

การศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อแบบยูนิเวอร์แซล

BEHAVIOR STUDY ON UNIVERSAL JOINT

นายชิตพิพล อนนต์พันธ์* สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ ธวัชชัย นาคพิพัฒน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 โทร 0-2326-4197 *อีเมลล์ nonnwats.a@bu.ac.th

Thitiphol Anontaphan* Somchai Norasethasophon Tawatchai Nakpipat

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,

Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand, Tel: 0-2326-4197, * E-mail: nonnwats.a@bu.ac.th

บทคัดย่อ

ข้อต่อยูนิเวอร์แซล เป็นข้อต่อชนิดหนึ่งที่ถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายมากที่สุดในปัจจุบัน อย่างไรก็ตาม การใช้งานของข้อต่อชนิดนี้โดยทั่วไป จะกำหนดให้มีมุมเอียงระหว่างเพลาขับและเพลาตามไว้ไม่เกิน 30 องศา เนื่องจากการมีมุมเอียงมากขึ้นจะก่อให้เกิดแรงหน่วงจากข้อต่อมากขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจำเป็นต้องใช้แรงบิดเพลาขับมากขึ้นโดยไม่จำเป็น ดังนั้น ในการศึกษาพฤติกรรมของข้อต่อชนิดนี้จึงมุ่งเน้นอิทธิพลของมวลเพลาตาม ลักษณะของมวลเพลาตาม ความเร็วรอบของเพลา องศาระหว่างเพลาขับและเพลาตาม ความเร่งเชิงมุมของเพลาตามสัมพันธ์กับแรงบิดเพลาขับและอุณหภูมิ ด้วยการทดลองและการวิเคราะห์เชิงตัวเลข นอกจากนี้ ในบทความนี้ยังได้เสนอแนวความคิดการประยุกต์ โดยการใช้คุณสมบัติการหน่วงของข้อต่อยูนิเวอร์แซลซึ่งเกิดจากมุมระหว่างเพลาขับและเพลาตามมากกว่า 30 องศา เช่น ลิมิตเต็ดสลลิปดิฟเฟอเรนเชียลและเซ็นเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียลอีกด้วย

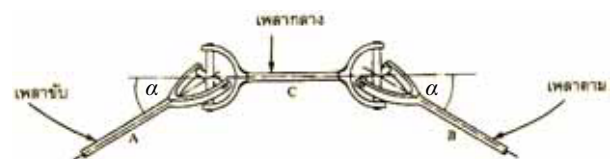
Abstract

Universal joint is one type of joints that are widely used nowadays. However, this type of joint limits the angle between driver and driven shaft not more than 30 degrees. If the angle between the two shafts is more than 30 degrees, retard will increase, and automatically requires unnecessary higher input torque. Therefore, this empirical study of the joint's behavior emphasizes influences of the driven mass, types of driven mass, revolution/minute (rpm), angles between driver and driven shaft and angular accelerations related with input torque and temperature. Further more, this paper also presents the application concept of Universal joint at the angle higher than 30 degrees, such as: Limited Slip Differential and Center Differential.

1. บทนำ

ข้อต่อยูนิเวอร์แซลมีหลักการทำงานโดยทั่วไป คือ 1. เพลาตามหมุนในแนวเดียวกับเพลาขับ เพลาตามจะหมุนตามด้วยความเร็วคงที่ 2. เพลาตามหมุนทำมุมกับเพลาขับ เพลาตามจะหมุนด้วยความเร็ว-ช้าสลับกันอย่างรวดเร็วแปรผันตามมุมตั้งกล่าว นอกจากนั้น ยังเกิดแรงต้านการหมุนที่เพลาขับอีกด้วย ดังนั้น ในการใช้งานทั่วไปจึงกำหนดมุมไว้ไม่เกิน 30 องศา ในด้านตรงข้าม คุณสมบัติตั้งกล่าวของข้อต่อยูนิเวอร์แซลสามารถหน่วงความเร็วของเพลาขับได้เมื่อทำมุมมากขึ้น ดังนั้น ในบทความนี้จะกล่าวถึงการทดสอบพฤติกรรมทั่วไปของข้อต่อยูนิเวอร์แซลและความสามารถในการหน่วงเพลา และในส่วนตัวยของบทความจะกล่าวถึง แนวความคิดการประยุกต์ใช้คุณสมบัติของข้อต่อชนิดนี้กับ ลิมิตเต็ดสลลิปดิฟเฟอเรนเชียลและเซ็นเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียลชนิดแปรผันต่อเนื่อง (ไม่ใช่คลัตช์)

