

การเพิ่มประสิทธิภาพของปีก โดยการกระตุ้นของคลื่นเสียงจากภายนอก  
INCREASING AIRFOIL PERFORMANCE BY EXTERNAL ACOUSTIC EXCITATION.

นาย ชรินทร์ ทรงจิตภักดี \* ; ผศ. ดร. ปองวิทย์ ศิริโพธิ์ \*\*

ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศยาน  
 คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ในการบินขึ้นหรือร่อนลงของเครื่องบินนั้น ส่วนใหญ่มักจะเกิดการรบกวนของปีก ซึ่งเกิดจากการเปิดมุมปะทะของปีกมากเกินไป จึงทำให้เกิดการแยกไหลของอากาศ เป็นผลให้สัมประสิทธิ์แรงยกตกลงมาก

ในการวิจัยนี้ได้เสนอแนวคิดที่พยายามให้เกิดการแยกไหลของอากาศให้น้อยที่สุด ซึ่งมีอยู่หลายวิธีที่นิยมปฏิบัติกัน เช่น vortex generator , roughness trips , blowing and suction , heating element ส่วนในการวิจัยนี้จะใช้การกระตุ้นด้วยเสียงแบบภายนอก

การศึกษาวิจัยและการทดลองนี้มีจุดประสงค์เพื่อการศึกษาผลที่เกิดจากการใช้คลื่นเสียงกระตุ้นจากภายนอก ในการทำให้อากาศยานที่ไหลผ่านแทนอากาศเกิดการแยกไหลน้อยลง หรือทำให้เกิดชั้นช้าลง ซึ่งมีผลต่อสมรรถนะของแทนอากาศ ผลการทดลองพบว่า หลังจากให้เกิดการกระตุ้นของคลื่นเสียงถึงอากาศยานที่ไหลผ่านแทนอากาศ จะเกิดการแยกไหลน้อยกว่าเดิมที่ซึ่งยังไม่กระตุ้นด้วยคลื่นเสียง และยังพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงยกของแทนอากาศมีค่าเพิ่มขึ้น นั่นก็คือสมรรถนะทางอากาศพลศาสตร์ของแทนอากาศเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

ในการกระตุ้นด้วยเสียงนั้น จะต้องเลือกคลื่นเสียงที่มีความถี่ที่เหมาะสมกับแทนอากาศ แต่ละแบบซึ่งจะเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่า shear layer instability frequency ของแทนอากาศ เมื่อแทนอากาศเปิดมุมปะทะน้อยกว่ามุมรบกวนเล็กน้อย และจะมีค่าใกล้เคียงกับค่า vortex shedding frequency of the wake เมื่อแทนอากาศเกิดมุมปะทะมากกว่ามุมรบกวน

ปัจจัยของคลื่นเสียงที่ให้ความสนใจ ในการทดลองครั้งนี้ได้แก่ ความถี่ แอมพลิจูด และรูปร่างของ pulse คลื่นเสียง

- \* : นิสิตชั้นปีที่ 4 ภาควิชาการบินและอวกาศยาน .
- \*\* : อาจารย์ประจำ ภาควิชาการบินและอวกาศยาน .

## Introduction

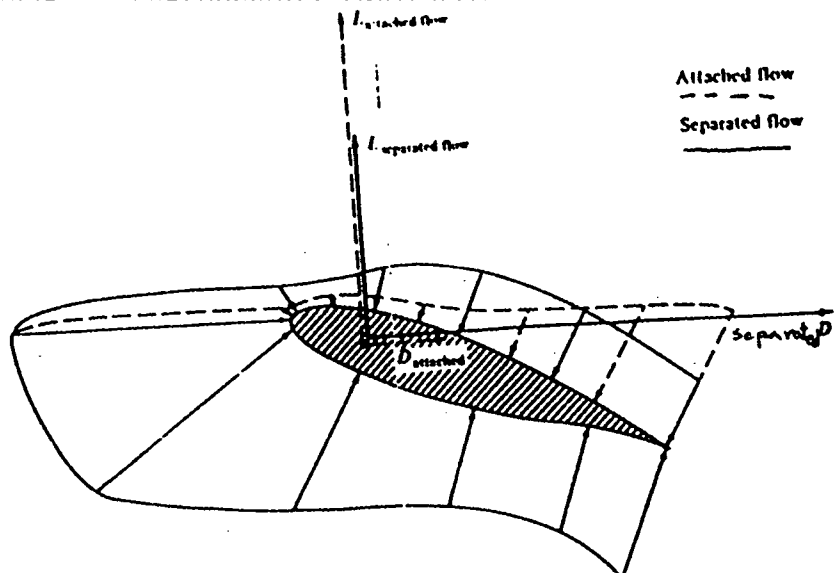
ในการไหลที่มีความเสียดทาน ทำให้ความเค้นเฉือนที่ผิวของวัตถุซึ่งมีส่วนทำให้เกิดแรงต้านทางอากาศพลศาสตร์อีกทีหนึ่ง คือแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานผิว อย่างไรก็ตาม ความเสียดทานยังทำให้เกิดปรากฏการณ์อีกอย่างหนึ่งที่เรียกว่า การไหลแยกตัว (flow separation) อีกด้วย ซึ่งทำให้เกิดแรงต้านอีกชนิดหนึ่งเรียกว่า แรงต้านที่เกิดจากความดันเนื่องจากการแยกไหล (pressure drag due to separation)

เมื่อ airfoil มีมุมปะทะต่ำ ซึ่งมีเส้นกระแสการไหล (streamline) ที่ราบเรียบ และการกระจายความดันดังแสดงในรูป เห็นได้ว่าตรงบริเวณชายหน้าปีก ค่าความดันส่วนใหญ่สูง เมื่ออากาศไหลผ่าน airfoil ความดันจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว ถึงค่าต่ำสุดซึ่งจะต่ำกว่าความดันสถิต (static pressure) ของกระแสอิสระ  $P_\infty$  ต่อจากนั้นเห็นจากกราฟได้ว่า ค่าความดันจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงกว่า  $P_\infty$  เล็กน้อยบริเวณชายหลังปีก ขานความดันที่เพิ่มขึ้นนี้เรียกว่า ขานเกรเดียนต์ความดันต่อต้าน (adverse pressure gradient) ซึ่งนิยามเป็นขานที่  $dP/dx$  เป็นบวก ในกรณีนี้ มุมปะทะมีค่าต่ำ ทำให้  $dP/dx$  มีค่าปานกลาง ไม่น่าหนัก เป็นให้การไหลส่วนใหญ่เป็นแบบเกาะติดผิว airfoil ดังนั้นแรงต้านส่วนใหญ่จึงเป็นแรงต้านเนื่องจากความเสียดทานผิว

ส่วนในกรณีที่ airfoil มีมุมปะทะสูง ถ้าสมมติให้อากาศยังคงมีสภาพการไหลเป็นแบบเกาะติดผิวอยู่นั้น จะทำให้การกระจายความดันที่ผิวบน เป็นไปตามรูป ดังแสดงด้วยเส้นประ สังเกตเห็นว่า จากบริเวณชายหน้าปีกถัดมา ความดันจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว มีค่าต่ำกว่าความดันสถิต  $P_\infty$  ของกระแสอิสระมาก ต่อมาความดันก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็วจนสูงกว่า  $P_\infty$  สังเกตให้คิดเห็นว่า ในช่วงที่ความดันเพิ่มขึ้นเร็วขานนั้น จะมีค่า  $dP/dx$  มากกว่าในกรณีที่ airfoil มีมุมปะทะต่ำ อยู่มาก ค่า  $dP/dx$  ที่สูงมากนี้เองเป็นตัวการที่ทำให้สนามการไหลจริงๆ มีแนวโน้มที่จะแยกตัวออกจากผิว

ลองจินตนาการว่าเรามีวัตถุทรงกลมที่มีความเร็ว เมื่อผ่านเข้าไปในบริเวณที่มีแรงดันที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ถ้าวัตถุมีความเร็วสูงพอ ก็จะวิ่งผ่านบริเวณนี้ออกมาได้ แต่ถ้าวัตถุมีความเร็วหรือพลังงานไม่เพียงพอที่จะผ่านบริเวณนั้นออกมาได้วัตถุก็จะช้าลงเรื่อยๆ จนหยุดและเริ่มวิ่งกลับ เปรียบเสมือนโมเลกุลอากาศที่ไหลผ่าน airfoil ถ้าโมเลกุลอากาศมีความเร็วไม่เพียงพอ เมื่อผ่านเข้าไปในบริเวณที่มี adverse pressure gradient สูงมาก ความเร็วก็จะลดลงจนหยุดและเริ่มวิ่งกลับ ซึ่งก็คือ การเกิดกระแสวน (wake)

ต่อมาพิจารณารูปที่ 1 ซึ่งแสดง airfoil ที่มีมุมปะทะสูง พร้อมด้วยการกระจายความดันผิวจริงๆ แทนด้วยลูกศรเส้นทึบ ส่วนเส้นประแทนการกระจายความดันของส่วนการไหลที่ไม่แยกตัว



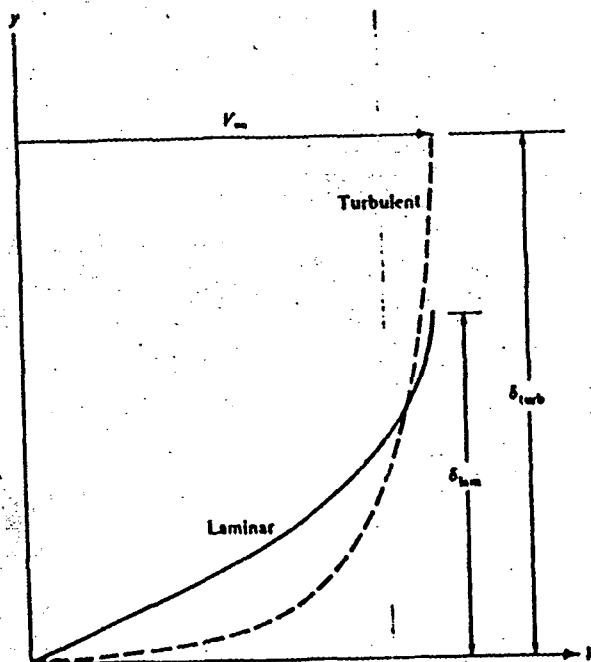
รูปที่ 1 เปรียบเทียบการกระจายความดัน แรงยก และแรงต้านระหว่างการไหลแยกตัว และเกาะติดผิว

จากรูปจะเห็นว่า การแยกไหลไม่มีผลต่อการกระจายความดันของผิวล่าง และเมื่อเปรียบเทียบอุกสรเส้นกับกับอุกสรเส้นประของผิวบนบริเวณใกล้ขาหน้าปีก จะเห็นว่ายาวกว่า แสดงว่าความดันสูงกว่า ดังนั้นเมื่อมีการไหลแยกตัวแรงยกจึงน้อยกว่า นอกจากนั้นการไหลแยกตัวนั้นทำให้การกระจายความดันในทางระดับไม่เท่ากัน ทำให้เกิดแรงค้ำเนื่องจากความดันสถิตในทิศทางแรงค้ำ

กล่าวถึงลักษณะของการไหลของอากาศผ่าน airfoil นั้น การไหลที่มีความหนืดมีอยู่ 2 แบบ คือ

- การไหลแบบละมินา (laminar flow) เป็นการไหลที่มีเส้นกระแสไหลราบเรียบและสม่ำเสมอ ซึ่งของไหลเคลื่อนที่อย่างราบเรียบไปตามเส้นกระแส

- การไหลเทอร์บูเลนต์ (turbulent flow) เป็นการไหลที่เส้นกระแสสลายตัว ซึ่งของไหลเคลื่อนที่ในลักษณะที่ปั่นป่วน อลวนไม่เป็นระเบียบ



รูปที่ 2 โพรไฟล์ความเร็วของชั้นจลนศาสตร์ laminar และ turbulent

จากรูป จะเห็นว่าโพรไฟล์ความเร็วของ turbulent อ้วนกว่าหรือเต็ม(สี่เหลี่ยม)กว่า นั่นคือ การไหลแบบ turbulent ในชั้นจลนศาสตร์ (boundary layer) จะมีความเร็วหรือพลังงานมากกว่าการไหลแบบ laminar จึงมีแนวโน้มจะแยกตัวได้ยากกว่า

