

b 10726661

การศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์  
ในผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติ

A STUDY OF TYMPANOMETRY BY USING PROBE TONE FREQUENCY  
630 HZ IN NORMAL HEARING ADULTS



ฉบับนี้ทนาย

จาก

บัณฑิตศึกษา ศ. ม.มหิดล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาศิลปศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาความผิดปกติของการสื่อความหมาย

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล

พ.ศ. 2540

ณ

กท๔๔

๕๕๔๐

Copyright by Mahidol University

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์

ในผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติ

กนกพร อินทร์พรค์

กนกพร คงกระพันธ์

ผู้วิจัย

เจียมจิต ถวิล

เจียมจิต ถวิล , วท.บ. (สุขศึกษา), ศศ.ม.

ประธานกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

ศิริพันธ์ ศรีวันยงค์

ศิริพันธ์ ศรีวันยงค์ , ศศ.บ. (ภาษาศาสตร์),

M.S. (Audiology)

กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

สุมาลี สิงหนิยม

สุมาลี สิงหนิยม , วท.บ. (คณิตศาสตร์),

วท.ม. (ชีวสถิติ)

กรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์

อดุลย์ วิริยะเวชกุล

อดุลย์ วิริยะเวชกุล , พ.บ. , น.บ. , F.R.C.P.

คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย

เจียมจิต ถวิล

เจียมจิต ถวิล , วท.บ. (สุขศึกษา), ศศ.ม.

ประธานคณะกรรมการประจำหลักสูตรศิลปศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาความผิดปกติของการสื่อความหมาย

คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์  
ในผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติ

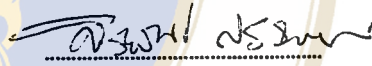
ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดตามหลักสูตร  
ปริญญาศิลปศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาความผิดปกติของการสื่อความหมาย  
วันที่ 29 เมษายน 2540



กนกพร คงกระพันธ์  
ผู้วิจัย



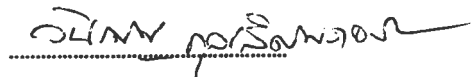
เจียมจิต ถวิล , วท.บ. (สุขศึกษา), ศศ.ม.  
ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



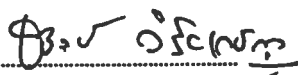
ศิริพันธ์ ศรีวันยงค์ , ศศ.บ. (ภาษาศาสตร์),  
M.S. (Audiology)  
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



สุมาลี สิงหนิยม , วท.บ. (คณิตศาสตร์),  
วท.ม. (ชีวสถิติ)  
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

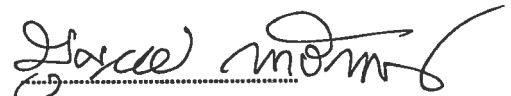


วันเพ็ญ กุลเลิศพรเจริญ , ค.บ. , ศศ.ม.  
กรรมการสอบวิทยานิพนธ์



อดุลย์ วิริยะเวชกุล , พ.บ. , น.บ. , F.R.C.P.  
คณบดี

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล



บุญชอบ พงษ์พาณิชย์ , พ.บ. , FACC.  
คณบดี

คณะแพทยศาสตร์ โรงพยาบาลรามาธิบดี  
มหาวิทยาลัยมหิดล

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวกนกพร คงกระพันธ์

วัน เดือน ปีเกิด 14 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2508

สถานที่เกิด จังหวัดสุโขทัย ประเทศไทย

ประวัติการศึกษา วิทยาลัยพยาบาลสวรรคภ์ระชาภิรักษ์ นครสวรรค์ พ.ศ. 2526-2530

ประกาศนียบัตรพยาบาลและผดุงครรภ์ชั้นสูง

มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช พ.ศ. 2534-2536

สาธารณสุขศาสตรบัณฑิต

มหาวิทยาลัยมหิดล พ.ศ. 2536-2540

ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาความผิดปกติของการสื่อความหมาย

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความอนุเคราะห์เป็นอย่างดียิ่งจากบุคคลหลายท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์เจียมจิต ถวิล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และอาจารย์ศิริพันธ์ ศรีวันยงค์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งได้กรุณาสละเวลา ให้คำแนะนำช่วยเหลือให้ข้อคิดเห็น ชี้แนะแนวทางที่เป็นประโยชน์และมีคุณค่าสำหรับการวิจัยครั้งนี้ ตลอดจนช่วยตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ทุกขั้นตอนด้วยความเอาใจใส่อย่างดียิ่ง

ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์สุมาลี สิงหนิยม ที่ได้กรุณาช่วยเหลือให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูลและช่วยตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ ขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์วันเพ็ญ กุลเลิศพรเจริญ ที่กรุณาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ และให้คำแนะนำที่มีประโยชน์

ขอกราบขอบพระคุณนายแพทย์สถาพร วงษ์เจริญ คุณสารา วงษ์เจริญ และฝ่ายการพยาบาลโรงพยาบาลสุโขทัยที่อนุญาตให้ผู้วิจัยลาศึกษาต่อในครั้งนี้อย่างเต็มใจ รวมถึงให้ข้อแนะนำและให้กำลังใจในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณนักศึกษาปริญญาโท สาขาความผิดปกติของการสื่อความหมาย เจ้าหน้าที่เวชระเบียน และเจ้าหน้าที่ตรวจเอกสารผู้ที่มาตรวจร่างกายก่อนไปทำงานต่างประเทศ โรงพยาบาลรามาริบัติที่ให้ความร่วมมือเป็นอย่างดีในการเก็บรวบรวมข้อมูล และบุคคลที่สำคัญยิ่งที่ทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี คือ คุณสุภัทรา พจนารณ เจ้าหน้าที่คลินิกโสตสัมผัสและการพูด โรงพยาบาลรามาริบัติ

ท้ายสุดนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อคุณแม่ คุณตาคุณยาย น้องสาวทั้ง 3 คน เพื่อนนักศึกษาปริญญาโท เพื่อนพยาบาล และคุณบุญทาบ อริยภวงค์ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ สนับสนุนและเป็นที่กำลังใจที่สำคัญยิ่งแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา

กนกพร คงกระพันธ์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์ ในผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติ
ผู้วิจัย	กนกพร คงกระพันธ์
ปริญญา	ศิลปศาสตรมหาบัณฑิต (ความผิดปกติของการสื่อความหมาย)
คณะกรรมการควบคุมวิทยานิพนธ์	เจียมจิต ถวิล , วท.บ. (สุขศึกษา) , ศศ.ม. ศิริพันธ์ ศรีวันยงค์ , ศศ.บ. (ภาษาศาสตร์) , M.S. (Audiology) สุมาลี สิงหนิยม , วท.บ. (คณิตศาสตร์) , วท.ม. (ชีวสถิติ)
วันที่สำเร็จการศึกษา	29 เมษายน พ.ศ. 2540

### บทคัดย่อ

การทดสอบ tympanometry โดยใช้ high frequency probe tone (เช่น 630 Hz) เป็นการทดสอบวิธีหนึ่งซึ่งใช้ร่วมกับการตรวจอื่นในการวินิจฉัยความผิดปกติของหูชั้นกลาง โดยเฉพาะพยาธิสภาพของ tympanic membrane และ ossicular chain เนื่องจากยังไม่มีการศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 630 Hz ในคนไทย งานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มคนไทยที่มีการได้ยินปกติเพศชายและเพศหญิงจำนวน 120 หู เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคือเครื่อง acoustic immittance ชื่อ Virtual รุ่น model 310 ใช้ pressure direction ascending direction อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 125 daPa/second ความดังของเสียง 85 dB SPL

ผลการศึกษาพบว่ารูปร่างของ tympanogram เป็นทั้ง single-peaked และ notched tympanogram โดยถ้าแสดงในรูปของ polar notation จะเป็น single-peaked tympanogram (1Y) 98.4% และเป็น notched tympanogram (3Y) 1.6% ถ้าแสดงในรูปของ rectangular notation จะเป็น single-peaked tympanogram (1B1G) 89.2% และเป็น notched tympanogram 10.8% โดยแบ่งเป็นรูป 3B1G 10% และ 3B3G 0.8% ค่าเฉลี่ยของ amplitude และ tympanometric peak pressure (TPP) ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz มีค่าเท่ากับ 2.13 mmhos และ 44.58 daPa ตามลำดับซึ่งมากกว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude และ TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ( $\bar{x}$  = 0.72 mmhos และ 40.94 daPa ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p=0.000$   $p=0.000$  ตามลำดับ) และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y, B, G tympanogram ในเพศชาย ( $\bar{x}$  = 2.38, 1.61, 2.14 mmhos ตามลำดับ) เปรียบเทียบกับเพศหญิง ( $\bar{x}$  = 1.88, 1.47, 1.35 mmhos ตามลำดับ) พบว่าเพศชายมีค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y, G

typanogram มากกว่าเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p=0.002$   $p=0.000$  ตามลำดับ) แต่ค่าเฉลี่ยของ B typanogram ในเพศชายไม่แตกต่างจากเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p=0.207$ ) และเมื่อพิจารณาค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y, B, G typanogram ในเพศชาย ( $\bar{x}= 47.42, 48.79, 39.08$  daPa ตามลำดับ) เปรียบเทียบกับเพศหญิง ( $\bar{x}= 41.75, 42.54, 32.92$  daPa ตามลำดับ) พบว่าเพศชายมีค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y, B, G typanogram มากกว่าเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p=0.004$   $p=0.008$   $p= 0.001$  ตามลำดับ)





( $\bar{x}$ = 2.38, 2.14 mmhos, respectively) were significantly greater ( $p=0.002$   $p=0.000$ , respectively) than that in females ( $\bar{x}$ = 1.88, 1.35 mmhos, respectively) but the mean amplitude of B tympanogram in males ( $\bar{x}$ = 1.61 mmhos) was not significantly different ( $p=0.207$ ) from that in females ( $\bar{x}$ = 1.47 mmhos). The mean TPP of Y, B, G tympanogram in males ( $\bar{x}$ = 47.42, 48.79, 39.08 daPa, respectively) were significantly different ( $p=0.004$   $p=0.008$   $p=0.001$ ) from that in females ( $\bar{x}$ = 41.75, 42.54, 32.92 daPa, respectively).



## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก-ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค-ฆ
สารบัญตาราง	ง-จ
สารบัญภาพ	ฉ-ช
บทที่	
1. บทนำ	1
2. วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	6
3. วิธีดำเนินการศึกษา	82
4. ผลการศึกษา	90
5. อภิปราย สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ	101
บรรณานุกรม	109-116
ภาคผนวก	
ก. ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz	117-121
ข. ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz	122-123
ค. แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency ต่างๆ	124-125
ง. แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับค่า amplitude ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz หรือใกล้เคียง	126-127
จ. แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz หรือใกล้เคียง	128

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	แสดงร้อยละของรูปร่าง Y, B-G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติจำนวน 120 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz pressure direction ชนิด ascending direction และ rate 125 daPa/second	91
2	แสดงร้อยละของรูปร่าง Y, B-G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชาย 60 หู เพศหญิง 60 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz pressure direction ชนิด ascending direction และ rate 125 daPa/ second	92
3	แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และพิสัยของ amplitude ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติ 120 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz	93
4	แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า amplitude ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศหญิงและเพศชายเมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz	94
5	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz ด้วยสถิติ pair t-test	95
6	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ amplitude Y, B, G tympanogram ในเพศชาย และเพศหญิงที่มีการได้ยินปกติเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ด้วยสถิติ t-test	96
7	แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ พิสัยของ TPP ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติจำนวน 120 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz	97
8	แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ TPP ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายและเพศหญิงเมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz	98
9	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz ด้วยสถิติ pair t-test	99

ตารางที่	หน้า
10 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย TPP ของ Y, B, G tympanogram ในเพศชาย และเพศหญิงที่มีการได้ยินปกติเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ด้วย สถิติ t-test	100
11 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศชาย	117-119
12 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศหญิง	120-121
13 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศชาย	122
14 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศหญิง	123
15 แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency ต่างๆ	124-125
16 แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับค่า amplitude ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz หรือใกล้เคียง	126-127
17 แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz หรือใกล้เคียง	128

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1	แสดงความสัมพันธ์ของแรงและความเร็วในการเคลื่อนที่ของ mass, spring และ friction	16
2-3	การวิเคราะห์หาค่า impedance ของระบบโดยนำระบบ vector มาใช้	18
4-5	การวิเคราะห์หาค่า admittance ของระบบโดยระบบ vector มาใช้	19
6	แสดงรูปร่างของ susceptance tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency ต่างกัน	22
7	แสดงความสัมพันธ์ของ resistance และ reactance กับความถี่ของเสียง (การศึกษาของ Zwislocki, 1975 อ้างใน 22)	23
8	แสดงความสัมพันธ์ของ mass, stiffness และ friction กับ frequency	24
9	แสดงความสัมพันธ์ของ resistance และ reactance กับความถี่ (การศึกษาของ Morton และ Jones, 1956 อ้างใน 31)	25
10	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานการเคลื่อนไหวของระบบที่เกิดจาก mass, stiffness กับความถี่ในการเคลื่อนไหว	25
11	แสดงความสัมพันธ์ของ resistance และ reactance กับความถี่ของเสียง (การศึกษาของ Shaw EAG, 1980 อ้างใน 42)	26
12	แสดงความสัมพันธ์ของ resistance และ reactance กับความถี่ของเสียงในกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ กลุ่ม otosclerosis และกลุ่ม ossicular separation	27
13	แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ tympanogram ตาม probe tone frequency เมื่อใช้ ascending และ descending direction	31
14	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า X และ R ที่ทำให้เกิด Y, B, G tympanogram แบบต่างๆ ที่พบได้ในหูปกติ	40
15	แสดงรูปร่างของ X, R tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz	41
16	แสดง sharp W shaped tympanogram ที่พบในคนที่มีการได้ยินปกติซึ่งเกิดขึ้นจาก artifact ของเครื่องมือ	42

รูปที่		หน้า
17	แสดงกราฟการเกิด tympanogram แบบต่างๆ เมื่อใช้ probe tone frequency 200-2000 Hz descending direction rate 15 daPa/second	42
18	แสดงตำแหน่งของ TPP เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz	45
19	แสดงรูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ ascending และ descending direction	57
20	แสดงตำแหน่งของ TPP ของ Y, B, G, X tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ascending และ descending direction	60
21	แสดงการเปลี่ยนแปลง amplitude ของ Y, B, G tympanogram ตามจำนวนครั้ง ที่ทดสอบโดยใช้ ascending และ descending direction	65
22	แสดงภาพการเปรียบเทียบ ear canal volume ที่ได้จากการทดสอบ tympanometry กับ ear canal volume ที่วัดได้โดยตรงเมื่อใช้ ear canal pressure ต่างกัน	67
23	แสดงค่า resistance และ compliance ที่เปลี่ยนแปลงตาม ear canal volume	68
24	แสดงค่า resistance และ reactance ที่เปลี่ยนแปลงตาม ear canal volume เปรียบเทียบกับค่า resistance และ reactance ในกลุ่ม otosclerosis และ disarticulation	68
25	แสดงค่าเฉลี่ยของค่า static compliance ในแต่ละช่วงอายุ	70
26	แสดงค่า static compliance ของเพศชายและเพศหญิงในแต่ละช่วงอายุ (การศึกษาของ 89)	71
27	แสดงค่า amplitude ของ Y tympanogram ในกลุ่มเด็กและผู้ใหญ่	75
28	แสดงค่า static compliance ของเพศชายและเพศหญิงในแต่ละช่วงอายุ (การศึกษาของ 89)	77
29	แสดง ear canal volume ของเพศชายและเพศหญิงในช่วงอายุต่างๆกัน	78
30	ตัวอย่างการบรรยายรูปร่างของ admittance tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz	85
31	ตัวอย่างการบรรยายรูปร่างของ susceptance-conductance tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz	86
32	ตัวอย่างการหาค่า amplitude (หน่วย mmhos)	87
33	ตัวอย่างการหาค่า TPP (หน่วย daPa)	88

## บทที่ 1

### บทนำ

การเกิดพยาธิสภาพในหูชั้นกลาง (middle ear) มีผลทำให้ระบบการทำงานของหูชั้นกลางในการส่งต่อพลังงานเสียงเปลี่ยนแปลงไปซึ่งมีผลทำให้มีการสูญเสียการได้ยินเกิดขึ้นได้ พยาธิสภาพในหูชั้นกลางพบได้บ่อยๆ โดยเฉพาะในเด็ก ทำให้เกิดความไม่สุขสบาย สูญเสียการได้ยินและอาจมีภาวะแทรกซ้อนที่รุนแรง เช่น ฝีในสมองซึ่งอาจเป็นอันตรายถึงแก่ชีวิตได้ ดังนั้นการวินิจฉัยปัญหาของหูชั้นกลางได้ในระยะแรกๆ จะช่วยให้รักษาได้เร็วขึ้น มีผลแทรกซ้อนน้อยลง และสิ้นเปลืองเศรษฐกิจน้อย

โดยปกติหูชั้นกลางมีทางติดต่อกับบรรยากาศภายนอกทางท่อยูสเทเชียน (eustachian tube) และการที่มีอากาศผ่านเข้าออกทางท่อยูสเทเชียนทำให้ความดันอากาศในหูชั้นกลางเท่ากับความดันอากาศในช่องหูชั้นนอก มีผลให้เยื่อแก้วหู (tympanic membrane) และกระดูก 3 ชิ้นในหูชั้นกลางคือ malleus, incus, stapes ทำงานได้ตามปกติ พลังงานเสียงที่ผ่านเข้าไปทางช่องหูชั้นนอกจะผ่านเข้าไปในหูชั้นกลางได้ดีที่สุดเมื่อความดันอากาศในช่องหูชั้นนอกและหูชั้นกลางไม่ต่างกัน ซึ่งโดยปกติแล้วจะอยู่ที่ระดับความดันบรรยากาศ 0 daPa (1) การเกิดความดันอากาศในหูชั้นกลางต่างจากความดันบรรยากาศปกติจะทำให้ระบบของหูชั้นกลางมีแรงต้านการเดินทางของพลังงานเสียง (acoustic impedance) มากขึ้นหรือกล่าวในทางกลับกันว่าระบบของหูชั้นกลางยอมให้พลังงานเสียงเดินทางเข้าสู่หูชั้นกลาง (acoustic admittance) น้อยลง (2) จากการศึกษาเหล่านี้ Terkildsen and Thomsen ได้พัฒนา tympanometry มาใช้ในการศึกษาความดันอากาศในหูชั้นกลาง (middle ear pressure) และต่อมาในต้นปี 1970 จึงมีการใช้ tympanometry เป็นการทดสอบอย่างหนึ่งในคลินิกตรวจการได้ยิน (3)

tympanometry เป็นการตรวจเพื่อประเมินการทำงานของหูชั้นกลาง โดยจะวัด acoustic immittance ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของระบบหูชั้นกลางและเยื่อแก้วหูสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศในช่องหูชั้นนอก (1) แสดงผลออกมาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง acoustic immittance ซึ่งอาจอยู่ในรูปของ admittance, susceptance, conductance, phase angle, reactance หรือ resistance กับการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศในช่องหูชั้นนอกเรียกว่า tympanogram และการแปลผล tympanogram พิจารณาจาก shape, amplitude และ peak pressure (2, 4, 5) ข้อมูลที่ได้มีประโยชน์ในการวินิจฉัยแยกโรคในหูชั้นกลางได้ (6)

นอกจากนี้ tympanometry ยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับระบบการส่งพลังงานเสียงของหูชั้นกลางซึ่งไม่พบใน pneumatic otoscopy (7) และให้ข้อมูลดีกว่า pure tone audiometry ในกรณีที่ตรวจเด็ก (2) แต่ทั้งนี้ควรใช้ tympanometry ช่วยในการวินิจฉัยโรคของหูชั้นกลางร่วมกับ otoscopic examination, audiometry, acoustic reflex และประวัติของผู้ป่วย (8) ประโยชน์ของ tympanometry มีดังต่อไปนี้

1. ช่วยวินิจฉัยความผิดปกติของหูชั้นกลาง
2. ช่วยประเมินระบบการส่งต่อพลังงานของหูชั้นกลาง
3. ช่วยประเมินสภาพความดันอากาศในหูชั้นกลาง
4. ช่วยประเมินหน้าที่ของท่อยูสเตเชียนในหูชั้นกลาง

(2, 7, 9, 10, 11)

tympanometry เป็นการตรวจที่ทำได้เร็ว ไม่เจ็บ ต้องการความร่วมมือจากผู้ป่วยน้อย ตรวจได้ง่ายในทุกกลุ่มประชากร (5) โดยสอด probe tip เข้าไปในช่องหูชั้นนอกแล้วให้เสียง (probe signal หรือ probe tone) และความดันอากาศพร้อมๆกัน บันทึกการเปลี่ยนแปลงระดับความดังของเสียงเป็น sound pressure level (SPL) ที่สะท้อนออกมา การเปลี่ยนแปลงของ SPL ที่บันทึกได้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของ impedance หรือ admittance ของหูชั้นกลางและเยื่อแก้วหู (10) สำหรับ probe signal นั้น Terkildsen และ Thomsen ได้เริ่มใช้เสียงที่มีความถี่ 220 เฮิร์ตซ์ โดยจะให้ความดังของเสียงน้อยกว่า stapedial reflex threshold ของแต่ละคน (3) ซึ่งได้มีการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบ tympanometry โดยใช้เสียงที่มีความถี่ 220 เฮิร์ตซ์หลายการศึกษาและพบว่าสามารถช่วยในการวินิจฉัยโรคของหูชั้นกลางได้อย่างมาก (12) ต่อมาเมื่อผู้ศึกษาพบว่า การทดสอบ tympanometry โดยใช้เสียงที่มีความถี่ 220 เฮิร์ตซ์ไม่สามารถวินิจฉัยโรค otosclerosis ได้อย่างชัดเจน เนื่องจาก tympanogram เมื่อใช้เสียงที่มีความถี่ 220 เฮิร์ตซ์ในผู้ป่วยกลุ่มนี้มีรูปร่างเหมือนกับคนที่มีการได้ยินปกติคือเป็น type A tympanogram (13, 14) Liden และคณะ (6) จึงเริ่มศึกษา tympanometry โดยใช้เสียงที่มีความถี่มากกว่า 220 เฮิร์ตซ์ พบว่ารูปร่างของ tympanogram แตกต่างไปจากเมื่อใช้เสียงความถี่ 220 เฮิร์ตซ์ ทำให้มีผู้ศึกษาโดยใช้เสียงที่มีความถี่สูงในการทดสอบ tympanometry ในผู้ป่วยที่มีความผิดปกติของหูชั้นกลางชนิดต่างๆ และได้ผลว่าการใช้เสียงที่มีความถี่สูงจะให้ข้อมูลในการวินิจฉัยโรคของหูชั้นกลางมากกว่าการใช้เสียงที่มีความถี่ต่ำ โดยเฉพาะโรคที่เกี่ยวข้องกับระบบ tympano-ossicular (3, 7, 9, 11, 15, 16, 17, 18) ทั้งนี้เนื่องจากการมีพยาธิสภาพในหูชั้นกลางทำให้มีการเปลี่ยนแปลง resonance frequency ของหูชั้นกลาง การใช้เสียงที่มีความถี่ที่ใกล้เคียงกับ resonance frequency (750-900 เฮิร์ตซ์) ของหูชั้นกลางจะให้ข้อมูลในการ

วินิจฉัยแยกโรคของหูชั้นกลางได้ดีกว่าเสียงที่มีความถี่ต่างจาก resonance frequency มาก (5) ซึ่ง Van Camp และคณะ (3) ได้กำหนดให้เสียงที่มีความถี่ 660 หรือ 678 เฮิรตซ์ เป็น high frequency probe tone เนื่องจากเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 660 หรือ 678 เฮิรตซ์จะพบ multipeaked tympanogram ได้มากในคนปกติทำให้วินิจฉัยผิดพลาดได้ นอกจากนี้ยังประเมินปริมาตรของช่องหูชั้นนอก (ear canal volume) และ acoustic immittance ของหูชั้นกลางได้ยาก

คลินิกโสตสัมผัสและการพูด โรงพยาบาลรามาธิบดีก็ได้มีการใช้เสียงที่มีความถี่ 630 เฮิรตซ์ในการทดสอบ tympanometry เพื่อช่วยในการวินิจฉัยโรคของหูชั้นกลางเช่นกัน แต่เนื่องจากยังไม่มีข้อมูลของ tympanogram ที่ได้จากการทดสอบในคนหูปกติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะทำการศึกษาผลการทดสอบ tympanometry ที่ใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์ในคนหูปกติ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์แยกโรคของหูชั้นกลางต่อไป

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษารูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์
2. เพื่อหาค่า amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์
3. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ amplitude ของ admittance tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 226 และ 630 เฮิรตซ์
4. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบ amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์ ในเพศหญิงและเพศชาย
5. เพื่อศึกษาดำแหน่ง tympanometric peak pressure ของ tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์
6. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบตำแหน่ง tympanometric peak pressure ของ admittance tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 226 และ 630 เฮิรตซ์
7. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบตำแหน่ง tympanometric peak pressure ของ tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 630 เฮิรตซ์ ในเพศหญิงและเพศชาย

### สมมติฐานของการศึกษา

1. รูปร่างของ admittance tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 226 และ 630 เฮิรตซ์ แตกต่างกัน
2. amplitude ของ admittance tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 226 และ 630 เฮิรตซ์ มีค่าต่างกัน
3. tympanometric peak pressure ของ admittance tympanogram เมื่อใช้เสียงความถี่ 226 และ 630 เฮิรตซ์ อยู่ที่ตำแหน่งต่างกัน
4. amplitude ของ admittance, susceptance, conductance tympanogram ในเพศหญิงและเพศชายมีค่าต่างกัน
5. tympanometric peak pressure ของ admittance, susceptance, conductance tympanogram ในเพศหญิงและเพศชายอยู่ที่ตำแหน่งต่างกัน

### คำนิยามศัพท์เฉพาะ

1. tympanometry เป็นการตรวจเพื่อประเมินการทำงานของ middle ear โดยการวัดค่า acoustic immittance สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศในช่องหูชั้นนอก (ear canal pressure) (1)
2. tympanogram เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง acoustic immittance ซึ่งอาจอยู่ในรูปของ reactance (X), resistance (R), susceptance (B) หรือ conductance (G) กับ ear canal pressure (1)
3. acoustic impedance (Z) เป็นแรงต้านของระบบต่อการไหลของพลังงานเสียง แสดงเป็นอัตราส่วนระหว่าง sound pressure และ volume velocity แรงต้านการเคลื่อนที่นี้ประกอบด้วย reactance และ resistance (8, 36)
4. acoustic admittance (Y) เป็นส่วนกลับของ acoustic impedance ซึ่งก็คือการที่ระบบยอมให้พลังงานเสียงไหลผ่าน แสดงเป็นอัตราส่วนระหว่าง volume velocity และ sound pressure (8, 36)
5. acoustic immittance เป็นคำที่ใช้เรียก acoustic impedance หรือ acoustic admittance หรือเรียกทั้ง acoustic impedance และ acoustic admittance (8)

6. reactance เป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของระบบที่เกิดจาก mass และ stiffness ถ้าเป็นแรงต้านที่เกิดจาก mass เรียกว่า mass reactance ( $X_m$ ) ถ้าเป็นแรงต้านที่เกิดจาก stiffness เรียกว่า compliant reactance ( $X_c$ ) (8, 36, 101)
7. susceptance เป็นส่วนกลับของ reactance ซึ่งประกอบด้วยส่วนของ mass และ stiffness เช่นเดียวกับ reactance ถ้า mass ยอมให้พลังงานไหลผ่านเรียกว่า mass susceptance ( $B_m$ ) ถ้า stiffness ยอมให้พลังงานไหลผ่านเรียกว่า compliant susceptance ( $B_c$ ) (8, 36, 101)
8. resistance เป็นแรงต้านการเคลื่อนที่ของระบบที่เกิดจากการเสียดสี (101)
9. conductance เป็นส่วนกลับของ resistance (101)
10. magnitude คือ ความยาวของ impedance หรือ admittance vector (8)
11. phase angle คือ มุมระหว่าง impedance หรือ admittance vector กับแกน X (8)
12. polar notation เป็นการแสดงค่า impedance หรือ admittance ของระบบในรูปของ magnitude กับ phase angle (3, 36, 38)
13. rectangular notation เป็นการแสดงค่า impedance หรือ admittance ของระบบในรูปของ reactance กับ resistance หรือ susceptance กับ conductance (3, 36, 38)
14. amplitude ของ tympanogram คือ acoustic immittance ของ middle ear ที่วัดได้ในระนาบของ tympanic membrane ซึ่งคำนวณจากค่า acoustic immittance ในระนาบของ probe tip ลบด้วยค่า acoustic immittance ของ ear canal volume (3, 36, 38)
15. tympanometric peak pressure (TPP) เป็นค่าที่แสดงถึง pressure status ใน middle ear (4) โดยการพิจารณาว่า peak ของ tympanogram เกิดที่ ear canal pressure เท่าไร (3)
16. resonance frequency เป็นความถี่ที่พบว่ามีความต้านของ mass เท่ากับความต้านของ stiffness (35) หรือความถี่ในการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยใช้แรงน้อยที่สุด (102)
17. probe tone frequency เป็นความถี่ของเสียงที่ใช้ในการทดสอบ tympanometry
18. hysteresis เป็นภาวะที่วัตถุไม่สามารถตอบสนองต่อแรงที่มากระทำโดยทันที (60, 83)

## บทที่ 2

### วาระกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วาระกรรมที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยเรื่อง "การศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้เสียงความถี่ 630 Hz ในผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติ" นั้น ผู้วิจัยนำเสนอเนื้อหาที่เกี่ยวข้องโดยจะกล่าวเป็น 8 หัวข้อ ดังนี้

1. anatomy and physiology of the middle ear
2. transformer action of the middle ear
3. mechanical and acoustic properties of the middle ear
4. frequency dependence of acoustic immittance
5. การศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency ต่างๆกัน
6. แนวความคิดในการเลือกใช้ probe tone frequency
7. parameter และปัจจัยที่มีผลต่อ parameter ของ tympanometry
8. การวินิจฉัยความผิดปกติของ middle ear โดยใช้ 630, 660, 678 Hz tympanometry

#### Anatomy and physiology of the middle ear

middle ear เป็นโครงสร้างที่อยู่ระหว่าง outer ear และ inner ear ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 5 ส่วน คือ

1. middle ear cavity

middle ear cavity เป็นโครงสร้างที่มีรูปร่างเป็น irregular shape ประกอบด้วยด้านต่างๆ 6 ด้าน โดยมี anterior-posterior dimension ยาวประมาณ 15 มิลลิเมตร vertical dimension ที่มากที่สุดยาวประมาณ 15 มิลลิเมตร transverse dimension ยาวประมาณ 2-6 มิลลิเมตร และมีปริมาตรประมาณ 1-2 ลูกบาศก์เซนติเมตร (21)

ด้าน lateral wall มี tympanic membrane กั้น middle ear ออกจาก outer ear ทางด้าน medial wall เป็นผนังด้านที่อยู่ติดกับ inner ear ประกอบด้วย oval window อยู่ด้านบน round window อยู่ด้านล่างและ promontary ของ basal cochlea อยู่ระหว่าง oval window และ round window ด้านบนของ oval window มี facial nerve พาดผ่าน oval window เป็นทางเปิดเข้าสู่ scala vestibular ส่วน round window เป็นทางเปิดเข้าสู่ scala tympani ของ cochlea ที่ round window มี membrane บางๆคลุมอยู่เรียกว่า secondary tympanic membrane ด้าน anterior wall ของ middle ear cavity มีรูเปิดของ eustachian tube ซึ่งอยู่สูงกว่าพื้นของ middle ear cavity ประมาณ 4 มิลลิเมตร ปลายเปิดของท่ออีกด้านหนึ่งอยู่ที่ nasopharynx ด้านบนของ anterior wall มีรูเปิดซึ่งมี tendon ของ tensor tympani ผ่านออกมา ทางด้าน posterior wall เป็นผนังที่อยู่ติดกับ mastoid cavity โดยมี tympanic aditus เป็นทางเปิดเข้าสู่ mastoid antrum ซึ่งเป็นส่วนที่ใหญ่ที่สุดของ mastoid cavity ภายใน mastoid antrum ประกอบด้วยกระดูกพรุนๆที่เรียกว่า pneumatic cell ซึ่งมีขนาดแตกต่างกันเชื่อกันว่าเป็นผลมาจากกรรมพันธุ์และสิ่งแวดล้อมและยังเชื่อกันอีกว่า pneumatic cell เป็นส่วนที่ก่อให้เกิด acoustic resonance ของ middle ear ที่ผนังด้าน posterior นั้นนอกจากจะมี tympanic aditus แล้วยังมี fossa incudis ซึ่งเป็นส่วนที่มี short process ของ incus อยู่ และ pyramidal eminence ซึ่งมี stapedius muscle อยู่ภายในและมี tendon ของ stapedius muscle ผ่านออกมาทางรูเปิดบริเวณยอดของ eminence ทางด้าน superior wall มี tegmen tympani ซึ่งเป็นกระดูกบางๆกั้นระหว่าง cranial cavity (brain cavity) กับ tympanic region บริเวณนี้จะเป็นบริเวณสำคัญหากมีการติดเชื้อใน middle ear อาจผ่านเข้าไปใน cranial cavity ได้ ส่วนทางด้าน inferior wall เป็นส่วนที่อยู่ด้านบนของ jugula bulb มีกระดูกบางๆชื่อ fundus tympani กั้นระหว่าง middle ear cavity กับ cardiovascular reservoir (20, 21, 22)

พื้นผิวภายในของ middle ear cavity บุด้วย mucous membrane และเนื่องจาก middle ear cavity ติดต่อกับ mastoid antrum ภายใน mastoid antrum จึงบุด้วย mucous membrane เช่นกัน ถ้ามีการติดเชื้อภายใน middle ear cavity ก็อาจมีการแพร่กระจายเชื้อเข้าสู่ mastoid cavity ได้ ภายใน middle ear cavity มีกลไกการแพร่กระจายและดูดซึมก๊าซ โดยจะแพร่กระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) จากเส้นเลือดที่ mucous membrane เข้าสู่ middle ear cavity และดูดซึมก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) จาก middle ear cavity เข้าสู่เส้นเลือด การแพร่กระจายก๊าซ CO<sub>2</sub> ออกจากเส้นเลือดเข้าสู่ middle ear cavity มีอิทธิพลต่อ pressure ใน middle ear cavity มากกว่าการดูดซึมก๊าซ O<sub>2</sub> เข้าสู่เส้นเลือด ดังนั้นจึงพบว่า pressure ใน middle ear cavity เป็น positive pressure (23, 24, 25) นอกจากนี้ภายใน mastoid antrum ยังมี pneumatic cell

เป็นแหล่งเก็บสำรองก๊าซให้กับ middle ear cavity อีกด้วย อากาศที่อยู่ภายใน middle ear cavity, mastoid antrum และ eustachian tube มีผลต่อการส่งพลังงานเสียงของ middle ear ซึ่งถ้ามีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่านอากาศภายใน middle ear cavity, mastoid antrum และ eustachian tube จะมีผลต่อการสั่นของ tympanic membrane แต่ถ้ามีเสียงความถี่สูงไหลผ่านอากาศภายใน middle ear cavity เท่านั้นที่มีผลต่อการสั่นของ tympanic membrane ปริมาตรของอากาศมีผลต่อระบบการส่งต่อพลังงานเสียงของ middle ear โดยที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ acoustic admittance ของ middle ear แต่เป็นสัดส่วนผกผันกับ acoustic impedance (26, 27)

## 2. tympanic membrane

tympanic membrane เป็นส่วนที่กั้นระหว่าง external ear กับ middle ear ส่วนบนของ tympanic membrane เอียงทำมุม 55° กับ ear canal มีความหนาประมาณ 0.074 มิลลิเมตร vertical dimension กว้างประมาณ 9-10 มิลลิเมตร horizontal dimension ยาวประมาณ 8-9 มิลลิเมตร มีพื้นที่ประมาณ 85 ตารางมิลลิเมตร และมีน้ำหนักประมาณ 14 มิลลิกรัม (22, 28) tympanic membrane มีผิวเรียบสีเทาขาว และมีลักษณะโปร่งแสง ส่วนบนจนถึงส่วนกลางของ tympanic membrane มี manubrium ของ malleus เกาะอยู่ ปลาย manubrium ของ malleus จะดึง tympanic membrane เข้าไปข้างในเป็นรอยบวมเรียกว่า umbo tympanic membrane ส่วนบนที่อยู่เหนือ umbo เรียกว่า pars flaccida และส่วนล่างเรียกว่า pars tensa เมื่อใช้ otoscope ตรวจดูจะเห็นผิวของ tympanic membrane สะท้อนแสงไฟจาก otoscope เรียกบริเวณที่สะท้อนแสงไฟนี้ว่า light reflex หรือ cone of light tympanic membrane ประกอบด้วยเนื้อเยื่อ 3 ชั้น คือ

2.1 outer layer เป็นเนื้อเยื่อบางๆ ต่อมาจากผิวของ ear canal

2.2 medial layer เป็น fibrous layer ซึ่งเนื้อเยื่อส่วนนี้มีเส้นใยที่มีการเรียงตัว 2 ลักษณะดังนี้

- เส้นใยที่มีการเรียงตัวเหมือนซี่ล้อรถกระจายออกจาก umbo เรียกว่า radial fiber
- เส้นใยที่มีการเรียงตัวเหมือนวงแหวนอยู่บริเวณขอบของ tympanic membrane เรียกว่า

circular fiber

medial layer เป็นเนื้อเยื่อที่พบใน tympanic membrane บริเวณ pars tensa เท่านั้น ไม่พบใน pars flaccida

2.3 inner layer เป็น mucous membrane ชนิดเดียวกันกับที่บุผนังของ middle ear cavity ไว้

(4, 28)

การเคลื่อนไหวของ tympanic membrane เกิดขึ้นเมื่อคลื่นเสียงเดินทางเข้าไปใน ear canal ทำให้โมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่และเกิดการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศที่ tympanic membrane มีผลให้ tympanic membrane เคลื่อนไหวโดยจะมีรูปแบบการเคลื่อนไหวเปลี่ยนแปลงไปตามความถี่ของเสียงที่มากระตุ้น Bekesy (อ้างใน 29) ศึกษาพบว่าที่ความถี่ 2000 Hz การเคลื่อนไหวของ tympanic membrane มีลักษณะเหมือนกับบานพับ แต่ที่ความถี่มากกว่า 2500 Hz การเคลื่อนไหวมีรูปแบบไม่แน่นอน นอกจากนี้เขายังพบว่าพื้นที่ของ tympanic membrane ที่เคลื่อนไหวได้อย่างมีประสิทธิภาพมีเพียง 2/3 ส่วนเท่านั้น Khanna และ Tonndorf (อ้างใน 30) ศึกษาในแมวพบว่า tympanic membrane บริเวณข้างๆของแนว manubrium ทั้ง 2 ข้างมีการเคลื่อนไหวมากที่สุดและที่ความถี่มากกว่า 6000 Hz รูปแบบการเคลื่อนไหวจะซับซ้อนมากขึ้น Lipscomb (20) กล่าวว่า tympanic membrane มีการเคลื่อนไหวเหมือนบานพับไม่เหมือนลูกสูบเนื่องจาก tympanic membrane ส่วนบนเกาะติดกับผนัง ear canal แน่นกว่าส่วนล่างจึงทำให้ tympanic membrane เคลื่อนไหวเหมือนกับบานพับ

### 3. auditory ossicles

auditory ossicles ประกอบด้วยกระดูก 3 ชิ้น คือ malleus, incus และ stapes กระดูกทั้ง 3 ชิ้นนี้ยึดติดกันโดย capsular ligament นอกจากนี้ยังมี ligament อีก 8 เส้นยึดกระดูกทั้ง 3 ชิ้นนี้ไว้ middle ear cavity โดยมี ligament 2 เส้นมาจาก tensor tympani และ stapedius muscle

กระดูก malleus หนักประมาณ 25 มิลลิกรัม มีรูปร่างคล้ายฆอน manubrium ของ malleus เกาะติดกับ tympanic membrane ตั้งแต่ umbo จนถึงขอบด้านบนของ tympanic membrane

กระดูก incus มีน้ำหนักประมาณ 30 มิลลิกรัม รูปร่างคล้ายตั้งอยู่ต่อจากกระดูก malleus โดยมี capsular ligament ยึดไว้ ข้อต่อระหว่างกระดูก malleus และกระดูก incus เรียกว่า incudo-malleolar joint

กระดูก stapes เป็นกระดูกชิ้นเล็กที่สุดมีน้ำหนักประมาณ 2.5 มิลลิกรัม มีรูปร่างคล้ายโกลนมาอยู่ต่อจากกระดูก incus โดยมี capsular ligament ยึดไว้ข้อต่อระหว่างกระดูก 2 ชิ้นนี้เรียกว่า incudo-stapedial joint ซึ่งเป็นข้อต่อที่ไม่แข็งแรงใน ossicular chain ส่วนปลายของ stapes เรียกว่า stapes footplate วางอยู่บน oval window ของ inner ear โดยมี fibrous annular ligament ยึดไว้ (18, 20, 31, 32)

