



บทที่ 6

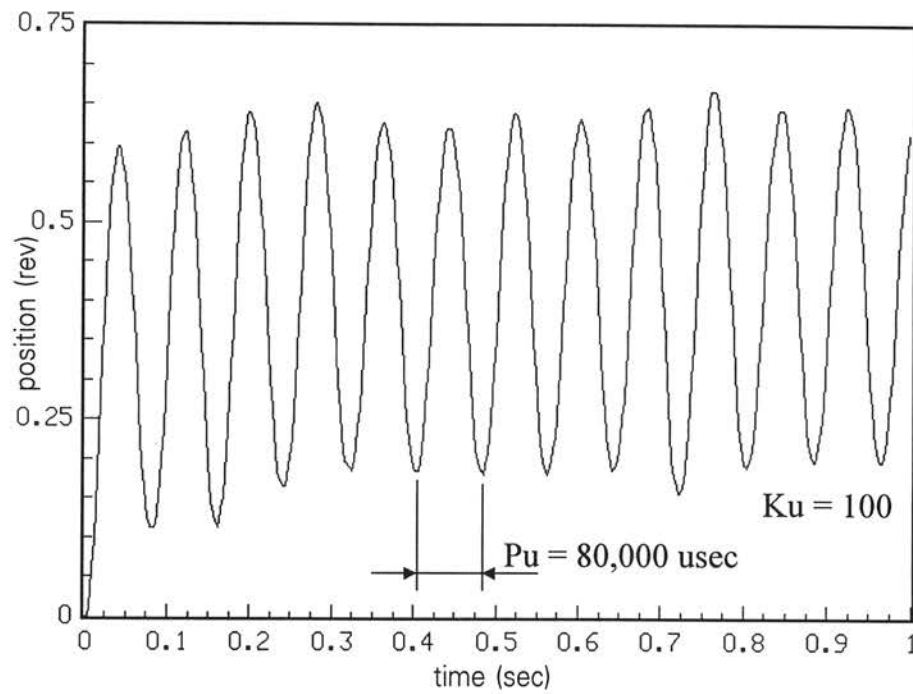
ผลการทดลอง

การปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม

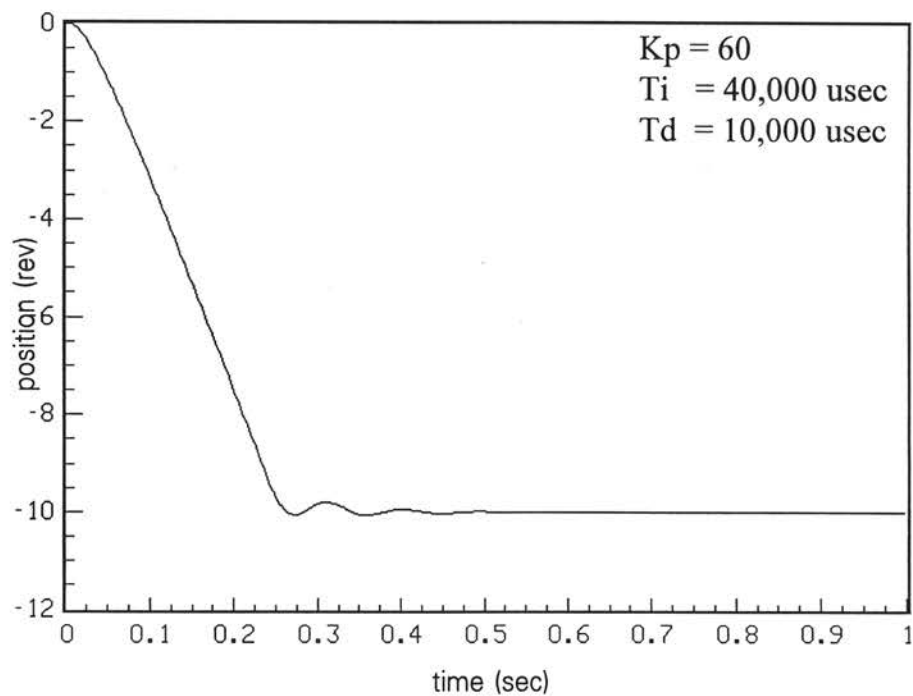
ใช้วิธีการของซิกเลอร์และนิโคลส์ ในการปรับค่าเกนตัวควบคุม ลินเข็มเซอร์โว , ตัวกระตุ้นแบบไซลินอยด์ และระบบห้ามล้อ ABS การปรับค่าพารามิเตอร์มีอยู่ด้วยกัน 2 วิธี คือวิธีพรอเซส รีเอคชั่น (process reaction method) และวิธีอัลทิเมท ไซเคิล (ultimate cycle method) วิธีทั้งสองดังกล่าวจะใช้เป็นแนวทางในการหาค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุม ซึ่งใช้ได้ดีในทางปฏิบัติ เมื่อระบบหรือกระบวนการมีคุณลักษณะเป็นเชิงเส้น แต่เมื่อระบบหรือกระบวนการมีคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ได้จากวิธีของซิกเลอร์และนิโคลส์ จะถูกปรับแต่งจนกระทั่งให้ได้ผลการตอบสนองที่เหมาะสมมากที่สุด โดยการลองผิดลองถูก (trial and error)