2. ทฤษฎีของข้อต่อยูนิเวอร์แซล



รูปที่ 1 การใช้ UV joint สองชุดเพื่อให้มีความเร็วคงที่

จากรูปที่ 1 กำหนดให้

ω_1 ความเร็วเชิงมุมเพลาขับ (รอบ/นาที)

ω_2 ความเร็วเชิงมุมเพลาตาม (รอบ/นาที)

α มุมเอียงของเพลาขับและเพลาตาม/เพลาตามและเพลาตาม

θ ตำแหน่งที่เพลาขับหมุนในหนึ่งรอบ

ดังนั้น อัตราส่วนความเร็วเชิงมุมของเพลาชับและเพลากลาง คือ

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{1 - \cos^2 \theta \sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \quad (1)$$

ความเร็วสูงสุดและต่ำสุดของเพลากลาง คือ

$$\omega_2 (\text{สูงสุด}) = \omega_1 / \cos \alpha \quad (2)$$

$$\omega_2 (\text{ต่ำสุด}) = \omega_1 \cos \alpha \quad (3)$$

อัตราเร่งเชิงมุมเพลากลาง คือ

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{\omega_1^2 \cos \alpha \sin 2\theta \sin^2 \alpha}{(1 - \cos^2 \theta \sin^2 \alpha)^2} \quad (4)$$

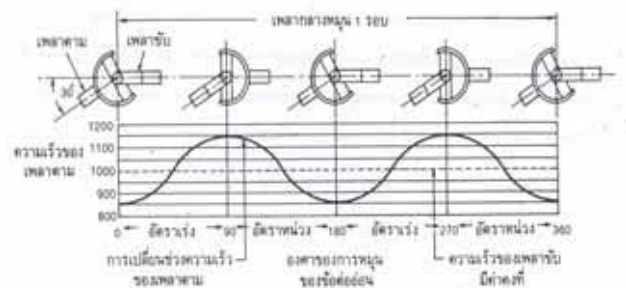
และแรงบิดสูงสุดเพลาชับ คือ

$$T_{max} = \frac{I d\omega_2}{dt} \quad (5)$$

เมื่อ T_{max} = แรงบิดสูงสุด Nm
 I = โมเมนต์ความเฉื่อย $kg.m^2$

3. การติดตั้งข้อต่อยูนิเวอร์แซล

จากสมการ (1) ถึง (4) เมื่อกำหนดให้มุมเอียงของเพลาชับและเพลากลางเท่ากับ 30 องศา และให้เพลาชับมีความเร็วคงที่ 1,000 รอบ/นาที พบว่าเพลากลางซึ่งต่อกับเพลาชับด้วยข้อต่อยูนิเวอร์แซลจะมีความเร็วสูงสุดมากกว่าและต่ำสุดน้อยกว่าเพลาชับตามสมการ (2) และ (3) ดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วของเพลากลาง

ดังนั้น ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องต่อเพลาดำเข้ากับเพลากลางก่อนนำไปใช้งานด้วยข้อต่อยูนิเวอร์แซลอีกหนึ่งชุด ที่มีมุมเอียงเท่ากับเพลาชับและเพลากลางและต้องมีมุมเฟสต่างกัน 180 องศา เพื่อชดเชยให้เพลาดำเข้าหมุนด้วยความเร็วคงที่เท่ากับเพลาชับได้ ดังรูปที่ 1

ในกรณีใช้ข้อต่อยูนิเวอร์แซลชุดเดียว การหมุนของเพลาดำเข้าด้วยรอบไม่คงที่ดังรูปที่ 2 จะก่อให้เกิดแรงบิดต้านที่เพลาชับโดยไม่จำเป็นดังสมการ (4) และ (5) แรงบิดต้านจากเพลาดำเข้านี้จะเพิ่มมากขึ้นเมื่อมุมระหว่างเพลาชับและเพลาดำเข้ามากขึ้น ดังนั้น จึงกำหนดให้มีมุมใช้งานโดยทั่วไปไม่เกิน 30 องศา

