การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย

สราวุฒิ สุจิตจร

การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย

สราวุฒิ สุจิตจร

ISBN 974-533-176-7

การวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย

โดย สราวุฒิ สุจิตจร

พิมพ์ครั้งที่หนึ่ง 2,000 เล่ม : กันยายน 2545

รูปเล่ม : สราวุฒิ สุจิตจร
ออกแบบปก : สราวุฒิ สุจิตจร
กราฟฟิก : ชมพู ทรัพย์ปทุมสิน

จัดพิมพ์โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง
จ.นครราชสีมา 30000
โทรศัพท์ (044) 224-400 โทรสาร (044) 224-220
http://www.sut.ac.th

พิมพ์ที่ โรงพิมพ์เลิศศิลป์ (1994)
255/4 ถ.ยมราช อ.เมือง จ.นครราชสีมา

คำนำ

จากการที่ผมมีความรักในดนตรีไทย ที่เป็นมรดกทางวัฒนธรรมที่สำคัญยิ่งสิ่งหนึ่งของชาติ ตลอดจนได้มีโอกาสฝึกฝนการบรรเลงดนตรีไทยอยู่บ้าง จึงทำให้มีความคิดว่าจะสามารถผสมผสานความรู้ในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ที่ผมมีอยู่ เข้ากับดนตรีไทยในหนทางที่จะเป็นประโยชน์ต่อสังคมได้อย่างไร ประการหนึ่งที่ผมคิดทำ เมื่อได้พูดคุยกับพี่ชายของผมและได้ดูเนื้อหาในหนังสือ Physics of Music ก็คืองานที่นำเสนอในหนังสือเล่มนี้ ชาวตะวันตกได้ทำการวัดและทดสอบหาความถี่เสียงเครื่องดนตรีของเขากันมานาน ได้ใช้ประโยชน์ผลลัพธ์ที่ได้ในการปรับเทียบเสียงเครื่องดนตรีในวง ตลอดจนทุกวันนี้มีผลพวงที่งอกงามขึ้นมาเป็นเครื่องสังเคราะห์เสียงดนตรี เมื่อมองมาทางดนตรีไทยจะพบว่า คนไทยเรายังมิได้ดำเนินการวัดและตรวจสอบเสียงของเครื่องดนตรีไทยอย่างละเอียดถ้วนถี่ตามหลักวิชา มีท่านผู้รู้ได้กรุณาแนะนำผมให้สืบค้นทั้งในและต่างประเทศซึ่งผมก็ได้พยายามแล้ว ก็ยังมิได้พบหลักฐานทางวิชาการใดๆคงมีแต่คำเล่าลือถึงเรื่องราวในอดีตเท่านั้น

ผมคิดและดำเนินการเรื่องการตรวจวัด และวิเคราะห์เสียงดนตรีไทยด้วยหลักการ วิธีการ ทางวิทยาศาสตร์อย่างถูกต้องและละเอียดถ้วนถี่ด้วยหวังว่ากระบวนการในการดำเนินงาน วิธีวิเคราะห์สัญญาณที่ใช้ จะเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อวงการดนตรีไทย ผลลัพธ์ที่เป็นความถี่เสียงของขลุ่ยเพียงออ (หมายเหตุ: ขลุ่ยเพียงออ เป็นขลุ่ยระดับเสียงปานกลาง ใช้บรรเลง

ในวงเครื่องสายและวงมโหรี) เป็นเพียงตัวอย่างหนึ่งที่รายงานผลให้ประชาคมได้ทราบ ขลุ่ยที่ได้ทดสอบนั้นเป็นขลุ่ยไม้มะริดคุณภาพดี เสียงของขลุ่ยจึงยอมรับได้ว่าถูกต้องตามมาตรฐานของการผลิตเครื่องดนตรีไทย สิ่งที่ผมปรารถนาจะให้เกิดขึ้น ต่อไปคือการเก็บข้อมูลเสียงเครื่องดนตรีไทยจากวงดนตรีที่เป็นหลักวงต่างๆของชาติ ซึ่งขออนุญาตไม่เอ่ยนามสถาบัน หรือบุคคลผู้เป็นเจ้าของหรือดูแลวงเหล่านั้น ข้อมูลเหล่านั้นจะได้นำมาวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์เป็นความถี่เสียง แล้ววันหนึ่งวงการดนตรีไทยอาจตกลงกันได้ว่า เสียงกลาง อันเป็นมาตรฐานของชาติควรจะเป็นเช่นไร หรือมีความถี่เท่าใดที่แน่นอน

ในโอกาสนี้ ผมขอแสดงความขอบคุณ ต่อผู้มีพระคุณทั้งหลาย นับแต่คุณพ่อคุณแม่ ที่ให้โอกาสทางการศึกษาแก่ผมเป็นอย่างดียิ่ง สนับสนุนให้ผมได้เรียนดนตรีไทย

ขอบพระคุณ คุณครูเตือน พาทยกุล ศิลปินแห่งชาติ คุณครูประพาส สวนขวัญ ที่ท่านทั้งสองได้วางรากฐานทางการดนตรีให้แก่ผมอย่างมั่นคง ขอขอบพระคุณ คุณครูฉลวย จิยะจันทร์ ในความกรุณาของท่านที่ถ่ายทอดความรู้ด้วยวิธีการอันแยบยล แต่ด้วยความเขลาของผมจึงทำให้มิอาจรับการถ่ายทอดมาได้มากตามที่คุณครูตั้งใจ ขอขอบพระคุณ คุณครูนิพันธ์ ธนรักษ์ และท่านอื่นๆแห่งกรมประชาสัมพันธ์ ที่ให้ความเมตตากรุณาต่อผมอย่างล้นเหลือ

ขอบพระคุณพี่อ๊อด(พีระวัฒน์ สุจิตจร) ในการสนทนาอันประเทืองปัญญา และหนังสืออันทรงคุณค่าที่ให้ยืม

ขอบพระคุณ นาวาอากาศเอก ดร.เพียร โตท่าโรง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติ อัตถกิจมงคล ที่ได้ให้คำแนะนำต่างๆ อันมีประโยชน์อย่างยิ่ง

ขอบคุณ คุณสุกัญญา สุจิตจร(ทองสาย) ที่ดูแลชีวิตผมอย่างดีที่สุด

สุดท้ายนี้ ผมขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่สนับสนุนการจัดพิมพ์หนังสือเล่มนี้ขึ้นเป็นวิทยาทาน เพื่อเผยแพร่ความรู้ อันเกิดจากการศึกษาวิจัยในภาระกิจทำนุบำรุงศิลปวัฒนธรรมของชาติ และต้องขอบคุณคุณฤดีรัตน์ ชินเวชกิจวานิชย์ เป็นอย่างยิ่งในความช่วยเหลือหลายๆด้านอย่างขยันขันแข็ง

น.ท.สราวุฒิ สุจิตจร*

9 สิงหาคม 2545

---

* นาวาอากาศโท สราวุฒิ สุจิตจร ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ และเป็นหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อาจติดต่อทาง E-mail ได้ที่ sarawut@ccs.sut.ac.th

สารบัญ

คำนำ	ก
1. บทนำ	1
2. เสียง การได้ยิน และไมโครโฟน	5
2.1 กล่าวนำ	5
2.2 การเกิดเสียง	5
2.3 แหล่งกำเนิดเสียง	8
2.4 หูและการได้ยิน	10
2.5 ไมโครโฟน	12
3. ระบบเสียงดนตรีไทย	19
3.1 กล่าวนำ	19
3.2 เสียงดนตรีไทยเทียบกับเสียงสากล	19
3.3 ระดับเสียงของดนตรีไทย	27
4. การจัดเครื่องมือและเทคนิคการวิเคราะห์	31
4.1 กล่าวนำ	31
4.2 การจัดเครื่องมือ	31
4.3 เทคนิคการวิเคราะห์	36
5. ผลและอภิปราย	56
6. สรุปและส่งท้าย	67
เอกสารอ้างอิง	71

1
บทนำ

ดนตรีไทยถือเป็นศิลปะอันละเอียดอ่อน ที่เจริญถึงขั้นที่เรียกว่าเป็นคลาสสิค(classic) แสดงถึงวัฒนธรรมและอารยธรรมอันสูงส่งของชนชาติไทย ดนตรีไทยมีการบรรเลงด้วยมาตราเสียงแบบไทย และมีอิสระสูงในการบรรเลง มาตราเสียงแบบไทยนั้น หนึ่งบันไดเสียงมีเจ็ดเสียงเต็ม ไม่มีครึ่งเสียง ทำให้การบรรเลงเพลงไทยสามารถขึ้นที่เสียงไหนก็ได้ทั้งสิ้น(ปัญญา รุ่งเรือง, 2517) เป็นการบรรเลงด้วยระดับเสียงต่างๆที่เรียกว่า "ทาง" เช่น ทางนอก ทางใน ทางเพียงออ เป็นต้น

มาตราเสียงแบบไทยแม้จะเป็นที่รู้จักกันอย่างดีในหมู่นักดนตรี แต่ก็ยังไม่มีการประกาศความถี่เสียงของบันไดเสียงไทยให้ใช้เป็นที่อ้างอิงได้ การเทียบเสียงของเครื่องดนตรีในวง อาศัยความชำนาญของครูหรือนักดนตรีอาวุโสผู้ควบคุมดูแลวง โดยอาศัยเสียงจากเครื่องดนตรีที่ปรับแต่งเสียงไม่ได้หรือทำได้ยาก เช่น ปี่ ขลุ่ย ระนาดเหล็ก เป็นตัวนำในการเทียบเสียง จึงมักพบว่า เครื่องดนตรีของวงต่างๆที่มาจากต่างถิ่น มีเสียงเพี้ยนไปจากกันบ้าง เมื่อมีการรวมวงและนักดนตรีต่างนำเครื่องมือของตนมาเอง ก็จะประสบปัญหาว่าต้องตั้งเสียงใหม่ เครื่องสายคงตั้งเสียงได้ไม่ยาก แต่ปี่พาทย์คงใช้เวลานานพอสมควรกว่าจะตั้งเสียงเสร็จ ที่สำคัญ นักดนตรีจะไม่คุ้นเสียงที่ตั้งใหม่ บรรเลงไปก็จะรู้สึกเพี้ยนตลอดเวลา บรรเลงไม่มีความสุขและอาจบรรเลงผิดเอาได้ง่ายๆ หากมีการประกาศความถี่เสียงอันเป็นมาตรฐานของ

มาตราเสียงแบบไทย ผลที่จะตามมาประการหนึ่งก็คือ การมีเครื่องเทียบเสียงเหมือนอย่างเช่นของฝรั่ง วงดนตรีทุกๆวง โดยเฉพาะอย่างยิ่งตามสถานศึกษาต่างๆก็สามารถเทียบเสียงตามมาตรฐานกลางได้อย่างไม่ผิดเพี้ยน การบรรเลงรวมวงก็จะมีแต่ความลงรอยกัน ผลดีประการอื่นๆก็ยังมีตามมาอีก เช่น ในการสร้างเครื่องสังเคราะห์เสียงดนตรี(music synthesizer) ที่ผลิตเสียงเครื่องดนตรีไทยต่างๆได้ไม่ผิดเพี้ยน การสร้างเครื่องดนตรีขึ้นจากวัสดุทดแทนต่างๆ เหล่านี้ ต้องการการตรวจวัดคุณภาพเสียงตามหลักการทางวิทยาศาสตร์ทั้งสิ้น ถ้าเราต้องการให้เครื่องมือที่ประดิษฐ์ขึ้นนั้นมีคุณภาพ ความถี่ของเสียงอันเป็นมาตรฐานจะเป็นสิ่งอ้างอิงที่มีประโยชน์อย่างยิ่งสำหรับการวัดและทดสอบที่กล่าวถึง

ดั้งนั้น การศึกษาวิจัยให้เกิดองค์ความรู้ ทางความถี่เสียงของเครื่องดนตรีไทย จึงเป็นสิ่งจำเป็นและให้ประโยชน์ เครื่องมือต่างๆที่พัฒนาขึ้นเพื่อการวิเคราะห์เสียงดนตรีไทย ก็จะเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต เพื่อขยายขอบเขตการศึกษาวิจัยให้กว้างขวางออกไป เพื่อให้ผลการศึกษาวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแหล่งอ้างอิงได้ จะเกิดประโยชน์ต่ออนุชนรุ่นหลัง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จึงได้ให้การสนับสนุน จัดพิมพ์หนังสือเล่มนี้ขึ้นมาเพื่อการเผยแพร่ความรู้เป็นวิทยาทาน

ในการบันทึกเสียง ได้เลือกขลุ่ยเพียงออทำจากไม้มะริด เป็นเครื่องดนตรีต้นแบบ เพราะขลุ่ยใช้เป็นหลักในการเทียบเสียงวงมโหรีและเครื่องสาย อีกทั้งยังเป็นเครื่องดนตรีที่คนไทยทั่วไปนิยมบรรเลงเล่นเพื่อการผ่อนคลายอารมณ์และเพื่อความสุนทรีย์ ผลการศึกษาวิจัยที่นำเสนอนี้มิใช่จุดสิ้นสุด หากแต่เป็นจุดเริ่มต้นของการวิเคราะห์เสียงเครื่องดนตรีทุกชิ้นอย่างละเอียด

ถ้วนถี่ต่อไป ด้วยกระบวนการและวิธีการที่นำเสนอ เมื่อการศึกษาวิจัยนี้ดำเนินการเกี่ยวข้องกับเสียง บทที่ 2 ของหนังสือนี้จึงบรรยายทบทวนในเรื่องของเสียงกับการได้ยิน และในการบันทึกเสียงต้องใช้ไมโครโฟน จึงมีเนื้อหาเกี่ยวกับชนิดและไมโครโฟนที่เลือกใช้ บรรยายไว้ในบทที่ 2 นี้อีกด้วย

ระบบเสียงดนตรีไทยที่อธิบายแบบไทย ได้รับการทบทวนพอสังเขปไว้ในบทที่ 3 ในอดีตได้เคยมีผู้นำเสนอผลคำนวณเชิงทฤษฎี ถึงความถี่ของเสียงดนตรีไทย ที่คำนวณโดยอิงความถี่เสียงของเปียโน ข้อมูลดังกล่าวก็ได้รับการนำเสนอไว้ในบทนี้พร้อมคำอภิปราย

การจัดเครื่องมือในการวัดบันทึกเสียง กระบวนการดำเนินงานได้รับการบรรยายไว้ในบทที่ 4 นอกจากนั้นบทที่ 4 ยังอธิบายถึงวิธีการต่างๆที่ใช้เพื่อวิเคราะห์สัญญาณที่บันทึกได้ เนื่องจากการวิเคราะห์หาความถี่เสียงดนตรีไทยยังไม่ปรากฏแหล่งข้อมูลอ้างอิงได้ เพื่อให้เกิดความรอบคอบและมั่นใจในผลการศึกษาวิจัย จึงได้ใช้เทคนิคที่แตกต่างกัน 3 วิธีการ เข้าดำเนินกระบวนการทางสัญญาณกับเสียงที่บันทึกได้ วิธีการทั้งสามได้รับการอธิบายไว้ในบทนี้พอสังเขป

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์สัญญาณประกอบการอภิปรายต่างๆได้รับการนำเสนอไว้ในบทที่ 5 ส่วนบทที่ 6 นั้นเป็นการสรุปผลจากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้

2
เสียง การได้ยิน และไมโครโฟน

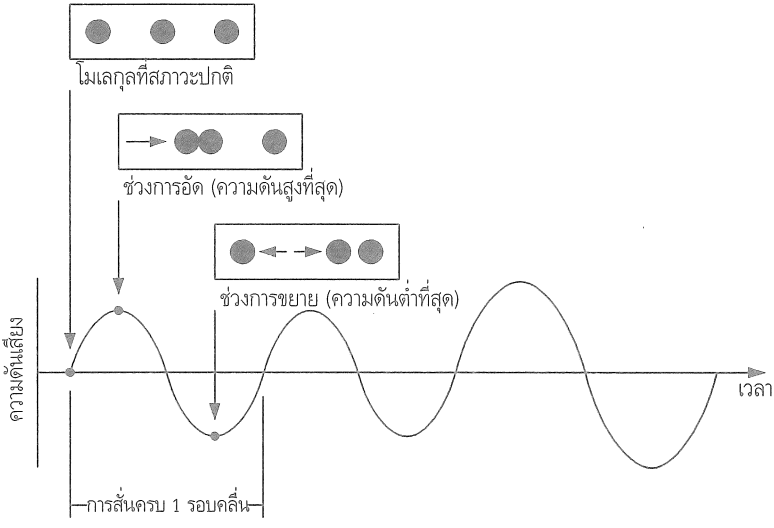
2.1 กล่าวนำ

มนุษย์สามารถได้ยินเสียงต่างๆที่อยู่รอบตัว โดยอาศัยหูเป็นอวัยวะในการรับฟังเสียงซึ่งเกิดจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียง และพลังงานจากการสั่นนั้นเคลื่อนที่ผ่านอากาศมาถึงหู หูจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวเก็บรวบรวมข้อมูลของเสียงที่เข้ามา แล้วส่งต่อไปยังสมอง เพื่อพิจารณาเสียงที่ได้ยินว่าเป็นเสียงอะไร มีความดังมากหรือน้อยอย่างไร ในบทที่ 2 นี้จะกล่าวถึงการเกิดของเสียง แหล่งกำเนิดเสียงที่มนุษย์สามารถได้ยิน ซึ่งจะกล่าวถึงแต่เพียงเสียงพูดของมนุษย์(voice) และเสียงจากเครื่องดนตรีประเภทเครื่องเป่า อธิบายส่วนประกอบของหูและการได้ยินเสียง ทำให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของเสียงที่เกิดขึ้นจริงกับความรู้สึกของการได้ยิน นอกจากนั้น เราได้ใช้ไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณเสียง ไมโครโฟนให้การแปลงเสียงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ในบทนี้จึงกล่าวถึงไมโครโฟนชนิดต่างๆรวมทั้งลักษณะสมบัติที่สำคัญของไมโครโฟนอีกด้วย

2.2 การเกิดเสียง

เสียง เริ่มเกิดขึ้นเมื่อวัตถุหรือแหล่งกำเนิดเสียงมีการสั่นสะเทือน ส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของอากาศที่อยู่โดยรอบ กล่าวคือโมเลกุลของอากาศเหล่านี้จะเคลื่อนที่จากตำแหน่งเดิม ไปชนกับโมเลกุลที่อยู่ถัดไป ก่อให้