ดังนั้นเมื่อต้องการให้อากาศเกิดการแยกไหลน้อยที่สุด จึงต้องพยายามทำให้อากาศที่ไหลในชั้นจลนศาสตร์มีความเร็วเพิ่ม หรือนั่นคือ ถ้าจะป้องกันไม่ให้สนามการไหลแยกตัวต้องทำให้ชั้นจลนศาสตร์เป็นแบบ turbulent

มีวิธีการหลายวิธีที่ใช้กันในการลดการแยกไหลของอากาศ เช่น vortex generator , roughness trips , blowing and suction , heating element และการกระตุ้นด้วยเสียง (acoustic excitation)

การกระตุ้นด้วยเสียงนั้นแบ่งออกเป็น 2 แบบ ใหญ่ คือ

- การกระตุ้นด้วยเสียงแบบภายใน (Internal acoustic excitation)
- การกระตุ้นด้วยเสียงแบบภายนอก (External acoustic excitation)

การวิจัยนี้จะใช้วิธี การกระตุ้นด้วยเสียงแบบภายนอก

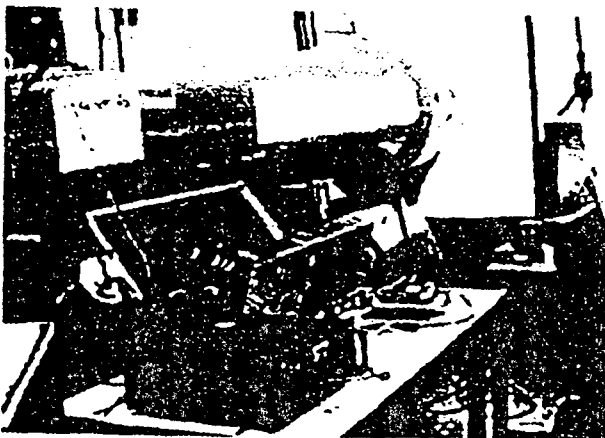
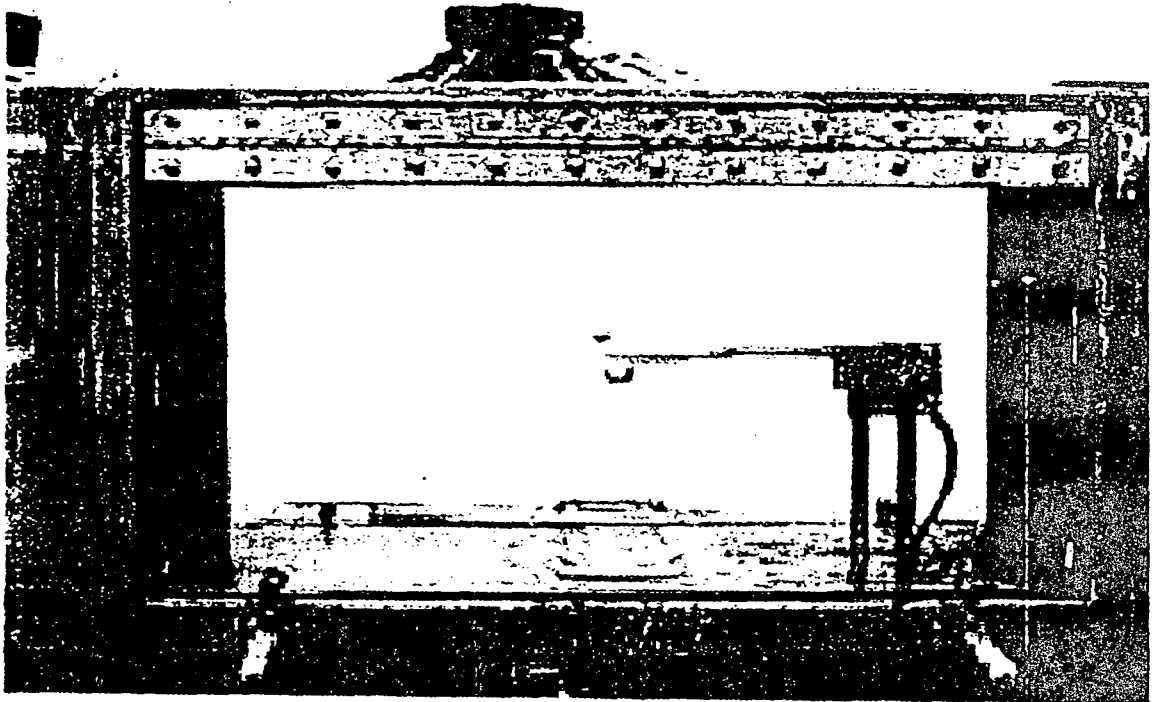
### Experimental facilities

การทดลองครั้งนี้ทำการทดลอง และเก็บข้อมูลต่าง ๆ โดยใช้อุโมงค์ลมความเร็วต่ำกว่าเสียง ชนิดวงจรเปิด หน้าตัดของส่วนทดลอง (test section) มีขนาด  $12 \times 12$  นิ้ว ความเร็วลมในส่วนทดลองอยู่ในช่วง 0-145 ไมล์/ชม. ขับเคลื่อนโดยพัดช่วยมอเตอร์ขนาด 10 แรงม้า มีอัตราส่วนพื้นที่ทางเข้าต่อพื้นที่ส่วนทดลอง เท่ากับ 9.5:1

โมเดลแพนอากาศมีหน้าตัดแบบ clarkY - 1x ความยาวคอรัค 6.2 ซม. ความยาวสแปน 26.2 ซม.

การกระตุ้นด้วยเสียงนั้นกระตุ้นจากภายนอก โดยทางลำโพงขนาด 200 W ลำโพงจะต่อเข้ากับแอมพลิฟายเออร์ (amplifier) และเครื่องกำเนิดสัญญาณ

เก็บข้อมูลโดยคอมพิวเตอร์ที่รับสัญญาณโดยตรงจากอุโมงค์ลม พร้อมทั้งคำนวณค่า CL, CD โดยผ่านโปรแกรมที่ทำไว้ คอมพิวเตอร์จะเก็บข้อมูลหรือข้อมูลต่อวินาที และจะเฉลี่ยค่าแสดงบนหน้าจอทุก ๆ 5 วินาที ในการทดลองจะเก็บข้อมูลแต่ละค่าเป็นเวลา 2 นาที แล้วนำข้อมูลที่ได้ออกมาหาค่าเฉลี่ยต่อไป นั่นคือ ข้อมูลที่นำมาเขียนกราฟได้จากการหาค่าเฉลี่ยของข้อมูลดิบ 60,000 ค่า



ภาพอุปกรณ์การทดลอง

## ผลกระทบต่อค่า CI

ในการทดลองเพื่อศึกษา ผลการทบทของคลื่นเสียงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงยก (CI) นั้น ปัจจัยที่สนใจในการทดลองคือ ความถี่เสียง ชนิดของรูปคลื่นเสียง และความดังของเสียง ในชั้นแรกหาชนิดของ pulse สัญญาณของคลื่นเสียง ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการกระตุ้นพร้อมกับหาค่าความถี่ที่เหมาะสมของแต่ละรูปคลื่น ในการทดลองนี้ชนิดของสัญญาณเสียงที่ใช้มาจากเครื่อง Signal Generator จะมีทั้งคลื่นสี่เหลี่ยม (square wave) คลื่นสามเหลี่ยม (triangle wave) คลื่นไซน์ (sine wave) และแบบที่เป็นไฟกระตุ้น (pulse)

หาความสัมพันธ์ระหว่างค่า CI กับ มุมปะทะ (angle of attack , AOA) ในกรณีที่มีการกระตุ้นด้วยเสียงที่มีชนิดสัญญาณต่างกันไป ซึ่งจะได้อผลการทดลองดังกราฟรูปที่ 1-5

จากผลการทดลองนั้นจะเห็นได้ว่า ในการกระตุ้นด้วยเสียงนั้น ชนิดของสัญญาณเสียงจะมีผลกระทบต่อค่า CI ซึ่งจะแตกต่างกันออกไป ตามแต่ละชนิด และแต่ละชนิดของสัญญาณเสียงจะมีค่าความถี่ที่เหมาะสมในการกระตุ้น (ค่าความถี่ที่ทำให้ค่า CI เพิ่มขึ้นมากที่สุด) มีค่าไม่เท่ากันด้วย ซึ่งจากกราฟผลการทดลอง สามารถบอกถึงลักษณะการกระตุ้นของเสียงแต่ละชนิดได้

รูปที่ 1 เป็นการกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบสี่เหลี่ยมเปรียบเทียบกับค่า CI กับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น ย่านความถี่ที่เหมาะสมอยู่ที่ประมาณ 400Hz ซึ่งทำให้ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 29.26%

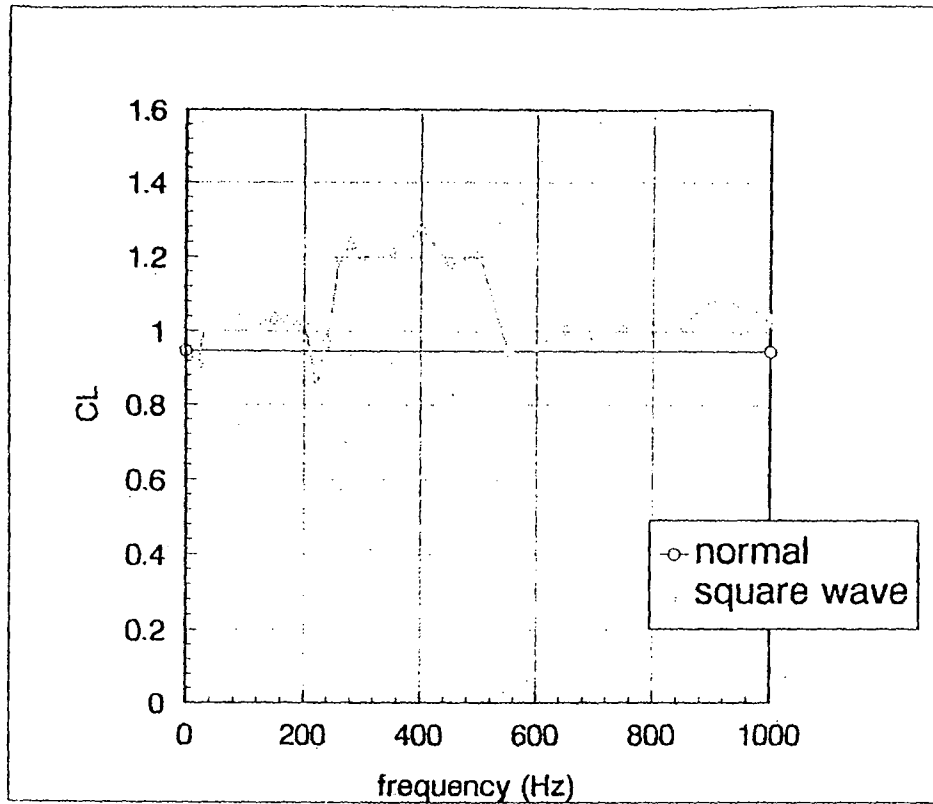
รูปที่ 2 เป็นการกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ สามเหลี่ยม เปรียบเทียบกับค่า CI กับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น ย่านความถี่ที่เหมาะสมประมาณ 280Hz ซึ่งทำให้ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 17.90%

รูปที่ 3 เป็นการกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ sine เปรียบเทียบกับค่า CI กับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น ย่านความถี่ที่เหมาะสมประมาณ 600Hz ซึ่งทำให้ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 21.05%

