

ปรากฏการณ์ควาวิเตชันกับสัญญาณการสั่นสะเทือน Cavitation and Vibration Signal

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ปิยะรัตน์ อาชาวัตน์ พงศธร รักสินเจริญศักดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ควาวิเตชันที่ระดับความรุนแรงต่างกัน ถูกจำลองขึ้นในเครื่องทดลองปรากฏการณ์ควาวิเตชัน โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาวิเตชันจะถูกกำหนดด้วยตัวเลขควาวิเตชัน การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ควาวิเตชันถูกนำมาพิจารณาและวิเคราะห์ การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนกระทำที่ตัวเรือนเครื่องสูบน้ำ และบริเวณ Test Section ที่มีวัดอุทกวิทยาไหลเป็นรูปแบนอากาศ ซึ่งต่างเป็นอุปกรณ์และชิ้นส่วนหลักของเครื่องทดลองปรากฏการณ์ควาวิเตชันพบว่าจากปรากฏการณ์ควาวิเตชันที่เกิดขึ้นที่ตัวเรือนเครื่องสูบน้ำจะมีสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในลักษณะเป็นสัญญาณแถบกว้างแบบสุ่มที่เรียกว่า Noise Floor ที่บริเวณความถี่ที่ค่อนข้างสูง ในช่วงบริเวณ 10,000 - 200,000 CPM โดยที่จะสามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์ควาวิเตชันอย่างชัดเจนเมื่อตัวเลขควาวิเตชันมีค่าต่ำกว่า 2.1 โดยประมาณ และเมื่อปรับเงื่อนไขการทำงานของเครื่องทดลองให้ปรากฏการณ์ควาวิเตชันไปเกิดขึ้นที่ Test Section จะพบว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในลักษณะคล้ายคลึงกัน คือมีสัญญาณแถบกว้างแบบสุ่มที่ความถี่ตั้งแต่ 10,000 CPM ขึ้นไป และจะสามารถเริ่มสังเกตเห็นปรากฏการณ์ควาวิเตชันเมื่อตัวเลขควาวิเตชันมีค่าเท่ากับ 4.25 และเห็นชัดเจนขึ้นเมื่อตัวเลขควาวิเตชันมีค่าต่ำลง อาทิเช่นที่ 2.16 และ 1.78 ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะแปรตามความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาวิเตชัน โดยที่ตัวเลขควาวิเตชันนี้จะแปรผกผันกับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาวิเตชัน

Abstract

Cavitation at different stages were simulated in the cavitation phenomenon experimental apparatus. The stage of cavitation is defined by cavitation number. The vibration from cavitation was considered and analyzed. Vibration signals were picked up at pump casing and test section with flow obstruction in an airfoil shape. These pump and test section are the main components of the experimental apparatus. It was found that vibration signal on frequency domain coming from cavitation at pump was in the shape of broadband random signal called noise floor at rather

high frequency range around 10,000-200,000 CPM. The cavitation phenomenon can be clearly observed when cavitation number is less than 2.1. With the proper condition the cavitation was then shifted to appear at the test section. The picked up vibration signal was in the similar pattern which was in the shape of broadband random signal at frequency of 10,000 CPM and higher. The cavitation phenomenon can be observed when cavitation number equal to 4.25 and it can be clearly seen when the value of its number getting lower such as 2.16 and 1.78. The magnitude of the vibration signal shall be varied directly proportional to the stages of cavitation while the cavitation number shall be varied inversely to the stages of cavitation.

1. บทนำ

ปรากฏการณ์ควาวิเตชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวมีความดันสถิตเฉพาะที่ต่ำกว่าความดันไอของมัน ซึ่งก็จะทำให้ของเหลวดังกล่าวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นฟองไอน้ำจำนวนมาก และเมื่อฟองไอน้ำเหล่านี้เคลื่อนตัวไปอยู่ในตำแหน่งที่มีความดันสูงขึ้น ฟองไอน้ำจะแตกออก และของเหลวโดยรอบฟองจะไหลเข้าสู่ช่องว่างที่เกิดจากการแตกตัวของฟองไอน้ำอย่างฉับพลันทำให้เกิดการกระแทกของของเหลว ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน และเกิดการกัดกร่อนของผิวโลหะที่อยู่ใกล้ นอกจากนี้ก็จะมีเสียงดังตามมาด้วย ปรากฏการณ์ควาวิเตชันมักเกิดในบริเวณที่ของเหลวมีความเร็วสูงซึ่งจะส่งผลให้ความดันสถิตเฉพาะที่ของของเหลวในบริเวณนั้นต่ำลง และเมื่อความดันลดต่ำกว่าความดันไอก็จะเกิดปรากฏการณ์ควาวิเตชันขึ้น ปรากฏการณ์ควาวิเตชันมักเกิดที่บริเวณปากทางเข้าและบริเวณใบพัดของเครื่องสูบน้ำ และในระบบท่อที่มีการออกแบบที่ไม่ดี และในบริเวณหลังสิ่งกีดขวางการไหล อาทิเช่น หลัวาล์วที่หรีโกลิปิด เป็นต้น ในการตรวจสอบว่าในระบบการไหลจะมีปรากฏการณ์ควาวิเตชันเกิดขึ้นหรือไม่ หากไม่มีเครื่องมือเฉพาะก็อาจสามารถสังเกตได้ด้วยการฟังเสียงใน ส่วนที่เกิดปรากฏการณ์ควาวิเตชันซึ่งจะมีเสียงดังเหมือนก้อนกรวดไหลกระแทกผิวโลหะ หรือสังเกตจากการสั่นสะเทือน ในบทความนี้จะกล่าว