ในด้านตรงข้าม แรงบิดต้านจากเพลาดำเข้าที่เกิดจากข้อต่อยูนิเวอร์แซล นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานแทนอุปกรณ์หน่วงความเร็วแบบอื่นๆได้ เช่น ผ้าเบรกหรือแผ่นคลัตช์ในกรณีที่ต้องการความแม่นยำในการหน่วงความเร็ว ความสามารถในการทำนายแรงหน่วงล่วงหน้าและนอกจากนั้น ยังต้องการความคงทนต่อการเปลี่ยนคุณสมบัติของวัสดุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอีกด้วย

4. การประมาณค่าแรงบิดสูงสุด

โดยการใช้สมการ (4) และ (5) ทำให้สามารถทำนายแรงบิดต้าน (แรงหน่วง) สูงสุดที่เพลาชับเนื่องจากผลของข้อต่อยูนิเวอร์แซลได้ ดังตารางที่ 1-3 การกำหนดให้มุมระหว่างเพล (α) ไว้ไม่เกิน 70 องศา เนื่องจาก เกิดการชนกันของแขนข้อต่อยูนิเวอร์แซลระหว่างการทดสอบ ขณะที่มุมมากกว่า 70 องศา ส่วนการกำหนดความเร็วรอบเพลาชับจะกำหนดโดย การใช้เงื่อนไขประยุกต์ความเร็วของข้อต่อยูนิเวอร์แซลที่เหมาะสมกับลิมิตเตีตสลิปและเซ็นเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียล

ตารางที่ 1 แสดงการทำนายแรงบิด(ต้าน)สูงสุด (Nm) สัมพันธ์กับความเร็วยรอบเพลาชับ (rpm) มุมระหว่างเพล (α) และมวลถ่วง 1 kg

(rpm)	(α)				
50	.03	.04	.058	.085	.14
55	.035	.05	.069	.1	.161
60	.042	.059	.082	.125	.195
65	.098	.068	.098	.146	.225
70	.113	.08	.113	.17	.274
50	55	60	65	70	

ตารางที่ 2 แสดงการทำนายแรงบิด(ต้าน)สูงสุด (Nm) สัมพันธ์กับความเร็วยรอบเพลาชับ (rpm) มุมระหว่างเพล (α) และมวลถ่วง 5 kg

(rpm)	(α)				
50	.531	.73	1.05	1.52	2.52
55	.635	.891	1.24	1.89	2.9
60	.756	1.06	1.47	2.26	3.51
65	1.77	1.23	1.77	2.63	4.05
70	2.36	1.44	2.36	3.06	4.93
50	55	60	65	70	

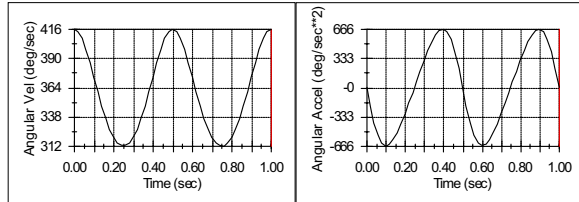
ตารางที่ 3 แสดงการทำนายแรงบิด(ต้าน)สูงสุด (Nm) สัมพันธ์กับความเร็วยรอบเพลาชับ (rpm) มุมระหว่างเพล (α) และมวลถ่วง 8 kg

(rpm)	(α)				
50	1.03	1.42	2.04	2.96	4.9
55	1.23	1.74	2.41	3.7	5.65
60	1.47	2.06	2.87	4.39	6.83
65	3.44	2.4	3.44	5.13	7.87
70	3.96	2.8	3.96	5.97	9.59
50	55	60	65	70	

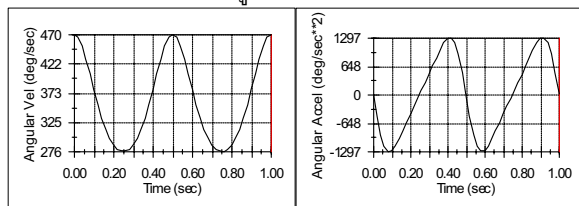
AMM027

5. ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ความเร่งและมุม

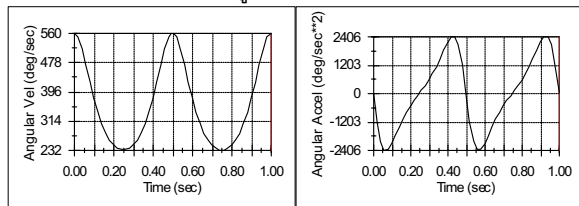
จากสมการ (2) (3) และ (4) สามารถสรุปตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่าง ความเร็วและความเร่งเมื่อมีมุมระหว่างเพลาชับและเพลาดตาม 30 ถึง 85 องศาและกำหนดให้มีความเร็วเพลาชับเท่ากับ 60 รอบ/นาที ดังรูปที่ 3 - 9



