแผ่รังสีอคูวิธีการหนึ่ง

4.2 การประเมินความไม่แน่นอนของผลการวัด

ค่าความไม่แน่นอนในการวัด เป็นผลมาจากค่าที่ได้จากการสอบเทียบกับค่ามาตรฐาน ซึ่งแยกเป็นส่วนใหญ่ๆ ได้ดังนี้

- 1. ค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่วัดได้เฉลี่ย เทียบกับค่ามาตรฐาน (Error)
- 2. ค่าความละเอียดในการอ่านค่าของเครื่องมือวัดที่นำมาสอบเทียบ (Unit Under Calibration : UUC)
- 3. ค่าความไม่แน่นอนรวมของเครื่องมือมาตรฐาน ทุกเครื่องที่นำมาใช้ในการสอบเทียบ
- 4. ค่าตัวแปรสิ่งแวดล้อมต่างๆ ที่หาได้ เช่น อุณหภูมิห้อง
- 5. ต้องรู้ค่าแรงโน้มถ่วงของโลก ณ จุดที่สอบเทียบ
- 6. ต้องรู้ค่าความหนาแน่นของอากาศ
- 7. ค่าตัวแปรอื่นที่สามารถหาได้

ในการวัด (Measurement) หรือ การหาปริมาณในทางวิเคราะห์ ค่าปัจจัย (Parameter) หนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ ได้แก่ ค่าความไม่แน่นอนจากการวัด (Uncertainty) โดยค่าความไม่แน่นอนสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

4.2.1 ความไม่แน่นอน แบบ Type A Evaluation

เกิดจากการคำนวณค่าจากการทดลองซ้ำๆ (Repeated Observation) หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าเป็นการทำซ้ำ (Repeatability) โดยใช้สัญลักษณ์ $u(A)$ ซึ่งเป็นการคำนวณจากอนุกรมการสังเกตด้วยวิธีการทางสถิติ

4.2.1.1 คำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลการวัด (Average, $\bar{x}$) ที่ทำการวัดซ้ำ n ครั้ง ดังสมการที่ (4-1)

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

(4-1)

เมื่อ	$\bar{x}$	คือ	ค่าเฉลี่ยของผลการวัด
	n	คือ	จำนวนครั้งที่ทำการวัด

x_i คือ ผลการวัดครั้งที่ i โดยที่ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

4.2.1.2 การกระจายของผลการวัดที่ได้จากการทำการวัดซ้ำๆ หาได้จากการคำนวณค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) ของผลการวัด จากสมการที่ (4-2)

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{4-2}$$

เมื่อ $s(x_i)$ คือ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัด

4.2.1.3 ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าเฉลี่ย (Standard Deviation of Mean) หาได้จากการเฉลี่ยค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของแต่ละตัวอย่าง ($s(x_i)$) คือ

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x_i)}{\sqrt{n}} \tag{4-3}$$

4.2.1.4 ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐาน Type A ซึ่งมีการกระจายแบบปกติ คือ

$$u(A) = \frac{s(\bar{x})}{\sqrt{1}} \tag{4-4}$$

เมื่อ $u(A)$ คือ ค่า Repeatability ของระบบการวัด

4.2.2 ความไม่แน่นอน แบบ Type B Evaluation

เป็นการประเมินโดยวิธีอื่น ๆ ที่ไม่ใช่การทำการซ้ำ (Repeatability) เช่น การใช้ข้อมูลที่ได้รับจากใบรับรอง (Calibration Certificate) การนำค่าความละเอียด (Resolution) ของเครื่องมือมาใช้ และปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม (Environment) ที่เกี่ยวข้องในการทดลอง โดยพิจารณาว่าความไม่แน่นอนเป็นการแจกแจงแบบปกติ และค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานหาได้จาก ค่าความไม่แน่นอนที่ระบุความเชื่อมั่น ซึ่งการสอบเทียบเครื่องมือโดยหัวหน้าสตีวเซอร์จะกำหนดให้ใช้ค่า $k = 2$

$$u(B_i) = u(B_1) = \frac{\text{ค่าความไม่แน่นอนที่ระบุความเชื่อมั่น}}{k} \tag{4-5}$$