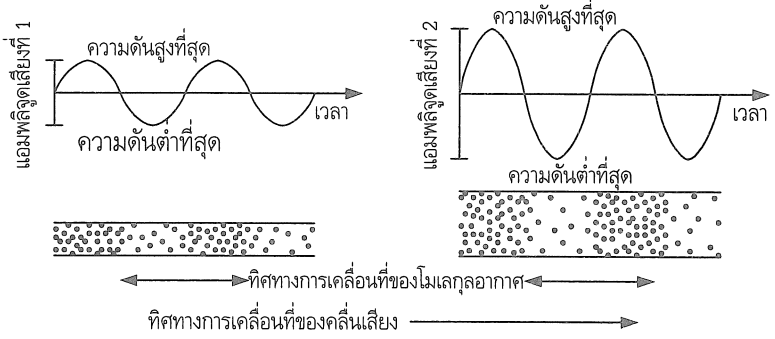
เกิดการถ่ายโอนโมเมนตัม จากโมเลกุลที่มีการเคลื่อนที่ให้กับโมเลกุลที่อยู่ในสภาวะปกติ จากนั้นโมเลกุลที่ชนกันนี้จะแยกออกจากกัน โดยโมเลกุลที่เคลื่อนที่มาจะถูกดึงกลับไปยังตำแหน่งเดิมด้วยแรงปฏิกิริยา และโมเลกุลที่ได้รับการถ่ายโอนพลังงานจะเคลื่อนที่ไปชนกับโมเลกุลที่อยู่ถัดไป ปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นสลับกันไปมาได้เมื่อสื่อกลาง(ในที่นี้คืออากาศ) มีคุณสมบัติของความยืดหยุ่น(Alten, 1999) การเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศนี้จึงเกิดเป็นคลื่นเสียง รูปที่ 2.1 แสดงการเคลื่อนที่ของโมเลกุลอากาศ เทียบกับลักษณะของคลื่น เมื่อแหล่งกำเนิดเสียงมีการสั่นสะเทือน อาจสังเกตได้จากภาพว่าขณะที่แหล่งกำเนิดเสียงไม่มีการสั่นสะเทือน หรือโมเลกุลของอากาศอยู่ในสภาวะปกติ ความดันเสียง(sound pressure) ในขณะนี้จะคงที่ที่ค่าหนึ่ง เมื่อโมเลกุลของอากาศมีการชนกัน ความดันอากาศจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นจากปกติ ส่งผลให้ความดันเสียง ณ ช่วงเวลานี้เพิ่มมากขึ้นด้วย เสมือนเป็นช่วงการอัด(compression) เกิดเป็นยอดคลื่นที่มีความดันเสียงสูงที่สุดในคลื่นเสียงและเมื่อโมเลกุลของอากาศแยกออกจากกัน ความดันอากาศจะมีค่าลดลงจากปกติ ส่งผลให้ความดันเสียง ณ ช่วงเวลานี้ลดลงด้วย เสมือนเป็นช่วงการขยาย(rarefaction) เกิดเป็นจุดที่มีความดันเสียงต่ำที่สุดในคลื่นเสียง(Alten, 1999) ดังนั้นการสั่นสะเทือนของแหล่งกำเนิดเสียงจากช่วงการอัดถึงช่วงการขยาย จึงเปรียบได้กับการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ(cycle) ของคลื่น ซึ่งจำนวนรอบในเวลาหนึ่งวินาทีนี้ หมายถึงความถี่(frequency) ของคลื่นเสียง มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์(Hz) หรือรอบต่อวินาที(cps.) และนอกจากนี้จำนวนโมเลกุลของอากาศที่เคลื่อนที่ทั้งในช่วงการอัดและช่วงการขยายของโมเลกุลของอากาศยังหมายถึงแอมพลิจูด(amplitude) ของคลื่นเสียงด้วย เช่นถ้าจำนวนโมเลกุลของคลื่นเสียงที่หนึ่ง น้อยกว่าของคลื่นเสียงที่สอง ยอดคลื่นของเสียงที่หนึ่ง



รูปที่ 2.1 การเคลื่อนที่ของโมเลกุลของอากาศเทียบกับลักษณะของคลื่น

ย่อมจะต่ำกว่ายอดคลื่นของเสียงที่สอง ซึ่งทำให้แอมพลิจูดของเสียงที่หนึ่งต่ำกว่าแอมพลิจูดของเสียงที่สอง เป็นต้น รูปที่ 2.2 แสดงจำนวนโมเลกุลของอากาศกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง เมื่อพิจารณาจากภาพดังกล่าว จะเห็นได้ว่าเสียงเป็นคลื่นตามยาว(longitudinal wave) เนื่องจากโมเลกุลของอากาศเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นเสียง คลื่นเสียงจะเคลื่อนที่ออกห่างจากแหล่งกำเนิดเสียง มีลักษณะคล้ายกับคลื่นที่เกิดขึ้นเมื่อโยนก้อนหินลงในน้ำ รูปคลื่นที่ใช้แทนคลื่นเสียงจากรูปที่ 2.1 และ 2.2 นั้นเป็นรูปคลื่นไซน์ ประกอบด้วยพลังงานที่มีเพียงความถี่เดียว จึงเรียกว่าเสียงบริสุทธิ์(pure tones) ซึ่งในความเป็นจริงแล้ว เสียงที่มนุษย์ได้ยินมิใช่ในรูปของเสียงบริสุทธิ์ แต่อยู่ในรูปของคลื่นความถี่ต่างๆผสมกัน เพราะเสียงที่

มนุษย์สามารถได้ยิน เกิดจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีการสั่นในหลายลักษณะหรือมีหลายความถี่รวมกัน ทำให้รูปคลื่นที่เกิดขึ้นมีความซับซ้อนมากกว่าคลื่นรูปไซน์(Rumsey and McCormick, 1994)



รูปที่ 2.2 จำนวนโมเลกุลของอากาศกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง

2.3 แหล่งกำเนิดเสียง

เสียงที่มนุษย์ได้ยินนั้นมีอยู่มากมาย อาจเกิดจากมนุษย์เองหรือเกิดจากสิ่งแวดล้อม เสียงที่เกิดจากมนุษย์มีทั้งที่เป็นเสียงพูด ไม่เป็นเสียงพูด บ้างก็เป็นเสียงที่สื่อความหมาย บ้างก็ไม่ได้สื่อความหมายใดๆ เสียงพูดของมนุษย์เริ่มต้นจากการหดตัวของกล้ามเนื้อหน้าอก ซึ่งเป็นผลของอากาศจากปอดที่ดันขึ้นมา ผ่านไปยังคู่สายเสียง(vocal cords) ที่อยู่ภายในกล่องเสียง (larynx) ทำให้มีการสั่นสะเทือนที่บริเวณดังกล่าว เกิดเป็นเสียงที่ออกมาจากลำคอ แล้วใช้อวัยวะในช่องปากปรับให้กลายเป็นเสียงพูด ได้แก่ เสียงพูดทั้งพยัญชนะและสระรวมทั้งเสียงร้องเพลง ส่วนเสียงที่ไม่ใช่เสียงพูดอาจยกตัวอย่างได้ เช่น เสียงถอนหายใจ เสียงผิวปาก เป็นต้น(Kinsler, Frey, Coppens, and Sanders, 1982) และถ้าพิจารณาถึงรูปคลื่นที่เกิดขึ้นเมื่อ

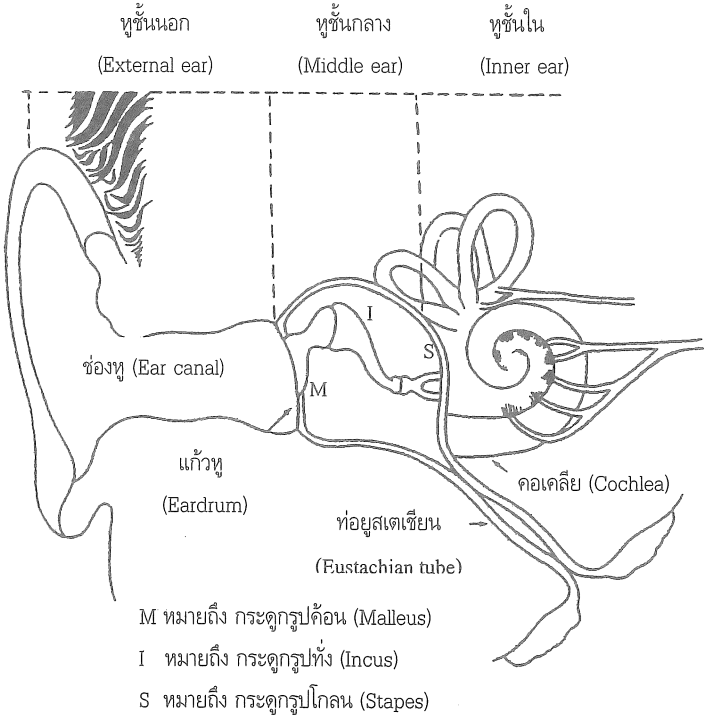
แหล่งกำเนิดเสียงมีการสั่นสะเทือน แหล่งกำเนิดเสียงที่ให้รูปคลื่นที่มีความซับซ้อนมากและมีลักษณะไม่เป็นระเบียบ(random) เสียงที่เกิดขึ้นนี้จะถูกเรียกว่าเสียงรบกวน(noise) (Rumsey and McCormick, 1994) ซึ่งให้ความรู้สึกไม่น่าฟังและไม่มีความหมาย เสียงดนตรีเป็นเสียงอีกชนิดหนึ่งที่มนุษย์ให้ความสนใจศึกษารายละเอียด เสียงที่ถูกสร้างขึ้นโดยเครื่องดนตรีส่วนมากเกิดจากการสั่นเชิงกลของตัวสั่น(oscillator) ที่ได้รับการกระตุ้นในรูปแบบใดรูปแบบหนึ่ง เช่น ดีด สี ตี เป่า เป็นต้น ส่งผลให้ส่วนต่างๆของเครื่องดนตรีสั่น เสียงดนตรีจึงเกิดขึ้นจากการสั่นของส่วนประกอบทั้งหมดที่รวมกันเป็นเครื่องดนตรี สำหรับเครื่องดนตรีประเภทเครื่องเป่า เช่น ขลุ่ยทั้งของฝรั่งและของไทย การสั่นของลำอากาศในการเกิดเสียง เป็นการสั่นตามยาว กล่าวคือ เมื่อเป่าลมเข้าไปในช่องว่างที่อยู่ภายในกระบอก โมเลกุลของอากาศที่อยู่ภายในจะเคลื่อนที่กลับไปกลับมาตามความยาวของกระบอกเกิดเป็นเสียงขึ้น เสียงดังกล่าวหากเราวัดรูปคลื่นได้ พบว่ามีลักษณะของรูปคลื่นใกล้เคียงกับรูปคลื่นไซน์ และการเปลี่ยนระดับเสียงของเครื่องดนตรีชนิดนี้ยังสามารถทำได้โดย การเปลี่ยนแปลงความยาวของลำอากาศ(Cannon, 1967) ด้วยวิธีปิดเปิดนิ้วมือของผู้เล่นเครื่องดนตรีนั้น

เนื่องจากเสียงที่มนุษย์ได้ยินมาจากแหล่งกำเนิดเสียงที่มีหลายความถี่รวมกัน คุณภาพของเสียงจึงขึ้นอยู่กับความเข้มของความถี่เหล่านี้ ในทางฟิสิกส์ คุณภาพของเสียงจะขึ้นอยู่กับสเปกตรัมที่เกิดขึ้น แต่สำหรับในทางดนตรีนั้น คุณภาพของเสียงจะเรียกว่าทิมเบรอะ(timbre) (Zitzewitz, Neff, and Davids, 1995) หรือน้ำเสียง(tone color) ซึ่งหมายถึงคุณลักษณะเฉพาะของเสียง ตัวอย่างเช่น นำเครื่องดนตรีชนิดต่างๆมาเล่นโน้ตตัวเดียวกัน

ด้วยความดังเท่ากัน จะพบว่าเสียงที่ได้ยินจากเครื่องดนตรีแต่ละชนิดไม่เหมือนกันเป็นต้น (บริษัท รีดเดอร์ส ไดเจสท์ (ประเทศไทย) จำกัด, 2541)

2.4 หูและการได้ยิน

มนุษย์มีหูเป็นอวัยวะในการรับฟังเสียง เสียงที่มนุษย์สามารถได้ยินนั้น มีความถี่ในช่วงประมาณ 20 Hz ถึง 20,000 Hz หูประกอบด้วย 3 ส่วน คือ หูชั้นนอก(external ear) หูชั้นกลาง(middle ear) และ หูชั้นใน(inner ear) รูปที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบของหู จะเห็นว่าหูชั้นนอกประกอบด้วยใบหู และช่องหู(หรือรูหู) เมื่อเสียงเดินทางจากแหล่งกำเนิดมาถึงหู ใบหูจะทำหน้าที่เป็นเหมือนกรวยนำเสียงส่งเข้าไปยังช่องหู ซึ่งมีลักษณะลาดขึ้นเล็กน้อย ที่ส่วนปลายของช่องหูนี้ จะติดกับเยื่อแก้วหู(tympanic membrane) หรือแก้วหู(eardrum) ที่กั้นแบ่งหูชั้นนอกและหูชั้นกลาง หูชั้นกลางมีลักษณะกลวงและมีขนาดเล็กมาก ภายในประกอบด้วยกระดูกสามชิ้นที่อยู่ติดกัน คือ กระดูกรูปค้อน(malleus หรือ hammer) กระดูกรูปทั่ง(incus หรือ anvil) และกระดูกรูปโกลน(stapes หรือ stirrup) เมื่อคลื่นเสียงตกกระทบแก้วหู จึงเกิดแรงตึงผิวขึ้นทำให้แก้วหูสั่นสะเทือน ส่งผลให้กระดูกทั้งสามชิ้นสั่นสะเทือนตามไปด้วย ซึ่งเป็นการส่งผ่านพลังงานต่อกันไปยังหูชั้นใน และขณะที่เกิดการสั่นของกระดูกทั้งสามชิ้น ความดันอากาศภายในหูจะเพิ่มมากขึ้น จึงต้องอาศัยท่อยูสเตเชียน(Eustachian tube) ปรับให้ความดันอากาศเท่ากับภายนอกหู ท่อยูสเตเชียนนี้เชื่อมต่ออยู่ระหว่างหูกับคอส่วนบน ถัดจากหูชั้นกลางเข้าไปเป็นหูชั้นในซึ่งมีทั้งอวัยวะรับเสียงและอวัยวะที่เกี่ยวกับการทรงตัว คอเคลีย(cochlea) เป็นอวัยวะรับเสียงที่มีขนาดเล็กมาก มีรูปร่างเหมือนหอยโข่ง ประกอบด้วยเซลล์รับความรู้สึก(sensory cell) จำนวนมาก



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบของหู*

ทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นเสียงเป็นกระแสประสาท โดยคลื่นเสียงความถี่ต่ำจะกระตุ้นเซลล์ที่อยู่ด้านในสุดของคอเคลีย และคลื่นเสียงความถี่สูงจะกระตุ้น

* ตำราโสต นาสิก ลาริงซ์วิทยา (หน้า 2), โดย ชัย อยู่สวัสดิ์, 2540, กรุงเทพฯ: โฮลิสติก พับลิชชิ่ง.

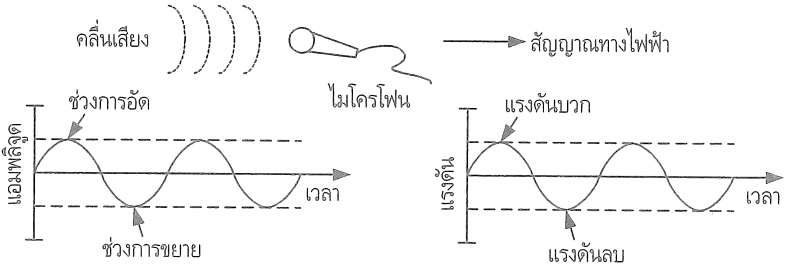
เซลล์ที่อยู่ทางด้านนอก เมื่อได้รับการกระตุ้น เซลล์รับความรู้สึกนี้จะเปลี่ยนพลังงานให้เป็นกระแสประสาท แล้วส่งผ่านโสตประสาทไปยังสมอง สมองจะทำหน้าที่แปลความหมายของเสียงที่ได้ยินว่าเป็นเสียงอะไร (บริษัท รีดเดอร์ส ไดเจสท์ (ประเทศไทย) จำกัด, 2541)

เมื่อพิจารณาส่วนประกอบและหน้าที่ของหู ตามที่ได้อธิบายไปแล้วนั้น สามารถเปรียบเทียบได้ว่า หูชั้นนอกทำหน้าที่เสมือนอุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ ส่งต่อไปยังหูชั้นกลางซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณแล้วส่งต่อไปยังหูชั้นใน ซึ่งทำหน้าที่เสมือนเป็นตัววิเคราะห์สเปกตรัม(spectrum analyzer) จากนั้นส่งข้อมูลไปยังสมองเพื่อประมวลผล ดังนั้นมนุษย์จึงได้ยินและรับรู้ลักษณะของเสียงด้วยความทุ้มแหลมของเสียงหรือพิตช์(pitch) และความดัง (loudness) แทนที่จะเป็นความถี่และแอมพลิจูดของคลื่นเสียง ซึ่งระดับเสียงทุ้มต่ำหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่ต่ำ และระดับเสียงแหลมสูงหมายถึงคลื่นเสียงที่มีความถี่สูง ส่วนความดังนั้นจะขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง

2.5 ไมโครโฟน

เมื่อต้องการนำเสียงที่ได้ยินมาทำการวิเคราะห์หรือขยายความดัง อุปกรณ์สำคัญซึ่งทำหน้าที่ในการรับพลังงานเสียง และแปลงเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าคือไมโครโฟน แอมพลิจูดของสัญญาณทางไฟฟ้าที่ได้จากไมโครโฟนเป็นสัดส่วนกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียงที่ผ่านเข้ามา และยังขึ้นอยู่กับความสามารถของไมโครโฟนอีกด้วย ในกรณีที่ไมโครโฟนสามารถแปลงคลื่นเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้ทั้งหมด แอมพลิจูดของสัญญาณทางไฟฟ้าจะมีความสูงเท่ากันกับแอมพลิจูดของคลื่นเสียง รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่าง