ผลการตอบสนองของลินเข็มเซอร์โว

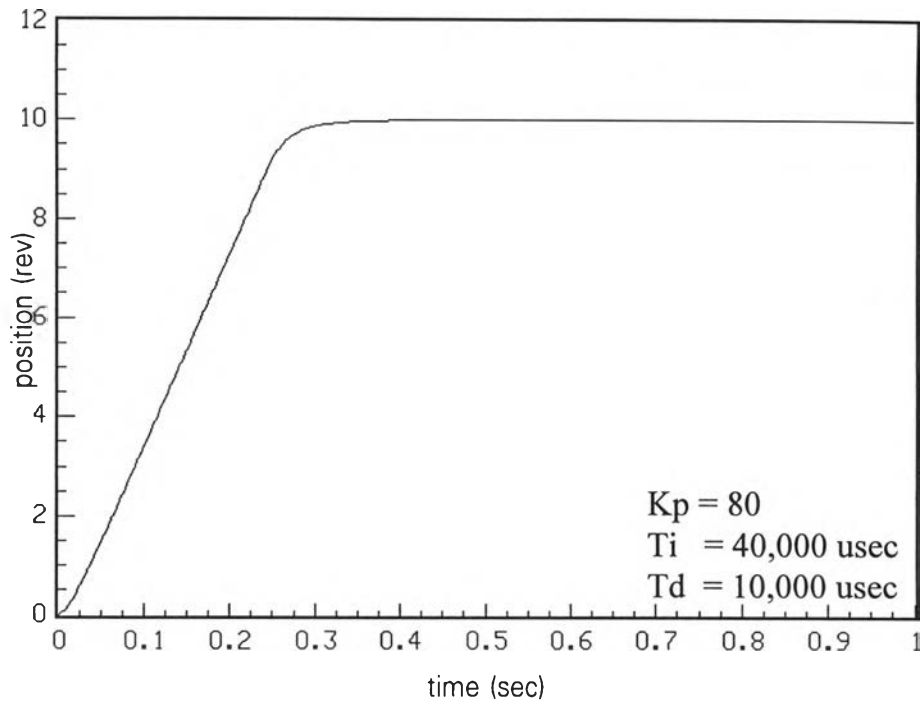
การปรับค่าเกนตัวควบคุมของลินเข็มเซอร์โว ใช้วิธีอัลทิเมท ไซเคิล ป้อนสัญญาณเข้าแบบขั้นหนึ่งหน่วย ทำการควบคุมแบบป้อนกลับ เป็นแบบสัดส่วน (proportional control) ทำการต่อการควบคุมแบบสัดส่วนนี้ เข้ากับลินเข็มเซอร์โวแล้ว ค่อย ๆ เพิ่มค่าเกนให้มีความมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบเริ่มมีการแกว่งตัว (oscillate) ทำการบันทึกค่าเกนที่ทำให้ระบบเริ่มมีการแกว่ง และให้ค่าเท่ากับ K_u ในขณะเดียวกันนี้ให้ทำการวัดค่าคาบของการแกว่ง (period of oscillation) และให้ค่าเท่ากับ P_u ในการปรับค่าจะได้ค่า $K_u = 100$ และ $P_u = 80,000$ ไมโครวินาที ดังแสดงในรูปที่ 6.1 และจะใช้ชนิดการควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอินทิกรัลบวกกับแบบอนุพันธ์หรือการควบคุมแบบ PID ซึ่งจากการคำนวณโดยใช้ตาราง 4.2 ค่าเกน $K_p = 60$, $T_i = 40,000$ ไมโครวินาที และ $T_d = 10,000$ ไมโครวินาที จากนั้นทำการต่อตัวควบคุมแบบ PID กับ