เมื่อ k คือ ค่าตัวประกอบครอบคลุม

หรือความไม่แน่นอนของเครื่องมือวัดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต และไม่ได้กำหนดระดับความเชื่อมั่นให้ตั้งสมมติฐานว่าความไม่แน่นอนนี้มีการกระจายความน่าจะเป็นแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ระดับความเชื่อมั่น 100 % ซึ่งให้พิจารณาว่าความไม่แน่นอนเป็นการแจกแจงแบบสี่เหลี่ยม (Rectangular Distribution) และค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานหาได้จาก

$$u(B_1) = u(B_2) = \frac{a_i}{\sqrt{3}} \tag{4-6}$$

เมื่อ a_i เป็นค่ากึ่งกลางของขอบเขตบน และล่างของความเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ซึ่งค่าความไม่แน่นอนแต่ละค่า ของทั้ง Type A และ Type B ที่หามาได้จะเป็นค่าหนึ่งของ การเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Uncertainty) จากนั้นจึงทำการรวมค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานแต่ละค่า ซึ่งค่าที่ได้ เรียกว่า ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined Standard Uncertainty)

4.2.3 ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (Combined Standard Uncertainty)

การคำนวณค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (u_c) โดยพิจารณาที่หน่วยของความไม่แน่นอน $u(x_i)$ โดยที่

4.2.3.1 ถ้า $u(x_i)$ มีหน่วยเดียวกันแล้ว ค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (u_c) จะเท่ากับ

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(x_i)^2} \tag{4-7}$$

โดย $u(x_i)$ คือ ความไม่แน่นอนที่ 1 ที่ได้จาก Type A และ Type B

4.2.3.2 ถ้า $u(x_i)$ มีหน่วยไม่เหมือนกันแล้วจะต้องทำให้มีหน่วยเหมือนกันก่อนซึ่งสามารถทำได้ 2 วิธี ดังนี้

1. ทำให้ความไม่แน่นอน $u(x_i)$ อยู่ในรูปความไม่แน่นอนสัมพัทธ์ คือ

$$u(x_i \%) = \frac{u(x_i)}{\bar{x}} \tag{4-8}$$

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n u(x_i \%)^2} \tag{4-9}$$

2. ใช้ c_i คูณที่ $u(x_i)$ เพื่อให้เป็นหน่วยที่ต้องการ ดังนั้น

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n c_i^2 u(x_i)^2} \tag{4-10}$$

โดย c_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความไว (Sensitivity Coefficient) การคำนวณเพื่อหาค่า c_i โดยการหาอนุพันธ์ย่อยของปริมาณที่วัดเอาต์พุต (output) $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ เทียบกับ x หรือ $c_i = \partial f / \partial x$

อย่างไรก็ตาม ในการนำไปใช้งานจะใช้ค่าความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty) ซึ่งจะให้ค่าช่วงกว้าง รอบค่าผลการวัดมากกว่าค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม ผลที่ตามมาคือ มีความน่าจะเป็นที่ครอบคลุมค่าจริงสูงกว่า เนื่องจากความไม่แน่นอนขยายจะ ได้จากการคูณความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม โดยตัวประกอบครอบคลุม (k) การเลือกค่า k จะขึ้นอยู่กับระดับความเชื่อมั่นที่ต้องการ

4.2.4 ความไม่แน่นอนขยาย (Expanded Uncertainty)

ความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (U) ตามระดับความเชื่อมั่นที่พิจารณาหาได้จากผลคูณของตัวประกอบครอบคลุม (k) กับความไม่แน่นอนรวม (u_c) โดย

$$U = k u_c \tag{4-11}$$

โดย k หาได้จากตารางแจกแจง t ซึ่งจำเป็นต้องได้ค่าประมาณของ Effective Degree of Freedom (v_{eff}) คือ

$$v_{\text{eff}} = \frac{u_c^2(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u^4(x_i)}{v_i}}$$

(4-12)