การแปลงสัญญาณของไมโครโฟนในกรณีนี้ ซึ่งจะเห็นว่าแอมพลิจูดของคลื่นเสียงได้รับการแปลงไปเป็นสัญญาณแรงดันไฟฟ้า กล่าวคือในช่วงการอัดของ



รูปที่ 2.4 การแปลงคลื่นเสียงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าของไมโครโฟน

โมเลกุลของอากาศ ซึ่งมีแอมพลิจูดสูงสุดนั้น จะเกิดแรงดันบวกของสัญญาณทางไฟฟ้าขึ้น และในช่วงการขยายของโมเลกุลของอากาศ ซึ่งมีแอมพลิจูดต่ำสุด จะเกิดแรงดันลบของสัญญาณทางไฟฟ้า(Rumsey and McCormick, 1994)

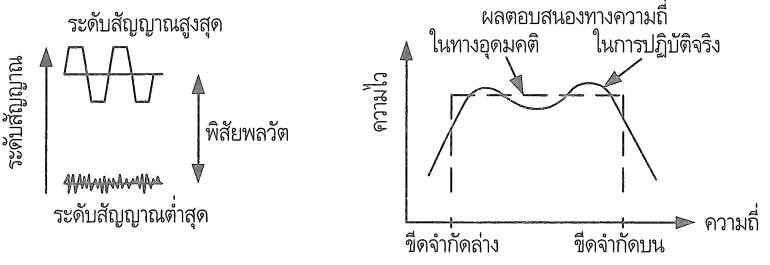
2.5.1 ความสามารถของไมโครโฟน

ความสามารถของไมโครโฟนอาจพิจารณาได้จากลักษณะสมบัติที่สำคัญดังต่อไปนี้

- ความไว(sensitivity) คือ ค่าอัตราส่วนของแรงดันเอาต์พุตที่เกิดจากไมโครโฟน เทียบกับความดันเสียงที่เข้ามา มีหน่วยเป็นโวลต์ต่อปาสคาล(V/Pa) และอาจแสดงในหน่วยเดซิเบล(dB) ก็ได้ ซึ่งไมโครโฟนที่ดีควรมีค่าความไวสูง
- พิสัยพลวัต(dynamic range) คือ พิสัยการวัดของไมโครโฟน

ซึ่งถูกจำกัดการวัดที่ระดับต่ำสุดด้วยสัญญาณรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์(electronic noise) ของไมโครโฟน (สัญญาณรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์คือเอาต์พุตที่เกิดขึ้นแม้ไม่มีความดันเสียงเข้ามายังไมโครโฟนเลย) และถูกจำกัดการวัดที่ระดับสูงสุดด้วยความไม่เป็นเชิงเส้นของไมโครโฟนและการเพี้ยนของรูปคลื่น(Smith and Peters, 1996) พิสัยพลวัตอาจแสดงได้ดังรูปที่ 2.5

- ผลตอบสนองทางความถี่(frequency response) ของไมโครโฟน คือ ค่าความไวเทียบกับความถี่ ในทางอุดมคติไมโครโฟนควรจะมีค่าความไวเท่ากันตลอดทุกความถี่ หรือมีผลตอบสนองทางความถี่แบบราบ(flat) แต่ในทางปฏิบัติจริงนั้น ผลตอบสนองทางความถี่ จะเป็นแบบราบหรือค่อนข้างราบ ในช่วงระหว่างขีดจำกัดความถี่บนและล่าง และผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ขีดจำกัดความถี่บนและล่าง(Smith and Peters, 1996) ดังที่แสดงในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 พิสัยพลวัตและผลตอบสนองทางความถี่ของไมโครโฟน

2.5.2 ชนิดของไมโครโฟน

ไมโครโฟนสามารถแบ่งได้ตามชนิดของวัสดุที่ใช้ ดังนี้

- ไมโครโฟนที่ค่าความจุแปรผันได้(variable-capacitance microphone) ประกอบด้วยแผ่นโลหะขนาดเล็ก 2 แผ่น วางขนานกัน แผ่นหนึ่งสามารถเคลื่อนที่ตามการเปลี่ยนแปลงของความดันเสียงส่วนอีกแผ่นหนึ่งอยู่กับที่ การเปลี่ยนแปลงของค่าความจุที่เกิดจากความดันเสียง จะถูกแปลงไปเป็นค่าแรงดันที่เปลี่ยนแปลงระหว่างแผ่นโลหะทั้งสอง(Smith and Peters, 1996) เรียกไมโครโฟนชนิดนี้ว่า คอนเดนเซอร์ไมโครโฟน (condenser microphone) หรือในบางครั้งอาจเรียกว่าอิเล็กโตรสแตติกไมโครโฟน(electrostatic microphone) (Noll, 1995) คอนเดนเซอร์ไมโครโฟนสามารถสร้างแรงดันไฟฟ้าตามสัญญาณเสียงที่ผ่านเข้ามาได้แม่นยำมาก แต่มีข้อเสียคือต้องการแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงจากภายนอกเพื่อรักษาให้ค่าประจุไฟฟ้าระหว่างแผ่นโลหะทั้งสองคงที่(Noll, 1995) และไม่สามารถทนต่อสภาพอากาศชื้นได้ดีนัก(Smith and Peters, 1996)
- อิเล็กเทรดไมโครโฟน(electret microphone) ได้รับการพัฒนาขึ้นจากคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน โดยใช้แผ่นพอลิเมอร์บางๆเคลือบบนพื้นผิวด้านหนึ่งของแผ่นโลหะ พอลิเมอร์จะทำให้ประจุไฟฟ้ายังคงอยู่บนแผ่นโลหะทั้งสอง จึงไม่ต้องการแหล่งจ่ายไฟแรงดันสูงเหมือนคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน และยังทนทานต่อสภาพอากาศชื้นได้ดี จากคุณสมบัติดังกล่าวทำให้อิเล็ก-

เทรดไมโครโฟนเป็นที่นิยมใช้กันมากในการวัดและบันทึกเสียง (Smith and Peters, 1996)

- พิโซอิเล็กตริกไมโครโฟน(piezoelectric microphone) ประกอบด้วยวัสดุพิโซอิเล็กตริก ได้แก่ ผลึก(crystal) และเซรามิก(ceramic) ต่ออยู่กับแผ่นโลหะบางๆ เมื่อความดันเสียงกระทบกับแผ่นโลหะ วัสดุพิโซอิเล็กตริกจะเกิดความเค้น (stress) ขึ้นเนื่องจากการเคลื่อนที่ของแผ่นโลหะ ซึ่งความเค้นนี้จะเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้า เรียกไมโครโฟนชนิดนี้ว่า คริสตอลไมโครโฟน(crystal microphone) หรือเซรามิกไมโครโฟน (ceramic microphone) ตามวัสดุที่ใช้(Noll, 1995) พิโซอิ-เล็กตริกไมโครโฟนมีราคาถูกกว่าทั้งคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน และอิเล็กเทรดไมโครโฟน แต่มีข้อด้อยตรงที่วัสดุพิโซอิเล็กตริกจะเปลี่ยนไปตามอายุการใช้งาน และพิโซอิเล็กตริกไมโครโฟนยังมีผลตอบสนองทางความถี่ไม่ค่อยดีนัก(Smith and Peters, 1996)

ฉะนั้นการเลือกไมโครโฟนเพื่อนำไปใช้ให้เหมาะกับการวัดต่างๆ ควรพิจารณาก่อนว่าสัญญาณที่จะทำการวัดมีความถี่อยู่ในช่วงใด จากนั้นจึงเลือกไมโครโฟนที่มีผลตอบสนองทางความถี่ใกล้เคียงกับช่วงดังกล่าว และหากสามารถทำได้ ควรทำการปรับเทียบไมโครโฟน ในงานวิจัยนี้ใช้ไมโครโฟนแบบอิเล็กเทรด ซึ่งมีค่าความไว –52 dB และมีผลตอบสนองทางความถี่ในช่วง 50 Hz ถึง 18,000 Hz เพราะเนื่องจากสัญญาณเสียงดนตรีที่จะทำการวัดมีความถี่อยู่ในช่วงประมาณ 200 Hz ถึง 2,000 Hz และมีลักษณะสมบัติ

ใกล้เคียงกับไมโครโฟนที่สืบค้นได้ว่า เหมาะสำหรับใช้วัดเสียงดนตรีประเภทเครื่องลมไม้(woodwind instrument) ซึ่งมี ค่าความไว -62 dB และมีผลตอบสนองทางความถี่ในช่วง 40 Hz ถึง 16,000 Hz (RS Components Ltd., www, 2001) แต่ที่ไม่สามารถใช้ไมโครโฟนชนิดนี้ได้ เนื่องจากมีราคาสูงมาก

3
ระบบเสียงดนตรีไทย

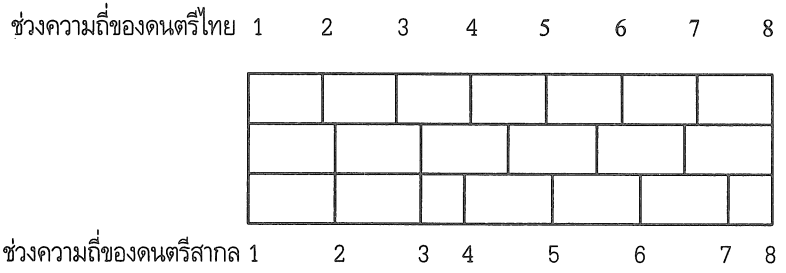
3.1 กล่าวนำ

ดนตรีไทยมีประวัติความเป็นมายาวนาน เป็นศิลปวัฒนธรรมประจำชาติ ที่มีเอกลักษณ์เฉพาะไม่เหมือนชนชาติใด ดนตรีไทยจึงมีความแตกต่างจากดนตรีสากลหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นเรื่องเสียง รูปทรงเครื่องดนตรี เทคโนโลยีของการสร้างเครื่องดนตรี เทคนิคการประพันธ์เพลงและอื่นๆ บทนี้บรรยายทบทวนแต่เพียงเรื่องความถี่ของเสียงที่ต่างกัน พร้อมทั้งแสดงค่าความถี่ของเสียงเปียโนที่ได้จากการวัด เทียบกับความถี่ของเสียงดนตรีไทยที่ได้จากการคำนวณ และอธิบายคำว่า "ทาง" ที่หมายถึงระดับเสียงของดนตรีไทย อย่างไรก็ตาม คงต้องย้ำอีกครั้งว่า ความถี่ของเสียงดนตรีไทยที่นำมาตีแผ่ในบทนี้ เป็นสิ่งที่บูรพาจารย์ทางดนตรีไทยได้เคยคำนวณไว้แต่อดีต หรืออาจกล่าวได้ว่า ข้อมูลที่นำเสนอมาจากการคาดการณ์ในเชิงทฤษฎี

3.2 เสียงดนตรีไทยเทียบกับเสียงสากล

ดนตรีไทยและดนตรีสากลนั้น แต่ละเสียงมีความถี่ไม่เท่ากัน เนื่องจากดนตรีไทยแบ่ง 1 ทบเสียง(octave) ออกเป็น 7 เสียง ที่มีความถี่ห่างเท่าๆ กัน(ในความหมายว่า เสียงดนตรีไทยเป็นเสียงเต็ม(whole tone)) ส่วนดนตรีสากลแบ่ง 1 ทบเสียงออกเป็น 7 เสียงเหมือนกัน แต่มีความถี่ห่างไม่เท่ากันทั้งหมด กล่าวคือจะมีเสียงเต็มอยู่ 5 เสียง และมีครึ่งเสียง(semi tone) อยู่

2 เสียง ที่เป็นเช่นนี้เพราะดนตรีสากลสามารถแบ่ง 1 ทบเสียงออกเป็น 6 เสียงเต็มที่มีความถี่ห่างเท่าๆกัน และยังแบ่งครึ่ง 1 เสียงเต็มออกเป็น 2 ครึ่งเสียง ดังนั้นใน 1 ทบเสียงจึงแบ่งได้อีกเป็น 12 ครึ่งเสียง รูปที่ 3.1 แสดงการแบ่งช่วงความถี่ใน 1 ทบเสียง(สันทัด ตัณฑนันท์, 2542) จากภาพจะเห็นได้ว่าใน 1 ทบเสียง ถ้าตั้งให้เสียงที่ 1 ของดนตรีไทย ตรงกับดนตรีสากลแล้ว เสียงที่ 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 จะไม่ตรงกันเลย ยกเว้นเสียงที่ 8 ซึ่งซ้ำกับเสียงที่ 1 และยังพบว่าเสียงที่ 2, 3, 5, 6 และ 7 ของสากล มีความถี่สูงกว่าของไทย แต่เสียงที่ 4 ของสากล มีความถี่ต่ำกว่าเสียงที่ 4 ของไทยนอกจากนี้เมื่อพิจารณาช่วงความถี่ของดนตรีสากล จะสังเกตได้ว่ามีครึ่งเสียงอยู่ระหว่างเสียงที่ 3 กับเสียงที่ 4 และระหว่างเสียงที่ 7 กับเสียงที่ 8 (ในการกล่าวถึงเสียงที่ 1 ถึง 8 ต่อไปจากนี้ จะใช้เสียงเรียกเป็น โด, เร, มี, ฟา, ซอล, ลา, ที และ โด แทนตามลำดับ)



รูปที่ 3.1 การแบ่งช่วงความถี่ใน 1 ทบเสียงของดนตรีไทยเทียบกับดนตรีสากล

ตารางที่ 3.1 ความถี่ของเสียงเปียโน (บางส่วน)

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)
โด	130.81
เร	146.83
มี	164.81
ฟา	174.61
ซอล	196.00
ลา	220.00
ที	246.94
โด	261.63
เร	293.66
มี	329.63
ฟา	349.23
ซอล	392.00
ลา	440.00
ที	493.88
โด	523.25
เร	587.33
มี	659.26
ฟา	698.46

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)
ซอล	783.99
ลา	880.00
ที	987.77
โด	1,046.5
เร	1,174.7
มี	1,318.5
ฟา	1,396.9
ซอล	1,568.0
ลา	1,760.0
ที	1,975.5
โด	2,093.0
เร	2,349.3
มี	2,637.0
ฟา	2,793.0
ซอล	3,136.0
ลา	3,520.0
ที	3,951.1
โด	4,186.0

หมายเหตุ จาก Audio in Media (หน้าปกใน), โดย Alten, 1999, USA: Wadsworth.

จากตารางที่ 3.1 ที่แสดงความถี่ของเสียงเปียโน ในช่วงความถี่ 261.63 Hz ถึง 2,093.0 Hz จะตรงกับช่วงความถี่ของขลุ่ยฝรั่ง(flute) พอดี ซึ่งจะนำไปเทียบกับผลจากการวิเคราะห์ความถี่ของเสียงขลุ่ยเพียงออ ในบทที่ 5 ต่อไป

พิจารณาความถี่ของเสียงเปียโนใน 1 ทบเสียง จากตารางที่ 3.1 คือ ช่วงความถี่ตั้งแต่ 261.63 Hz ถึง 523.25 Hz นำความถี่เหล่านี้ มาคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกัน แสดงการคำนวณและค่าของอัตราส่วนดังรูปที่ 3.2 เมื่อสังเกตอัตราส่วนในรูปที่ 3.2 พบว่าระหว่าง โดกับเร, เรกับมี,

โด	261.63
เร	293.66
มี	329.63
ฟา	349.23
ซอล	392.00
ลา	440.00
ที	493.88
โด	523.25

$$\frac{293.66}{261.63}=1.12$$
$$\frac{329.63}{293.66}=1.12$$
$$\frac{349.23}{329.63}=1.06$$
$$\frac{392.00}{349.23}=1.12$$
$$\frac{440.00}{392.00}=1.12$$
$$\frac{493.88}{440.00}=1.12$$
$$\frac{523.25}{493.88}=1.06$$

เร:โด	=	1.12
มี:เร	=	1.12
ฟา:มี	=	1.06
ซอล:ฟา	=	1.12
ลา:ซอล	=	1.12
ที:ลา	=	1.12
โด:ที	=	1.06

รูปที่ 3.2 การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกันของเสียงเปียโน

ฟากับซอล, ซอลกับลา และ ลากับที มีค่าเท่ากัน คือ 1.12 และอัตราส่วนระหว่าง มีกับฟา และ ทีกับโด มีค่าเท่ากันคือ 1.06 ซึ่งเป็นไปตามที่กล่าวข้างต้น จึงสรุปได้ว่าค่าอัตราส่วน 1.12 หมายถึงเสียงเต็มและค่าอัตราส่วน

1.06 หมายถึงครึ่งเสียง แต่สำหรับดนตรีไทยนั้น มีความถี่ห่างเท่าๆกันใน 1 ทบเสียง อัตราส่วนระหว่างโน้ตที่ติดกันมีค่าเท่ากันทั้งหมด โดย อุทิศ นาคสวัสดิ์(2514) ได้กล่าวว่าค่าอัตราส่วนนี้เท่ากับ 1.09745 และทำการคำนวณค่าความถี่ของเสียงดนตรีไทยไว้ ซึ่งอาศัยความถี่ของเสียงเปียโนเป็นหลัก ตารางที่ 3.2 แสดงความถี่ของเสียงดนตรีไทยในเชิงทฤษฎีตามที่กล่าวถึงนี้

พิจารณาความถี่ของเสียงดนตรีไทยใน 1 ทบเสียง โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3.2 ในช่วงความถี่ตั้งแต่ 262 Hz ถึง 524 Hz นำความถี่เหล่านี้มาคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกัน แสดงการคำนวณและค่าของอัตราส่วน ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งอาจสังเกตได้ว่า ค่าอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกันของเสียงดนตรีไทย ไม่เท่ากันทั้งหมด และไม่เท่ากับ 1.09745 ดังนั้นจึงไม่อาจสรุปได้ว่าค่าความถี่ของเสียงดนตรีไทยเป็นดังตารางที่ 3.2 นอกจากนั้นในเอกสารที่อ้างถึง ก็มิได้แสดงที่มาของข้อมูลตัวเลขของความถี่เสียงดนตรีไทยที่นำเสนอไว้แต่อย่างใด คงไว้แต่ความสงสัยใคร่รู้ของคนรุ่นต่อๆมา

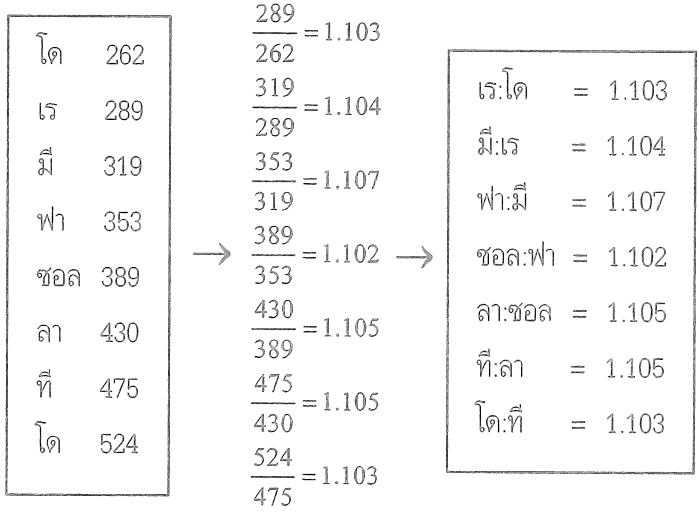
ตารางที่ 3.2 ความถี่ของเสียงดนตรีไทยเทียบกับเสียงเปียโน (บางส่วน)

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz) เสียงเปียโน	ความถี่ (Hz) เสียงดนตรีไทย
โด	65	65
เร	73	72
มี	82	80
ฟา	87	88
ซอล	98	97
ลา	110	107
ที	123	119
โด	131	131
เร	147	145
มี	165	160
ฟา	175	176
ซอล	196	195
ลา	220	215
ที	247	237
โด	262	262
เร	294	289
มี	330	319
ฟา	349	353
ซอล	392	389
ลา	440	430
ที	494	475
โด	524	524

ตารางที่ 3.2 (ต่อ)

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz) เสียงเปียโน	ความถี่ (Hz) เสียงดนตรีไทย
เร	587	579
มี	659	639
ฟา	698	705
ซอล	784	779
ลา	880	860
ที	988	949
โด	1,048	1,048
เร	1,175	1,157
มี	1,319	1,278
ฟา	1,397	1,411
ซอล	1,568	1,558
ลา	1,760	1,720
ที	1,976	1,899
โด	2,097	2,097
เร	2,349	2,315
มี	2,637	2,556
ฟา	2,794	2,822
ซอล	3,136	3,116
ลา	3,510	3,440
ที	3,951	3,798
โด	4,194	4,194

หมายเหตุ จาก ทฤษฎีและการปฏิบัติดนตรีไทย (หน้า 10-11), โดย อุทิศ นาคสวัสดิ์, 2514, กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภา.