เมื่อมีคลื่นเสียงมากระทบ tympanic membrane ทำให้ tympanic membrane เกิดการเคลื่อนไหว การเคลื่อนไหวของ tympanic membrane นี้ทำให้ ossicular chain ที่ติดอยู่กับ tympanic membrane เกิดการเคลื่อนไหวด้วย malleus และ incus จะเคลื่อนไหวแบบโยกเหมือนกัน Dahmann (อ้างใน 29) กล่าวว่า malleus และ incus เคลื่อนไหวแบบโยกรอบๆ แกนบริเวณ anterior process ของ malleus ถึง short process ของ incus สำหรับ stapes ก็มีการเคลื่อนไหวเช่นกันแต่จะมีแกนการเคลื่อนไหวและลักษณะการเคลื่อนไหวแตกต่างกันขึ้นอยู่กับความดังของเสียงที่มากระตุ้น ทั้งนี้เนื่องจากการหดตัวของกล้ามเนื้อที่ยึด stapes (19, 22) Yost (33) กล่าวว่าที่ระดับเสียงดังปานกลางแกนการเคลื่อนไหวของ stapes footplate เป็นแกนตั้ง ส่วน anterior และ posterior ของ stapes footplate จะเคลื่อนไหวเข้า-ออกจาก cochlea เหมือนลูกสูบ แต่ส่วน posterior ของ stapes footplate มีการเคลื่อนไหวน้อยมากทำให้ลักษณะการเคลื่อนไหวของ stapes footplate โดยรวมเหมือนกับบานพับ ถ้าเสียงที่มากระตุ้นเป็นเสียงที่มีความดังมากแกนการเคลื่อนไหวของ stapes footplate จะเปลี่ยนเป็นแกนนอนซึ่ง stapes footplate จะมีการเคลื่อนไหว 2 ลักษณะพร้อมๆ กันคือ เคลื่อนไหวแบบโยกคล้ายคานและเคลื่อนไหวแบบลูกสูบ การเคลื่อนไหวลักษณะดังกล่าวสามารถลดแรงที่ส่งเข้าไปใน inner ear ซึ่งเป็นกลไกการป้องกัน inner ear อย่างหนึ่ง Yost (33) ได้ทำการศึกษาการเคลื่อนไหวของ stapes ในแนวพบว่า stapes จะเคลื่อนไหวเหมือนลูกสูบเมื่อมีเสียงความถี่ต่ำที่มีความดังประมาณ 130 dB SPL มากระตุ้น แต่เมื่อเสียงกระตุ้นดัง 150 dB SPL stapes จะเคลื่อนไหวทั้งแบบลูกสูบและแบบโยกคล้ายคานพร้อมๆ กัน

#### 4. middle ear muscles

middle ear muscles ประกอบด้วยกล้ามเนื้อ 2 ชนิด คือ stapedius muscle และ tensor tympani stapedius muscle เป็นกล้ามเนื้อที่เล็กที่สุดในร่างกายคนมีความยาวประมาณ 6.3 มิลลิเมตร มีพื้นที่ตัดขวางประมาณ 4.9 ตารางมิลลิเมตร (Wever และ Lawrence อ้างใน 30, 32) stapedius muscle อยู่ใน bony canal บริเวณปลายของ bony canal เป็นปุ่มยื่นเข้าไปใน middle ear cavity เรียกว่า pyramidal eminence tendon ของ stapedius muscle ผ่านออกมาทางรูเปิดเล็กๆ ที่ยอดของ pyramidal eminence และไปยึดกับ neck ของ stapes เส้นประสาทที่มาหล่อเลี้ยง stapedius muscle คือ facial nerve ส่วน middle ear muscle อีกมัดหนึ่งเรียกว่า tensor tympani เป็นกล้ามเนื้อในหูชั้นกลางที่มีความยาวประมาณ 25 มิลลิเมตร มีพื้นที่ตัดขวาง 6 ตารางมิลลิเมตรฝังตัวอยู่ใน bony canal เหนือ eustachian tube ส่วนปลายของ bony canal ยื่นเข้าไปใน middle ear cavity เรียกว่า cochleariform process tendon ของ tensor tympani muscle จะ

ผ่านออกมาทางยอดของ cochleariform process ไปยึดกับ manubrium ของ malleus การที่กล้ามเนื้อทั้ง 2 มัดนี้อยู่ใน bony canal จะช่วยลดการสั่นของกล้ามเนื้อที่อาจจะรบกวนการส่งต่อพลังงานเสียงได้ เส้นประสาทที่มาหล่อเลี้ยง กล้ามเนื้อ tensor tympani คือ trigeminal nerve (4, 28, 32, 34)

การหดตัวของกล้ามเนื้อทั้ง 2 มัดนี้ทำให้ระบบของ middle ear มี stiffness เพิ่มขึ้นเพราะการหดตัวของ stapedius muscle ทำให้ stapes เปลี่ยนตำแหน่งและการหดตัวของ tensor tympani ทำให้ malleus เปลี่ยนตำแหน่ง การเปลี่ยนตำแหน่งของกระดูกทั้ง 2 ชิ้นนี้ทำให้ ossicular chain stiff มากขึ้น และจากการที่ ossicular chain ติดอยู่กับ tympanic membrane จึงทำให้ tympanic membrane stiff มากขึ้นด้วย การหดตัวของกล้ามเนื้อทั้ง 2 มัดนี้ช่วยลดความดังของเสียงกระตุ้นที่มีความถี่ต่ำได้เนื่องจาก stiffness เป็นองค์ประกอบหนึ่งที่ให้แรงต้านแก่ระบบซึ่งมีอิทธิพลมากเมื่อมีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่านระบบ นอกจากนี้การหดตัวของกล้ามเนื้อในหูชั้นกลางอาจจะลด resonance ใน middle ear ได้เมื่อมีเสียงที่มีความถี่มากกว่า 1000-2000 Hz ไหลผ่านระบบ (30)

โดยปกติแล้วการหดตัวของกล้ามเนื้อในหูชั้นกลางอยู่นอกอำนาจจิตใจ แต่ก็มีบางคนสามารถควบคุมการหดตัวของกล้ามเนื้อทั้ง 2 มัดนี้ได้ การหดตัวของกล้ามเนื้อในหูชั้นกลางส่วนใหญ่เกิดจากมีเสียงดังมากกระตุ้นซึ่งเสียงจะต้องดังประมาณ 80 dBSL (33, 34) หรือมากกว่า 85 dB SPL (35) ที่ความถี่น้อยกว่า 2000 Hz เท่านั้น เนื่องจากการหดตัวของกล้ามเนื้อทั้ง 2 มัดนี้ทำให้ ossicular chain stiff ซึ่งมีผลต่อการส่งเสียงความถี่ต่ำ และการหดตัวของกล้ามเนื้อจะทำให้การส่ง sound pressure ทาง ossicular chain ลดลงซึ่งช่วยลดเสียงได้ประมาณ 15-20 dB หรือประมาณ 0.6-0.7 dB ต่อ 1 dB ของเสียงที่เพิ่มขึ้นจากระดับเสียงที่มากกระตุ้นให้เริ่มเกิดการหดตัวของกล้ามเนื้อในหูชั้นกลาง (20, 33, 35) Pong และ Peake (อ้างใน 30) พบว่าการหดตัวของ stapedius muscle ที่แข็งแรงนั้นสามารถลดเสียงที่ความถี่ 1000-2000 Hz ได้ถึง 30 dB แต่ที่ความถี่มากกว่า 2000 Hz ลดได้เพียง 10 dB จะเห็นได้ว่าหน้าที่ในการป้องกันเสียงโดยการหดตัวของกล้ามเนื้อในหูชั้นกลางมีข้อจำกัดคือ ป้องกันเสียงได้น้อยถ้าเสียงกระตุ้นมีความถี่เกิน 2000 Hz และข้อจำกัดอีกข้อหนึ่งคือ ระยะเวลาที่กล้ามเนื้อเริ่มหดตัวโดย stapedius muscle ใช้เวลา 63 มิลลิวินาที และ tensor tympani ใช้เวลา 132 มิลลิวินาที ดังนั้นเสียงที่มีช่วงเวลาการเกิดสั้น เช่น เสียงยิงปืน กล้ามเนื้อหดตัวไม่ทันจึงไม่สามารถป้องกันเสียงได้ (20) การหดตัวของกล้ามเนื้อในหูชั้นกลางนอกจากเกิดจากเสียงดังแล้วการกระพริบตา การกรอกตา การเคลื่อนไหวกล้ามเนื้อปาก เช่น การเคี้ยว การกลืน การหายใจ ก็ทำให้กล้ามเนื้อในหูชั้นกลางหดตัวด้วย

## 5. eustachian tube

eustachian tube เป็นท่อรูปรวยมีความยาวประมาณ 31-38 มิลลิเมตร ประกอบด้วยส่วนที่เป็น osseous ประมาณ 11-14 มิลลิเมตร ส่วนที่เป็น cartilage และ membranous ประมาณ 20-25 มิลลิเมตร tube ส่วนที่เป็น osseous นั้นอยู่ติดกับ middle ear cavity โดยที่รูเปิดของ tube อยู่สูงกว่าพื้นของ middle ear cavity ประมาณ 4 มิลลิเมตร tube ส่วนนี้จะเปิดอยู่เสมอ สำหรับ tube ส่วนที่เป็น cartilage นั้นอยู่ต่อจาก tube ส่วนที่เป็น osseous รอยต่อของ tube ส่วนที่เป็น osseous และ cartilage เรียกว่า isthmus ซึ่งมีความยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร กว้างประมาณ 1 มิลลิเมตร ถ้ามองทางด้านตัดขวาง tube ส่วนนี้ ประกอบด้วยส่วนที่เป็น cartilage และ membranous อยู่ต่อกันเป็นวงกลม ส่วนที่เป็น cartilage จะมีรูปร่างเหมือนตะขอและ tube ส่วนที่เหลือจะเป็น membranous ส่วนปลายของ tube อีกด้านหนึ่งเปิดที่ nasopharynx โดยปกติแล้วปลาย tube บริเวณ nasopharynx จะปิดอยู่เสมอแต่ถ้ากล้ามเนื้อ tensor veli palatini และ levator veli palatini หดตัวจะดึงส่วนที่เป็น membranous ทำให้ tube เปิด การหดตัวของกล้ามเนื้อทั้งสองมัดนี้เกิดเมื่อหาว กลืน เคี้ยวหรือตะโกน (20, 22, 26, 34)

eustachian tube ทำหน้าที่ปรับอากาศภายใน middle ear cavity ให้สมดุลกับอากาศภายนอกซึ่งเป็นสภาวะที่มีการส่งพลังงานเสียงเข้าสู่ middle ear ได้มากที่สุด แต่ถ้า tube ผิดปกติไม่สามารถปรับอากาศใน middle ear cavity ให้สมดุลกับอากาศภายนอกได้มีผลให้กลไกในการส่งต่อพลังงานของ middle ear ผิดปกติและทำให้หูอื้อ ถ้าเกิดความไม่สมดุลของอากาศมากๆจะทำให้ปวดหูและ tympanic membrane ฉีกขาดได้ Loch และ Rasmussen (อ้างใน 31) กล่าวว่าถ้า pressure ใน middle ear cavity ต่างกับ pressure ใน ear canal 7 mmH<sub>2</sub>O มีผลให้การได้ยินลดลง 5-20 dB ที่ความถี่ 50-2000 Hz นอกจากนี้ eustachian tube ยังเป็นทางระบาย fluid ใน middle ear cavity อีกด้วย การอักเสบของเนื้อเยื่อบริเวณ posterior nasopharynx จะทำให้ tube ปิดเกิดการอุดตันและไม่สามารถทำงานได้ตามปกติ ในเด็กจะมีปัญหาของ middle ear มากกว่าผู้ใหญ่เนื่องจาก tube ของเด็กสั้นกว่าผู้ใหญ่และเกือบเป็นแนวนอน ถ้ามีการติดเชื้อบริเวณ nasopharynx จะมีการแพร่กระจายเชื้อสู่ middle ear cavity ได้ง่ายและทำให้มีการระบาย fluid ได้ไม่สะดวก (19, 20, 28, 34)

### Transformer action of the middle ear

ขั้นตอนของการส่งต่อพลังงานเสียงในระบบการได้ยินนั้นเกิดขึ้นเมื่อมีพลังงานเสียงมากระทบ tympanic membrane ซึ่งจะมีการเปลี่ยนพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานกลส่งผ่านกลไกของ middle ear เข้าไปใน inner ear ทำให้ cochlear fluid มีการเคลื่อนไหว จากนั้น sensory cell ใน inner ear จะรับสัญญาณส่งเข้าไปยังสมองเพื่อแปลความหมายต่อไป

มนุษย์รับรู้การเปลี่ยนแปลงแรงดันเพียงเล็กน้อยที่เกิดจากเสียงได้นั้นเนื่องจากกลไกการทำงานหลายอย่างของ middle ear ทำให้มีการส่งพลังงานเข้าไปใน inner ear ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยปกติแล้ว ประสิทธิภาพในการส่งพลังงานจากตัวกลางหนึ่งไปอีกตัวกลางหนึ่งขึ้นอยู่กับความแตกต่างของ impedance ของทั้ง 2 ตัวกลาง การส่งต่อพลังงานผ่านตัวกลางที่มี impedance เท่ากันย่อมมีประสิทธิภาพมากกว่าการส่งต่อพลังงานผ่านตัวกลางที่มี impedance ต่างกัน Wever และ Lawrence (อ้างใน 29) พบว่าการเดินทางของคลื่นเสียงจากอากาศไปยังของเหลวโดยตรงจะทำให้ได้ยินเสียงลดลงประมาณ 30dB เนื่องจากมีพลังงานเสียงเพียงร้อยละ 0.1 ที่เดินทางผ่านเข้าไปยังของเหลวได้และร้อยละ 99.9 เกิดการสะท้อนกลับ จะเห็นว่าการส่งพลังงานเสียงจากอากาศไปยังของเหลวโดยตรงนั้นมีประสิทธิภาพน้อยมากเนื่องจากทั้ง 2 ตัวกลางมี impedance ต่างกันมากคือ อากาศมี impedance มีประมาณ 41.5 โอห์ม (ohms) ในขณะที่ impedance ของของเหลวมีประมาณ  $143 \times 10^7$  ohms (20) สำหรับในระบบการได้ยินของมนุษย์นั้นแม้จะมีการส่งต่อพลังงานเสียงจากอากาศไปยังของเหลวซึ่งได้แก่ fluid ใน cochlear แต่ก็สามารถส่งต่อพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ Wever และคณะ (อ้างใน 29) ได้ทำการศึกษาผลการทำงานของ middle ear ต่อระดับการได้ยินโดยทำการตัด tympanic membrane, malleus และ incus ของสัตว์ทดลองหลังจากที่วัดระดับการได้ยินไว้แล้ว ซึ่งพบว่ามีการสูญเสียการได้ยินโดยเฉลี่ย 28 dB ที่ความถี่ 500–2000 Hz และ 5000–7000 Hz เขาสรุปว่าการสูญเสียการได้ยินนี้อาจแสดงถึงหน้าที่ในการส่งพลังงานเสียงของ middle ear จึงได้มีการศึกษาการทำงานของ middle ear ในการส่งต่อพลังงานเสียงอีกมากมายและได้สรุปว่า middle ear จะทำหน้าที่เป็น impedance matching transformer โดยจะเปลี่ยน low-pressure, high-displaced vibration ของอากาศเป็น high-force, low-displaced vibration เพื่อไปกระตุ้น cochlear fluid ให้เคลื่อนไหว (29, 33) กลไกที่ทำให้เกิดลักษณะดังกล่าวมีดังต่อไปนี้

1. areal ratio การที่พื้นที่ของ tympanic membrane ใหญ่กว่าพื้นที่ของ stapes footplate ทำให้มี sound pressure ที่ stapes footplate เพิ่มขึ้นประมาณ 17 เท่า หรือประมาณ 24.6 dB

2. lever action เป็นกลไกการทำงานของ ossicular chain ซึ่งมีลักษณะคล้ายคานจะทำให้มี sound pressure ที่ stapes เพิ่มขึ้นประมาณ 1.3 เท่าหรือประมาณ 2.5 dB

3. bulking action การที่ tympanic membrane มีลักษณะเป็นรูปกรวย ส่วนโค้งของ tympanic membrane ทำให้บริเวณ umbo มี sound pressure เพิ่มขึ้น 2 เท่า

นอกจากกลไกทั้ง 3 อย่างที่จะทำให้ sound pressure ที่ oval window เพิ่มขึ้นแล้ว ความถี่ของเสียงที่มากระดับยังมีผลต่อการเพิ่มขึ้นของ sound pressure ด้วย พบว่า sound pressure ที่ oval window จะมากกว่า sound pressure ที่ tympanic membrane ประมาณ 30 dB หรือมากกว่า 30 dB ถ้ามีเสียงความถี่ 2500 Hz ไหลผ่าน ทั้งนี้เป็นผลจากการทำงานของ middle ear ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นและเป็นผลจากโครงสร้างของ outer ear ซึ่งมี resonance ของใบหูและช่องหูอยู่ที่ 2000 Hz แต่ถ้ามีเสียงความถี่มากกว่า 2500 Hz ไหลผ่าน sound pressure ที่ oval window ก็จะมีค่ามากกว่า sound pressure ที่ tympanic membrane ไม่ถึง 30 dB (19, 21, 28, 30, 33, 35)

### Mechanical and acoustic properties of the middle ear

จากหลักการทางกลศาสตร์ เมื่อแรงกระทำต่อวัตถุหนึ่ง วัตถุจะมีการตอบสนองต่อแรงที่มากระทำ นั่นคือ วัตถุเกิดการเคลื่อนที่ หลักการนี้ใช้ได้กับระบบกลศาสตร์ ระบบไฟฟ้า และระบบเสียง เมื่อแรงมากกระทำให้ระบบมีการเคลื่อนที่ย่อมมีแรงต้านของระบบต่อการเคลื่อนที่นั้น แรงต้านการเคลื่อนที่ของระบบเรียกว่า impedance ดังนั้นในการหาค่า impedance ของระบบจึงได้จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงและความเร็วของการเคลื่อนที่ของระบบนั้น ดังสมการ

$$Z = F/V$$

โดยที่ Z คือ impedance ของระบบ F คือแรงที่ให้แก่ระบบ V คือความเร็วของระบบ

ในทางกลับกัน admittance ของระบบ คือความง่ายในการเคลื่อนที่ของระบบเมื่อมีแรงมากกระทำ ดังนั้น admittance ของระบบจึงได้จากสมการ

$$Y = V/F$$

โดยที่ Y คือ admittance ของระบบ

การเคลื่อนที่ของแรงที่กระทำต่อระบบนั้นมีลักษณะเป็น dynamic คือมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งจะพิจารณาได้ง่ายในรูปของ sinusoidal force เมื่อแรงที่กระทำต่อระบบเป็น sinusoidal force มีผลให้วัตถุมีการเคลื่อนที่เป็น sinusoidal ด้วย นั่นคือ ความเร็วของวัตถุจะเป็น sinusoidal เช่นเดียวกับแรง

ในระบบแต่ละระบบประกอบด้วย mass, spring และ friction ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้เป็นตัวกำหนด impedance หรือ admittance ของระบบ โดยทั้ง 3 องค์ประกอบมีการตอบสนองต่อแรงในลักษณะต่าง ๆ กัน ดังต่อไปนี้

1. spring คุณสมบัติของ spring คือ มีแรงต้านทานต่อการเปลี่ยนตำแหน่ง เมื่อออกแรงดึง spring ให้ยืดออก spring จะพยายามกลับสู่ตำแหน่งเดิม เมื่อปล่อย spring ก็จะไปเคลื่อนที่กลับสู่ตำแหน่งเดิม นั่นคือเมื่อไม่มีแรงมาดึง spring หรือเมื่อแรงเท่ากับศูนย์ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของ spring จะมากที่สุด เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของแรงและความเร็วแบบ sinusoid จะได้ว่าแรงเคลื่อนที่ช้ากว่าความเร็ว  $1/4$  รอบ หรือ  $90^\circ$  จึงเรียก spring ว่า out of phase component ชนิด force lag velocity

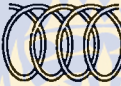

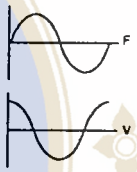


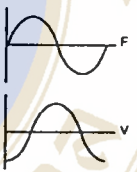


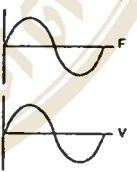
แรงต้านของระบบหรือ impedance ที่เกิดจาก spring เรียกว่า compliant reactance ( $-X_c$ ) ในทางกลับกันความง่ายในการเคลื่อนที่ของพลังงานผ่าน spring หรือ admittance ของระบบที่เกิดจาก spring นี้ เรียกว่า compliant susceptance ( $B_c$ )

2. mass คือขนาดและน้ำหนักของระบบ ซึ่งมีคุณสมบัติต่อต้านการเปลี่ยนตำแหน่งหรือต่อต้านการเคลื่อนที่ นั่นคือ ในการที่จะทำให้ mass เคลื่อนที่ได้มันจะต้องใช้แรงมากกว่าแรงต้านการเคลื่อนที่ของ mass เมื่อแรงที่ให้มากกว่าแรงต้านของ mass ก็จะทำให้ mass เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงสุดโดยไม่ต้องให้แรงเพิ่ม เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของแรงและความเร็วแบบ sinusoid จะได้ว่าแรงเคลื่อนที่เร็วกว่าความเร็ว  $1/4$  รอบ หรือ  $90^\circ$  จึงเรียก mass ว่า out of phase component ชนิด force lead velocity

แรงต้านของระบบหรือ impedance ที่เกิดจาก mass นี้เรียกว่า mass reactance ( $X_m$ ) ในทางกลับกันความง่ายในการเคลื่อนที่ของพลังงานผ่าน mass หรือ admittance ของระบบที่เกิดจาก mass นี้เรียกว่า mass susceptance ( $-B_m$ )

3. friction เมื่อมีแรงมากระทำต่อระบบแล้วทำให้ระบบเคลื่อนที่ แรงส่วนหนึ่งจะสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน ซึ่งแรงต้านที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานความร้อนไปนี้เรียกว่า friction เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของแรงที่มากระทำต่อระบบและความเร็วของ friction แบบ sinusoid จะได้ว่าแรงเคลื่อนที่พร้อมกับความเร็วจึงเรียก friction ว่า in phase component

impedance ที่เกิดจาก friction นี้เรียกว่า resistance (R) และ admittance ของระบบที่เกิดจาก friction เรียกว่า conductance (G) (3, 36, 37, 38)

TYPE OF ELEMENT	SYSTEM		FORCE -VELOCITY RELATIONSHIP
	MECHANICAL	ACOUSTICAL	
$B_c$ SUSCEPTANCE (COMPLIANT)	 SPRING	 CLOSED CAVITY	
$B_m$ SUSCEPTANCE (MASS)	 MASS	 OPEN TUBE	
G CONDUCTANCE (DISSIPATIVE)	 SLIDING FRICTION	 FINE-MESH SCREEN	

รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของแรงและความเร็วในการเคลื่อนที่ของ spring, mass, friction (จาก 7)

โครงสร้างของหูประกอบด้วยลักษณะทางฟิสิกส์ คือมี mass, spring และ friction ซึ่งมีการทำงานที่เป็นทั้งระบบกลศาสตร์และระบบเสียง (สำหรับการพิจารณา spring component ในโครงสร้างของ middle ear นั้นมักใช้คำว่า stiffness หรือ compliance แทนคำว่า spring) เมื่อมีแรงหรือ sound pressure เข้าไปใน ear canal จะทำให้ tympanic membrane และโครงสร้างของ middle ear เกิดการเคลื่อนไหวซึ่งจะมีการตอบสนองต่อแรงในลักษณะต่างๆกัน

เนื่องจากโครงสร้างของ middle ear และ tympanic membrane มีการทำงานทั้งที่เป็นระบบกลศาสตร์และระบบเสียง จึงได้พิจารณาโครงสร้างดังกล่าวตามองค์ประกอบที่ให้ impedance หรือ admittance แก่ระบบดังนี้

### 1. spring ประกอบด้วย

- mechanical spring ได้แก่ ligament, muscle, tendon ใน middle ear cavity, cochlear window และ tympanic membrane
- acoustic spring ได้แก่ อากาศที่ถูกกักไว้ใน ear canal และอากาศใน middle ear cavity

### 2. mass ประกอบด้วย

- mechanical mass ได้แก่ pars flaccida, ossicles, perilymph ใน cochlear
- acoustic mass ได้แก่ อากาศที่อยู่ใน ear canal, middle ear cavity, และ mastoid air cell

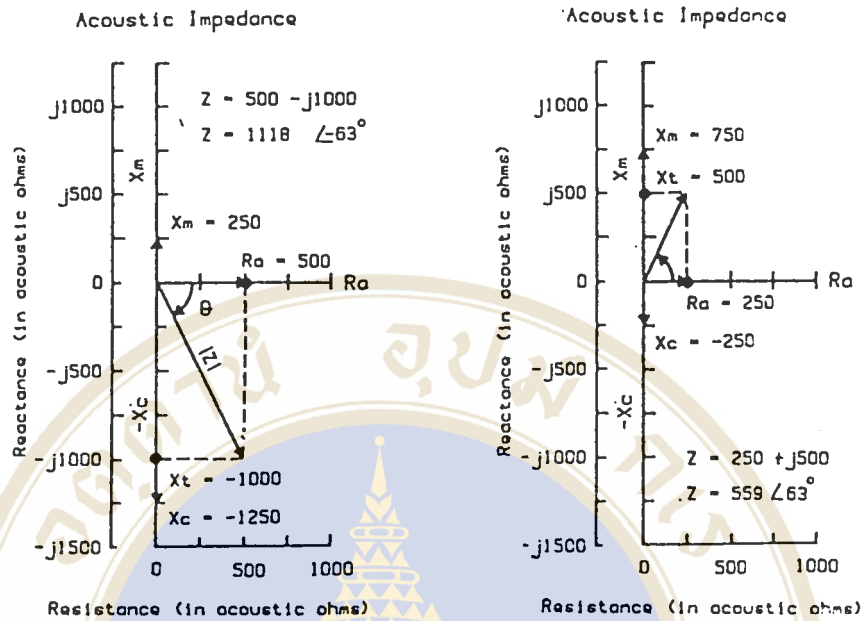
### 3. friction ประกอบด้วย

- mechanical friction ได้แก่ mucous membrane, ligament และ tendon ของ middle ear การเคลื่อนไหวของ fiber ที่เรียงตัวเป็นเนื้อเยื่อของ tympanic membrane, ossicular joint, cochlear fluid
- acoustic friction ได้แก่ ความหนืดของอากาศใน ear canal และ middle ear cavity

(4, 7, 36, 37, 39)

โครงสร้างของ middle ear ทั้งหมดนี้จะตอบสนองต่อแรงหรือ sound pressure เช่นเดียวกับ mass spring, friction ที่ตอบสนองกับแรงที่มากระทำตามลักษณะทางกลศาสตร์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

ในการหาค่า impedance ที่เกิดจาก mass, spring friction นั้นสามารถนำระบบ vector มาใช้ในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 2- 3



รูปที่ 2

รูปที่ 3

จากรูปที่ 2 และ 3  $X_m$  เป็นค่าที่อยู่บนแกน y ด้านบวกหรือด้านบน เนื่องจากใน mass component เมื่อมีแรงกระทำต่อ mass การเคลื่อนที่ของแรงจะนำความเร็ว  $1/4$  รอบ ( $+90^\circ$ ) ส่วน  $-X_c$  เป็นค่าที่อยู่บนแกน y ด้านลบหรือด้านล่างเนื่องจากใน spring component เมื่อมีแรงกระทำต่อ spring การเคลื่อนที่ของแรงจะช้ากว่าความเร็ว  $1/4$  รอบ ( $-90^\circ$ ) ส่วน R เป็นค่าที่อยู่บนแกน x ทางด้านบวก เนื่องจากใน friction แรงที่มากกระทำต่อ friction และความเร็วจึงเกิดขึ้นพร้อมกัน ( $0^\circ$ )  $-X_c$  และ  $X_m$  เป็น vector ที่อยู่บนแกนเดียวกันสามารถรวมกันได้ง่ายๆโดยวิธีทางเลขคณิต จากรูปที่ 2 ได้ vector ของ X รวม ( $X_t$ ) อยู่ทางด้านลบแสดงถึงในระบบนั้นมี reactance ที่เกิดจาก spring มากกว่าเกิดจาก mass ซึ่งจะเรียก ระบบนี้ว่า stiffness controlled ส่วนรูปที่ 3 ได้ vector ของ X รวม ( $X_t$ ) อยู่ทางด้านบวกแสดงถึงระบบมี reactance ที่เกิดจาก mass มากกว่า จึงเรียกระบบนี้ว่า mass controlled สำหรับการรวม impedance ที่เกิดจาก X และ R หรือ magnitude ของ impedance ( $|Z|$ ) จะต้องคำนวณโดยใช้ทฤษฎีของ Pythagorus เนื่องจาก R และ X เป็นค่าที่อยู่บนแกนต่างกัน

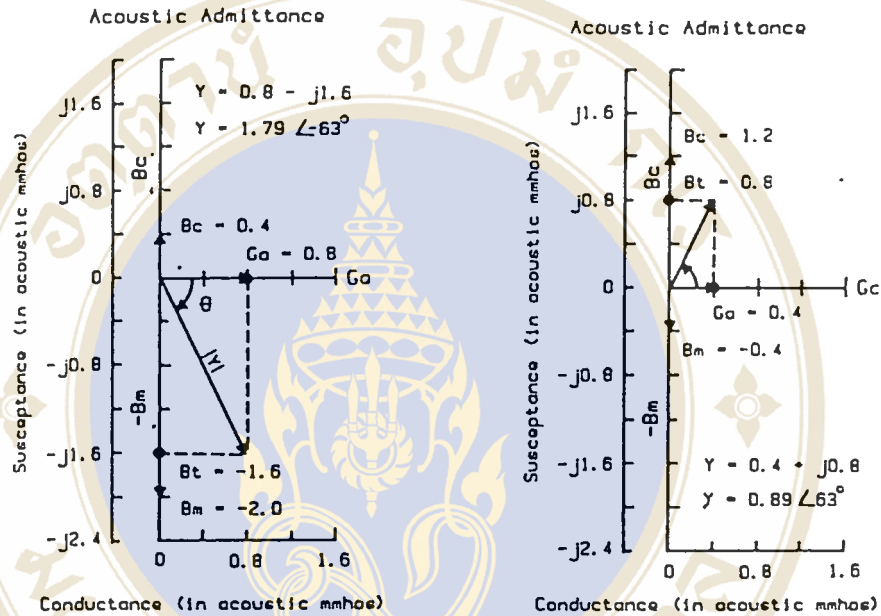
magnitude ของ impedance ที่คำนวณตาม ทฤษฎีของ Pythagorus คือ

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$$

ส่วนมุม (phase angle) ของ magnitude คือ

$$\Theta = \arctan (X/R)$$

สำหรับการหาค่า admittance ที่เกิดจาก mass, spring, friction นั้นสามารถนำระบบ vector มาใช้ในการวิเคราะห์ดังรูปที่ 4-5



รูปที่ 4

รูปที่ 5

ในทางกลับกันเมื่อพิจารณาค่า admittance ของระบบจะเป็นดังรูปที่ 4 และ 5 ซึ่ง vector ของ  $B_c$  และ  $-B_m$  จะอยู่ตรงข้ามกับ  $-X_c$  และ  $X_m$  ส่วน vector  $G$  อยู่ตำแหน่งเดียวกับ vector  $R$  และมีการรวม vector โดยใช้ทฤษฎีของ Pythagorus เช่นกัน คือ

$$\text{admittance magnitude } (|Y|) = \sqrt{G^2 + B^2}$$

และมุมของ magnitude  $Y$  คือ

$$\Theta = \arctan (B/G)$$

ในการแสดงค่า impedance หรือ admittance ของระบบนั้น สามารถแสดงได้ 2 รูปแบบคือ

1. polar notation แสดงเป็น magnitude และ phase angle

impedance ของระบบที่แสดงในรูป polar notation คือ  $Z \angle \theta$

admittance ของระบบที่แสดงในรูป polar notation คือ  $Y \angle \theta$

2. rectangular notation แสดงเป็นปริมาณของ in phase component รวมกับ out of phase component

impedance ของระบบที่แสดงในรูปของ rectangular notation คือ  $Z = R \pm jX$

admittance ของระบบที่แสดงในรูปของ rectangular notation คือ  $Y = G \pm jB$

R และ G คือ in phase component ที่อยู่บนแกน x (real axis) ส่วน X และ B คือ out of phase component ที่อยู่บนแกน y (imaginary axis) ทำให้ไม่สามารถรวมกันได้โดยวิธีทางเลขคณิตซึ่งแสดงโดยใช้สัญลักษณ์ j ส่วนเครื่องหมายหน้า j นั้นอาจเป็น + หรือ - ก็ได้ขึ้นอยู่กับว่า out of phase component นั้นมี mass หรือ spring มากกว่ากัน ถ้ามี mass มาก (mass controlled) จะได้เป็น  $+jX$ ,  $-jB$  แต่ถ้ามี spring มาก (stiffness controlled) จะได้เป็น  $-jX$ ,  $+jB$  (3, 36, 38)

### Frequency dependence of acoustic immittance

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่า impedance ของระบบกลศาสตร์ ระบบเสียง หรือ ระบบไฟฟ้านั้น ได้มาจาก 3 องค์ประกอบ คือ mass, spring (สำหรับการศึกษาเกี่ยวกับ spring ที่จะกล่าวต่อไปนี้จะใช้คำว่า stiffness หรือ compliance แทน) และ friction เมื่อพิจารณาการตอบสนองของทั้ง 3 องค์ประกอบต่อแรงที่มากกระทำ แล้วพบว่า mass และ stiffness เป็น frequency dependent component ถ้าพิจารณาในส่วนของ mass ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติต้านทานการเคลื่อนที่นั้นพบว่า วัตถุที่มี mass มากมีแนวโน้มจะเคลื่อนที่ได้ช้า และการที่จะทำให้วัตถุที่มี mass มากเคลื่อนที่ได้ขึ้นจะต้องมีแรงมากกระทำต่อวัตถุมากด้วย นั่นคือ mass จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความเร็วในการเคลื่อนที่แต่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากกระทำหรือกล่าวได้ว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความถี่ของแรงที่มากกระทำ ส่วน stiffness นั้นพบว่าถ้า stiffness มากมีแนวโน้มจะเคลื่อนที่ได้เร็วเช่น ถ้าถือไม้บรรทัดอ่อน (stiffness น้อย) และไม้บรรทัดแข็ง (stiffness มาก) ไว้เมื่อจับปลายไม้บรรทัดให้

งอแล้วปล่อยออกจะพบว่าไม้บรรทัดที่อ่อนจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาช้ากว่าไม้บรรทัดที่แข็ง นั่นคือ stiffness เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเร็วในการเคลื่อนที่ เห็นได้ว่าความสัมพันธ์ระหว่าง stiffness กับความเร็วในการเคลื่อนที่นั้นตรงข้ามกับความสัมพันธ์ระหว่าง mass กับความเร็วในการเคลื่อนที่ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง stiffness กับความถี่ของแรงที่มากระทำจึงตรงข้ามกับความสัมพันธ์ระหว่าง mass กับความถี่ของแรงที่มากระทำ นั่นคือ stiffness จะเป็นสัดส่วนผกผันกับความถี่ของแรงที่มากระทำ (เนื่องจาก mass เป็นสัดส่วนโดยตรงกับแรงที่มากระทำ) สำหรับ friction นั้นเป็นองค์ประกอบที่ให้ impedance คงที่ตลอดไม่ขึ้นอยู่กับความถี่ของแรงที่มากระทำ จัดว่า friction เป็น frequency independent component (40)

Feldman (2) Feldman และ Wiley (4) กล่าวว่า impedance ที่ tympanic membrane ใน low frequency นั้นเกิดจาก elastic force หรือ stiffness ที่เกิดใน middle ear cavity และ ossicular attachment เป็นส่วนใหญ่ impedance ที่ tympanic membrane ใน high frequency เกิดจาก inertia force หรือ mass component เป็นส่วนใหญ่ และที่ mid frequency (ประมาณ 800 Hz) impedance เกิดจาก mass และ stiffness เท่ากัน จะเห็นว่าที่ความถี่ต่างกัน mass และ stiffness component จะมีอิทธิพลต่อ impedance ที่ tympanic membrane ต่างกัน

Shanks (36) กล่าวว่า compliant reactance ( $-X_c$ ) เป็นแรงต้านทานของ spring ต่อการไหลของพลังงานซึ่งแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

$$-X_c = 1/2 \pi f c$$

โดยที่ c คือ compliance f คือ frequency

จากสูตร จะเห็นว่า compliant reactance เป็นสัดส่วนผกผันกับ frequency นั่นคือ spring จะมีแรงต้านทานการไหลของพลังงาน (compliant reactance) มากเมื่อมีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่านระบบ

ส่วน mass reactance ( $X_m$ ) เป็นแรงต้านทานของ mass ต่อการไหลของพลังงานแสดงเป็นสมการดังนี้

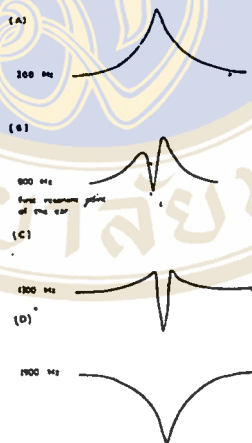
$$X_m = 2 \pi f m$$

โดยที่ m คือ mass f คือ frequency

จากสูตร เห็นได้ว่า mass reactance เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ frequency นั่นคือ mass จะมีแรงต้านทานการไหลของพลังงาน (mass reactance) มากเมื่อมีเสียงความถี่สูงไหลผ่าน

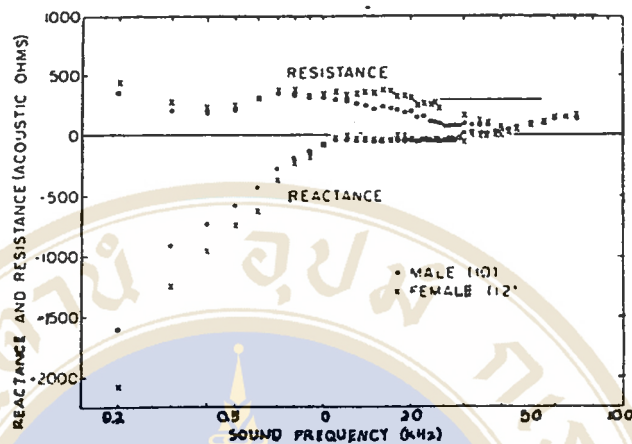
Hughes และ Berlin (41) กล่าวว่าเมื่อมีเสียงความถี่สูงไหลผ่านระบบ mass จะมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่มากกว่า stiffness แต่เมื่อมีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่าน stiffness จะมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่มากกว่า mass ส่วน friction จะมีแรงต้านทานการเคลื่อนที่โดยไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของเสียงที่ไหลผ่านระบบ

Shone และ Moflat (17) กล่าวว่าเมื่อมีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่านระบบ แรงต้านของระบบส่วนใหญ่เกิดจาก stiffness นั่นคือค่า  $-X_C$  มากกว่าค่า  $X_m$  เมื่อพิจารณาในรูปของ susceptance พบว่า  $B_C$  มากกว่า  $-B_m$  ดังนั้น peak ของ susceptance tympanogram จะอยู่ทางค่าบวก แต่เมื่อมีเสียงความถี่สูงไหลผ่านแรงต้านของระบบที่เกิดจาก mass มีมากขึ้นและแรงต้านจาก stiffness ลดลง นั่นคือ ค่า  $X_m$  มากกว่าค่า  $-X_C$  เมื่อพิจารณาในรูปของ susceptance พบว่า  $-B_m$  มากกว่า  $B_C$  ดังนั้น peak ของ susceptance tympanogram จึงอยู่ทางค่าลบ ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงรูปร่างของ susceptance tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency ต่างกัน (จาก 17)

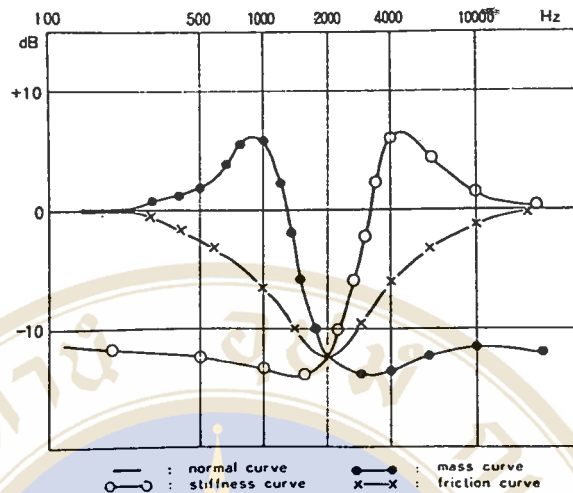
Zwislocki (อ้างใน 22) ศึกษาความสัมพันธ์ของ reactance และ resistance กับความถี่ของเสียง พบว่าที่ low frequency ค่า reactance เป็นค่าลบซึ่งเป็น reactance ที่เกิดจาก stiffness แต่ที่ high frequency ค่า reactance เป็นค่าบวกซึ่งเป็น reactance ที่เกิดจาก mass ส่วน resistance มีค่าเกือบคงที่ในทุกความถี่ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ของ resistance และ reactance กับความถี่ของเสียง (Zwislocki อ้างใน 22)

Margolis และคณะ (42) ทำการศึกษาค่า resistance จากกลุ่มตัวอย่าง 10 คน อายุ 25-41 ปี ที่มีระดับการได้ยินปกติ ตรวจหูแล้วไม่พบความผิดปกติ และไม่มีประวัติโรคหู โดยใช้เสียงความถี่ 220-910 Hz การเปลี่ยนแปลง pressure เป็นแบบ ascending direction และ descending direction พบว่า ค่า resistance ของทั้ง 2 direction อยู่ในระดับเกือบคงที่แม้จะเปลี่ยนความถี่ของเสียง ส่วนค่า reactance จะเพิ่มจากค่าลบไปค่าบวกเมื่อเพิ่มความถี่ของเสียงทั้ง 2 direction แต่ ascending direction จะได้ค่า reactance ที่เป็นบวกที่ความถี่ต่ำกว่าเมื่อใช้ descending direction

