

ปรากฏการณ์ควิเตชันกับสัญญาณการสั่นสะเทือน

Cavitation and Vibration Signal

สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ปิยรัตน์ อาชาวรัตน์ พงศธร รักสินเจริญศักดิ์
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถ.พญาไท กรุงเทพฯ 10330

บทคัดย่อ

ปรากฏการณ์ควิเตชันที่ระดับความรุนแรงต่างกัน ถูกจำลองขึ้นในเครื่องทดลองปรากฏการณ์ควิเตชัน โดยที่ความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเตชันจะถูกกำหนดด้วยตัวเลขควิเตชัน การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ควิเตชันถูกนำมาพิจารณาและวิเคราะห์ การตรวจวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนกระทำที่ตัวเรือนเครื่องสูบน้ำ และบริเวณ Test Section ที่มีตัวดูดขวางการไหลเป็นรูปแผ่นอากาศ ซึ่งต่างเป็นอุปกรณ์และชิ้นส่วนหลักของเครื่องทดลองปรากฏการณ์ควิเตชัน พบว่าจากปรากฏการณ์ควิเตชันที่เกิดขึ้นที่ตัวเรือนเครื่องสูบน้ำจะมีสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในลักษณะเป็นสัญญาณแถบกว้างแบบสุ่มที่เรียกว่า Noise Floor ที่บริเวณความถี่ที่ค่อนข้างสูง ในช่วงบริเวณ 10,000 – 200,000 CPM โดยที่จะสามารถสังเกตเห็นปรากฏการณ์ควิเตชันอย่างชัดเจนเมื่อตัวเลขควิเตชันมีค่าต่ำกว่า 2.1 โดยประมาณ และเมื่อปรับเงื่อนไขการทำงานของเครื่องทดลองให้ปรากฏการณ์ควิเตชันไปเกิดขึ้นที่ Test Section จะพบว่ามีสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในลักษณะคล้ายคลึงกัน คือมีสัญญาณแถบกว้างแบบสุ่มที่ความถี่ตั้งแต่ 10,000 CPM ขึ้นไป และจะสามารถเริ่มสังเกตเห็นปรากฏการณ์ควิเตชันเมื่อตัวเลขควิเตชันมีค่าเท่ากับ 4.25 และเห็นชัดเจนขึ้นเมื่อตัวเลขควิเตชันมีค่าต่ำลง อาทิเช่นที่ 2.16 และ 1.78 ขนาดของสัญญาณการสั่นสะเทือนจะแปรตามความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเตชัน โดยที่ตัวเลขควิเตชันนี้จะแปรผกผันกับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเตชัน

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

ปรากฏการณ์ควิเตชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากของเหลวมีความดันสถิตเฉพาะที่ต่ำกว่าความดันไอของมัน ซึ่งก็จะทำให้ของเหลวดังกล่าวเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นฟองไอน้ำจำนวนมาก และเมื่อฟองไอน้ำเหล่านี้เคลื่อนตัวไปอยู่ในตำแหน่งที่มีความดันสูงขึ้น ฟองไอน้ำจะแตกออก และของเหลวโดยรอบฟองจะไหลเข้าสู่ช่องว่างที่เกิดจากการแตกตัวของฟองไอน้ำอย่างฉับพลันทำให้เกิดการกระแทกของของเหลว ก่อให้เกิดการสั่นสะเทือน และเกิดการกัดกร่อนของผิวโลหะที่อยู่ใกล้ นอกจากนี้ก็จะมีเสียงดังตามมาด้วย ปรากฏการณ์ควิเตชันมักเกิดในบริเวณที่ของเหลวมีความเร็วสูงซึ่งจะส่งผลให้ความดันสถิตเฉพาะที่ของของเหลวในบริเวณนั้นต่ำลง และเมื่อความดันลดต่ำกว่าความดันไอก็จะเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันขึ้น ปรากฏการณ์ควิเตชันมักเกิดที่บริเวณปากทางเข้าและบริเวณใบพัดของเครื่องสูบน้ำ และในระบบท่อที่มีการออกแบบที่ไม่ดี และในบริเวณหลังสิ่งกีดขวางการไหล อาทิเช่น หลัวาล์วที่หรีโกลปิด เป็นต้น ในการตรวจสอบว่าในระบบการไหลจะมีปรากฏการณ์ควิเตชันเกิดขึ้นหรือไม่ หากไม่มีเครื่องมือเฉพาะก็อาจสามารถสังเกตได้ด้วยการฟังเสียงในส่วนที่เกิดปรากฏการณ์ควิเตชันซึ่งจะมีเสียงดังเหมือนก้อนกรวดไหลกระแทกผิวโลหะ หรือสังเกตจากการสั่นสะเทือน ในบทความนี้จะกล่าว

ถึงการวิเคราะห์ปัญหาของปรากฏการณ์คาวิเทชัน โดยจะพิจารณาจากสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่เพื่อใช้เป็นเครื่องมือในการพยากรณ์การเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันล่วงหน้า และพยายามหาทางแก้ไขก่อนที่จะเกิดความเสียหายรุนแรงแก่ระบบเครื่องจักร

2. พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์คาวิเทชัน

ตามนิยามของปรากฏการณ์คาวิเทชันที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 1 นั้น จะเห็นได้ว่าการเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันจะขึ้นกับความดันเฉพาะที่ของของเหลว และความดันไอ พารามิเตอร์ที่นำตัวแปรสำคัญทั้งสองมาพิจารณาเพื่อกำหนดว่าของเหลวจะเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันขึ้นหรือไม่ จะถูกเรียกว่า ตัวเลขคาวิเทชัน (Cavitation Number) [2]¹ ซึ่งมีค่าเท่ากับ

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

k_M = ตัวเลขคาวิเทชัน

P = ความดันสัมบูรณ์ของของเหลว

P_v = ความดันไอของของเหลว

ρ = ความหนาแน่นของของเหลว

V = ความเร็วของของเหลว

ตัวเลขคาวิเทชันสามารถใช้ในการกำหนดการเกิดและระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิเทชัน โดยที่ตัวเลขยิ่งน้อย ความรุนแรงของปรากฏการณ์ยิ่งมาก

ในกรณีของเครื่องสูบน้ำ พารามิเตอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งสามารถอ้างอิงถึงการเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันได้ก็คือ ค่า NPSH Net Positive Suction Head [2, 4] สำหรับเครื่องสูบน้ำแต่ละเครื่องในแต่ละจุดทำงานจะมีค่า NPSH ที่ต่ำสุดที่จะทำให้ไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันขึ้นซึ่งเรียกเป็นค่า NPSH_r Required Net Positive Suction Head และในกรณีของการติดตั้งระบบเครื่องสูบน้ำกับชุดท่อ ค่า NPSH ของระบบจะสามารถเขียนได้เป็น

$$NPSH_a = H - H_v$$

ซึ่ง $NPSH_a$ = Available Net Positive Suction Head

H = ค่าความดันสัมบูรณ์ของของเหลวในจุดที่พิจารณาในรูปของความสูงของลำน้ำ

H_v = ค่าความดันไอของของเหลวในจุดที่พิจารณาในรูปของความสูงของลำน้ำ

ดังนั้นหาก $NPSH_a$ ของระบบมีค่าสูงกว่า $NPSH_r$ ก็จะไม่เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน ดังนั้นในการออกแบบระบบท่อกับเครื่องสูบน้ำจะต้องคำนึงถึงค่า NPSH เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์คาวิเทชัน

เนื่องจากปรากฏการณ์คาวิเทชันเกิดจากการแตกตัวเป็นฟองไอน้ำจำนวนมาก และจะเกิดการกระแทกกันของของเหลวที่ไหลเข้าสู่ฟองไอน้ำที่แตกตัวในลักษณะสุม ดังนั้นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดจากปรากฏ

การณ์คาวิเทชันนั้นควรจะเป็นสัญญาณในลักษณะสุม [1, 3, 5] โดยมีขนาดของสัญญาณขึ้นกับความรุนแรงของปรากฏการณ์คาวิเทชัน

3. ชุดทดลองปรากฏการณ์คาวิเทชัน

ในการศึกษาการสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คาวิเทชันจะกระทำโดยการจำลองสภาวะปรากฏการณ์คาวิเทชันขึ้นในชุดเครื่องทดลอง Cavitation Phenomenon Experimental Apparatus รุ่น CPE-2412 B ซึ่งเป็นเครื่องทดลองที่ประกอบด้วยเครื่องสูบน้ำแบบ Volute เครื่องสูบน้ำสุญญากาศ มอเตอร์เหนี่ยวนำกระแสสลับแบบสามเฟส มุเล่ สายพาน ดึงลดความดัน 2 ดึง 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 ก็จะสามารถจำลองปรากฏการณ์คาวิเทชันให้เกิดขึ้นที่ตัวเครื่องสูบน้ำ หรือที่ Test Section ได้ ซึ่งที่เครื่องสูบน้ำและที่ Test Section ของเครื่องทดลองนี้จะมีส่วนที่เป็นผนังใสที่สามารถใช้สังเกตเห็นปรากฏการณ์คาวิเทชันซึ่งเกิดขึ้นได้ โดยใช้ Strobe Lite รุ่น CMSS 6165 ของบริษัท SKF จำกัด เข้าช่วยให้เห็นปรากฏการณ์คาวิเทชันอยู่ในลักษณะภาพนิ่งที่ชัดเจนขึ้น

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

4. สัญญาณการสั่นสะเทือน

การวิเคราะห์การสั่นสะเทือนจากปรากฏการณ์คาวิเทชันกระทำโดยใช้หัววัดความเร่งจับยึดติดตัวเรือนเครื่องสูบน้ำในแนวดิ่ง(แนวรัศมี)และในแนวแกนในกรณีที่ได้อ้างอิงปรากฏการณ์คาวิเทชันขึ้นที่เครื่องสูบน้ำ และจะใช้หัววัดความเร่งจับยึดในแนวดิ่งที่ตัวต่อกับ Test Section ในกรณีที่ได้อ้างอิงปรากฏการณ์คาวิเทชันขึ้นที่ Test Section รูปที่ 4 5 และ 6 แสดงถึงการจับยึดหัววัดที่เครื่องสูบน้ำ และ Test Section