เมื่อ	u_c	คือ	ค่าความไม่แน่นอนรวม
	$u(x_i)$	คือ	ส่วนประกอบของความไม่แน่นอนทั้งแบบ Type A และ Type B
	v_i	คือ	ค่าองศาอิสระของแต่ละส่วนประกอบความน่าจะเป็น
	v_{eff}	คือ	ค่าองศาอิสระของค่าความไม่แน่นอนรวม

เมื่อได้ค่า v_{eff} แล้วจะใช้ตารางการแจกแจง t เพื่อหาค่าของ k ซึ่งโดยปกติค่า v_{eff} ที่คำนวณได้จะไม่เป็นเลขจำนวนเต็ม ดังนั้นจำเป็นต้องทำการประมาณค่าระหว่างค่าที่กำหนดไว้ในตารางการแจกแจง t

4.2.5 การหาค่าความไม่แน่นอนของการสอบเทียบเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์รุ่น UPM DT-1

4.2.5.1 การหาค่าความไม่แน่นอนแบบ Type A Evaluation

1. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลการวัด ($\bar{x}$) ของเครื่องอัลตราซาวด์ พาวเวอร์มิเตอร์รุ่น UPM DT-1 ที่ความถี่ 1 เมกะเฮิร์ตซ์ ค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ 60 มิลลิวัตต์

ความถี่ (MHz)	ค่ากำลังที่สอบเทียบ (Watts)	ค่าที่อ่านได้ (Watts)					
		1	2	3	4	5	6
1	0.060	0.058	0.060	0.060	0.058	0.060	0.060

แทนค่าลงในสมการที่ (4-1) จะได้

$$\bar{x} = \frac{0.058 + 0.060 + 0.060 + 0.058 + 0.060 + 0.060}{6}$$

$$\bar{x} = 0.059 \text{ W}$$

2. คำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัด โดยใช้สมการที่ (4-2) จะได้

$$s(x_i)=\sqrt{\frac{\sum (0.058-0.059)^2+(0.060-0.059)^2+(0.060-0.059)^2+(0.058-0.059)^2+(0.060-0.059)^2+(0.060-0.059)^2}{6-1}}$$

$s(x_i)=0.001095445\text{ W}$

3. คำนวณหาค่า Repeatability ของระบบการวัด โดยใช้สมการที่ (4-3) และ (4-4) ซึ่งมีการกระจายแบบปกติ จะได้

$s(\bar{x})=\frac{0.001095445W}{\sqrt{6}}=0.000447213\text{ W}$

$u(A)=\frac{0.000447213W}{\sqrt{1}}=0.000447213\text{ W}$

4.2.5.2 การหาค่าความไม่แน่นอนแบบ Type B Evaluation

อิทธิพลที่มีผลต่อค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดได้จากระบบการวัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ แบ่งออกเป็นดังนี้

1. ความไม่แน่นอนของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1 ซึ่งมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยมอันเกิดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ($u(B_1)$) หาได้จากสมการที่ (4-5)

$u(B_1)=\frac{(3\%)\times0.059W}{\sqrt{3}}=0.001021509\text{ W}$

2. จากความละเอียดของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1 ($u(B_2)$)

$u(B_2)=\frac{0.001W}{2\sqrt{3}}=0.000288675\text{ W}$

จากความละเอียดของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-10 ($u(B_2)$)

$u(B_2)=\frac{0.010W}{2\sqrt{3}}=0.002886751\text{ W}$

3. ความไม่แน่นอนของเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยมอันเกิดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ($u(B_3)$)

$$u(B_3) = \frac{(1\%) \times 0.0001 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 0.000000577 \text{ V}$$

4. ความไม่แน่นอนของเครื่องขยายกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยมอันเกิดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ($u(B_4)$)

$$u(B_4) = \frac{(1\%) \times 0.001 \text{ W}}{\sqrt{3}} = 0.00000577 \text{ W}$$

5. ความไม่แน่นอนของเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยมอันเกิดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ($u(B_5)$)

$$u(B_5) = \frac{(1.25\%) \times 0.001 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 0.000007216 \text{ V}$$

6. ความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนไป โดยมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยม เมื่อ $c(24^\circ\text{C}) = 1,494.06 \text{ m/s}$ และ $c(18^\circ\text{C}) = 1,476.07 \text{ m/s}$ ($u(B_6)$)

$$u(B_6) = \frac{(1,494.06 - 1,476.07)}{\sqrt{3}} = 10.4 \text{ m/s}$$

7. การหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (u_c) โดยใช้สมการที่ (4-10) เพื่อให้ความไม่แน่นอน $u(x_i)$ อยู่ในรูปความไม่แน่นอนสัมพัทธ์

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{0.000447213 \text{ W}}{0.059 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.001021509 \text{ W}}{0.059 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.000288675 \text{ W}}{0.059 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.000000577 \text{ V}}{0.0001 \text{ V}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.00000577 \text{ W}}{0.059 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.000007216 \text{ V}}{0.001 \text{ V}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{10.4 \text{ m/s}}{1,493.8 \text{ m/s}} \times 100\right)^2}$$

$$= \sqrt{(0.757988035\%)^2 + (1.731371086\%)^2 + (0.489279661\%)^2 + (0.566029607\%)^2 + (0.0097796610\%)^2 + (0.7216\%)^2 + (0.696082\%)^2}$$

$$u_c = 2.274931179\%$$

8. การคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยาย (U) สำหรับหัวทรานสดิวเซอร์ จะใช้ค่า $k = 2$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยจะแทนค่าลงในสมการที่ (4-11)

$$U = 2 \times 2.274931179 = 4.549862358\% \approx 5\%$$

ดังนั้น ผลการวัดกำลังคลื่นอัลตราซาวด์โดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ ที่ความถี่ 1 MHz ที่กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ 60 มิลลิวัตต์ มีค่า $0.51 \text{ W} \pm 5\%$

จากตัวอย่างการหาค่าความไม่แน่นอนข้างต้น สามารถหาค่าความไม่แน่นอนของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1 และ UPM DT-10 ได้ผลของค่าความไม่แน่นอนดังตารางที่ 4-16 จะแสดงค่าความไม่แน่นอนของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1 และ UPM DT-10 โดยจะแสดงค่าความไม่แน่นอนที่ค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์และค่าความถี่ของหัวทรานสดิวเซอร์ต่างๆ

ตารางที่ 4-16 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์ด้วยเครื่อง
อัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1และ UPM DT-10

ความถี่ (Hz)	กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ (Watts)	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-1	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-10
1 MHz	0.010	0.010 W±10%	0.01 W±53%
1 MHz	0.020	0.019 W±9%	0.02 W±23%
1 MHz	0.040	0.041 W±5%	0.05 W±11%
1 MHz	0.060	0.059 W ±5%	0.06 W ±8%
1 MHz	0.080	0.077 W±5%	0.08 W±10%
1 MHz	0.100	0.098 W±4%	0.10 W±6%
1 MHz	0.200	0.193 W±4%	0.22 W±4%
1 MHz	0.300	0.292 W±4%	0.32 W±4%
1 MHz	0.400	0.380 W±4%	0.42 W±3%
1 MHz	0.500	0.487 W±4%	0.54 W±3%
5 MHz	0.010	0.011 W±11%	0.011 W±53%
5 MHz	0.020	0.024 W±9%	0.024 W±15%
5 MHz	0.040	0.043 W±5%	0.043 W±8%
5 MHz	0.060	0.065 W±4%	0.065 W±8%
5 MHz	0.080	0.086 W±5%	0.086 W±6%
5 MHz	0.100	0.111 W±5%	0.111 W±5%
5 MHz	0.200	0.219 W±5%	0.219 W±4%
5 MHz	0.300	0.328 W±5%	0.328 W±3%
5 MHz	0.400	0.409 W±4%	0.409 W±3%
5 MHz	0.500	0.523 W±5%	0.523 W±3%
10 MHz	0.010	0.010 W±7%	0.010 W±53%
10 MHz	0.020	0.025 W±6%	0.025 W±23%
10 MHz	0.040	0.040 W±5%	0.040 W±8%
10 MHz	0.060	0.059 W ±5%	0.059 W ±12%