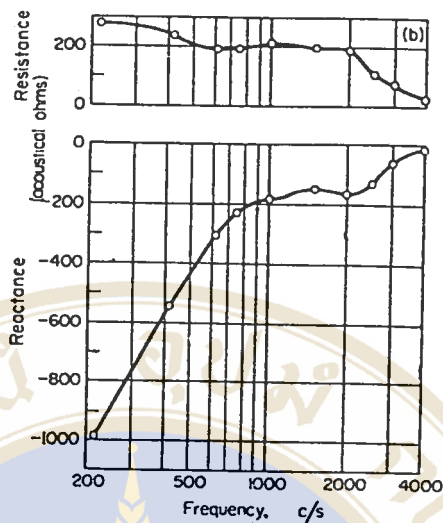
Johansen (อ้างใน 26) ศึกษา acoustic impedance ของระบบการสั่นสะเทือนระบบหนึ่งโดยใช้สูตร  $I = \sqrt{r + (mf - s/f)}$  โดยที่  $I = \text{impedance}$   $r = \text{resistance}$   $m = \text{mass}$   $s = \text{stiffness}$  ผลการศึกษาพบว่าเมื่อระบบมี mass เพิ่มขึ้น เช่นการมี fluid ใน middle ear จากโรค otitis media เสียงความถี่ต่ำเดินทางผ่านได้ดี resonance frequency ของระบบก็จะอยู่ในช่วงความถี่ต่ำ แต่ถ้ระบบมี stiffness เพิ่มขึ้นเช่นการเกิด negative pressure ใน middle ear cavity, การอุดตันของ eustachian tube หรือ otosclerosis เสียงความถี่สูงจะเดินทางผ่านได้ดี resonance frequency ของระบบก็จะอยู่ในช่วงความถี่สูง ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ mass, stiffness, และ resistance กับ frequency (Johansen อ้างใน 26)

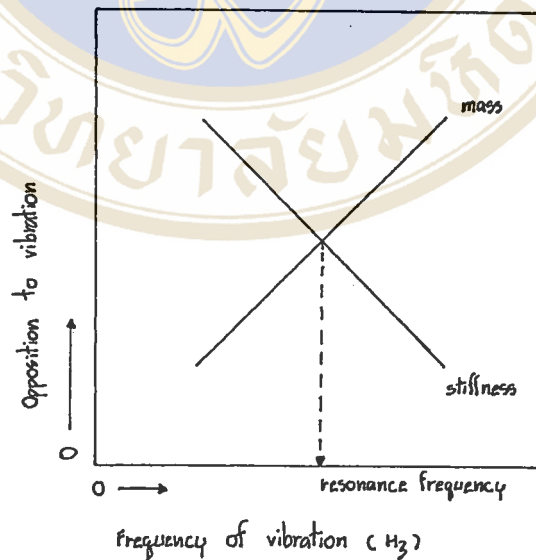
Burke และคณะ (44) ได้ทำการศึกษา middle ear impedance จากกลุ่มตัวอย่าง 25 คน อายุ 19-29 ปี ที่มีระดับการได้ยินปกติ ไม่มีประวัติโรคหู เมื่อกระตุ้นด้วย white noise พบ acoustic reflex ในหูทั้ง 2 ข้าง เขาทำการศึกษาค่า reactance และ resistance ที่ความถี่ 125, 250, 500, 750, 1000, 1500 Hz ผลการศึกษาพบว่าค่า reactance (ไม่ได้แยก mass, stiffness) ลดลงจนเข้าสู่ค่า 0 เมื่อเพิ่มความถี่ ในขณะที่ค่า resistance ค่อนข้างคงที่ และการศึกษาคล้ายคลึงกับการศึกษาของ Glattke (26) ซึ่งกล่าวว่า friction หรือ resistance ในระบบจะมีค่าคงที่ในทุกความถี่ของเสียงที่มากกระตุ้น คือมีประมาณ 300 ohms ส่วน reactance จะมีค่ามากที่สุดที่ low frequency คือประมาณ 2500 ohms และมีค่าน้อยลงที่ high frequency (มากกว่า 1000 Hz)

Morton และ Jones (อ้างใน 31) ศึกษา impedance ของ middle ear จากกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติพบว่า reactance มีการเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของเสียงที่ไหลผ่านระบบคือเปลี่ยนจากค่าลบเข้าสู่ค่าบวกเมื่อเสียงมีความถี่สูงขึ้น ส่วน resistance มีค่าค่อนข้างคงที่แม้จะเปลี่ยนแปลงความถี่ของเสียงดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ของ resistance และ reactance กับความถี่ (จาก Morton และ Jones อ้างใน 31)

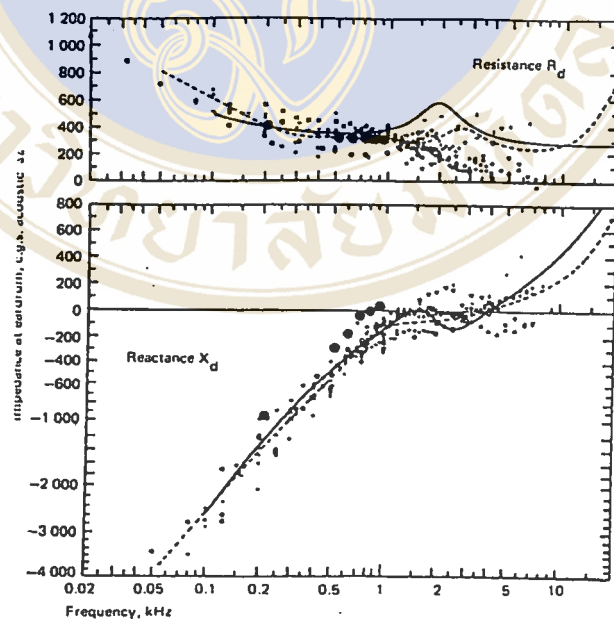
Bess และ Humes (35) กล่าวว่าความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานของระบบที่เกิดจาก mass และ stiffness กับความถี่ในภาวะปกติเป็นดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงต้านทานการเคลื่อนไหวของระบบที่เกิดจาก mass, stiffness กับความถี่ในการเคลื่อนไหว (จาก 35)

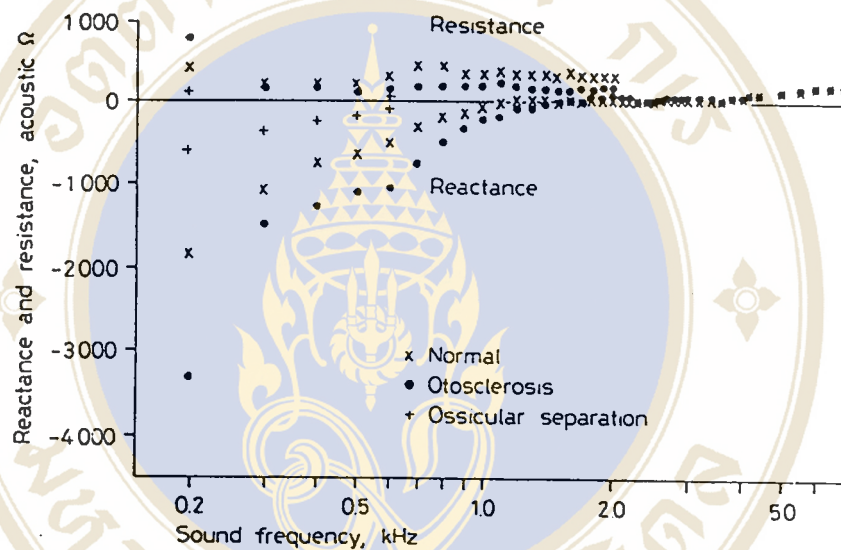
จากรูป จะเห็นว่าที่ความถี่ต่างๆ mass มีแรงต้านการเคลื่อนที่น้อยในขณะที่ stiffness มีแรงต้านการเคลื่อนที่มาก แต่เมื่อความถี่สูงขึ้น mass จะมีแรงต้านการเคลื่อนที่มากกว่า stiffness ถ้าระบบใดมีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่านจะมีแรงต้านของ stiffness มากกว่าแรงต้านของ mass เรียกระบบนี้ว่า stiffness controlled แต่ถ้าระบบใดมีเสียงความถี่สูงไหลผ่านจะมีแรงต้านของ mass มากกว่าแรงต้านของ stiffness เรียกระบบนี้ว่า mass controlled ถ้าระบบใดมีแรงต้านของ mass และ stiffness เท่ากันเมื่อมีเสียงความถี่หนึ่งไหลผ่านที่ความถี่นั้นถือว่าเป็น resonance frequency ของระบบ ในกรณีที่มีระบบมี mass เพิ่มขึ้น จะทำให้ระบบนั้นมี resonance frequency ต่ำกว่าปกติ แต่ถ้าระบบมี stiffness มากขึ้นก็จะทำให้ resonance frequency สูงกว่าปกติ

Shaw (อ้างใน 42) ศึกษาค่าของ acoustic resistance และ acoustic reactance พบว่า acoustic resistance เป็น frequency independence เนื่องจากมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่ของเสียง ส่วน acoustic reactance เป็น frequency dependence เนื่องจากมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของเสียงโดยเปลี่ยนแปลงจากค่าลบเป็นค่าบวกเมื่อมีความถี่สูงขึ้น ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ของ resistance และ reactance กับความถี่ของเสียง (Shaw อ้างใน 42)

Zwislocki (43) ได้ทำการศึกษา resistance และ reactance ในกลุ่มคนปกติ กลุ่ม otosclerosis และ กลุ่ม ossicular separation พบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า reactance ของทั้ง 3 กลุ่มตัวอย่างมีลักษณะเหมือนกัน คือ ค่า reactance จะเปลี่ยนจากค่าลบเป็นค่าบวกเมื่อเพิ่มความถี่ของเสียง แต่ในกลุ่ม ossicular separation พบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่า reactance จากค่าลบเป็นค่าบวกก่อนกลุ่มปกติและกลุ่ม otosclerosis ในขณะที่ 2 กลุ่มหลังมีการเปลี่ยนแปลงค่า reactance จากค่าลบเป็นบวกที่ความถี่ใกล้เคียงกัน ส่วนค่า resistance ค่อนข้างจะคงที่แม้จะเปลี่ยนแปลงความถี่ของเสียง ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง resistance และ reactance กับความถี่ของเสียงในกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ, กลุ่ม otosclerosis และกลุ่ม ossicular separation (จาก 43)

### การศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency ต่างกัน

การประเมินสภาพภายใน middle ear cavity โดยผ่าน tympanic membrane ที่สมบูรณ์นั้นเป็นสิ่งที่ทำได้ยาก tympanometry เป็นวิธีที่ใช้ในการประเมินสภาพภายใน middle ear cavity ทางอ้อมโดยการวัด acoustic immittance ของ middle ear ในขณะที่ความดันอากาศในช่องหูชั้นนอกเปลี่ยนแปลง ผู้ศึกษาหลายคนกล่าวว่า tympanometry เป็นการตรวจที่มีความไวต่อการประเมินสภาพของ middle ear นอกจากนี้ยังเป็น การตรวจที่ไม่ต้องการการตอบสนองจากผู้ป่วย ตรวจได้เร็ว ใช้ได้ในทุกกลุ่มอายุ รวมทั้งในกลุ่มที่ตรวจ

ยาก จึงมีการใช้ tympanometry ร่วมกับการตรวจชนิดอื่นๆในการวินิจฉัยความผิดปกติของ middle ear (45, 46, 47)

Terkildsen และ Thomsen (อ้างใน 3) เป็นบุคคลแรกที่นำเสียงที่มีความถี่ 220 Hz มาใช้ในการทดสอบ tympanometry ซึ่งเป็นที่ยอมรับและใช้กันอย่างกว้างขวางในคลินิกตรวจการได้ยินเนื่องจากสามารถวินิจฉัยโรคของ middle ear ได้เป็นอย่างดี แต่มีความผิดปกติของ middle ear บางอย่างที่ใช้ probe tone frequency 220 Hz ไม่ได้ให้ข้อมูลที่ช่วยในการวินิจฉัย จึงมีการศึกษาเกี่ยวกับ probe tone frequency ในการทดสอบ tympanometry เพิ่มเติม

Liden และคณะ (6) เป็นบุคคลกลุ่มแรกที่ใช้ probe tone frequency มากกว่า 220 Hz ในการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone 800 Hz ใช้การเปลี่ยนแปลงความดันอากาศใน ear canal ชนิด ascending direction โดยเปลี่ยนจาก  $-200$  mmH<sub>2</sub>O ถึง  $+200$  mmH<sub>2</sub>O ในเวลา 45 วินาที และอ่านผลในรูปของ impedance tympanogram กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามี 3 กลุ่มคือ กลุ่มที่มีการได้ยินปกติ 67 คน อายุ 19-43 ปี (อายุเฉลี่ย 27 ปี) กลุ่มตัวอย่างที่มีความผิดปกติในการได้ยินชนิดประสาทหูเสื่อม (sensori-neural hearing loss) 27 หู อายุเฉลี่ย 47 ปี และกลุ่มตัวอย่างที่มีความผิดปกติในการได้ยินชนิดนำเสียงเสีย (conductive hearing loss) อายุเฉลี่ย 41 ปี โดยแยกเป็นโรค otosclerosis 25 หู otitis media 5 หู และ ossicular disruption 2 หู ผลการศึกษาพบว่าในกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ กลุ่ม otosclerosis และกลุ่มที่มีประสาทหูเสื่อมจะมี tympanogram รูปร่างเหมือนกัน แต่ในกลุ่มที่มีการนำเสียงเสียทั้งหมดยกเว้นกลุ่ม otosclerosis จะมี tympanogram รูปร่างแตกต่างจากกลุ่มอื่น เขากล่าวว่าการที่ tympanogram มีรูปร่างต่างกันนี้เกิดจาก

1. มีผลที่ tympanic membrane หรือมีการเคลื่อนไหวของ tympanic membrane มากกว่าปกติ ซึ่งมีผลให้ curve ของ tympanogram เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วใกล้ๆกับจุดที่ความดันอากาศทั้ง 2 ด้านของ tympanic membrane เท่ากัน
2. ความผิดปกติของความดันอากาศใน middle ear cavity ทำให้เกิด notch ในตำแหน่งที่ต่างจากปกติ

3. มี fluid ใน middle ear หรือมี tympanic membrane perforate จะทำให้ tympanogram เป็นรูปแบบราบ (flat tympanogram) เนื่องจาก fluid จะทำให้ tympanic membrane เคลื่อนไหวน้อย และสำหรับ tympanic membrane perforate อากาศจะไหลผ่านรอยทะลุโดยไม่ได้ทำให้ tympanic membrane เคลื่อนไหว

4. มี ossicular disruption ซึ่งจะได้ broad undulating peak tympanogram

นอกจากนี้ Liden และคณะ (6) ยังได้ทำการศึกษากลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติ 20 หู โดยใช้ probe tone frequency 220, 625 และ 800 Hz ผลการศึกษาพบว่าการใช้ probe tone frequency เพิ่มขึ้นจะทำให้ความลึกของ notch เพิ่มขึ้นและเกิด notch ที่ความดันอากาศเป็นบวกมากขึ้น เนื่องจากมี impedance ที่ high frequency น้อยกว่าที่ low frequency เมื่อความดันอากาศใน ear canal เป็นบวก นอกจากนี้การเกิด notch ที่ positive pressure ยังอาจเกิดจากภาวะ hysteresis ของ tympanic membrane เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันอากาศใน ear canal สำหรับกลุ่มที่มีแผลที่ tympanic membrane และ tympanic membrane ที่มีการเคลื่อนไหวมากจะเกิด W shape tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 625 และ 800 Hz แต่จะไม่พบเมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz เขาให้เหตุผลว่าความผิดปกติของ tympanogram ที่ 625 และ 800 Hz probe tone นี้ อาจเกิดจากความยาวคลื่น (wave length) ของแต่ละความถี่สัมพันธ์กับขนาดของ middle ear cavity นั่นคือที่ความถี่สูงความยาวคลื่นจะน้อยจึงเกิดการสะท้อนกลับของคลื่นที่ medial wall ของ middle ear cavity และ medial surface ของ tympanic membrane ที่เป็นแผลและมีการเคลื่อนไหวมากผิดปกติซึ่งอาจทำให้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ tympanogram ในขณะที่ความดันอากาศใน ear canal และ middle ear cavity เท่ากัน แต่ที่ probe tone frequency 220 Hz จะไม่พบความผิดปกติของ tympanogram เนื่องจากที่ความถี่ต่ำจะมีความยาวคลื่นมากจึงไม่เกิดการสะท้อนกลับของคลื่นเสียงระหว่างผนังทั้ง 2 ด้าน

Liden และคณะ (6) จึงสรุปผลการศึกษาว่า เมื่อใช้ probe tone frequency ต่างกันจะทำให้ได้รูปร่างของ tympanogram แตกต่างกันซึ่งช่วยในการวินิจฉัยความผิดปกติใน middle ear ได้ ดังนั้นจึงต้องเลือก probe tone frequency ที่มีประโยชน์ในการวินิจฉัยมากที่สุด

หลังจากการศึกษาของ Liden และคณะ ในปี 1970(6) จึงมีผู้ศึกษาเกี่ยวกับ probe tone frequency ในการทดสอบ tympanometry มากขึ้น

Liden และคณะ (9) ทำการศึกษา tympanometry จากผู้ป่วยที่เป็น ossicular disruption จำนวน 10 คน อายุ 14-60 ปี ใช้ probe tone frequency 220, 625 และ 800 Hz มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal จาก  $-200$  mmH<sub>2</sub>O ถึง  $+200$  mmH<sub>2</sub>O ในเวลา 45 วินาที ผลการศึกษาพบว่า ทุกคนจะได้รูปร่างของ tympanogram ที่ 220 Hz ต่างจาก 800 Hz และมีบางคนที่ได้รูปร่างของ tympanogram ที่ 220 Hz ต่างจาก 625 Hz

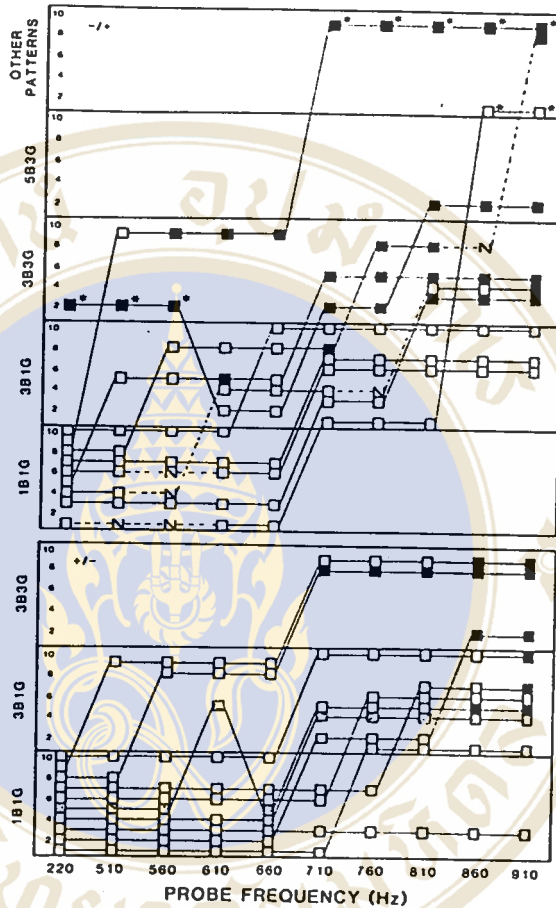
เขาสรุปถึงการที่รูปร่างของ tympanogram ที่ 800 Hz ต่างจาก 220 Hz ในกลุ่ม ossicular disruption นั้นเกิดจาก

1. เมื่อเพิ่ม probe tone frequency ทำให้ compliance ของ tympanic membrane เพิ่มขึ้น
2. probe tone frequency 800 Hz เป็น frequency ที่ใกล้กับ resonance frequency ของ middle ear มากกว่า 220 Hz ทำให้ตรวจได้ผลชัดเจนกว่า

Margolis และคณะ (42) ทำการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 220-910 Hz ใช้ pressure direction แบบ ascending และ descending direction กลุ่มตัวอย่างเป็นกลุ่มคนที่มีการได้ยินปกติอายุ 25-41 ปี จำนวน 10 คน ไม่มีประวัติโรคหู ตรวจหูแล้วไม่พบความผิดปกติ ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ probe tone frequency เพิ่มขึ้นจะทำให้รูปร่างของ BG tympanogram เปลี่ยนแปลงอย่างมีระบบโดยเปลี่ยนจาก 1B1G, 3B1G, 3B3G, 5B3G ตามลำดับ ดังรูปที่ 13 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ BG tympanogram ตาม probe tone frequency นี้เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของค่า reactance จากค่าลบ (stiffness reactance) เป็นค่าบวก (mass reactance) ตาม frequency ที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่า resistance นั้นมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตาม frequency ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามกลุ่มตัวอย่างทุกคนไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ tympanogram ครบทุกรูปแบบเมื่อเพิ่ม probe tone frequency นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ tympanogram ยังขึ้นอยู่กับ pressure direction อีกด้วยซึ่งในการศึกษาครั้งนี้พบว่า tympanogram รูป 5B3G และรูปร่างของ BG tympanogram ที่ผิดปกติจะเกิดขึ้นเมื่อใช้ pressure direction แบบ ascending direction เท่านั้น

ส่วน Y tympanogram นั้นพบว่าจะเกิด multi-peaked Y tympanogram เมื่อ BG tympanogram เป็นรูป 3B3G และ 5B3G แต่ก็พบว่าเกิดในกรณีที่เป็นรูป 3B1G ได้ multi-peaked Y tympanogram

แสดงถึงค่า reactance เป็นค่าบวกหรือเป็นค่าลบที่อยู่ใกล้กับค่า 0 นอกจากนี้ multi-peaked Y tympanogram อาจเกิดจาก artifact ของเครื่องมือ เสียงรบกวนที่เกิดจากการเคลื่อนไหวของร่างกายและการกลืน



รูปที่ 13 แสดงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ tympanogram ตาม probe tone frequency เมื่อใช้ ascending และ descending direction ของกลุ่มตัวอย่างแต่ละคน

\* = รูปร่างของ tympanogram ที่ผิดปกติ      ■ = multi-peaked Y tympanogram

N = ไม่มีข้อมูล (จาก 42)

Colletti (48) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของ impedance tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 200–2000 Hz มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal จาก +200 mmH<sub>2</sub>O ถึง -200 mmH<sub>2</sub>O แต่ถ้าพบว่าได้ flat tympanogram จะใช้ pressure จาก +400 mmH<sub>2</sub>O ถึง -400 mmH<sub>2</sub>O อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 10 mmH<sub>2</sub>O/second กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษามี 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีการได้ยินปกติ 20 หู และกลุ่มที่มีพยาธิสภาพในหูชั้นกลางโดยแบ่งเป็น otosclerosis 20 หู หลังทำผ่าตัด stape-

dectomy 11 หู ossicular discontinuity 6 หู หลังทำผ่าตัด myringoplasty 3 หู cholesteatoma แต่มี tympanic membrane ปกติ 2 หู และ serous otitis media 10 หู ผลการศึกษาพบว่า

1. กลุ่มที่มีการได้ยินปกติมีรูปร่างของ tympanogram เปลี่ยนแปลงตาม probe tone frequency คือ ที่ low frequency เกิด V shape mid frequency (ประมาณ 1100- 1300 Hz) เกิด W shape และที่ high frequency (มากกว่า 1300 Hz) เกิด A shape

2. กลุ่มที่มีพยาธิสภาพใน middle ear มีรูปร่างของ tympanogram เปลี่ยนแปลงตาม probe tone frequency เช่นเดียวกับกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ แต่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วง frequency ต่างกัน คือ otosclerosis เกิด W shape ที่ 850-1650 Hz กลุ่มหลังผ่าตัด stapedectomy เกิด W shape ที่ 500-1000 Hz ส่วนกลุ่มหลังผ่าตัด myringoplasty เกิด W shape ที่ frequency สูงกว่าและต่ำกว่ากลุ่มที่มีการได้ยินปกติ

เขาสรุปว่า การใช้ probe tone frequency 220 Hz ในการทดสอบ tympanometry จะให้ข้อมูลเกี่ยวกับระบบการส่งพลังงานของ middle ear ได้จำกัด multiple frequency tympanometry จะช่วยวินิจฉัยแยกโรคของ middle ear ได้โดยดู frequency ที่ทำให้เกิด W shape tympanogram ต่อมาในปี 1976 (49),1977 (50) เขาก็ทำการศึกษา multiple frequency tympanometry อีกซึ่งก็ได้ผลการศึกษาสนับสนุนการศึกษาในปี 1975

Alberti และ Jerger (51) ศึกษาการใช้ high frequency probe tone tympanometry ในการวินิจฉัยโรคของ middle ear ทำการศึกษาโดยใช้ probe tone frequency 220 และ 800 Hz กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาเป็นกลุ่มที่มีการได้ยินปกติและกลุ่มที่มีการได้ยินผิดปกติในระดับต่างๆ จำนวน 1143 หู ผลของการศึกษาพบว่า

1. 969 หู (85%) ไม่มีความแตกต่างของรูปร่าง impedance tympanogram เมื่อเปลี่ยน probe tone frequency

2. 174 หู (15%) มีรูปร่างของ impedance tympanogram แตกต่างกันเมื่อเปลี่ยนแปลง probe tone frequency โดยพบว่า 141 หู เกิด W shape ที่ 800 Hz ในขณะที่ได้ V shape ที่ 220 Hz ใน 141 หู พบว่ามีความผิดปกติของ tympanic membrane ประมาณ 70 หู เขาสรุปผลการศึกษาว่า 800 Hz tympano-

ometry ไม่ได้ให้ข้อมูลในการวินิจฉัยมากกว่า 220 Hz tympanometry แต่อย่างไรก็ตามการเกิด W shape tympanogram ในหูปกตินั้นมีจำนวนน้อยมาก และการมีความผิดปกติของ tympanic membrane เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้เกิด W shape tympanogram

### แนวความคิดการเลือกใช้ probe tone frequency

จากการศึกษา tympanometry โดยใช้ probe tone frequency หลายๆความถี่ ทำให้มีผู้ให้แนวคิดเกี่ยวกับการเลือกใช้ probe tone frequency ดังนี้

Feldman (2) แนะนำให้ใช้ probe tone frequency น้อยกว่า 800 Hz อาจใช้ 500-700 Hz เขากล่าวว่า การใช้ probe tone frequency ใกล้กับ resonance frequency มากเกินไป จะทำให้ resonance มีผลต่อรูปร่างของ tympanogram มากกว่าผลจากพยาธิสภาพใน middle ear

Van Camp และคณะ (3) แนะนำให้ใช้ 660, 678 Hz เนื่องจากที่ frequency มากกว่า 660 Hz จะพบ multipeaked tympanogram ได้มากขึ้นในคนที่มีการได้ยินปกติทำให้การวินิจฉัยผิดพลาดได้ นอกจากนี้การมีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่าน ear canal และ middle ear sound pressure ของเสียงความถี่ต่ำที่ ear canal, tympanic membrane และ middle ear จะเท่ากันเนื่องจากเสียงความถี่ต่ำนั้นจะมีความยาวคลื่น (wavelength) มากกว่าความยาวของ ear canal ตั้งแต่ probe tip ถึง tympanic membrane นั่นคือ เมื่อมีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่าน ear canal และ middle ear จะเป็น parallel acoustic element ซึ่งเข้าหลักการในการหาค่า acoustic immittance ที่ tympanic membrane แต่ถ้ามีเสียงความถี่สูงไหลผ่าน ear canal และ middle ear จะไม่เป็น parallel acoustic element เนื่องจากเสียงความถี่สูงมีความยาวคลื่นน้อยกว่าเสียงความถี่ต่ำและน้อยกว่าความยาวของ ear canal ทำให้ sound pressure ที่ ear canal ต่างจากที่ tympanic membrane

Feldman และ Wilber (4) กล่าวว่า การมี ossicular fixation, malleolar fixation หรือ adhesion จะทำให้ middle ear มี stiffness มากขึ้น การใช้ low frequency probe tone tympanometry ในการวินิจฉัยจึงมีแนวโน้มที่จะได้ผลปกติ ทั้งนี้เนื่องจากที่ low frequency ระบบของ middle ear จะเป็น stiffness controlled อยู่แล้ว แต่ถ้าใช้ high frequency probe tone จะพบความผิดปกติของพยาธิสภาพที่มีผลต่อ stiffness ของ

middle ear ได้ ส่วนพยาธิสภาพที่ทำให้ stiffness ของ middle ear ลดลง เช่น ossicular disruption ซึ่งจะ ทำให้ resonance frequency ของ middle ear ต่ำกว่าปกติ การใช้ high frequency probe tone จะพบรูปร่างของ tympanogram ผิดปกติซึ่งชัดเจนกว่าการใช้ low frequency probe tone ที่จะพบเพียงการเปลี่ยนแปลง amplitude เท่านั้น

Margolis และ Shanks (5, 37) กล่าวว่า เนื่องจาก ear canal และ middle ear เป็นโครงสร้างที่มีผลต่อการวัด acoustic immittance ดังนั้นจะต้องเข้าใจว่าโครงสร้างเหล่านี้มีปฏิสัมพันธ์กันอย่างไรจึงทำได้ ค่า acoustic immittance ที่วัดได้ที่ปลายของ probe tip ซึ่งจะต้องพิจารณาการทำงานของระบบอนุกรมและระบบขนานประกอบเพื่อให้เข้าใจ ในระบบขนานนั้น input impedance ของระบบจะน้อยกว่า impedance ของแต่ละองค์ประกอบในระบบและแรงที่กระทำต่อองค์ประกอบในระบบจะมีค่าเท่ากัน แต่ถ้าเป็นระบบอนุกรม input impedance ของระบบจะมากกว่า impedance ของแต่ละองค์ประกอบในระบบและแรงที่กระทำต่อในระบบจะเท่ากันก็ต่อเมื่อองค์ประกอบเหล่านั้นมี impedance เท่ากัน

เขากล่าวว่าในการวัด acoustic immittance นั้นถ้าใช้ probe tone frequency น้อยกว่า 1000 Hz จะมี sound pressure ที่มากระทำต่อ ear canal, tympanic membrane และ middle ear เท่ากัน แสดงถึงเมื่อมีเสียงความถี่น้อยกว่า 1000 Hz ไหลผ่านระบบ ear canal, tympanic membrane และ middle ear จะเป็น parallel acoustic element นั่นคือ แต่ละส่วนมีปฏิสัมพันธ์ต่อกันเหมือนอยู่ในระบบขนานซึ่งเข้าหลักการของการหาค่า acoustic immittance ที่ tympanic membrane ว่า ear canal และ middle ear จะต้องเป็น parallel acoustic element

Moller (อ้างใน 52) กล่าวว่า resonance frequency ของ middle ear จะอยู่ใกล้กับ 800 Hz การใช้ low frequency probe tone ในการวัด impedance จะจำกัดการวินิจฉัยโรคของ middle ear ซึ่งสอดคล้องกับ Shanks และ Shelton (7) Lilly (11, 53) ที่กล่าวว่า การใช้ low frequency tympanometry จะให้ข้อมูลที่ เป็นประโยชน์สำหรับผู้ป่วยที่มี middle ear cavity, tympanic membrane และ eustachian tube ผิดปกติแต่จะไม่มีควมไวมในการประเมินความผิดปกติของ ossicular chain การใช้ probe tone frequency ที่ใกล้กับ resonance frequency ในการศึกษา acoustic immittance ของ middle ear จะทำให้พบการเปลี่ยนแปลงในระบบ middle ear ได้ง่าย โดยปกติ resonance ของ middle ear จะอยู่ที่ประมาณ 1200 Hz แต่ก็จะมีพบ resonance peak เล็กๆ ที่ 750-900 Hz ด้วย

Lilly (53) แนะนำให้ใช้ probe tone frequency น้อยกว่า 1000 Hz เพราะจะทำให้ตรวจได้ง่ายขึ้น เนื่องจากที่ความถี่ 1000 Hz มีความยาวคลื่นประมาณ 35.2 เซนติเมตรที่อุณหภูมิ 34 °c ซึ่งมีความยาวมากกว่าความยาวของ ear canal ทำให้สามารถวัดคลื่นเสียงที่ใช้กระตุ้นกับคลื่นเสียงที่สะท้อนกลับจากโครงสร้างของ middle ear ได้พร้อมกัน

Hunter และ Margolis (54) กล่าวว่า การใช้ probe tone frequency มากกว่า 2000 Hz จะแปลผลได้ยากเนื่องจากมี artifact และถ้าใช้ probe tone frequency น้อยกว่า 150 Hz จะมีเสียงรบกวนมากทำให้ calibrate เสียงกระตุ้นได้ยาก

Van Camp และคณะ (55) กล่าวว่า การใช้ probe tone frequency 500–700 Hz จะแปลผลได้ง่าย เพราะเกิด notched tympanogram ในหูปกติได้น้อย แต่ไม่พบว่า frequency ใดที่เหมาะสมที่สุดในการใช้งานทางคลินิก อย่างไรก็ตามงานวิจัยส่วนใหญ่จะใช้ 660 Hz.

Valvik และคณะ (56) กล่าวว่า การทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency ใกล้เคียงกับ resonance frequency จะวัดการเปลี่ยนแปลง stiffness และ mass ของ middle ear โดยเขาศึกษาพบว่า ค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ resonance frequency ของ middle ear ในกลุ่มคนที่มีการได้ยินปกติมีค่าเท่ากับ 350–1750, 1049, 261 Hz ตามลำดับ

### Parameter ของ tympanometry

ในการศึกษาข้อมูลของ tympanogram นั้น Feldman และ Wilber (4) Margolis และ Shanks (5) พิจารณา 3 parameter คือ shape, amplitude และ tympanometric peak pressure (TPP) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. shape

รูปร่างของ tympanogram ให้ข้อมูลเกี่ยวกับลักษณะการทำงานโดยรวมของ tympanic membrane

และ ossicular chain นอกจากนี้ยังให้ข้อมูลเกี่ยวกับ resonance ของ middle ear อีกด้วย (4) รูปร่างของ tympanogram เกิดจากการมีปฏิสัมพันธ์ต่อกันของ resistance (R) และ reactance (X) component การมีพยาธิสภาพใน middle ear มีผลต่อค่าของ R และ X จึงมีผลให้รูปร่างของ tympanogram แตกต่างจากปกติ ในการวินิจฉัยโรคของหูชั้นกลางโดยการทดสอบ tympanometry จึงใช้ shape เป็น parameter ตัวหนึ่ง

## 2. amplitude

Van Camp และคณะ (3) Feldman และ Wilber (4) กล่าวว่า amplitude, static acoustic immittance หรือ static compliance คือ acoustic immittance ของ middle ear ที่วัดได้ในระนาบของ tympanic membrane

ปัจจุบันมีการใช้คำว่า amplitude แสดงค่า acoustic immittance ของ middle ear แทนการใช้คำว่า static acoustic immittance เนื่องจากมาตรฐาน ANSI S3.39,1987 กำหนดให้ static acoustic immittance เป็น acoustic immittance ของ middle ear ขณะพักซึ่ง pressure ใน external ear canal อยู่ที่ atmospheric pressure และไม่มีการหดตัวของกล้ามเนื้อใน middle ear แต่ในการทดสอบ tympanometry ในปัจจุบันเป็นวิธีการที่ใช้ในการวัด การบันทึก และการประเมินการเปลี่ยนแปลง acoustic immittance ของ middle ear ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง air pressure ใน ear canal อย่างมีระบบจึงไม่ใช่เป็นการวัด static acoustic immittance ตามข้อกำหนดที่กล่าวข้างต้น (1, 3, 57)

สำหรับการใช้คำว่า static compliance แสดงค่า acoustic immittance ของ middle ear เนื่องจากการศึกษาค่า acoustic immittance ในระยะแรกๆนั้นใช้ probe tone frequency 226 Hz ซึ่งการที่มีเสียงความถี่ 226 Hz ไหลผ่านระบบ spring จะเป็นองค์ประกอบที่อิทธิพลต่อค่า acoustic immittance มากกว่า mass แต่ในปัจจุบันมีการใช้ probe tone frequency มากกว่า 226 Hz ดังนั้นการใช้คำว่า static compliance จะเป็นการใช้คำที่ไม่ถูกต้อง (36, 58)

ในการหาค่า amplitude หรือ static acoustic immittance ที่ tympanic membrane นั้นจะต้องทำ ear canal correction เพื่อให้ได้ค่า acoustic immittance ของ ear canal volume แล้วจึงนำค่าที่ได้ไปลบจากค่า acoustic immittance ที่วัดได้ในระนาบของ probe tip (3, 37, 58, 59) สำหรับการ correct ear canal นั้น

แล้วแต่ว่าการศึกษาเน้นเลือก correct ear canal ที่ pressure ใดและค่า acoustic immittance ในระนาบของ probe tip นั้นอาจใช้ตำแหน่งที่ ambient pressure หรือใช้ peak ของ tympanogram ก็ได้ซึ่งการเลือกใช้ ตำแหน่งต่างกันดังกล่าวจะมีผลต่อการคำนวณค่า amplitude หรือ static acoustic immittance ที่ tympanic membrane ดังนั้นในการแสดงค่าปกติของ amplitude จะต้องบอก pressure ที่ใช้ในการ correct ear canal และตำแหน่งที่ใช้ในการหาค่า acoustic immittance ในระนาบของ probe tip ด้วย

การมีค่าปกติของ amplitude จะช่วยวินิจฉัยการมีพยาธิสภาพของ middle ear ได้เนื่องจากการมี พยาธิสภาพของ middle ear มีผลให้ amplitude เปลี่ยนแปลง ซึ่งอาจสูงกว่าหรือต่ำกว่าค่า amplitude ปกติ นอกจากนี้ค่า amplitude ยังช่วยแบ่ง tympanogram ที่เป็น single peak ได้แน่นอนขึ้น

### 3. tympanometric peak pressure (TPP)

TPP แสดงถึง pressure status ใน middle ear (4) โดยพิจารณาว่า peak ของ tympanogram เกิดที่ ear canal pressure เท่าไร ทั้งนี้เนื่องจาก peak ของ tympanogram เป็นตำแหน่งที่แสดงถึงพลังงาน เสียงสามารถเดินทางผ่าน middle ear ได้มากที่สุดซึ่งสภาวะนี้จะเกิดขึ้นเมื่อ pressure ใน middle ear เท่ากับ pressure ใน ear canal

Van Camp และคณะ (3) Margolis และ Shanks (5) กล่าวว่าถึงแม้ TPP จะสัมพันธ์กับ middle ear pressure แต่ก็พบว่า TPP มีค่าต่างจาก middle ear pressure เนื่องจาก

ก. instrument lag ในการทดสอบ tympanometry จะต้องใช้ transducer เป็นท่อใส่เข้าไปใน ear canal ความหนืดของอากาศทำให้ pressure ที่ปลายท่อ 2 ซ้ำต่างกัน ยิ่งถ้าเป็นท่อยาวและแคบจะทำให้มี pressure ต่างกันมากขึ้น

ข. ear hysteresis คุณสมบัติ viscoelastic ของ tympanic membrane และ middle ear ทำให้เกิด ภาวะ hysteresis เมื่อมีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ในขณะทดสอบ tympanometry ซึ่งมีผลให้ เกิด TPP ที่ตำแหน่งต่างกันถ้าใช้ probe tone frequency, pressure direction หรือ rate ต่างกัน

ค. asymmetry ของ resistance component ทำให้ TPP ของ Y,B,G tympanogram อยู่ในตำแหน่ง ต่างกันแม้จะทดสอบพร้อมกัน

ง. การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ middle ear cavity เนื่องจากการเคลื่อนไหวของ tympanic membrane ในขณะทดสอบ tympanometry ซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่สุดที่ทำให้ TPP ต่างจาก middle ear pressure

แต่อย่างไรก็ตามจากสาเหตุที่กล่าวมาข้างต้นจะทำให้ TPP ต่างจาก middle ear pressure ไม่เกิน 30 daPa

Feldman และ Wilber (4) Northern (47) กล่าวว่า TPP สามารถประเมิน middle ear pressure ได้ถูกต้อง  $\pm 15 \text{ mmH}_2\text{O}$

Decraemer และคณะ (60) กล่าวว่า TPP ไม่ได้ บอกถึง middle ear pressure จริงๆ เนื่องจากมีภาวะ hysteresis ที่เกิดจาก viscoelastic ของ soft tissue ของ middle ear มาเกี่ยวข้อง แต่อย่างไรก็ตาม TPP จะประมาณค่า middle ear pressure ผิดพลาดไม่เกิน 15 daPa

การศึกษา tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 630, 660, 678 Hz

Hall และ Chandler (1) Hall (18) กล่าวว่าในหูปกติส่วนใหญ่จะพบ tympanogram เป็น single peak นั่นคือ ได้รูป 1B1G1Y เป็นส่วนใหญ่ แต่ก็พบว่ามี notched tympanogram ในหูปกติด้วย Van de Heyning และคณะ (16) จึงแยกการเกิด notched tympanogram ในหูปกติออกจากหูปกติคือในหูปกติจะต้องมี extrema ของ B, G และ Y tympanogram ไม่เกิน 5, 3, 3 extrema ตามลำดับ และ pressure ระหว่าง extrema ที่อยู่นอกสุดไม่เกิน 75 และ 100 daPa ใน tympanogram ที่มี 3 และ 5 extrema ตามลำดับ

Feldman และ Wilber (4) กล่าวว่า การใช้ probe tone frequency ใกล้เคียงกับ resonance frequency ของ middle ear จะทำให้เกิด notched tympanogram ได้ซึ่งเป็นผลจากการมีปฏิสัมพันธ์ต่อกันของ X และ R

Shanks และ Shelton (7) กล่าวว่า เราสามารถบอกได้ว่าระบบใน middle ear เป็น stiffness controlled, mass controlled หรืออยู่ที่ resonance ของระบบโดยการดูรูปร่างของ notched B tympanogram ถ้าจุดต่ำสุดของ notch อยู่สูงกว่าระดับ tail value จัดเป็นระบบ stiffness controlled ถ้าจุดต่ำสุดของ notch อยู่ต่ำกว่า tail value จัดเป็นระบบ mass controlled และถ้าจุดต่ำสุดของ notch อยู่ที่ระดับ tail value ถือว่าอยู่ที่ resonance ของระบบ เมื่อใช้ probe tone frequency 678 Hz stiffness จะมี impedance มากกว่า mass ซึ่งเรียกว่าระบบ stiffness controlled ดังนั้นจุดต่ำสุดของ notch จะต้องอยู่เหนือระดับ tail value ถ้าพบว่าอยู่ต่ำกว่าระดับ tail value แสดงว่าหูนั้นมีพยาธิสภาพ จากการพิจารณารูปร่างของ notched B tympanogram จึงอาจช่วยแยก notched tympanogram ที่ปกติและผิดปกติได้ Margolis และ Popelka (67) ทำการศึกษาพบว่ารูปร่างของ notched B tympanogram ในกลุ่มตัวอย่างที่มีแผลที่ tympanic membrane และ กลุ่ม ossicular disruption พบว่าจุดต่ำสุดของ notch อยู่ต่ำกว่าระดับ tail value