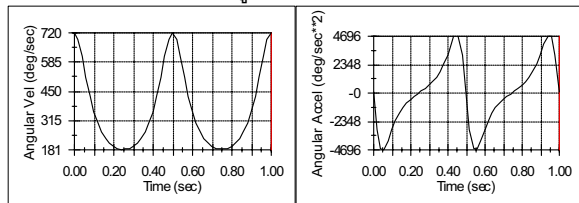
รูปที่ 3 $\alpha = 30^\circ$



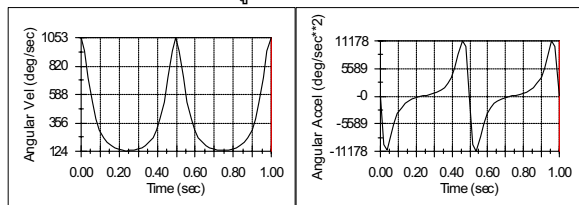
รูปที่ 4 $\alpha = 40^\circ$



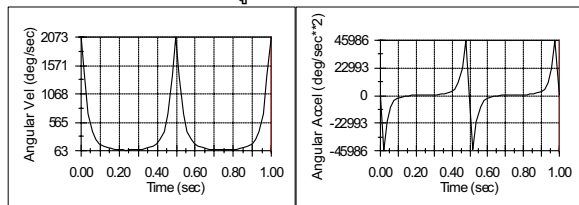
รูปที่ 5 $\alpha = 50^\circ$



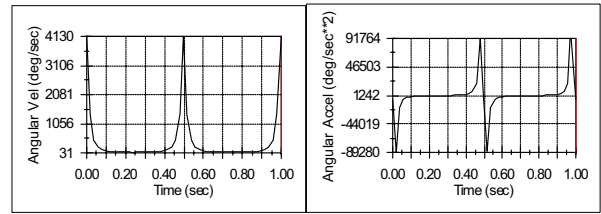
รูปที่ 6 $\alpha = 60^\circ$



รูปที่ 7 $\alpha = 70^\circ$



รูปที่ 8 $\alpha = 80^\circ$



รูปที่ 9 $\alpha = 85^\circ$

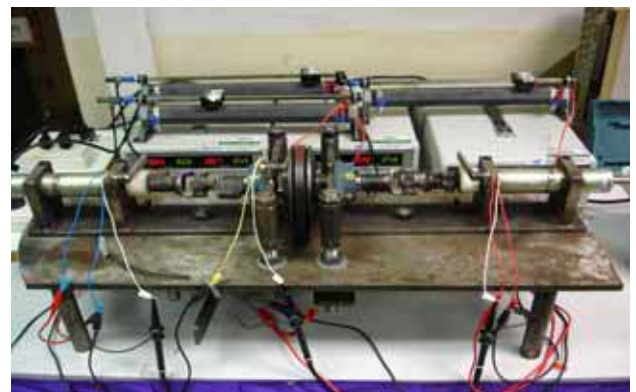
จากรูปที่ 3 - 9 พบว่า เมื่อเปลี่ยนมุมระหว่างเพลาชับและเพลาดตามให้มากขึ้น ความเร็วเพลาชับและเพลาดตามจะมากกว่าและน้อยกว่าเพลาชับมากขึ้นตามไปด้วยโดยเฉพาะอย่างยิ่งความเร่งของเพลาดตาม

ความเร่งที่มีปริมาณมากของเพลาดตาม เมื่อมีมุมระหว่างเพลาดมากนี้ เป็นผลให้ต้องใช้แรงบิดมากขึ้นหรือมีแรงท่วงเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง อย่างไรก็ตาม แรงท่วงที่เกิดขึ้นมีปริมาณไม่คงที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ 2 ชุด หรือเป็นจำนวนคู่เพื่อชดเชยกันเป็นผลให้เกิดแรงท่วงคงที่ได้