ถึงการวิเคราะห์ปัญหาของปรากฏการณ์คavitation โดยจะพิจารณาจากสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการพยากรณ์การเกิดปรากฏการณ์คavitationล่วงหน้า และพยายามหาทางแก้ไขก่อนที่จะเกิดความเสียหายรุนแรงแก่ระบบเครื่องจักร

2. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์คavitation

ตามนิยามของปรากฏการณ์คavitation ที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1 นั้น จะเห็นได้ว่าการเกิดปรากฏการณ์คavitation จะขึ้นกับความดันเฉพาะที่ของของเหลว และความดันไอ พารามิเตอร์ที่นำตัวแปรสำคัญทั้งสองมาพิจารณาเพื่อกำหนดว่าของเหลวจะเกิดปรากฏการณ์คavitation ขึ้นหรือไม่ จะถูกเรียกว่า ตัวเลขคavitation (Cavitation Number) [2] ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$k_M = \frac{2(P - P_v)}{\rho V^2}$$

k_M = ตัวเลขคavitation

P = ความดันสัมบูรณ์ของของเหลว

P_v = ความดันไอของของเหลว

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว

V = ความเร็วของของเหลว

ตัวเลขคavitation สามารถใช้ในการกำหนดการเกิดและระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คavitation โดยที่ตัวเลขยิ่งน้อย ความรุนแรงของปรากฏการณ์ยิ่งมาก

ในกรณีของเครื่องสูบน้ำ พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งสามารถอ้างอิงถึงการเกิดปรากฏการณ์คavitation ได้ก็คือ ค่า NPSH Net Positive Suction Head [2, 4] สำหรับเครื่องสูบน้ำแต่ละเครื่องในแต่ละจุดทำงานจะมีค่า NPSH ที่ต่ำสุดที่จะทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์คavitation ขึ้นซึ่งเรียกเป็นค่า NPSHr Required Net Positive Suction Head และในกรณีของการติดตั้งระบบเครื่องสูบน้ำกับชุดท่อ ค่า NPSH ของระบบจะสามารถเขียนได้เป็น

$$NPSHa = H - H_v$$

ซึ่ง $NPSHa$ = Available Net Positive Suction Head

H = ค่าความดันสัมบูรณ์ของของเหลวในจุดที่พิจารณาในรูปของความสูงของลำน้ำ

H_v = ค่าความดันไอของของเหลวในจุดที่พิจารณาในรูปของความสูงของลำน้ำ

ดังนั้นหาก $NPSHa$ ของระบบมีค่าสูงกว่า $NPSHr$ ก็จะไม่เกิดปรากฏการณ์คavitation ดังนั้นในการออกแบบระบบท่อกับเครื่องสูบน้ำจะต้องคำนึงถึงค่า NPSH เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์คavitation

เนื่องจากปรากฏการณ์คavitation เกิดจากการแตกตัวเป็นฟองไอน้ำจำนวนมาก และจะเกิดการกระแทกกันของของเหลวที่ไหลเข้าสู่ฟองไอน้ำที่แตกตัวในลักษณะสุ่ม ดังนั้นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดจากปรากฏ

การณ์คavitation นั้นควรจะเป็นสัญญาณในลักษณะสุ่ม [1, 3, 5] โดยมีขนาดของสัญญาณขึ้นกับความรุนแรงของปรากฏการณ์คavitation

3. ชุดทดลองปรากฏการณ์คavitation

ในการศึกษาการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คavitation จะกระทำโดยการจำลองสภาวะปรากฏการณ์คavitation ขึ้นในชุดเครื่องทดลอง Cavitation Phenomenon Experimental Apparatus รุ่น CPE-2412 B ซึ่งเป็นเครื่องทดลองที่ประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำแบบ Volute เครื่องสูบน้ำสุญญากาศ มอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบสามเฟส มอเตอร์สายพาน ถึงลดความดัน 2 ถัง ระบบท่อ วาล์วควบคุมการไหล วาล์วสำหรับปรับความดันในถังลดความดัน 5 วาล์ว มาตรวัดความดัน เครื่องวัดความเร็วรอบการหมุนของเครื่องสูบน้ำ เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้าที่มอเตอร์ เครื่องวัดอุณหภูมิ น้ำ เครื่องวัดอัตราการไหลแบบ Orifice Meter และเครื่องสูบน้ำในชุดทดลองนี้มีใบพัดอยู่ 6 ใบ รูปที่ 1 และ 2 แสดงถึงชุดเครื่องทดลอง และผังภาพแสดงอุปกรณ์ต่างๆในชุดทดลอง

การทำงานของเครื่องทดลองจะกระทำโดยการเดินเครื่องสูบน้ำสุญญากาศเพื่อลดความดันของระบบท่อให้ต่ำลงก่อน และจากนั้นจึงเดินเครื่องสูบน้ำซึ่งก็จะทำให้น้ำในระบบมีความดันต่ำลง เมื่อมีการปรับเงื่อนไขที่เหมาะสม ก็จะสามารถจำลองปรากฏการณ์คavitation ให้เกิดขึ้นที่ตัวเครื่องสูบน้ำ หรือที่ Test Section ได้ ซึ่งที่เครื่องสูบน้ำและที่ Test Section ของเครื่องทดลองนี้จะมีส่วนที่เป็นผนังใสที่สามารถใช้สังเกตเห็นปรากฏการณ์คavitation ซึ่งเกิดขึ้นได้ โดยใช้ Strobe Lite รุ่น CMSS 6165 ของบริษัท SKF จำกัด เข้าช่วยให้เห็นปรากฏการณ์คavitation อยู่ในลักษณะภาพนิ่งที่ชัดเจนขึ้น

สำหรับการวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนจะกระทำด้วยเครื่องวัดสัญญาณการสั่นสะเทือน MICROLOG รุ่น CMVA 10 และทรานส์ดิวเซอร์สำหรับวัดความเร่ง Accelerometer รุ่น CMSS786M พร้อมหัววัดแม่เหล็ก โปรแกรมนคอมพิวเตอร์ PRISM⁴ สำหรับ Window เพื่อจัดการและวิเคราะห์ข้อมูล รูปที่ 3 แสดงถึงเครื่องวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการศึกษาค้างนี้

4. สัญญาณการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คavitation จะกระทำโดยใช้หัววัดความเร่งจับยึดติดตัวเรือนเครื่องสูบน้ำในแนวตั้ง(แนวรัศมี)และในแนวแกนในกรณีที่ได้จำลองปรากฏการณ์คavitation ขึ้นที่เครื่องสูบน้ำ และจะใช้หัววัดความเร่งจับยึดในแนวตั้งที่ตัวต่อกับ Test Section ในกรณีที่ได้จำลองปรากฏการณ์คavitation ขึ้นที่ Test Section รูปที่ 4 5 และ 6 แสดงถึงการจับยึดหัววัดที่เครื่องสูบน้ำ และ Test Section

ด้วยการปรับเงื่อนไขการไหลในระบบท่อกับชุดทดลองจะสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์คavitation ขึ้นที่ระหว่างใบพัดเครื่องสูบน้ำ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยการใช้ Strobe lite ปรับความถี่ของแสงให้มีความถี่เท่ากับอัตราเร็วของการหมุนของเครื่องสูบน้ำ และที่แต่ละเงื่อนไขจะสามารถทำการบันทึกค่าความดันและอุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่เครื่องสูบน้ำ และความดันลดของน้ำที่คร่อม Orifice meter ซึ่งใช้ในการ

วัดอัตราการไหล ข้อมูลที่ได้จากการวัดในแต่ละเงื่อนไขสามารถนำไปทำการคำนวณหาค่าตัวเลขควาวิเดชั่นได้ในตารางที่ 1 จะแสดงถึงตัวเลขควาวิเดชั่น และภาพจำลองการเกิดปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นที่ใบพัดเครื่องสูบน้ำ ซึ่งจากการปรับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำจาก 1,100 ถึง 1,400 รอบต่อนาที จะเห็นการเกิดปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเครื่องสูบน้ำทำงานที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 1,300 รอบต่อนาทีขึ้นไป ซึ่งที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,300 รอบต่อนาทีจะตรงกับตัวเลขควาวิเดชั่นเท่ากับ 2.16 และที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,400 รอบต่อนาทีปรากฏการณ์จะรุนแรงมากขึ้นจนเห็นฟองอากาศจำนวนมากเกิดขึ้นที่บริเวณใบพัดของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งตัวเลขควาวิเดชั่นจะมีค่าเท่ากับ 1.68 รูปที่ 7 จะแสดงถึงฟองอากาศจำนวนมากจากปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นที่ใบพัดเครื่องสูบน้ำเมื่อตัวเลขควาวิเดชั่นเท่ากับ 1.68 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นจะแปรผกผันกับตัวเลขควาวิเดชั่น

รูปที่ 8 และ 9 จะแสดงถึงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ที่วัดในหน่วยของความเร่งในทิศทางตามแนวแกน ที่ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 1,300 และ 1,400 รอบต่อนาที และรูปที่ 10 และ 11 จะแสดงถึงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ที่วัดในหน่วยของความเร่งในทิศทางตามแนวรัศมี ที่ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 1,300 และ 1,400 รอบต่อนาที จะสังเกตเห็นได้ว่าขนาดของสัญญาณในแนวแกนมีขนาดที่ชัดเจนกว่าสัญญาณในแนวรัศมีค่อนข้างมาก ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ว่าปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นเกิดขึ้นอย่างมากในแนวทอสุดเข้า และเกิดการกระแทกของฟองอากาศที่แตกกับจานของใบพัดเครื่องสูบน้ำในแนวแกน จึงทำให้มีการสั่นสะเทือนในแนวแกนมากกว่า ซึ่งก็จะส่งผลให้เห็นสัญญาณในแนวแกนชัดเจนกว่า และยังเห็นสัญญาณการสั่นสะเทือนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องสูบน้ำ อาทิเช่น สัญญาณที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1,500 รอบต่อนาที สัญญาณฮาร์มอนิกของความถี่รอบสายพาน และสัญญาณที่ความถี่ Blade Pass Frequency ($BPF = 6 \times RPM$ pump) และฮาร์มอนิกของมัน แต่สัญญาณที่ชัดเจนที่แสดงถึงปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นคือสัญญาณลักษณะแบบสุ่มแบบกว้างที่เรียกว่า Noise Floor ที่มีตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณา และพบว่ามียอดของสัญญาณที่เด่นชัดที่ความถี่ที่ไม่แน่นอน แต่ขนาดของ Noise Floor จะขยายขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อเครื่องสูบน้ำทำงานที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที

และเมื่อให้เครื่องสูบน้ำทำงานที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,200 รอบต่อนาที และปรับเงื่อนไขการไหลของเครื่องทดลองอย่างเหมาะสม จะสามารถจำลองปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นขึ้นที่ Test Section เมื่อของเหลวไหลผ่านแบบจำลองรูปแพนอากาศที่ขวางการไหลอยู่ และจะพบว่าระดับความรุนแรงหรือการเกิดของปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อปรับมุมของแบบจำลองรูปแพนอากาศที่ขวางการไหลให้มากขึ้น ซึ่งระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นนี้จะแปรผกผันกับตัวเลขควาวิเดชั่น ตารางที่ 2 จะแสดงถึงตัวเลขควาวิเดชั่น และภาพจำลองของปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นที่ Test Section ซึ่งจะเริ่มเห็นฟองอากาศจากปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นเมื่อตัวเลขควาวิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 4.25 และจะเห็นฟองอากาศมากขึ้นเมื่อตัวเลขควาวิเดชั่นต่ำกว่านั้น และเมื่อปรับเงื่อนไข

ให้แพนอากาศมีมุมบิดสูงขึ้น จะเห็นฟองอากาศมากขึ้นเมื่อตัวเลขควาวิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16 และ 1.78 รูปที่ 12 จะแสดงถึงรูปฟองอากาศที่เกิดขึ้นที่ Test Section เมื่อตัวเลขควาวิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 1.78

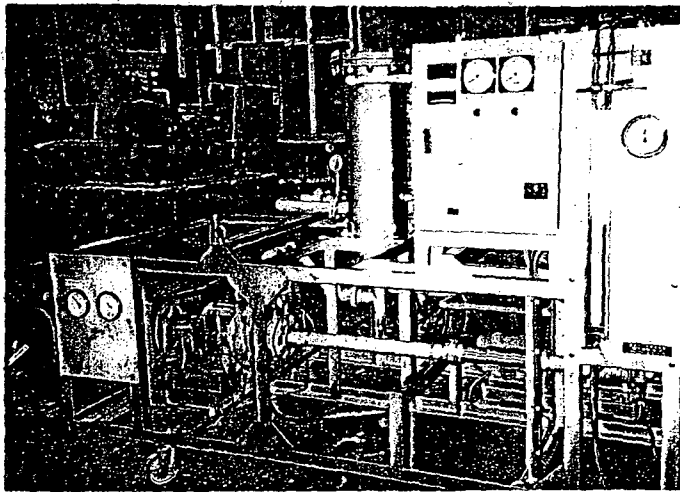
รูปที่ 13 และ 14 จะแสดงถึงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ที่วัดในหน่วยของความเร่งในแนวตั้ง เมื่อตัวเลขควาวิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16 และ 1.78 ซึ่งจะพบว่าสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะแถบกว้างชนิดที่เรียกว่า Noise Floor โดยที่มียอดของสัญญาณอยู่ในลักษณะไม่แน่นอน กล่าวคือเป็นสัญญาณลักษณะสุ่ม และจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อระดับของปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นมีความรุนแรงมากขึ้น ตัวเลขควาวิเดชั่นจะลดลง และสัญญาณ Noise Floor จะมียอดสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งในกรณีนี้จะขยายชัดเจนขึ้นที่ความถี่สูงกว่า 10,000 CPM ขึ้นไป ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 14