ด้วยการปรับเงื่อนไขการไหลในระบบท่อกับชุดทดลองจะสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์คาวิเทชันขึ้นที่ระหว่างใบพัดเครื่องสูบน้ำ ซึ่งสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยการใช้ Strobe lite ปรับความถี่ของแสงให้มีความถี่เท่ากับอัตราเร็วของการหมุนของเครื่องสูบน้ำ และที่แต่ละเงื่อนไขจะสามารถทำการบันทึกค่าความดันและอุณหภูมิของน้ำที่เข้าสู่เครื่องสูบน้ำ และความดันลดของน้ำที่คร่อม Orifice meter ซึ่งใช้ในการ

วัดอัตราการไหล ข้อมูลที่ได้จากการวัดในแต่ละเงื่อนไขสามารถนำไปทำการคำนวณหาค่าตัวเลขควิเดชั่นได้ ในตารางที่ 1 จะแสดงถึงตัวเลขควิเดชั่น และภาพจำลองการเกิดปรากฏการณ์ควิเดชั่นที่ใบพัดเครื่องสูบน้ำ ซึ่งจากการปรับความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำจาก 1,100 ถึง 1,400 รอบต่อนาที จะเห็นการเกิดปรากฏการณ์ควิเดชั่นได้ชัดเจนมากขึ้นเมื่อเครื่องสูบน้ำทำงานที่ความเร็วรอบตั้งแต่ 1,300 รอบต่อนาทีขึ้นไป ซึ่งที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,300 รอบต่อนาทีจะตรงกับตัวเลขควิเดชั่นเท่ากับ 2.16 และที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,400 รอบต่อนาทีปรากฏการณ์จะรุนแรงมากขึ้นจนเห็นฟองอากาศจำนวนมากเกิดขึ้นที่บริเวณใบพัดของเครื่องสูบน้ำ ซึ่งตัวเลขควิเดชั่นจะมีค่าเท่ากับ 1.68 รูปที่ 7 จะแสดงถึงฟองอากาศจำนวนมากจากปรากฏการณ์ควิเดชั่นที่ใบพัดเครื่องสูบน้ำเมื่อตัวเลขควิเดชั่นเท่ากับ 1.68 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเดชั่นจะแปรผกผันกับตัวเลขควิเดชั่น

รูปที่ 8 และ 9 จะแสดงถึงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ที่วัดในหน่วยของความถี่ในทิศทางตามแนวแกน ที่ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 1,300 และ 1,400 รอบต่อนาที และรูปที่ 10 และ 11 จะแสดงถึงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ที่วัดในหน่วยของความถี่ในทิศทางตามแนวรัศมี ที่ความเร็วรอบของเครื่องสูบน้ำเท่ากับ 1,300 และ 1,400 รอบต่อนาที จะสังเกตได้ว่าขนาดของสัญญาณในแนวแกนมีขนาดที่ชัดเจนกว่าสัญญาณในแนวรัศมีค่อนข้างมาก ซึ่งจะสามารถอธิบายได้ว่าปรากฏการณ์ควิเดชั่นเกิดขึ้นอย่างมากในแนวทอชุดเข้า และเกิดการกระแทกของฟองอากาศที่แตกกับจานของใบพัดเครื่องสูบน้ำในแนวแกน จึงทำให้มีการสั่นสะเทือนในแนวแกนมากกว่า ซึ่งก็จะส่งผลให้เห็นสัญญาณในแนวแกนชัดเจนกว่า และยังเห็นสัญญาณการสั่นสะเทือนอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของเครื่องสูบน้ำ อาทิเช่น สัญญาณที่ความเร็วรอบของมอเตอร์ 1,500 รอบต่อนาที สัญญาณฮาร์โมนิกของความถี่รอบสายพาน และสัญญาณที่ความถี่ Blade Pass Frequency ($BPF = 6 \times RPM \text{ pump}$) และฮาร์โมนิกของมัน แต่สัญญาณที่ชัดเจนที่แสดงถึงปรากฏการณ์ควิเดชั่นคือสัญญาณลักษณะแบบสุ่มแบบกว้างๆ ที่เรียกว่า Noise Floor ที่มีตลอดช่วงความถี่ที่พิจารณา และพบว่ามียอดของสัญญาณที่เด่นชัดที่ความถี่ที่ไม่แน่นอน แต่ขนาดของ Noise Floor จะขยายขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเดชั่นสูงขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนเมื่อเครื่องสูบน้ำทำงานที่ความเร็วรอบ 1,400 รอบต่อนาที

และเมื่อให้เครื่องสูบน้ำทำงานที่ความเร็วรอบเท่ากับ 1,200 รอบต่อนาที และปรับเงื่อนไขการไหลของเครื่องทดลองอย่างเหมาะสม จะสามารถจำลองปรากฏการณ์ควิเดชั่นขึ้นที่ Test Section เมื่อของเหลวไหลผ่านแบบจำลองรูปแผนอากาศที่ขวางการไหลอยู่ และจะพบว่าระดับความรุนแรงหรือการเกิดของปรากฏการณ์ควิเดชั่นจะเพิ่มขึ้นเมื่อปรับมุมของแบบจำลองรูปแผนอากาศที่ขวางการไหลให้มากขึ้น ซึ่งระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเดชั่นนี้จะแปรผกผันกับตัวเลขควิเดชั่น ตารางที่ 2 จะแสดงถึงตัวเลขควิเดชั่น และภาพจำลองของปรากฏการณ์ควิเดชั่นที่ Test Section ซึ่งจะเริ่มเห็นฟองอากาศจากปรากฏการณ์ควิเดชั่นเมื่อตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 4.25 และจะเห็นฟองอากาศมากขึ้นเมื่อตัวเลขควิเดชั่นต่ำกว่านั้น และเมื่อปรับเงื่อนไข