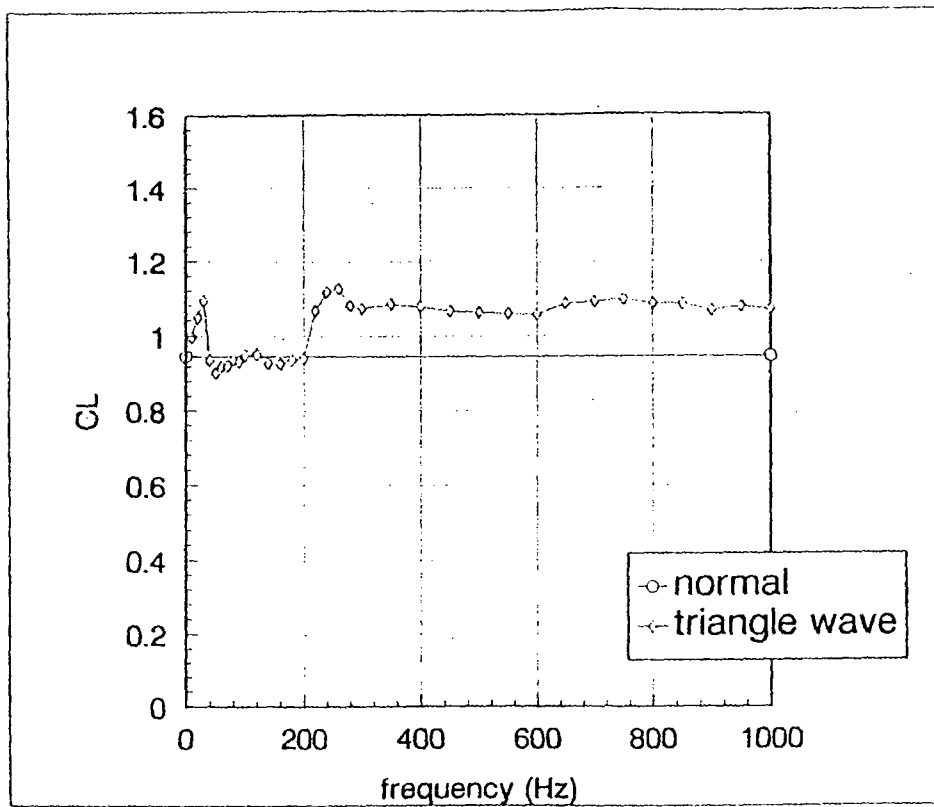
รูปที่ 4 การกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse เปรียบเทียบกับค่า CI กับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น ย่านความถี่ที่เหมาะสมประมาณ 640Hz ซึ่งทำให้ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 49.47%

รูปที่ 5 จะ สังเกตเห็นได้ว่า ชนิดของสัญญาณเสียงแบบ pulse จะมีผลทำให้ค่า CI เพิ่มขึ้นมากที่สุดประมาณ 49.47% ในช่วงความถี่ 640Hz

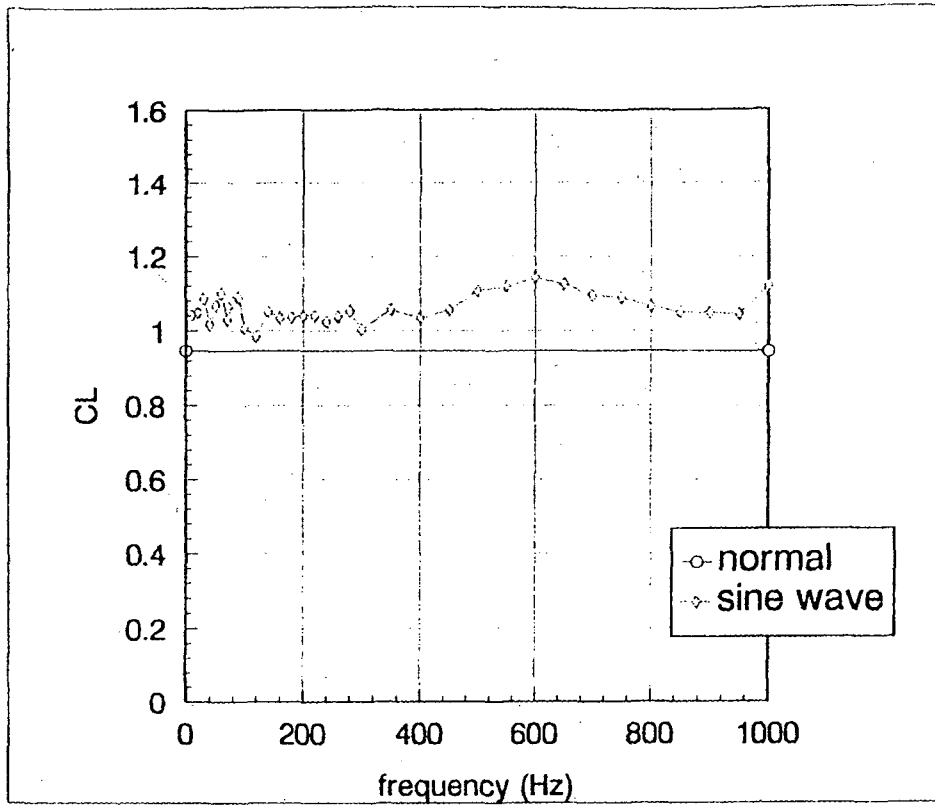
ดังนั้นจากผลการทดลองนี้ ชี้ให้เห็นว่า ชนิดของสัญญาณที่เหมาะสมที่ควรเป็น ชนิดสัญญาณเสียงแบบ pulse โดยที่มีช่วงความถี่ในการกระตุ้นอยู่ในช่วง 640Hz



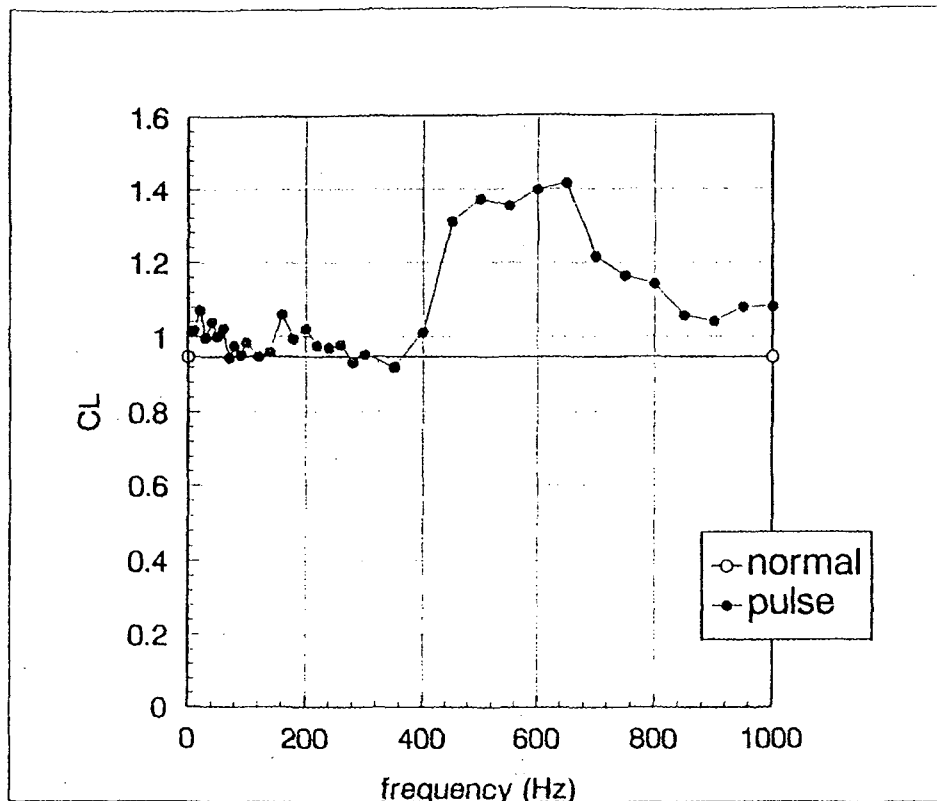
រូបទី 1



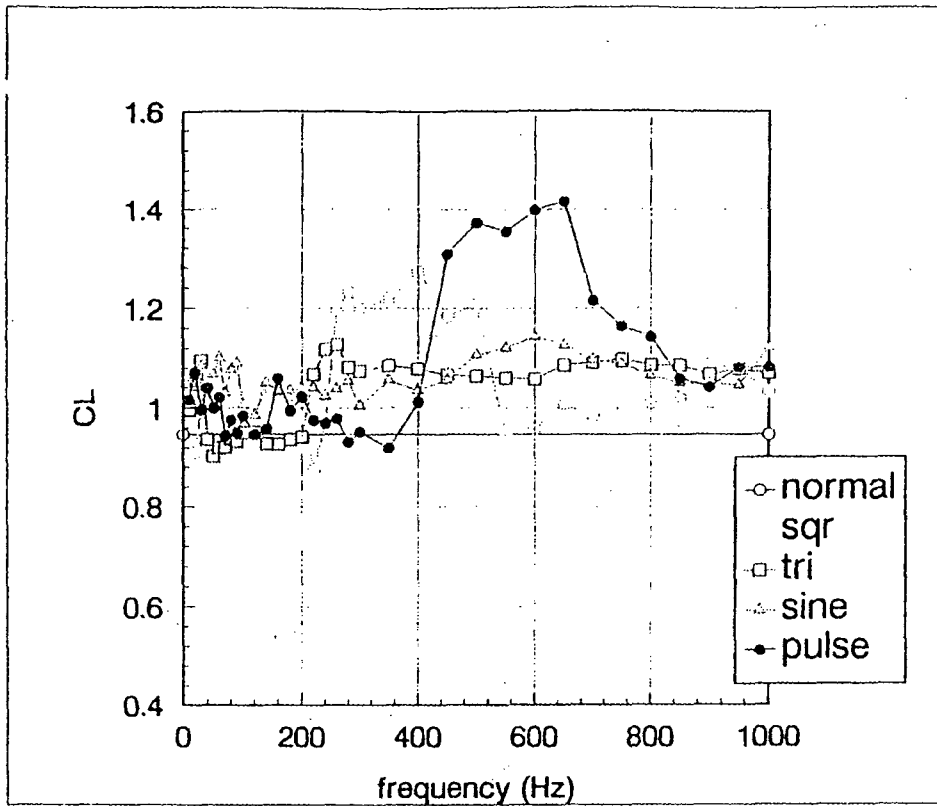
រូបទី 2



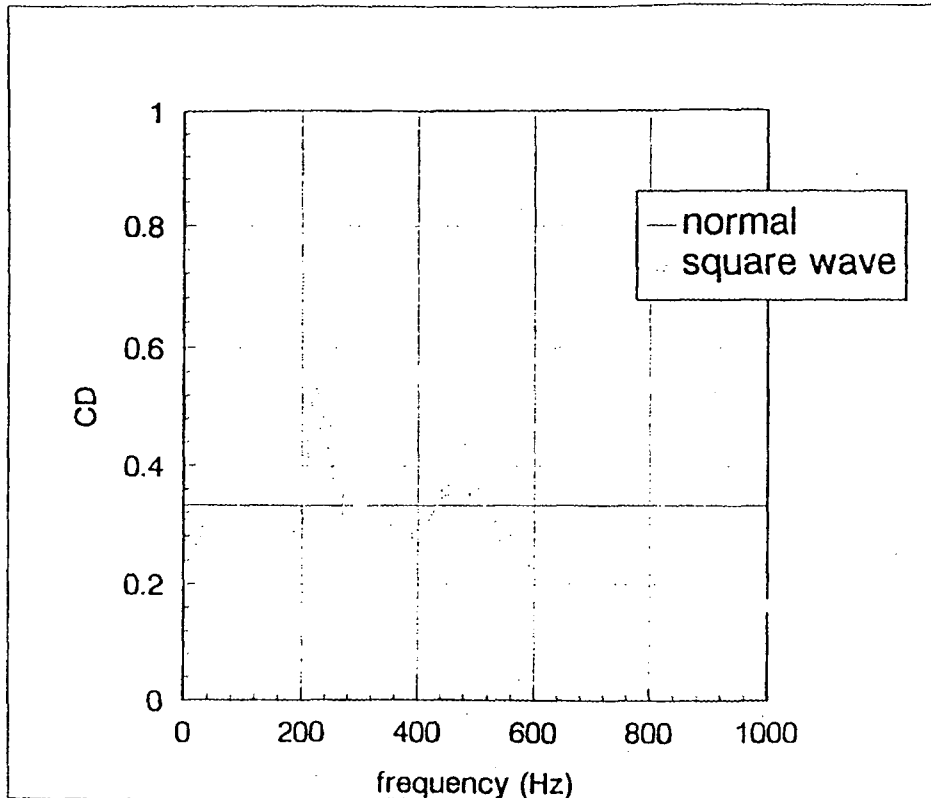
รูปที่ 3



รูปที่ 4



รูปที่ 5



รูปที่ 6



## ผลกระทบต่อกำ Cd

ในการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของคลื่นเสียงที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แรงต้าน ( Cd ) คือ ปัจจัยที่สนใจในการทดลองเหมือนกันกับการศึกษาคุณผลของค่า CI คือ ความถี่เสียง ชนิดของรูปคลื่นเสียง และความดังของเสียง