Margolls และ Shanks (37) Wiley และ Block (52) กล่าวว่าเมื่อใช้ probe tone frequency ใกล้กับ resonance frequency ของ middle ear จะทำให้ amplitude ของ tympanogram เพิ่มขึ้น

Vanhuyse และคณะ (61) กล่าวว่า impedance ที่วัดได้ในระนาบของ probe tip ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอากาศ ความดันอากาศ ความเร็วของเสียง ความถี่ของเสียงสัญญาณที่ใช้ พื้นที่ตัดขวางของ ear canal และระยะทางจากปลาย probe tip ถึง tympanic membrane

สำหรับความถี่ของสัญญาณเสียงที่ใช้ในการทดสอบ tympanometry นั้นเขาพบว่า การใช้ high frequency probe tone จะทำให้เกิด W notched tympanogram ในหูปกติได้ เขาอธิบายการเกิด W notched tympanogram โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่าง reactance (X) และ resistance (R) ที่มีการเปลี่ยนแปลงตาม pressure ใน ear canal ดังรูปที่ 14 ค่าฟังก์ชันของ X จะมีค่าสมมาตรเมื่อ ear canal pressure มีค่าเท่ากับ 0 daPa ซึ่งพบว่า X tympanogram มีรูปร่างเป็น  $\wedge$  shape ส่วนค่า R นั้นพบว่าเมื่อ ear canal pressure เป็นลบจะมีค่า R มากกว่าเมื่อ ear canal pressure เป็นบวกเล็กน้อย ซึ่ง R tympanogram มีรูปร่างเกือบแบนราบ (flat) ความสัมพันธ์ระหว่าง X และ R มีผลต่อรูปร่างของ BG tympanogram ซึ่งเขาได้แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มดังต่อไปนี้

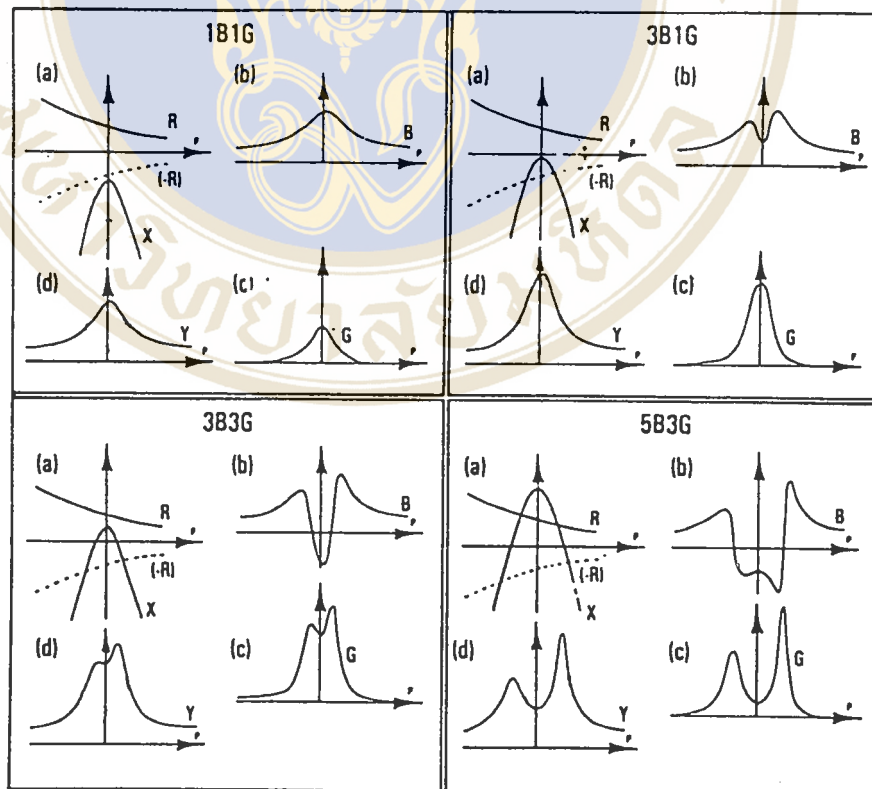
กลุ่มที่ 1 รูป 1B1G (B และ G tympanogram มี 1 extrema) เกิดเมื่อ  $R^2 < X^2$  ทุกๆ ear canal pressure ส่วนค่า X และ R ที่ ear canal pressure ใกล้กับ 0 daPa นั้น พบว่าค่า  $X_0 < -R_0$

กลุ่มที่ 2 รูป 3B1G (B และ G tympanogram มี 3 และ 1 extrema ตามลำดับ) เกิดเมื่อ  $R^2 > X^2$  และ  $0 > X_0 > -R_0$  ที่ ear canal pressure ใกล้กับ 0 daPa แต่ที่ negative และ positive pressure มากๆ พบว่า  $X^2 > R^2$

กลุ่มที่ 3 รูป 3B3G (B และ G tympanogram มี 3 extrema) เกิดเมื่อ  $R > X$  และ  $0 < X_0 < -R_0$  ที่ ear canal pressure ใกล้กับ 0 daPa แต่ที่ negative และ positive pressure มากๆ พบว่า  $X^2 > R^2$

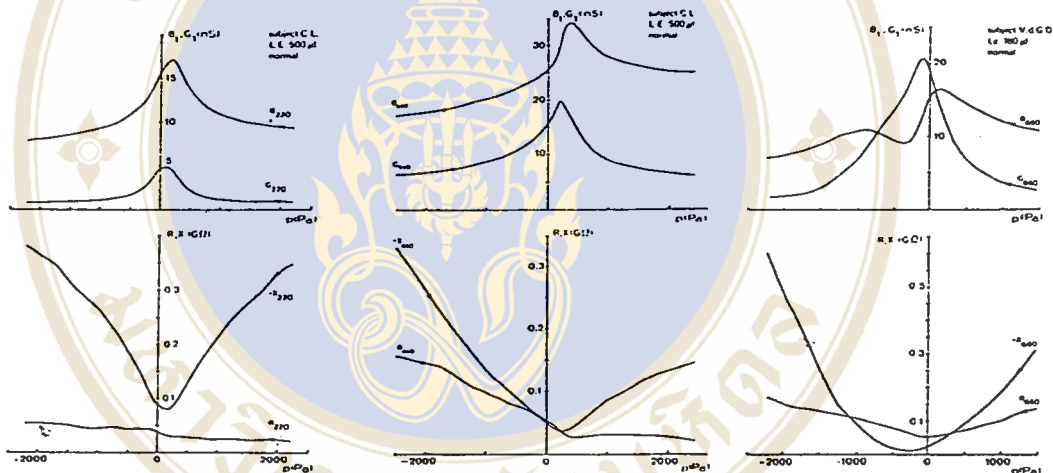
กลุ่มที่ 4 รูป 5B3G (B และ G tympanogram มี 5 และ 3 extrema ตามลำดับ) เกิดเมื่อ  $X > R$  ทุก ear canal pressure

รูปร่างของ BG tympanogram ที่กล่าวมาข้างต้นเป็นรูปร่างที่พบได้ในหูปกติซึ่งเขายังกล่าวเพิ่มเติมอีกว่า ถ้านับที่ Y, B, G tympanogram พร้อมกันแล้ว outermost extrema ของ G tympanogram จะอยู่ใน outermost extrema ของ B tympanogram นอกจากนี้เขาได้กล่าวถึง sharp W shaped tympanogram ที่พบในหูปกตินั้นอาจเกิดจากเครื่องมือที่ใช้ตรวจ



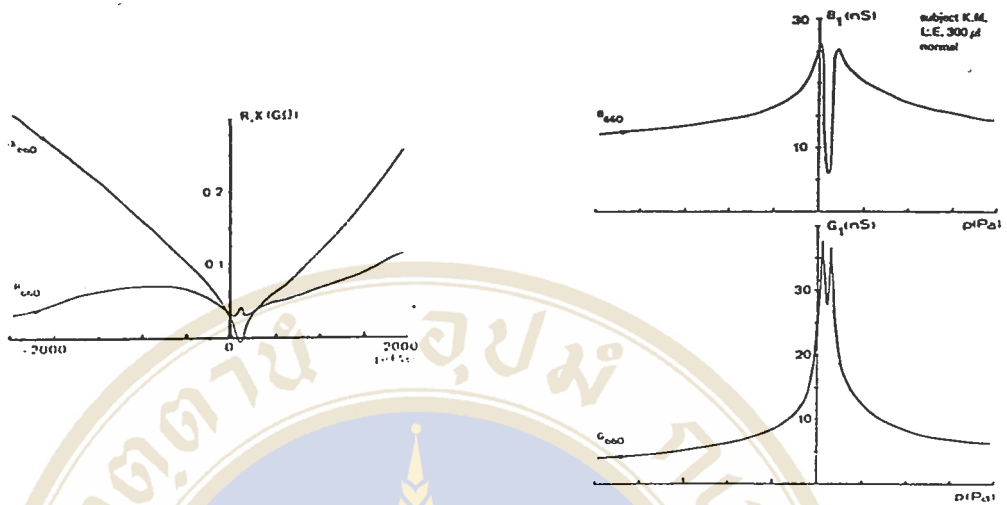
รูปที่ 14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า X และ R ที่ทำให้เกิด Y, B, G tympanogram แบบต่างๆ ที่พบได้ในหูปกติ (จาก 61)

Creten และคณะ (62) ศึกษาารูปแบบของ R, X tympanogram โดยคำนวณค่า R, X จาก B, G tympanogram โดยใช้สูตร  $X = -B/(B^2+G^2)$  และ  $R = G/(B^2+G^2)$  ค่า B, G ที่ใช้ในสูตรนั้นเป็นค่า B, G ของ tympanic membrane และ middle ear ซึ่งคำนวณได้จากค่า B, G ที่ probe tip ซึ่งเป็นค่าที่จุดสูงสุดของ tympanogram ลบด้วยค่า B, G ที่ ear canal ซึ่งเป็นค่า B, G ที่ ear canal pressure  $-400$  daPa เขาทำการศึกษาโดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ผลการศึกษาที่ได้พบว่าค่า X เปลี่ยนจากค่าลบไปทางค่าบวกเมื่อ probe tone frequency เพิ่มจาก 220 เป็น 660 Hz ในขณะที่ค่า R ไม่เปลี่ยนแปลงอย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลง probe tone frequency ไม่ทำให้รูปร่างของ X, R tympanogram เปลี่ยนแปลงคือรูปร่าง X tympanogram เป็น  $\Lambda$  shape และรูปร่าง R tympanogram เป็นแบบแบนราบ (flat) ดังรูปที่ 15



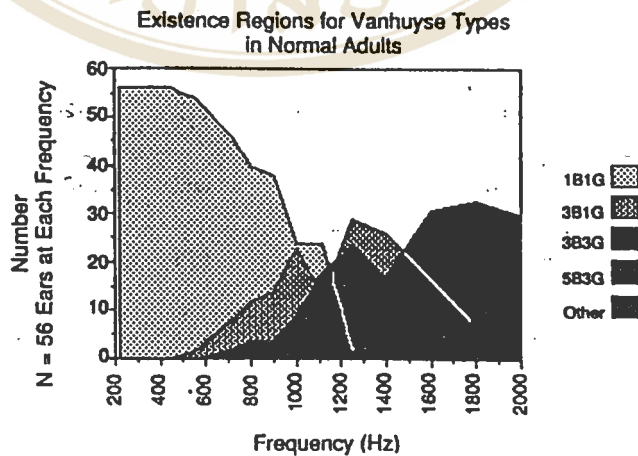
รูปที่ 15 แสดงรูปร่างของ X, R tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 220, 660 Hz (จาก 62)

นอกจากนี้เขายังพบว่า มี sharp W shape ของ B, G, X, R tympanogram ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติและมี tympanic membrane ปกติ ซึ่งเกิดขึ้นจาก artifact ของเครื่องมือ ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แสดง sharp W-shaped tympanogram ที่เกิดขึ้นในคนที่มีการได้ยินปกติซึ่งเกิดขึ้นจาก artifact ของเครื่องมือ (จาก 62)

Hunter และ Margolis (54) แสดงกราฟการเกิด tympanogram รูปแบบต่างๆ ตาม Vanhuyse model ในผู้ใหญ่ปกติ โดยใช้ probe tone frequency 200–2000 Hz มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal แบบ descending direction อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 15 daPa /second ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 แสดงกราฟการเกิดรูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 200–2000 HZ descending direction rate 15 daPa/second (จาก 54)

จากภาพเห็นได้ว่า เมื่อ probe tone frequency สูงขึ้น รูปร่าง tympanogram จะซับซ้อนขึ้น นอก  
จากนี้เขายังกล่าวว่า notched tympanogram ที่ปกตินั้น ควรเกิด notch ตรงกลาง และเป็น notch แบนๆ  
การมี notch อยู่ทางด้านข้างและเป็น notch กว้างอาจแสดงถึงความผิดปกติใน middle ear ได้

Van Camp และคณะ (3, 63) กล่าวว่า ค่า R ไม่เปลี่ยนแปลงตาม probe tone frequency แต่จะ  
เปลี่ยนแปลงตาม ear canal pressure คือ R มีค่าลดลงเมื่อเพิ่ม ear canal pressure จากการที่ค่า R เปลี่ยน-  
แปลงตาม pressure นี้มีผลให้ TPP ของ B, G tympanogram อยู่ในตำแหน่งต่างกัน อย่างไรก็ตาม Wilson  
และคณะ (63) ได้ศึกษาเปรียบเทียบ amplitude ของ Y, B, G tympanogram ที่คำนวณจาก peak Y, B, G  
ที่อยู่ในตำแหน่งต่างกัน (TPP ต่างกัน) พบว่า เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz ได้ค่า amplitude ของ  
Y, B, G tympanogram ต่างกันมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.03 mmhos และเมื่อใช้ probe tone frequency  
660 Hz มีค่า amplitude ต่างกันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.28 mmhos เขาสรุปว่า TPP ของ Y, B, G tympa-  
nogram ที่เกิดในตำแหน่งต่างกันในขณะที่ทำการทดสอบพร้อมกันนั้นมีผลต่อค่า amplitude น้อยมาก

Bess และ Humes (35) กำหนดให้ค่า TPP ของหูผู้ใหญ่ปกติอยู่ในช่วง +40 และ -100 daPa

Ostergard และ Carter (65) ทำการศึกษาความสัมพันธ์ของ TPP กับความผิดปกติของ middle ear  
พบว่า 15 ใน 16 หูที่มี TPP มากกว่า  $\pm 49$  mmH<sub>2</sub>O มีอาการของโรคในระบบทางเดินหายใจส่วนบน  
อาการทางหูและหรือมีความผิดปกติของ tympanic membrane เขาจึงแนะนำให้ใช้  $\pm 50$  mmH<sub>2</sub>O เป็นค่า  
ปกติของ TPP นอกจากนี้เขายังพบว่า tympanogram ที่มีค่า compliance (amplitude ของ tympanogram)  
น้อยลงและมี TPP ที่ positive pressure ยังสามารถบอกถึงการมี effusion ได้ถึง 67%

Ostergard และ Carter (65) กล่าวว่า positive pressure ใน middle ear cavity พบได้ในระยะแรกของ  
otitis media แบบเฉียบพลัน การจามหรือการสั่งน้ำมูก

Margolis และ Heller (66) กล่าวว่า โดยปกติแล้วมีการเกิด negative pressure ใน middle ear  
cavity ได้เนื่องจาก mucosa ใน middle ear cavity ดูดซึ่มก๊าซไว้ แต่ถ้ามี negative pressure มากๆ แสดง  
ถึงความผิดปกติที่เกิดจากอัตราการดูดซึ่มก๊าซเปลี่ยนแปลง การมี ciliary action ของ eustachian tube ที่

ปิดและการเป็นหวัดคัดจมูก สำหรับการ เกิด positive pressure ใน middle ear นั้นพบในระยะแรกของ otitis media ชนิดเฉียบพลันเนื่องจากการแพร่กระจายก๊าซจากเนื้อเยื่อที่ติดเชื้อเข้าไปใน middle ear cavity

Wiley และคณะ (68) กล่าวว่า มีการศึกษาเกี่ยวกับการวัด acoustic immittance มากมาย แต่ไม่สามารถนำข้อมูลมาใช้ทั่วไปได้เนื่องจากเครื่องมือที่ใช้ในการศึกษาต่างกัน มีการ calibration เครื่องมือและวิธีการที่ใช้ในการทดสอบต่างกัน ดังนั้นในแต่ละคลินิกจึงควรมีค่าปกติไว้ใช้ในการวินิจฉัย เขาจึงได้ทำการศึกษาค่าปกติของ acoustic immittance ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติเป็นชาย 50 คน หญิง 77 คน อายุ 20-30 ปี ทั้งหมด 253 หู ใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz มีการเปลี่ยนแปลง pressure จาก -250 daPa ถึง +250 daPa อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 50 daPa/second พิจารณา tympanogram ในรูปของ B, G และ Y ผลการศึกษามีดังนี้

1. รูปร่าง เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz ได้ B, G, Y tympanogram เป็น single peak เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz ได้ 1B1G 192 หู (75.8%) 3B1G 44 หู (17.4%) 3B3G 14 หู (5.5%) และ 5B3G 3 หู (1.2%)

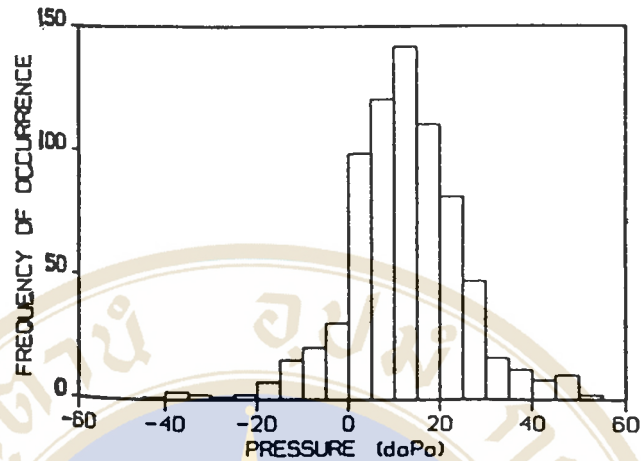
2. amplitude วัดจากค่า B, G หรือ Y ที่ peak ลบด้วยค่า B, G หรือ Y ที่ pressure -250 daPa/second

เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz พบว่า ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ Y tympanogram มี 2 ค่าคือ  $0.74 \pm 0.29$  mmhos เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz แล้วได้ single-peaked tympanogram และ  $0.94 \pm 0.55$  mmhos เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz แล้วได้ single-peaked และ notched tympanogram ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ B และ G tympanogram คือ  $0.69 \pm 0.26$  และ  $0.28 \pm 0.14$  mmhos ตามลำดับ

เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz พบว่าค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ Y, B, G tympanogram คือ  $3.06 \pm 1.72$ ,  $2.09 \pm 1.05$ ,  $2.24 \pm 1.36$  mmhos ตามลำดับ

นอกจากนี้เขาทดลองศึกษาค่า amplitude โดยใช้ค่า B, G, Y ที่ peak ลบค่า B, G, Y ที่ -600 daPa พบว่าได้ค่า amplitude มากขึ้นทั้งที่ 220 และ 660 Hz เมื่อเปรียบเทียบกับค่า amplitude โดยใช้ค่า B, G, Y ที่ peak ลบค่า B, G, Y ที่ -250 daPa

3. TPP วิเคราะห์เฉพาะ single-peaked tympanogram พบว่าค่าเฉลี่ยของ TPP=11.8 daPa การที่มี TPP ที่ positive pressure นั้นเนื่องจากใช้ pressure direction ชนิด ascending direction



รูปที่ 18 แสดงตำแหน่งของ TPP เมื่อใช้ probe tone frequency 220 , 660 Hz (จาก 68)

Wiley และคณะ (6) พบว่าค่าปกติของ amplitude และ TPP ของ tympanogram ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ต่างจากค่าปกติในกลุ่มเด็กแรกเกิด เด็กทารก และเด็กโต เขาจึงแนะนำว่าควรมีค่าปกติในแต่ละกลุ่มอายุ

Himmelfarb และคณะ (69) ศึกษาค่าปกติของ amplitude และ TPP จาก tympanogram ของกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติ tympanic membrane ปกติและไม่มีประวัติโรคหู จำนวน 90 คน อายุ 18-30 ปี (อายุเฉลี่ย 23 ปี) โดยใช้เครื่อง Grason Stadler otoadmittance meter model 1720 ใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz สำหรับการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal นั้นใช้ ascending direction ในการแสดง B tympanogram และ descending direction ในการแสดง G tympanogram มีการเปลี่ยนแปลง pressure ช่วง  $\pm 200$  mmH<sub>2</sub>O ในการหาค่า amplitude นั้นใช้ค่า mmhos ที่ peak ลบด้วยค่า mmhos ที่ pressure -200 mmH<sub>2</sub>O และ TPP คือ pressure ที่เกิด peak ผลการศึกษามีดังนี้

1. ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude Y ที่ 220 Hz, Y ที่ 660 Hz, B ที่ 660 Hz และ G ที่ 660 Hz คือ  $0.6 \pm 0.3$ ,  $2.15 \pm 1.02$ ,  $1.29 \pm 0.66$  และ  $1.65 \pm 0.88$  mmhos
2. TPP อยู่ในช่วง -57 mmH<sub>2</sub>O ถึง +39.9 mmH<sub>2</sub>O ทั้ง B, G และ Y tympanogram แต่เขาแนะนำให้ใช้  $\pm 50$  mmH<sub>2</sub>O เป็นค่าปกติ

Feldman และ Syracuse (70) กล่าวว่า tympanic membrane, ossicles, อากาศใน middle ear cavity, mastoid space และ cochlear fluid เป็นโครงสร้างที่มีผลต่อการส่งพลังงานเสียงเข้าสู่หูชั้นในทั้งสิ้น ถ้าโครงสร้างเหล่านี้ผิดปกติมีผลให้ความสามารถในการส่งต่อพลังงานเสียงเปลี่ยนแปลงไป เมื่อทดสอบ tympanometry จะพบการเปลี่ยนแปลงของ static acoustic impedance หรือ amplitude ของ tympanogram เขาจึงได้ทำการศึกษาค่าปกติของ amplitude จากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม คือ กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่มีการได้ยินปกติหรือมีการได้ยินผิดปกติชนิดประสาทหูเสื่อมซึ่งมี tympanic membrane ปกติจำนวน 100 หู กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มที่มีการได้ยินปกติแต่ tympanic membrane ผิดปกติ ซึ่งพิจารณาความผิดปกติจากการซักประวัติ การตรวจหู และ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz เป็น W shape คล้ายกับ W shaped tympanogram ของผู้ป่วยที่มี heal perforation ของ tympanic membrane

ผลการศึกษาในกลุ่มที่มีการได้ยินปกติหรือมีการได้ยินผิดปกติชนิดประสาทหูเสื่อม ซึ่งมี tympanic membrane ปกติ พบว่า ค่า amplitude ของ Y ที่ 220 Hz, Y ที่ 660 Hz, B ที่ 660 Hz และ G ที่ 660 Hz คือ 0.33 ถึง 0.85 1.38 ถึง 4.5 0.9 ถึง 2.45 และ 1 ถึง 4.2 mmhos ตามลำดับ (แสดงเป็น 80% range)

ผลการศึกษาในกลุ่มที่มีการได้ยินปกติแต่มี tympanic membrane ผิดปกติ พบว่า ค่า amplitude ของ Y ที่ 220 Hz, Y ที่ 660 Hz, B ที่ 660 Hz และ G ที่ 660 Hz คือ 0.95 ถึง 2.6 4.55 ถึง 11.1 0.6 ถึง 4.45 และ 4.25 ถึง 10.1 mmhos ตามลำดับ (แสดงเป็น 80% range)

สำหรับรูปร่างของ tympanogram นั้น พบ W shape ทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่าง แต่ W shape ของกลุ่มที่ 2 แตกต่างจากกลุ่มแรกอย่างชัดเจน

เขาสรุปว่า สภาพของ tympanic membrane เป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการทดสอบ tympanometry ถ้ามีความผิดปกติของ tympanic membrane จะพบรูปร่างของ tympanogram ผิดปกติอย่างชัดเจนถ้าใช้ high frequency probe tone และการพิจารณาค่า amplitude นั้นเหมาะสมที่จะใช้หาความผิดปกติของ middle ear เฉพาะรายที่ไม่มีความผิดปกติของ tympanic membrane เท่านั้น

Wilson และคณะ (64) ศึกษา shape, amplitude และ TPP ของ tympanogram จากกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติจำนวน 24 คน อายุเฉลี่ย 25.6 ปี โดยใช้เครื่อง Grason Stadler otoadmittance model 1723 ใช้ probe tone frequency 226 และ 678 Hz มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ชนิด ascending direction ที่ pressure -400 ถึง 300 daPa อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 25 daPa/second

ในการหาค่า amplitude นั้นใช้ค่า mmhos ที่ peak ของ tympanogram ลบด้วยค่า mmhos ที่ pressure -390 daPa

ผลการศึกษาเมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz มีดังนี้

1. shape พบว่าเป็น single-peaked tympanogram
2. amplitude มีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude Y คือ  $0.64 \pm 0.17$  mmhos เมื่อ tympanogram ที่ 226 และ 678 Hz เป็น single peak และ  $1.41 \pm 0.69$  mmhos เมื่อ tympanogram ที่ 226 Hz เป็น single peak และ ที่ 678 Hz เป็น notch

ผลการศึกษาเมื่อใช้ probe tone frequency 678 Hz มีดังนี้

1. shape พบว่า เป็นรูป 1B1G 13 คน 3B1G 7 คน 3B3G 1 คน และ 5B3G 3 คน
2. amplitude มีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude Y, B, G ที่เป็น single-peaked tympanogram คือ  $1.86 \pm 0.63$ ,  $1.36 \pm 0.39$  และ  $1.36 \pm 0.56$  mmhos ตามลำดับ ส่วนค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude Y, B, G ที่เป็น notched tympanogram คือ  $3.75 \pm 1.36$ ,  $0.32 \pm 1.24$  และ  $3.22 \pm 1.29$  mmhos ตามลำดับ
3. TPP เชาศึกษาตำแหน่งของ TPP โดยเปรียบเทียบตำแหน่ง TPP ของ B และ G tympanogram เท่านั้นพบว่า มีตำแหน่ง TPP แตกต่างกันและเมื่อเขาลองคำนวณค่า B, G ตรงตำแหน่ง pressure เดียวกับ pressure ที่เกิด peak Y แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่า B, G ที่ peak B, G โดยตรงพบว่ามีค่าแตกต่างกันน้อยมาก ในทำนองเดียวกันเมื่อเขาคำนวณค่า Y จาก peak Y เปรียบเทียบกับค่า Y ตรงตำแหน่ง pressure เดียวกับ pressure ที่เกิด peak B, G ก็พบว่ามีค่าแตกต่างกันน้อยมาก

Creten และคณะ (71) ศึกษา tympanogram ของกลุ่มตัวอย่าง 3 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ เป็นชาย 24 คน หญิง 20 คน อายุ 20-29 ปี กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มผู้ป่วยในคลินิก หู คอ จมูก ที่มีการได้ยินปกติ อายุ 1-80 ปี จำนวน 725 หู กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มที่มีการได้ยินผิดปกติชนิดประสาทหูเสื่อมที่ไม่ได้เกิดจากความผิดปกติของ cochlear fluid อายุ 1-90 ปี จำนวน 448 หู ใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 20 daPa/second ผลการศึกษามีดังนี้

1. กลุ่มแรกเป็นกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ อายุ 20-29 ปี พบว่า เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz มีรูปร่างเป็น single-peaked tympanogram แต่เมื่อใช้ 660 Hz มีรูปร่างเป็น notched tympanogram ชนิด 1B1G 56.8% 3B1G 28.1% 3B3G 6% และ 5B3G 9.1% ส่วนค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระยะระหว่าง extrema ที่อยู่ด้านนอกสุด (outermost extrema) ของ Y, B, G tympanogram ที่มี 3 extrema และ B tympanogram ที่มี 5 extrema คือ  $32 \pm 19$ ,  $31 \pm 17$ ,  $28 \pm 18$  และ  $66 \pm 25$  daPa ตามลำดับ
2. กลุ่มที่ 2 เป็นกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ อายุ 1-80 ปี ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้ศึกษาผลของอายุต่อรูปร่างของ B,G tympanogram ผลการศึกษาพบว่ารูปร่างของ B,G tympanogram ไม่แตกต่างกันแม้อายุต่างกัน
3. กลุ่มที่ 3 เป็นกลุ่มที่มีการได้ยินผิดปกติชนิดประสาทหูเสื่อม พบว่ารูปร่างของ B,G tympanogram เหมือนกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ

Margolis และ Goycoolea (72) ศึกษา tympanogram ที่ได้จากการใช้ probe tone frequency 226-2000 Hz กลุ่มตัวอย่างเป็นหญิง 14 คน ชาย 14 คน อายุ 19-48 ปี มีการได้ยินปกติ ไม่มีประวัติโรคของ middle ear ตรวจหูไม่พบความผิดปกติใช้การเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ชนิด descending direction อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 250 daPa/second ผลการศึกษาพบว่า เมื่อเพิ่ม probe tone frequency รูปร่างของ tympanogram จะเปลี่ยนแปลงตาม Vanhuysse model ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ probe tone frequency ที่ทำให้รูปร่างของ tympanogram เป็นรูป 1B1G-3B1G, 3B1G-3B3G 3B3G-5B3G คือ  $1010 \pm 228$ ,  $1570 \pm 330$  และ  $1701 \pm 248$  Hz ตามลำดับ

Van de Heyning และคณะ (16) กล่าวว่าการใช้ 220 Hz tympanometry ในการวินิจฉัยพยาธิสภาพของ ossicular chain ชนิด luxation, necrosis และ disruption นั้นมักจะได้อุณหภูมิของ admittance (Y) tympanogram เป็น single peak ที่มี peak สูงมาก ในกรณีที่มี tympanic membrane ผิดปกติร่วมกับมีพยาธิสภาพของ ossicular chain เช่น otosclerosis การใช้ 220 Hz tympanometry ก็จะได้ tympanogram มี peak สูงเช่นเดียวกับที่พบในกลุ่ม ossicular disruption ทำให้วินิจฉัยผิดพลาดได้ การใช้ probe tone frequency 660 Hz สามารถวินิจฉัยแยกโรค ossicular disruption กับความผิดปกติของ tympanic membrane ได้ถูกต้องมากกว่าการใช้ probe tone frequency 220 Hz

Van de Heyning และคณะ (16) ทำการศึกษา tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz จากกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม กลุ่มแรกเป็นกลุ่มตัวอย่างที่เป็น myringopexia และมีพยาธิสภาพของ

incudo-stapedial joint จำนวน 14 คน กลุ่มที่ 2 ใช้ temporal bone 8 อันที่มี middle ear ปกติ ทำการทดสอบ tympanometry ภายใน 4-50 ชั่วโมงหลังเสียชีวิต นำเอา temporal bone มาทำให้เกิด ossicular disruption นำผลที่ได้จาก 2 กลุ่มตัวอย่างไปเปรียบเทียบกับผลของกลุ่มที่มีการได้ยินปกติจำนวน 80 คน อายุ 18-22 ปี ผลการศึกษามีดังนี้

1. เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz พบว่า tympanogram ของทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่างที่มีความผิดปกติของ middle ear เป็น single-peaked tympanogram ทั้งหมดและมีค่า peak amplitude คาบเกี่ยวกับค่า peak amplitude ของกลุ่มหูปกติมาก
2. เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz พบว่า กลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มที่มีความผิดปกติของ middle ear เกิด W shape tympanogram แตกต่างจาก W shape tympanogram ของกลุ่มที่มีการได้ยินปกติ

เขาสรุปผลการศึกษาว่า การใช้ probe tone frequency 660 Hz ในการทดสอบ tympanometry จะช่วยในการวินิจฉัย disruption necrosis และ luxation ของ ossicula chain ได้ดีกว่า 220 Hz แต่อย่างไรก็ตามจะพบ false positive จากการทดสอบ tympanometry มาก จึงควรใช้ tympanometry ร่วมกับ pure tone audiometry และ otoscopic examination

Chesnult และคณะ (73) ทำการผ่าตัดหูซ้ายของผู้ป่วย 2 คน ที่มีการได้ยินผิดปกติชนิดการนำเสียงเสื่อม ก่อนทำผ่าตัดเขาทดสอบ tympanometry ในผู้ป่วยทั้ง 2 คน โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ซึ่งได้ผลการทดสอบดังนี้

1. ผู้ป่วยคนแรกอายุ 7 ปี ซึ่งมีการได้ยินผิดปกติชนิดการนำเสียงเสื่อมทั้ง 2 หู เมื่อทดสอบ tympanometry ที่ 220 Hz ได้ tympanogram type A แต่ที่ 660 Hz พบว่า tympanogram ของทั้ง 2 หูเป็น W shape tympanogram ที่มีลักษณะเดียวกับที่พบในผู้ป่วย ossicular disruption, heal perforation ของ tympanic membrane เมื่อพิจารณา amplitude (เฉพาะ type A tympanogram) พบว่า amplitude ของ susceptance และ conductance tympanogram ในหูซ้ายสูงกว่าค่าปกติแต่ในหูขวาอยู่ในค่าปกติทั้ง 2 probe tone frequency เมื่อทำการผ่าตัดหูซ้ายพบว่ามีความผิดปกติของ ossicular chain แบบ stapes fixation และ incudo stapedial joint disruption

2. ผู้ป่วยคนที่สองอายุ 34 ปี หูขวามีการได้ยินปกติ ส่วนหูซ้ายมีการได้ยินผิดปกติชนิดการนำเสียงเสื่อมระดับปานกลาง เมื่อทดสอบ tympanometry พบว่า tympanogram ของหูซ้ายเป็น type A เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz และเมื่อพิจารณา amplitude ของ type A tympanogram พบว่า มี amplitude ต่ำกว่าค่าปกติ เมื่อทำการผ่าตัดหูซ้ายพบว่าเป็น epitympanic recess fixation และ incudo stapedial joint disruption

จะเห็นว่า 660 Hz tympanogram ให้ข้อมูลในการวินิจฉัย ossicular disruption ของผู้ป่วยคนแรกได้ชัดเจน สำหรับผู้ป่วยคนที่ 2 ก็เป็น ossicular disruption แต่ 660 Hz tympanogram ไม่เป็นรูปแบบของ ossicular disruption เนื่องจากผู้ป่วยมี epitympanic recess fixation ด้วยซึ่งเป็น lateralmost disorder ทำให้ปิดบังพยาธิสภาพของ ossicular chain

Shone และ Moflat (17) ทำการศึกษาค่า compliance ที่วัดโดยเครื่อง electro acoustic impedance โดยใช้ probe tone frequency 220 Hz เปรียบเทียบกับค่า admittance ที่วัดโดยเครื่อง otoadmittance โดยใช้ probe tone frequency 220,660 Hz ในกลุ่มผู้ป่วย otosclerosis 20 คน อายุ 14-71 ปี อายุเฉลี่ย 48.3 ปี เป็นชาย 6 คน หญิง 14 คน ตรวจหูแล้วไม่พบความผิดปกติของ tympanic membrane ใช้การเปลี่ยนแปลง pressure ชนิด ascending และ descending direction ในช่วง  $\pm 200$  mmH<sub>2</sub>O อัตราการเปลี่ยน pressure 15 mmH<sub>2</sub>O/second เปรียบเทียบผลที่ได้กับค่าปกติของ Feldman (74)

ผลการศึกษามีดังนี้

1. ในการศึกษาค่า compliance เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz พบว่ามีค่า compliance ต่ำกว่าปกติ 18 หู
2. ในการศึกษาค่า admittance เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz พบว่ามีค่า admittance ต่ำกว่าปกติ 18 หู
3. ในการศึกษาค่า admittance เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz พบว่ามีค่า admittance ต่ำกว่าปกติ 23 หู และสูงกว่าปกติ 2 หู

เขาสรุปผลการศึกษาว่า การวัดค่า admittance โดยใช้ probe tone frequency 660 Hz จะให้ข้อมูลในการวินิจฉัย otosclerosis ได้ถูกต้องกว่าการวัดค่า compliance และ admittance โดยใช้ probe tone frequency 220 Hz สำหรับการศึกษานี้พบว่ามี 2 หู ที่ได้ค่า admittance ที่ 660 Hz สูงกว่าปกติอาจเป็นเพราะมี tympanic membrane เคลื่อนไหวมากกว่าปกติ ซึ่งการวัด admittance มีความไวมากต่อความผิดปกตินี้

Roberto และ Zito (75) ทำการศึกษา tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz จาก 14 temporal bone มีอายุขณะเสียชีวิต 20-45 ปี ไม่มีประวัติโรคหู ทำการศึกษาใน 15-24 ชั่วโมงหลังเสียชีวิต ใช้การเปลี่ยนแปลง pressure ชนิด descending direction ในการแสดง susceptance tympanogram และ ascending direction ในการแสดง conductance tympanogram มีการเปลี่ยนแปลง pressure ในช่วง  $\pm 200$  mmH<sub>2</sub>O อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 20 mmH<sub>2</sub>O/second ค่าความ amplitude ของ susceptance และ conductance tympanogram ที่เป็น type A โดยใช้ค่า B, G ที่ peak ลบด้วยค่า B, G ที่ tail value ในการศึกษาจะทำให้เกิดพยาธิสภาพใน middle ear โดยการตัด ligament ของ incus และ malleus ตัด tensor tympani ตัด stapedius tendon ทำให้เกิด ossicular disruption และ ossicular fixation ผลการศึกษาพบว่า

1. temporal bone ที่มีการตัด ligament ของ malleus, incus ตัด tensor tympani และ ตัด stapedius tendon พบ type A tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz และ 660 Hz และมี amplitude อยู่ในค่าปกติ

2. temporal bone ที่มี ossicular disruption เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz พบ type A tympanogram ซึ่ง amplitude ของ type A tympanogram อยู่ในค่าปกติแต่อยู่ระดับบน (upper limit) ของค่าปกติ แต่ถ้าทำให้ eustachian tube เปิดจะได้ค่า amplitude มากกว่าค่าปกติเนื่องจากเมื่อ tube เปิดปริมาตร middle ear cavity มีมากขึ้นทำให้มี stiffness ลดลง และเมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz พบ W shape tympanogram

3. temporal bone ที่มี ossicular fixation พบ type A tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz amplitude ของ tympanogram น้อยลงเมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz แต่ค่าเฉลี่ยยังคงอยู่ในค่าปกติหรือต่ำกว่าค่าปกติเล็กน้อย

4. รูปร่างและ amplitude ของ 220 และ 660 Hz tympanogram เมื่อศึกษาใน temporal bone ไม่แตกต่างจากคนปกติ ซึ่งสามารถนำผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ไปใช้ในการวินิจฉัยโรคของหูชั้นกลางในคลินิกได้

เขาสรุปว่า 660 Hz tympanogram จะให้ข้อมูลเพิ่มเติมจาก 220 Hz tympanogram จึงควรใช้ทั้ง 220 และ 660 Hz ในการวินิจฉัยโรคของ middle ear

Beattie และ Leamy (74) ทำการศึกษาค่าปกติของ amplitude และ TPP ของ tympanogram โดยใช้กลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม กลุ่มแรกอายุ 17-29 ปี อายุเฉลี่ย 20 ปี เป็นชาย 7 คน หญิง 13 คน กลุ่มที่ 2 อายุ 60-78 ปี อายุเฉลี่ย 65 ปี เป็นหญิง 20 คน กลุ่มตัวอย่างทั้ง 2 กลุ่มมีระดับการได้ยินปกติ ไม่มีประวัติโรคหู เขาทดสอบโดยใช้เครื่อง otoadmeter ชื่อ Grason Stadler (model 1720) ทดสอบกลุ่มตัวอย่างกลุ่มแรกโดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ใช้ ascending และ descending direction ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง pressure ในช่วง  $\pm 300$  mmH<sub>2</sub>O rate 30 mmH<sub>2</sub>O/second ส่วนกลุ่มที่ 2 ทดสอบโดยใช้ probe tone frequency 660 Hz ใช้ pressure direction และ rate เหมือนกลุ่มแรก ผลการศึกษามีดังนี้

#### 1. amplitude

- กลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz เท่ากับ  $0.83 \pm 0.04$  mmH<sub>2</sub>O และค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz คือ  $3.43 \pm 2.09$ ,  $1.46 \pm 1.3$ ,  $2.69 \pm 1.9$  mmH<sub>2</sub>O ตามลำดับ

- กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz คือ  $5.25 \pm 3.25$ ,  $2.41 \pm 1.48$ ,  $5.04 \pm 3.39$  mmH<sub>2</sub>O ตามลำดับ

#### 2. TPP เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz

- กลุ่มที่ 1 มีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่ง TPP ของ B, G tympanogram เมื่อใช้ ascending direction คือ  $-3.9 \pm 24.2$  และ  $-9.8 \pm 23.3$  mmH<sub>2</sub>O ตามลำดับ และเมื่อใช้ descending direction คือ  $-109 \pm 28.1$  และ  $-12.0 \pm 29.2$  mmH<sub>2</sub>O ตามลำดับ