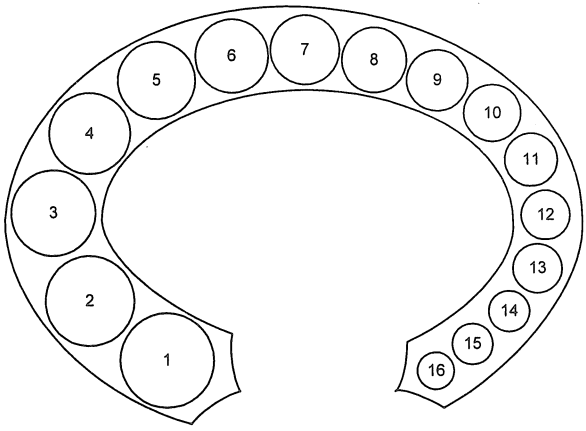


รูปที่ 3.3 การคำนวณหาอัตราส่วนระหว่างตัวโน้ตที่ติดกันของเสียงดนตรีไทย โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ 3.2

3.3 ระดับเสียงของดนตรีไทย

ในปัจจุบันการผสมวงของไทยมีอยู่ 3 ประเภทหลักๆ ได้แก่ ปี่พาทย์เครื่องสาย และมโหรี การเทียบเสียงของเครื่องดนตรีที่จะผสมเป็นวงเดียวกันจะยึดเสียงของเครื่องดนตรีในวงที่เลื่อนลดเสียงไม่ได้ เป็นหลักสำหรับเทียบเสียง ในวงปี่พาทย์ ปี่ในกับปี่นอกเป็นเครื่องดนตรีที่มีเสียงตายตัว จึงต้องสร้างให้เสียงเข้ากัน แล้วยึดเสียงปี่ในเป็นหลักเทียบเสียงเครื่องดนตรีอื่นๆ ในวงเครื่องสาย ขลุ่ยเพียงออกับขลุ่ยหลิบเป็นเครื่องดนตรีที่เลื่อนลดเสียงไม่ได้ จึงต้องสร้างให้เสียงเข้ากัน แล้วยึดเสียงขลุ่ยเพียงออเป็นหลัก ในวงมโหรีใช้ขลุ่ยเทียบเสียงเหมือนกับวงเครื่องสาย(มนตรี ตราโมท, 2540) ดังนั้นการ

เทียบเสียงจึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้ในวงบรรเลงที่ระดับเสียงเดียวกัน เพลงจึงจะฟังไพเราะ เนื่องจากเครื่องดนตรีที่เลื่อนลดเสียงไม่ได้เหล่านี้ มีข้อจำกัดในการเล่น จึงได้มีการกำหนดระดับเสียง เพื่อใช้กับเครื่องเป่าต่างๆนี้ โดยจะระบุระดับเสียงด้วยชื่อของ "ทาง" ซึ่งมีอยู่ 7 ทาง แต่ละทางมีเสียงหลักที่แน่นอน และกำหนดด้วยตำแหน่งของลูกฆ้องของฆ้องวงใหญ่ ดังรูปที่ 3.4 ซึ่งเสียงโดถูกกำหนดให้เป็นเสียงหลักของทาง มีการเปลี่ยนตำแหน่งสูงขึ้นทีละหนึ่งเสียงไปจนครบ 7 ทาง



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งลูกฆ้องของฆ้องวงใหญ่

ทางที่ 1 ทางในลด หรือทางเพียงออล่าง เสียงโดอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 3 และ 10 ซึ่งฆ้องลูกที่ 10 นี้มีชื่อว่าลูกเพียงออ จึงเรียกว่าทางเพียงออ

ทางที่ 2 ทางใน เรียกตามชื่อ ปี่ใน ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ เสียงโดอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 4 และ 11

ทางที่ 3 ทางกลาง เรียกตามชื่อปี่กลาง ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ เสียงโดอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 5 และ 12

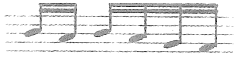
ทางที่ 4 ทางนอกต่ำ หรือทางเพียงออบน หรือทางมโหรี เรียกตามชื่อ ขลุ่ยเพียงออ หรือ ปี่นอกต่ำ ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ ซึ่งทางนี้เป็นทางของมโหรีและเครื่องสาย เสียงโดอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 6 และ 13

ทางที่ 5 ทางนอก หรือทางกรวด หรือทางเสภา หรือทางไม้แข็ง เรียกตามชื่อ ปี่นอก หรือ ขลุ่ยกรวด ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ และทางนี้ยังใช้บรรเลงประกอบกับเสภา เสียงโดอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 7 และ 14

ทางที่ 6 ทางแหบหรือทางกลางแหบ เรียกตามการเป่าของ ปี่กลางที่ต้องเป่าเป็นทางแหบ เสียงโดอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 1, 8 และ 15

ทางที่ 7 ทางชวา เรียกตามชื่อ ปี่ชวา ที่ใช้ประกอบในเสียงนี้ และทางนี้ยังใช้ประกอบการบรรเลงที่ผสมปี่ชวา เสียงโดอยู่ที่ฆ้องลูกที่ 2, 9 และ 16

4
การจัดเครื่องมือและเทคนิคการวิเคราะห์



4.1 กล่าวนำ

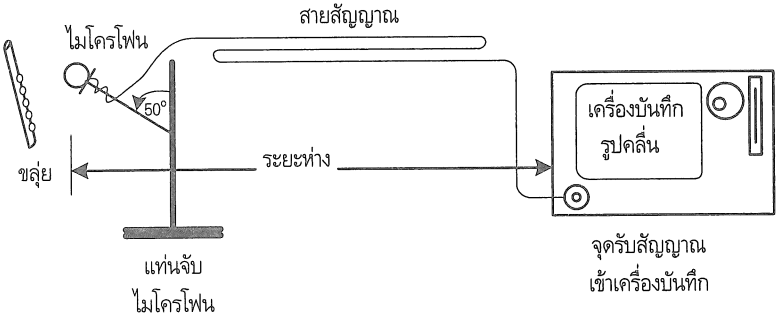
การวิเคราะห์เสียงโน้ตเดี่ยวของขลุ่ยเพียงออนี้ นอกจากจะต้องการให้ได้ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ ที่มีความน่าเชื่อถือสูงแล้ว การเผยแพร่ข้อมูลเกี่ยวกับการจัดเครื่องมือในการวัดบันทึกเสียง ขั้นตอนในการทำงาน ก็จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจรายอื่นๆที่จะทำการบันทึกและวิเคราะห์เสียงของเครื่องดนตรีประเภทอื่นๆบ้าง ดังนั้นในตอนนี้จึงอธิบายถึงเครื่องมือ กระบวนการดำเนินงาน และเทคนิคการวิเคราะห์สัญญาณ

4.2 การจัดเครื่องมือ

การตรวจวัดและบันทึกเสียงของเครื่องดนตรี เพื่อประโยชน์ในการวิเคราะห์วิจัยทางวิทยาศาสตร์ อาจไม่มีความจำเป็นถึงขนาดต้องพึ่งห้องบันทึกเสียง ที่เราเรียกกันว่าสตูดิโอ(studio) แต่จำเป็นจะต้องมั่นใจว่า ห้องที่จะบันทึกเสียงกว้างขวางพอที่จะไม่เกิดการสะท้อนของเสียง จนรบกวนเสียงหลักที่ทำการบันทึก ไม่มีเสียงดังรบกวนจากภายนอกห้อง ไม่มีเสียงดังรบกวนของเครื่องปรับอากาศ พัดลมระบายอากาศภายในห้อง การจัดเครื่องมือจะเป็นดังรูปที่ 4.1 ตำแหน่งที่เป็นขลุ่ยในรูป หมายถึงตำแหน่งที่ผู้บันทึกนั่งด้วยท่าที่ขยับเขยื้อนน้อยที่สุด จับขลุ่ยอย่างมั่นคง บริเวณใกล้ๆกันนั้น ในระยะที่

ผู้เป่าขลุ่ยมองเห็นได้ชัดเจนตลอดเวลา จะมีเครื่องวัดความดังของเสียง(วัดเป็นเดซิเบล หรือ dB) เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ และเธอร์โมมิเตอร์จัดวางอยู่

เครื่องวัดความดังของเสียงจะช่วยให้ผู้เป่าขลุ่ย สามารถควบคุมแรงลมที่เป่าได้ใกล้เคียงกันทุกตัวโน้ต ในการบันทึก ความดังที่ควบคุมไว้โดยเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 76 dB เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์และเธอร์โมมิเตอร์ช่วยให้มั่นใจว่า สภาพแวดล้อมในการบันทึกเสียงอยู่ในสภาวะควบคุมให้ใกล้เคียงกัน และเป็นสภาพปกติของเมืองไทย ในขณะบันทึกเสียงพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ที่ 27°C และความชื้นสัมพัทธ์โดยประมาณ 67%

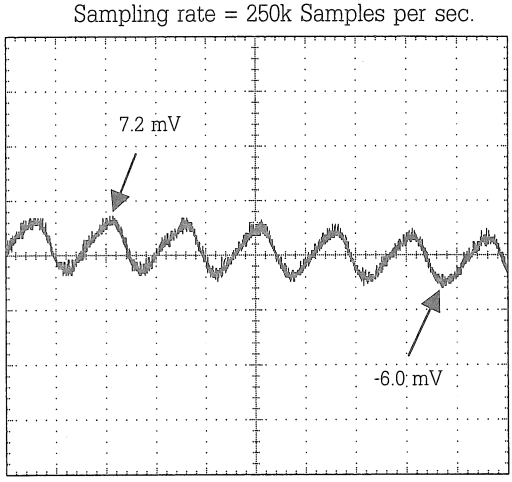


รูปที่ 4.1 การจัดเครื่องมือ (หมายเหตุ: เครื่องวัดความดังของเสียง เครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์ และเธอร์โมมิเตอร์ มิได้แสดงในรูป)

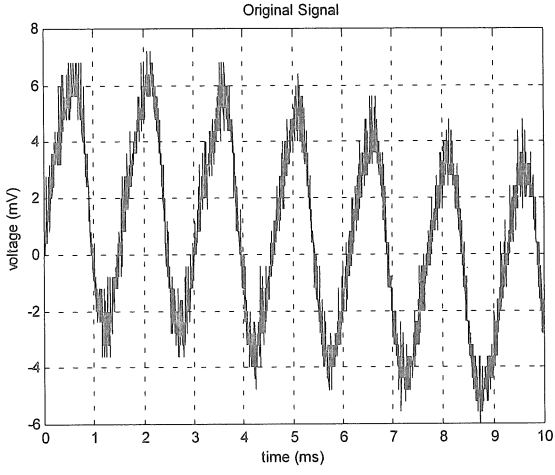
ไมโครโฟนขนาดเล็กมีแท่นจับยึดไว้อย่างมั่นคง ตามปกติไมโครโฟนแบบหนีบกับเสื้อชนิดที่ใช้นี้ มักจะมีสายสัญญาณค่อนข้างยาว จะต้องไม่ตัดแต่งสายสัญญาณ เพราะการตัดแต่งจะทำให้ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ

ไมโครโฟนและสายผิดเพี้ยนไป การวางพาดสายไปตามพื้น จะต้องให้คดเคี้ยวน้อยที่สุด สายที่วางพาดจะต้องไม่ไขว้กันและห่างกันพอควร เพื่อป้องกันมิให้เกิดการแทรกสอดของสัญญาณไขว้ข้ามสายได้ ระยะห่างระหว่างไมโครโฟนกับเครื่องบันทึกรูปคลื่น(oscilloscope) จะต้องมากพอมิให้เสียงจากพัดลมระบายความร้อนขณะเครื่องบันทึกรูปคลื่นทำงาน เข้าไปรบกวนการบันทึกเสียงได้ เครื่องบันทึกรูปคลื่นเป็นแบบดิจิตอลของ Tektronix™ รุ่น TDS420A มีแบนด์วิดธ์(bandwidth) 200 เมกะเฮิรตซ์(MHz) อัตราการสุ่มสัญญาณสูงสุด 100 เมกะแซมเปิ้ลต่อวินาที(MS/sec.) รูปคลื่นที่วัดได้และปรากฏบนหน้าจอ สามารถโอนไปบรรจุไว้ในแผ่นดิสก์ที่มาพร้อมกับตัวเครื่องในรูปไฟล์ข้อมูลพร้อมที่จะนำไปใช้ประมวลผลต่อ

ตัวอย่างของรูปคลื่นที่บันทึกได้ ที่แสดงให้ดูในขณะนี้ เป็นของเสียงซอล ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งเป็นภาพที่เหมือนกับที่ปรากฏบนจอภาพ ของเครื่องบันทึกรูปคลื่น ภาพสัญญาณแสดงแรงดันไฟฟ้า(ตามแนวแกนตั้ง) ที่วัดได้จากไมโครโฟน เทียบต่อเวลา(ตามแนวแกนนอน) รูปที่ 4.3 แสดงภาพขยายของรูปคลื่นดังกล่าว จะสังเกตเห็นว่ารูปคลื่นทั้งหมด มีลักษณะลาดลง ที่เป็นดังนี้เพราะมีสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ต่ำ เมื่อวิเคราะห์สัญญาณตามหลักวิชาอย่างถี่ถ้วน พบว่าสัญญาณรบกวนในย่านความถี่ต่ำ เป็นฮาร์มอนิค (harmonic) ของความถี่ไฟฟ้า 50 เฮิรตซ์ เช่น พบสัญญาณรบกวนที่ 100 และ 150 เฮิรตซ์ ส่วนรอยขีดถี่ๆที่เกาะตามขอบรูปคลื่น เกิดจากสัญญาณ



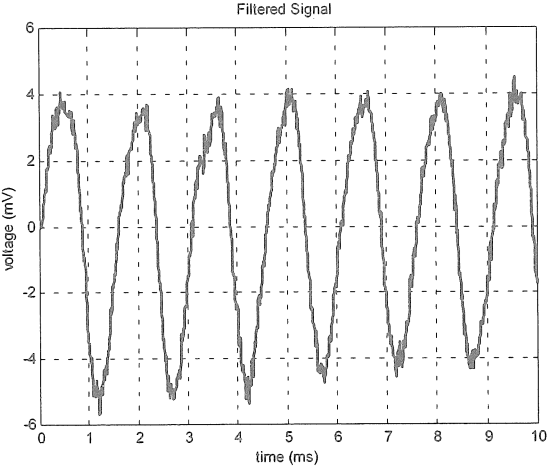
รูปที่ 4.2 สำเนาภาพที่ปรากฏบนจอภาพของเครื่องบันทึกรูปคลื่น (สัญญาณเสียงซอลบันทึกจากขลุ่ย)



รูปที่ 4.3 ภาพขยายรูปคลื่นในรูปที่ 4.2

รบกวนในย่านความถี่สูง จากการวิเคราะห์สัญญาณตามหลักวิชา พบว่าความถี่ของสัญญาณรบกวนเหล่านี้ สูงเกินกว่าที่หูมนุษย์ได้ยินไปมาก(สูงกว่า 20,000 เฮิรตซ์)

ดังนั้น ทุกๆสัญญาณที่วัดได้ จะต้องผ่านการตัดสัญญาณรบกวนเหล่านี้ทิ้งเสียก่อนที่จะนำไปผ่านกระบวนการอื่นๆเพื่อการวิเคราะห์ จึงได้ใช้การกรองสัญญาณแบบบัทเทอร์เวิร์ธแถบผ่าน(bandpass Butterworth filter) ที่มีความถี่ตัด(cutoff frequency) อยู่ที่ 175 เฮิรตซ์ และ 25,000 เฮิรตซ์ รูปคลื่นของสัญญาณหลังจากที่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวนแล้วเป็นดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 รูปคลื่นที่ได้ท้ายสุดนี้ จึงจะนำไปผ่านกระบวนการวิเคราะห์สัญญาณต่อไป