รูปแบบและวิธีการทดลองเหมือนกับในการทดลองคุณผลกระทบต่อกำ CI

ในการหาชนิดของสัญญาณเสียงและความถี่ที่เหมาะสม จะได้ผลการทดลองตามรูปที่ 6-10

รูปที่ 6 การกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบสี่เหลี่ยม เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น

ย่านความถี่ที่เหมาะสมประมาณ 950 Hz ซึ่งทำให้ค่า Cd ลดลงประมาณ 60.61%

รูปที่ 7 การกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบสามเหลี่ยม เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น

ย่านความถี่ที่เหมาะสมประมาณ 220 Hz ซึ่งทำให้ค่า Cd ลดลงประมาณ 6.06%

รูปที่ 8 การกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ sine เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น

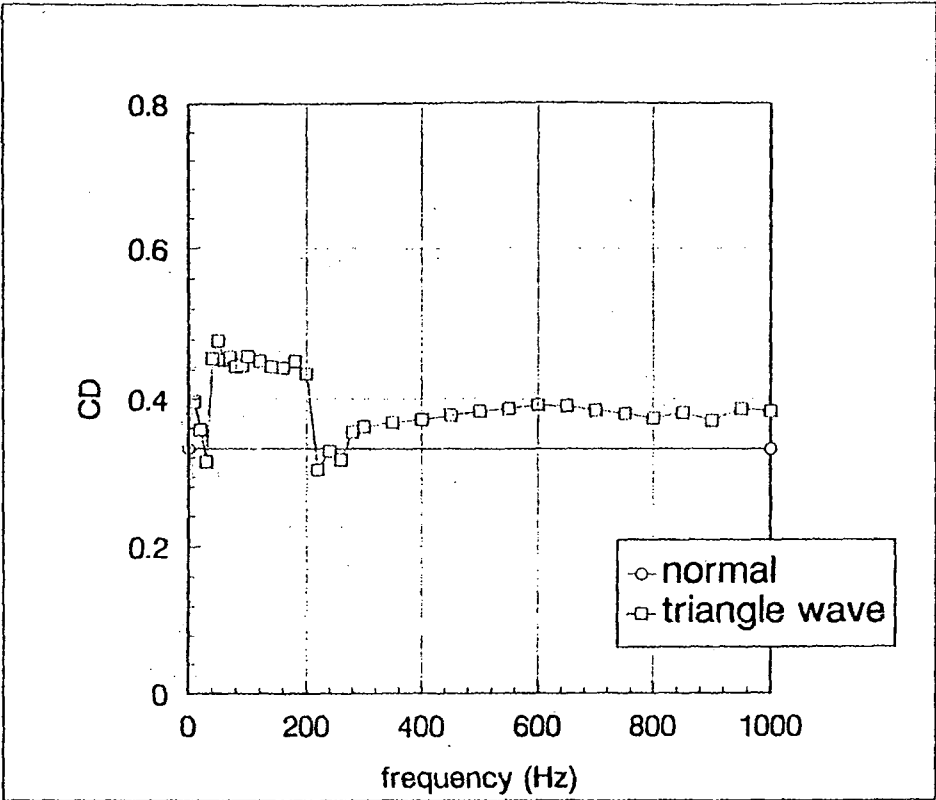
ไม่มีย่านความถี่ที่เหมาะสม

รูปที่ 9 การกระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse เปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น

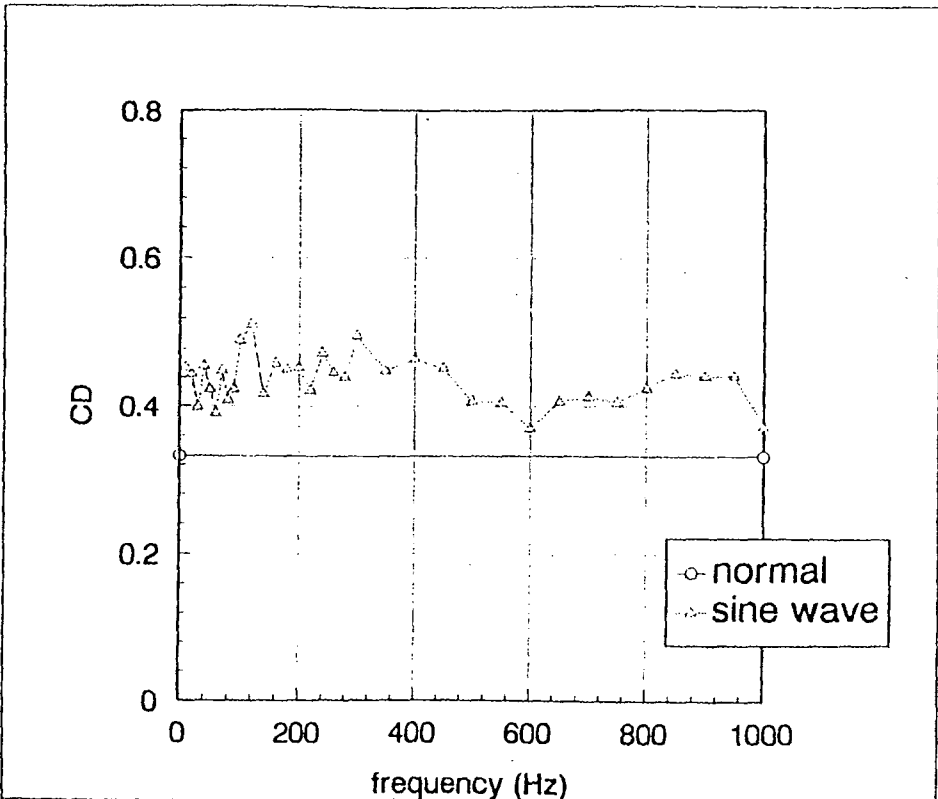
ย่านความถี่ที่เหมาะสมประมาณ 700 Hz ซึ่งทำให้ค่า Cd ลดลงประมาณ 93.94%

รูปที่ 10 เขียนกราฟเปรียบเทียบการกระตุ้นของสัญญาณทั้งหมด กับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น

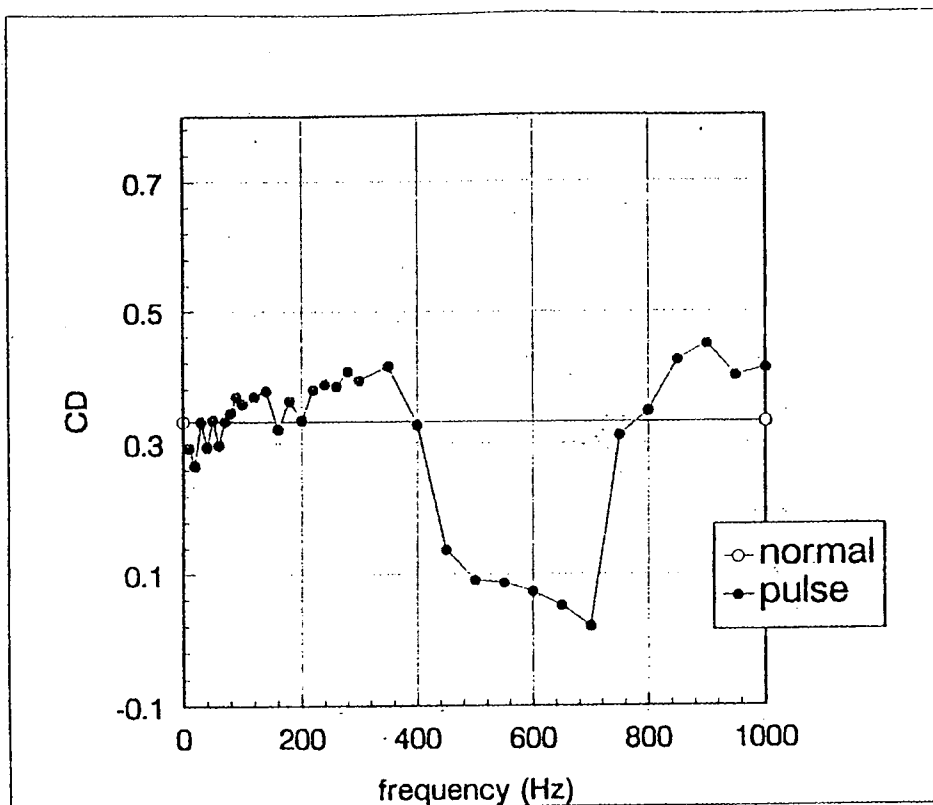
จากรูปที่ 10 จะสังเกตเห็น



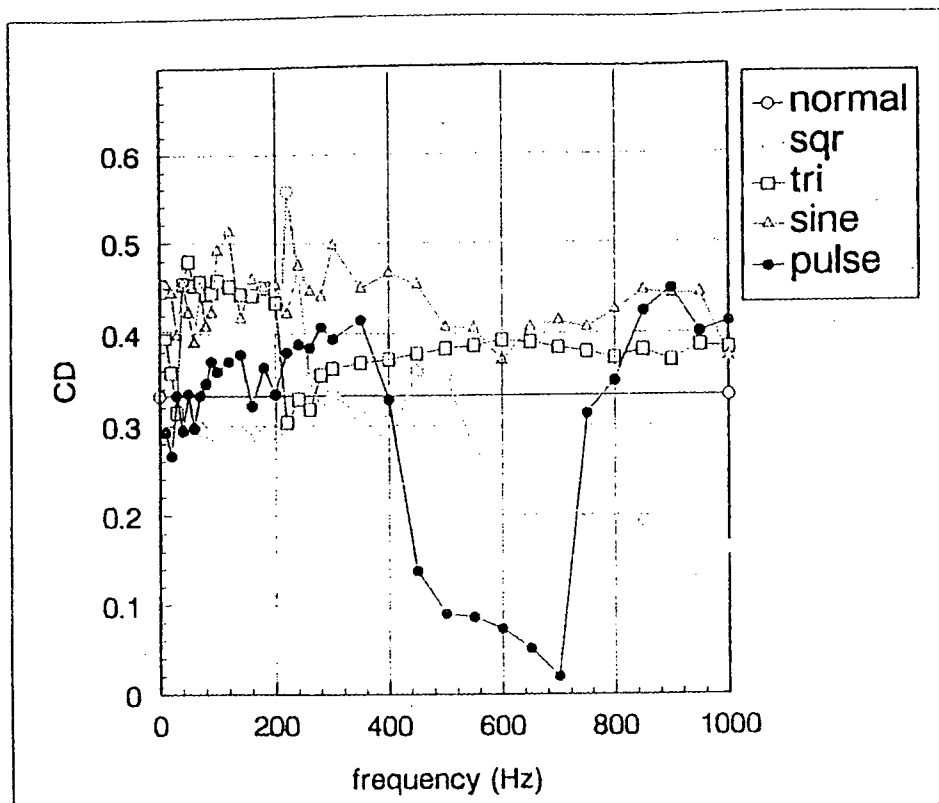
รูป 7



รูป 8



รูปที่ 9



รูปที่ 10

ขั้นตอนต่อมา ปัจจัยที่สนใจคือ ปัจจัยจากค่าความถี่ ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้เราจะทำการเลือกค่าความถี่ 3 ค่า โดยทั้ง 3 ค่านี้ ประกอบด้วยค่าความถี่ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองครั้งรูปที่ 5 และอีก 2 ค่า ให้เป็นค่าความถี่ที่มากกว่าและน้อยกว่าค่าความถี่ที่เหมาะสมค่อนข้างมาก เพื่อให้เห็นถึงผลกระทบที่เห็นได้ชัดเจนของการเลือกค่าความถี่ที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม กับช่วงที่ไม่เหมาะสม