ให้แผนอากาศมีมุมบิดสูงขึ้น จะเห็นฟองอากาศมากขึ้นเมื่อตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16 และ 1.78 รูปที่ 12 จะแสดงถึงรูปฟองอากาศที่เกิดขึ้นที่ Test Section เมื่อตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 1.78

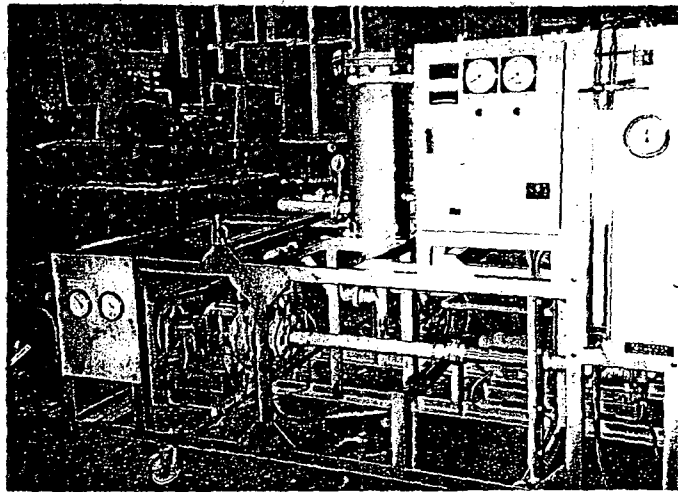
รูปที่ 13 และ 14 จะแสดงถึงสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ที่วัดในหน่วยของความถี่ในแนวตั้ง เมื่อตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16 และ 1.78 ซึ่งจะพบว่ามีสัญญาณการสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะแถบกว้างๆ ที่เรียกว่า Noise Floor โดยที่มียอดของสัญญาณอยู่ในลักษณะไม่แน่นอน กล่าวคือเป็นสัญญาณลักษณะสุ่ม และจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อระดับของปรากฏการณ์ควิเดชั่นมีความรุนแรงมากขึ้น ตัวเลขควิเดชั่นจะลดลง และสัญญาณ Noise Floor จะมีขนาดสูงขึ้นอย่างชัดเจน ซึ่งในกรณีนี้จะขยายชัดเจนขึ้นที่ความถี่สูงกว่า 10,000 CPM ขึ้นไป ดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 14