รูปที่ 4.4 รูปคลื่นของสัญญาณเสียงซอลที่ผ่านการตัดสัญญาณรบกวนแล้ว

4.3 เทคนิคการวิเคราะห์

เสียงดนตรีเป็นเสียงที่ให้ความไพเราะแก่ผู้ฟัง เสียงดนตรีที่บรรเลงเป็นเพลงมีลักษณะต่อเนื่อง สม่ำเสมอ สามารถกำหนดระดับเสียงได้ ธรรมชาติอย่างหนึ่งที่เห็นได้ชัดในเสียงดนตรี ก็คือ มีการผันแปรของเสียงอยู่ตลอดเวลา หากอธิบายด้วยภาษาที่เป็นเชิงวิทยาศาสตร์ ก็อาจพูดว่า เป็นการผันแปรตามเวลาและความถี่(time-frequency varying)

การวิเคราะห์เสียงดนตรี อาจจัดตามวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์ได้สองกลุ่ม กลุ่มแรกเป็นการวิเคราะห์เพื่อให้เข้าใจธรรมชาติของเสียงนั้นอย่างแท้จริง ส่วนกลุ่มที่สอง เป็นการวิเคราะห์เพื่อหวังที่จะสกัดเอาข้อมูลคุณสมบัติต่างๆของเสียงเพื่อนำไปใช้สังเคราะห์เสียงนั้นกลับขึ้นมาใหม่ (Vercoe, Gardner, and Scheirer, 1998) การดำเนินงานของแต่ละกลุ่มมีเทคนิคการวิเคราะห์ซึ่งพึ่งพาคณิตศาสตร์ ที่ไม่เหมือนกันเสียทีเดียว งานวิจัยที่รายงานผลในที่นี้ จัดอยู่ในงานของกลุ่มแรก คือ ต้องการทราบค่าความถี่หลักของโน้ตเดี่ยว ของเสียงดนตรีไทยในช่วงหนึ่งทบเสียง โดยได้เลือกเครื่องดนตรีเป็นขลุ่ยเพียงออ ทำจากไม้มะริดด้วยฝีมือช่างที่ปราณีต ขณะบันทึกเสียงได้เป่าขลุ่ยให้เกิดเสียงสม่ำเสมอ ราบเรียบ อย่างคงตัว ทีละตัวโน้ตจากโดต่ำ ไปโดสูง เทคนิคในการวิเคราะห์เสียง จะต้องเลือกอย่างเหมาะสม เนื่องจากการวิเคราะห์ความถี่เสียงดนตรีไทยนี้ ไม่ปรากฏหลักฐานไว้ให้ศึกษาเปรียบเทียบได้ เพื่อให้การศึกษาวิจัยเป็นไปอย่างรัดกุม รอบคอบ จึงต้องใช้เทคนิคการวิเคราะห์หลายเทคนิคเข้าช่วย เพื่อเปรียบเทียบผลที่ได้

เนื่องจากหนังสือนี้อาจมีผู้อ่านที่หลากหลาย มีความแตกต่างกันด้านภูมิหลังทางการศึกษาและอาชีพ การนำเสนอเนื้อหาในส่วนนี้ จึงพยายามใช้ภาษาที่ง่ายๆอธิบายพอสังเขป เพื่อเป็นเสมือนต้นตอข้อมูลทางวิชาการสำหรับกลุ่มผู้อ่านที่มีความสนใจทางวิทยาศาสตร์และคณิตศาสตร์ประยุกต์ได้ใช้รายการอ้างอิงเป็นจุดตั้งต้น ในการค้นคว้าข้อมูลเบื้องลึกต่อไป สำหรับกลุ่มผู้อ่านที่มิได้สนใจทางคณิตศาสตร์และวิทยาศาสตร์เป็นพิเศษ ก็สามารถข้ามเนื้อหาตรงนี้ไปได้ ซึ่งท่านอาจสนใจผลลัพธ์ที่ได้ ดังปรากฏในตอนที่ 5 ก็อาจข้ามไปอ่านเนื้อหาของตอนที่ 5 ได้ทันที

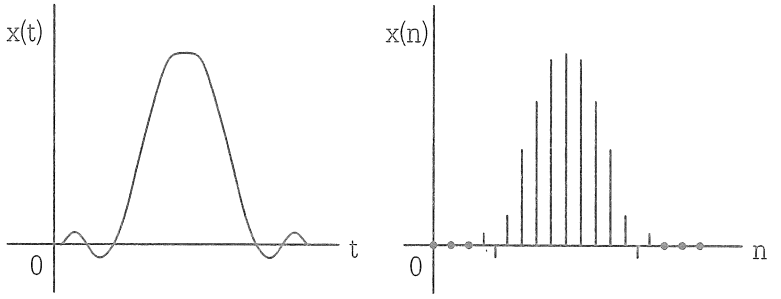
ก่อนที่จะเริ่มอธิบายถึงเทคนิคการวิเคราะห์ อยากให้ท่านผู้อ่านได้รู้จักกับคำๆหนึ่งคือ "การแปลง(transform)" คำดังกล่าวในเนื้อหานี้ หมายถึงการใช้คณิตศาสตร์ประยุกต์บางประเภท เข้าดำเนินการกับชุดข้อมูลที่เราบันทึกไว้ได้ ข้อมูลที่บันทึกนั้นผันแปรไปตามเวลา โดยมีข้อมูลเชิงความถี่ซ่อนอยู่ เมื่อดำเนินการแล้วเสร็จ ข้อมูลเชิงความถี่จะปรากฏออกมาอย่างเด่นชัด ให้ข้อมูลอันเป็นประโยชน์ การดำเนินงานเช่นนี้ เราเรียกว่า การแปลงจากโดเมนเวลา(time domain) ไปเป็นโดเมนความถี่(frequency domain)

เมื่อบรรเลงโน้ตเดี่ยวด้วยเครื่องดนตรีที่สามารถลากเสียงให้ยาวนานสม่ำเสมอได้อย่างคงตัว เสียงโน้ตนั้นจะแสดงองค์ประกอบทางความถี่อย่างเด่นชัด โดยธรรมชาติเราสังเกตได้จากการฟังว่า โน้ตนั้นถูกเล่นขึ้นมาอย่างชัดเจน ไม่บอด ไม่แหบ และไม่แตกพร่า ลักษณะเช่นนี้ของสัญญาณเสียงจึงมีความเป็นรายคาบ(periodic) สมบัติที่สำคัญของเสียงจึงอยู่ที่ฟอร์แมนท์(formant) ซึ่งเป็นคุณลักษณะเชิงสเปกตรัมของขนาด

(magnitude spectral characteristic) คุณลักษณะทางเฟส(phase characteristic) ไม่มีบทบาทต่อความเพี้ยนของโน้ตเดี่ยว(Risset, and Wessel, 1982) เทคนิคการแปลงสัญญาณที่ใช้ได้อย่างดี กับเสียงดนตรีเช่นที่ว่านี้ เป็นกลุ่มการแปลงฟูริเยร์(Fourier transform) เทคนิคในกลุ่มนี้ที่ได้รับการนำมาประยุกต์กันอย่างกว้างขวาง ก็ได้แก่ การแปลงฟูริเยร์เต็มหน่วย (discrete Fourier transform) หรือเรียกย่อๆว่า DFT และการแปลงฟูริเยร์ในช่วงเวลาสั้น(short-time Fourier transform) หรือเรียกโดยย่อว่า STFT เป็นต้น นอกจากนี้ เคยมีผู้ใช้การแปลงเวฟเล็ต(wavelet transform) กับการวิเคราะห์เสียงดนตรี(Kronland-Martinet, 1988) พบว่าผลจากการแปลง ให้การตีความยากมาก จนถึงไม่สามารถตีความได้ หรืออาจจำเป็นต้องให้ความหมายใหม่ เพื่อให้ตีความผลการแปลงได้ แต่ความหมายใหม่และการตีความอาจไม่เป็นที่ยอมรับในวงกว้าง

เทคนิค DFT และ STFT ได้รับการนำมาใช้กับงานวิจัยนี้ และเพื่อให้รอบคอบยิ่งขึ้น จึงได้นำเทคนิคออโตรีเกรสซีฟโมเดล(autoregressive model) หรือเรียกโดยย่อว่า AR มาใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณเป็นเทคนิคที่สาม ทั้งสามวิธีการได้รับการนำเสนอพอสังเขปไว้ในตอนนี้

เทคนิคการวิเคราะห์แบบ DFT



(ก) (ข)

รูปที่ 4.5 (ก) สัญญาณต่อเนื่อง x(t) (ข) สัญญาณเต็มหน่วย x(n)

เมื่อเรามีสัญญาณที่บันทึกได้ x(t) เป็นสัญญาณต่อเนื่อง หลังจากนำ x(t) นี้ผ่านกระบวนการสุ่มสัญญาณแล้ว จะได้ x(n) เป็นสัญญาณเต็มหน่วย x(n) มีรูปแบบเป็นลำดับข้อมูลที่มีค่าแน่นอน หากเรานำ x(n) ไปแปลงด้วยเทคนิค DFT ผลลัพธ์ที่ได้คือ $\mathbf{X}(k)$ เป็นปริมาณเชิงซ้อน(complex) เขียนแสดงความสัมพันธ์ของ DFT ได้ว่า

$$\mathbf{X}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\left(2\pi/N\right)kn} \quad , \quad 0 \le k \le N-1$$

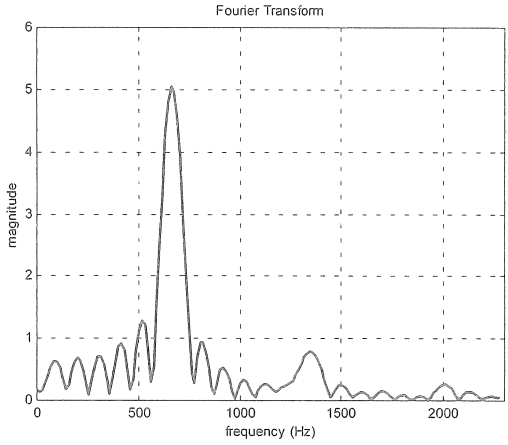
$$= \left|\mathbf{X}(k)\right| \angle \arg \mathbf{X}(k)$$

ซึ่ง $|\mathbf{X}(k)|$ ให้ข้อมูลสเปกตรัมของขนาด และ $\arg \mathbf{X}(k)$ ให้ข้อมูลสเปกตรัมของเฟส ในการวิเคราะห์โน้ตเดี่ยว สเปกตรัมของขนาดมีความสำคัญ เพราะช่วยให้สังเกตฟอร์แมนท์ได้ ทำให้สามารถระบุความถี่หลักของโน้ตแต่ละตัวได้ ถ้าดูตามสมการของ DFT ข้างต้น N คือจำนวนข้อมูลที่นำไปแปลงด้วยกระบวนการ DFT

ในการดำเนินงาน ถ้าคำนวณตามสมการข้างต้นโดยตรง จะทำให้คำนวณได้ช้า ในการใช้คอมพิวเตอร์คำนวณอย่างมีประสิทธิภาพ เราพึ่งพาอัลกอริทึมที่เรียกว่า อัลกอริทึมการแปลงฟูริเยร์อย่างรวดเร็ว(fast Fourier transform algorithms) หรือ เรียกโดยย่อว่า FFT ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม MATLAB™ (หมายเหตุ: MATLAB เป็นโปรแกรมวิเคราะห์คำนวณทางวิทยาศาสตร์ ใช้งานกันอย่างกว้างขวางบนเครื่อง PC) คำนวณ FFT ในการวิเคราะห์สัญญาณ คำอธิบายเกี่ยวกับ DFT และ FFT โดยละเอียด อาจหาอ่านได้จากตำรา(Antoniou, 1993) และ(Lim, and Oppenheim, 1988)

ได้มีการยกตัวอย่างรูปคลื่น ของสัญญาณเสียงซอลไว้ให้ดูในรูปที่ 4.4 ที่ผ่านมา เพื่อให้สอดคล้องกัน จึงขอยกตัวอย่างเป็นผลการแปลงสัญญาณดังกล่าว ด้วยวิธี DFT ตามอัลกอริทึม FFT สำหรับข้อมูล 17,500 จุด ได้ผลลัพธ์สเปกตรัมของขนาด เป็นดังรูปที่ 4.6 ขนาดของสัญญาณสูงสุดที่เห็นเป็นยอดแหลม มีความหมายว่าสัญญาณมีพลังงานเข้มข้นที่สุดในบริเวณนี้ เมื่อเขียนคำสั่งให้โปรแกรม MATLAB ค้นหาพิกัดจุดที่มีค่าสูงสุด

MATLAB รายงานผลเป็นพิกัด (x, y) มีค่า (657.14, 5.04) ตัวเลขที่มีความหมายต่อการวิเคราะห์ของเราในขณะนี้ คือ 657.14 เป็นค่าความถี่มีหน่วยเป็น



รูปที่ 4.6 สเปกตรัมของขนาดของเสียงซอลที่เป็นผลของ FFT

เฮิรตซ์(Hz) ซึ่งสรุปได้ว่าผลการวิเคราะห์ด้วยวิธี DFT (ตามอัลกอริทึม FFT) ระบุว่าความถี่ของโน้ตเสียงซอลเป็น 657.14 Hz

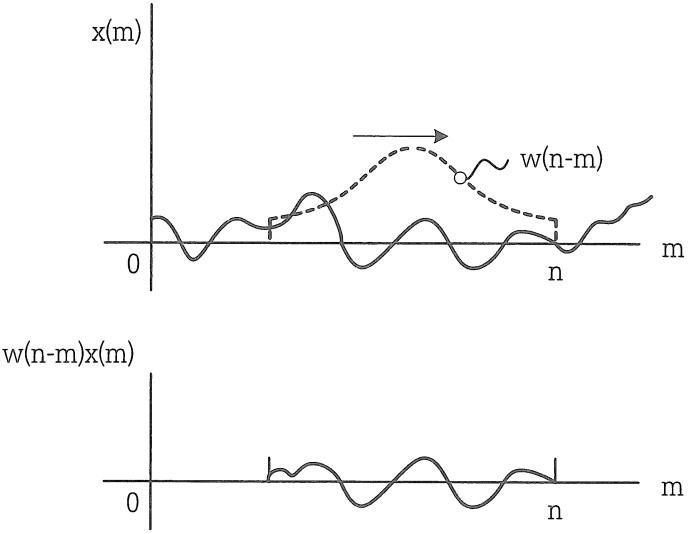
เทคนิคการวิเคราะห์แบบ STFT

STFT เป็นอักษรย่อของ short-time Fourier transform วิธี STFT นี้เป็นเทคนิคการแปลงสัญญาณ ที่กระทำกับสัญญาณในโดเมนเวลา ซึ่งมีลักษณะสมบัติของการที่องค์ประกอบทางความถี่ของสัญญาณ ผันแปรไปตามเวลาด้วย อย่างเช่น เสียงดนตรี เมื่อดำเนินกระบวนการ STFT กับสัญญาณ ผลที่ได้สามารถนำไปวาดเป็นภาพสามมิติ ซึ่งให้ข้อมูลสเปกตรัมของขนาดเทียบต่อเวลาและความถี่ เราเรียกภาพสามมิติเช่นนี้ว่า สเปกโตร-

แกรม(spectrogram) วิธี STFT อาจเขียนแสดงเป็นความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ได้ ดังนี้

$$\mathbf{X}(n, \omega) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(n - m)\, x(m)\, e^{-j\omega m}$$

เมื่อ x(m) เป็นลำดับข้อมูลที่ต้องทำการแปลง w(n) เรียกว่า วินโดว์ หรือหน้าต่าง อาจเรียกว่า ฟังก์ชันหน้าต่าง(window function) ก็ได้ w(n)นี้ได้รับการเลือกขึ้นมา เพื่อกำกับลำดับข้อมูลเป็นช่วงๆ แต่ละช่วงของข้อมูลที่ถูกกำกับ ดังเช่น ตัวอย่างตามรูปที่ 4.7 ก็จะถูกนำไปผ่านกระบวนการ STFT กระทำเช่นนี้ไปเรื่อยๆจนหมดจำนวนข้อมูล



รูปที่ 4.7 การใช้ฟังก์ชันหน้าต่างกำกับลำดับข้อมูล w(n)เป็นหน้าต่างแบบแฮมมิง(Hamming window)

ข้อมูลที่นำไปผ่านกระบวนการ STFT เป็นข้อมูลแบบเต็มหน่วย ที่ได้มาจากการสุ่มสัญญาณในโดเมนเวลา x(t) ดังนั้นวิธี STFT สำหรับสัญญาณข้อมูลเต็มหน่วยจึงอาจเขียนแสดงได้ว่า

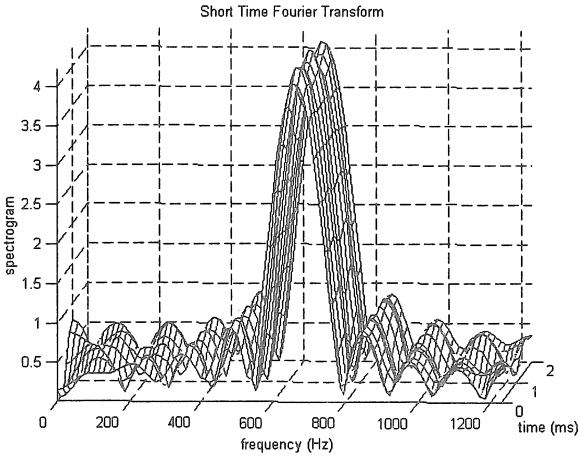
$$\mathbf{X}(n, k) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(n - m)\, x(m) e^{-j\left(2\pi/N\right)km} R_N(k)$$

เมื่อ N คือ ตัวประกอบการสุ่มสัญญาณ(sampling factor) และ $R_N(k)$ คือ

$$R_N(k) = u(k) - u(k - N)$$

เรียกว่า ลำดับข้อมูลแบบสี่เหลี่ยมผืนผ้าจำนวน N จุด การประยุกต์ใช้ STFT จะต้องเลือกฟังก์ชันหน้าต่าง และเมื่อฟังก์ชันหน้าต่างนั้นถูกเลื่อนไป ตามลำดับข้อมูลดังกลไกของกระบวนการ STFT เอง ก็จะเกิดการเกยกันหรือเหลื่อมซ้อนกันของข้อมูล ผู้ใช้ STFT ก็จะต้องเลือกจำนวนจุดข้อมูล ที่จะอนุญาตให้มีการเกยกันได้ด้วย ในตอนนี้จึงขออธิบายเรื่อง STFT พอเป็นสังเขปไว้แต่เพียงเท่านี้ สำหรับผู้ที่สนใจศึกษาในรายละเอียด อาจค้นคว้าข้อมูลเพิ่มได้จาก(Allen, and Rabiner, 1977) และ(Lim, and Oppenheim, 1988) เป็นต้น