6. ชุดทดสอบพฤติกรรมของข้อต่อยูนิเวอร์แซล

ชุดทดสอบข้อต่อยูนิเวอร์แซลแสดงดังรูปที่ 10 มีรายละเอียดดังนี้

- 6.1 เพลาชับติดตั้งตรงกลางแท่นรับแรงขับจากมอเตอร์ผ่านสายพาน
- 6.2 ติดตั้งข้อต่อยูนิเวอร์แซลจำนวน 2 ชุด ที่ปลายเพลาชับทั้ง 2 ด้าน ซึ่งนอกจากจะทำให้มีความเร็วรอบคงที่แล้วยังทำให้มีแรงบิด(ต้าน)คงที่ที่เพลาชับอีกด้วย
- 6.3 ติดตั้งแกนกดและลูกเบี้ยว 3 ชุด ที่เพลาชับและเพลาดตามทั้ง 2 ด้าน เพื่อวัดตำแหน่งที่สัมพันธ์กันของเพลาทังสามด้วย Oscilloscope
- 6.4 การเปรียบเทียบวัดของสัญญาณจากแกนกดและลูกเบี้ยวทั้ง 3 ชุด ทำได้โดยใช้แหล่งจ่ายและชุดความต้านทานปรับค่าได้แยกอิสระ
- 6.5 ติดตั้ง Load cell เพื่อวัดแรงบิดของมอเตอร์และเปรียบเทียบวัดด้วยก่อนนำหน้ากันอย่างอิง

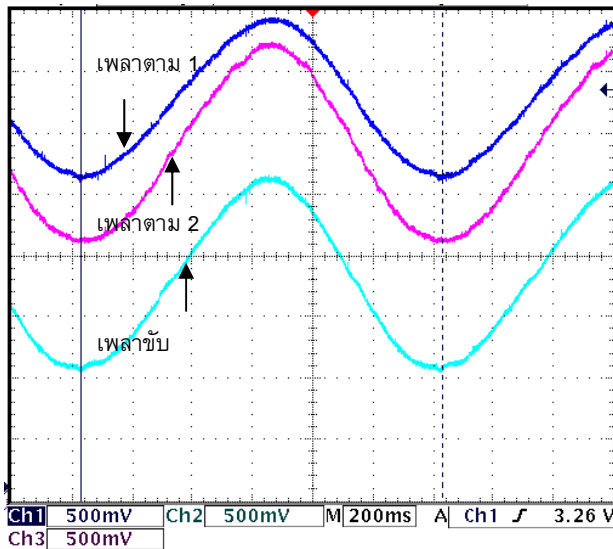


รูปที่ 10 ชุดทดสอบข้อต่อยูนิเวอร์แซล

7. วิธีการทดสอบ

การทดสอบจะใช้เงื่อนไขความเร็วรอบเพลาชับ (rpm) และมุมระหว่างเพลาด (α) ดังตารางที่ 1-3 โดยมีสัญญาณมาตรฐานจากชุดลูกเบี้ยวทั้ง 3 ชุด ดังตัวอย่างรูปที่ 11 เพลาชับมีความเร็ว 60 rpm และมีมุมระหว่างเพลาด $\alpha = 180$ องศา