ตารางที่ 4-16 (ต่อ)

ความถี่ (Hz)	กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ (Watts)	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-1	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-10
10 MHz	0.080	0.077 W±5%	0.077 W±6%
10 MHz	0.100	0.094 W±5%	0.094 W±7%
10 MHz	0.200	0.201 W±4%	0.201 W±4%

4.2.7 การหาค่าความไม่แน่นอนของการทดสอบเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์กับเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด

4.2.7.1 การหาค่าความไม่แน่นอนแบบ Type A Evaluation

1. ตัวอย่างการคำนวณหาค่าเฉลี่ยของผลการวัด ($\bar{x}$) ของเครื่องอัลตราซาวด์ ฟาวเวอร์มิเตอร์รุ่น UPM DT-1 ที่ความถี่ 3 เมกะเฮิร์ตซ์ แบบช่วงคลื่น 1:10 ที่ระดับความเข้ม 1 W/cm²

ระดับความเข้ม	ค่าที่อ่านได้					
	1	2	3	4	5	6
1 W/cm ²	0.51 W	0.52 W	0.51 W	0.50 W	0.52 W	0.52 W
0.50 Watts						

แทนค่าลงในสมการที่ (4-1) จะได้

$$\bar{x} = \frac{0.51 + 0.52 + 0.51 + 0.50 + 0.52 + 0.52}{6}$$
$$\bar{x} = 0.51 \text{ W}$$

2. คำนวณหาค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลการวัด โดยใช้สมการที่ (4-2) จะได้

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{\sum (0.51 - 0.51)^2 + (0.52 - 0.51)^2 + (0.51 - 0.51)^2 + (0.50 - 0.51)^2 + (0.52 - 0.51)^2 + (0.52 - 0.51)^2}{6 - 1}}$$

$$s(x_1) = 0.008944271 \text{ W}$$

3. คำนวณหาค่า Repeatability ของระบบการวัด โดยใช้สมการที่ (4-3) และ (4-4) ซึ่งมีการกระจายแบบปกติ จะได้

$$s(\bar{x}) = \frac{0.008944271 \text{ W}}{\sqrt{6}} = 0.003651483 \text{ W}$$

$$u(A) = \frac{0.003651483 \text{ W}}{\sqrt{1}} = 0.003651483 \text{ W}$$

4.2.7.2 การหาค่าความไม่แน่นอนแบบ Type B Evaluation

อิทธิพลที่มีผลต่อค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์ที่วัดได้จากระบบการวัดโดยเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ แบ่งออกเป็นดังนี้

1. ความไม่แน่นอนของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1 ซึ่งมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยมอันเกิดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ($u(B_1)$) หาได้จากสมการที่ (4-5)

$$u(B_1) = \frac{(3\%) \times 0.51 \text{ W}}{\sqrt{3}} = 0.008833459 \text{ W}$$

2. จากความละเอียดของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-1 ($u(B_2)$)

$$u(B_2) = \frac{0.001 \text{ W}}{2\sqrt{3}} = 0.000288675 \text{ W}$$

จากความละเอียดของเครื่องอัลตราซาวด์พาวเวอร์มิเตอร์ รุ่น UPM DT-10 ($u(B_3)$)

$$u(B_2) = \frac{0.010 \text{ W}}{2\sqrt{3}} = 0.002886751 \text{ W}$$

3. ความไม่แน่นอนของเครื่องกำเนิดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยมอันเกิดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ($u(B_3)$)

$$u(B_3) = \frac{(1\%) \times 0.0001 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 0.000000577 \text{ V}$$

4. ความไม่แน่นอนของเครื่องขยายกำลังไฟฟ้า ซึ่งมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยมอันเกิดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ($u(B_4)$)

$$u(B_4) = \frac{(1\%) \times 0.001 \text{ W}}{\sqrt{3}} = 0.00000577 \text{ W}$$

5. ความไม่แน่นอนของเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยมอันเกิดจากข้อกำหนดเฉพาะของผู้ผลิต ($u(B_5)$)

$$u(B_5) = \frac{(1.25\%) \times 0.001 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 0.000007216 \text{ V}$$