5. บทสรุป

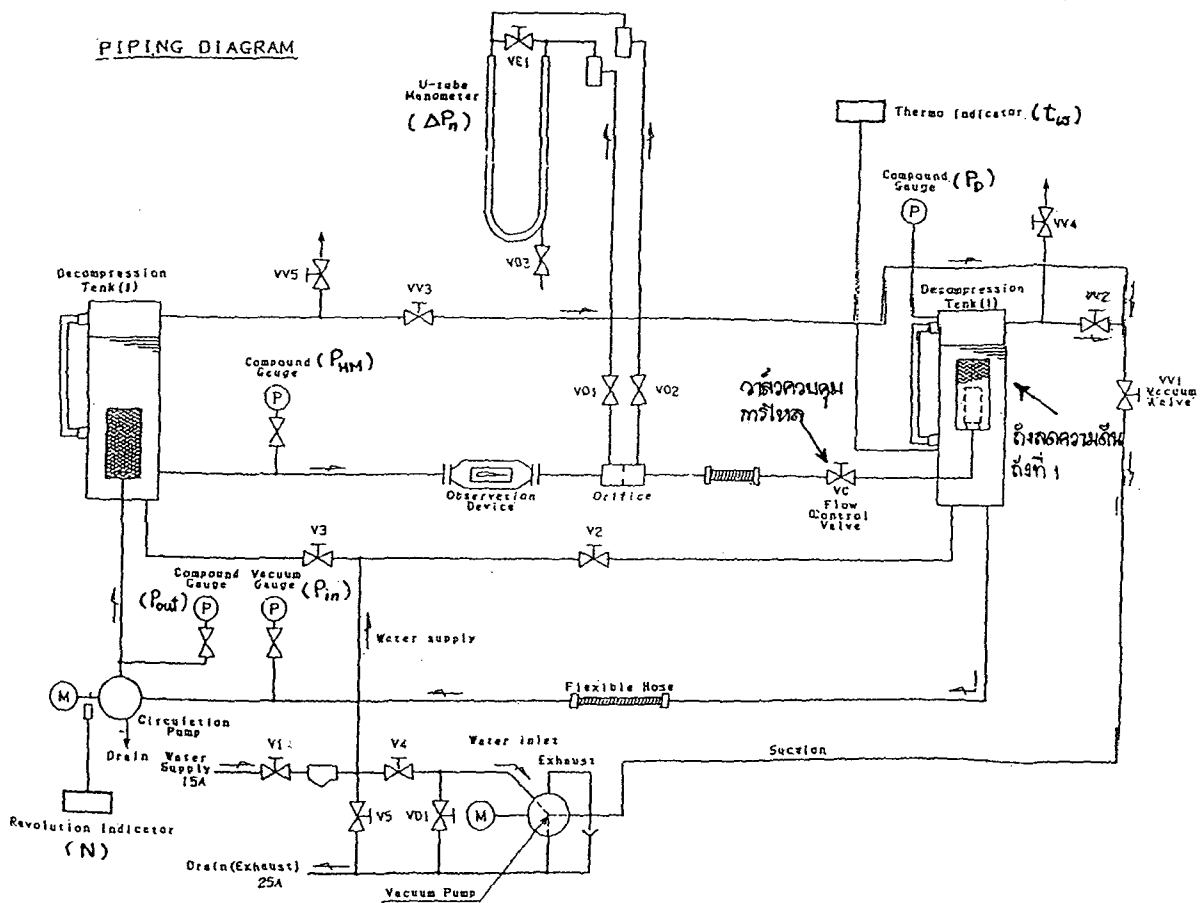
จากการจำลองปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นขึ้นในเครื่องทดลองจะเห็นได้ชัดเจนว่า ระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นนั้นจะแปรผกผันกับตัวเลขควาวิเดชั่น การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นจะสามารถสังเกตได้จากผลการพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่โดยเฉพาะในหน่วยของความเร่ง สัญญาณที่บ่งบอกถึงปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นจะมีลักษณะเป็นสัญญาณในลักษณะแถบกว้างแบบสุ่มอย่างชัดเจนตลอดช่วงความถี่และชัดเจนในบริเวณความถี่ค่อนข้างสูง และจะขยายขนาดของสัญญาณอย่างชัดเจนเมื่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นเพิ่มขึ้น และในกรณีที่ปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นเกิดขึ้นที่เครื่องสูบน้ำ จะเห็นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ Blade Pass Frequency ด้วย ในขณะที่เมื่อปรับให้แบบจำลองรูปแพนอากาศให้ขวางการไหลมากขึ้น ก็เกิดปรากฏการณ์ควาวิเดชั่นรุนแรงมากขึ้น และจะพบสัญญาณการสั่นสะเทือนในลักษณะเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

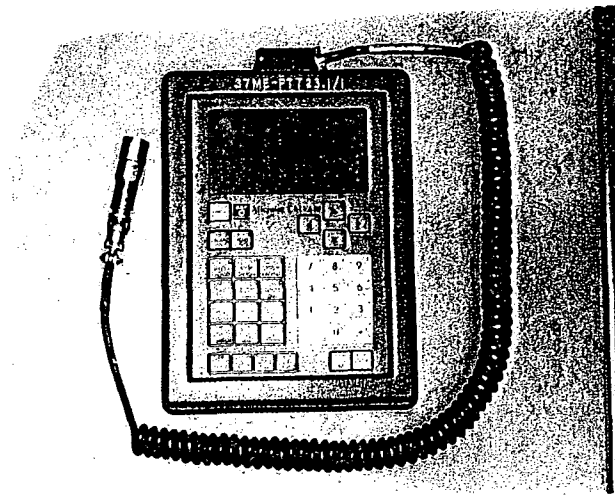
- [1] ก่อเกียรติ บุญชูกุล สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ "การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน การเฝ้าตรวจและการจัดการการบำรุงรักษา" สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) 2540
- [2] Sank,R.L., Tchobanoglous,G., Newton,D., Bosserman II,B.E., Jones,G.M., "Pumping Station Design", Butterworths, 1989
- [3] Berry,J.E., "Concentrated Vibration Signature Analysis and Related Condition Monitoring Techniques.", Technical Associates of Charlotte, Inc., 1984
- [4] Fox,R.W., McDonald,A.T., "Introduction to Fluid Mechanics", fifth edition, John Wiley, 1998
- [5] Buscarello,R.T., "Practical Solutions to Machinery and Maintenance Vibration Problems", Update International , Inc., 1995



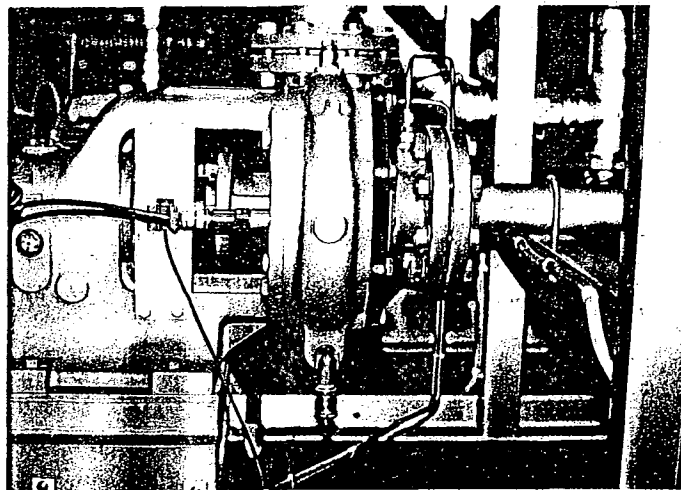
รูปที่ 1 เครื่องทดลอง Cavitation Phenomenon Experimental Apparatus