5. บทสรุป

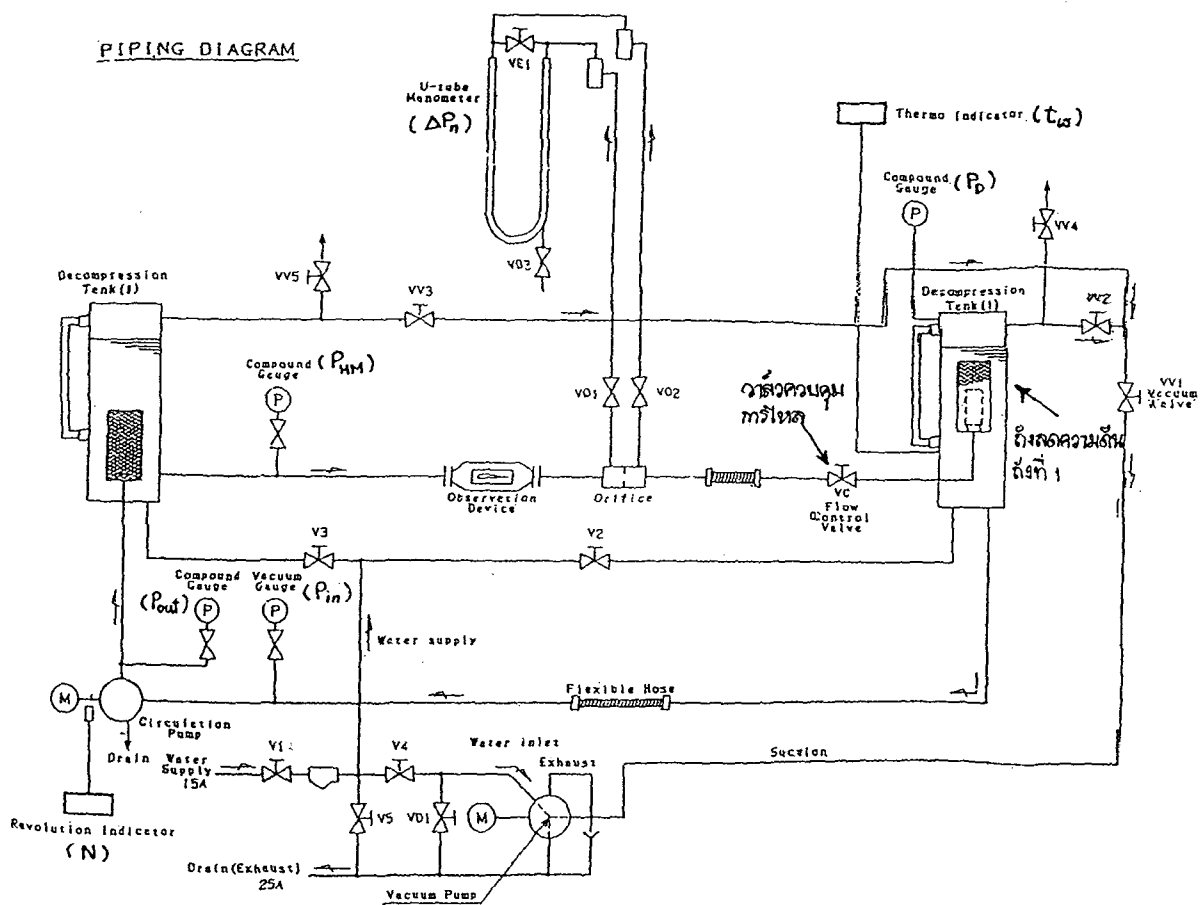
จากการจำลองปรากฏการณ์ควิเดชั่นขึ้นในเครื่องทดลองจะเห็นได้ชัดเจนว่า ระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเดชั่นนั้นจะแปรผกผันกับตัวเลขควิเดชั่น การสั่นสะเทือนที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์ควิเดชั่นจะสามารถสังเกตได้จากการพิจารณาสัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่โดยเฉพาะในหน่วยของความถี่ สัญญาณที่บ่งบอกถึงปรากฏการณ์ควิเดชั่นจะมีลักษณะเป็นสัญญาณในลักษณะแถบกว้างแบบสุ่มอย่างชัดเจนตลอดช่วงความถี่และชัดเจนในบริเวณความถี่ค่อนข้างสูง และจะขยายขนาดของสัญญาณอย่างชัดเจนเมื่อระดับความรุนแรงของปรากฏการณ์ควิเดชั่นเพิ่มขึ้น และในกรณีที่ปรากฏการณ์ควิเดชั่นเกิดขึ้นที่เครื่องสูบน้ำ จะเห็นสัญญาณการสั่นสะเทือนที่ความถี่ Blade Pass Frequency ด้วย ในขณะที่เมื่อปรับให้แบบจำลองรูปแผนอากาศให้ขวางการไหลมากขึ้น ก็เกิดปรากฏการณ์ควิเดชั่นรุนแรงมากขึ้น และจะพบสัญญาณการสั่นสะเทือนในลักษณะเดียวกัน

เอกสารอ้างอิง

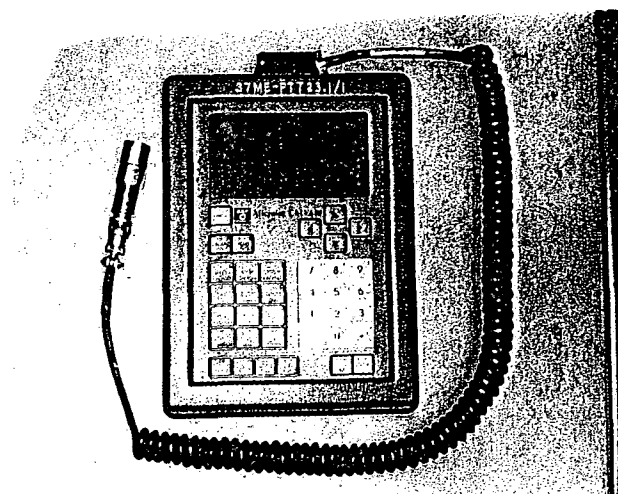
- [1] ก่อเกียรติ บุญชูกุล สมศักดิ์ ไชยะภินันท์ ชัยโรจน์ คุณพนิชกิจ "การวิเคราะห์การสั่นสะเทือน การเฝ้าตรวจและการจัดการการบำรุงรักษา" สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) 2540
- [2] Sank,R.L., Tchobanoglous,G., Newton,D., Bosserman II,B.E., Jones,G.M., "Pumping Station Design", Butterworths, 1989
- [3] 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



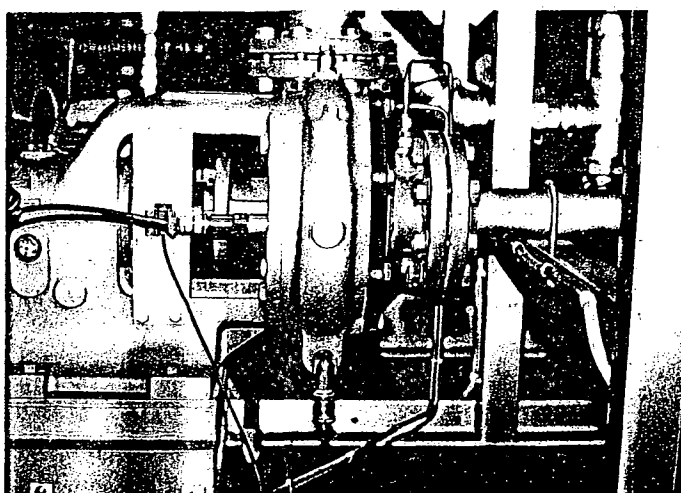
รูปที่ 1 เครื่องทดลอง Cavitation Phenomenon Experimental Apparatus