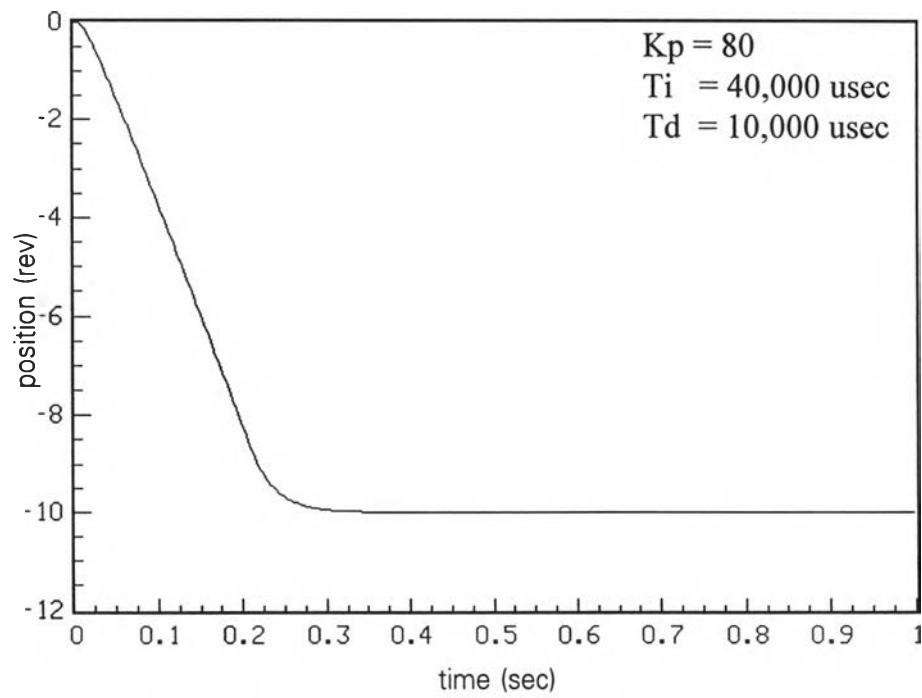
รูปที่ 6.1 แสดงตำแหน่งของลินเข็มเซอร์โวต่อเวลา โดยใช้วิธีอัลทิเมท ไชเคิล
ปรับจนมีการแกว่งตัว