การดำเนินงานวิเคราะห์สัญญาณด้วยวิธีSTFT ได้ใช้โปรแกรม MATLAB เข้าดำเนินการ กับลำดับข้อมูลของสัญญาณที่บันทึกไว้ได้ เป็นจำนวน 17,500 จุด สำหรับเสียงของโน้ตแต่ละตัว ฟังก์ชันหน้าต่างได้เลือกใช้



รูปที่ 4.8 แผนภาพสเปกโตรแกรมของเสียงซอล

ชนิดสี่เหลี่ยมผืนผ้ายาว 2,000 จุด เพื่อให้ข้อมูลตลอดช่วงความยาว ของฟังก์ชันหน้าต่างมีน้ำหนักเท่าๆกัน ไม่มีการขยายสัญญาณเป็นบางช่วง เหมือนอย่างการใช้หน้าต่างแบบแฮมมิง และยอมให้มีจำนวนจุดเกยกันได้ 1,950 จุด ค่าต่างๆที่ได้เลือกใช้เหล่านี้ ได้ผ่านการทดลองมานับครั้งไม่ถ้วน จากผลการทดลองที่บันทึกไว้ จึงนำมาพิจารณาอย่างถี่ถ้วน แล้วเลือกค่าพารามิเตอร์เหล่านี้ ซึ่งให้ผลดีต่อการวิเคราะห์สัญญาณมากที่สุด ตัวอย่างที่นำมาแสดงให้ดูในรูปที่ 4.8 เป็นแผนภาพสเปกโตรแกรมของเสียงซอล จากขลุ่ยเพียงออไม้มะริด ภาพสามมิติที่เป็นยอดพุ่งขึ้นไปสูงสุด มีความหมายว่าพลังงานในสัญญาณรวมตัวกันเข้มข้นที่สุด บริเวณช่วงความถี่นั้น และเมื่อเวลาดำเนินผ่านไป พลังงานก็ยังคงรวมตัวกันเข้มข้นที่สุด อยู่ที่ความถี่นั้น ซึ่ง MATLAB อ่านค่าความถี่นั้นได้เท่ากับ 657.14 Hz

เทคนิคการวิเคราะห์แบบ AR

เมื่อเรามีกลุ่มของสัญญาณ ที่ได้รับการบันทึกไว้ในรูปลำดับข้อมูลจำนวนมาก การศึกษาถึงลักษณะสมบัติของกลุ่มข้อมูลนั้น แนวทางหนึ่งเป็นการวิเคราะห์คำนวณเพื่อประมาณค่า การกระจายเฉลี่ยของกำลังของสัญญาณข้อมูลเทียบกับความถี่ ผลการประมาณค่าอาจเรียกว่า ความหนาแน่นของสเปกตรัมกำลัง(power spectral density) หรือเรียกโดยย่อว่า PSD เทคนิค AR เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง เพื่อประมาณค่า PSD สำหรับลำดับข้อมูล x(n) กล่าวคือ

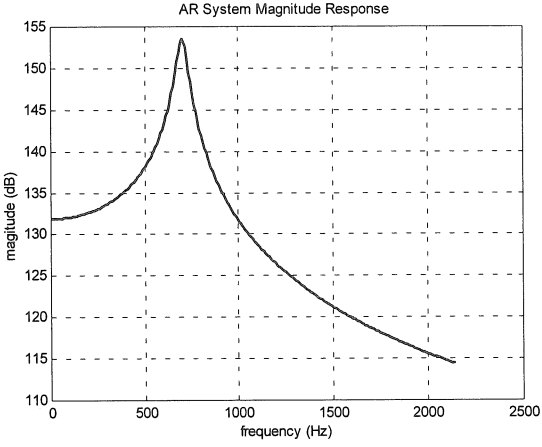
$$x(n) = -\sum_{k=1}^{p} a_k x(n-k) + \in (n)$$

ซึ่งมี $\in(n)$ แทนสัญญาณรบกวนขาว(white noise) และมี PSD แสดงได้ดังนี้

$$PSD_{AR}(\omega) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 + \sum_{k=1}^{p} a_k e^{-j\omega k} \right|^2}$$

ซึ่งมี σ^2 เป็นความแปรปรวนของ$\in(n)$ มี p เป็นอันดับของแบบจำลอง AR ค่า a_k ต่างๆและค่า σ^2 ถือว่าเป็นพารามิเตอร์ของแบบจำลอง AR หรือวิธี AR อันดับ p สามารถมีค่าสูงเท่าไรก็ได้ไม่จำกัด ตราบเท่าที่วิธี AR ให้ผลดีต่อการดำเนินงาน ในทางปฏิบัติก็มิได้หมายความว่า อันดับ p สูงๆจะให้ผลดีเสมอไป

ในทางการคำนวณตามวิธี AR อัลกอริทึมที่ใช้กันแพร่หลายได้แก่ อัลกอริทึมแบบเบิร์ก(Burg algorithm) เราสามารถใช้โปรแกรม MATLAB คำนวณ ตามวิธีและอัลกอริทึมดังกล่าวนี้ ผลลัพธ์ที่เป็นการตอบสนองทางขนาดในโดเมนความถี่ จากแบบจำลอง AR เป็นสิ่งที่แสดงฟอร์แมนท์ของสัญญาณได้อย่างชัดเจน สำหรับผู้อ่านที่สนใจรายละเอียดของวิธีการดังกล่าวนี้ อาจศึกษาเพิ่มเติมได้จากตำรา(Lim, and Oppenheim, 1988)

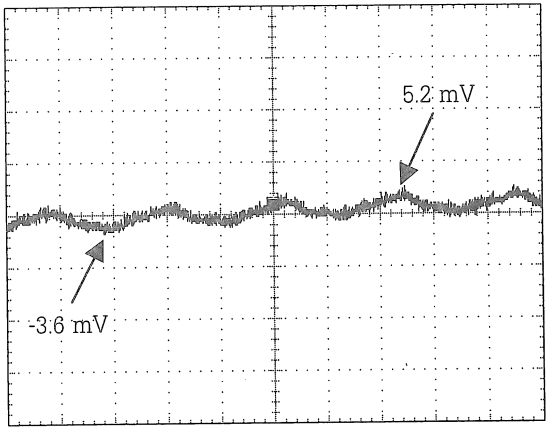


รูปที่ 4.9 สเปกตรัมจากการประมาณด้วยวิธี AR ของเสียงซอล

ตัวอย่างในรูปที่ 4.9 เป็นผลที่ได้จากการประมาณ PSD ด้วยวิธี AR ของเสียงซอลจากขลุ่ยเพียงออ ยอดแหลมในเส้นกราฟที่พุ่งขึ้นสูงสุด ระบุฟอร์แมนท์และให้ความหมายว่า พลังงานในเสียงที่บันทึกไว้ได้เข้มข้นที่สุด ณ ความถี่นี้ ผู้อ่านไม่ควรนำข้อมูลขนาด ที่อ่านได้จากแนวแกนตั้งของแต่ละวิธีไปเปรียบเทียบกัน เพราะไม่ได้ให้ความหมายใดๆในทางฟิสิกส์ จากภาพ

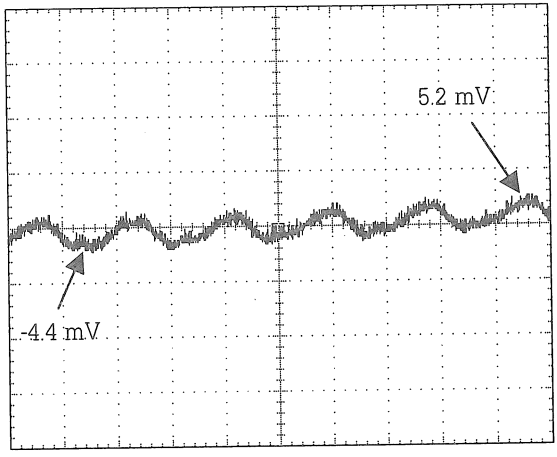
สเปกตรัมของขนาดดังรูปที่ 4.9 อ่านข้อมูลได้ว่า พลังงานของเสียงเข้มข้นที่สุด ณ ความถี่ 700 Hz เป็นความถี่ของเสียงซอล ที่หามาได้ด้วยวิธี AR อันดับ p = 18 ดำเนินกระบวนการกับข้อมูล 17,500 จุด ที่มาของอันดับ p = 18 นั้น มาจากการทดลองดำเนินงานด้วยอันดับเท่ากับ 1 จนถึง 50 แล้วพบว่าอันดับ 18 ให้ผลการวิเคราะห์ดีที่สุดในกลุ่ม โดยยึดหลักการพิจารณาที่ว่า จะต้องได้ความถี่โดต่ำกับโดสูง เป็นหนึ่งทบเสียงหรือประมาณได้ว่าใกล้เคียงนั้นจริง จากผลการคำนวณตามวิธี AR ดังกล่าว

Sampling rate = 250k Samples per sec.

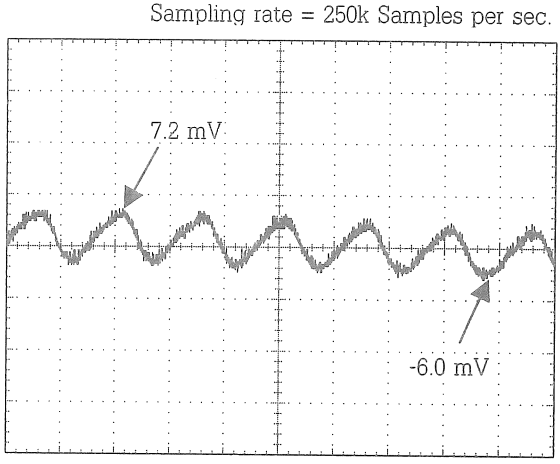


(ก)

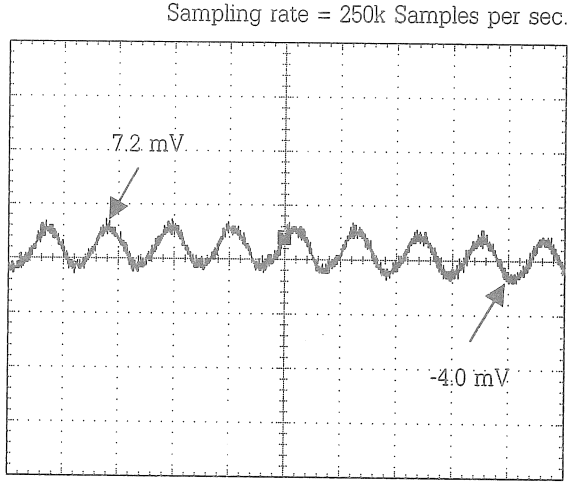
Sampling rate = 250k Samples per sec.



(ข)

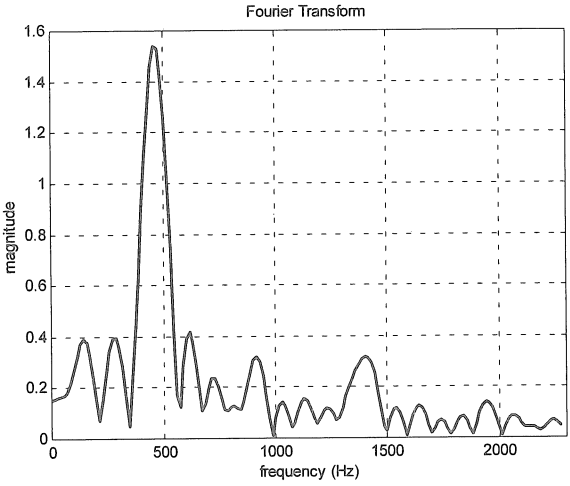


(ค)

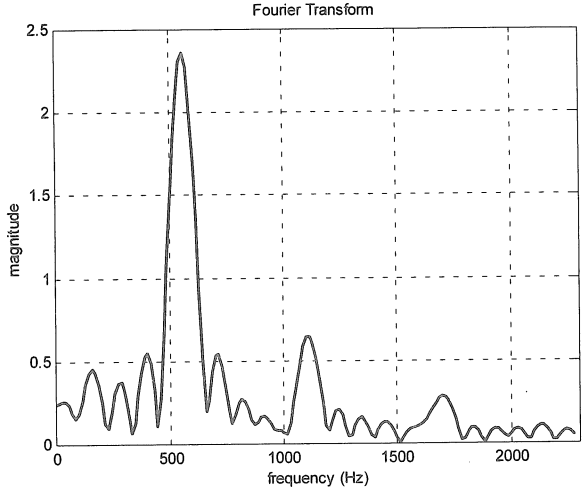


(ง)

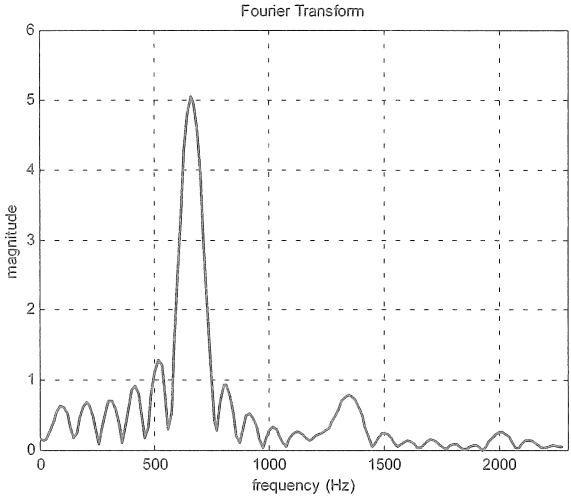
รูปที่ 5.1 รูปคลื่นที่บันทึกในโดเมนเวลาของเสียง (ก)โด (ข)มี (ค)ซอล (ง)โด′
(หมายเหตุ: โด′ หมายถึง เสียงโดสูง)


Fourier Transform
magnitude
frequency (Hz)
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
1.2
1.4
1.6
500
1000
1500
2000

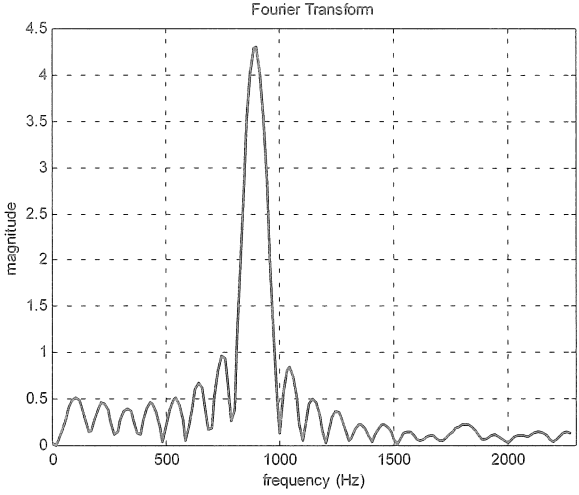
(ก)


Fourier Transform
magnitude
frequency (Hz)
0
0.5
1
1.5
2
2.5
500
1000
1500
2000

(ข)

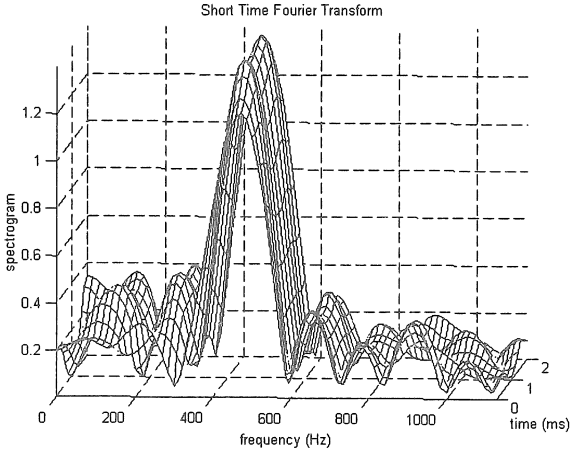


(ค)

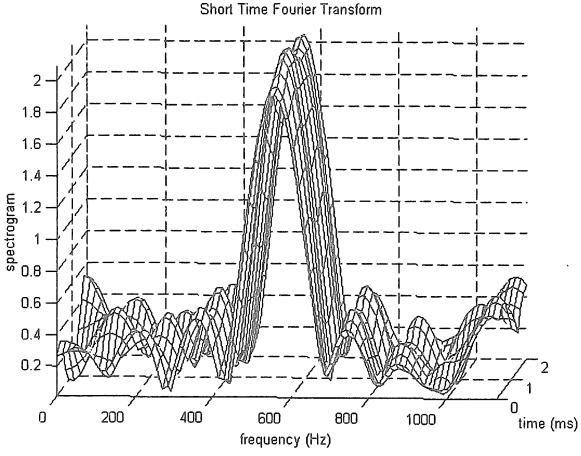


(ง)

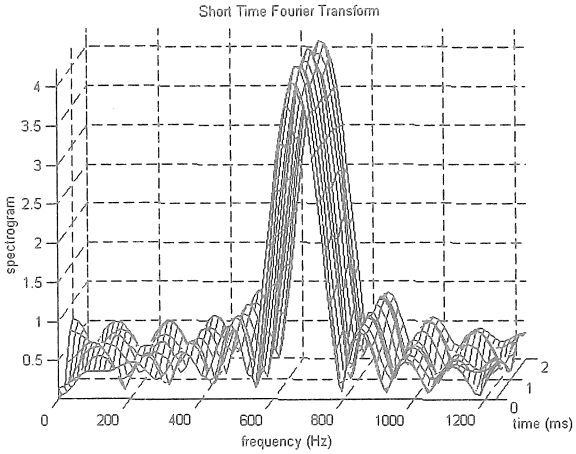
รูปที่ 5.2 สเปกตรัมทางขนาดที่เป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี DFT(FFT) ของเสียง (ก)โด (ข)มี (ค)ซอล (ง)โด′


Short Time Fourier Transform
spectrogram
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
200
400
600
800
1000
frequency (Hz)
2
1
0
time (ms)