AMM027

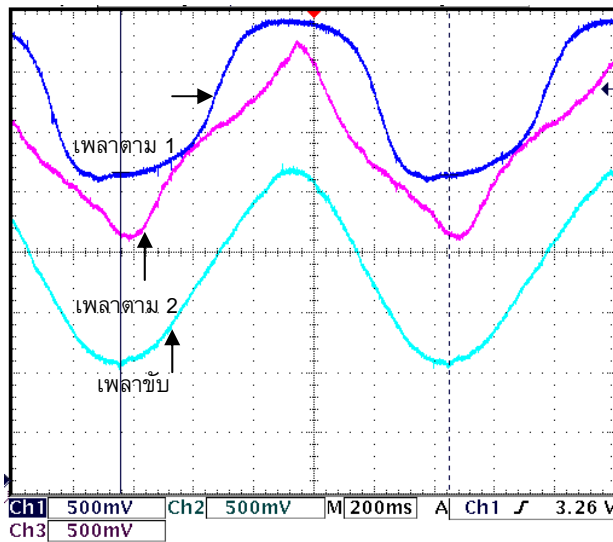


รูปที่ 11 สัญญาณมาตรฐานจากชุดลูกเบี้ยวทั้ง 3 ชุด

8. ผลการทดสอบ

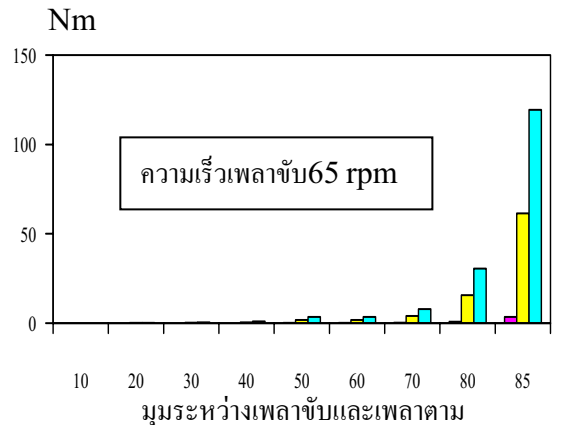
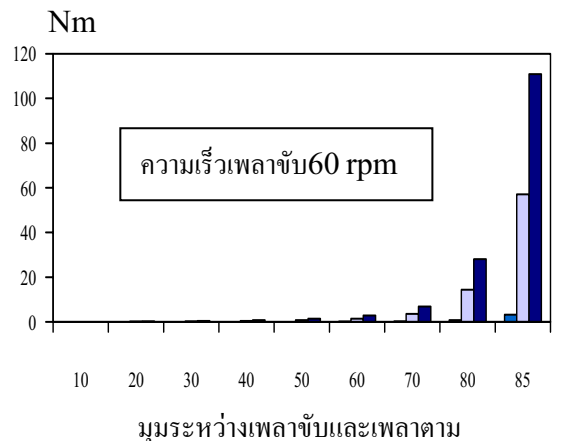
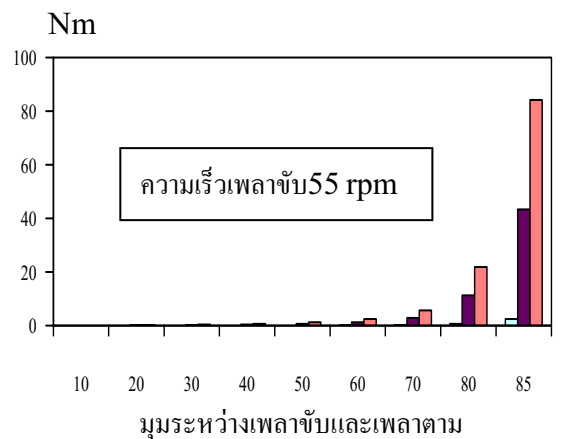
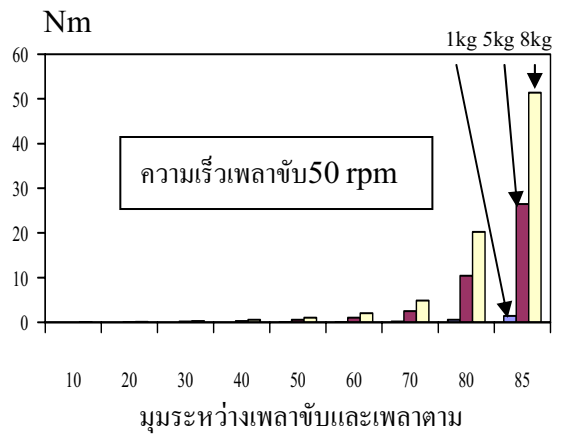
จากตัวอย่างสัญญาณแสดงตำแหน่งของเฟลาทั้งสาม ดังรูปที่ 12 พบว่า เมื่อมีมุมระหว่างเฟลา (α) มากขึ้น เฟลาตามทั้งสองจะมีความเร็วเปลี่ยนแปลงมากขึ้นตามไปด้วยดังสมการ (2) และ (3)

อย่างไรก็ตาม เฟลาขับยังคงมีความเร็วคงที่ซึ่งหมายถึง เฟลาขับใช้แรงบิดขับเฟลาตามทั้งสองคงที่อีกด้วย โดยการวัดแรงบิด Nm จากสัญญาณ Load cell แสดงดังรูปที่ 13