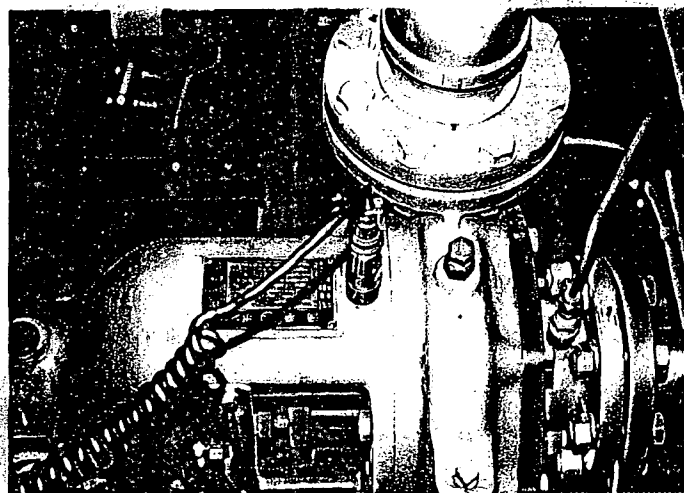
รูปที่ 2 แผนภาพระบบท่อและเครื่องมือวัดของเครื่องทดลองปรากฏการณ์เคาวิตชัน



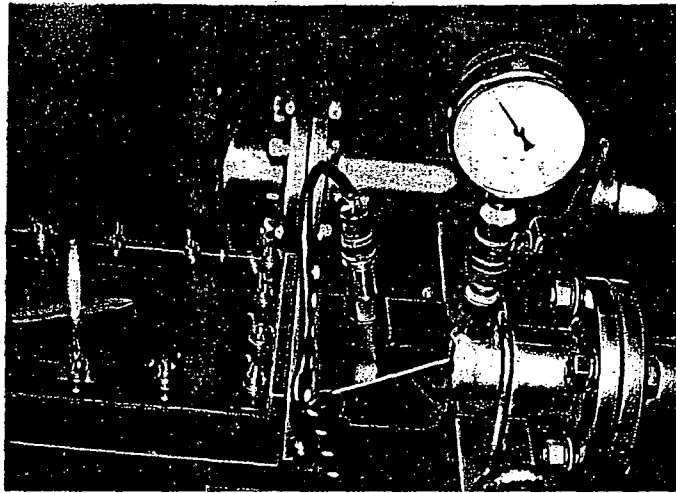
รูปที่ 3 เครื่องมือวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและทรานส์ดิวเซอร์ชนิดวัดความเร่ง



รูปที่ 4 ภาพแสดงการติดตั้งหัววัดความเร่งที่เครื่องสูบน้ำในทิศตามแนวแกน



รูปที่ 5 ภาพแสดงการติดตั้งหัววัดความเร่งที่เครื่องสูบน้ำในทิศตามแนวรัศมี



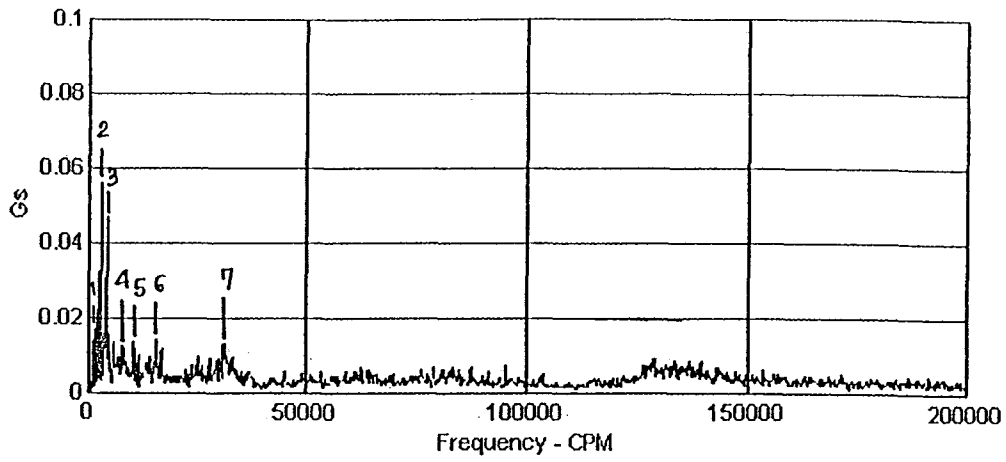
รูปที่ 6 ภาพแสดงการติดตั้งหัววัดความเร่งที่ตัวต่อ Test Section

	ความเร็วรอบของ เครื่องสูบน้ำ (rpm)	P (kgf/m ²)	P _v (kgf/m ²)	ρ (kgf.s ² /m ⁴)	V (m/s)	k _M	Cavitation Phenomenon
1	1,100	1,626	428	101.5	1.92	6.40	
2	1,200	1,082	480	101.5	1.98	3.03	
3	1,300	1,014	502	101.5	2.16	2.16	
4	1,400	946	522	101.5	2.23	1.68	