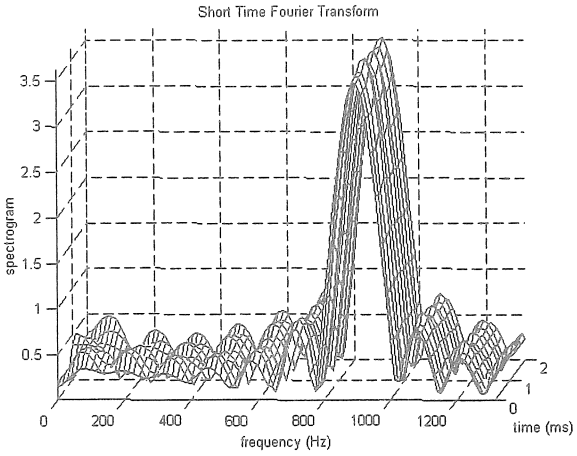
(ก)


Short Time Fourier Transform
spectrogram
2
1.8
1.6
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
200
400
600
800
1000
frequency (Hz)
2
1
0
time (ms)

(ข)

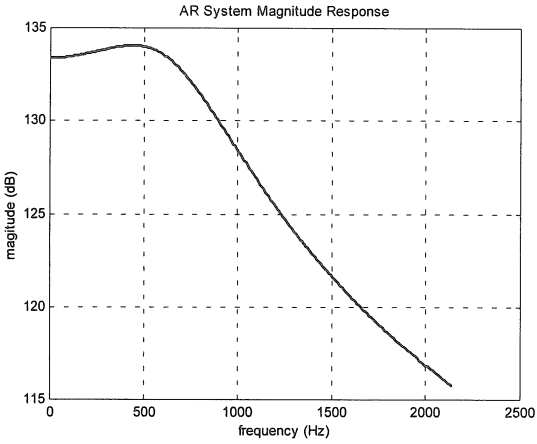


(ค)

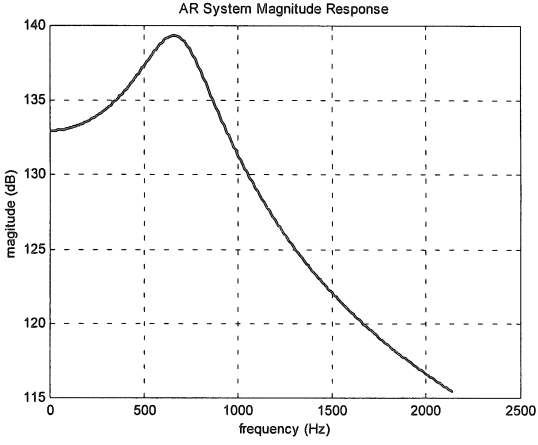


(ง)

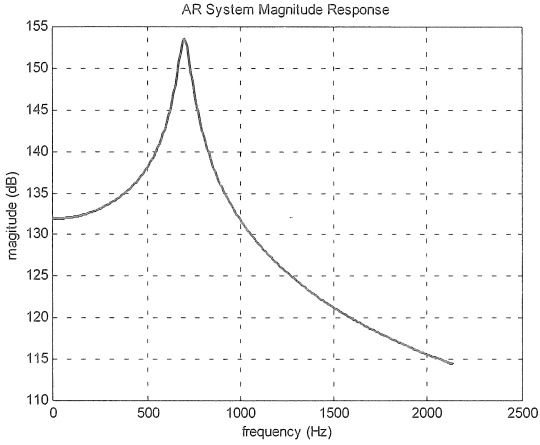
รูปที่ 5.3 สเปกโตรแกรมที่เป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี STFT ของเสียง (ก)โด (ข)มี (ค)ซอล (ง)โด′


AR System Magnitude Response
magitude (dB)
frequency (Hz)
135
130
125
120
115
0
500
1000
1500
2000
2500

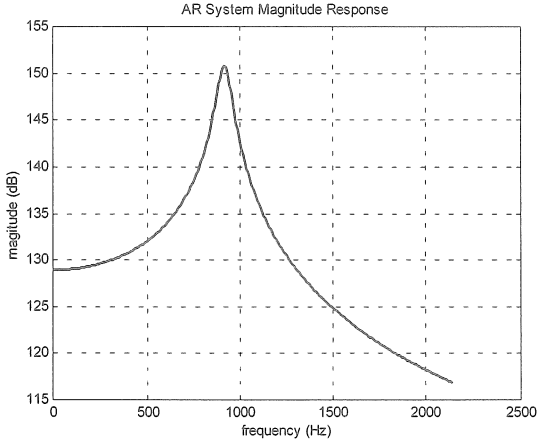
(ก)


AR System Magnitude Response
magitude (dB)
frequency (Hz)
140
135
130
125
120
115
0
500
1000
1500
2000
2500

(ข)



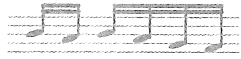
(ค)



(ง)

รูปที่ 5.4 สเปกตรัมทางขนาดที่เป็นผลจากการวิเคราะห์ด้วยวิธี AR ของเสียง (ก)โด (ข)มี (ค)ซอล (ง)โด′

5
ผลและอภิปราย



การบันทึกเสียงโน้ตเดี่ยวของขลุ่ยเพียงออ ได้กระทำจนครบหนึ่งทบเสียง ภายใต้สภาวะควบคุมในห้อง ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 27° เซลเซียส และมีความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย 67% สัญญาณในโดเมนเวลาที่บันทึกด้วยเครื่องบันทึกรูปคลื่น Tektronix TDS420A ได้รับการแสดงไว้เป็นตัวอย่างในรูปที่ 5.1 สำหรับเสียง โด มี ซอล และโด′ (ต่อไปนี้จะใช้ โด′ ในความหมายของเสียงโดสูง) อาจสังเกตได้ว่า ระดับของสัญญาณที่บันทึกได้นั้นต่ำมาก มีขนาดเป็นมิลลิโวลต์(mV) ในการดำเนินงาน ได้พยายามหลีกเลี่ยงการขยายสัญญาณใดๆ เพราะสัญญาณที่บันทึกจะได้มีความผิดเพี้ยนน้อยที่สุด ผลการแปลงสัญญาณเหล่านี้ด้วยวิธี DFT(FFT) STFT และ AR ได้รับการนำมาแสดงไว้เรียงลำดับอย่างสอดคล้องกัน ในรูปที่ 5.2, 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ ซึ่งทุกวิธีแสดงผลให้สังเกตฟอร์แมนท์ได้อย่างเด่นชัด จากการอ่านค่าความถี่ ณ จุดที่เกิดฟอร์แมนท์เหล่านี้ สามารถสรุปค่าความถี่สัมพันธ์กับโน้ตหรือระดับเสียงในหนึ่งทบเสียง ได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ความถี่ของระดับเสียงต่างๆที่วิเคราะห์ได้ด้วยวิธีที่แตกต่างกัน

ระดับเสียง	ความถี่(Hz)		
	DFT(FFT)	STFT	AR
โด	457.14	457.14	442.86
เร	514.29	500	557.14
มี	557.14	557.14	657.14
ฟา	600	600	650
ซอล	657.14	657.14	700
ลา	714.29	714.29	785.71
ที	814.29	814.29	864.29
โด′	900	900	914.29

เมื่อศึกษารายละเอียดข้อมูลในตารางที่ 5.1 อาจสังเกตเห็นว่า ค่าความถี่ที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสามวิธี มีค่าใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผลวิเคราะห์ด้วยวิธี DFT(FFT) กับ STFT นั้นใกล้เคียงกันมาก แตกต่างกันเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อดูข้อมูลในคอลัมน์ขวาสุดของตาราง ซึ่งแสดงผลวิเคราะห์ด้วยวิธี AR อาจสังเกตเห็นว่าความถี่ของระดับเสียงที่สูงขึ้น เพิ่มสูงขึ้นอย่างก้าวกระโดด เช่น ความถี่เสียงเร สูงกว่าเสียงโดถึง 114.28 Hz หรือกล่าวอีกอย่างได้ว่า ความถี่ของเสียงเรเป็น 1.258 เท่าของเสียงโด ซึ่งดูจะสูงเกินจริง นอกจากนั้น วิธี AR ให้ผลความถี่เสียงมี (657.14 Hz) สูงกว่าเสียงฟา (650 Hz) ซึ่งเป็นไปไม่ได้ เพราะเสียงฟาสูงกว่าเสียงมี จึงต้องขออธิบายเพิ่มเติมว่า ในการดำเนินงานวิเคราะห์ จะต้องยึดหลักที่ว่า ความถี่ของเสียงโด

และโด′ จะต้องต่างกันใกล้เคียงสองเท่าหรือเป็นสองเท่า ตามความหมายของหนึ่งทบเสียง จากการทดลองเปลี่ยนอันดับของวิธี AR อย่างนับครั้งไม่ถ้วน พบว่าอันดับ 18 ให้ผลใกล้เคียงตามหลักเกณฑ์นี้มากที่สุด จากนั้นจึงใช้แบบจำลอง AR อันดับ 18 วิเคราะห์ความถี่ของเสียงต่อไปจนครบหนึ่งทบเสียง เนื่องจากเราไม่ทราบมาก่อนว่าเสียง เร มี ฟา ต่อไปจนถึง ที มีความถี่เท่าไร จึงต้องปล่อยให้เป็นการดำเนินงานไปตามธรรมชาติ ของวิธีการที่ได้เลือกแล้ว การที่จะบังคับหรือปรับอันดับ ให้แตกต่างกันไปสำหรับแต่ละระดับเสียง จึงเป็นสิ่งที่ไม่อาจทำได้ เพราะไม่มีหลักเกณฑ์ใดๆรองรับ และก็ไม่อาจทราบได้ว่า จะยุติที่อันดับที่เท่าไร วิธีการแบบ AR นี้อาจไม่เหมาะ ต่อการวิเคราะห์หารายละเอียดของเสียงดนตรี แต่อาจเหมาะสมกับการวิเคราะห์เสียงพูดหรือการสังเคราะห์เสียง(Allen, and Rabiner, 1977)

จากที่ได้อภิปรายผ่านมา อาจสรุปในขั้นนี้ได้ว่า วิธี DFT(FFT) และ STFT ให้ผลการวิเคราะห์ความถี่ ที่สมจริงและน่าเชื่อถือ และทั้งสองวิธีให้ผลที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อนำผลที่ได้จากทั้งสองวิธีมาเฉลี่ยกัน จะได้ความถี่เฉลี่ยของเสียงโด ถึง โด′ ดังที่แสดงในตารางที่ 5.2 และคอลัมน์ขวาสุดของตารางนี้ แสดงค่าอัตราส่วนความถี่ เช่น เร:โด คำนวณได้ว่า 507.14 ÷ 457.14 = 1.1094 เมื่อปัดทศนิยมให้เหลือสองตำแหน่งจะได้ อัตราส่วน เร:โด ≅ 1.11 จะมีเพียงอัตราส่วนของ ที:ลา ที่มีค่าประมาณ 1.14 ซึ่งสูงกว่าค่าอัตราส่วนระหว่างคู่เสียงอื่นๆ ถ้าพิจารณาที่นัยสำคัญของตัวเลข ที่ทศนิยมสองตำแหน่ง อาจสรุปได้ว่า ระดับเสียงของดนตรีไทยมีอัตราการเพิ่มขึ้น ของความถี่เสียงเป็นอัตราส่วนที่เท่าๆกันทีละตัวโน้ต จากเสียงโดต่ำไปโดสูงจนครบหนึ่งทบเสียง ผลดังกล่าวเป็นการยืนยันทางวิทยาศาสตร์ ว่าดนตรีไทยมี

เสียงเต็ม ตามหลักความเชื่อทางศิลปศาสตร์ของการปฏิบัติทางดนตรี หรือการบรรเลงดนตรีนั่นเอง การบรรเลงเพลงไทยจึงสามารถเริ่มต้นที่โน้ตเสียงใดก็ได้ สามารถบรรเลงไปตามกลอนเพลงได้อย่างไม่ติดขัด ถึงกระนั้น ปราชญ์ทางดนตรีก็ได้กำหนด "ทาง" และ "สำเนียง" ของเพลง เพื่อให้บรรเลงแล้วมีความไพเราะสูงสุด

ตารางที่ 5.2 ความถี่ของโน้ตหรือระดับเสียงของไทย หนึ่งทบเสียงที่เฉลี่ยได้จากการวัดและวิเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออ

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)	อัตราส่วนความถี่ของระดับเสียง
โด	457.14	เร:โด = 1.1094 ≅ 1.11
เร	507.14	มี:เร = 1.0986 ≅ 1.10
มี	557.14	ฟา:มี = 1.0769 ≅ 1.10
ฟา	600	ซอล:ฟา = 1.0952 ≅ 1.10
ซอล	657.14	ลา:ซอล = 1.0869 ≅ 1.10
ลา	714.29	ที:ลา = 1.1399 ≅ 1.14
ที	814.29	โด′:ที = 1.1053 ≅ 1.11
โด′	900	

ระดับเสียงสูงต่ำของดนตรีนั้น ทางวิทยาศาสตร์ของการดนตรีกำหนดเป็นระยะพิตช์(pitch interval) ซึ่งคำนวณได้ด้วยสูตร

$$\text{ระยะพิตช์} = K \log_2 \frac{f_1}{f_2}$$

(Wood, 1975) K เป็นค่าคงที่ ถ้าต้องการผลคำนวณให้มีหน่วยเซนต์(cent) ค่า K = 1,200 $\log_2$ หมายถึงค่า log ฐานสอง ส่วน f_1 และ f_2 คือค่าความถี่มีหน่วยเฮิรตซ์(Hz) ของเสียงดนตรีที่จะนำมาเปรียบเทียบกัน ในช่วงหนึ่งทบเสียง ระยะพิตช์ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 0 มาจากเสียงโดเทียบกับตัวเอง ระยะพิตช์สูงสุดมีค่าเท่ากับ 1,200 เมื่อเสียงโด′ เทียบกับโด ตารางที่ 5.3 แสดงข้อมูลระยะพิตช์ของระดับเสียงดนตรีไทย ระยะพิตช์ของเสียงเรในตารางแสดงค่า 179.6976 ตัวเลขนี้มาจาก $1{,}200\log_2(507.14 \div 457.14)$ ระยะพิตช์ของเสียงทีในตารางมาจาก $1{,}200\log_2(814.29 \div 457.14) = 999.4876$ ดังนี้เป็นต้น เป็นที่น่าสังเกตว่า ระยะพิตช์ของเสียงโด′ ครบหนึ่งทบเสียงไม่ได้เท่ากับ 1,200 เพียงแต่มีค่าใกล้เคียงมากเท่านั้น

ตารางที่ 5.3 ระยะพิตช์ของระดับเสียงขลุ่ยเพียงออ

ระดับเสียง	ระยะพิตช์ (เซนต์)
โด	0
เร	179.6976 ≅ 180
มี	342.4846 ≅ 342
ฟา	470.7917 ≅ 471
ซอล	628.2776 ≅ 628
ลา	772.6486 ≅ 773
ที	999.4876 ≅ 1,000
โด′	1,172.70 ≅ 1,173

ตารางที่ 5.4 ระยะพิตช์ของระดับเสียงเปียโนในหนึ่งทบเสียง ที่มีความถี่ใกล้เคียงย่านของขลุ่ยเพียงออ

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)	ระยะพิตช์ (เซนต์)
โด	523.25	0
เร	587.33	200.00
มี	659.26	400.02
ฟา	698.46	500.01
ซอล	783.99	700.00
ลา	880.00	900.00
ที	987.77	1,100.00
โด′	1,046.50	1,200.00

ทีนี้ ลองพิจารณาระยะพิตช์ของระดับเสียงสากลบ้าง ย่านความถี่เสียงตามตารางที่ 5.4 ได้เลือกตัดตอนมาจากตารางที่ 3.1 ซึ่งแสดงความถี่ของเสียงเปียโน ได้คัดเลือกช่วงหนึ่งทบเสียง ที่มีความถี่ในย่านใกล้เคียงกับความถี่เสียงขลุ่ยเพียงออ กล่าวคือ โด ปรากฏที่ความถี่ 523.25 Hz และ โด′ ปรากฏที่ 1,046.50 Hz ระยะพิตช์ที่ปรากฏในตารางที่ 5.4 สะท้อนให้เห็นว่าระดับเสียงสากลถูกกำหนดด้วยระยะพิตช์ที่มีค่าลงตัว การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของระดับเสียงสากลอย่างเต็มเสียง กำหนดโดยระยะพิตช์เท่ากับ 200 ส่วน การเพิ่มขึ้นหรือลดลงครึ่งเสียง มีระยะพิตช์เป็น 100 ถึงแม้จะวิเคราะห์ทบเสียงอื่นที่สูงหรือต่ำกว่านี้ ก็จะได้ผลเหมือนกัน

ถ้าย้อนกลับมาพิจารณา ค่าระยะพิตช์ตามตารางที่ 5.3 ของขลุ่ยเพียงออ เพื่อให้ดูง่ายขึ้น อาจพิจารณาตัวเลขจำนวนเต็มโดยประมาณ จะเห็นได้ว่า ระยะพิตช์ที่เพิ่มขึ้น เมื่อระดับเสียงไล่จากต่ำไปสูง มีอัตราการเพิ่มขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอ ดังนั้น สิ่งที่เป็นลักษณะอันโดดเด่น ของระดับเสียงแบบไทย คือ อัตราส่วนระหว่างระดับเสียงสองระดับที่ติดกัน มีค่าคงที่ และนี่คือความเป็นไทยทางวิทยาศาสตร์ ของศิลปศาสตร์อันวิจิตรอย่างไทย

เพื่อให้มั่นใจต่อผลการศึกษาวิจัย จึงขอนำเสนอข้อมูลอีกชุดหนึ่ง ที่เป็นผลจากการวิเคราะห์เสียงของระนาดเอกเหล็ก การบันทึกเสียงระนาดเอกเหล็ก เลือกบันทึกหนึ่งทบเสียง ที่เป็นย่านเดียวกันกับของขลุ่ยเพียงออ การบันทึกกระทำในวันเดียวกัน เมื่อบันทึกเสียงขลุ่ยเสร็จ ก็ได้ทำการบันทึกเสียงระนาดเอกเหล็กในทันที ด้วยการตีรัวไล่ไปทีละลูก สภาพแวดล้อมในขณะบันทึก อยู่ในสภาวะควบคุมเดียวกัน เหมือนดังที่ได้อธิบายไว้ในบทต้นๆ การดำเนินงานวิเคราะห์สัญญาณ ปฏิบัติเช่นเดียวกันกับการวิเคราะห์เสียงขลุ่ยเพียงออทุกประการ ผลที่ได้จากวิธี DFT(FFT) และ STFT ได้รับการนำมาเฉลี่ยและแสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ความถี่เฉลี่ยของระดับเสียงระนาดเอกเหล็กในทบเสียงเดียวกันกับขลุ่ยเพียงออ