6. ความไม่แน่นอนเนื่องจากอุณหภูมิของน้ำเปลี่ยนไป โดยมีการกระจายแบบสี่เหลี่ยม เมื่อ $c(24^\circ\text{C}) = 1,494.06 \text{ m/s}$ และ $c(18^\circ\text{C}) = 1,476.07 \text{ m/s}$ ($u(B_6)$)

$$u(B_6) = \frac{(1,494.06 - 1,476.07)}{\sqrt{3}} = 10.4 \text{ m/s V}$$

7. การหาค่าความไม่แน่นอนมาตรฐานรวม (u_c) โดยใช้สมการที่ (4-10) เพื่อให้ความไม่แน่นอน $u(x_i)$ อยู่ในรูปความไม่แน่นอนสัมพัทธ์

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{0.003651483 \text{ W}}{0.51 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.002303627 \text{ W}}{0.51 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.000288675 \text{ W}}{0.51 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.002886751 \text{ W}}{0.51 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.000000577 \text{ V}}{0.0001 \text{ V}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.00000577 \text{ W}}{0.51 \text{ W}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{0.000007216 \text{ V}}{0.001 \text{ V}} \times 100\right)^2 + \left(\frac{10.4 \text{ m/s}}{1,493.8 \text{ m/s}} \times 100\right)^2}$$

$$= \sqrt{(0.715977199\%)^2 + (0.451691568\%)^2 + (0.014722425\%)^2 + (2.170489474\%)^2 + (0.566029607\%)^2 + (0.0011313725\%)^2 + (0.7216\%)^2 + (0.696082\%)^2}$$

$$u_c = 2.5998841805\%$$

8. การคำนวณค่าความไม่แน่นอนขยาย (U) สำหรับหัวเทียนสควิเซอร์ จะใช้ค่า $k = 2$ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยจะแทนค่าลงในสมการที่ (4-11)

$$U = 2 \times 2.5998841805 = 5.199768361\% \approx 5\%$$

ดังนั้น ผลการวัดกำลังคลื่นอัลตราซาวด์โดยเครื่องอัลตราซาวด์ฟาวเวอร์มิเตอร์ ที่ความถี่ 3 MHz แบบช่วงคลื่น 1 : 10 ที่ระดับความเข้ม 1 W/cm^2 มีค่า $0.51 \text{ W} \pm 5\%$

จากตัวอย่างข้างต้นซึ่งแสดงวิธีการหาค่าความไม่แน่นอนของการวัดค่ากำลังคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่องอัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด สามารถแสดงค่าความคลาดเคลื่อนได้ดังตารางที่ 4-17

ตารางที่ 4-17 ค่าความไม่แน่นอนที่เกิดจากการวัดค่ากำลังของคลื่นอัลตราซาวด์จากเครื่อง
อัลตราซาวด์ทางกายภาพบำบัด