รูปที่ 6.2 แสดงการเปิดลินเข็มเซอร์โว โดยใช้ค่าเกณฑ์ควบคุมจากราง 4.2



รูปที่ 6.3 แสดงผลการตอบสนองของการเปิดลิ้นเข็มเซอร์โว

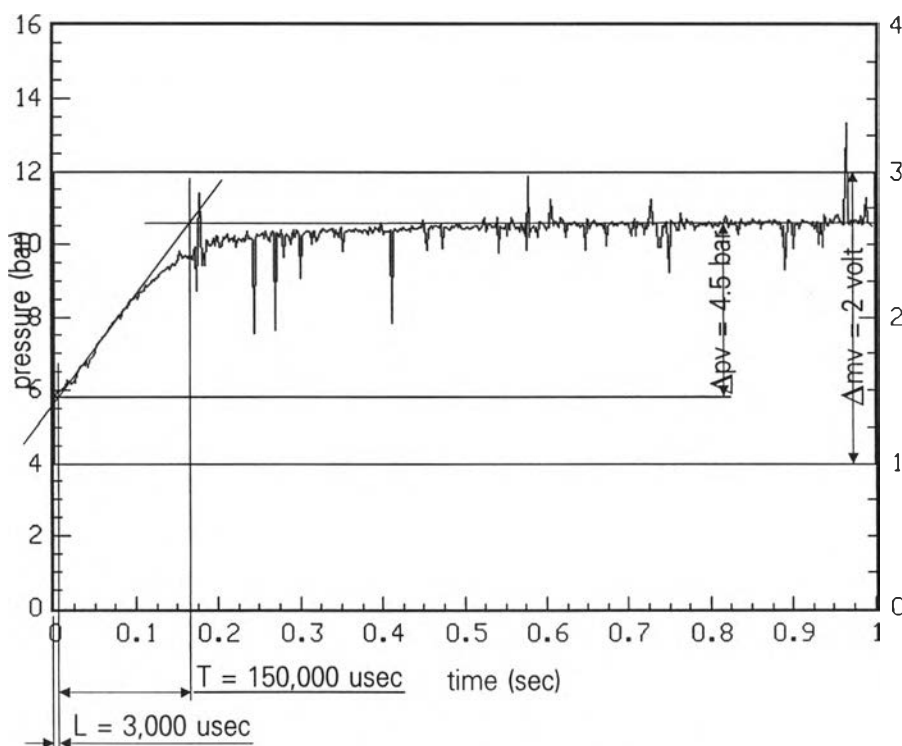


รูปที่ 6.4 แสดงผลการตอบสนองของการเปิดลิ้นเข็มเซอร์โว

ระบบ จะแสดงการตอบสนอง ดังรูปที่ 6.2 แสดงการเปิดลิ้นเข็มเซอร์โวเท่านั้น โดยที่ลิ้นเข็มปิดและเปิด 2 รอบ มีชุดเกียร์ทด 1:5 มอเตอร์เซอร์โวจะต้องหมุน 10 รอบ และทำการปรับค่าเกนตัวควบคุม เพื่อให้ผลการตอบสนองที่เหมาะสมมากที่สุด โดยให้การตอบสนองเข้าหาเป้าหมายใช้เวลาที่น้อยที่สุดและไม่ให้มีโอเวอร์ชูต (overshoot) เกิดขึ้นเพราะในตำแหน่งที่ลิ้นเข็มเซอร์โวปิดสุด จะไม่สามารถให้มีโอเวอร์ชูตได้ ถ้ามีโอเวอร์ชูต จะทำให้ลิ้นเข็มเซอร์โวขัดแน่นได้ จากการปรับแต่งค่าเกนตัวควบคุมได้ว่า $K_p = 80$, $T_i = 40,000$ ไมโครวินาที และ $T_d = 10,000$ ไมโครวินาที แสดงผลการตอบสนองปิดและเปิดของลิ้นเข็มเซอร์โว แสดงในรูป 6.3 และรูป 6.4 ตามลำดับ จากรูปดังกล่าวเมื่อพิจารณาระยะเวลาปิดและเปิดจะใช้เวลาไม่เกิน 0.4 วินาที

ผลการตอบสนองของตัวกระตุ้นแบบไซลินอยด์

การปรับค่าเกนตัวควบคุมของตัวกระตุ้นแบบไซลินอยด์ใช้วิธีพรอซเซซ รีเอคชั่น ทำการควบคุมแบบเปิด (open loop) ที่ไม่มีตัวควบคุมอยู่ ได้ผลตอบสนองเป็นเส้นโค้ง



รูปที่ 6.5 แสดงเส้นโค้งรูปตัว S โดยวิธีพรอซเซซ รีเอคชั่น

รูปตัว S แสดงในรูปที่ 6.5 จากรูปสามารถวัดค่าความแตกต่างของค่าที่ใส่ $\Delta mv = 2$ โวลต์ , ค่าความแตกต่างที่ตอบสนอง $\Delta pv = 4.5$ บาร์ , ค่าคงตัวเวลา $T = 160,000$ ไมโครวินาที และ เวลาหน่วง $L = 3,000$ ไมโครวินาที ฉะนั้น จะได้ค่าเกนของตัวกระตุ้นแบบไซลินอยด์ $K_s = \frac{\Delta pv}{\Delta mv}$ เท่ากับ 2.25 และเลือกตัวควบคุมแบบ PID โดยใช้ตาราง 4.1 จะได้ $K_p = 28.44$, $T_i = 6,000$ ไมโครวินาที และ $T_d = 1,500$ ไมโครวินาที จากนั้นทำการต่อตัวควบคุมแบบ PID กับระบบ โดยควบคุมแบบป้อนกลับ ด้วยการปรับตั้งค่าความดันเป้าหมายแบบหนึ่งหน่วยขั้นบันได ทดสอบที่ทุกความดันเป้าหมาย (1,2,3,...) เมื่อพิจารณาจากผลตอบสนองทั้งหมดแล้ว พบว่าค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่ใช้เป็นค่าเกนตัวควบคุมนี้ เหมาะสมสำหรับความดันเป้าหมายที่ 4 บาร์ เนื่องด้วยตัวกระตุ้นแบบไซลินอยด์มีสมการคุณลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ต่อจากนั้นทำการปรับตั้งความดันเป้าหมายแบบหนึ่งหน่วยขั้นบันได ทดสอบความดันเป้าหมายที่ 4 บาร์ ทำการปรับเปลี่ยนค่าเกนตัวควบคุมดังกล่าว ด้วยวิธีการลองผิดลองถูก เพื่อให้ผลการตอบสนองออกมาดีที่สุด จึงได้ค่าเกนตัวควบคุมใหม่ คือ $K_p = 100.0$, $T_i = 6,000$ ไมโครวินาที และ $T_d = 1,500$ ไมโครวินาที และทดสอบความดันเป้าหมายที่ละความดัน คือที่ความดัน 2,3,5,6,...,12 บาร์ โดยทำการปรับเปลี่ยนค่าเกนตัวควบคุม แบบวิธีการลองผิดลองถูก จนกว่าจะได้ผลการตอบสนองออกมาดีที่สุด จึงบันทึกค่าเกนตัวควบคุม ดังแสดงในตาราง 6.1 ตารางค่าเกน