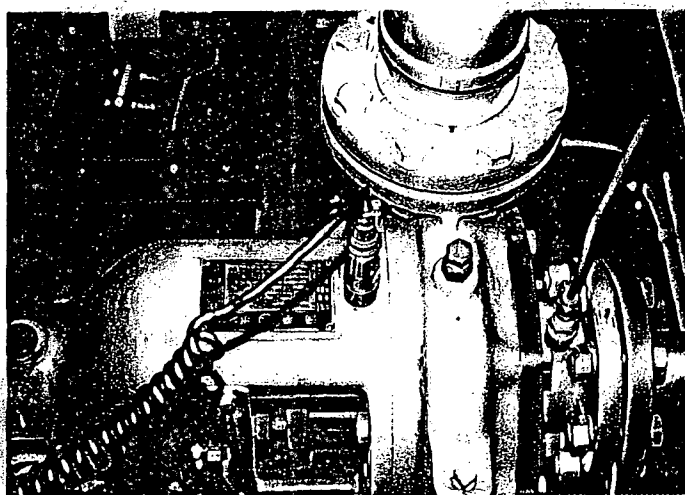
รูปที่ 2 แผนภาพระบบท่อและเครื่องมือวัดของเครื่องทดลองปรากฏการณ์เคาวิเทชั่น



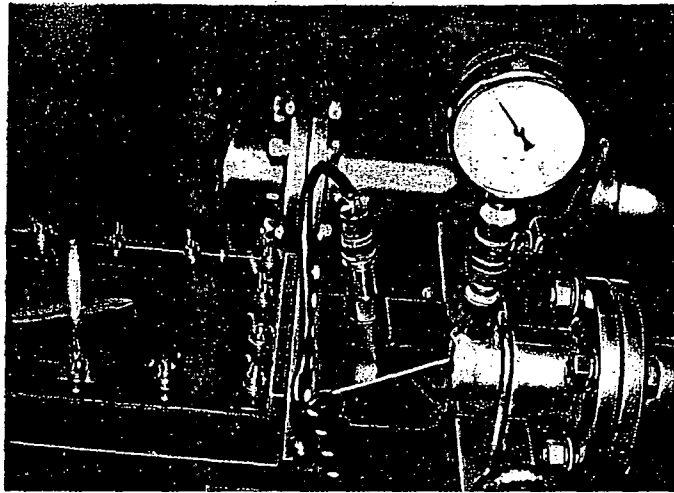
รูปที่ 3 เครื่องมือวัดสัญญาณการสั่นสะเทือนและทรานส์ดิวเซอร์ชนิดวัดความเร่ง



รูปที่ 4 ภาพแสดงการติดตั้งหัววัดความเร่งที่เครื่องสูบน้ำในทิศตามแนวแกน



รูปที่ 5 ภาพแสดงการติดตั้งหัววัดความเร่งที่เครื่องสูบน้ำในทิศตามแนวรัศมี



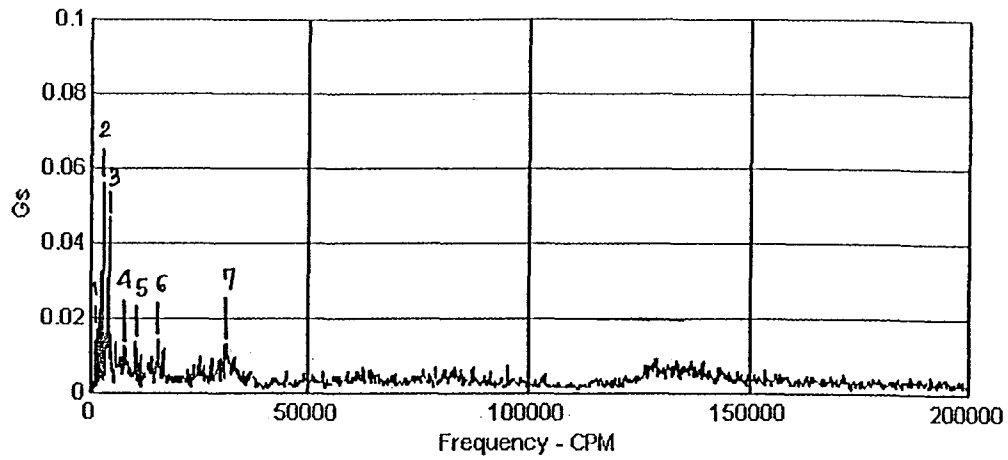
รูปที่ 6 ภาพแสดงการติดตั้งหัววัดความแรงที่ตัวต่อ Test Section

	ความเร็วรอบของ เครื่องสูบน้ำ (rpm)	P (kgf/m^2)	P_v (kgf/m^2)	ρ ($\text{kgf.s}^2/\text{m}^4$)	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	