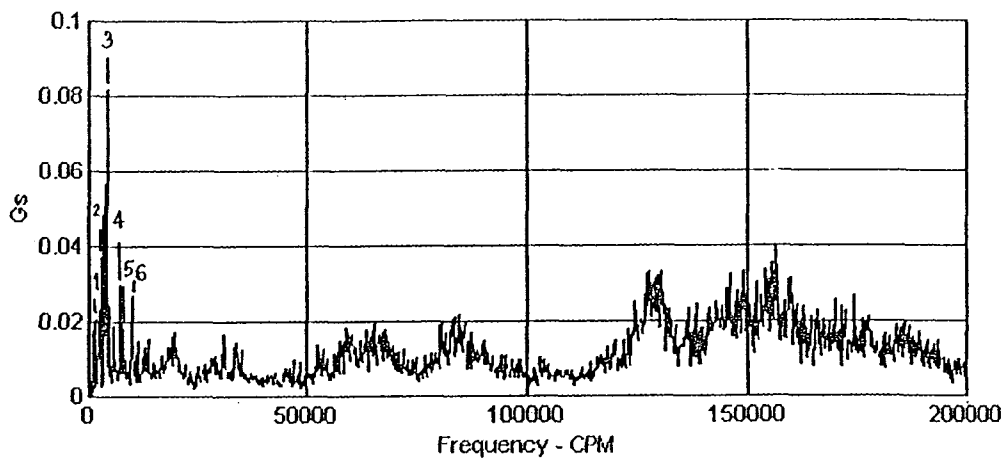
ตารางที่ 1 แสดงถึงตัวเลขควิตซ์ัน และภาพจำลองของการเกิดปรากฏการณ์ควิตซ์ันที่ใบพัดเครื่องสูบน้ำ



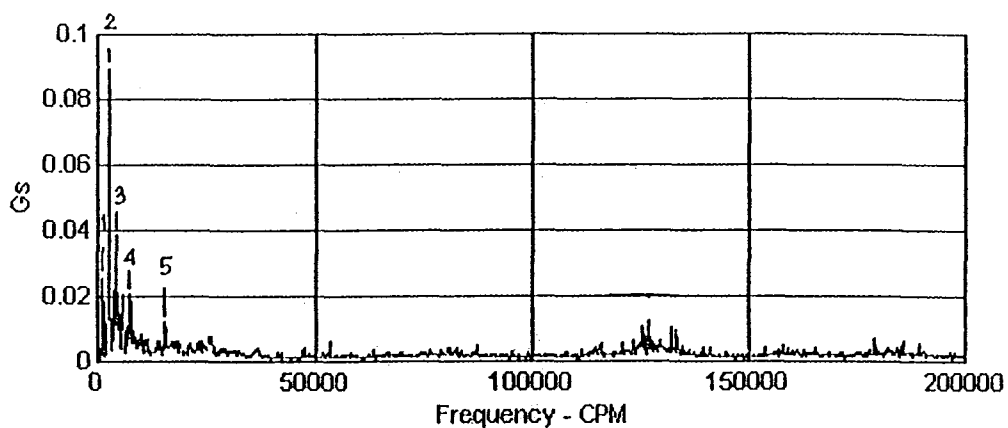
รูปที่ 7 ภาพแสดงฟองไอจากปรากฏการณ์ควิตซ์ันที่เรือนเครื่องสูบน้ำที่ตัวเลขควิตซ์ันมีค่าเท่ากับ 1.68



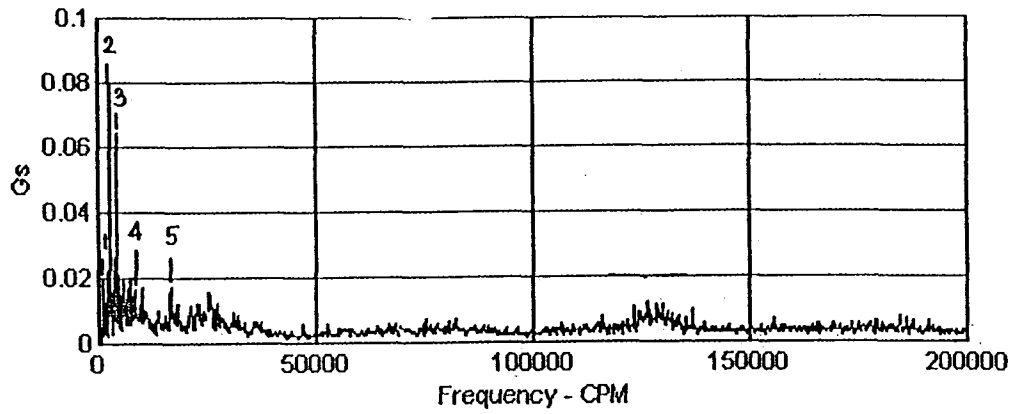
รูปที่ 8 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความเร่งซึ่งวัดที่เรือนเครื่องสูบน้ำในแนวแกนที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16 โดยที่ 1, 2, 3 อยู่ที่ 1x,2x,3X RPM (Motor) 4, 6, 7 อยู่ที่ 1x, 2x, 4x BPF (6xRPM Pump) , 5 อยู่ที่ 18x Belt RPM