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)	ระยะพิตช์ (เซนต์)	อัตราส่วนความถี่ของระดับเสียงติดกัน
โด	471.43	0	เร:โด ≅ 1.11
เร	521.43	174.5160 ≅ 175	มี:เร ≅ 1.10
มี	571.43	333.0399 ≅ 333	ฟา:มี ≅ 1.10
ฟา	621.43	478.2580 ≅ 478	ซอล:ฟา ≅ 1.11
ซอล	692.86	666.6244 ≅ 667	ลา:ซอล ≅ 1.10
ลา	764.29	836.4919 ≅ 836	ที:ลา ≅ 1.10
ที	842.86	1,005.9000 ≅ 1,006	โด′:ที ≅ 1.12
โด′	942.86	1,200.00 = 1,200	

ความถี่ของระดับเสียงระนาดเอกเหล็กที่วัดได้ ใกล้เคียงกับระดับเสียงของขลุ่ยเพียงออมาก ถึงแม้ว่าค่าตัวเลขแสดงความถี่ รวมทั้งระยะพิตช์จะมิได้เท่ากันทุกประการ ในทั้งสองกรณี ลักษณะเช่นนี้ย่อมเกิดขึ้นได้ เพราะการผลิตเครื่องดนตรีไทยในปัจจุบัน ใช้วิธีเทียบเสียงด้วยการฟังของช่างผู้ผลิตเป็นเกณฑ์ แต่การที่ความถี่ระดับเสียงจากเครื่องดนตรีแต่ละชิ้น มิได้มีค่าตัวเลขเท่ากันทุกประการ ก็อาจมิได้ส่งผลเสียอย่างเด่นชัดนัก ถ้าความแตกต่างมีไม่มาก เพราะมนุษย์ไม่สามารถแยกแยะได้จากการฟัง นอกจากนั้นยังมีความเป็นไปได้ที่ว่า ความถี่ที่ไม่เท่ากันเสียทีเดียว ทำให้มีฮาร์มอนิคทางความถี่เสียงจำนวนมาก เมื่อฮาร์มอนิคเหล่านี้ผสมผสานกันในอากาศ ขณะที่

นักดนตรีบรรเลง ฮาร์มอนิคทางความถี่เสียงอาจเสริมกัน เป็นผลให้เกิดสเปกตรัมทางความถี่ ที่ต่อเนื่อง ไม่ขรุขระ ทำให้เสียงที่ได้ยินมีความไพเราะนุ่มนวล อย่างน่าฟัง เมื่อพิจารณาระยะพิตช์ตามตารางที่ 5.5 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับกรณีของขลุ่ยเช่นกัน ในกรณีของระนาดเอกเหล็ก หนึ่งทบเสียงมีระยะพิตช์ 1,200 เซนต์ พอดี เหมือนกับที่ทฤษฎีฟิสิกส์ทางดนตรีของฝรั่งได้ระบุไว้ กรณีนี้อธิบายได้ว่า ลักษณะการกำเนิดของเสียง มาจากของแข็งกระทบกัน นั่นคือ ไม้ระนาดตีรัวบนลูกระนาดที่ทำจากโลหะ โลหะแทบจะไม่ยืดหดเลยในอุณหภูมิห้องตามปกติ ไม้ระนาดก็เช่นเดียวกัน ดังนั้น พลังงานของเสียงที่เกิดขึ้น จึงเข้มข้นและสม่ำเสมอ โอกาสที่ความถี่ของเสียงจะเลื่อนไปจึงมีน้อยมากด้วยคุณสมบัติของโลหะที่เป็นของแข็ง ผิดกับกรณีของขลุ่ย ซึ่งมีลักษณะการเกิดเสียงเป็นการเคลื่อนไหว ของลำอากาศโดยตรงในหลอดหรือกระบอกไม้ อากาศเป็นของไหลมีความไวมาก ต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นแม้เพียงเล็กน้อย จึงมีความเป็นไปได้ที่ความถี่ของเสียงอาจเลื่อนไปบ้างไม่มากนัก นอกจากนั้น ไม้เป็นวัสดุที่มีรูพรุน(อาจไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาเปล่า) สามารถยืดหดตามสภาพอากาศ ได้ง่ายกว่าโลหะที่เป็นลูกระนาดเหล็ก นี้เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่อาจส่งผลต่อการเลื่อนของความถี่ ดังนั้นที่จะให้ความถี่จากเสียงของขลุ่ยตรงกับความถี่จากเสียงระนาดเหล็กเสียทีเดียวนั้น ในปัจจุบันคงยังเป็นไปไม่ได้ แต่ถ้าในอนาคต หากเราอยากให้เครื่องดนตรีแต่ละชิ้น เมื่อบรรเลงเสียงเดียวกัน ในทบเสียงเดียวกันด้วย ความถี่ต้องตรงกันพอดี เราก็อาจต้องเพิ่มเติมกระบวนการบางอย่าง ในขั้นตอนการผลิตเครื่องดนตรี เช่น เพิ่มการวัดละเอียดทั้งขนาดหรือในทางมิติ และในทางความเที่ยงตรงของเสียง เพิ่มการอบอย่างพอเหมาะ เพิ่มการตรวจวัดคุณสมบัติของเนื้อไม้ ก่อนที่จะนำไปผลิตเป็นเครื่องดนตรี เป็นต้น ไม่เพียงแต่

หนทางปฏิบัติในการผลิตอาจปรับเปลี่ยนไป แนวคิดก็อาจปรับเปลี่ยนไปด้วย เช่น ในวันหนึ่งข้างหน้า เราอาจเห็นขลุ่ยที่ทำจากโลหะ มีน้ำหนักเบา ภายในบุด้วยวัสดุดูดซับเสียงเพื่อช่วยให้เสียงเมื่อบรรเลง มีความนุ่มนวลไพเราะ ก็อาจเป็นได้

อย่างไรก็ตาม การที่จะเพิ่มเติม ปรับเปลี่ยนสิ่งใดนั้น เป็นการลงทุนทั้งสิ้น จะต้องตอบคำถามให้ได้ว่า ทำแล้วคุ้มหรือไม่ เช่น ถ้าปรับแต่งให้ความถี่ของเสียง ดังที่อธิบายมาข้างต้นนั้น ตรงกันพอดีเลยทีเดียว เครื่องดนตรีจะให้เสียงที่ไพเราะขึ้นไหม ทั้งเมื่อบรรเลงเดี่ยวและบรรเลงรวมวง หรือว่าความไพเราะจะลดน้อยถอยลง เหล่านี้คงยังเป็นเรื่องที่น่าคิด ติดตาม และพิสูจน์ให้เห็นจริง ทั้งด้วยวิธีปฏิบัติทางดนตรีและทางวิทยาศาสตร์

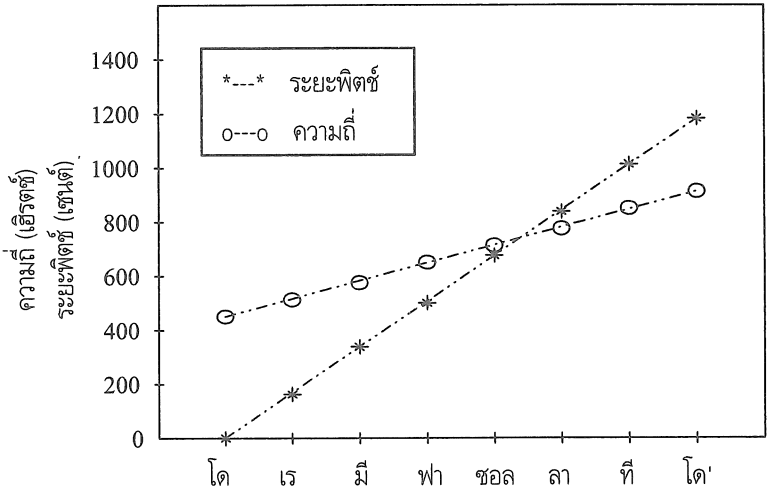
6
สรุปและส่งท้าย

ในตอนสรุปนี้ คงจะไม่พยายามกล่าวซ้ำในรายละเอียด ที่เคยได้อธิบายไว้แล้วในหนังสือ แต่จะชี้ถึงประเด็นสำคัญต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการดำเนินงานวิจัย และประเด็นที่ค้นพบ ตลอดจนความคิดความเห็นที่อยากนำเสนอไปถึงท่านผู้อ่าน

การตรวจวัดและบันทึกเสียงที่ดำเนินการ ต้องใช้ไมโครโฟนเป็นอุปกรณ์วัดหรือตรวจจับสัญญาณเสียง คำอธิบายเกี่ยวกับไมโครโฟนและการเลือกใช้ปรากฏในตอนที่ 2 ซึ่งไมโครโฟนที่ใช้เป็นแบบอิเล็กเทรด ใช้ได้ดีกับเครื่องดนตรีประเภทเครื่องลมไม้ ผู้อ่านที่สนใจในด้านการจัดเครื่องมือการตรวจวัดทางวิศวกรรม อาจศึกษารายละเอียดได้จากตอนที่ 4 นอกจากนั้นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สัญญาณ ซึ่งเป็นคณิตศาสตร์รูปแบบต่างๆ ก็ได้กล่าวถึงไว้ในตอนที่ 4 เช่นกัน

รายละเอียดผลการวิเคราะห์นำเสนอในตอนที่ 5 นั้น มีสิ่งสำคัญที่สรุปได้ คือ ผลการวิเคราะห์สามารถยืนยันในทางวิทยาศาสตร์ได้ว่า ระดับเสียงแบบไทยในหนึ่งทบเสียง มีระดับเสียงเต็ม ความถี่ของระดับเสียงจากโดต่ำไปโดสูง มีอัตราเพิ่มขึ้นอย่างคงที่สม่ำเสมอ (ดูรูปที่ 6.1) อัตราส่วน

ความถี่ของสองระดับเสียงที่ติดกันมีค่าคงที่ โดยประมาณเท่ากับ 1.1 ในหนึ่งทบเสียงขลุ่ยเพียงออให้ความถี่ในย่าน 457-900 เฮิรตซ์ ส่วนระนาดเอกเหล็ก



รูปที่ 6.1 ความถี่ของระดับเสียงแบบไทยในหนึ่งทบเสียงและระยะพิตช์ (เส้นประใช้แสดงแนวโน้มของข้อมูลเท่านั้น)

ให้ความถี่ในย่าน 471-942 เฮิรตซ์ และพบว่า ระยะพิตช์จาก 0-1,200 เซนต์ในหนึ่งทบเสียง มีอัตราการเพิ่มขึ้นคงที่สม่ำเสมอด้วย (ดูรูปที่ 6.1)

ถ้าลองสร้างตารางความถี่ระดับเสียงดนตรีไทย ในหนึ่งทบเสียงเชิงทฤษฎี ก็สามารถทำได้ โดยเริ่มต้นด้วยเสียงโดต่ำ มีความถี่ 464 เฮิรตซ์ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยระหว่าง ค่าความถี่เสียงโดของขลุ่ยเพียงออกับระนาดเอกเหล็ก จากนั้นหาค่าเฉลี่ยของอัตราส่วนความถี่ได้ มีค่าเท่ากับ 1.1057 ซึ่งเป็นค่า

เฉลี่ยของอัตราส่วนความถี่ที่แสดงไว้ในตารางที่ 5.5 จากนั้นก็คำนวณเพื่อสร้างตารางระดับเสียง ดังตารางที่ 6.1 ด้วยการกำหนดให้ทุกๆระดับเสียงที่สูงขึ้นหนึ่งระดับ ความถี่ก็จะสูงขึ้น 1.1057 เท่าเสมอ

ตารางที่ 6.1 ความถี่ของระดับเสียงดนตรีไทย เชิงทฤษฎี

ระดับเสียง	ความถี่ (Hz)
โด	464.00
เร	513.04
มี	567.27
ฟา	627.23
ซอล	693.53
ลา	766.84
ที	847.89
โด	937.52

การที่สรุปในแนวทางสนับสนุน ความเห็นที่ว่าระดับเสียงดนตรีไทยเป็นเสียงเต็มนั้น ก็มิได้หมายความว่า จะบรรเลงดนตรีให้เกิดครึ่งเสียงไม่ได้ แต่ถ้าพิจารณาอย่างเป็นธรรม เครื่องดนตรีไทยจำนวนมาก อย่างเช่น ในวงมโหรีเครื่องใหญ่ ล้วนเป็นเครื่องที่เลื่อนลดเสียงไม่ได้ขณะบรรเลง และทำครึ่งเสียงไม่ได้เสียด้วย เช่น บรรดาเครื่องตีทั้งหลาย แต่เครื่องดนตรีบางชนิด เช่น ซอ ขลุ่ย ปี่ ก็ยังสามารถบรรเลงได้ด้วยเทคนิคพิเศษ ที่เรียกว่าการโหน ทำให้เกิดครึ่งเสียงได้อย่างไพเราะ เช่น ในการบรรเลงเพลงสำเนียงแขก การที่

ระดับเสียงแบบไทยมีเพียง 7 ระดับ วนไปวนมา ก็มิได้ทำให้เพลงไทยขาดความไพเราะแต่ประการใดเลย ด้วยระดับเสียงอันจำกัดแต่มีกลอนเพลงอันไพเราะนั้น ย่อมแสดงถึงอัจฉริยภาพของคีตกวีไทย ในทุกยุคทุกสมัยที่สืบทอดกันมาแต่โบราณกาล และสิ่งนี้จึงเป็นสิ่งที่คนไทยทุกคนควรภาคภูมิใจ

ดังที่ผมได้เกริ่นนำไว้แต่ต้นว่า การดำเนินงานชิ้นนี้เป็นจุดเริ่มต้นของการเดินทางอีกยาวไกล ที่จะนำการวิจัยทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เข้ามามีส่วนร่วมในการพัฒนาและจรรโลงดนตรีไทยในทุกๆด้าน ไม่ว่าจะด้านการผลิตและมาตรฐานการผลิตเครื่องดนตรี เทคนิคการประพันธ์เพลง และเทคนิคการบรรเลง เป็นต้น ผมมีความหวังที่จะเห็นดนตรีไทยในเชิงอนุรักษ์อยู่คู่กับคนไทยอย่างมีสง่าราศรีตลอดไป ผมมีความฝันที่จะเห็นพัฒนาการของดนตรีไทย ออกมาในแนวแปลกใหม่ เป็นดนตรีร่วมสมัย ที่สามารถคงความเป็นไทยไว้ได้อย่างดี เมื่อลูกหลานของเรามีบทเพลงอันไพเราะไว้ให้ฟังได้อย่างชื่นใจ ภายในบทเพลงเหล่านั้น ซ่อนไว้ด้วยความงดงาม นุ่มนวลอย่างไทย ผมเชื่อเหลือเกินว่าความงามในวิถีชีวิตอย่างไทย จะได้รับการซึมซาบผ่านบทเพลง น่าจะมีส่วนช่วยให้สังคมของเรา คงความเป็นเอกลักษณ์ไทยไว้ได้อย่างไม่เสื่อมคลาย จริงไหมครับ

เอกสารอ้างอิง

ชัย อยู่สวัสดิ์. (2540). กายวิภาคของหู. ใน สุภาวดี ประคุณหังสิต และ บุญชู กุลประดิษฐารมณ์ (บรรณาธิการ). **ตำราโสต นาสิก ลาริงซ์วิทยา** (หน้า 2). กรุงเทพฯ: โฮลิสติก พับลิชชิ่ง.

บริษัท รีดเดอร์ส ไดเจสท์ (ประเทศไทย) จำกัด. (2541). **พื้นฐานแห่งกายมนุษย์.** กรุงเทพฯ: อมรินทร์พริ้นติ้ง.

ปัญญา รุ่งเรือง. (2517). **ประวัติการดนตรีไทย.** กรุงเทพฯ: ไทยวัฒนาพานิช.

มนตรี ตราโมท. (2540). **ดุริยางคศาสตร์ไทย: ภาควิชาการ.** กรุงเทพฯ: มติชน.

สันทัด ตัณฑนันทน์. (2542). บันทึกเพลงไทยเป็นโน้ตสากลอย่างไร. ใน สมชาย รัศมี (บรรณาธิการ). **ครูดนตรีของแผ่นดิน** (หน้า 1-108). กรุงเทพฯ: สถาบันราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา.

อุทิศ นาคสวัสดิ์. (2514). **ทฤษฎีและการปฏิบัติดนตรีไทย.** กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์คุรุสภา.

Allen, J. B., and Rabiner, L. R. (1977). A unified approach to short-time Fourier analysis and synthesis. **Proceedings of the IEEE.** 65 (11): 1558-1564.

Alten, S. R. (1999). **Audio in media.** USA: Wadsworth.

Antoniou, A. (1993). **Digital filters: Analysis, design, and applications.** Singapore: McGraw-Hill.

Cannon, R. H. (1967). **Dynamics of the physical systems.** New York: McGraw-Hill.

Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., and Sanders, J. V. (1982). **Fundamentals of acoustics.** Singapore: John Wiley & Sons.

Kronland-Martinet, R. (1988). The wavelet transform for analysis, synthesis, and processing of speech and music sounds. **Computer music journal.** 12 (4): 11-20.

Lim, J. S., and Oppenheim, A. V. (1988). **Advanced topics in signal processing.** USA: Prentice Hall.

Noll, A. M. (1995). **Introduction to telecommunication electronics.** Boston: Artech House.

Risset, J-C., and Wessel, D. L. (1982). Exploration of timbre by analysis and synthesis. **The psychology of music.** : 25-58.

RS Components Ltd. (2001). **Musical instrument microphones** [On-line]. Available: http://www.rswww.com/All Products/Electrical/Audio and Video Systems/Microphones and Accessories.

Rumsey, F., and McCormick, T. (1994). **Sound & recording: An introduction.** Great Britain: Focal Press.

Smith, B. J., Peters, R. J., and Owen, S. (1996). **Acoustic and noise control.** Harlow: Addison Wesley Longman.

Vercoe, B. L., Gardner, W. G., and Scheirer, E. D. (1998). Structured audio: Creation, transmission, and rendering of parametric sound representation. **Proceedings of the IEEE.** 86 (5): 922-940.

Wood, A. (1975). **The physics of music.** (revised by Bowsher, J. M., 7th ed.). USA: John wiley & Sons.

Zitzewitz, P. W., Neff, R. F., and Davids, M. (1995). **Merril physics: Principles and problems.** New York: Glencoe.