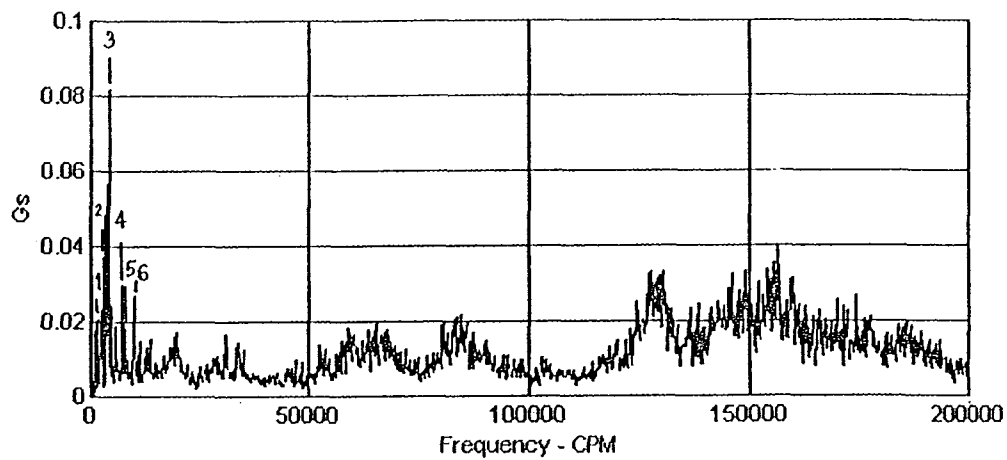
ตารางที่ 1 แสดงถึงตัวเลขควิเตชัน และภาพจำลองของการเกิดปรากฏการณ์ควิเตชันที่ใบพัดเครื่องสูบน้ำ



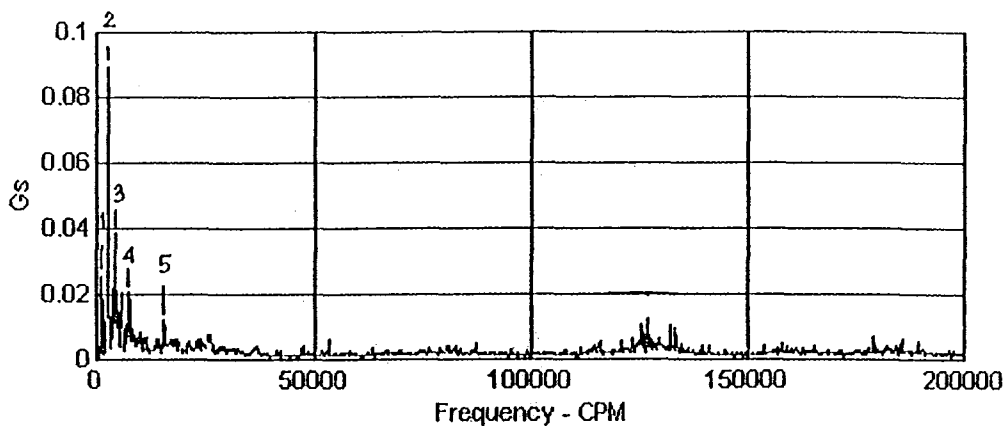
รูปที่ 7 ภาพแสดงฟองอากาศจากปรากฏการณ์ควิเตชันที่เรือนเครื่องสูบน้ำที่ตัวเลขควิเตชันมีค่าเท่ากับ 1.68



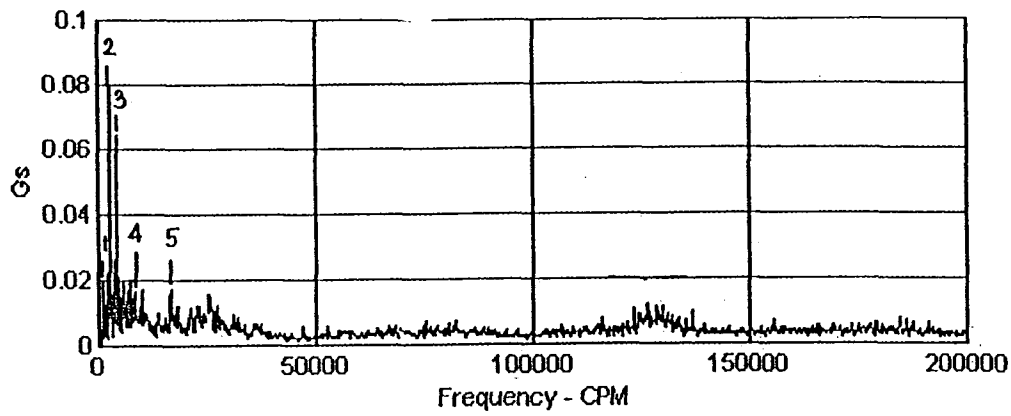
รูปที่ 8 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความเร่งซึ่งวัดที่เรือนเครื่องสูบน้ำในแนวแกนที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16 โดยที่ 1, 2, 3 อยู่ที 1x,2x,3X RPM (Motor) 4, 6, 7 อยู่ที 1x, 2x, 4x BPF (6xRPM Pump) , 5 อยู่ที 18x Belt RPM