- กลุ่มที่ 2 มีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตำแหน่ง TPP ของ B, G tympanogram เมื่อใช้ ascending direction คือ  $-12.2 \pm 26.7$  และ  $9.7 \pm 30.4$  mmH<sub>2</sub>O ตามลำดับ และเมื่อใช้ descending direction คือ  $-28.2 \pm 23.8$  และ  $11.3 \pm 35.2$  mmH<sub>2</sub>O ตามลำดับ

Beery และคณะ (77) ทำการศึกษา tympanometry เพื่อหาเกณฑ์ในการวินิจฉัย middle ear effusion โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ในเด็กที่มีโรคของ middle ear และมีข้อบ่งชี้ที่จะต้องทำ myringotomy เป็นชาย 43 คน หญิง 27 คน ช่วงอายุ 2-15 ปี อายุเฉลี่ย 6-7 ปี มีการเปลี่ยนแปลง pressure ในช่วง  $-400$  ถึง  $+200$  mmH<sub>2</sub>O โดยใช้ ascending direction สำหรับแสดง B tympanogram และใช้ ascending direction สำหรับแสดง G tympanogram ผลการศึกษาพบว่า

1. รูปร่างของ tympanogram ส่วนใหญ่เป็น single peak จึงต้องพิจารณา amplitude ร่วมกับรูปร่างที่เป็น single peak นี้ ซึ่งการพิจารณาโดยใช้ 660 Hz B tympanogram สามารถวินิจฉัย effusion ได้ถูกต้อง 93% นอกจากนี้รูปร่างของ 660 Hz B tympanogram ที่เป็นแบบราบ (flat) สามารถวินิจฉัย effusion ได้ถูกต้อง 80%
2. TPP ไม่สัมพันธ์กับการมี effusion

Margolis และ Popelka (67) ได้ทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz กลุ่มตัวอย่างแบ่งเป็น 5 กลุ่มดังนี้

กลุ่มที่ 1 มี 5 คน ระดับการได้ยินปกติ ตรวจหูไม่พบความผิดปกติ และ tympanogram ที่ 660 Hz เป็น single peak ปกติ

กลุ่มที่ 2 มี 3 คน ระดับการได้ยินปกติและ B tympanogram ที่ 660 Hz เป็น notch

กลุ่มที่ 3 มี 2 คน ระดับการได้ยินปกติ ตรวจหูไม่พบความผิดปกติ พบ notched B, G tympanogram ที่ 660 Hz

กลุ่มที่ 4 มี 1 คน ระดับการได้ยินปกติ ตรวจพบ atrophic scar ที่ tympanic membrane

กลุ่มที่ 5 มี 1 คน มีระดับการได้ยินผิดปกติเนื่องจากเป็น congenital ossicular disruption

ผลการศึกษามีดังนี้

1. shape ทุกกลุ่มตัวอย่างมีรูปร่างของ reactance (X) tympanogram เป็น bell shape และ resistance (R) tympanogram เป็น flat เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ไม่พบว่า X tympanogram เป็น notch แม้ว่า B-G tympanogram จะเป็น notch สำหรับค่า X มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าลบ (compliant reactance) เป็นค่าบวก (mass reactance) เมื่อมาพิจารณา notch ของ B tympanogram ที่เกิดจากการใช้ probe tone frequency 660 Hz พบว่าจุดที่ต่ำที่สุดของ notch ในกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีการได้ยินปกติและ middle ear ปกตินั้นอยู่สูงกว่าระดับ tail value แสดงถึงเมื่อเสียงความถี่ 660 Hz ไหลผ่าน middle ear จะมีแรงต้านของระบบที่เกิดจาก stiffness เป็นส่วนใหญ่ แต่ในกลุ่มที่ 4 และกลุ่มที่ 5 พบว่าจุดที่ต่ำที่สุดของ notch อยู่ต่ำกว่าระดับ tail value แสดงถึงแรงต้านของระบบเกิดจาก mass เป็นส่วนใหญ่ซึ่งต่างจากกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 เขาจึงสรุปว่ากลุ่มที่ 4 และกลุ่มที่ 5 เป็นกลุ่มที่มีพยาธิสภาพใน middle ear

2. amplitude พิจารณาจากกราฟแสดงค่า X และ R พบว่าเมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz ค่า X จะมากกว่าค่า R ทำให้ได้ single-peaked tympanogram ในทุกกลุ่มตัวอย่าง กลุ่มที่มีพยาธิสภาพในหู จะมีค่า X และ R ต่ำกว่ากลุ่มปกติ เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz พบว่า กลุ่มที่ 1 มีค่า X และ R เท่ากันทำให้ได้ single-peaked tympanogram ในกลุ่มที่ 2 และกลุ่มที่ 3 มีค่า X น้อยกว่าค่า R ทำให้ได้ notched tympanogram จากการพิจารณาค่า X ในกลุ่มที่ 1 ถึงกลุ่มที่ 3 ซึ่งเป็นกลุ่มที่ปกตินั้นจะเห็นได้ว่าค่า X เป็นค่าลบทั้งหมด นั่นคือเมื่อเสียงความถี่ 660 Hz ไหลผ่านระบบจะมี stiffness เป็นตัวควบคุมแรงต้านทานของระบบ แต่เมื่อพิจารณาค่า X ในกลุ่มที่ 4 และกลุ่มที่ 5 ค่า X จะเป็นค่าบวก นั่นคือ mass เป็นตัวควบคุมแรงต้านทานของระบบเมื่อมีเสียงความถี่ 660 Hz ไหลผ่าน

เขาสรุปว่า ในการแยก notched tympanogram ของหูปกติและหูที่มีพยาธิสภาพนั้นอาจใช้ค่า X ที่เกิดจากการใช้ probe tone frequency 660 Hz โดยดูว่าเป็น stiffness หรือ mass reactance และพิจารณาจุดที่ต่ำที่สุดของ notch ของ B tympanogram ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น

Decraemer และคณะ (60) ทำการศึกษาตำแหน่ง TPP ของ tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ทั้งแบบ ascending และ descending direction กลุ่มตัวอย่างแบ่งเป็น 2 กลุ่ม

กลุ่มที่ 1 เป็นคนที่มีการได้ยินปกติ และ tympanic membrane ปกติ ซึ่งพิจารณาเฉพาะคนที่พบ single-peaked BG tympanogram

กลุ่มที่ 2 เป็น 6 temporal bone ที่ยังมี tympanic membrane โดยทดสอบภายใน 40-50 ซังโงม หลังเสียชีวิต ในขณะที่ทดสอบจะปรับให้ pressure ใน middle ear cavity อยู่ที่ ambient pressure ตลอด ทั้งนี้ เนื่องจากขณะทดสอบ tympanometry นั้นอาจมีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน middle ear cavity ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของ tympanic membrane และปริมาตรของอากาศใน middle ear

ผลการศึกษามีดังนี้

1. กลุ่มที่ 1 พบว่า เมื่อใช้ probe tone frequency ต่างกันจะเกิด TPP ที่ตำแหน่งต่างกันด้วย ซึ่งเขากล่าวว่า TPP ไม่ได้เป็น pressure ใน middle ear จริงๆ เพราะ TPP เปลี่ยนแปลงตาม probe tone frequency
2. กลุ่มที่ 2 พบว่า
  - TPP ของ B, G, Y, X มีค่าไม่ตรงกับ 0 daPa ซึ่งเป็น pressure ใน middle ear cavity ที่ปรับไว้ในขณะทดสอบ
  - การทดสอบที่ใช้ ascending direction จะพบว่าเกิด TPP ที่ positive pressure ส่วนการทดสอบที่ใช้ descending direction จะพบว่าเกิด TPP ที่ negative pressure

เขาได้ทำการวิเคราะห์ต่อไปว่า probe tone frequency 220 หรือ 660 Hz เหมาะสมที่จะใช้ในการหา TPP โดยการพิจารณาดำแหน่งของ TPP เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ใน temporal bone อันเดียวกัน ใช้สถิติ Wilcoxon signed Rank test ในการวิเคราะห์พบว่าทั้ง 2 probe tone frequency สามารถประเมิน middle ear pressure ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

## ปัจจัยที่มีผลต่อการทดสอบ tympanometry

### Procedural variables

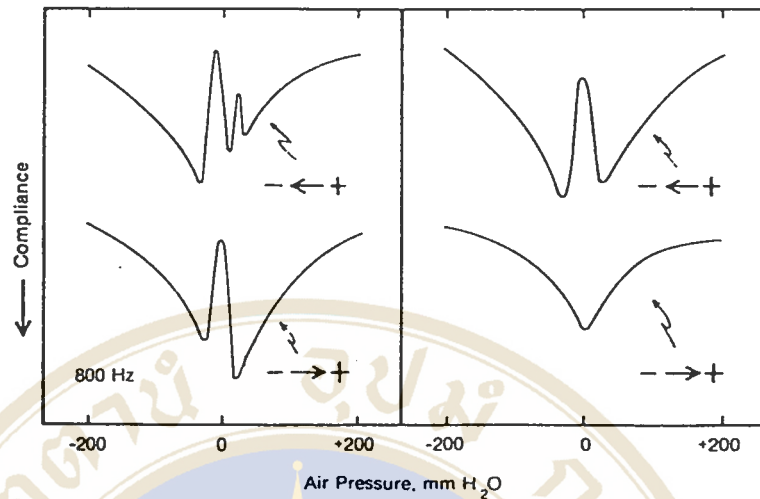
#### 1. ทิศทางการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal (pressure direction )

tympanometry เป็นการวัด acoustic immittance ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของ tympanic membrane และ middle ear ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง pressure ในช่องหูชั้นนอกซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง pressure 2 ชนิดคือ ascending direction ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจาก negative pressure เป็น positive pressure และ descending direction ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงจาก positive pressure เป็น negative pressure

Van Camp และคณะ (3) กล่าวว่า pressure direction มีผลต่อ parameter ทั้ง 3 ชนิดของ tympanogram คือ ascending direction มีผลให้รูปร่างของ tympanogram ชับซ้อนกว่า descending direction มี amplitude สูงกว่า descending direction ในกรณีที่ได้ single-peaked tympanogram และทำให้เกิด TPP ที่ positive pressure ในขณะที่ descending direction ทำให้เกิด TPP ที่ negative pressure การที่ pressure direction ทำให้เกิด TPP ในตำแหน่งต่างกันนี้เนื่องจากคุณสมบัติ viscoelastic ของ tympanic membrane และ middle ear

Margolis และ Shanks (37) กล่าวว่าการใช้ ascending direction จะทำให้เกิด multipeaked tympanogram มากกว่าใช้ descending direction เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่า reactance ไปทางค่าบวก (mass-reactance) มากกว่า นอกจากนี้ ascending direction ยังทำให้มี amplitude ของ tympanogram มากกว่า descending direction แต่อย่างไรก็ตามพบว่า pressure direction มีผลต่อ amplitude ของ 226 Hz tympanogram น้อยมาก

Alberti และ Jerger (51) ศึกษาผลของ pressure direction ต่อรูปร่างของ tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 800 Hz มีการเปลี่ยนแปลง pressure ในช่วง +200 mmH<sub>2</sub>O ถึง -200 mmH<sub>2</sub>O rate 40 mmH<sub>2</sub>O/second พบว่า descending direction ทำให้รูปร่างของ tympanogram ชับซ้อนกว่า ascending direction ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงรูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ ascending และ descending direction (จาก 51)

Hall และ Chandler (1) ศึกษา Y tympanogram ของกลุ่มตัวอย่าง 182 คน ใช้ probe tone frequency 226 Hz อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 50 daPa/second และใช้การเปลี่ยนแปลง pressure ชนิด ascending และ descending direction ผลการศึกษาพบว่า direction มีผลต่อ amplitude และ TPP ดังนี้

1. amplitude การใช้ pressure direction ชนิด ascending direction ทำให้ได้ amplitude ของ tympanogram สูงกว่า ต่ำกว่าและเท่ากับ descending direction 62% 21% และ 16% ตามลำดับ
2. TPP ตำแหน่งของ TPP เมื่อใช้ ascending และ descending direction มีค่าต่างกันประมาณ 31.2 daPa ascending direction ทำให้เกิด TPP ที่ positive pressure (ประมาณ +170 daPa) และ descending direction ทำให้เกิด TPP ที่ negative pressure (ประมาณ -110 daPa)

Osguthorpe และ Lam (78) ศึกษาผลของ pressure direction ในการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz กลุ่มตัวอย่างเป็นแมว 7 ตัว ตรวจหูแล้วไม่พบความผิดปกติ ผลการศึกษาพบว่า descending direction ทำให้เกิด single-peaked tympanogram ในขณะที่ ascending direction เกิด notched tympanogram เขากล่าวว่าเป็นผลจาก viscoelastic ของ tympanic membrane และ middle ear ซึ่งมีการตอบสนองต่อ 2 pressure direction ที่ต่างกัน

Shanks และ Wilson (79) ศึกษาผลของ pressure direction ต่อ shape, amplitude และ TPP ของ tympanogram ในกลุ่มตัวอย่าง 24 คน อายุเฉลี่ย 29.5 ปี มีการได้ยินปกติ ไม่มีประวัติโรคของ middle ear ทดสอบโดยใช้ probe tone frequency 220 และ 678 Hz ผลการศึกษามีดังนี้

1. shape เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz ทำให้เกิด single-peaked tympanogram 23 คนทั้ง 2 direction และเกิด notched tympanogram 1 คนเมื่อใช้ ascending direction เมื่อใช้ probe tone frequency 678 Hz ทำให้เกิดทั้ง single-peaked และ notched tympanogram โดยที่ ascending direction ทำให้เกิด notched tympanogram มากกว่า descending direction
2. amplitude pressure direction มีผลต่อ amplitude ของ B tympanogram อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อใช้ probe tone frequency 678 Hz โดยที่ ascending direction ทำให้ amplitude ของ B tympanogram น้อยกว่า descending direction ทั้งนี้เนื่องจากการใช้ probe tone frequency 678 Hz และ ascending direction ทำให้เกิด notched tympanogram มากกว่าจึงทำให้ amplitude น้อยกว่าด้วย เขา กล่าวว่า การพิจารณาค่า amplitude ของ B tympanogram เมื่อใช้ high frequency probe tone อาจจะทำให้แปลผลผิดพลาดได้
3. TPP pressure direction มีผลต่อ TPP ของ Y, B, G tympanogram ทั้ง 2 probe tone frequency อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อใช้ ascending direction จะเกิด TPP ที่ positive pressure มากกว่า เมื่อใช้ descending direction คือเมื่อใช้ ascending direction ค่าเฉลี่ยของตำแหน่ง TPP คือ 11 ถึง 23 daPa ที่ 220 Hz และ 10 ถึง 28 daPa ที่ 678 Hz แต่เมื่อใช้ descending direction พบว่าค่าเฉลี่ยของตำแหน่ง TPP คือ -16 ถึง -2 daPa ที่ 220 Hz และ -8 ถึง 12 daPa ที่ 678 Hz

นอกจากนี้เขายังพบว่า pressure direction มีผลต่อค่า ear canal volume อีกด้วย เมื่อใช้ descending direction ทำให้ประมาณค่า ear canal volume ใหญ่กว่าเมื่อใช้ ascending direction 0.01-0.08 ลูกบาศก์เซนติเมตรเนื่องจากการเคลื่อนที่ของ probe tip ascending direction มีการเปลี่ยนแปลง pressure จาก negative pressure ทำให้ probe tip เลื่อนเข้าใกล้ tympanic membrane มากขึ้นทำให้ค่า ear canal volume (จาก probe tip ถึง tympanic membrane) น้อยลงในขณะที่ descending direction มีการเปลี่ยนแปลง pressure จาก positive pressure ซึ่งจะดัน probe tip ออกจาก tympanic membrane ทำให้ค่า ear canal volume มากขึ้น

Wilson และคณะ (64) ศึกษาผลของ pressure direction ต่อ shape, amplitude และ TPP ของ tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 226 และ 678 Hz กลุ่มตัวอย่างเป็นคนที่มีการได้ยินปกติ 24 คน อายุเฉลี่ย 25.6 ปี และใช้การเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal จาก -400 ถึง 300 daPa อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 25 daPa/second ผลการศึกษามีดังนี้

1. shape การใช้ pressure direction แบบ ascending direction จะทำให้รูปร่างของ tympanogram ชับซ้อนกว่า descending direction เมื่อใช้ probe tone frequency 678 Hz แต่ pressure direction ไม่มีผลต่อรูปร่างถ้าใช้ probe tone frequency 220 Hz

2. amplitude พบว่าการใช้ ascending direction จะทำให้มี amplitude ของ tympanogram น้อยกว่าเมื่อใช้ descending direction เนื่องจากการใช้ descending direction จะเกิด notched tympanogram น้อยกว่าใช้ ascending direction แต่ถ้าพิจารณาเฉพาะ single-peaked tympanogram จะพบว่าการใช้ ascending direction จะทำให้เกิด amplitude ของ tympanogram มากกว่าใช้ descending direction

3. TPP ทั้ง ascending และ descending direction ทำให้ TPP ของ B และ G tympanogram แตกต่างกัน

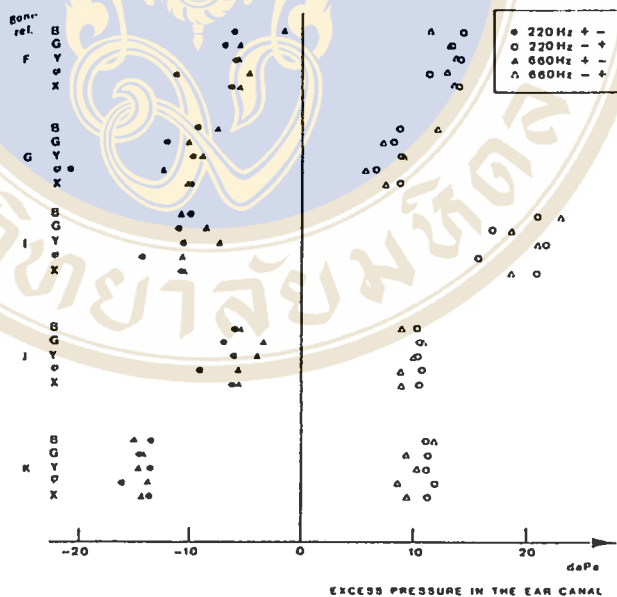
เมื่อใช้ ascending direction พบว่า ในรูป 1B1G TPP ของ B tympanogram อยู่ที่ positive pressure มากกว่า TPP ของ G tympanogram ทั้ง 2 probe tone frequency ส่วนในรูป 3B1G ที่เกิดจากการใช้ probe tone frequency 660 Hz พบว่า TPP ของ G tympanogram อยู่ที่ positive pressure มากกว่า TPP ของ B tympanogram 82% และ TPP ของ B, G tympanogram เกิดในตำแหน่งเดียวกัน 18%

เมื่อใช้ descending direction พบว่า ในรูป 1B1G TPP ของ B tympanogram อยู่ที่ positive pressure มากกว่า TPP ของ G tympanogram ทั้ง 2 probe tone frequency มีเพียง 78% ส่วนในรูป 3B1G ที่เกิดจากการใช้ probe tone frequency 660 Hz พบว่า TPP ของ G tympanogram มากกว่า TPP ของ B tympanogram 38% และ TPP ของ B, G tympanogram เกิดในตำแหน่งเดียวกัน 31%

Margolis และ Smith (80) กล่าวว่า pressure direction มีผลต่อ amplitude ของ tympanogram โดยจะทำให้ peak ของ tympanogram เปลี่ยนแปลงแต่ไม่ทำให้ tail value เปลี่ยนแปลง amplitude ของ G tympanogram ที่เกิดจากการใช้ ascending direction มีค่ามากกว่า descending direction อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz และ amplitude ของ B tympanogram ที่เกิดจาก

การใช้ ascending direction มีค่าน้อยกว่า descending direction อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz

Decraemer และคณะ (60) ทำการศึกษาผลของ pressure direction ต่อ TPP โดยใช้กลุ่มตัวอย่าง เป็น temporal bone ที่ยังมี tympanic membrane ทั้งหมด 5 temporal bone ทำการศึกษาในช่วง 40-50 ชั่วโมงหลังเสียชีวิต ขณะทดสอบจะปรับให้ pressure ใน middle ear cavity เท่ากับ ambient pressure (0 daPa) ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ descending direction จะเกิด TPP ที่ negative pressure แต่เมื่อใช้ ascending direction จะเกิด TPP ที่ positive pressure ดังรูปที่ 20 แต่อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลง TPP ตาม pressure direction นี้ไม่เกิน 10 daPa การที่ TPP เปลี่ยนแปลงตาม pressure direction นี้เกิดจาก viscoelastic ของ soft tissue ใน middle ear ทำให้เกิดภาวะ hysteresis คือ ภาวะที่โครงสร้างของ middle ear ไม่ตอบสนองต่อแรงที่มากกระทำโดยทันที



- รูปที่ 20 แสดง TPP ของ Y, B, G, X tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ascending และ descending direction (จาก 60)

Margolis และ Goycoolea (72) ศึกษาตำแหน่งของ TPP ของ Y tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 226 Hz กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ใหญ่เพศหญิงและเพศชายอายุ 19-48 ปี จำนวน 56 หู พบว่า

เมื่อใช้ ascending direction จะเกิด TPP ที่ positive pressure แต่เมื่อใช้ descending direction จะเกิด TPP ที่ negative pressure เขาสรุปว่า การใช้ pressure direction ต่างกันแล้วทำให้เกิดตำแหน่งของ TPP ต่างกันนี้เป็นผลจาก nonlinear properties ของ tympanic membrane นอกจากนี้เขายังพบว่าตำแหน่งของ TPP ในเพศหญิงไม่แตกต่างจากเพศชาย

Kabayashi และคณะ (81) ศึกษาผลของ pressure direction ต่อ shape และ TPP ของ tympanogram ในกลุ่มผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติจำนวน 59 หู มีการเปลี่ยนแปลง pressure ในช่วง  $\pm 200$  mmH<sub>2</sub>O อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 70 mmH<sub>2</sub>O/second และใช้ probe tone frequency 226 Hz

ผลการศึกษามีดังนี้

1. TPP ทั้ง 2 direction ทำให้ TPP เปลี่ยนไปจาก atmospheric pressure ในช่วง  $\pm 50$  mmH<sub>2</sub>O โดย ascending direction จะเกิด TPP ที่ positive pressure และถ้าใช้ descending direction จะเกิด TPP ที่ negative pressure ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติ viscoelastic ของ tympanic membrane ซึ่งทำให้เกิดภาวะ hysteresis จากการที่ direction มีผลต่อตำแหน่งของ TPP แสดงถึง TPP ไม่ได้แสดงค่าของ middle ear pressure จริงๆ แต่อย่างไรก็ตามก็ยังคงใช้ TPP แสดงค่า middle ear pressure ซึ่งการใช้ค่าเฉลี่ยของตำแหน่ง TPP ที่เกิดจากการใช้ทั้ง 2 direction จะแสดงถึงค่าของ middle ear pressure ได้ดีกว่าการใช้เพียง 1 direction

2. shape ทั้ง 2 direction ทำให้เกิด single-peaked tympanogram

Margolis และคณะ (42) ศึกษาผลของ pressure direction ต่อรูปร่างของ tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 220–910 Hz กลุ่มตัวอย่างเป็นกลุ่มคนที่มีการได้ยินปกติอายุ 25–41 ปี จำนวน 10 คน ผลการศึกษาพบว่า เมื่อใช้ pressure direction ชนิด ascending direction จะทำให้รูปร่างของ tympanogram ชับซ้อนกว่า descending direction

## 2. อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure (rate)

rate มีอิทธิพลต่อค่า amplitude และ shape การเพิ่ม rate ทำให้ amplitude เพิ่มขึ้นและ shape

ซับซ้อนขึ้น เนื่องจากค่า reactance เปลี่ยนแปลงจากค่าลบ (compliant reactance) เป็นค่าบวก (mass reactance) ทำให้ middle ear มีแรงต้านการส่งต่อพลังงานน้อยลงซึ่งการที่แรงต้านน้อยลงนี้ยังไม่ทราบสาเหตุแน่นอน อาจเกิดจากคุณสมบัติ viscoelastic ของ tympanic membrane และ middle ear ซึ่งเป็นแบบ nonlinear ก็ได้ ปัจจุบันมีแนวโน้มที่จะใช้ rate เพิ่มขึ้นในการทดสอบ tympanometry เนื่องจาก fast rate ช่วยให้ใช้เวลาในการทดสอบน้อยลง (3)

Shanks และคณะ (8) กล่าวว่า middle ear มีการตอบสนองต่อสิ่งที่มีกระดุนแบบ non-linear ดังนั้น immittance ของ middle ear จึงอาจเปลี่ยนแปลงได้ตาม rate ที่ใช้ นอกจากนี้การตอบสนองของเครื่องมือที่ใช้บันทึกผลการทดสอบจากการใช้ fast rate อาจทำให้เกิด artifact ค่า immittance ของ middle ear จึงเปลี่ยนแปลง

เขาศึกษาพบว่า fast rate ทำให้ amplitude ของ single-peaked Y, B, G tympanogram สูงกว่าการใช้ slow rate เนื่องจาก fast rate ทำให้ middle ear มีแรงต้านการส่งต่อพลังงานน้อยลง นอกจากนี้การใช้ fast rate ทำให้เกิด notched tympanogram มากกว่าการใช้ slow rate และ notch ที่เกิดขึ้นจะลึกกว่าเนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงค่า reactance จากค่าลบ (compliant reactance) เข้าสู่ค่าบวก (mass reactance) มากขึ้น

Kabayashi และคณะ (81) ศึกษาผลของ rate ต่อ amplitude ของ tympanogram ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติโดยใช้ probe tone frequency 226 Hz rate 8, 35 และ 70 mmH<sub>2</sub>O/second พบว่า amplitude จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ rate เพิ่มขึ้น

Shanks และ Wilson (79) กล่าวว่า ความแตกต่างของตำแหน่ง TPP เมื่อใช้ direction ต่างกันมีมากขึ้นถ้าใช้ rate เพิ่มขึ้นโดยเฉพาะเมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz เขาเชื่อว่าเป็นผลจากการตอบสนองของ middle ear ต่อสิ่งที่มีกระดุนมากกว่าอิทธิพลจากเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

Osguthorpe และ Lam (78) ศึกษาผลของ rate ต่อ amplitude ของ tympanogram กลุ่มตัวอย่างเป็นแมว 7 ตัว ตรวจหูแล้วไม่พบความผิดปกติ ใช้ pressure direction 220,660 Hz rate 12.5, 50 mmH<sub>2</sub>O/second ผลการศึกษาพบว่า amplitude จะเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ rate เพิ่มขึ้น

Koebssell และ Margolis (82) ศึกษาผลของ rate ต่อ amplitude ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติ 46 คน อายุ 3.7-5.8 ปี (อายุเฉลี่ย 4.54 ปี) จำนวน 88 หู โดยใช้ rate 50 และ 200 daPa/second ผลการศึกษาพบว่า rate มีผลต่อ amplitude ของ Y tympanogram อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p=0.001$ ) คือ เมื่อใช้ rate 200 daPa/second จะได้ amplitude มากกว่าใช้ rate 50 daPa/second ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติ viscoelastic ของ tympanic membrane ซึ่งมีการตอบสนองต่อสิ่งที่มากระตุ้นแบบ nonlinear

Margolis และ Heller (66) ศึกษาผลของ rate ต่อ TPP และ amplitude โดยใช้ screening tympanometer กลุ่มตัวอย่างเป็นเด็ก 50 คน อายุ 2.8-5.8 ปี (อายุเฉลี่ย 4.7 ปี) จำนวน 92 หู และผู้ใหญ่ 48 คน อายุ 19.5-61.5 ปี (อายุเฉลี่ย 30.5 ปี) จำนวน 87 หู ทุกคนมีระดับการได้ยินปกติ ตรวจหูแล้วไม่พบความผิดปกติ ใช้ probe tone frequency 226 Hz descending direction ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง pressure จาก +200 ถึง -300 daPa rate 200 และ 400 daPa/second ผลการศึกษาพบว่า rate มีผลต่อ amplitude ของ Y tympanogram อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งในกลุ่มเด็กและกลุ่มผู้ใหญ่โดย amplitude จะเพิ่มตาม rate ที่เพิ่มขึ้น และ rate มีผลต่อตำแหน่ง TPP ของผู้ใหญ่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยที่ TPP จะเกิดที่ negative pressure มากขึ้นเมื่อเพิ่ม rate แต่อย่างไรก็ตามตำแหน่งของ TPP เมื่อใช้ rate 200 และ 400 daPa/second ต่างกันไม่เกิน 3.3 daPa ส่วนตำแหน่ง TPP ในกลุ่มเด็กนั้นพบว่า rate ไม่มีผลต่อตำแหน่ง TPP ที่เกิดขึ้น

Feldman และคณะ (83) ศึกษาผลของ rate ต่อ shape, amplitude และ TPP กลุ่มตัวอย่างเป็นผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติจำนวน 10 คน และกลุ่มตัวอย่าง是孩子อายุไม่เกิน 13 ปีที่มีพยาธิสภาพใน middle ear แต่ tympanic membrane ปกติ จำนวน 27 คน ใช้ descending direction ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง pressure จาก -400 ถึง 200 mmH<sub>2</sub>O rate 25 และ 75 mmH<sub>2</sub>O/second ผลการศึกษามีดังนี้

1. shape แบ่งตามรูปแบบของ Paradise และคณะ (ซึ่งพิจารณา TPP และ amplitude) พบว่าเมื่อใช้ rate 25 และ 75 mmH<sub>2</sub>O/second จะได้รูปร่างต่างกันประมาณ 23-27% ของหู

2. amplitude การใช้ rate ต่างกันทำให้ค่า amplitude ต่างกันทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่างคือ เมื่อเพิ่ม rate ก็จะทำให้ amplitude เพิ่มขึ้นด้วย ซึ่งในกลุ่มที่มีพยาธิสภาพใน middle ear มี amplitude เพิ่มมากกว่ากลุ่มที่มีการได้ยินปกติ 2 เท่า การเปลี่ยนแปลง amplitude ตาม rate นี้เกิดจากภาวะ hysteresis ของ tympanic membrane และ middle ear ที่ไม่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลง pressure ได้ทันที

3. TPP rate มีผลให้ตำแหน่งของ TPP แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) ทั้ง 2 กลุ่มตัวอย่าง กลุ่มที่มีการได้ยินปกติเมื่อใช้ fast rate จะทำให้ตำแหน่งของ TPP อยู่ทาง negative pressure มากกว่าเมื่อใช้ slow rate ประมาณ 25.8 mmH<sub>2</sub>O สำหรับกลุ่มที่มีพยาธิสภาพใน middle ear เมื่อใช้ fast rate จะทำให้ตำแหน่งของ TPP อยู่ทาง negative pressure น้อยกว่าเมื่อใช้ slow rate ประมาณ 36.2mmH<sub>2</sub>O

Decraemer และคณะ (60) กล่าวว่า การใช้ rate น้อยกว่า 50 daPa/second ไม่ได้ช่วยลดภาวะ hysteresis ซึ่งเป็นภาวะที่เกิดจาก internal friction force ของ soft tissue (เช่น ผิวหนัง กล้ามเนื้อ เส้นเลือดดำ tympanic membrane)

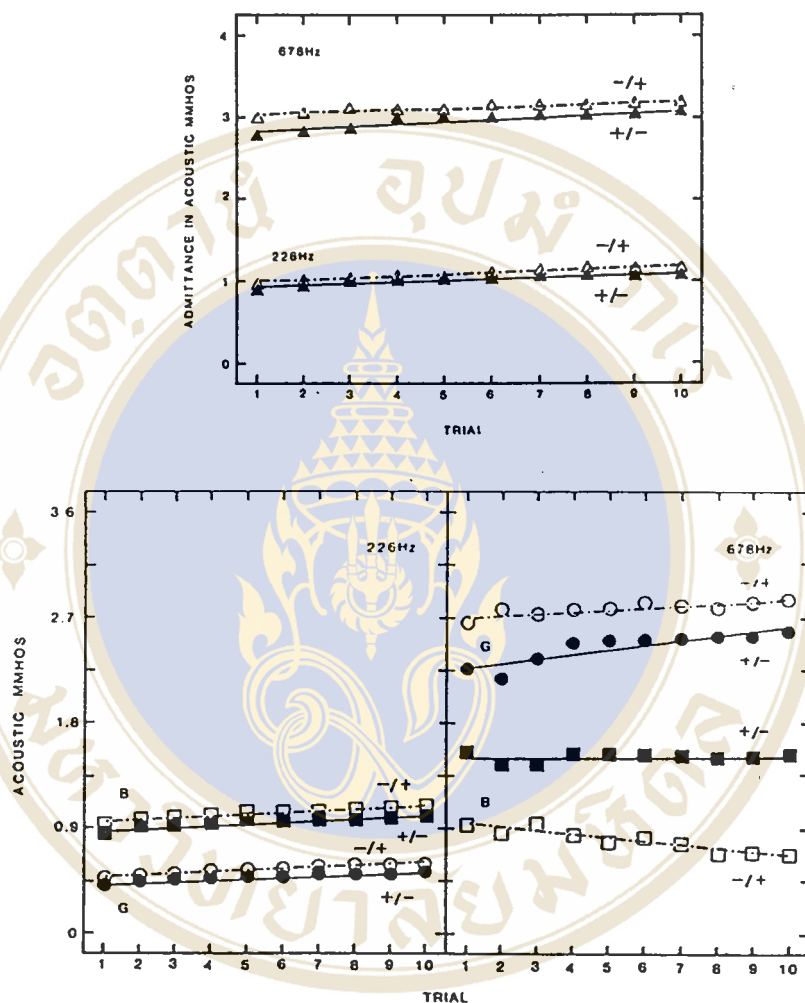
### 3. จำนวนครั้งในการทดสอบ (Number of tympanometric runs)

Van Camp และคณะ (3) กล่าวว่า จำนวนครั้งในการทดสอบมีผลทำให้ amplitude และ shape ของ tympanogram เปลี่ยนแปลงคือ ถ้าทดสอบหลายครั้งจะทำให้ค่า amplitude เพิ่มขึ้นและ shape ชับซ้อนมากขึ้น การเปลี่ยนแปลงนี้เกิดจาก impedance ของ tympanic membrane และ middle ear น้อยลงและมีการเปลี่ยนแปลงค่า reactance ไปสู่ค่าบวก (mass reactance) มากขึ้น

Osguthorpe และ Lam (78) ศึกษาผลของจำนวนครั้งในการทดสอบต่อค่า amplitude พบว่าในการทดสอบ 10 ครั้ง ทำให้ amplitude ของ B, G tympanogram เพิ่มขึ้นโดยเฉลี่ย 12% โดยที่การทดสอบ 3 ครั้งแรกทำให้ amplitude เพิ่มถึง 7% เขาคิดว่ากรณีที่ amplitude เพิ่มขึ้นตามจำนวนครั้งที่ทดสอบนี้เกิดจากการเคลื่อนที่ของ probe tip ทำให้ ear canal volume เปลี่ยนแปลงซึ่งมีผลต่อค่า amplitude นอกจากนี้การทดสอบหลายครั้งยังทำให้เกิด notched tympanogram เพิ่มขึ้นอีกด้วย

Wilson และคณะ (64) กล่าวว่ารูปร่างของ tympanogram จะซับซ้อนมากขึ้นถ้าเพิ่มจำนวนครั้งในการทดสอบ และในการทดสอบ 10 ครั้งจะทำให้ amplitude ของ B, G tympanogram เพิ่มขึ้นประมาณ 0.04 mmhos เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz และเมื่อใช้ probe tone frequency 678 Hz จะทำให้ amplitude ของ B, G tympanogram เพิ่มขึ้นประมาณ 0.02 และ 0.09 mmhos ตามลำดับ การเพิ่ม amplitude นี้พบมากในการทดสอบ 3-5 ครั้งแรก

เขาสรุปรว่า การทดสอบหลายครั้งทำให้ pressure ใน ear canal เปลี่ยนแปลงมากมีผลให้คุณสมบัติ viscoelastic ของ middle ear เปลี่ยนแปลงคือมี impedance น้อยลงจึงทำให้ amplitude และ shape ของ tympanogram เปลี่ยนแปลงไปด้วยและการเปลี่ยนแปลงนี้ไม่ได้เกิดจากการที่ probe tip เคลื่อนที่



รูปที่ 21 แสดงการเปลี่ยนแปลง amplitude ของ Y, B, G tympanogram ตามจำนวนครั้งในการทดสอบ โดยใช้ ascending และ descending direction (จาก 64)

#### 4. ear canal correction

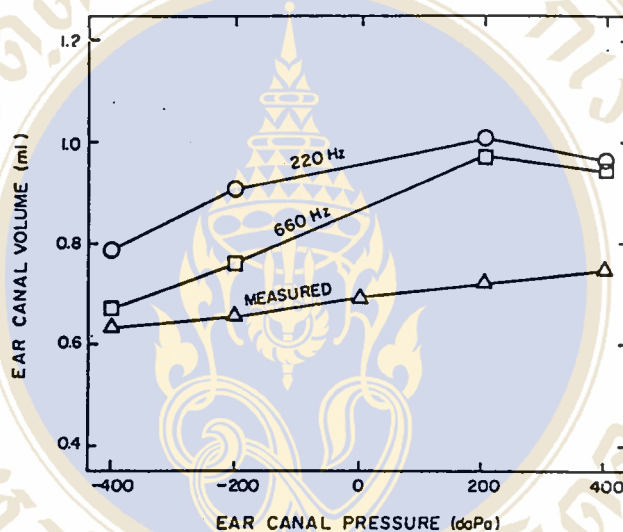
acoustic immittance ที่วัดได้ในระนาบของ probe tip นั้นเป็น immittance ของ ear canal volume รวมกับ immittance ของ tympanic membrane และ middle ear ดังนั้น acoustic immittance ของ middle ear ที่วัดในระนาบของ tympanic membrane จึงได้จากการนำ acoustic immittance ของ ear canal volume หักออกจาก acoustic immittance ที่วัดได้ในระนาบของ probe tip

Van Camp และคณะ (3) Margolis และ Shanks (5) Shanks และคณะ (84) กล่าวว่า เดิมการหาค่า acoustic immittance ของ ear canal volume นั้นจะต้องรู้ค่า ear canal volume ก่อนซึ่งใช้วิธีการใส่แอลกอฮอล์เข้าไปใน ear canal วิธีนี้เป็นวิธีที่ยู่ยากจึงมีการดัดแปลงโดยใช้การทดสอบ tympanometry ซึ่งเป็นการวัด acoustic immittance ของ ear canal, tympanic membrane และ middle ear ในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ถ้า pressure ใน ear canal เป็น negative หรือ positive pressure มากๆ tympanic membrane จะมี impedance มากขึ้นจนกระทั่งพลังงานไม่สามารถผ่าน tympanic membrane เข้าสู่ middle ear ได้ acoustic immittance ที่วัดได้ที่ probe tip ในขณะนั้นคือ acoustic immittance ของ ear canal volume เพียงอย่างเดียว วิธีการหา acoustic immittance ของ ear canal volume ดังกล่าวเรียกว่า ear canal correction หลังจากนั้นจึงนำไปหาค่า acoustic immittance ของ middle ear โดยนำเอาค่า acoustic immittance ในระนาบของ probe tip ลบด้วยค่า acoustic immittance ของ ear canal volume ได้เป็นค่า acoustic immittance ของ tympanic membrane ซึ่งก็คือค่า static acoustic immittance หรือ amplitude ของ tympanogram นั่นเอง

เขากล่าวว่า การ correct ear canal โดยใช้ pressure ใน ear canal ที่เป็น positive และ negative pressure จะทำให้ได้ค่า amplitude ต่างกันได้ การ correct ear canal โดยใช้ negative pressure จะช่วยให้หาค่า immittance ของ middle ear ในระนาบของ tympanic membrane ได้ถูกต้องกว่าการใช้ positive pressure เนื่องจากที่ negative pressure มีค่า resistance มากกว่าที่ positive pressure ในขณะที่ค่า reactance ที่ negative และ positive เท่ากัน การที่มี negative pressure ใน ear canal มากๆ (มากกว่าหรือเท่ากับ  $-400$  daPa) จะทำให้ impedance ของ tympanic membrane มากที่สุดช่วยให้หาค่า acoustic immittance ของ ear canal volume และ middle ear ถูกต้องมากขึ้น

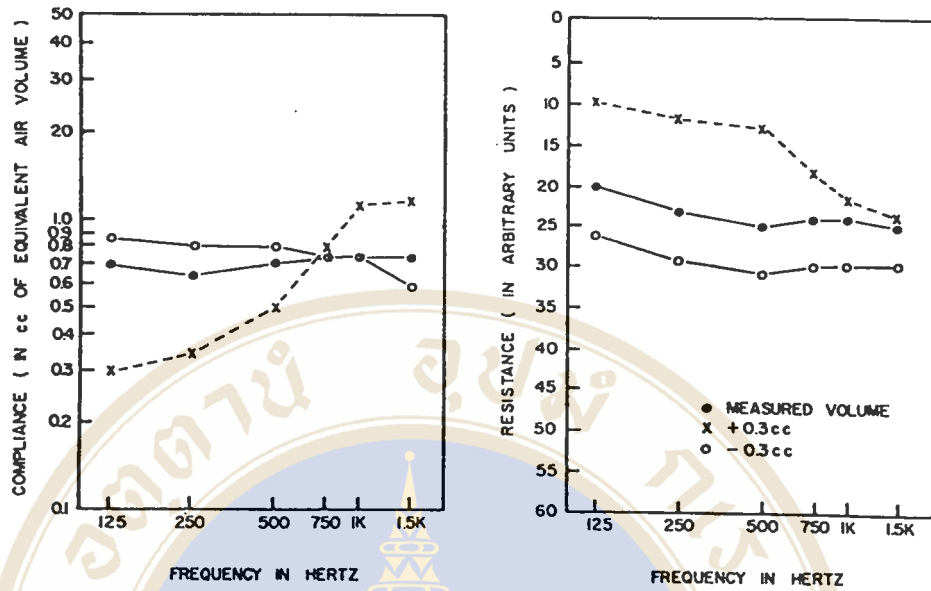
Shanks และ Lilly (85) กล่าวว่า การประมาณค่า ear canal volume มีความสำคัญในการหาค่า acoustic immittance ของ middle ear ถ้า ear canal volume มากจะทำให้ค่า impedance ของ ear canal volume ลดลง ซึ่งมีผลมากต่อค่า impedance ที่วัดได้ในระนาบของ probe tip และทำให้หาค่า impedance ของ middle ear ผิดพลาดได้ ดังนั้นถ้าสามารถประมาณค่า ear canal volume ได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากเท่าไรก็จะทำให้หาค่า impedance ของ middle ear ได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