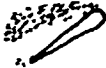
รูปที่ 9 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความเร่งซึ่งวัดที่เรือนเครื่องสูบน้ำในแนวแกนที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 1.68 โดยที่ 1, 2, 3 อยู่ที่ 1x,2x,3X RPM (Motor) 5 อยู่ที่ 1xBPF (6xRPM Pump) , 4 อยู่ที่ 12x Belt RPM



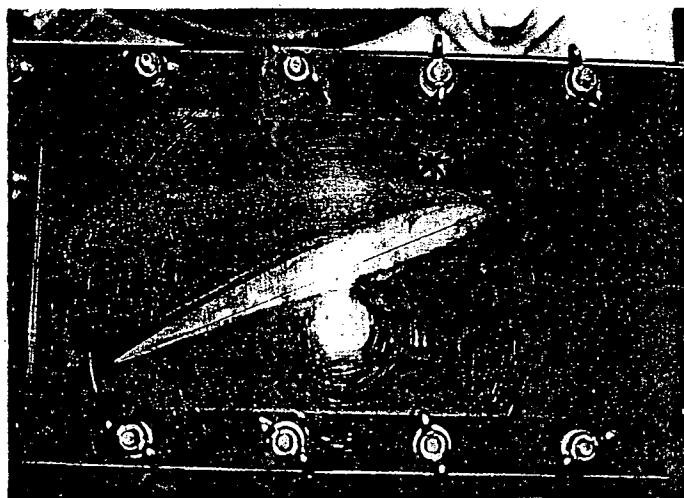
รูปที่ 10 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความเร่งซึ่งวัดที่เรือนเครื่องสูบน้ำในแนวรัศมีที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16 โดยที่ 1, 2, 3 อยู่ที่ 1x,2x,3X RPM (Motor) 4, 5อยู่ที่ 1x, 2xBPF (6xRPM Pump)



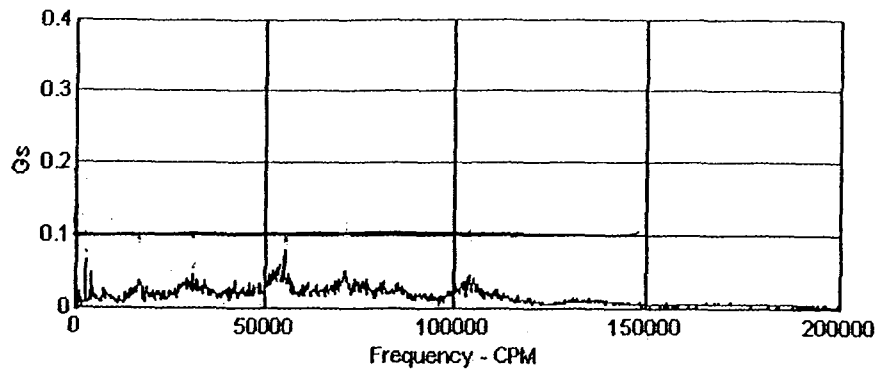
รูปที่ 11 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความเร่งซึ่งวัดที่เรือนเครื่องสูบน้ำในแวนวิคที่มีตัวเลขคาวิตีชันมีค่าเท่ากับ 1.68 โดยที่ 1, 2, 3 อยู่ที่ 1x,2x,3X RPM (Motor) 4, 5 อยู่ที่ 1x, 2x BPF (6xRPM Pump)

	ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำ (rpm)	P (kgf/m ²)	P _v (kgf/m ²)	ρ (kgf.s ² /m ⁴)	V (m/s)	k _m	Cavitation Phenomenon
1	1,200	12,830	412	101.5	7.58	4.25	
2	1,200	11,330	458	101.5	9.95	2.16	
3	1,200	10,330	504	101.5	10.50	1.78	

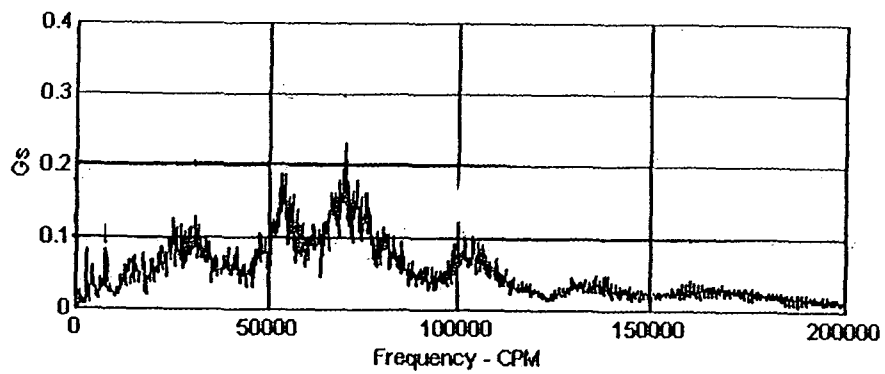
ตารางที่ 2 แสดงถึงตัวเลขคาวิตีชัน และภาพจำลองของการเกิดปรากฏการณ์คาวิตีชันที่ใบพัดเครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 12 ภาพแสดงฟองไอจากปรากฏการณ์คาวิตีชันที่ Test Section ที่ตัวเลขคาวิตีชันมีค่าเท่ากับ 1.78



รูปที่ 13 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความถี่ซึ่งวัดที่ Test Section ในแนวตั้งที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16



รูปที่ 14 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความถี่ซึ่งวัดที่ Test Section ในแนวตั้งที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 1.78