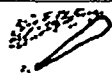
รูปที่ 9 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความเร่งซึ่งวัดที่เรือนเครื่องสูบน้ำในแนวแกนที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 1.68 โดยที่ 1, 2, 3 อยู่ที 1x,2x,3X RPM (Motor) 5 อยู่ที 1xBPF (6xRPM Pump) , 4 อยู่ที 12x Belt RPM



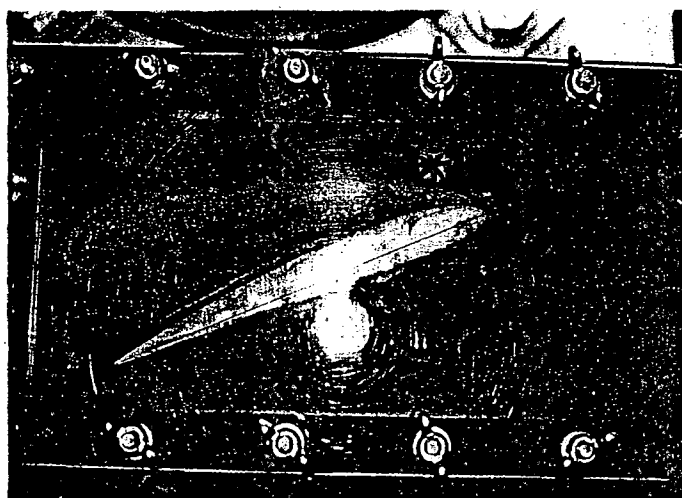
รูปที่ 10 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความเร่งซึ่งวัดที่เรือนเครื่องสูบน้ำในแนวรัศมีที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16 โดยที่ 1, 2, 3 อยู่ที 1x,2x,3X RPM (Motor) 4, 5อยู่ที 1x, 2xBPF (6xRPM Pump)



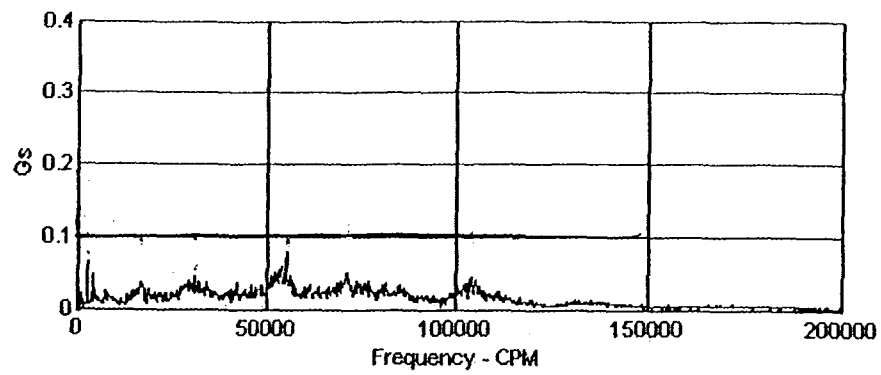
รูปที่ 11 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความเร่งซึ่งวัดที่เรือนเครื่องสูบน้ำในแนวนอนที่มีตัวเลขคาวิตีชันมีค่าเท่ากับ 1.68 โดยที่ 1, 2, 3 อยู่ที่ 1x,2x,3X RPM (Motor) 4, 5 อยู่ที่ 1x, 2x BPF (6xRPM Pump)

	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	1,200	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	

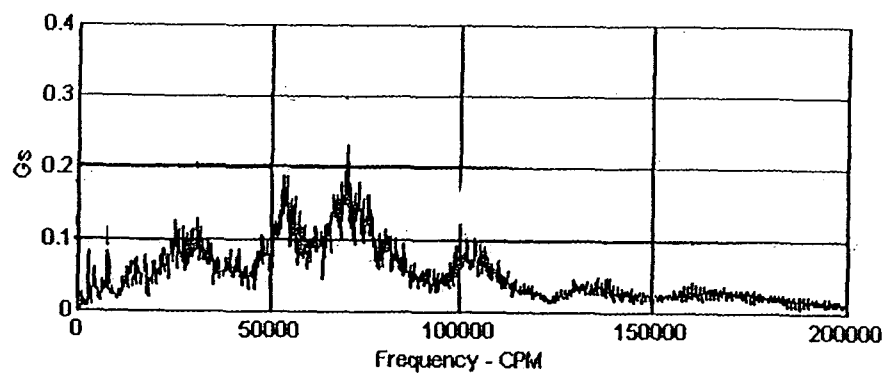
ตารางที่ 2 แสดงถึงตัวเลขคาวิตีชัน และภาพจำลองของการเกิดปรากฏการณ์คาวิตีชันที่ใบพัดเครื่องสูบน้ำ



รูปที่ 12 ภาพแสดงฟองอากาศจากปรากฏการณ์คาวิตีชันที่ Test Section ที่ตัวเลขคาวิตีชันมีค่าเท่ากับ 1.78



รูปที่ 13 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความถี่ซึ่งวัดที่ Test Section ในแนวดิ่งที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 2.16



รูปที่ 14 สัญญาณการสั่นสะเทือนบนโดเมนความถี่ในหน่วยวัดความถี่ซึ่งวัดที่ Test Section ในแนวดิ่งที่ตัวเลขควิเดชั่นมีค่าเท่ากับ 1.78