Shanks และ Lilly (85) ได้แสดงการประมาณค่า ear canal volume โดยใช้การทดสอบ tympanometry ที่ probe tone frequency 220 และ 660 Hz เปรียบเทียบกับวิธีการวัด ear canal volume โดยตรง ผลการศึกษาพบว่า การประมาณค่า ear canal volume โดยใช้ tympanometry ทั้ง 2 probe tone frequency ที่ ear canal pressure  $-400$  daPa นั้นจะได้ค่า ear canal volume ใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้โดยตรงและเมื่อใช้ ear canal pressure มากกว่า  $-400$  daPa มีแนวโน้มจะได้ค่า ear canal volume ใกล้เคียงค่า ear canal volume จริงมากขึ้น ดังรูปที่ 22



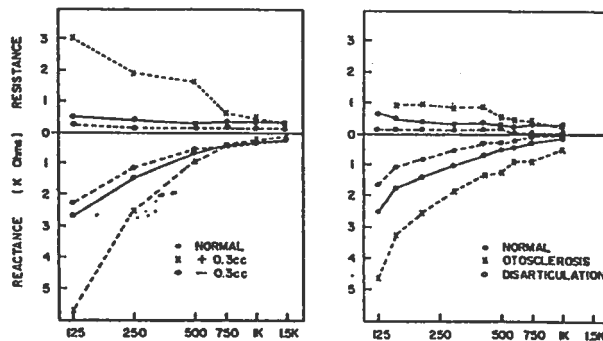
รูปที่ 22 แสดงการเปรียบเทียบ ear canal volume ที่ได้จากการทดสอบ tympanometry กับ ear canal volume ที่วัดได้โดยตรงเมื่อใช้ ear canal pressure ต่างๆกัน (จาก 85)

การประมาณค่า ear canal volume ผิดพลาดมีผลให้ได้ค่า acoustic immittance ที่ tympanic membrane ผิดพลาดไปด้วย Burke และคณะ (44) ศึกษาค่า resistance และ compliance ของ tympanic membrane และ middle ear ที่มีการประมาณค่า ear canal volume ในขนาดต่างๆกันและขนาดที่วัดได้จริง โดยใช้ probe tone frequency 226 Hz ผลการศึกษาพบว่าค่า resistance และ compliance ต่างกันเมื่อค่า ear canal volume ต่างกัน ดังรูปที่ 23



รูปที่ 23 แสดงค่า resistance และ compliance ที่เปลี่ยนแปลงตาม ear canal volume (จาก 44)

การประมาณค่า ear canal volume ต่างกันมีผลให้ได้ค่า impedance ของ middle ear ต่างกันและอาจทำให้วินิจฉัยผิดพลาดได้ Burke และคณะ (44)พบว่า การประมาณค่า ear canal volume มากกว่าค่าที่วัดได้โดยตรง 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรทำให้ได้ค่า reactance และ resistance เหมือนค่า reactance และ resistance ของกลุ่มคนที่เป็น otosclerosis แต่ถ้าวัดประมาณ ear canal volume น้อยกว่าค่าที่วัดได้โดยตรง 0.3 ลูกบาศก์เซนติเมตรจะได้ค่า resistance และ reactance เหมือนกลุ่มคนที่เป็น disarticulation



รูปที่ 24 แสดงค่า reactance, resistance ที่เปลี่ยนแปลงตามค่า ear canal volume เปรียบเทียบกับค่า reactance, resistance ในกลุ่ม otosclerosis และ disarticulation (จาก 44)

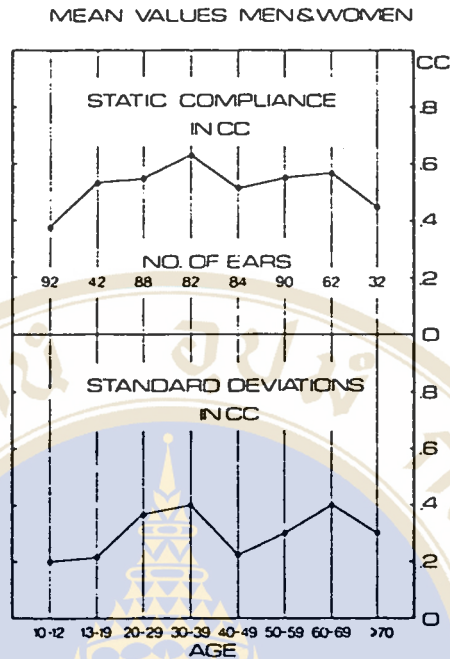
จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า pressure ใน ear canal เป็นสิ่งสำคัญที่ทำให้ค่า ear canal volume เปลี่ยนแปลงซึ่งมีผลให้ acoustic immittance ของ ear canal volume และ middle ear เปลี่ยนแปลงไป นั่นคือ ค่า amplitude ของ tympanogram เปลี่ยนแปลงไปด้วย Margolis และ Shanks (37) กล่าวว่า amplitude ที่ได้จากการ correct ear canal ที่ positive pressure หรือ positive tail value ของ tympanogram จะมีค่าน้อยกว่า amplitude ที่จากการ correct ear canal ที่ negative pressure หรือ negative tail value

### Subject variables

#### 1. อายุ (age)

Nixon และคณะ (อ้างใน 86) กล่าวว่า ระบบการได้ยินของคนจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่ออายุมากขึ้น นั่นคือ connective tissue ของ middle ear ก็จะมีการเปลี่ยนแปลงด้วยซึ่งจะมีผลต่อกลไกการส่งต่อพลังงานของ middle ear Osterhammel และ Osterhammel (86) จึงทำการศึกษาผลของอายุและเพศต่อค่า compliance ของหู กลุ่มตัวอย่างเป็นคนที่มีการได้ยินปกติ ไม่เคยมีประวัติโรคของหูชั้นกลาง ไม่มีปัจจัยเสี่ยงในเรื่องความผิดปกติของหูเมื่อทดสอบ tympanometry พบ type A tympanogram โดยมี TPP อยู่ในช่วง  $\pm 50$  mmH<sub>2</sub>O มี acoustic reflex ในหูทั้ง 2 ข้าง กลุ่มตัวอย่างจำนวน 286 คน ชาย 143 คน หญิง 143 คน แบ่งเป็น 5 กลุ่ม คือ กลุ่มอายุ 10-12 ปี, 13-19 ปี, 20-29 ปี, 30-39 ปี, 40-49 ปี, 50-59 ปี, 60-69 ปี และมากกว่า 70 ปี ทดสอบ tympanometry โดยใช้เครื่อง Madsen ZO-72 electroacoustic impedance bridge ทำการวัดค่า static compliance โดยใช้ค่า compliance ที่ 0 mmH<sub>2</sub>O ลบด้วยค่า compliance ที่ +200 mmH<sub>2</sub>O ผลการศึกษาพบว่า

1. ค่า static compliance ของเพศชายมีแนวโน้มว่ามากกว่าของเพศหญิงทุกกลุ่มอายุแต่เมื่อวิเคราะห์ทางสถิติไม่พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
2. ค่า static compliance มีค่ามากที่สุดทั้งในเพศชายและเพศหญิงในช่วงอายุ 30-39 ปี



รูปที่ 25 แสดงค่าเฉลี่ยของค่า static compliance ในแต่ละช่วงอายุ (จาก 86)

Margolis และ Heller (66) ศึกษาผลของอายุต่อ amplitude และ TPP ของ tympanogram พบว่าอายุที่ต่างกันมีผลทำให้ amplitude และ TPP ของ tympanogram แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงทางด้าน anatomy และ physiology ของ middle ear จึงมีการตอบสนองต่อเสียงที่มากระตุ้นต่างกัน การเปลี่ยนแปลงนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึงวัยเจริญพันธุ์

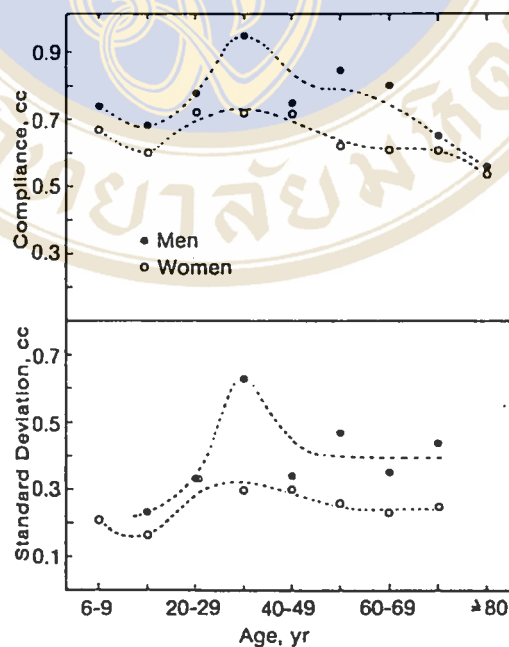
Hall (18) กล่าวว่าอายุมีผลต่อค่า amplitude ของ tympanogram โดย amplitude มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอายุ 1-35 ปี และจะลดลงเมื่ออายุมากขึ้น

Harty (อ้างใน 87) ศึกษา 12 temporal bones ซึ่งมีอายุขณะเสียชีวิตตั้งแต่แรกเกิดถึง 84 ปี พบว่าเมื่ออายุมากขึ้น elastic tissue ใน ossicular joint จะลดลงและ elastic fiber ใน tendon ของ stapedius muscle แดกแยกออกเป็นชิ้นเล็กๆ การเปลี่ยนแปลงนี้อาจมีผลต่อ acoustic immittance ได้

Hall (87) ศึกษาผลของอายุและเพศต่อค่า static compliance กลุ่มตัวอย่างทั้งหมด 336 คน อายุ 6-91 ปี อายุเฉลี่ย 46 ปี ที่มี middle ear ปกติโดยพิจารณาจาก tympanogram type A TPP ไม่เกิน -50

mmH<sub>2</sub>O และมี acoustic reflex ผลการศึกษาพบว่าอายุมีผลต่อค่า compliance และอายุประมาณ 31-40 ปี จะมีค่า compliance สูงที่สุดและลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากมีการเปลี่ยนแปลงของ middle ear muscle , ossicular chain หรือ connective tissue ใน middle ear

Jerger และคณะ (89) ศึกษาเปรียบเทียบค่า static compliance โดยใช้ probe tone frequency 226 Hz กลุ่มตัวอย่างอายุ 6-90 ปี แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีการได้ยินปกติจำนวน 315 คน และกลุ่มที่มีการได้ยินผิดปกติชนิดประสาทหูเสื่อมซึ่งมี acoustic reflex และระดับการได้ยินไม่เกิน 70 dB จำนวน 385 คน ผลการศึกษาพบว่า ช่วงอายุ 30-39 ปี จะมีค่า static compliance มากที่สุดและลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 26 เขากล่าวว่าการที่ช่วงอายุนี้มีค่า static compliance มากกว่าช่วงอายุอื่นอาจเกิดจากช่วงอายุนี้อยู่ในวัยทำงานซึ่งอาจสัมผัสกับเสียงมากทำให้กล้ามเนื้อในหูชั้นกลางอ่อนล้าจึงมี compliance มากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเขาเปรียบเทียบค่า compliance ของกลุ่มตัวอย่างอายุ 30-39 ปีที่มีการสัมผัสเสียงดังกับที่ไม่สัมผัสเสียงดังพบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก เขาจึงสรุปว่าการที่ compliance ของแต่ละช่วงอายุต่างกันเนื่องมาจากแต่ละช่วงอายุมี anatomy และ physiology ของ middle ear ต่างกัน



รูปที่ 26 แสดงค่า static compliance ของเพศชายและเพศหญิงในแต่ละช่วงอายุ (จาก 89)

Sweltzer (อ้างใน 87) ศึกษาค่า reactance, resistance ในกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มซึ่งมีช่วงอายุต่างกัน กลุ่มแรกอายุ 19-33 ปี จำนวน 21 คน กลุ่มที่สองอายุ 59-85 ปี จำนวน 15 คน ผลการศึกษาพบว่า กลุ่มที่สองมีค่า resistance, reactance ต่ำกว่ากลุ่มแรก

Blood และ Greenberg (อ้างใน 87) ศึกษา amplitude ของ Y tympanogram ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติ 20 คน แบ่งเป็น 3 ช่วงอายุคือ อายุ 50-59 ปี, 60-69 ปี และมากกว่า 70 ปี โดยใช้ probe tone frequency 226 Hz ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude ลดลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้นคือ 0.85 0.81 และ 0.6 mmhos ตามลำดับ

Thompson และคณะ (87) ศึกษา amplitude ของ Y, B, G tympanogram ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติและไม่มีภาวะเสี่ยงต่อการเกิดความผิดปกติในการได้ยิน จำนวน 60 คน อายุ 20-79 ปี ผลการศึกษาพบว่าช่วงอายุ 20-29 ปี มีค่า amplitude ของ Y, B, G tympanogram สูงที่สุดและจะลดลงในช่วงอายุ 30-60 ปี ช่วงอายุประมาณ 60-79 ปีจะมีค่า amplitude เพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง แต่อย่างไรก็ตามเมื่อวิเคราะห์ผลของอายุต่อค่า amplitude พบว่าค่า amplitude ไม่เปลี่ยนแปลงตามอายุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เขาสรุปว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายใน middle ear ไม่มีอิทธิพลต่อหน้าที่ในการส่งต่อพลังงานของ middle ear ในช่วงอายุ 20-79 ปีนี้ เขากล่าวเพิ่มเติมว่า amplitude อาจมีการเปลี่ยนแปลงตามอายุแต่เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบไม่สามารถเก็บข้อมูลการเปลี่ยนแปลงนี้ได้

Porter (90) ศึกษาผลของอายุต่อค่า amplitude ของ Y, B, G tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz กลุ่มตัวอย่างแบ่งเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติจำนวน 18 คน อายุ 18-40 ปี อายุเฉลี่ย 25 ปี กลุ่มเด็กที่มีการได้ยินปกติจำนวน 18 คน อายุ 7-14 ปี อายุเฉลี่ย 9 ปี กลุ่มเด็กที่มีการได้ยินผิดปกติชนิดประสาทหูเสื่อมจำนวน 18 คน อายุ 7-14 ปี อายุเฉลี่ย 9 ปี และเมื่อทดสอบ tympanometry พบว่า TPP เกิดใน pressure  $\pm 50$  mmH<sub>2</sub>O ผลการศึกษามีดังนี้

1. เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz ในการทดสอบกลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม พบว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram คือ 0.79, 0.65, 0.59 mmhos ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ B tympanogram คือ 0.71, 0.60, 0.54 mmhos และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.22, 0.19,

0.21 mmhos ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ G tympanogram คือ 0.35, 0.24, 0.23 mmhos และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.08, 0.06, 0.13 mmhos ตามลำดับ

2. เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz ในการทดสอบกลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่ม พบว่า ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram คือ 2.93, 2.91, 1.71 mmhos ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ B tympanogram คือ 1.01, 1.01, 0.91 mmhos และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.48, 0.41, 0.39 mmhos ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ G tympanogram คือ 2.75, 2.06, 1.45 mmhos และมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 1.01, 1.01, 0.73 mmhos ตามลำดับ

จากการทดสอบทางสถิติพบว่าค่า amplitude ของ B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz ในกลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) และค่า amplitude ของ G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz ในกลุ่มตัวอย่างทั้ง 3 กลุ่มแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.01$ ) เขากล่าวว่าความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้ไม่ทราบสาเหตุแน่นอนอาจเกิดจากการมีพยาธิสภาพใน middle ear ที่ไม่สามารถวินิจฉัยได้หรือเกิดจากโครงสร้างของ middle ear เปลี่ยนแปลงเมื่ออายุเพิ่มขึ้น

Himmelfarb และ Popelka (91) ศึกษา tympanogram ของเด็กแรกเกิด 34 คนอายุ 8-96 ชั่วโมง กลุ่มตัวอย่างทุกคนมีประวัติการตั้งครรภ์และคลอดปกติ ศึกษาโดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ผลการศึกษาเบื้องต้น

เมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz ประมาณ 50% ของกลุ่มตัวอย่างมีรูปร่างของ tympanogram เป็น 1B1G ประมาณ 25% เป็น 3B1G tympanogram และประมาณ 25% เป็น 3B3G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz พบว่า ประมาณ 15% มีรูปร่างของ tympanogram เหมือนเมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz อีก 85% พบว่า B tympanogram มีรูปร่างเกือบแบนราบ (flat) ค่า B ทางด้าน positive pressure สูงกว่าด้าน negative pressure ส่วน G tympanogram เป็น single หรือ double-peaked tympanogram และเมื่อคำนวณค่า R, X จากค่า B, G พบว่าเมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz ค่าเฉลี่ยของ R มากกว่าค่าเฉลี่ยของ X และเมื่อใช้ probe tone frequency 660 Hz X มีค่าเกือบเท่ากับค่า R เขาสรุปว่าค่า X และ R มีการเปลี่ยนแปลงตามอายุซึ่งมีผลให้รูปร่างของ tympanogram เปลี่ยนแปลงไปด้วย

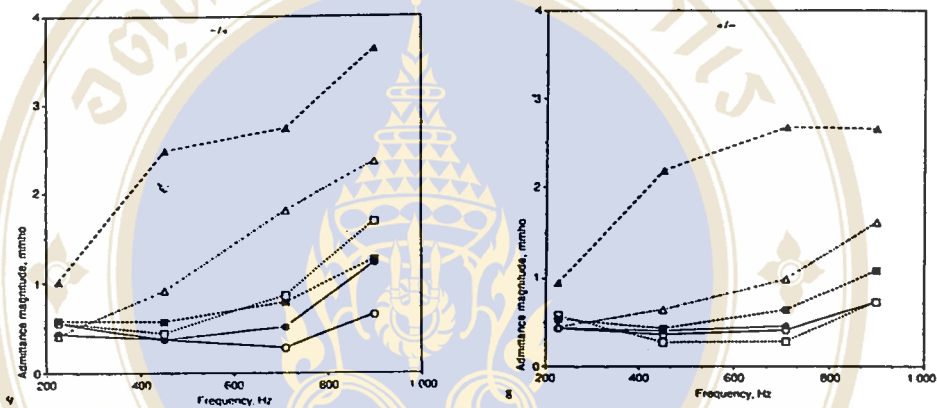
Spruque และคณะ (92) ศึกษารูปร่างของ tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz กลุ่มตัวอย่างเป็นเด็กแรกเกิดอายุ 24-130 ชั่วโมง จำนวน 44 คน ซึ่งมีประวัติการตั้งครุฑประวัติการคลอดและประวัติหลังคลอดปกติ ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz เกิด notched tympanogram ประมาณ 85% ในขณะที่ใช้ probe tone frequency 660 Hz เกิด notched tympanogram เพียง 1% และเกิด single-peaked tympanogram 99% เขากล่าวว่าการพบ notched tympanogram ในกลุ่มเด็กเมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz นั้นเนื่องจากระบบการได้ยินของเด็กมี resonance frequency ประมาณ 220-660 Hz ซึ่งเขาคิดว่าเป็น resonance frequency ของ ear canal มากกว่าเป็น resonance frequency ของ middle ear นอกจากนี้เขายังพบว่า notched tympanogram ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้ probe tone frequency 220 Hz นั้นเป็น notch ที่ลึกมากแสดงถึงเมื่อมีเสียงความถี่ต่ำไหลผ่าน mass component จะมีอิทธิพลมากในการควบคุมการส่งต่อพลังงานซึ่งตรงข้ามกับผู้ใหญ่ที่พบว่า mass มีอิทธิพลมากเมื่อมีเสียงความถี่สูงกว่า 1000 Hz ไหลผ่านระบบ

Holte และคณะ (93) กล่าวว่า การพบ notched tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ในกลุ่มเด็กทารกนั้นเกิดจากอิทธิพลของ middle ear มากกว่าเกิดจากการเคลื่อนไหวของ ear canal wall ซึ่งเขาได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางของ ear canal ของเด็กอายุ 56 วันในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลง pressure จาก -250 ถึง 300 daPa แล้วพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางของ ear canal ตามการเปลี่ยนแปลง pressure ในขณะทดสอบ tympanometry แล้วพบ notched tympanogram เขาจึงสรุปว่า notched tympanogram เกิดจากโครงสร้างและการทำงานของ middle ear ยังไม่สมบูรณ์เต็มที่

Holte และคณะ (94) ทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 226, 335, 450, 560, 710 และ 900 Hz กลุ่มตัวอย่างเป็นเด็กอายุ 1 วัน ถึง 4 เดือน ไม่มีภาวะเสี่ยงต่อการเกิดความผิดปกติในการได้ยิน ใช้ ascending และ descending direction ตั้งแต่ -500 ถึง 300 daPa rate 250 daPa/second ผลการศึกษามีดังนี้

1. shape ทุกกลุ่มอายุ มีแนวโน้มที่จะเกิด shape ของ tympanogram ชับชันขึ้นเมื่อใช้ probe tone frequency มากขึ้นซึ่งเหมือนกับผู้ใหญ่แต่ที่ 335 และ 450 Hz จะเกิด shape ชับชันมากกว่า เนื่องจากระบบการได้ยินของเด็กมี resonance frequency ที่ 450 Hz ซึ่งต่างกับผู้ใหญ่ นอกจากนี้ mass และ resistance ยังมีอิทธิพลต่อค่า acoustic immittance ของ middle ear ของเด็กมากกว่าของผู้ใหญ่

2. amplitude ทุกกลุ่มอายุมีแนวโน้มที่จะมี amplitude ของ Y tympanogram มากขึ้นเมื่อใช้ probe tone frequency มากขึ้น ดังรูปที่ 27 แต่อย่างไรก็ตามค่า amplitude ของ Y tympanogram ของเด็กก็ยังคงน้อยกว่าของผู้ใหญ่ทุก probe tone frequency ทั้งนี้เนื่องจาก middle ear cavity ของเด็กมีขนาดเล็กกว่าผู้ใหญ่จึงทำให้ input admittance ของ middle ear น้อยกว่าด้วยเพราะ input admittance ของ middle ear มีการเปลี่ยนแปลงตามปริมาตรของอากาศใน middle ear cavity



รูปที่ 27 แสดงค่า amplitude ของ Y tympanogram ในกลุ่มเด็กและผู้ใหญ่ O =1-7 วัน ● =11-12 วัน □ =26-47 วัน ■ =51-66 วัน △ =103-113 วัน ▲ =adult (จาก 94)

Beattie และ Leamy (76) ทำการศึกษาผลของอายุต่อค่า amplitude และ TPP ของ tympanogram โดยใช้ probe tone frequency 220 และ 660 Hz ใช้ ascending และ descending direction rate 30 mmH<sub>2</sub>O/second กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษาแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มอายุ 17-29 ปีและกลุ่มอายุ 60-78 ปี ซึ่งทั้ง 2 กลุ่มมีระดับการได้ยินปกติและไม่มีประวัติโรคหู ผลการศึกษาพบว่า

1. กลุ่มที่ 1 มีค่า amplitude มากกว่ากลุ่มที่ 2 เขาสรุปว่าอายุเป็นตัวแปรหนึ่งของการศึกษาค่า admittance ซึ่งเขาแนะนำว่าควรมีค่าปกติของค่า admittance ในแต่ละช่วงอายุ

2. pressure direction มีผลต่อ TPP ของ B G tympanogram ในกลุ่มอายุมากกว่า 60 ปีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ไม่มีผลต่อ TPP ของกลุ่มอายุ 17-29 ปี ทำให้ไม่สามารถกล่าวได้ว่าเป็นผลจากภาวะ hysteresis หรือความผิดปกติของระบบการนำเสียง

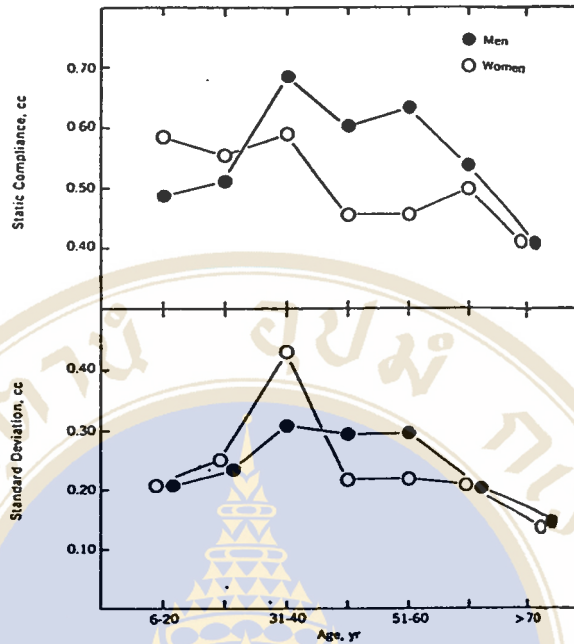
## 2. เพศ (sex)

Margolis และ Heller (66) ศึกษาเปรียบเทียบ amplitude ของ Y tympanogram ในกลุ่มตัวอย่างเพศชายและเพศหญิง ทดสอบโดยใช้เครื่อง screening tympanometer ใช้ probe tone frequency 226 Hz ผลการศึกษาพบว่า amplitude ของ Y tympanogram ในกลุ่มตัวอย่างเพศชายแตกต่างจากเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติถ้าใช้ rate 200 daPa/second แต่ถ้าใช้ rate 400 daPa/second แล้ว amplitude ของทั้ง 2 เพศไม่แตกต่างกัน เขาจึงแนะนำให้ใช้ fast rate เพื่อลดความแตกต่างของ amplitude ในเพศชายและเพศหญิง นอกจากนี้เขายังศึกษาเปรียบเทียบตำแหน่ง TPP ของ tympanogram พบว่าตำแหน่ง TPP ของเพศชายไม่แตกต่างจากเพศหญิง

Hall (18) กล่าวว่าโดยทั่วไปค่า static compliance ของเพศชายมากกว่าเพศหญิงเนื่องจากเพศชายมี ear canal volume มากกว่าเพศหญิง

Jerger และคณะ (89) ศึกษาเปรียบเทียบค่า static compliance ของเพศชายและเพศหญิงอายุ 6-90 ปี โดยใช้ probe tone frequency 220 Hz กลุ่มตัวอย่างทุกคนมีการได้ยินปกติ ผลการศึกษาพบว่าค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า static compliance ของเพศหญิงน้อยกว่าเพศชาย เขาไม่ได้ให้เหตุผลเกี่ยวกับความแตกต่างของค่า static compliance ระหว่างเพศชายและเพศหญิง เขากล่าวเพิ่มเติมว่าควรมีการศึกษาเกี่ยวกับ anatomy และ physiology ของ middle ear ในแต่ละช่วงอายุและระหว่างเพศ

Hall (88) ศึกษาเปรียบเทียบค่า static compliance ในกลุ่มตัวอย่างเพศชาย 185 คนและเพศหญิง 151 คน อายุ 6-91 ปี อายุเฉลี่ย 45.5 ปีซึ่งมี middle ear ปกติ ศึกษาโดยใช้ probe tone frequency 226 Hz ผลการศึกษาพบว่าค่า static compliance ของเพศหญิงมากกว่าเพศชายเล็กน้อยถ้าอายุน้อยกว่า 30 ปี แต่ถ้าอายุ 31-60 ปี ค่า static compliance ของเพศชายจะมากกว่าเพศหญิง และเมื่ออายุมากกว่า 60 ปี static compliance ของเพศชายและเพศหญิงจะมีค่าเท่ากัน ดังรูปที่ 28



รูปที่ 28 แสดงค่า static compliance ของเพศชายและเพศหญิง (จาก 88)

Brooks (95) ทำการศึกษา acoustic compliance ในกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติอายุ 5-11 ปี เป็นเพศชายจำนวน 320 หู เพศหญิงจำนวน 322 หู ใช้ probe tone frequency 220 Hz ผลการศึกษาพบว่า ค่ามัธยฐานของค่า compliance ของเพศชายและเพศหญิง คือ 0.68 และ 0.63 cc เขากล่าวว่าในวัยเด็ก หูของเพศชายจะมี compliance มากกว่าหูของเพศหญิงประมาณ 5-10% วัยผู้ใหญ่มีมากกว่าประมาณ 15-25% และในวัยชราจะมีมากกว่าเล็กน้อย ทั้งนี้เนื่องจากโดยทั่วไปเพศชายมีรูปร่างใหญ่กว่าเพศหญิง ear canal และ tympanic membrane มีขนาดใหญ่กว่าด้วยซึ่งมีผลให้ acoustic compliance ของหูเพศชายต่างจากเพศหญิง เขาจึงทำการทดสอบ tympanometry เพื่อหาขนาดของ ear canal volume โดยใช้กลุ่มตัวอย่างเพศชายและเพศหญิงที่มีอายุต่างกันดังนี้

กลุ่มอายุ 4-6 ปี 50 คน (100 หู)      กลุ่มอายุ 7-8 ปี 50 คน (100 หู)

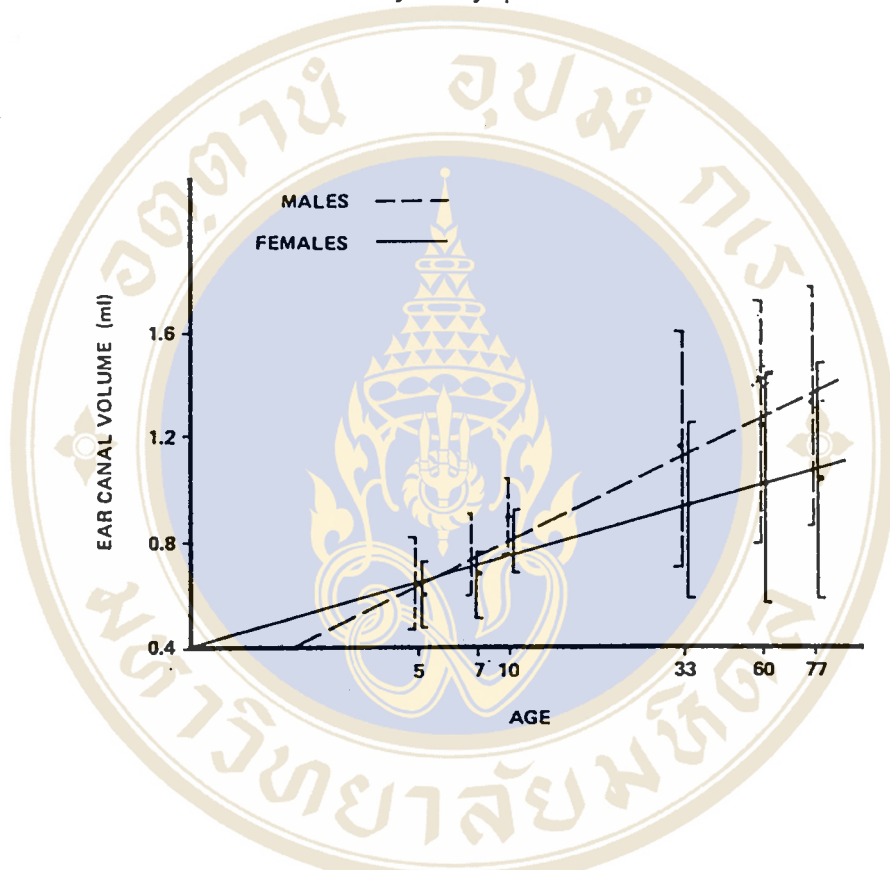
กลุ่มอายุ 9-11 ปี 50 คน (100 หู)      กลุ่มอายุ 20-45 ปี 50 คน (100 หู)

กลุ่มอายุ 46-70 ปี 50 คน (100 หู)      และกลุ่มอายุมากกว่า 71 ปี 25 คน (50 หู)

ผลการศึกษาพบว่า ขนาดของ ear canal volume ของเพศชายแตกต่างจากเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในทุกกลุ่มอายุยกเว้นในกลุ่มอายุ 4-6 ปี ดังรูปที่ 29 เขาสรุปผลการศึกษาว่า

1. ear canal volume ของเพศชายจะใหญ่กว่าเพศหญิงเมื่ออายุมากกว่า 5 ปี การที่ ear canal ของเพศชายมีขนาดใหญ่กว่าเพศหญิงทำให้ขนาดของ tympanic membrane ใหญ่กว่าจึงมี compliance มากกว่าด้วย

2. middle ear compliance จะเพิ่มตามอายุ ช่วงอายุน้อยจะเพิ่มเร็วแต่ช่วงอายุมากจะเพิ่มช้าลง ทั้งนี้อาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลง elasticity ของ tympanic membrane และ middle ear



รูปที่ 29 แสดง ear canal volume ของเพศชายและเพศหญิงในช่วงอายุต่างๆ ( จาก 95)

### 3. body position

การที่ช่องเหลวในอวัยวะก้นหอย (perilymph ใน cochlea) มีแรงดันของของเหลว (hydrostatic pressure) เพิ่มขึ้น 100–200 mmH<sub>2</sub>O จะทำให้พลังงานเสียงไหลผ่าน tympanic membrane ลดลง (Metz อ้างใน 94) body inversion มีส่วนทำให้ intracranial pressure ของ cerebrospinal fluid เพิ่มขึ้นและเนื่องจาก cerebrospinal fluid อยู่ติดกับ perilymph ทาง cochlea aqueduct จึงทำให้ perilymph มี pressure เพิ่มขึ้นด้วย ทำให้ดัน oval window และ round window ออกจาก cochlea มีผลทำให้ acoustic immittance เปลี่ยนแปลงได้ (Davson อ้างใน 96)

Macrae (96) ทำการศึกษาผลของ body position ต่อค่า acoustic immittance กลุ่มตัวอย่างเป็นชายอายุ 18-35 ปี จำนวน 10 คน มีการได้ยินปกติ ไม่มีประวัติโรคหู ทดสอบ tympanometry โดยให้กลุ่มตัวอย่างอยู่ในท่า upright และท่า invert แล้วทำการเปรียบเทียบ amplitude และ TPP ของ tympanogram ที่ได้จากการทดสอบทั้ง 2 ท่า ใช้ probe tone frequency 660 Hz ผลการศึกษาพบว่า

1. ท่า invert ทำให้ amplitude ของ B tympanogram เพิ่มขึ้น 4% amplitude ของ G tympanogram ลดลง 60%
2. ท่า invert ทำให้ TPP ของ B, G tympanogram อยู่ที่ positive pressure มากกว่าท่า upright เนื่องจากท่า invert ทำให้ intracranial venous blood pressure เพิ่มขึ้นมีผลให้ mucosa ที่บุใน middle ear cavity มีปริมาตรเพิ่มขึ้นทำให้ pressure ใน middle ear cavity เพิ่มขึ้น

เขาทำการทดสอบต่อเพื่อดูว่า pressure ใน middle ear cavity ที่เพิ่มขึ้นนี้สัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลง amplitude ของ B, G tympanogram จริงหรือไม่โดยทดสอบกลุ่มตัวอย่างในท่า upright แล้วให้กลุ่มตัวอย่างทำ valsalva เพื่อเพิ่ม pressure ใน middle ear cavity แล้วจึงทดสอบ tympanometry ผลการศึกษาพบว่า amplitude ของ B, G tympanogram ไม่เปลี่ยนแปลงในขณะที่ TPP อยู่ที่ positive pressure มากขึ้น เขาจึงสรุปว่าการเปลี่ยนแปลง amplitude ของ tympanogram เมื่อทดสอบในท่า invert นั้นไม่ได้เกิดจากการเพิ่มขึ้นของ middle ear pressure แต่เกิดจากการเพิ่มขึ้นของ hydrostatic pressure ของ perilymph

Daniel และคณะ (97) ศึกษาผลของ body position ต่อค่า acoustic immittance โดยทำการทดสอบกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติ 25 คน อายุ 20-39 ปี อายุเฉลี่ย 25.8 ปี โดยให้กลุ่มตัวอย่างอยู่ในท่านั่งตรง นอนหงาย นอนคว่ำ นอนตะแคงในขณะทดสอบ tympanometry ใช้ probe tone frequency 220 Hz แล้วศึกษาค่า amplitude และ TPP ของ B tympanogram ผลการศึกษาพบว่า ท่านั่งตรงมีค่า amplitude ต่างจากท่านอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติและ TPP อยู่ที่ negative pressure มากกว่าท่านอนประมาณ 13 mmH<sub>2</sub>O เขาให้เหตุผลว่าการเพิ่มขึ้นของ pressure ใน perilymph และปริมาตรของ mucosa ที่บุใน middle ear ซึ่งทำให้ middle ear มี impedance มากขึ้น นอกจากนี้แรงดึงดูดของโลกก็มีผลต่อ acoustic immittance ของ middle ear โดยจะทำให้ ossicular chain มี stiffness ต่างกันเมื่อกลุ่มตัวอย่างอยู่ในท่าต่างกันขณะทดสอบ ท่านั่งตรงทำให้

ossicular chain มี stiffness น้อยกว่าทำอื่นดังนั้นทำนั้งตรงจึงเป็นทำที่มีการส่งพลังงานเสียงผ่าน middle ear ได้มากที่สุด

#### Environment variables

de Jonge และ Cummings (98) ศึกษาการเปลี่ยนแปลงของ middle ear pressure ในแต่ละวัน กลุ่มตัวอย่างเป็นเด็กวัยเรียน 20 คน ผลการศึกษาพบว่าการเปลี่ยนแปลงของ middle ear pressure มากถึง 150 daPa (95% range) ดังนั้นจึงต้องระวังการแปลผล tympanogram ที่พิจารณา middle ear pressure เพียงอย่างเดียว

Feldman (2) กล่าวว่า ที่ระดับความดันบรรยากาศต่างกันหรือความสูงจากระดับน้ำทะเลต่างกันมีผลให้ immittance ของหูต่างกันได้นอกจากนี้ acoustic immittance ยังเปลี่ยนแปลงตามปริมาตรของอากาศ โดยที่ acoustic impedance จะเป็นสัดส่วนผกผันกับปริมาตรของอากาศในขณะที่ acoustic admittance เป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาตรของอากาศ

Shankes (36, 99) กล่าวว่า acoustic immittance ของอากาศที่อยู่ใน ear canal ตั้งแต่ probe tip ถึง tympanic membrane มักจะขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมเช่น อุณหภูมิ ความชื้น และความดันบรรยากาศ แต่อย่างไรก็ตามอุณหภูมิและความชื้นนั้นมีผลให้ acoustic immittance ของ ear canal volume มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 20 °c เป็น 37 °c ทำให้ acoustic immittance ของ ear canal volume เปลี่ยนแปลงน้อยมาก การเปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์จาก 0 เป็น 100% ก็ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง acoustic immittance ของ ear canal volume อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การเปลี่ยนแปลงความดันบรรยากาศซึ่งขึ้นกับความสูงจากระดับน้ำทะเลนั้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง acoustic immittance ของ ear canal volume อย่างเห็นได้ชัด ดังนั้นจึงไม่สามารถนำค่า acoustic immittance ที่ได้จากการทดสอบในสถานที่ที่สูงจากระดับน้ำทะเลต่างกันมาเปรียบเทียบกันได้

Cudahy (40) กล่าวว่า ที่ความดันบรรยากาศ 760 mmHg (ความดันบรรยากาศที่ระดับน้ำทะเล) พบว่า อากาศ 1 cc มี impedance 1100 ohm เมื่อมีเสียงความถี่ 220 Hz ไหลผ่าน ถ้าปริมาตรของอากาศ

เปลี่ยนแปลง impedance ก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย และถ้ามีเสียงความถี่ต่างกันไหลผ่านก็จะมี impedance ของอากาศเปลี่ยนแปลงเช่นกันเนื่องจาก impedance เป็น frequency dependance นอกจากนี้ impedance ของอากาศยังมีการเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิของอากาศอีกด้วย

#### Instrument variables

Cudahy (40) กล่าวว่า เครื่องมือที่ใช้ในการหาค่า acoustic immittance ของ middle ear ประกอบด้วย 6 ส่วนใหญ่ๆคือ audio oscillator, pressure pump, ear insert, voltmeter, video display และ recorder

ในการทดสอบ tympanometry นั้นเป็นการวัด acoustic immittance ของ tympanic membrane และ middle ear ในระนาบของ probe tip ลักษณะของ probe จึงมีผลต่อการวัด acoustic immittance ด้วย ลักษณะที่สำคัญของ probe ที่ใช้ในการวัด acoustic immittance คือ จะต้องมีความสูงสัมพันธ์กับ impedance ของหู เพื่อป้องกันการมีปฏิสัมพันธ์กันของเครื่องมือกับ middle ear พื้นที่หน้าตัดของ probe จะควบคุม impedance ของ probe probe ที่มีพื้นที่หน้าตัดน้อยจะมี impedance มาก นอกจากนี้ ปริมาตรของอากาศก็มีผลต่อ impedance ของ probe ด้วย ยิ่งปริมาตรของอากาศน้อย probe ก็ยิ่งมี impedance มาก ดังนั้นถ้าศึกษาค่า acoustic immittance ของ middle ear โดยใช้เครื่องมือที่มี probe ขนาดต่างกันและปริมาตรของอากาศใน ear canal ต่างกันก็จะทำให้ได้ค่า acoustic immittance ต่างกันด้วย

### บทที่ 3

#### วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้เก็บข้อมูลที่คลินิกโสตสัมผัสและการพูด โรงพยาบาลรามธิบดี ดำเนินการเก็บข้อมูลโดยผู้วิจัย เริ่มเก็บข้อมูลตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2538 เป็นระยะเวลา 2 เดือน โดยเก็บข้อมูลในช่วงเวลา 7.30-8.30 น. และ 12.00-14.00 น. เนื่องจากสามารถใช้เครื่องมือในการทดสอบได้สะดวก และผู้วิจัยได้ใช้สถานที่และเครื่องมือของคลินิกโสตสัมผัสและการพูด โรงพยาบาลรามธิบดี