ความถี่ (MHz)	ระดับความเข้ม		กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ (Watts)	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-1	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-10
	Pulse	W/cm ²			
0.86	1:10	0.25	0.13	0.13 W ± 4 %	0.13 W ± 12 %
0.86	1:10	0.50	0.25	0.27 W ± 5 %	0.28 W ± 8 %
0.86	1:10	0.80	0.40	0.45 W ± 5 %	0.49W ± 10 %
0.86	1:10	1.00	0.50	0.55 W ± 5 %	0.59 W ± 5 %
0.86	1:10	1.50	0.75	0.88 W ± 5 %	0.95 W ± 5 %
0.86	1:10	2.00	1.00	1.15 W ± 5 %	1.21 W ± 5 %
0.86	1:10	2.50	1.25	1.48 W ± 5 %	1.53 W ± 5 %
0.86	1:10	3.00	1.50	1.72 W ± 5 %	1.82 W ± 5 %
0.86	1:5	0.25	0.25	0.24 W ± 6 %	0.26 W ± 6 %
0.86	1:5	0.50	0.50	0.50 W ± 5 %	0.53 W ± 5 %
0.86	1:5	0.80	0.80	0.83 W ± 5 %	0.88 W ± 5 %
0.86	1:5	1.00	1.00	1.01 W ± 5 %	1.08 W ± 5 %
0.86	1:5	1.50	1.50	1.59 W ± 5 %	1.69 W ± 4 %
0.86	1:5	2.00	2.00	2.07 W ± 5 %	2.17 W ± 5 %
0.86	1:5	2.50	2.50	2.67 W ± 5 %	2.82 W ± 5 %
0.86	1:5	3.00	3.00	3.14 W ± 5 %	3.29 W ± 5 %
0.86	1:2	0.25	0.63	0.64 W ± 5 %	0.66W ± 5 %
0.86	1:2	0.50	1.25	1.29 W ± 5 %	1.34 W ± 4 %
0.86	1:2	0.80	2.00	2.11 W ± 5 %	2.23 W ± 4 %
0.86	1:2	1.00	2.50	2.55 W ± 5 %	2.73 W ± 4 %
0.86	1:2	1.50	3.75	4.03 W ± 5 %	4.29 W ± 5 %
0.86	1:2	2.00	5.00	5.19 W ± 5 %	5.47 W ± 4 %
0.86	1:2	2.50	6.25	6.67 W ± 5 %	7.10 W ± 4 %
0.86	1:2	3.00	7.50	7.81 W ± 5 %	8.22 W ± 4 %

ตารางที่ 4-17 (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	ระดับความเข้ม		กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ (Watts)	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-1	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-10
	Pulse	W/cm ²			
0.86	CW	0.25	1.25	1.42 W ± 5 %	1.52 W ± 4 %
0.86	CW	0.50	2.50	2.90 W ± 5 %	3.09 W ± 4 %
0.86	CW	0.80	4.00	4.71 W ± 6 %	5.10 W ± 4 %
0.86	CW	1.00	5.00	5.73 W ± 6 %	6.23 W ± 4 %
0.86	CW	1.50	7.50	9.07 W ± 5 %	9.70 W ± 4 %
0.86	CW	2.00	10.00	11.77 W ± 5 %	12.39 W ± 4 %
2	1:10	0.25	0.13	0.13 W ± 5 %	0.14 W ± 6 %
2	1:10	0.50	0.25	0.25 W ± 5 %	0.26 W ± 7 %
2	1:10	0.80	0.40	0.42 W ± 4 %	0.42 W ± 5 %
2	1:10	1.00	0.50	0.51 W ± 4 %	0.52W ± 5 %
2	1:10	1.50	0.75	0.80 W ± 4 %	0.82 W ± 5 %
2	1:10	2.00	1.00	1.04 W ± 5 %	1.07 W ± 4 %
2	1:10	2.50	1.25	1.34 W ± 4 %	1.38 W ± 4 %
2	1:10	3.00	1.50	1.56 W ± 4 %	1.60 W ± 4 %
2	1:5	0.25	0.25	0.23 W ± 5 %	0.23 W ± 6 %
2	1:5	0.50	0.50	0.47 W ± 4 %	0.47 W ± 5 %
2	1:5	0.80	0.80	0.76 W ± 4 %	0.77 W ± 5 %
2	1:5	1.00	1.00	0.93 W ± 4 %	0.94 W ± 4 %
2	1:5	1.50	1.50	1.47 W ± 4 %	1.50 W ± 4 %
2	1:5	2.00	2.00	1.88 W ± 4 %	1.91 W ± 4 %
2	1:5	2.50	2.50	2.43 W ± 4 %	2.49 W ± 4 %
2	1:5	3.00	3.00	2.81 W ± 4 %	2.91 W ± 4 %
2	1:2	0.25	0.63	0.59 W ± 5 %	0.60 W ± 5 %
2	1:2	0.50	1.25	1.19 W ± 4 %	1.20 W ± 4 %