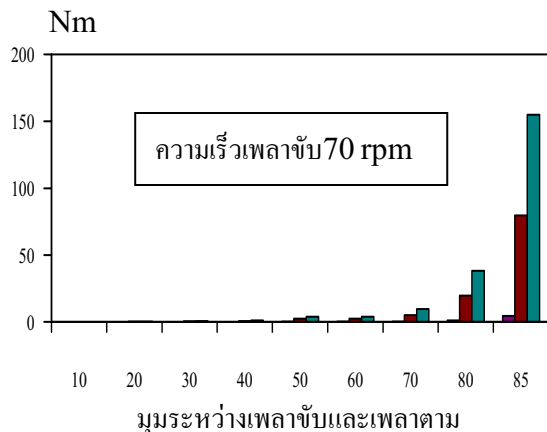


รูปที่ 12 ความเร็วเฟลาขับ 60 rpm $\alpha = 60$ องศา

รูปที่ 13 แสดงผลการคำนวณทางทฤษฎีในสมการ (4) และ (5) โดยให้แกน x คือมุมระหว่างเฟลาขับและเฟลาตาม แกน y คือแรงบิดที่เฟลาขับต้องใช้หมุนเฟลาตาม ส่วนกลุ่มกราฟแท่งในแต่ละมุมระหว่างเฟลาหมายถึงกลุ่มของน้ำหนักที่ใช้ถ่วงเฟลาตามมี 3 ขนาด คือ 3, 5 และ 8 กิโลกรัม



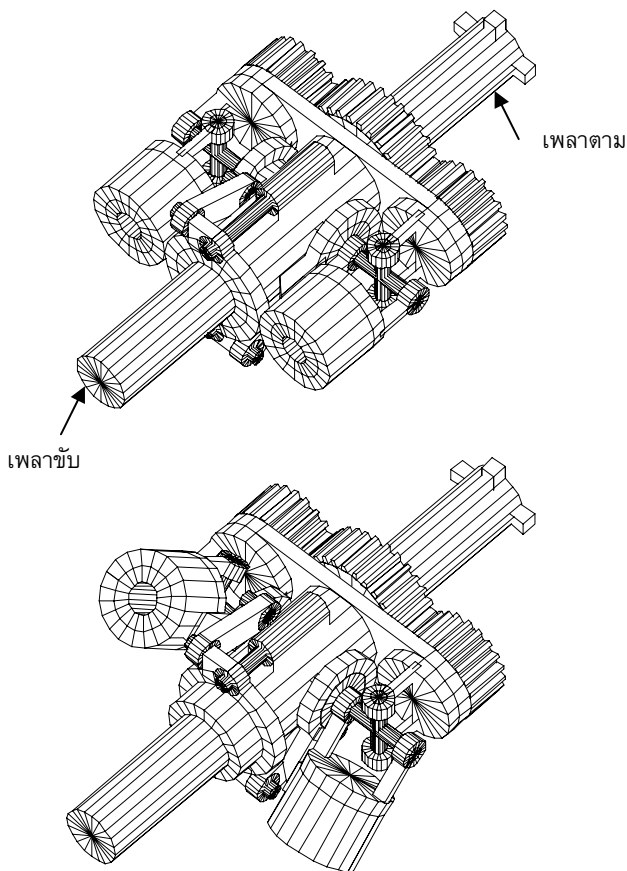
รูปที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเฟลาขับและเฟลาตาม



รูปที่ 13 (ต่อ)กราฟความสัมพันธ์ระหว่างเพลาขับและเพลาตาม

9. แนวความคิดการประยุกต์ใช้ เป็น เซ็นเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียล และ ลิมิตเต็ดสลลิปดิฟเฟอเรนเชียล

จากคุณสมบัติของข้อต่อที่สามารถหน่วงเพลาได้ เมื่อมีมุมระหว่างเพลา α มากขึ้นและมีค่าคงที่ตามทฤษฎีและผลการทดสอบดังรูปที่ 12 และ 13 ดังนั้น ผู้เขียนจึงเสนอสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถประยุกต์ใช้คุณสมบัติดังกล่าวได้ เช่น เซ็นเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียล และ ลิมิตเต็ดสลลิปดิฟเฟอเรนเชียล ชนิดแปรผันต่อเนื่อง ดังนี้