#### กลุ่มตัวอย่าง

กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาปริญญาโทสาขาวิชาความผิดปกติของการสื่อความหมาย โรงพยาบาลรามธิบดี เจ้าหน้าที่โรงพยาบาลรามธิบดี และกลุ่มคนที่มาตรวจร่างกายก่อนไปทำงานต่างประเทศ อายุระหว่าง 20-30 ปี อายุเฉลี่ย 23.53 ปี ทั้งหมด 60 คน (120 หู) เป็นเพศชาย 30 คน (60 หู) เพศหญิง 30 คน (60 หู) โดยมีเกณฑ์การคัดเลือกดังนี้

1. ไม่มีประวัติโรคเกี่ยวกับหู เช่น หูน้ำหนวก มีเสียงดังในหู
2. ไม่มีอาการเจ็บป่วยเกี่ยวกับโรคทางเดินหายใจส่วนบนในวันทำการเก็บข้อมูลหรือ 7 วันก่อนทำการเก็บข้อมูล
3. มีระดับการได้ยินปกติเมื่อทำการทดสอบการได้ยินด้วยเสียงบริสุทธิ์ (pure tone audiometry) ทาง air conduction (AC) ที่ความถี่ 250-8000 Hz และทาง bone conduction (BC) ที่ความถี่ 500-4000 Hz คือได้ค่าไม่เกิน 25 dBHL ทุกความถี่ (ANSI, 1969)
4. เมื่อตรวจวัดสมรรถภาพของหูชั้นกลางโดยการทดสอบ tympanometry ที่ความถี่ 226 Hz ได้ type A tympanogram (12) และมีการกระตุกของกล้ามเนื้อในหูชั้นกลาง (stapedial reflex) เมื่อใช้เสียงกระตุ้นในหูข้างเดียวกันและหูข้างตรงข้าม

### เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. เครื่องมือทดสอบการได้ยิน (audiometer) ชนิดที่ใช้ในคลินิก (clinical audiometer) ชื่อ Madsen รุ่น OB 822 ใช้ในการทดสอบหาค่าจุดเริ่มต้นการได้ยินเสียงบริสุทธิ์ทาง air conduction ที่ความถี่ 250-8000 Hz และทาง bone conduction ที่ความถี่ 500- 4000 Hz
2. เครื่องมือทดสอบสมรรถภาพของหูชั้นกลาง (digital impedance instrument) ชื่อ Virtual รุ่น model 310 โดยใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz ระดับความดังของเสียง 85 dB SPL มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ชนิด ascending direction และอัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 125 daPa/second ผลการทำงานของ middle ear จะแสดงออกมาทางจอภาพเป็นกราฟ (tympanogram) แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง acoustic immittance ของ middle ear กับการเปลี่ยนแปลงของความดันอากาศในช่องหูชั้นนอก โดยเมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz จะพิจารณาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง acoustic admittance กับ ear canal pressure (Y tympanogram) และเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz จะพิจารณาเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง acoustic admittance, susceptance, conductance กับ ear canal pressure ซึ่งได้แก่ admittance (Y), susceptance-conductance (BG) tympanogram
3. เครื่องพิมพ์ข้อมูล (printer)

### ขั้นตอนในการทดสอบ

1. ทดสอบการได้ยินโดยใช้เสียงบริสุทธิ์ทาง air conduction (AC) ที่ความถี่ 250-8000 Hz และ bone conduction (BC) ที่ความถี่ 500-4000 Hz ด้วยเครื่อง audiometer ชื่อ Madsen electronics รุ่น OB 822
2. ทดสอบสมรรถภาพของหูชั้นกลาง (tympanometry) ด้วยเครื่อง digital impedance instrument ชื่อ Virtual รุ่น Model 310 โดยใช้ probe tone frequency 226 Hz ระดับความดังของเสียง 85 dB SPL มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ชนิด ascending direction โดยเปลี่ยนแปลง pressure จาก -500 daPa ถึง +200 daPa อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 125 daPa/second และทำการทดสอบเพียง 1 ครั้ง แต่ถ้าทดสอบไม่ได้เนื่องจาก probe tip หลุด (seal loss) ใส่ probe tip ใน ear canal ใหม่แล้วจึงทดสอบ

ทดสอบการทำงานของกล้ามเนื้อหูชั้นกลาง (acoustic reflex) โดยใช้เสียงบริสุทธิ์กระตุ้นและวัดการทำงานของกล้ามเนื้อหูข้างเดียวกัน (ipsilateral record) ที่ความถี่ 500, 1000, 2000 Hz และใช้เสียงกระตุ้นในหูด้านตรงข้าม (contra-lateral record) ที่ความถี่ 500, 1000, 2000, 4000 Hz

ทดสอบสมรรถภาพของหูชั้นกลาง (typanometry) โดยใช้ probe tone frequency 630 Hz ระดับความดังของเสียง ทิศทาง อัตราการเปลี่ยนแปลง pressure และทำการทดสอบเหมือนกับเมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ทำการทดสอบโดยการสูบลมที่จะทดสอบเป็นหูแรกแล้วจึงทดสอบตามขั้นตอนที่กล่าวมาข้างต้น หลังจากนั้นจึงทดสอบหูอีกข้าง

3. พิมพ์ข้อมูลของ admittance (Y) tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226, 630 Hz และพิมพ์ข้อมูลของ susceptance-conductance (B-G) tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz โดยใช้เครื่อง printer

### การศึกษาข้อมูล

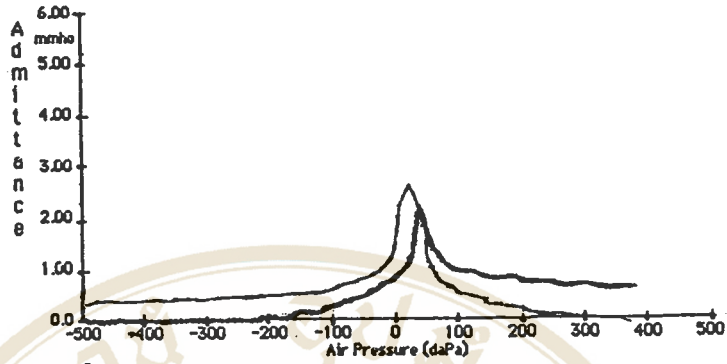
หลังจากที่ได้ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz แล้วพิจารณาดังนี้

#### 1. shape

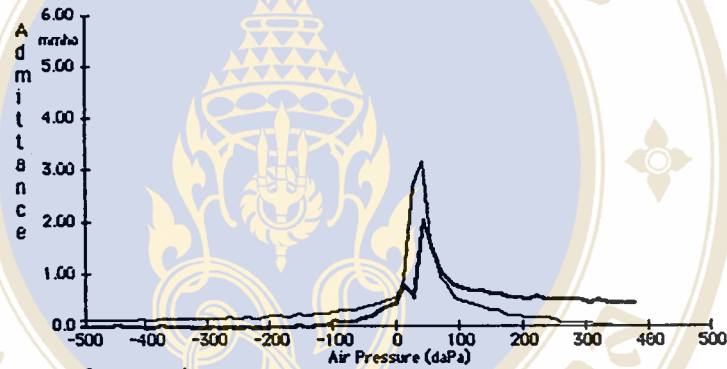
ในการศึกษารูปร่างของ admittance (Y) tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226, 630 Hz และ susceptance-conductance (BG) tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz นั้น ผู้วิจัยได้ใช้วิธีพิจารณาจำนวน extrema ของ tympanogram ตามวิธีของ Vanhuysse และคณะ (61) ซึ่งบรรยายรูปร่างของ tympanogram โดยบอกจำนวนของ extrema ตามด้วยชนิดของ tympanogram ดังแสดงในรูปที่ 30, 31



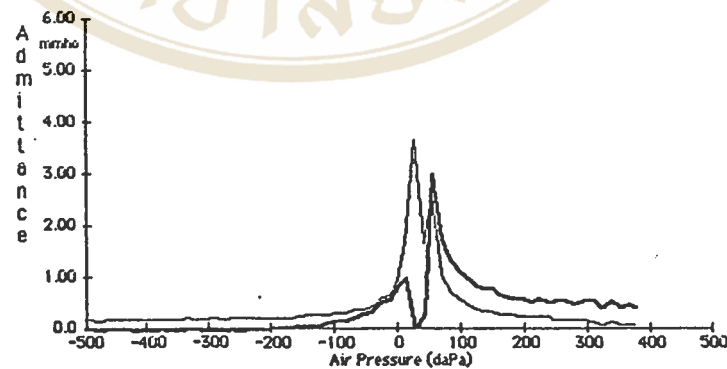
Left 630 Hz Tympanogram



1B1G



3B1G



3B3G

รูปที่ 31 ตัวอย่างการบรรยายรูปร่างของ susceptance-conductance (B-G) tympanogram เมื่อใช้

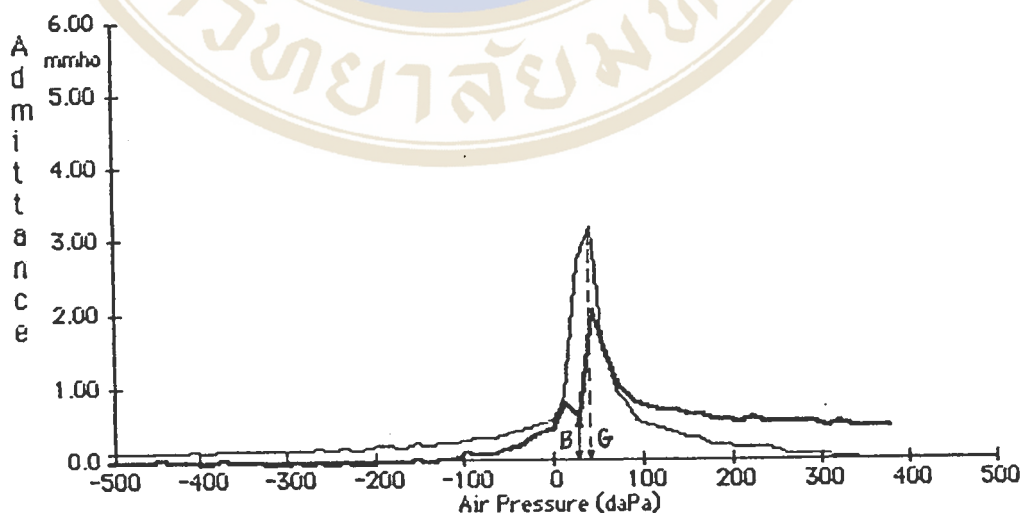
probe tone frequency 630 Hz

## 2. Amplitude

Margolis และคณะ (100) กล่าวว่า amplitude เป็นการวัดความสูงของ tympanogram สัมพันธ์กับ tail value

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้ศึกษาได้หาค่า amplitude โดยใช้จุดที่สูงที่สุดใน single-peaked tympanogram หรือจุดที่ต่ำที่สุดของ notch ใน notched tympanogram ลากลงมาถึงระดับ tail value ในแนวตั้งฉาก ซึ่งเป็นวิธีของ Feldman และ Wilber (4) Margolis และ Shanks (5) Shanks และ Shelton (7) Hunter และ Margolis (54) แต่เนื่องจาก tail value ของ tympanogram มี 2 ค่าคือ ค่าทางด้าน positive pressure และด้าน negative pressure ผู้ศึกษาจึงพิจารณาใช้ค่า tail value ทางด้าน negative pressure ที่  $-500$  daPa ซึ่ง Van Camp และคณะ (3) Margolis และ Shanks (35) Shanks และคณะ (84) Shanks และ Lilly (85) ศึกษาพบว่า การประมาณค่า ear canal volume ทางด้าน negative pressure นั้นจะได้ค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้โดยตรงมากที่สุด ซึ่งจะทำให้ค่านวนค่า acoustic immittance ของ middle ear ได้ถูกต้องมากกว่าการประมาณค่า ear canal volume ทางด้าน positive pressure

### Left 630 Hz Tympanogram



Ga: \_\_\_\_\_  
Ba: \_\_\_\_\_

amplitude ของ B tympanogram = 0.51 mmhos

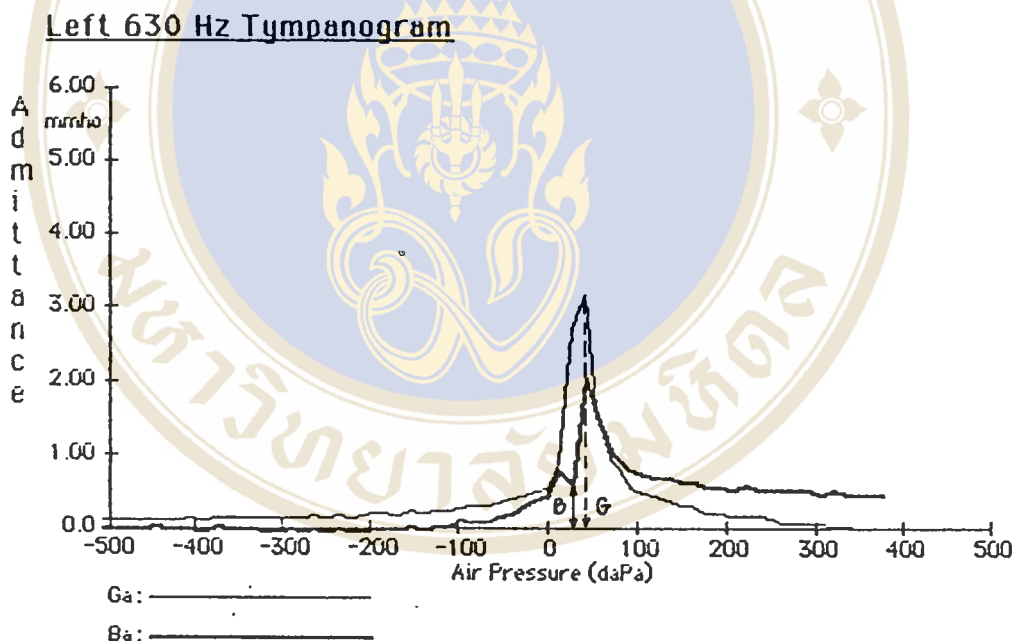
amplitude ของ G tympanogram = 3.10 mmhos

รูปที่ 32 ตัวอย่างการหาค่า amplitude ของ tympanogram มีหน่วยเป็น มิลลิโมลล์ (mmhos)

### 3. tympanometric peak pressure (TPP)

Van Camp และคณะ (3) กล่าวว่า TPP คือความดันอากาศในช่องหูที่ทำให้เกิด peak ของ single-peaked tympanogram ในกรณีที่ เป็น notched tympanogram นั้น TPP คือ ความดันอากาศในช่องหูที่ทำให้เกิดจุดที่ต่ำที่สุดของ notch

ผู้วิจัยได้ใช้วิธีหาตำแหน่งของ TPP โดยพิจารณาจุดที่สูงที่สุดของ single-peaked tympanogram และจุดที่ต่ำที่สุดของ notch ของ notched tympanogram ว่าเกิดที่ ear canal pressure เท่าไร โดยมีหน่วยเป็น daPa



TPP ของ B tympanogram = 25 daPa

TPP ของ G tympanogram = 37.5 daPa

รูปที่ 33 ตัวอย่างการหาค่า TPP มีหน่วยเป็น daPa

### ขอบเขตของการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ทำในกลุ่มตัวอย่างที่มีการได้ยินปกติจำนวน 120 หู โดยกลุ่มตัวอย่างนี้เป็นนักศึกษาปริญญาโท สาขาวิชาความผิดปกติในการสื่อความหมาย โรงพยาบาลรามาธิบดี เจ้าหน้าที่โรงพยาบาลรามาธิบดี และกลุ่มคนที่มาตรวจร่างกายก่อนไปทำงานในต่างประเทศ

### การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้ศึกษานำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Statistic Package for The Social Science (SPSS) สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ

1. ค่าร้อยละ เพื่อศึกษา shape ของ tympanogram
2. ค่าเฉลี่ยตัวกลางเลขคณิต (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation S.D.) เพื่อศึกษา amplitude และ TPP
3. pair t-test เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง amplitude และ TPP ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz
4. t-test เพื่อศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่าง amplitude และ TPP ของ tympanogram ในเพศหญิงและเพศชาย

## บทที่ 4

### ผลการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เก็บข้อมูลที่คลินิกโสตสัมผัสและการพูด โรงพยาบาลรามธิบดี โดยใช้ระยะเวลา 2 เดือน ตั้งแต่เดือนกรกฎาคมถึงเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2538

กลุ่มตัวอย่างเป็นกลุ่มคนที่มีการได้ยินปกติจำนวน 60 คน อายุ 20-30 ปี อายุเฉลี่ย 23.53 ปี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.67 ปี โดยทำการตรวจทั้งหมด 120 หู แบ่งเป็นเพศชาย 30 คน อายุเฉลี่ย 23.87 ปี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 2.22 ปี จำนวน 60 หู และเป็นเพศหญิง 30 คน อายุเฉลี่ย 23.20 ปี ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 3.04 ปี จำนวน 60 หู

จากการศึกษาได้ผลดังนี้

#### 1. รูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz

ร้อยละของรูปร่างของ Y, B-G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในคนที่มีการได้ยินปกติจำนวน 120 หู ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เมื่อพิจารณาในรูปของ admittance (Y) tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz พบว่ารูปร่างของ Y tympanogram ส่วนใหญ่เป็น single-peaked tympanogram (1Y) และพบ notched tympanogram (3Y) เพียงเล็กน้อย (1.6%) เมื่อพิจารณาในรูปของ susceptance-conductance (B-G) tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz พบว่ารูปร่างของ B-G tympanogram ส่วนใหญ่เป็น 1B1G (89.2%) รองลงมาเป็น 3B1G (10%) และที่พบน้อยที่สุดเป็น 3B3G (0.8%) ส่วนรูปร่างชนิด 5B3G ไม่พบในการศึกษาครั้งนี้

ตารางที่ 1 แสดงร้อยละของรูปร่าง Y, B-G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติจำนวน 120 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz pressure direction ชนิด ascending direction และ rate 125 daPa/second

รูปร่าง Y / รูปร่าง B-G	1B1G	3B1G	3B3G	รวม
1Y	89.2% (107 หู)	9.2% (11 หู)	-	98.4% (118 หู)
3Y	-	0.8% (1 หู)	0.8% (1 หู)	1.6% (2 หู)
รวม	89.2% (107 หู)	10% (12 หู)	0.8% (1 หู)	100% (120 หู)

ตารางที่ 2 แสดงรูปร่างของ Y, B-G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายจำนวน 60 หู และเพศหญิงจำนวน 60 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz เมื่อพิจารณาในรูปของ Y tympanogram พบว่าทั้งเพศชายและเพศหญิงมีรูปร่างของ Y tympanogram เป็น single-peaked tympanogram (1Y) เป็นส่วนใหญ่ (98.4%) และพบ notched tympanogram (3Y) เพียงเล็กน้อย (1.7% ทั้งเพศชายและเพศหญิง) เมื่อพิจารณารูปร่างของ B-G tympanogram ในเพศชายพบว่ารูปร่างของ B-G tympanogram มีเพียง 2 ชนิดโดยส่วนใหญ่เป็นชนิด 1B1G (88.3%) และพบชนิด 3B1G เพียงเล็กน้อย (11.7%) ส่วนในเพศหญิงพบรูปร่างของ B-G tympanogram ทั้งหมด 3 ชนิดโดยส่วนใหญ่เป็นชนิด 1B1G (90%) รองลงมาเป็น 3B1G (8.3%) และพบชนิด 3B3G น้อยที่สุด (1.7%)

ตารางที่ 2 แสดงร้อยละของรูปร่าง Y, B-G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชาย 60 หู เพศหญิง 60 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz pressure direction ชนิด ascending direction และ rate 125 daPa/ sec

รูปร่าง Y / รูปร่าง B-G	1B1G	3B1G	3B3G	รวม
1Y	ชาย 88.3% (53 หู) หญิง 90% (54 หู)	ชาย 10% (6 หู) หญิง 8.3% (5 หู)	ชาย - หญิง -	ชาย 98.3% (59 หู) หญิง 98.3% (59 หู)
3Y	ชาย - หญิง -	ชาย 1.7% (1 หู) หญิง -	ชาย - หญิง 1.7% (1 หู)	ชาย 1.7% (1 หู) หญิง 1.7% (1 หู)
รวม	ชาย 88.3% (53 หู) หญิง 90% (54 หู)	ชาย 11.7% (7 หู) หญิง 8.3% (5 หู)	ชาย - หญิง 1.7% (1 หู)	ชาย 100% (60 หู) หญิง 100% (60 หู)

## 2. amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และพิสัยของ amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz ในคนที่มีการได้ยินปกติ 120 หู พบว่าเมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และพิสัยของ amplitude ของ Y tympanogram มีค่าเท่ากับ 0.72, 0.25 และ 0.34-1.65 มิลลิโวลต์ตามลำดับ เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y, B, G tympanogram มีค่าเท่ากับ 2.13, 1.54 และ 1.74 มิลลิโวลต์ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 0.91, 0.61 และ 0.98 มิลลิโวลต์ตามลำดับ และพิสัยมีค่าเท่ากับ 0.8-5.8, 0.08-3.30 และ 0.40-5.28 มิลลิโวลต์ตามลำดับ

ตารางที่ 3 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ พิสัยของ amplitude ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติ 120 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz

tympanogram	probe tone frequency (Hz)	amplitude (มิลลิโวลต์)		
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน-มาตรฐาน	พิสัย
Y	226	0.72	0.25	0.34-1.65
Y	630	2.13	0.91	0.80-5.80
B	630	1.54	0.61	0.08-3.30
G	630	1.74	0.98	0.40-5.28

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า amplitude ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชาย 60 หู และเพศหญิง 60 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz พบว่าเมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ Y tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายและเพศหญิงมีค่าเท่ากับ  $0.81 \pm 0.27$  และ  $0.62 \pm 0.19$  มิลลิโวลต์ตามลำดับ เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ Y, B, G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายมีค่าเท่ากับ  $2.38 \pm 0.92$ ,  $1.61 \pm 0.62$  และ  $2.14 \pm 1.07$  มิลลิโวลต์ตามลำดับ ส่วนในเพศหญิงมีค่าเท่ากับ  $1.88 \pm 0.83$ ,  $1.47 \pm 0.60$  และ  $1.35 \pm 0.69$  มิลลิโวลต์ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่า amplitude ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศหญิงและเพศชาย เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz

tympanogram	probe tone frequency (Hz)	จำนวน (หู)	amplitude (มิลลิโวลต์)			
			เพศชาย		เพศหญิง	
			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน-มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน-มาตรฐาน
Y	226	60	0.81	0.27	0.62	0.19
Y	630	60	2.38	0.92	1.88	0.83
B	630	60	1.61	0.62	1.47	0.60
G	630	60	2.14	1.07	1.35	0.69

3. การเปรียบเทียบ amplitude ของ admittance (Y) tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz

ตารางที่ 5 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz โดยใช้สถิติ pair t-test พบว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz มีค่าน้อยกว่า amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.000$ )

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบของค่าเฉลี่ย amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz โดยใช้สถิติ pair t-test

ค่าเฉลี่ยของ amplitude (มิลลิโมลต์)		t-value	degree of freedom	2-tail probability
226 Hz	630 Hz			
0.72	2.13	-20.38	119	0.000*

\* =  $p < 0.05$  คือมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

4. การเปรียบเทียบ amplitude ของ Y,B,G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายและเพศหญิงเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz

ตารางที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ amplitude Y, B, G tympanogram ในเพศชายและเพศหญิงที่มีการได้ยินปกติเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz โดยใช้สถิติ t-test พบว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude Y และ G tympanogram ในเพศชายมากกว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude Y และ G tympanogram ในเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.002$  และ  $p=0.000$  ตามลำดับ) ส่วนค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ B tympanogram ในเพศชายและเพศหญิงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.207$ )

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบของค่าเฉลี่ยของ amplitude Y, B, G tympanogram ในเพศชายและเพศหญิงที่มีการได้ยินปกติเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz โดยใช้สถิติ t-test

tympanogram	ค่าเฉลี่ยของ amplitude (มิลลิโมลต์)		t-value	degree of freedom	2-tail probability
	เพศชาย	เพศหญิง			
Y	2.38	1.88	3.12	117	0.002*
B	1.61	1.47	1.27	118	0.207 <sup>ns</sup>
G	2.14	1.35	4.84	118	0.000*

\* =  $p < 0.05$  คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

<sup>ns</sup> =  $p > 0.05$  คือไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

5. tympanometric peak pressure (TPP) ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และพิสัยของ TPP ของ Y tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติ 120 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz พบว่าเมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และค่าน้อยที่สุดถึงค่ามากที่สุดของ TPP ของ Y tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติมีค่าเท่ากับ 40.94, 10.71 และ 10-70 daPa ตามลำดับ เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ค่าเฉลี่ยของ Y, B, G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติมีค่าเท่ากับ 44.58, 45.66 และ 36.00 daPa ตามลำดับ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าเท่ากับ 10.79, 12.97 และ 10.29 daPa ตามลำดับ และพิสัยเท่ากับ 10-70, 7.5-75 และ 7.5-65 daPa ตามลำดับ

ตารางที่ 7 แสดงค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และ พิสัยของ TPP ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติจำนวน 120 หู เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz

tympanogram	probe tone frequency (Hz)	TPP (daPa)		
		ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน-มาตรฐาน	พิสัย
Y	226	40.94	10.71	10-70
Y	630	44.58	10.79	10-70
B	630	45.66	12.97	7.5-75
G	630	36.00	10.29	7.5-65

ตารางที่ 8 แสดงค่าเฉลี่ยของ TPP ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายและเพศหญิงเมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz พบว่าเมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ TPP ของ Y tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายและเพศหญิงมีค่าเท่ากับ  $42.50 \pm 9.96$  และ  $39.38 \pm 11.28$  daPa ตามลำดับ เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ TPP ของ Y, B, G tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายมีค่าเท่ากับ  $47.42 \pm 9.66$ ,  $48.79 \pm 11.58$  และ  $39.08 \pm 8.05$  daPa ตามลำดับ ส่วนเพศหญิงมีค่าเท่ากับ  $41.75 \pm 11.18$ ,  $42.54 \pm 13.63$  และ  $32.92 \pm 11.37$  daPa ตามลำดับ

**ตารางที่ 8** แสดงค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ TPP ของ tympanogram ในคนที่มีการได้ยินปกติเพศชายและเพศหญิงเมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz

tympanogram	probe tone frequency (Hz)	จำนวน (หู)	TPP (daPa)			
			เพศชาย		เพศหญิง	
			ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน-มาตรฐาน	ค่าเฉลี่ย	ส่วนเบี่ยงเบน-มาตรฐาน
Y	226	60	42.50	9.96	39.38	11.28
Y	630	60	47.42	9.66	41.75	11.18
B	630	60	48.79	11.58	42.54	13.63
G	630	60	39.08	8.05	32.92	11.37

**6. การเปรียบเทียบ TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz**

ตารางที่ 9 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz โดยใช้สถิติ pair t-test พบว่าค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.000$ )

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz โดยใช้สถิติ pair t-test

ค่าเฉลี่ยของ TPP (daPa)		t-value	degree of freedom	2-tail probability
226 Hz	630 Hz			
40.94	44.58	-4.62	119	0.000*

\* =  $p < 0.05$  คือมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

7. การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y,B,G tympanogram ในเพศชายและเพศหญิงที่มีการได้ยินปกติ เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz

ตารางที่ 10 แสดงการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y, B, G tympanogram ในเพศชายและเพศหญิงที่มีการได้ยินปกติเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz โดยใช้สถิติ t-test พบว่าค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y, B, G tympanogram ในเพศชายมีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y, B, G tympanogram ในเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.004$   $p=0.008$  และ  $p=0.001$  ตามลำดับ

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ย TPP ของ Y, B, G tympanogram ในเพศชายและเพศหญิงที่มีการได้ยินปกติเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz โดยใช้สถิติ t-test

tympanogram	ค่าเฉลี่ยของ TPP (daPa)		t-value	degree of freedom	2-tail probability
	เพศชาย	เพศหญิง			
Y	47.42	41.75	2.97	116	0.004*
B	48.79	42.54	2.71	115	0.008*
G	39.08	32.92	3.43	118	0.001*

\* =  $p < 0.05$  คือแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

### อภิปราย รูป และข้อเสนอนะ

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาผลการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 630 Hz ในผู้ใหญ่ที่มีการได้ยินปกติในช่วงอายุ 20-30 ปี จำนวน 120 หู โดยมีวัตถุประสงค์การศึกษาดังหัวข้อต่อไปนี้

1. รูปร่างของ tympanogram
2. amplitude ของ tympanogram
  - 2.1 amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz
  - 2.2 amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz เปรียบเทียบกับ amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz
  - 2.3 amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในเพศชายเปรียบเทียบกับเพศหญิง
3. ค่า tympanometric peak pressure (TPP)
  - 3.1 ค่า tympanometric peak pressure (TPP) เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz
  - 3.2 ค่า tympanometric peak pressure (TPP) เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz เปรียบเทียบกับค่า tympanometric peak pressure (TPP) เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz
  - 3.3 ค่า tympanometric peak pressure (TPP) เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในเพศชายเปรียบเทียบกับเพศหญิง

#### 1. รูปร่างของ tympanogram

ผลการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มผู้ใหญ่ อายุ 20-30 ที่มีการได้ยินปกติ ใช้ความดัง 85 dB SPL มีการเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ชนิด ascending direction โดยเปลี่ยนแปลงจาก -500 daPa ถึง +200 daPa และอัตราการเปลี่ยนแปลง pressure 125 daPa/ second นั้นพบว่ารูปร่างของ tympanogram มีทั้งชนิด single-peaked

typanogram และ notched typanogram โดยถ้าพิจารณาในรูปของ admittance (Y) typanogram พบว่ารูปร่างของ Y typanogram ส่วนใหญ่ (98.4%) เป็น single-peaked typanogram (1Y) และพบ notched typanogram (3Y) เพียงเล็กน้อย (1.6%) เมื่อพิจารณาในรูปของ susceptance-conductance (B-G) typanogram พบว่ารูปร่างของ B-G typanogram ส่วนใหญ่เป็น 1B1G (89.2%) รองลงมา เป็น 3B1G (10%) และที่พบน้อยที่สุดเป็น 3B3G (0.8%) ส่วนรูปร่างชนิด 5B3G ไม่พบในการศึกษาครั้งนี้

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Margolis และคณะ (42) Colletti (48) Hunter และ Margolis (54) Wilson และคณะ (64) Wiley และคณะ (68) Creten และคณะ (71) ที่พบว่า เมื่อใช้ probe tone frequency ใกล้เคียงกับ resonance frequency ของ middle ear ในการทดสอบ tympanometry จะทำให้รูปร่างของ typanogram เป็นได้ทั้ง single-peaked typanogram และ notched typanogram ดังตารางที่ 15 หน้า 124-125

การใช้ probe tone frequency มากกว่า 226 Hz ในการทดสอบ tympanometry แล้วพบ notched typanogram นั้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ reactance component (X) ตามความถี่ของเสียงที่มากระดับโดยมีการเปลี่ยนแปลงจากค่าลบ ( $-X_C$ ) เป็นค่าบวก ( $X_M$ ) เมื่อเพิ่มความถี่ของเสียงที่มากระดับในขณะที่ค่าของ resistance component (R) ไม่มีการเปลี่ยนแปลง (2, 4, 35, 36, 40, 41, 43, 44) ความสัมพันธ์ระหว่าง reactance (X) ที่มีการเปลี่ยนแปลงจากค่าลบเป็นค่าบวกเมื่อเพิ่มความถี่ของเสียงที่มากระดับและ resistance (R) มีผลให้เกิด notched typanogram (61) นอกจากนี้การทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency ใกล้กับ resonance frequency ของ middle ear มากๆมีโอกาที่จะเกิด notched typanogram ได้มาก (2, 3, 4, 55) สำหรับค่า resonance frequency ของ middle ear นั้น Shanks และ Shelton (7) Lilly (11, 53) พบว่าอยู่ในช่วง 750-900 Hz จากการศึกษาครั้งนี้ใช้ probe tone frequency 630 Hz ซึ่งเป็นความถี่ที่ใกล้กับ resonance frequency ของ middle ear ดังนั้นจึงพบ notched typanogram ได้

## 2. amplitude ของ tympanogram

### 2.1 amplitude ของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของ amplitude ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz มีค่าเท่ากับ  $2.13 \pm 0.91$ ,  $1.54 \pm 0.61$  และ  $1.74 \pm 0.98$  mmhos ตามลำดับ พิสัยเท่ากับ 0.80–5.8, 0.08–3.3 และ 0.4–5.28 mmhos ตามลำดับ

### 2.2 amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz เปรียบเทียบกับ 630 Hz

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ( $\bar{x} = 0.72$  mmhos) มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ( $\bar{x} = 2.13$  mmhos) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.000$ ) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Wilson และคณะ (64) Wiley และคณะ (68) Himmelfarb และคณะ (69) Feldman และ Syracuse (70) Beattie และ Leamy (76) และ Porter (90) ดังตารางที่ 16 หน้า 126–127 ทั้งนี้เนื่องจาก probe tone frequency 630 Hz มีค่าใกล้เคียงกับ resonance frequency ของ middle ear ซึ่งมีค่าประมาณ 750–900 Hz (7, 11, 53) มากกว่า probe tone frequency 226 Hz จึงมีผลให้ได้ค่าของ amplitude ของ tympanogram มากกว่า (64, 68, 69, 70, 76, 90, 94) การใช้ probe tone frequency สูงขึ้นจนมีค่าใกล้เคียงกับ resonance frequency ของ middle ear ในการทดสอบ tympanometry แล้วพบว่า amplitude ของ tympanogram มีค่ามากขึ้นนั้นเนื่องจากที่ความถี่สูงขึ้น reactance ของ middle ear มีค่าลดลงในขณะที่ค่า resistance ค่อนข้างคงที่ (28, 44) ดังนั้น middle ear จึงมีแรงต้านการส่งต่อพลังงานน้อยลง amplitude ของ tympanogram จึงมีค่ามากขึ้น

### 2.3 amplitude ของ tympanogram ในเพศชายเปรียบเทียบกับเพศหญิง

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y, G tympanogram ในเพศชาย ( $\bar{x} = 2.38$  และ  $2.14$  mmhos ตามลำดับ) มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude

ของ Y, G tympanogram ในเพศหญิง ( $\bar{x}$ = 1.88 และ 1.35 mmhos ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.002$  และ  $p=0.00$  ตามลำดับ) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hall (18) Margolis และ Heller (66) Osterhammel และ Osterhammel (86) Jerger และคณะ (89) Brooks (95) ที่ศึกษาพบว่า amplitude ของ tympanogram ในเพศชายมีค่ามากกว่าเพศหญิง ทั้งนี้เนื่องจากเพศชายมีขนาดของโครงสร้างร่างกาย ear canal, tympanic membrane และ middle ear cavity ใหญ่กว่าเพศหญิงจึงมี acoustic admittance ของ middle ear มากกว่าหรือมี acoustic impedance น้อยกว่า (26, 27, 75, 94, 95) นอกจากนี้การศึกษาค้างนี้ใช้การเปลี่ยนแปลง pressure 125 daPa/second ซึ่งจัดเป็น slow rate จึงมีผลให้ amplitude ของ tympanogram ในเพศชายแตกต่างจากเพศหญิง ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Margolis และ Heller (66) ที่พบว่า amplitude ของ Y tympanogram ในเพศชายมีค่าแตกต่างจากเพศหญิงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อใช้ rate 200 daPa/second แต่เมื่อใช้ rate 400 daPa/second ค่า amplitude ของ Y tympanogram ในเพศชายไม่แตกต่างจากเพศหญิง เขาจึงแนะนำให้ใช้ fast rate ในการทดสอบ tympanometry เพื่อลดความแตกต่างของ amplitude ของ Y tympanogram ในเพศชายและเพศหญิง

ส่วนค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ B tympanogram ในเพศชาย ( $\bar{x}$ = 1.61 mmhos) และเพศหญิง ( $\bar{x}$ = 1.47 mmhos) พบว่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.027$ )

### 3. tympanometric peak pressure (TPP)

#### 3.1 ค่า TPP เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz

ผลการศึกษาค้างนี้พบว่าเมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz TPP ของ Y, B, G tympanogram อยู่ที่ positive pressure ทั้งหมดซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 44.58, 45.66 และ 36 daPa ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Hall และ Chandler (1) Ostergard และ Carter (65) Wiley และคณะ (68) Himmelfarb และคณะ (69) Beatti และ Leamy (76) Shanks และ Wilson (79) ดังตารางที่ 17 หน้า 128 ที่พบว่า มีแนวโน้มที่จะพบ TPP ที่ positive pressure ทั้งนี้เนื่องจากภายใน middle ear cavity มีการแลกเปลี่ยนก๊าซอยู่ตลอดเวลา โดยมีการแพร่กระจายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) จากเส้นเลือดที่ mucous membrane เข้าสู่ middle ear cavity และดูดซึมก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) จาก middle ear cavity เข้าสู่เส้นเลือด ซึ่งการแพร่กระจายก๊าซ  $CO_2$  จากเส้นเลือดที่ mucous membrane เข้าสู่ middle ear cavity มีอิทธิพลต่อ

pressure ใน middle ear มากกว่าการดูดซึ่มก๊าซ  $O_2$  จาก middle ear cavity เข้าสู่เส้นเลือด ดังนั้นจึงพบว่า pressure ใน middle ear cavity เป็น positive pressure (23, 24, 25) นอกจากนี้การศึกษาค้างนี้ใช้การเปลี่ยนแปลง pressure ใน ear canal ชนิด ascending direction ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลง pressure จาก positive pressure เป็น negative pressure จึงมีแนวโน้มที่จะพบ TPP ที่ positive pressure ได้ (1, 3, 60, 68, 72, 79)

### 3.2 ค่า TPP เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz เปรียบเทียบกับ 226 Hz

ผลการศึกษาค้างนี้พบว่าค่าเฉลี่ยของ TPP เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ( $\bar{x}$  = 44.58 daPa) มีค่าต่างจากค่าเฉลี่ยของ TPP เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ( $\bar{x}$  = 40.98 daPa) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.000$ ) ผลการศึกษาค้างนี้สอดคล้องกับการศึกษาของ Van Camp และคณะ (3) Decraemer และคณะ (60) Shanks และ Wilson (79) ที่ศึกษาพบว่า การทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency ต่างกันมีผลให้เกิด TPP ที่ตำแหน่งต่างกันทั้งนี้ เนื่องจากคุณสมบัติ viscoelastic ของ tympanic membrane และ soft tissue ใน middle ear ที่ไม่สามารถตอบสนองต่อสิ่งที่มากระตุ้นได้ทันที

### 3.3 ค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630Hz ในเพศชาย เปรียบเทียบกับเพศหญิง

ผลการศึกษาค้างนี้พบว่า เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y, B, G tympanogram ในเพศชาย ( $\bar{x}$  = 47.42, 48.79 และ 39.08 daPa ตามลำดับ) มีค่าต่างจากเพศหญิง ( $\bar{x}$  = 41.45, 42.54 และ 32.92 daPa ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.004$   $p=0.008$   $p=0.001$ ) ทั้งนี้เนื่องจาก pressure ใน middle ear มีการเปลี่ยนแปลงเป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับปริมาตรของ mucosa ใน middle ear cavity (96) ดังนั้นเพศชายซึ่งมีกระโหลกศีรษะและขนาดของ middle ear cavity ใหญ่กว่าเพศหญิงจึงอาจมีปริมาตรของ mucosa ใน middle ear cavity ต่างกันมีผลให้ middle ear pressure ในเพศชายต่างจากเพศหญิงได้

### สรุปผลการศึกษา

1. รูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในคนที่มีการได้ยินปกติ นั้น มีลักษณะเป็นทั้ง single-peaked และ notched tympanogram โดยถ้าแสดงในรูปของ polar notation จะเป็น single-peaked tympanogram (1Y) 98.4% และเป็น notched tympanogram (3Y) 1.6% ถ้าแสดงในรูปของ rectangular notation จะเป็น single-peaked tympanogram (1B1G) 89.2% และเป็น notched tympanogram 10.8% (3B1G 10% 3B3G 0.8%)

2. amplitude ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz มีค่าเฉลี่ยและ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ  $2.13 \pm 0.91$ ,  $1.54 \pm 0.61$ ,  $1.74 \pm 0.98$  mmhos ตามลำดับ

3. เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz พบว่า ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ( $\bar{x} = 2.13 \pm 0.91$  mmhos) มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ( $\bar{x} = 0.72 \pm 0.25$  mmhos) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p = 0.000$ )

4. เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในเพศชายและเพศหญิง พบว่า ค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ Y, G tympanogram ในเพศชาย ( $\bar{x} = 2.38 \pm 0.92$  และ  $2.14 \pm 1.07$  mmhos) มีค่ามากกว่าเพศหญิง ( $\bar{x} = 1.88 \pm 0.83$  และ  $1.35 \pm 0.69$  mmhos) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p = 0.002$   $p = 0.000$  ตามลำดับ)

ส่วนค่าเฉลี่ยของ amplitude ของ B tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในเพศชาย ( $\bar{x} = 1.61 \pm 0.62$  mmhos) ไม่แตกต่างจากเพศหญิง ( $\bar{x} = 1.47 \pm 0.60$  mmhos) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p = 0.207$ )

5. TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz มีค่าอยู่ที่ positive pressure ทั้งหมด โดยมีค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ  $44.58 \pm 10.79$ ,  $45.66 \pm 12.97$  และ  $36 \pm 10.29$  daPa ตามลำดับ

6. เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 และ 630 Hz พบว่า ค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y tympanogram มีค่าอยู่ที่ positive pressure ทั้ง 2 ความถี่ โดยที่ค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ( $\bar{x} = 44.58 \pm 10.79$

daPa) มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ( $\bar{x}=40.94\pm 10.71$  daPa) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.000$ )

7. เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในเพศชายและเพศหญิง พบว่า ค่าเฉลี่ยของ TPP ของ Y, B, G tympanogram ในเพศชาย ( $\bar{x}=47.42\pm 9.66$ ,  $48.79\pm 11.58$  และ  $39.08\pm 8.05$  daPa ตามลำดับ) มีค่ามากกว่าเพศหญิง ( $\bar{x}=41.75\pm 11.18$ ,  $42.54\pm 13.63$  และ  $32.92\pm 11.37$  daPa ตามลำดับ) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p=0.00$   $p=0.008$   $p=0.001$  ตามลำดับ)

### ประโยชน์ที่ได้จากการศึกษา

1. นำผลการศึกษาไปใช้เป็นค่ามาตรฐานในการพิจารณา tympanogram ของผู้ป่วย เพื่อวินิจฉัยการมีพยาธิสภาพใน middle ear โดยเฉพาะในรายที่สงสัยว่ามีพยาธิสภาพที่ ossicular chain
2. นำไปใช้ในการติดตามประเมินผลการรักษา
3. กระตุ้นให้มีการศึกษาต่อไปในเรื่องของการทดสอบ tympanometry เนื่องจากมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการทดสอบ

### การนำไปใช้ในทางปฏิบัติ

1. เนื่องจาก tympanometry จะ sensitive ต่อ lateralmost lesion ดังนั้นถ้ามีความผิดปกติของ tympanic membrane ร่วมกับการมีพยาธิสภาพใน middle ear ผลของ tympanometry ก็จะแสดงถึงความผิดปกติของ tympanic membrane เพียงอย่างเดียวซึ่งอาจทำให้วินิจฉัยผิดพลาดได้
2. มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการทดสอบ tympanometry ดังนั้นในการนำข้อมูลไปใช้ควรจะพิจารณาตัวแปรเหล่านั้นด้วย

### ข้อเสนอแนะในการศึกษาครั้งต่อไป

1. ควรมีการศึกษา tympanometry ในแต่ละกลุ่มอายุเนื่องจากอายุมีผลต่อการทดสอบ tympanometry การมีข้อมูลพื้นฐานของ tympanogram ในแต่ละกลุ่มอายุโดยเฉพาะในเด็กจะช่วยวินิจฉัยพยาธิสภาพของ middle ear ได้มากขึ้น นอกจากนี้ tympanometry เป็นการทดสอบที่อาศัยความร่วมมือจากคนใช้น้อยกว่า pure tone audiometry ซึ่งมีประโยชน์มากในการทดสอบเด็ก
2. อาจทำการศึกษาโดยใช้ probe tone frequency มากกว่า 630 Hz เพื่อหาค่า resonance frequency ของ middle ear ในคนไทย ซึ่งจะช่วยในการวินิจฉัยการมีพยาธิสภาพของ middle ear ได้มากขึ้น
3. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับระยะระหว่าง outermost extrema ของ notched tympanogram แต่ละชนิดในกลุ่มคนปกติเพื่อช่วยในการวินิจฉัยให้ถูกต้องมากขึ้น
4. ควรทำการศึกษาในเรื่องของ phase angle tympanogram เพิ่มเติม
5. ควรมีการศึกษาเกี่ยวกับการทดสอบ tympanometry โดยใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มคนที่มีพยาธิสภาพของ middle ear ชนิดต่างๆ

### บรรณานุกรม

1. Hall JW, Chandler D. Tympanometry in clinical audiology. In: Handbook of clinical audiology. Edited by Katz J. third edition. Baltimore : Williams & Wilkins, 1994: 283-299.
2. Feldman AS. Acoustic impedance-admittance measurement. In: Physiological measures of the audio-vestibular system. Edited by Bradford LJ. USA : Academic press. Inc, 1975: 87-130.
3. Van Camp KJ et al. Principles of tympanometry. ASHA monograph 1986; 24: 1-83.
4. Feldman AS, Wilber LA. Acoustic impedance and admittance : the measurement of middle ear function. Edited by Feldman AS, Wilber LA. Baltimore : Williams & Wilkins, 1976.
5. Margolis RH, Shanks JE. Tympanometry. In: Handbook of clinical audiology. Edited by Katz J. third edition. Baltimore : Williams & Wilkins, 1985: 438-475.
6. Liden G et al. Tympanometry. Arch Otolaryngology 1970; 92: 248-257.
7. Shanks JE, Shelton C. Basic principles and clinical application of tympanometry. Otolaryngologic Clinic of North America 1991; 24: 299-327.
8. Shanks JE et al. Tutorial in tympanometry. ASHA 1988; 53: 354-377.
9. Liden G et al. Tympanometry for the diagnosis of ossicular disruption. Archive Otolaryngology 1974; 99: 23-29.
10. Liden G et al. Tympanometry and acoustic impedance. Acta Otolaryngol 1977; 83: 140-145.
11. Lilly DJ. Multiple frequency, multiple component tympanometry : new approaches to an old diagnosis problem. Ear and Hearing 1984; 5: 300-308.
12. Jerger J. Clinical experience with impedance audiometry. Archive Otolaryngology 1970; 92: 311-324.
13. Jerger J et al. Studies in impedance audiometry : middle ear disorders. Archive Otolaryngology 1974; 99: 165-171.
14. พงษ์เทพ หาญชุมพล, สมศรี จิระพงษ์. ลักษณะการได้ยินในผู้ป่วยไอตัสเคลอโรซิส. วิทยาสาร-เสนารักษ์ 2527; 4: 199-211.