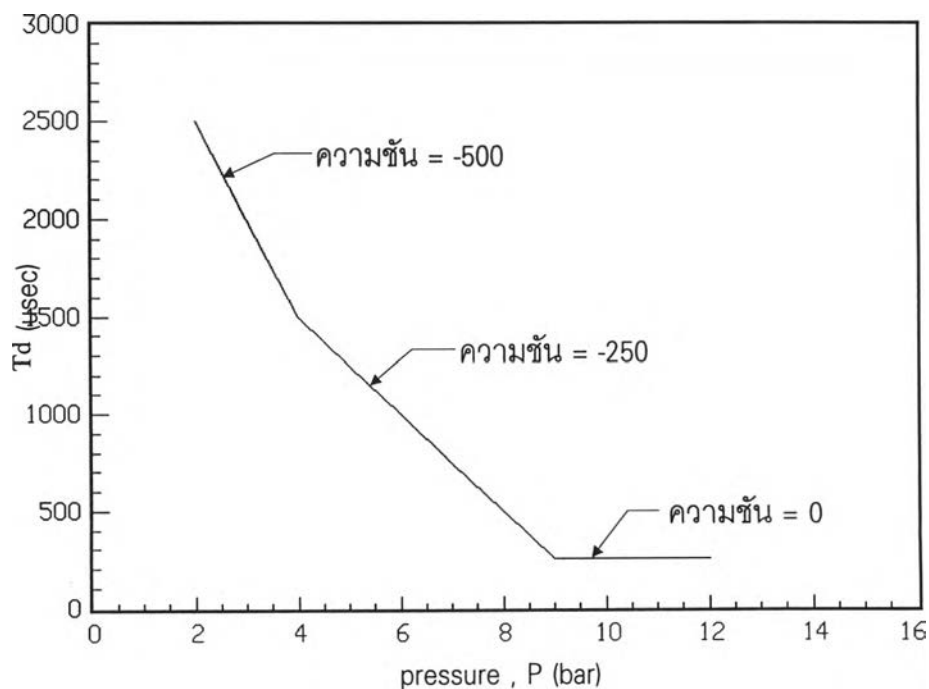
ตาราง 6.1 ตารางค่าเกน (gain schedule)

ความดันเป้าหมาย (บาร์)	K_p	T_i (usec)	T_d (usec)
2	100.0	10,000	2,500
3	100.0	8,000	2,000
4	100.0	6,000	1,500
5	100.0	5,000	1,250
6	100.0	4,000	1,000

ตาราง 6.1 ต่อ ตารางค่าเกน (gain schedule)

ความดันเป้าหมาย (บาร์)	Kp	Ti (usec)	Td (usec)
7	100.0	3,000	750
8	100.0	2,000	500
9	100.0	1,000	250
10	100.0	1,000	250
11	100.0	1,000	250
12	100.0	1,000	250

ความดันเป้าหมายที่แสดงในตาราง 6.1 เป็นความดันที่มีค่าเกนตัวควบคุมเปลี่ยนแปลง โดยดูจากค่า Ti หรือ Td เทียบความดันเป้าหมายที่ละความดัน จะมีอัตราความชันในการเปลี่ยนแปลงอยู่ 3 ช่วง ส่วนความดันเป้าหมายที่อยู่นอกตาราง