รูปที่ 14 แสดงแนวความคิด เซ็นเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียล ชนิดแปรผันต่อเนื่อง (Torque on demand)

จากรูปที่ 14 แสดงแนวความคิดการประยุกต์ใช้ เป็น เซ็นเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียล โดยเพลาขับจะรับแรงบิดจากเครื่องยนต์และส่งไปยังเพลาหลัง 100 % ส่วนแรงบิดที่ส่งไปเพลาหน้าจะขึ้นกับแรงบิด(ด้าน)ที่เกิดจากชุดข้อต่อยูนิเวอร์แซล

ส่วนการประยุกต์ใช้ เป็น เฟืองท้ายแบบ ลิมิตเต็ดสลลิปดิฟเฟอเรนเชียล ข้อต่อยูนิเวอร์แซลจะถูกขับตรงโดยเฟืองดอกจอกในชุดเฟืองท้ายทั่วไป ส่วนชุดควบคุมมุมของข้อต่อยูนิเวอร์แซลจะยึดติดกับชิ้นส่วนที่ใช้ยึดเฟืองบายศรี

10. สรุปผล

จากคุณสมบัติของข้อต่อยูนิเวอร์แซล ที่มีความสามารถหน่วงเพลาได้ถูกตรวจสอบโดยการทดลอง การวิเคราะห์เชิงตัวเลขและโปรแกรมเขียนแบบ 3 มิติ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า ข้อต่อสามารถทำงานได้ที่มุมสูงสุด $\alpha = 70$ องศา ก่อนเกิดการชนกันของข้อต่อ ส่วนแรงบิดสูงสุดจะขึ้นกับความเร็วของเพลาขับ ω_1 ที่สัมพันธ์กับมุม α การเพิ่มแรงหน่วงสามารถทำได้โดยเพิ่มชุดของข้อต่อยูนิเวอร์แซลเป็นจำนวนคู่ ในตอนท้ายได้เสนอการประยุกต์ใช้คุณสมบัติดังกล่าวเป็น เซ็นเตอร์ดิฟเฟอเรนเชียล และ ลิมิตเต็ดสลลิปดิฟเฟอเรนเชียล

จากข้อจำกัดทางกายภาพของ ข้อต่อยูนิเวอร์แซล พบว่า เกิดการชนกันภายในข้อต่อเองเมื่อมีมุมระหว่างเพลา มากกว่า $\alpha = 70$ องศา อีกทั้งยังต้องการกระบอกยึดแกนเพลาขับและเพลาตามค่อนข้างยาว ในกรณีต้องการความมั่นคงในการหมุน เป็นผลให้มีน้ำหนักมากและยังมีแรงเฉื่อยมากตามไปอีกด้วย

อย่างไรก็ตาม ผู้เขียนได้พัฒนาลักษณะทางกายภาพใหม่ซึ่งสามารถทำงานได้ที่มุมระหว่างเพลา $\alpha = 70$ ถึง 90 องศา (เพลาส่งกำลัง 100 %) โดยไม่ชนกันอีกทั้งยังมีขนาดกะทัดรัดซึ่งจะได้เสนอโอกาสต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] เผด็จ แสนเกษม, กลศาสตร์ยานยนต์, กรุงเทพฯ, โรงพิมพ์ เอช. เอ็น. กรุ๊ป, 2539
- [2] สมชัย นรเศรษฐ์โสภณ, กลศาสตร์เครื่องจักรกล, 2538
- [3] บัญชา คังตระกูล, ปานเพชร ชินินทร, ยงยศ จินารักษ์, กลศาสตร์ยานยนต์, หจก. เอช. เอ็น. การพิมพ์, 2532
- [4] Jack Erjavec, *Automatic transmissions and tranaxles*, Delmar publishers, 1995
- [5] <http://www.howstuffworks.com>
- [6] <http://inventors.about.com>
- [7] <http://wikipedia.org>
- [8] Charles E. Cooney, Jr. - Borg-Warner Corp., Double Cardan Constant Velocity Universal Joint, SAE 740671
- [9] Jochen F. Balken - Uni-Cardan AG, Siegburg, W. Germany GKN Automotive Componen, Systematic Development of Universal and Constant Velocity Joints, SAE 840566