ตารางที่ 4-17 (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	ระดับความเข้ม		กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ (Watts)	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-1	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-10
	Pulse	W/cm ²			
2	1:2	0.80	2.00	1.93 W ± 4 %	1.98 W ± 4 %
2	1:2	1.00	2.50	2.36 W ± 4 %	2.42 W ± 4 %
2	1:2	1.50	3.75	3.67 W ± 4 %	3.78 W ± 4 %
2	1:2	2.00	5.00	4.73 W ± 4 %	4.84 W ± 4 %
2	1:2	2.50	6.25	6.11 W ± 4 %	6.26 W ± 4 %
2	1:2	3.00	7.50	7.05 W ± 4 %	7.25 W ± 4 %
2	CW	0.25	1.25	1.35 W ± 4 %	1.36 W ± 4 %
2	CW	0.50	2.50	2.70 W ± 4 %	2.72 W ± 5 %
2	CW	0.80	4.00	4.37 W ± 4 %	4.50 W ± 4 %
2	CW	1.00	5.00	5.37 W ± 4 %	5.45 W ± 4 %
2	CW	1.50	7.50	8.32 W ± 4 %	8.55 W ± 4 %
2	CW	2.00	10.00	10.68 W ± 4 %	10.92 W ± 4 %
3	1:10	0.25	0.13	0.14 W ± 5 %	0.13 W ± 9 %
3	1:10	0.50	0.25	0.25 W ± 4 %	0.26 W ± 7 %
3	1:10	0.80	0.40	0.42 W ± 4 %	0.42 W ± 5 %
3	1:10	1.00	0.50	0.51 W ± 4 %	0.51 W ± 5 %
3	1:10	1.50	0.75	0.80 W ± 4 %	0.80 W ± 4 %
3	1:10	2.00	1.00	1.03 W ± 4 %	1.04 W ± 4 %
3	1:10	2.50	1.25	1.33 W ± 4 %	1.34 W ± 4 %
3	1:10	3.00	1.50	1.55 W ± 4 %	1.55 W ± 4 %
3	1:5	0.25	0.25	0.24 W ± 4 %	0.23 W ± 6 %
3	1:5	0.50	0.50	0.46 W ± 4 %	0.47 W ± 5 %
3	1:5	0.80	0.80	0.76 W ± 4 %	0.77 W ± 4 %
3	1:5	1.00	1.00	0.93 W ± 4 %	0.93 W ± 4 %

ตารางที่ 4-17 (ต่อ)

ความถี่ (MHz)	ระดับความเข้ม		กำลังคลื่นอัลตราซาวด์ (Watts)	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-1	ค่าที่วัดได้และ ค่าความไม่แน่นอน UPM DT-10
	Pulse	W/cm ²			
3	1:5	1.50	1.50	1.44 W ± 4 %	1.45 W ± 4 %
3	1:5	2.00	2.00	1.84 W ± 4 %	1.85 W ± 4 %
3	1:5	2.50	2.50	2.38 W ± 4 %	2.40 W ± 4 %
3	1:5	3.00	3.00	2.76 W ± 4 %	2.80 W ± 4 %
3	1:2	0.25	0.63	0.60 W ± 4 %	0.60 W ± 4 %
3	1:2	0.50	1.25	1.19 W ± 4 %	1.17 W ± 4 %
3	1:2	0.80	2.00	1.92 W ± 4 %	1.94 W ± 4 %
3	1:2	1.00	2.50	2.34 W ± 4 %	2.35 W ± 4 %
3	1:2	1.50	3.75	3.63 W ± 4 %	3.66 W ± 4 %
3	1:2	2.00	5.00	4.63 W ± 4 %	4.68 W ± 4 %
3	1:2	2.50	6.25	5.98 W ± 4 %	6.02 W ± 4 %
3	1:2	3.00	7.50	6.93 W ± 4 %	7.03 W ± 4 %
3	CW	0.25	1.25	1.35 W ± 4 %	1.34 W ± 4 %
3	CW	0.50	2.50	2.67 W ± 4 %	2.65 W ± 4 %
3	CW	0.80	4.00	4.33 W ± 4 %	4.38 W ± 4 %
3	CW	1.00	5.00	5.29 W ± 4 %	5.32 W ± 4 %
3	CW	1.50	7.50	8.19 W ± 4 %	8.25 W ± 4 %
3	CW	2.00	10.00	10.45 W ± 4 %	10.55 W ± 4 %