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า CI กับ มุมประทะ (AOA) โดยใช้การกระตุ้นโดยสัญญาณเสียงชนิด pulse ที่ความถี่ 200 Hz , 650 Hz (เลือกความถี่ 650 Hz เป็นตัวแทนช่วงความถี่ที่เหมาะสม), และ 1000 Hz ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 11 ถึง 14 (พิจารณา ที่มุมประทะ 15 องศา)

รูปที่ 11 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 200 Hz

ค่า CI ประมาณเท่าเดิม

รูปที่ 12 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 650 Hz

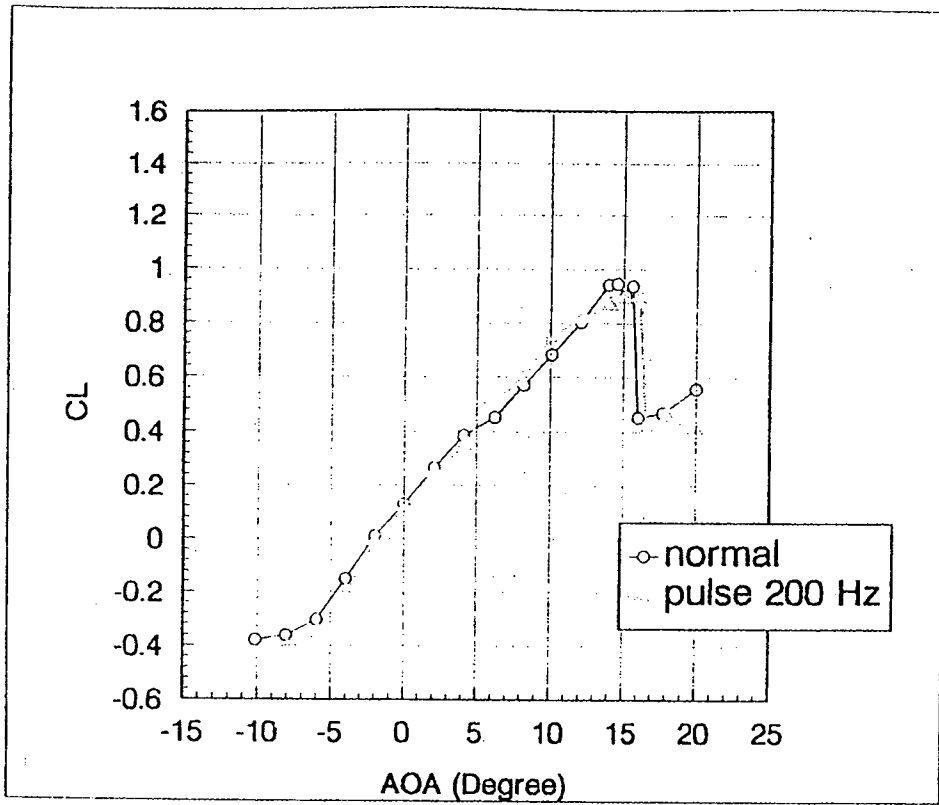
ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 43.53%

รูปที่ 13 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 1000 Hz

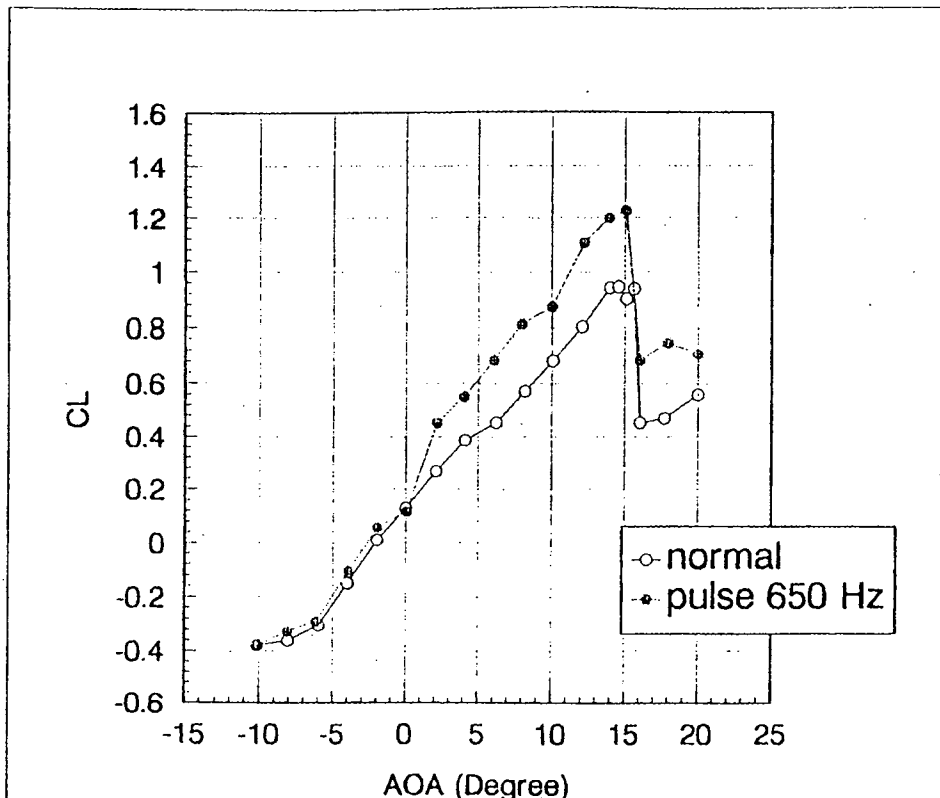
ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 22.35%

รูปที่ 14 เป็นการเปรียบเทียบของกราฟทั้งหมดกับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น

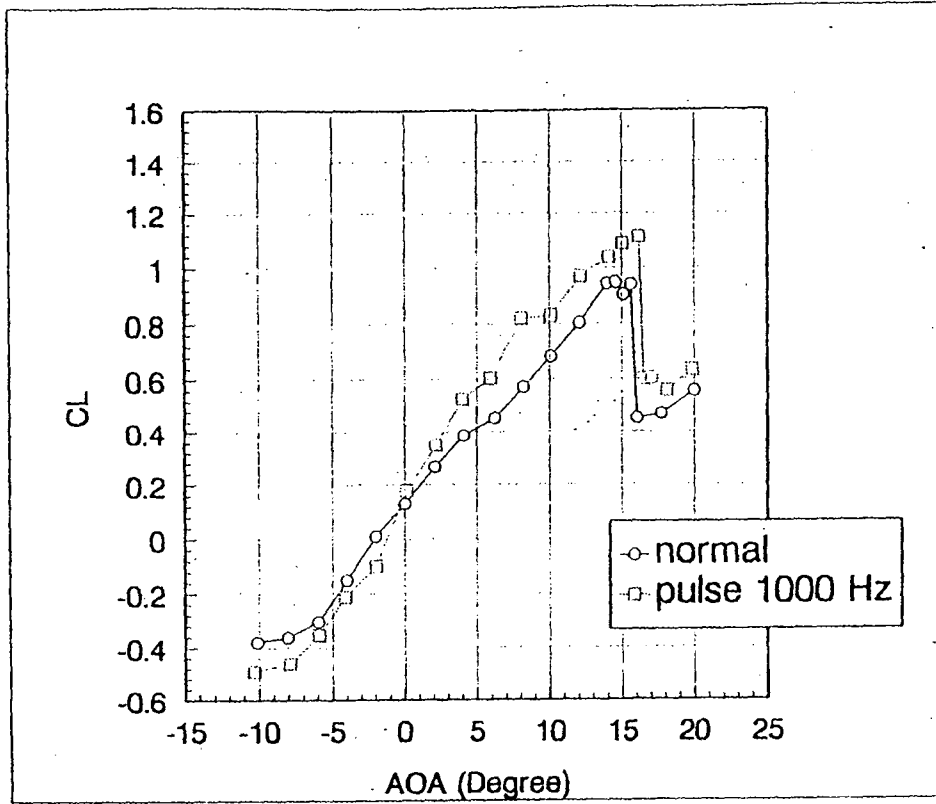
จากการทดลองเห็นได้ว่า ความถี่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่า CI และนอกจากนั้น กราฟยังบอกด้วยอีกว่า ความถี่ที่ทำให้ค่า CI เพิ่มขึ้นมากที่สุด จะอยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสม ถ้าเราใช้ค่าความถี่ที่ต่ำไป หรือสูงไป กว่าช่วงที่เหมาะสมจะมีผลต่อ CI อาจทำให้ค่า CI น้อยลงกว่าเดิม หรือ เพิ่มขึ้น (แต่ยังน้อยกว่าใช้ค่าความถี่ที่เหมาะสม) ก็ได้



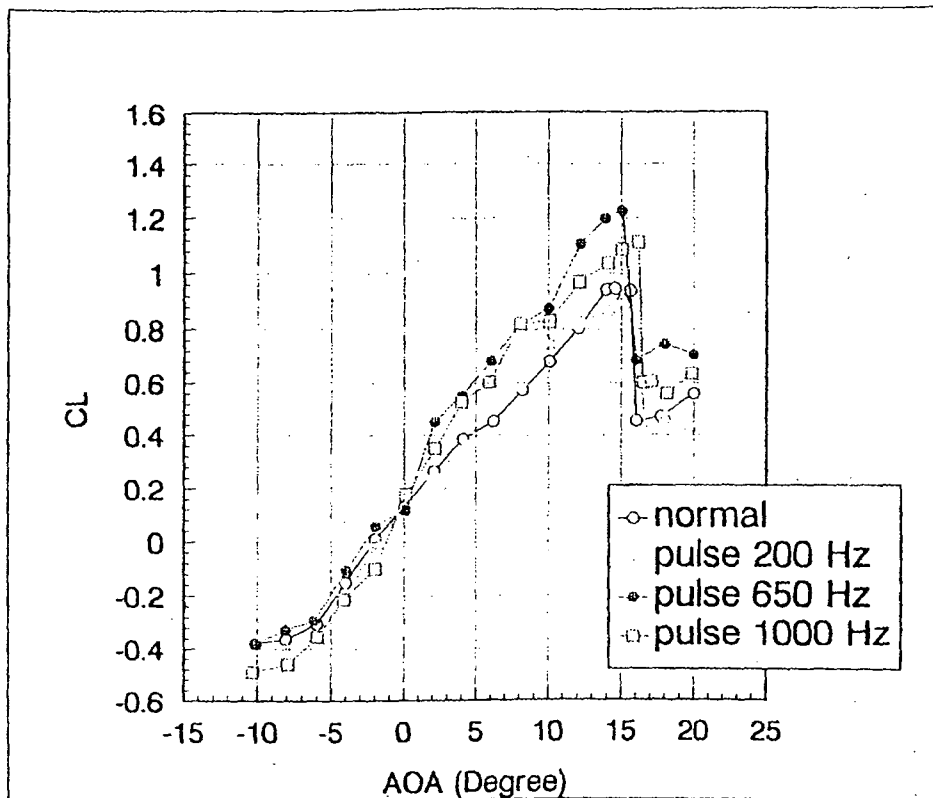
รูปที่ 11



รูปที่ 12



รูปที่ 13



รูปที่ 14

ขั้นตอนต่อมา ปัจจัยที่สนใจคือ ปัจจัยจากค่าความถี่ ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้เราจะทำการเลือกค่าความถี่ 3 ค่า โดยทั้ง 3 ค่านี้ ประกอบด้วยค่าความถี่ที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองครั้งรูปที่ 9 และอีก 2 ค่า ให้เป็นค่าความถี่ที่มากกว่าและน้อยกว่าค่าความถี่ที่เหมาะสมค่อนข้างมาก เพื่อให้เห็นถึงผลการทบทที่เห็นได้ชัดเจนของการเลือกค่าความถี่ที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม กับช่วงที่ไม่เหมาะสม

การทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างค่า Cd กับ มุมประทะ (AOA) โดยใช้การกระตุ้นโดยสัญญาณเสียงชนิด pulse ที่ความถี่ 200 Hz , 650 Hz (เลือกความถี่ 650 Hz เป็นตัวแทนช่วงความถี่ที่เหมาะสม), และ 1000 Hz ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 15 ถึง 18 (พิจารณา ที่มุมประทะ 15 องศา)

รูปที่ 15 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 200 Hz

ค่า Cd เพิ่มขึ้น

รูปที่ 16 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 650 Hz

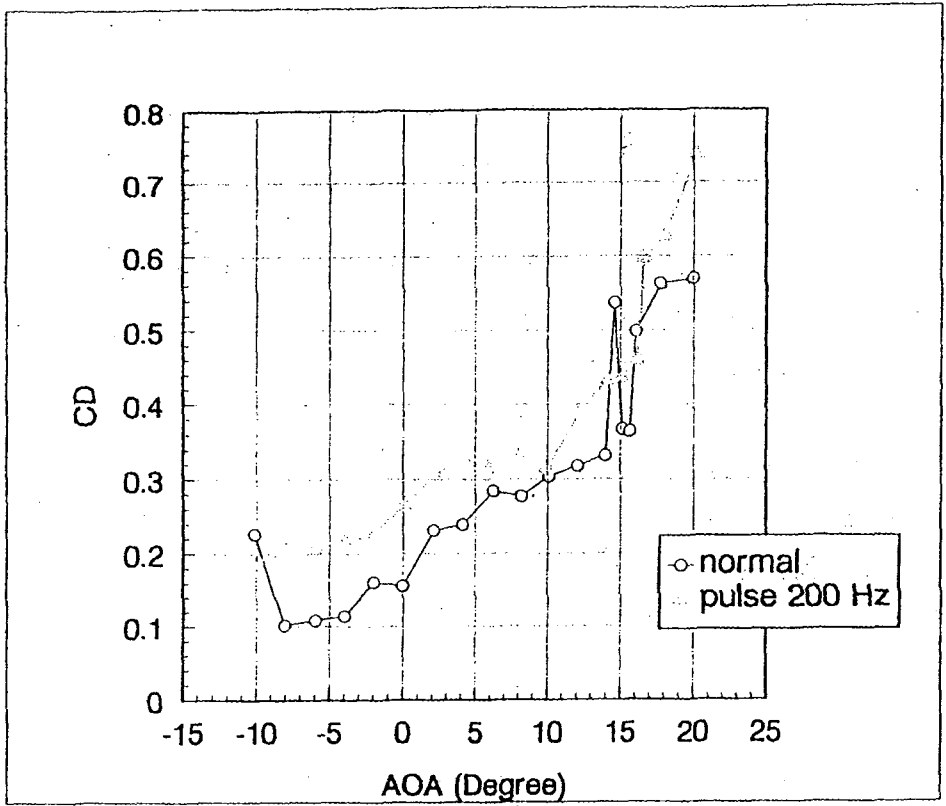
ค่า Cd ลดลงประมาณ 22.22 %

รูปที่ 17 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 1000 Hz

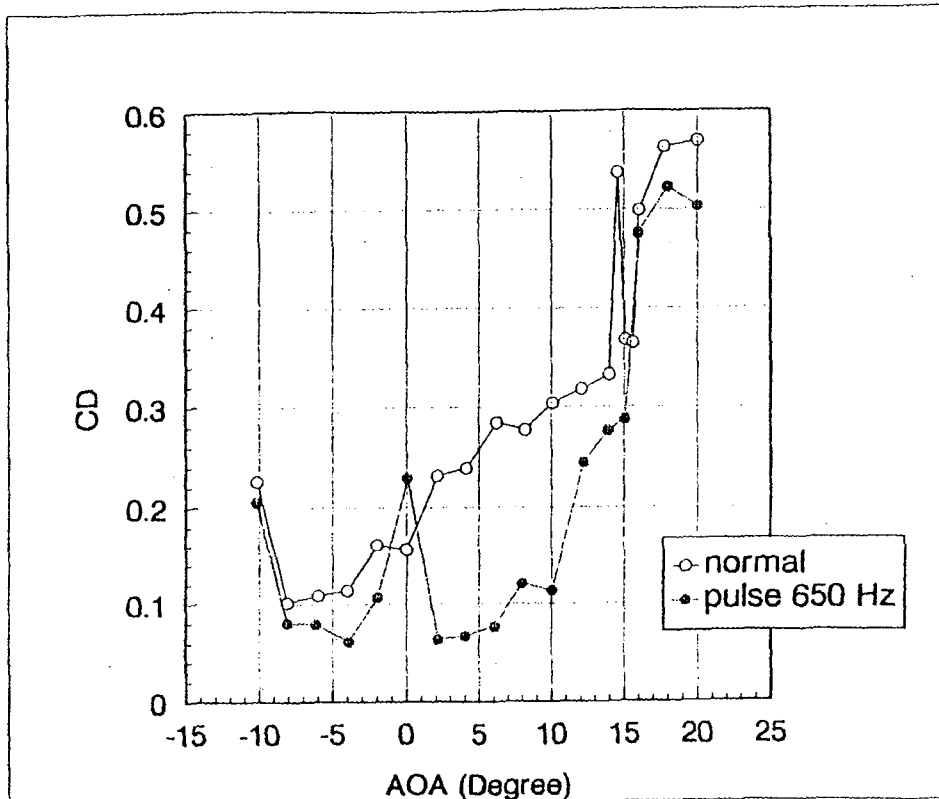
ค่า Cd เพิ่มขึ้น

รูปที่ 18 เป็นการเปรียบเทียบของกราฟทั้งหมดกับกรณีที่ไม่มีการกระตุ้น

จากการทดลองเห็นได้ว่า ความถี่เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อค่า Cd และนอกจากนั้น กราฟยังบอกด้วยอีกว่า ความถี่ที่ทำให้ค่า Cd เพิ่มขึ้นมากที่สุด จะอยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสม ถ้าเราใช้ค่าความถี่ที่ต่ำไป หรือสูงไป กว่าช่วงที่เหมาะสมจะมีผลต่อ Cd อาจทำให้ค่า Cd เพิ่มขึ้นกว่าเดิม

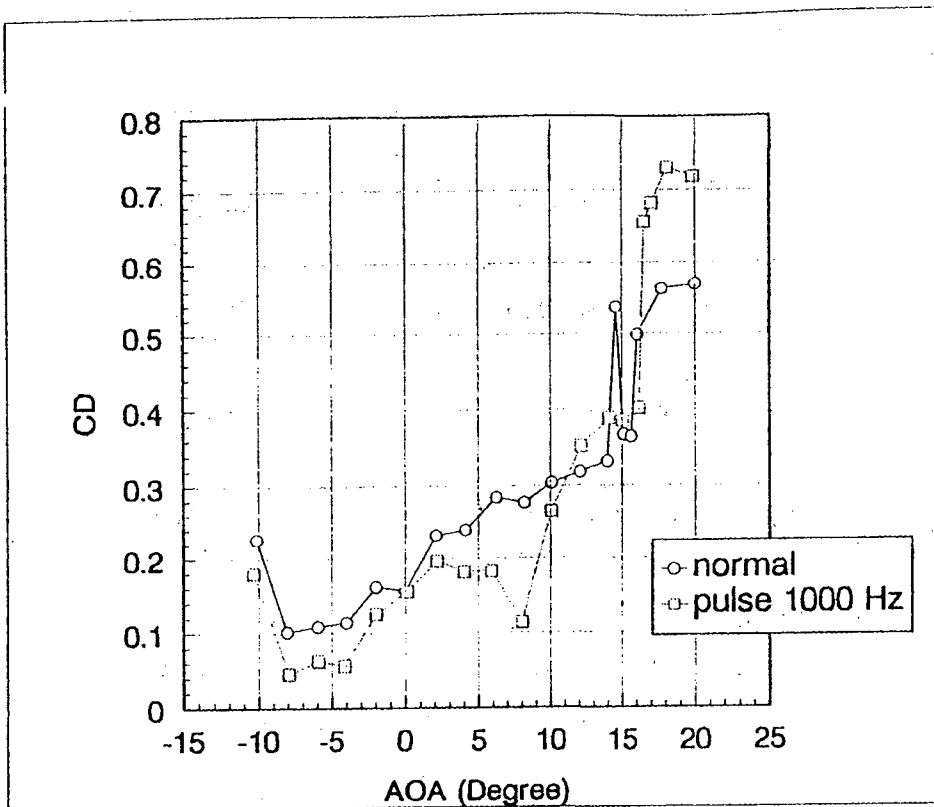


รูปที่ 15

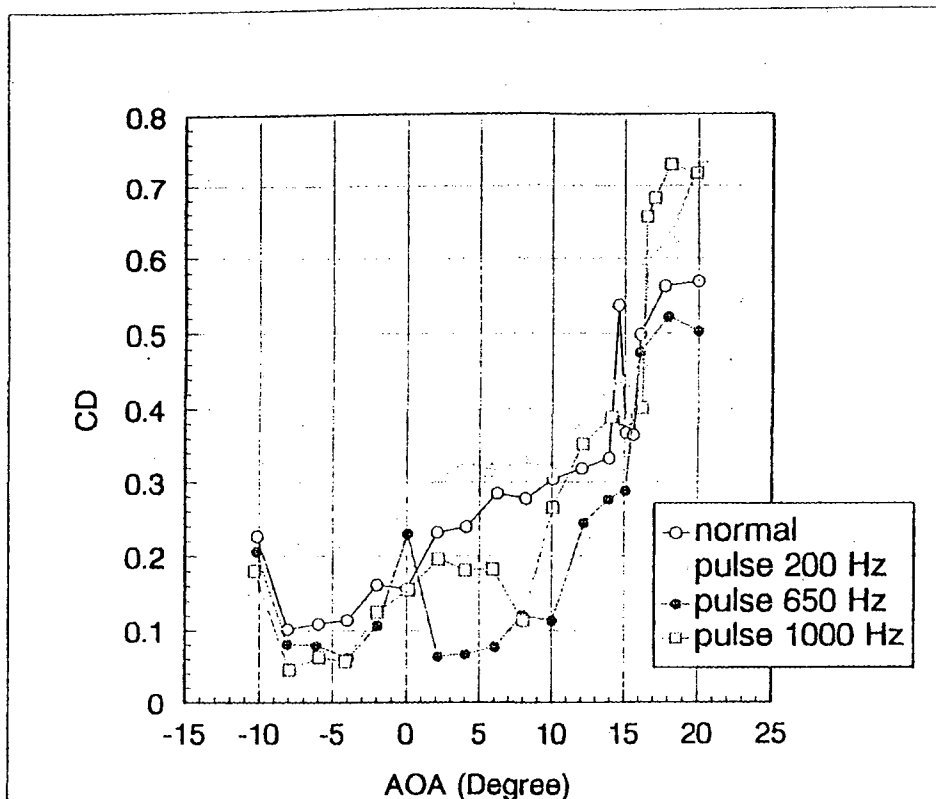


รูปที่ 16





รูปที่ 17



รูปที่ 18

ปัจจัยสุดท้ายที่สนใจคือ ความดังของเสียง ทำการทดลองโดยการกำหนดให้ชนิดของสัญญาณของเสียง และความถี่เสียงคงที่ ซึ่งเราจะใช้ชนิดสัญญาณเสียงแบบ pulse ที่ความถี่ 650 Hz และทำการเปรียบเทียบค่าแอมพลิจูดของคลื่นเสียงด้วยการปรับค่า Vpp(Voltage peak to peak) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ 3 ค่า คือ 1, 3 และ 10 Vpp

ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง CI กับ มุมปะทะ (AOA) โดยมีการกระตุ้นของเสียงที่มีความดังแตกต่างกันไป ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 19-22