รูปที่ 6.6 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดัน P กับค่า Td

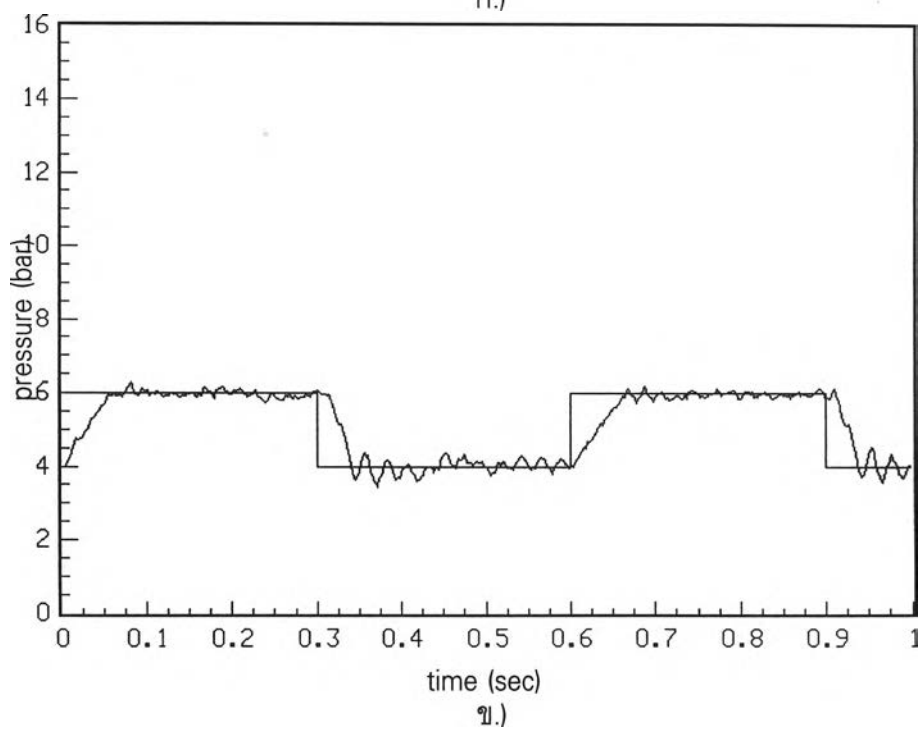
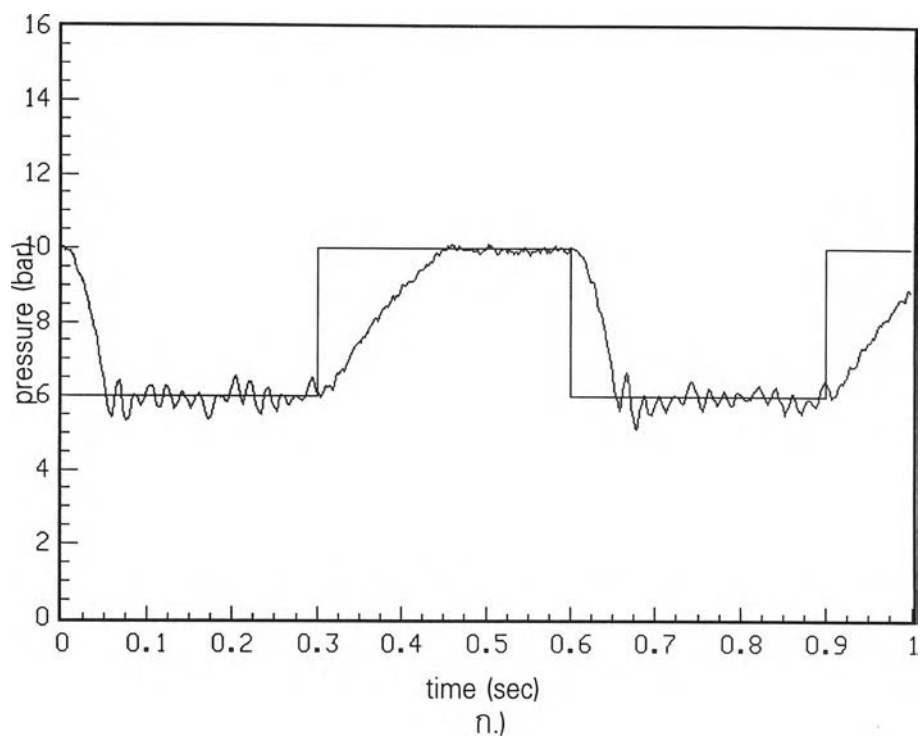
6.1 สามารถทำนายได้โดยทำเป็นแผนภาพ จากค่าเกณฑ์ควบคุมดังกล่าวจะเห็นว่า ค่าเกณฑ์ K_p มีค่าเท่ากัน เท่ากับ 100 และค่า T_i เป็น 4 เท่าของค่า T_d ที่ทุกความดัน ดังแสดงในรูปที่ 6.6 แสดงแผนภาพความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าความดัน P กับค่า T_d จะเห็นความชันของแผนภาพ 3 ความชันซึ่งนำมาเขียนเป็นสมการดังนี้

$$T_d = 250 \quad \text{โดยเงื่อนไข} \quad P > 9 \quad (6.1)$$

$$T_d = -250P + 2500 \quad \text{โดยเงื่อนไข} \quad 4 < P \leq 9 \quad (6.2)$$

$$T_d = -500P + 3500 \quad \text{โดยเงื่อนไข} \quad P \leq 4 \quad (6.3)$$

ผลการตอบสนองความดัน เมื่อใส่ค่าความดันแบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย ดังในรูปที่ 6.7 แสดงความดันที่ใส่กับความดันได้ออกที่ความดัน 6 - 10 บาร์ ในรูปที่ 6.7ก. และที่ความดัน 4 - 6 บาร์ ในรูปที่ 6.7ข. เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 6.7 จะเห็นว่าผลการตอบสนองชั่วครู่ (transient response) ของตัวกระตุ้นแบบไซลินอยด์ขณะสร้างความดันจะใช้เวลายาวนานกว่า เมื่อสร้างความดันสูง ๆ และผลการตอบสนองคงตัว (steady state response) ขณะสร้างความดันและลดความดันจะมีการแกว่งตัวของความดัน มาจากสัญญาณรบกวนภายนอก (รับสัญญาณจากทรานสดิวเซอร์ความดันผ่านภาคขยายอินสตรูเมนต์แอมพลิไฟเออร์) และความดันในวงจรวัยไฮดรอลิกที่กระเพื่อมตามจังหวะการทำงานของลูกสูบเคลื่อนที่ (plunger) ในตัวกระตุ้นแบบไซลินอยด์