15. Beery QC et al. Tympanometric pattern classification in relation to middle ear effusion. *Annal Otolology* 1975; 84: 56-64.
16. Van de Heyning et al. Incudo-stapedial joint pathology : a tympanometric approach. *Journal of Speech and Hearing Research* 1982; 25: 611-618.
17. Shone OR, Mofiat DA. Oto-admittance measurements in diagnosis of otosclerosis. *Journal of Laryngology and Otolology* 1986; 100: 149-154.
18. Hall JW. Contemporary tympanometry. *Seminar in Hearing* 1987; 8: 319-327.
19. Dene PB, Pinson EN. The physics of sound. In: *The speech chain*. Edited by Dene PB, Pinson EN. New York : Bell telephone laboratories, 1963: 14-38, 67-70.
20. Lipscomb DV. Mechanism of the middle ear. In: *Hearing disorders*. Edited by Nortem TL. USA : Little, Brown and Company Inc, 1976: 78-88.
21. Liston SL, Duvall AJ. Embryology, anatomy and physiology of the ear. In: *Boies fundamentals of otolaryngology*. Edited by Adams GL, Boies LC and Hilger PA. England : WB Saunders company, 1989: 31-59.
22. Gelfand SA. *Hearing : An introduction to psychological and physiological acoustics*. Edited by Gelfand SA. second edition. New York : Marcel dekker Inc, 1990: 47-55, 101-113.
23. Hergils L, Magnuson B. Morning pressure in the middle ear. *Arch Otolaryngology* 1985; 111: 86-89.
24. Hergils L, Magnuson B. Middle ear pressure under basal condition. *Arch Otolology Head Neck Surgery* 1987; 113: 829-832.
25. Tideholm B et al. Continuous 24-hour measurement of middle ear pressure. *Acta Otolaryngol (stockh)* 1996; 116: 581-588.
26. Bluestone CD. Physiology of the middle ear and eustachian tube. In: *Otolaryngology volume 1*. Edited by Paparella MM. third edition. USA : Saunders company, 1991:163-195.
27. Ballantyne D. Impedance audiometry. In: *Handbook of audiological technique*. Edited by Ballantyne D. England : Butterworth- Heinemann Ltd, 1990: 115-127.
28. Glattké TJ. Anatomy and physiology of middle ear. In: *Medical audiology disorder of hearing*. Edited by Martin FN. New Jersey : Prentice- Hall Inc, 1981: 87-108.

29. Zemlin WR. Speech and hearing science : Anatomy and physiology. Edited by Zemlin WR. New Jersey : Prentice- Hall Inc, 1968: 388-395.
30. Pickles JO. Physiology of the ear. In: Scott- Brown's otolaryngology : Basic science. third edition. Edited by Kerr AG. USA : Butterworth Co Ltd, 1987: 54-61.
31. Littler TS. The physics of the ear. Edited by Littler TS. England : Pergamon press Ltd, 1965: 22-34.
32. Lamb LE, Norris TW. Acoustic impedance measurement. In: Audiometry for the retarded with implication for the difficult-to-test. Edited by Fultun RT and Lloyd LL. Baltimore : Williams & Wilkins, 1969: 167-178.
33. Yost WA. Fundamental of hearings : an introduction. Edited by Yost WA. third edition. USA : Academic press Inc, 1994: 68-72.
34. Zemlin WR. Speech and hearing science : Anatomy and physiology. Edited by Zemlin WR. New Jersey : Prentice-Hall Inc, 1981: 532-577.
35. Bess FH, Humes LE. The nature of sound. In: Audiology : the fundamentals. Baltimore : Williams & Wilkins, 1990: 18-45.
36. Shanks JE. Tympanometry. Ear and Hearing 1984; 5: 268-279.
37. Margolis RH, Shanks JE. Tympanometry : Basic principle and clinical application. In: Hearing assessment. Edited by Rintelmann WF. second edition. USA : PRU-ED Inc, 1991: 179-246.
38. Block MG, Wiley TL. Overview and basic principles of acoustic immittance. In: Handbook of clinical audiology. Edited by Katz J. fourth edition. Baltimore : Williams & Wilkins, 1994: 271-281.
39. Relkin EM. Introduction to the analysis of middle ear function. In: Physiology of the ear. Edited by Jahn AF and Sacchi JS. New york : Raven Press, 1988: 103-122.
40. Cudahy EA. Introduction to instrumentation in speech and hearing. Edited by Cudahy EA. Baltimore : Williams & Wilkins, 1988: 141-146.

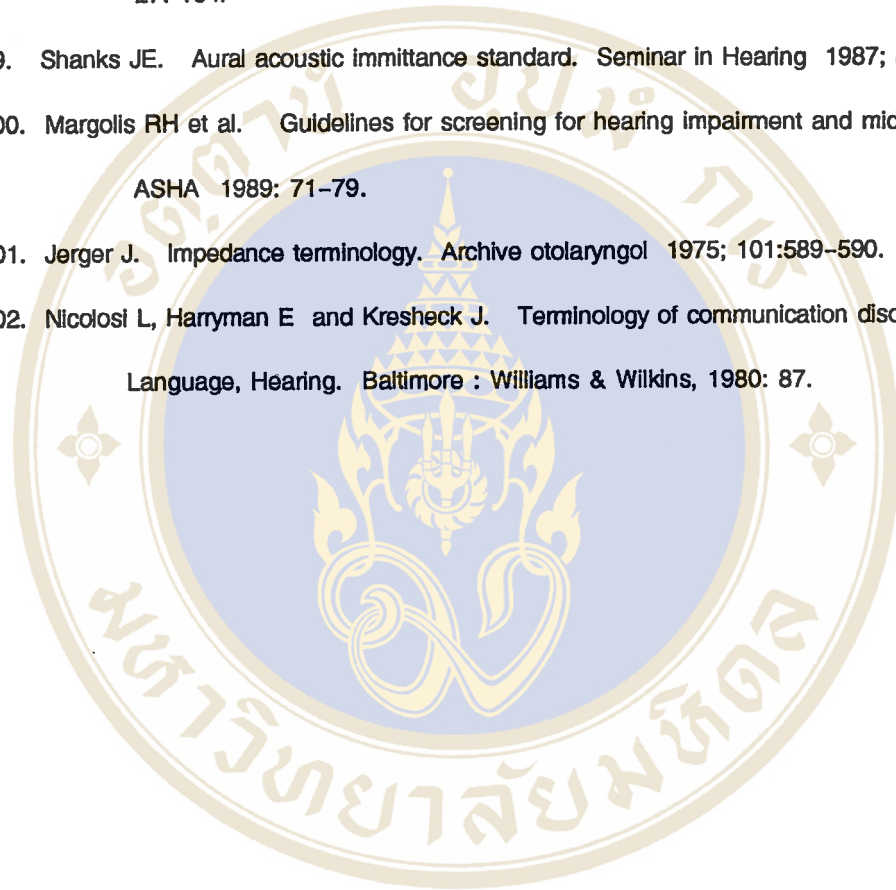
41. Huges LF, Berlin CI. Physic of sound and the decibel. In: Hearing disorders. Edited by Northern JL. USA : Little, Brown and Company Inc, 1976: 69-77.
42. Margolis RH et al. Multifrequency tympanometry in normal ears. *Audiology* 1985; 24: 44-53.
43. Zwislocki JI. Normal function of the middle ear and its measurement. *Audiology* 1982; 21: 4-14.
44. Burke KS et al. Middle ear impedance measurement. *Journal of Speech and Hearing Research* 1970; 13: 317-325.
45. Sander JW. Impedance measurement. *Otological of North America* 1975; 8: 109-124.
46. Rosenblum EH. Acoustic impedance and tympanometry. In: Fundamentals of hearing for health professionals. Edited by Rosenblum EH. USA : Little, Brown and Company Inc, 1979: 119-124.
47. Northern JL. Impedance audiometry. In: Hearing disorder. Edited by Northern JL. second edition. USA : Little, Brown and Company Inc, 1984: 41-45.
48. Colletti V. Methodologic observations on tympanometry with regard to the probe tone frequency. *Acta Otolaryngologica* 1975; 80: 54-60.
49. Colletti V. Tympanometry from 200-2000 Hz probe tone. *Audiology* 1976; 15: 106-119.
50. Colletti V. Multifrequency tympanometry. *Audiology* 1977; 16: 278-287.
51. Alberti PW, Jerger JF. Probe-tone frequency and the diagnosis value of tympanometry. *Archive Laryngology* 1974; 99: 206-210.
52. Wiley TL, Block VG. Tutorial : static acoustic-immittance measurements. *Journal of Speech and Hearing Research* 1979; 22: 677-696.
53. Lilly DJ. Measurement of acoustic impedance at the tympanic membrane. In: Modern developments in audiology. second edition. Edited by Jerger J. USA : Academic Press, 1973: 345-406.
54. Hunter LL, Margolis RH. Multifrequency tympanometry : current clinical application. *American Journal Audiology* 1992; 3: 33-43.
55. Van Camp KJ. A search for the most suitable immittance components and probe tone frequency in tympanometry. *Scandinavian Audiology* 1983; 12: 27-34.

56. Valvik BR, Johnsen M and Laukki E. Multifrequency tympanometry : preliminary experiences with a commercially available middle-ear analyzer. *Audiology* 1994; 33: 245-253.
57. Lilly DJ. Acoustic impedance at tympanic membrane. In: *Handbook of clinical audiology*. Edited by Katz J. Baltimore : The Williams & Wilkins , 1972: 434-469.
58. Lutman ME. Diagnostic Audiometry. In: *Scott-Brown's Otolaryngology*. fourth edition. Edited by Kerr AG. UK : Butterworth international edition, 1987: 253-256.
59. Northern JL. Impedance screening: An integral part of hearing screening. *Ann Oto Rhino and Laryngol* 1980; 85(supp.68): 233-235.
60. Decraemer WF, Creten WL and Van camp KJ. Tympanometric middle ear pressure determination with two-component admittance meters. *Scandinavian Audiology* 1984; 13: 165-172
61. Vanhuysse VJ, Creten WI and Van camp KJ. On the W-notching of tympanograms. *Scandinavian Audiology* 1975; 4: 45-50.
62. Creten WL, Vanpeperstraete PM and Van camp KJ. Impedance and admittance tympanometry : experimental approach. *Audiology* 1978; 17: 97-107.
63. Van Camp KJ et al. Impedance and admittance tympanometry : mathematical approach. *Audiology* 1978; 17: 108-119.
64. Wilson RH, Shanks JE and Kaplan SK. Tympanometric changes at 226 Hz and 678 Hz across 10 trials and for two directions of ear canal pressure change. *Journal of Speech and Hearing Research* 1984; 27: 257-266.
65. Ostergard CA, Carter DR. Positive middle ear pressure shown by tympanometry. *Archive Otolaryngology* 1981; 107: 353-356.
66. Margolis RH, Heller JW. Screening tympanometry : criteria for medical referral. *Audiology* 1987; 26: 197-208.
67. Margolis RH, Popelka GR. Interaction among tympanometric variables. *Journal of Speech and Hearing Research* 1977; 20: 447-461.
68. Wiley TL, Oviatt DL and Block MG. Acoustic- immittance measures in normal ears. *Journal of Speech and Hearing Research* 1987; 30: 161-170.

69. Himmelfarb MZ, Lessing and Shanon E. Otoadmittance in normal subjects. *Laryngoscope* 1977; 87: 1125-1129.
70. Feldman AS, Syracuse NY. Eardrum abnormality and the measurement of middle ear function. *Archive Otolaryngology* 1974; 99: 211-217.
71. Creten WL, Van de Heyning PH and Van Camp KJ. Immittance audiometry : normative data at 220 and 660 Hz. *Scandinavian Audiology* 1985; 14: 115-121.
72. Margolis RH, Goycoolea HG. Multifrequency tympanometry in normal adults. *Ear and hearing* 1993; 14: 408-413.
73. Chesnuit B et al. Otoadmittance measurements in cases of dual ossicular disorder. *Archive Otolaryngology* 1975; 101: 109-113.
74. Feldman AS. Tympanometry : application and interpretation. *Ann Oto Rhino Laryngology* 1976; 85: 202-208.
75. Roberto M, Zito F. Acoustic admittance measurements in human temporal bones. *Audiology* 1983; 22: 438-450.
76. Beattie RC, Leamy DP. Otoadmittance : normative values, procedural variables and reliability. *Journal of the American Auditory Society* 1975; 1: 21-27.
77. Beery QC et al. Tympanometric pattern classification in relation to middle ear effusions. *Annual Otolaryngology* 1975; 84: 56-64.
78. Osguthorpe JD, Lam C. Methodologic aspects of tympanometry in cats. *Otology Head Neck Surgery* 1981; 89: 1037-1040.
79. Shanks JE, Wilson RH. Effects of direction and rate of ear canal pressure change on tympanometric measures. *Journal of Speech and Hearing Research* 1986; 29: 11-19.
80. Margolis RH, Smith P. Tympanometry asymmetry. *Journal of Speech and Hearing* 1977; 20: 437-446.
81. Kobayashi T, Okitsu T and Takasaka T. Forward-backward tracing tympanometry. *Acta Otolaryngology (stock) supplement* 1987; 435: 100-106.
82. Koebseil KA, Margolis RH. Tympanometric gradient measured for normal preschool children. *Audiology* 1986; 25: 149-157.

83. Feldman RM et al. Effect of rate of air pressure change on tympanometry. *Ear and Hearing* 1984; 5: 91-95.
84. Shanks JE, Wilson RH and Cambron NK. Multiple frequency tympanometry : effects of ear canal volume compensation on static acoustic admittance and estimates of middle ear resonance. *Journal of Speech and Hearing Research* 1993; 36: 178-185.
85. Shanks JE, Lilly DJ. An evaluation of tympanometric estimates of ear canal volume. *Journal of Speech and Hearing Research* 1981; 24: 557-566.
86. Osterhammel D, Osterhammel P. Age and sex variations for the normal stapedial reflex thresholds and tympanometric compliance values. *Scandinavian Audiology* 1979; 8: 153-158.
87. Thompson DJ et al. Acoustic admittance and the aging ear. *Journal of Speech and Hearing Research* 1979; 22: 29-36.
88. Hall JW. Effect of age and sex on static compliance. *Archive Otolaryngology* 1979; 105: 153-156.
89. Jerger J, Jerger S and Mauldin L. Studies in impedance audiometry : normal and sensorineural ear. *Archive Otolaryngology* 1972; 96: 513-523.
90. Porter TA. Normative otoadmittance values for three populations. *Journal of Auditory Research* 1972; 12: 53-58.
91. Himmelfarb MZ, Popelka GR and Shanon E. Tympanometry in normal neonates. *Journal of Speech and Hearing Research* 1979; 22: 179-191.
92. Sprague BH, Wiley TL and Goldstein R. Tympanometric and acoustic-reflex studies in neonates. *Journal of Speech and Hearing Research* 1985; 28: 265-272.
93. Holte L, Cavanaugh RM and Margolis RH. Ear canal wall mobility and tympanometric shape in young infant. *Journal of Pediatric* 1990; 117: 77-80.
94. Holte L, Margolis RH and Cavanaugh RM. Developmental changes in multifrequency tympanograms. *Audiology* 1991; 30: 1-24.
95. Brooks DN. Tympanometry : between ear symmetry and normative values. *Journal of the American Auditory Society* 1979; 5: 112-117.

96. Macrae JH. Body inversion and the acoustic immittance of the ear. *Journal of Speech and Hearing Research* 1974; 17: 310-320.
97. Daniel HJ et al. Body position and acoustic admittance. *Ear and Hearing* 1985; 6: 76-79.
98. de Jonge Robert, Cumming DW. Daily fluctuation in middle ear pressure. *ASHA* 1985; 27: 164.
99. Shanks JE. Aural acoustic immittance standard. *Seminar in Hearing* 1987; 8: 307-318.
100. Margolis RH et al. Guidelines for screening for hearing impairment and middle ear disorder. *ASHA* 1989: 71-79.
101. Jerger J. Impedance terminology. *Archive otolaryngol* 1975; 101:589-590.
102. Nicolosi L, Harryman E and Kresheck J. Terminology of communication disorder : Speech, Language, Hearing. Baltimore : Williams & Wilkins, 1980: 87.



## ภาคผนวก ก

ตารางที่ 11 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศชาย

ลำดับที่	อายุ (ปี)	ค่า amplitude (mmhos)			ค่า TPP (daPa)		
		Y	B	G	Y	B	G
ช 1	24	30.00	0.50	3.80	50.0	40.0	37.5
		2.85	0.65	4.55	50.0	40.0	37.5
ช 2	25	1.90	1.50	1.75	40.0	37.5	37.5
		2.25	1.60	2.55	40.0	35.0	22.5
ช 3	24	1.50	1.30	1.20	40.0	55.0	40.0
		1.55	1.45	1.05	50.0	52.5	37.5
ช 4	21	2.55	2.00	2.10	40.0	55.0	37.5
		3.00	2.30	3.10	45.0	50.0	40.0
ช 5	26	2.65	1.85	2.80	40.0	52.5	37.5
		3.20	2.50	2.80	50.0	50.0	32.5
ช 6	23	1.70	1.50	1.00	32.5	40.0	22.5
		1.35	1.30	0.85	32.5	40.0	20.0
ช 7	20	1.75	1.50	1.55	70.0	65.0	50.0
		1.60	1.30	1.40	50.0	60.0	40.0
ช 8	27	2.30	1.75	2.50	65.0	65.0	50.0
		2.45	1.90	2.25	65.0	67.2	50.0
ช 9	24	1.90	1.65	1.20	40.0	40.0	40.0
		3.00	2.05	3.35	40.0	55.0	40.0
ช 10	25	1.70	1.55	1.25	50.0	55.0	37.5
		2.40	1.80	2.20	50.0	50.0	50.0
ช 11	23	2.40	1.80	2.20	37.5	40.0	40.0
		3.10	0.50	3.10	37.5	25.0	37.5
ช 12	22	1.50	1.35	1.15	55.0	52.5	37.5
		2.40	2.10	2.10	50.0	55.0	40.0
ช 13	23	2.10	1.80	1.80	42.5	50.0	40.0
		2.30	2.10	2.05	70.0	75.0	50.0

ตารางที่ 11 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศชาย (ต่อ)

ลำดับที่	อายุ (ปี)	ค่า amplitude (mmhos)			ค่า TPP (daPa)		
		Y	B	G	Y	B	G
ช 14	25	2.70	2.30	2.45	40.0	55.0	47.5
		3.10	2.50	2.50	65.0	67.5	50.0
ช 15	22	3.20	2.80	2.95	55.0	57.5	37.5
		3.30	2.55	2.70	37.5	40.0	40.0
ช 16	25	1.65	1.40	1.40	52.5	52.5	40.0
		1.95	1.55	1.75	50.0	52.5	37.5
ช 17	24	2.70	2.08	2.05	40.0	37.5	37.5
		2.50	2.00	2.50	37.5	50.0	37.5
ช 18	21	2.00	1.80	1.20	52.5	55.0	50.0
		2.65	1.95	2.35	37.5	37.5	37.5
ช 19	26	1.45	1.30	0.95	67.5	70.0	37.5
		1.80	1.50	1.40	40.0	45.0	40.0
ช 20	23	1.75	1.35	1.55	52.5	65.0	35.0
		1.60	1.40	1.00	45.0	50.0	40.0
ช 21	26	2.20	2.00	1.40	52.5	52.5	50.0
		1.65	1.50	1.00	50.0	52.5	37.5
ช 22	21	4.00	2.60	3.60	67.5	65.0	65.0
		3.30	2.30	2.85	37.5	40.0	40.0
ช 23	20	5.15	0.18	5.28	50.0	45.0	50.0
		5.35	0.08	5.28	50.0	40.0	50.0
ช 24	23	1.00	0.40	2.95	52.5	52.5	37.5
		3.90	0.60	3.25	37.5	30.0	37.5
ช 25	28	2.20	1.70	2.05	52.5	50.0	37.5
		2.00	1.70	1.45	37.5	40.0	22.5
ช 26	24	1.40	1.10	1.10	40.0	40.0	22.5
		2.15	1.30	2.30	37.5	37.5	37.5
ช 27	28	4.65	1.10	4.40	37.5	10.0	37.5
		3.25	2.40	2.75	37.5	37.5	37.5
ช 28	26	1.65	1.40	1.30	52.5	55.0	37.5
		1.10	0.95	0.90	40.0	40.0	35.0

ตารางที่ 11 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศชาย (ต่อ)

ลำดับที่	อายุ (ปี)	ค่า amplitude (mmhos)			ค่า TPP (daPa)		
		Y	B	G	Y	B	G
ช 29	21	2.30	2.20	1.35	55.0	57.5	37.5
		1.80	2.70	1.05	40.0	40.0	22.5
ช 30	26	1.40	1.20	1.25	57.4	50.0	37.5
		1.45	1.20	0.80	42.5	55.0	40.0



ตารางที่ 12 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศหญิง

ลำดับที่	อายุ (ปี)	ค่า amplitude (mmhos)			ค่า TPP (daPa)		
		Y	B	G	Y	B	G
ญ 1	20	1.20	1.15	0.70	45.0	50.0	20.0
		1.60	1.40	1.10	45.0	50.0	40.0
ญ 2	20	3.20	0.60	3.10	22.5	12.5	25.0
		2.70	2.25	2.35	35.0	40.0	20.0
ญ 3	23	2.40	1.95	2.20	40.0	52.5	37.5
		2.35	2.00	2.10	45.0	52.5	37.5
ญ 4	20	1.25	1.10	0.80	40.0	40.0	20.0
		1.32	1.15	1.00	37.5	40.0	22.5
ญ 5	21	1.30	1.20	0.75	40.0	37.5	37.5
		1.10	1.00	0.80	37.5	40.0	25.0
ญ 6	20	1.50	1.30	1.10	52.5	50.0	50.0
		1.20	1.10	0.80	50.0	52.5	27.5
ญ 7	26	2.80	2.10	2.30	40.0	40.0	22.5
		2.45	2.05	1.60	50.0	50.0	50.0
ญ 8	26	2.10	1.85	1.20	40.0	40.0	37.5
		2.00	1.85	1.30	40.0	42.5	20.0
ญ 9	26	2.65	0.15	3.50	55.0	25.0	32.5
		2.10	1.90	1.80	50.0	52.5	37.5
ญ 10	28	1.40	1.15	1.20	37.5	52.5	37.5
		2.20	1.80	1.85	37.5	40.0	40.0
ญ 11	20	2.15	2.00	1.50	70.0	70.0	50.0
		2.00	1.90	1.20	50.0	55.0	37.5
ญ 12	20	1.80	1.55	1.40	40.0	40.0	40.0
		2.20	1.80	1.60	37.5	40.0	40.0
ญ 13	20	1.35	1.25	0.75	50.0	52.5	37.5
		1.45	1.30	0.85	37.5	40.0	35.0
ญ 14	28	2.10	1.70	1.70	50.0	70.0	50.0
		2.00	0.40	2.55	50.0	40.0	37.5
ญ 15	24	2.30	1.90	1.80	40.0	40.0	22.5
		1.90	1.65	1.20	22.5	22.5	22.5

ตารางที่ 12 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศหญิง (ต่อ)

ลำดับที่	อายุ (ปี)	ค่า amplitude (mmhos)			ค่า TPP (daPa)		
		Y	B	G	Y	B	G
ญ 16	29	1.20	1.15	0.50	10.0	7.5	7.5
		1.80	1.60	1.15	22.5	22.5	22.5
ญ 17	22	2.30	1.90	1.75	25.0	25.0	7.5
		1.70	1.50	1.00	50.0	50.0	50.0
ญ 18	21	2.45	2.10	1.90	35.0	40.0	27.5
		2.80	2.50	1.80	40.0	55.0	37.5
ญ 19	20	1.73	1.50	1.20	70.0	67.5	50.0
		1.70	0.90	0.75	50.0	70.0	50.0
ญ 20	23	1.30	1.20	0.95	50.0	52.5	40.0
		2.30	1.80	2.00	50.0	50.0	37.5
ญ 21	25	1.00	0.95	0.40	40.0	40.0	40.0
		1.10	1.05	0.50	35.0	40.0	35.0
ญ 22	23	1.30	1.20	0.80	50.0	55.0	35.0
		1.30	1.25	0.65	30.0	40.0	20.0
ญ 23	21	1.50	1.43	0.75	40.0	40.0	25.0
		1.70	1.60	0.90	50.0	50.0	35.0
ญ 24	21	1.30	1.10	0.90	50.0	50.0	50.0
		1.15	1.00	0.75	65.0	67.5	50.0
ญ 25	22	2.50	2.20	1.80	40.0	37.5	20.0
		3.50	3.00	2.55	37.5	40.0	40.0
ญ 26	30	3.70	3.30	2.40	22.5	10.0	7.5
		2.30	2.00	1.55	37.5	40.0	37.5
ญ 27	27	1.07	1.00	0.55	42.5	42.5	22.5
		1.03	1.00	0.50	37.5	37.5	22.5
ญ 28	23	1.35	1.25	0.55	27.5	22.5	20.0
		1.50	1.35	0.90	37.5	40.0	20.0
ญ 29	24	2.50	0.60	2.00	40.0	25.0	22.5
		0.80	0.10	1.70	37.5	25.0	30.0
ญ 30	23	1.45	1.30	0.85	40.0	40.0	40.0
		1.00	0.90	0.65	40.0	40.0	40.0

## ภาคผนวก ข

ตารางที่ 13 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศชาย

ลำดับที่	ค่า amplitude (mmhos)	ค่า TPP (daPa)	ลำดับที่	ค่า amplitude (mmhos)	ค่า TPP (daPa)
ช 1	1.20	40.0	ช 16	0.59	40.0
	1.35	37.5		0.83	50.0
ช 2	0.86	35.0	ช 17	0.84	40.0
	0.94	22.5		0.94	37.5
ช 3	0.58	37.5	ช 18	0.94	52.5
	0.50	37.5		1.04	40.0
ช 4	0.70	40.0	ช 19	0.50	50.0
	0.84	37.5		0.60	37.5
ช 5	0.80	40.0	ช 20	0.65	52.5
	1.10	50.0		0.50	37.5
ช 6	0.51	32.5	ช 21	0.73	52.5
	0.51	22.5		0.60	40.0
ช 7	0.50	50.0	ช 22	1.40	65.0
	0.55	50.0		0.80	37.5
ช 8	0.88	50.0	ช 23	1.65	40.0
	0.88	65.0		1.55	50.0
ช 9	0.65	37.5	ช 24	1.20	40.0
	0.85	37.5		1.20	37.5
ช 10	0.59	52.5	ช 25	0.78	37.5
	0.74	55.0		0.73	37.5
ช 11	0.63	40.0	ช 26	0.50	25.0
	0.75	40.0		0.75	20.0
ช 12	0.53	50.0	ช 27	1.15	37.5
	0.74	37.5		1.15	37.5
ช 13	0.70	55.0	ช 28	0.64	45.0
	0.78	50.0		0.48	40.0
ช 14	0.79	50.0	ช 29	0.65	55.0
	0.98	65.0		0.53	20.0
ช 15	0.87	50.0	ช 30	0.58	40.0
	1.12	37.5		0.68	50.0

ตารางที่ 14 ข้อมูลดิบแสดงค่า amplitude และค่า TPP ของ Y tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 226 Hz ในกลุ่มตัวอย่างเพศหญิง

ลำดับที่	ค่า amplitude (mmhos)	ค่า TPP (daPa)	ลำดับที่	ค่า amplitude (mmhos)	ค่า TPP (daPa)
ญ 1	0.43	57.5	ญ 16	0.34	25.0
	0.50	50.0		0.46	40.0
ญ 2	1.00	25.0	ญ 17	0.83	22.5
	1.00	25.0		0.55	50.0
ญ 3	0.70	37.5	ญ 18	0.56	40.0
	0.55	37.5		0.73	37.5
ญ 4	0.40	30.0	ญ 19	0.65	37.5
	0.43	37.5		0.55	40.0
ญ 5	0.45	40.0	ญ 20	0.43	50.0
	0.54	40.0		0.37	35.0
ญ 6	0.53	52.5	ญ 21	0.38	25.0
	0.48	40.0		0.48	40.0
ญ 7	0.75	40.0	ญ 22	0.64	50.0
	0.68	50.0		0.48	30.0
ญ 8	0.91	42.5	ญ 23	0.54	50.0
	0.66	32.5		0.58	55.0
ญ 9	0.87	40.0	ญ 24	0.65	52.5
	0.69	37.5		0.53	65.0
ญ 10	0.55	40.0	ญ 25	0.83	40.0
	0.60	37.5		1.05	37.5
ญ 11	0.75	50.0	ญ 26	0.88	10.0
	0.68	50.0		0.63	40.0
ญ 12	0.68	40.0	ญ 27	0.45	22.5
	0.65	40.0		0.39	22.5
ญ 13	0.52	50.0	ญ 28	0.48	22.5
	0.57	37.5		0.61	32.5
ญ 14	1.00	70.0	ญ 29	0.58	37.5
	1.05	50.0		0.98	37.5
ญ 15	0.71	22.5	ญ 30	0.45	42.5
	0.57	22.5		0.38	37.5

## ภาคผนวก ค

ตารางที่ 15 แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency ต่างๆ

ผู้ศึกษา	กลุ่มตัวอย่าง	probe tone frequency (Hz)	pressure direction	rate (daPa/sec)	ผลการศึกษา
Margolis และคณะ (40)	10 คน อายุ 25-41 ปี	220-910	+/-	*	รูปร่างของ BG tympanogram มีการเปลี่ยนแปลงจาก 1B1G, 3B1G, 3B3G ตามลำดับ และพบ Y tympanogram เป็น 3Y เมื่อ BG tympanogram เป็น ชนิด 3B3G
			-/+	*	รูปร่างของ BG tympanogram มีการเปลี่ยนแปลงจาก 1B1G, 3B1G, 3B3G, 5B3G ตามลำดับ และพบ Y tympanogram เป็น 3Y เมื่อ BG tympanogram เป็นชนิด 3B3G, 5B3G
Colletti (46)	20 หู	200-2000	+/-	10	ศึกษา impedance tympanogram ที่ low frequency ได้ V shape ที่ 1100-1300 Hz ได้ W shape ที่ >1300 Hz ได้ A shape
Hunter และ Margolis (52)	*	220-2000	+/-	15	รูปร่างของ BG tympanogram มีการเปลี่ยนแปลงจาก 1B1G, 3B1G, 3B3G, 5B3G ตามลำดับ

\* = ไม่ได้ระบุไว้

ตารางที่ 15 แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับรูปร่างของ tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency ต่างๆ(ต่อ)

ผู้ศึกษา	กลุ่มตัวอย่าง	probe tone frequency (Hz)	pressure direction	rate (daPa/sec)	ผลการศึกษา
Wilson และ คณะ (62)	24 คน อายุเฉลี่ย 25.6 ปี	226, 678	-/+	25	226 Hz ได้ 1Y ทุกคน 678 HZ ได้ 1B1G 13 คน 3B1G 7 คน 3B3G 1คน 5B3G 3 คน
Wiley และ คณะ (66)	หญิง 77 หู ชาย 50 หู อายุ 20-30 ปี	220, 660	-/+	50	220 HZ ได้ 1Y1B1G 100% 660 Hz ได้ 1B1G 75.8% 3B1G 17.4% 3B3G 5.5% 5B3G 1.2%
Creten และ คณะ (69)	หญิง 24 คน ชาย 20 คน อายุ 20-29 ปี	220, 660	*	20	220 HZ ได้ 1B1G 100% 660 Hz ได้ 1B1G 56.8% 3B1G 28.1% 3B3G 6% 5B3G 9.1%
การศึกษา ครั้งนี้	หญิง 60 หู ชาย 60 หู อายุ 20-30 ปี	226, 630	-/+	125	226 Hz ได้ 1Y 100% 630 Hz ได้ 1B1G 89.2% 3B1G 10% 3B3G 0.8% และพบ Y tympanogram เป็น 3Y 0.8, 0.8% เมื่อ BG tympanogram เป็น 3B1G และ 3B3G ตามลำดับ

\* = ไม่ได้ระบุไว้

## ภาคผนวก ง

ตารางที่ 16 แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับค่า amplitude ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz หรือใกล้เคียง

ผู้ศึกษา	กลุ่มตัวอย่าง	probe tone frequency (Hz)	pressure direction	rate (daPa/sec)	ear canal correction	ผลการศึกษา (mmH <sub>2</sub> O/mmhos)
Wilson และคณะ (62)	24 คน อายุเฉลี่ย 25.6 ปี	226 678 (singled-peaked) 678 (notched)	-/+	25	ค่า mmhos ที่ peak - ค่า mmhos ที่ ear canal pressure -300 daPa	Y = 0.67±0.17 Y = 1.86±0.63 B = 1.32±0.39 G = 1.36±0.56 Y = 3.75±1.36 B = 0.32±1.24 G = 3.22±1.29
Wiley และคณะ (66)	253 คน อายุ 20-30 ปี	220 660	-/+	50	ค่า mmhos ที่ peak - ค่า mmhos ที่ ear canal pressure -250 daPa	Y = 0.74±0.29 Y = 3.06±1.72 B = 2.09±1.05 G = 2.24±1.36
Himmelfarb และคณะ(67)	90 คน อายุ 18-30 ปี	220 660	+/-, -/+	*	ค่า mmhos ที่ peak - ค่า mmhos ที่ ear canal pressure -200 mmH <sub>2</sub> O	Y = 0.6±0.3 Y = 2.15±1.02 B = 1.29±0.66 G = 1.65±0.88

\* = ไม่ได้ระบุไว้

ตารางที่ 16 แสดงผลการศึกษาเกี่ยวกับค่า amplitude ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz หรือใกล้เคียง (ต่อ)

ผู้ศึกษา	กลุ่มตัวอย่าง	probe tone frequency (Hz)	pressure direction	rate (daPa/sec)	ear canal correction	ผลการศึกษา (mmH <sub>2</sub> O/mmhos)
Feldman และ Syracuse (68)	100 หู อายุเฉลี่ย 25.6 ปี	220	*	*	*	Y = 0.33 ถึง 0.85 Y = 1.38 ถึง 4.5 B = 0.9 ถึง 2.45
Beattie และ Leamy (74)	หญิง 13 คน ชาย 7 คน อายุ 17-29 ปี	660	+/-, -/+	30	*	G = 1 ถึง 4.2 Y = 0.83±0.04 Y = 3.43±2.04 B = 1.46±1.3
Porter (88)	หญิง 20 คน อายุ 60-78 ปี	660	+/-, -/+	30	*	G = 2.69±1.9 Y = 5.25±3.5 B = 2.41±3.5
การศึกษาครั้งนี้	18 คน อายุ 18-40 ปี	660	*	*	*	G = 5.04±3.39 Y = 0.79 (mean) Y = 2.93 (mean) B = 0.1±0.48
	หญิง 60 หู ชาย 60 หู อายุ 20-30 ปี	226 630	-/+	125	ค่า mmhos ที่ peak - ค่า mmhos ที่ ear canal pressure -400 daPa	G = 2.75±1.01 Y = 0.72±0.25 Y = 2.13±0.9 B = 1.54±0.61 G = 1.74±0.98

\* = ไม่ได้ระบุไว้

ภาคผนวก จ

ตารางที่ 17 แสดงผลการศึกษเกี่ยวกับค่า TPP ของ Y, B, G tympanogram เมื่อใช้ probe tone frequency 630 Hz หรือใกล้เคียง

ผู้ศึกษา	กลุ่มตัวอย่าง	pressure direction	rate (daPa/sec)	ผลการศึกษา (daPa/mmH <sub>2</sub> O)
Hall และ Chandler (1)	182 คน	-/+ +/-	50	170 -110
Bess และ Humes (33)	*	*	*	-100 ถึง 40
Ostergard และ Carter (63)	*	*	*	50
Wiley และ คณะ (66)	253 หู อายุ 20-30 ปี	-/+		11.8
Himmelfarb และคณะ (67)	90 คน อายุ 18-30 ปี	-/+,+/-	*	B = -5.7 ถึง 39.9 G = -50 ถึง 50
Beattie และ Leamy (74)	หญิง 13 คน ชาย 7 คน อายุ 17-29 ปี	-/+ +/-	30	B = -3.9±24.2 G = -9.8±23.3 B = -10.9±28.1 G = -12±29.2
	หญิง 20 คน อายุ 60-78 ปี	-/+ +/-	30	B = -12.2±29.9 G = 9.7±30.4 B = -28.2±23.8 G = 11.3±35.2
Shanks และ Wilson (77)	24 คน อายุเฉลี่ย 29.5ปี	-/+ +/-	*	10 ถึง 28 -8 ถึง 12
การศึกษาครั้งนี้	หญิง 60 หู ชาย 60 หู อายุ 20-30 ปี	-/+	125	Y = 44.58±10.79 B = 45.66±12.97 G = 36±10.29

\* = ไม่ได้ระบุไว้