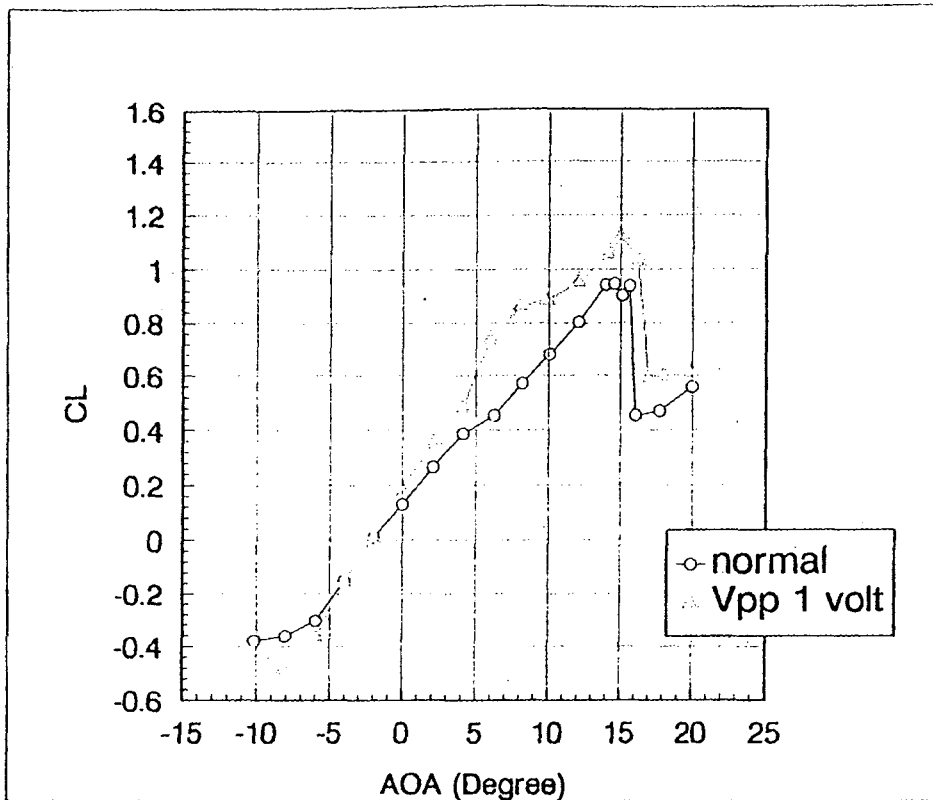
รูปที่ 19 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 650 Hz Vpp มีค่า 1 volt ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 31.76%

รูปที่ 20 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 650 Hz Vpp มีค่า 3 volt ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 43.53%

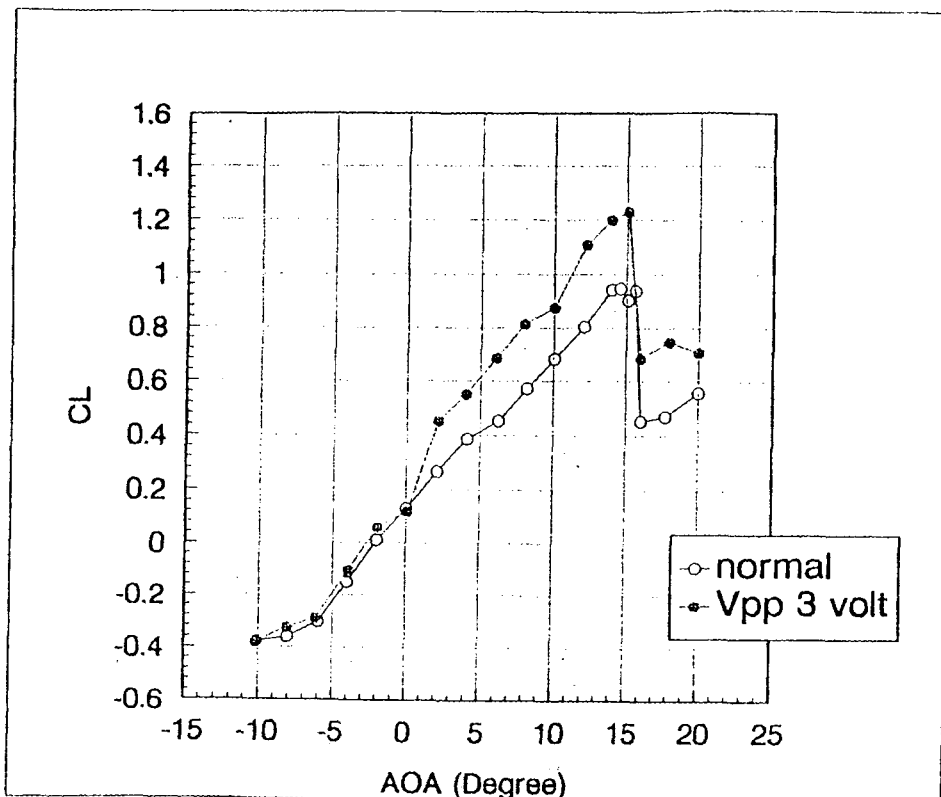
รูปที่ 21 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 650 Hz Vpp มีค่า 10 volt ค่า CI เพิ่มขึ้นประมาณ 64.71%

รูปที่ 22 กราฟทั้งหมดกับกรณีไม่มีการกระตุ้น

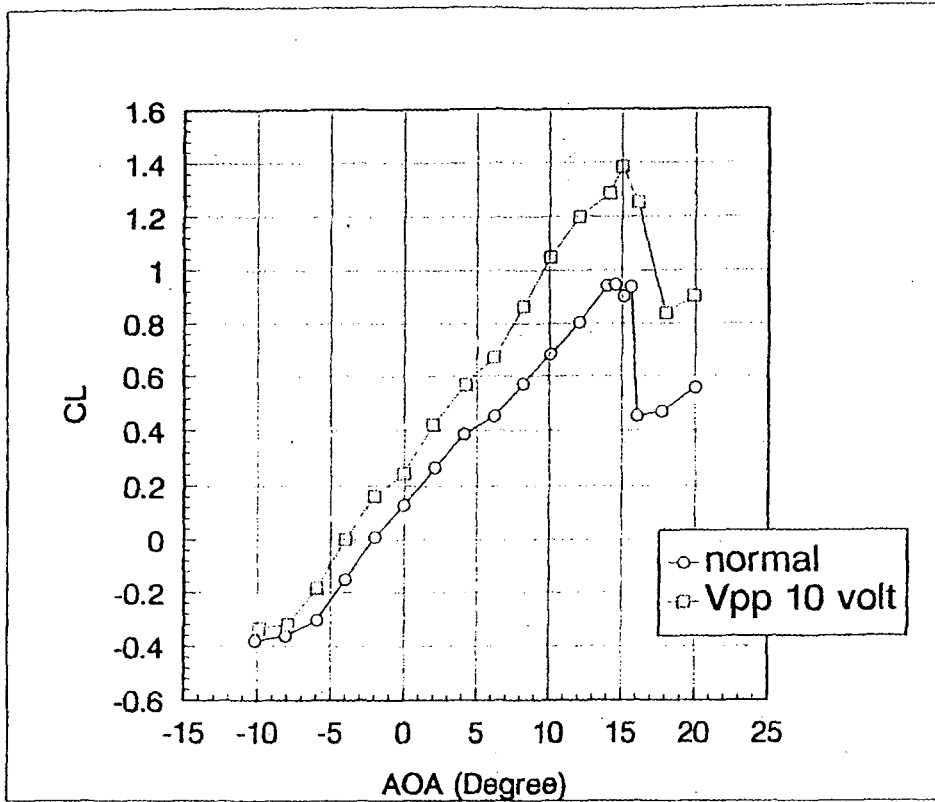
จากรูปที่ 22 สังเกตได้ชัดเจนว่า การกระตุ้นโดยใช้คลื่นเสียงที่มีความดังมากกว่า จะทำให้ค่า CI เพิ่มขึ้นมากกว่า ทั้งนี้ไม่ได้หมายความว่า ถ้าเพิ่มความดังไปเรื่อยๆค่า CI ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในการทดลองปรับปรุงประสิทธิภาพของ airfoil โดยการกระตุ้นด้วยเสียงจากภายนอกนั้น ถ้าใช้ความดังที่มากเกินไปจะทำให้การสั่นของโมเดลอากาศหลังไหลผ่าน airfoil ส่วนใหญ่เกิดเป็นผลมาจากอิทธิพลของคลื่นเสียงมากกว่าอิทธิพลจากรูปร่าง airfoil ที่ไหลผ่าน ซึ่งในการทดลองครั้งนี้จะมองเห็นได้ว่า ถ้าเราให้ความดังของเสียงมากเกินไป จะเปรียบเสมือนเราอัดอากาศให้มีทิศทางลงคั้งฉากกับโมเดล airfoil ทำให้เกิดแรงกระทำในทิศทางลงคั้งฉากกับโมเดล เป็นผลให้ค่า CI ลดน้อยลงซึ่งเป็นข้อจำกัดของการทดลองกระตุ้นด้วยเสียงแบบภายนอก



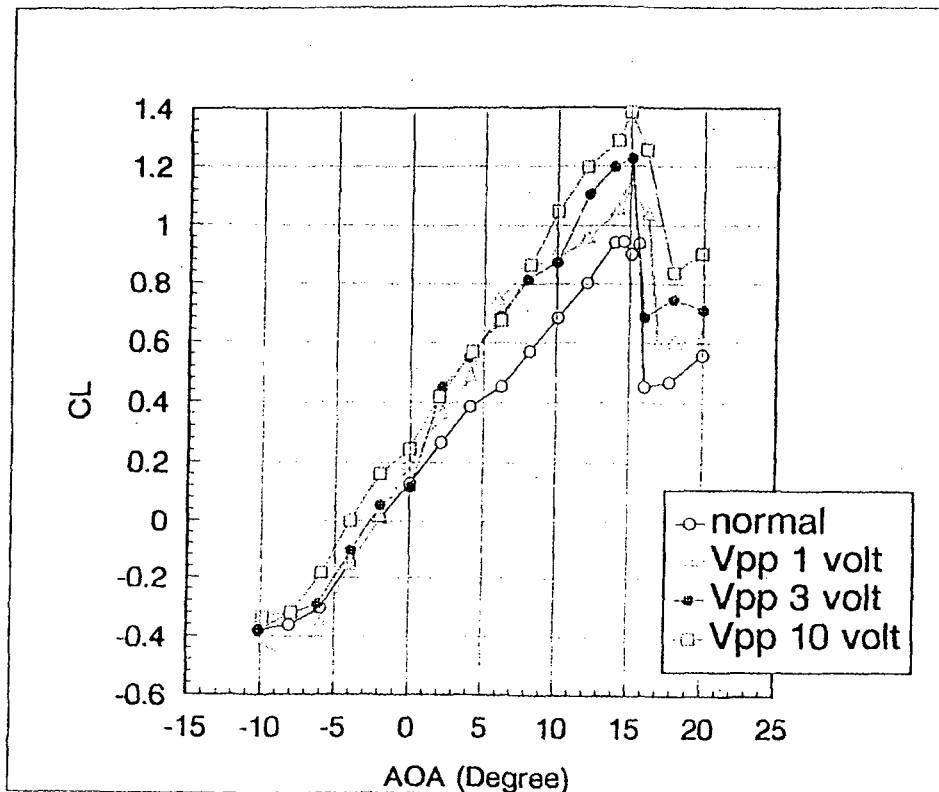
รูปที่ 19



รูปที่ 20



รูปที่ 21



รูปที่ 22

ปัจจัยสุดท้ายที่สนใจคือ ความดังของเสียง ทำการทดลองโดยการกำหนดให้ชนิดของ สัญญาณของเสียงและความถี่เสียงคงที่ ซึ่งเราจะใช้ชนิดสัญญาณเสียงแบบ pulse ที่ความถี่ 650 Hz และทำการเปรียบเทียบค่า

แอมพลิจูดของคลื่นเสียงด้วยการปรับค่า  $V_{pp}$ (Voltage peak to peak) ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ 3 ค่า คือ 1, 3 และ 10 Vpp