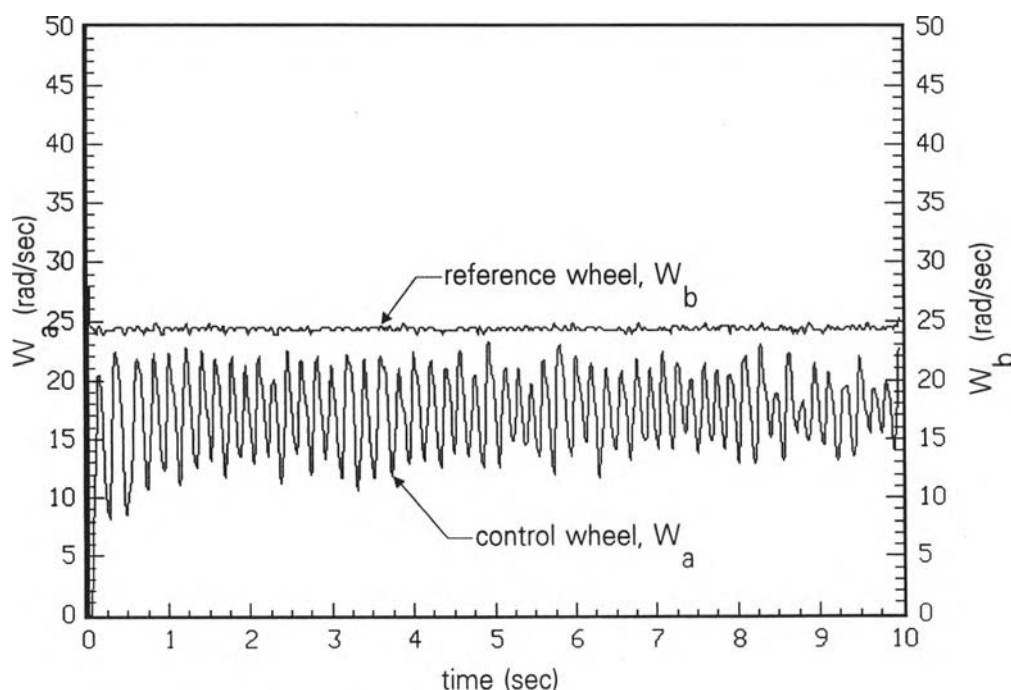


รูปที่ 6.7 แสดงการตอบสนองของความดันต่อเวลา แบบขั้นบันไดหนึ่งหน่วย

ก.) ความดัน 6 - 10 บาร์ ข.) ความดัน 4 - 6 บาร์

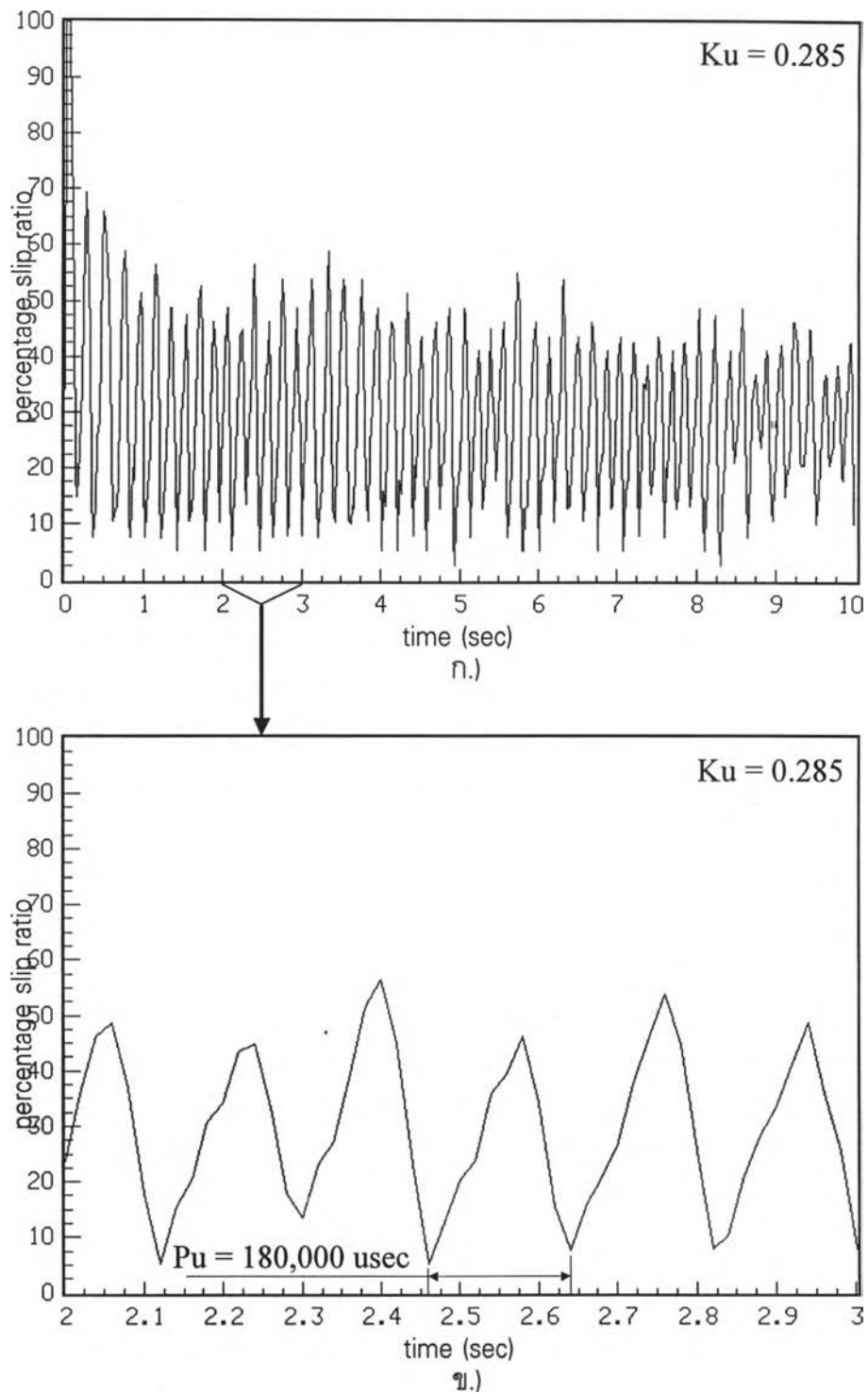
ผลการตอบสนองของระบบ ABS

การปรับค่าเกณฑ์ควบคุมของระบบห้ามล้อ ใช้วิธีอัลทิเมท ไฮเคิล ทำการปรับ เช่นเดียวกับการปรับค่าเกณฑ์ควบคุมของลินซ์เซมเซอร์โว ดังแสดงในรูปที่ 6.8 แสดงความเร็วเชิงมุมของล้อที่ถูกควบคุมกับล้ออ้างอิงต่อเวลา จะเห็นการแกว่งตัวของล้อควบคุมเมื่อปรับค่าเกณฑ์ถึงค่าเกณฑ์วิกฤต และรูปที่ 6.9 แสดงค่าอัตราสิ้นไถลต่อเวลา โดยรูป 6.9ก จะแสดงช่วงเวลา 0 - 10 วินาที ซึ่งเป็นเวลาทั้งหมดในการบันทึก รูปที่ 6.9ข จะทำการขยายช่วงเวลา 2 - 3 วินาที