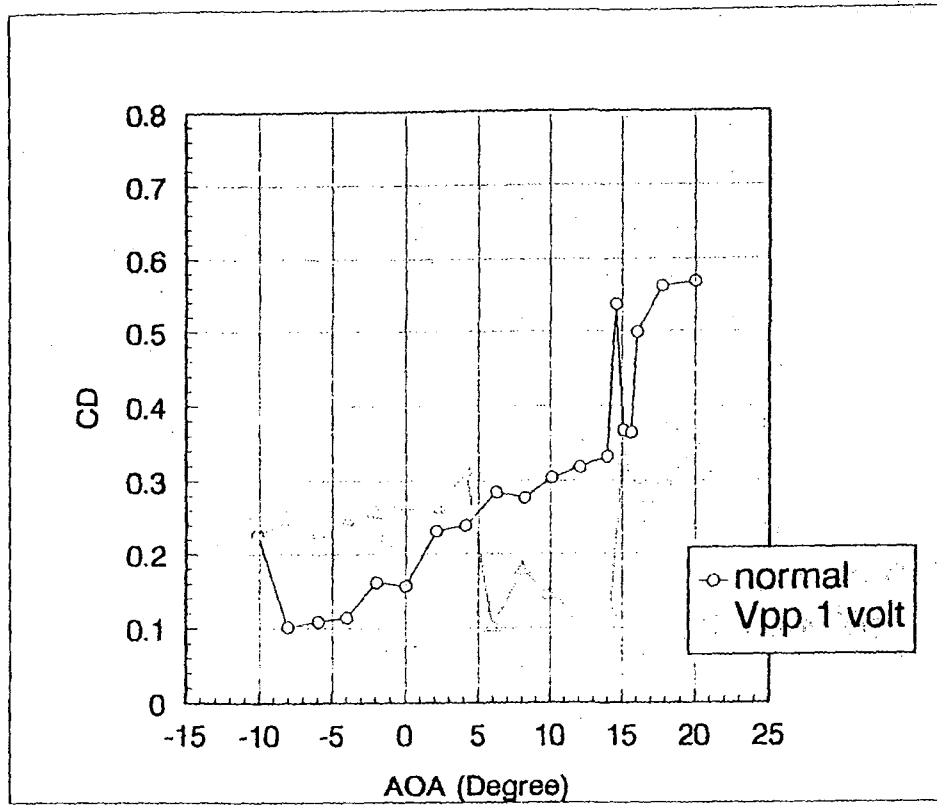
ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่าง Cd กับ มุมปะทะ( AOA ) โดยมีการกระตุ้นของเสียงที่มีความดังแตกต่างกันไป ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 23-26

รูปที่ 23 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 650 Hz  $V_{pp}$  มีค่า 1 volt ค่า Cd ลดลง ประมาณ 11.11 %

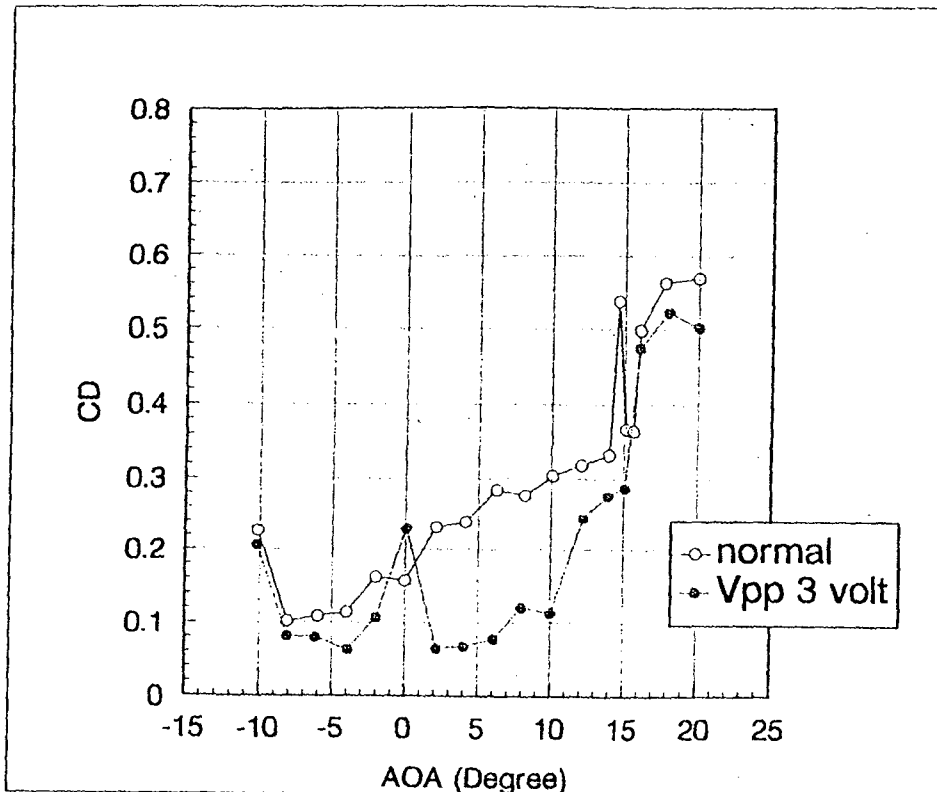
รูปที่ 24 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 650 Hz  $V_{pp}$  มีค่า 3 volt ค่า Cd ลดลง ประมาณ 22.22 %

รูปที่ 25 กระตุ้นด้วยสัญญาณเสียงแบบ pulse 650 Hz  $V_{pp}$  มีค่า 10 volt ค่า Cd ลดลง ประมาณ 61.11 %

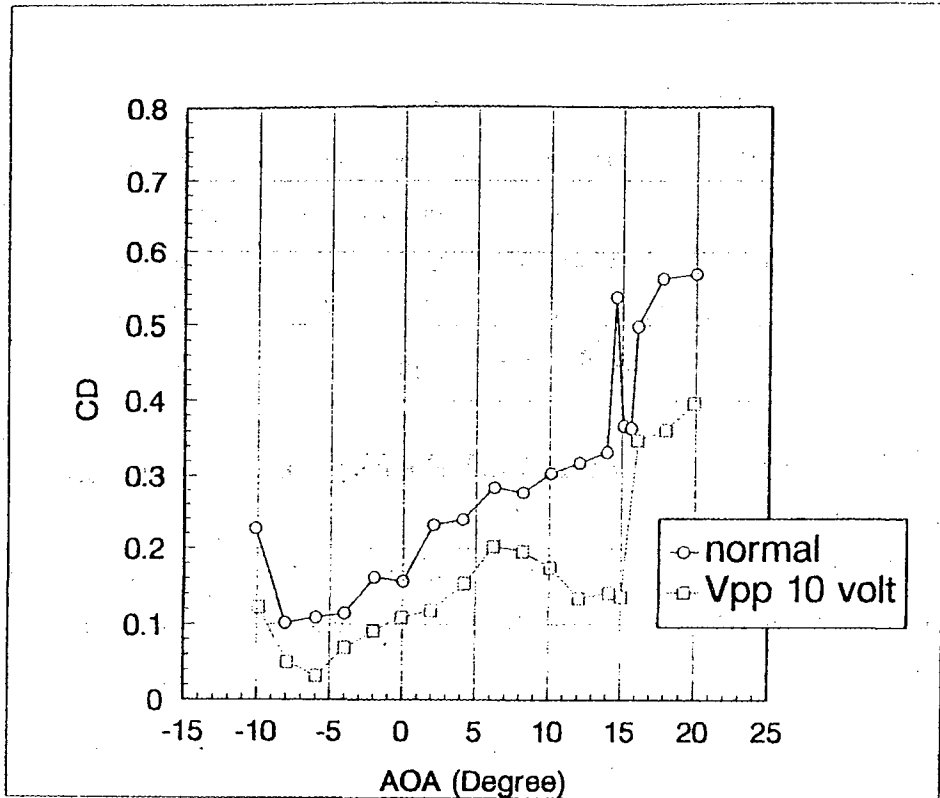
รูปที่ 26 กราฟทั้งหมดกับกรณีไม่มีการกระตุ้น



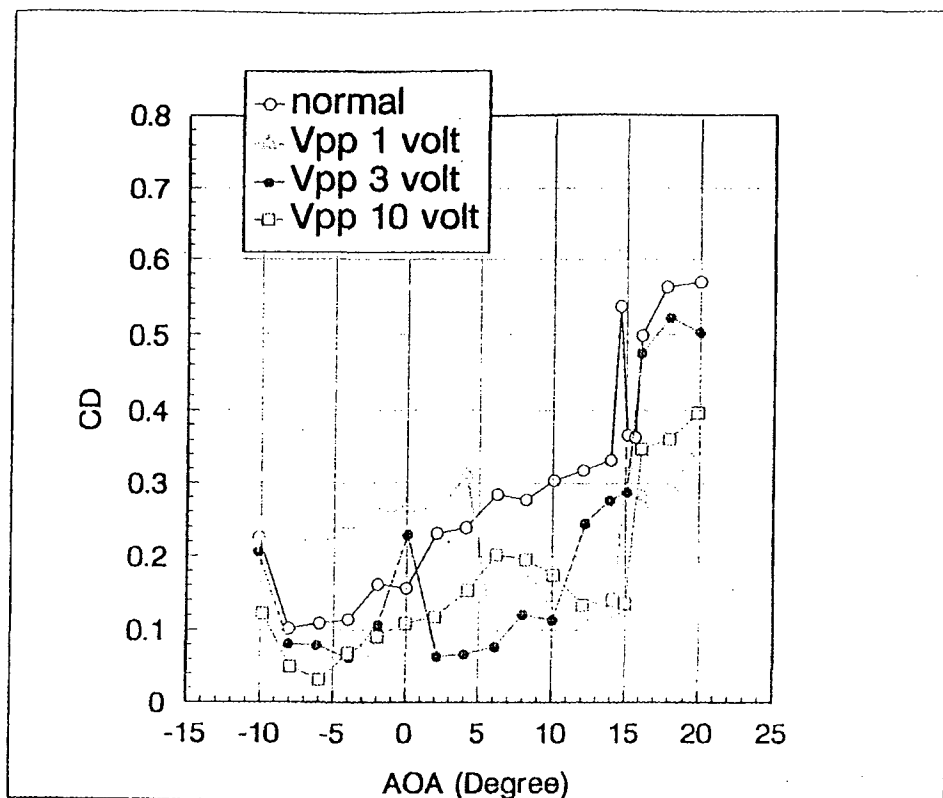
รูปที่ 23



รูปที่ 24



รูปที่ 25



รูปที่ 26

### CONCLUDING REMARK

การศึกษาวិจัยการปรับปรุงประสิทธิภาพของแพนอากาศ(airfoil) โดยการกระตุ้นด้วยเสียงจากภายนอกนี้ศึกษาพิจารณา จากค่า  $C_l$  ,  $C_d$  และ การไหลของอากาศผ่านairfoil ผลการทดลองสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การกระตุ้นด้วยเสียงสามารถทำให้การแยกไหลของอากาศเกิดขึ้นได้น้อยลงกว่าปกติ
2. ค่าความถี่และชนิดสัญญาณเสียง ที่เหมาะสมในการกระตุ้นนั้น ขึ้นอยู่กับรูปร่างและขนาดของแพนอากาศ(airfoil) ความถี่และชนิดสัญญาณที่เหมาะสมในการกระตุ้นคือ ค่าที่ทำให้ค่า  $C_l$  ของ airfoil เพิ่มมากที่สุด และค่า  $C_d$  ลดลงมากที่สุด

ในการทดลองครั้งนี้จะได้ว่า ชนิดสัญญาณเสียงที่เหมาะสมที่สุดคือ สัญญาณแบบ pulse และค่าความถี่ที่เหมาะสมคือ 650 Hz

3. ความดังของเสียง เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพของ airfoil ด้วยนั้นคือในการกระตุ้นด้วยเสียงจากภายนอกนั้นจะต้องเลือกค่าความดังที่เหมาะสม ไม่มากไม่น้อยไป จึงจะทำให้ค่า  $C_l$  เพิ่มขึ้นได้มากที่สุด