จะเห็นได้ว่า ค่า $P_u = 180,000$ ไมโครวินาที บันทึกค่าเกณฑ์ $K_u = 0.285$ เลือกตัวควบคุมแบบ PID จากตาราง 4.2 ได้ค่าเกณฑ์ควบคุม $K_p = 0.171$, $T_i = 90,000$ ไมโครวินาที และ $T_d = 22,500$ ไมโครวินาที ทำการต่อตัวควบคุมแบบ PID กับระบบ และได้ทำการปรับเพื่อให้ผลการตอบสนองที่เหมาะสมมากที่สุด จะได้ค่าเกณฑ์ $K_p = 0.175$, $T_i = 90,000$ ไมโครวินาที และ $T_d = 22,500$ ไมโครวินาที การทดสอบ โดยการปรับการรับภาระน้ำหนักที่ล้อกดบนลูกกิ้งเหล็ก ตั้งแต่ช่วง 300 - 600 กิโลกรัม ทำการปรับให้รับภาระน้ำหนักที่ 600 , 550 , 500 , 450 , 400 , 350 และ



รูปที่ 6.8 แสดงความเร็วเชิงมุมของล้อที่ถูกควบคุมกับล้ออ้างอิงต่อเวลา

ใช้วิธีอัลทิเมท ไฮเคิล ปรับจนมีการแกว่งตัว

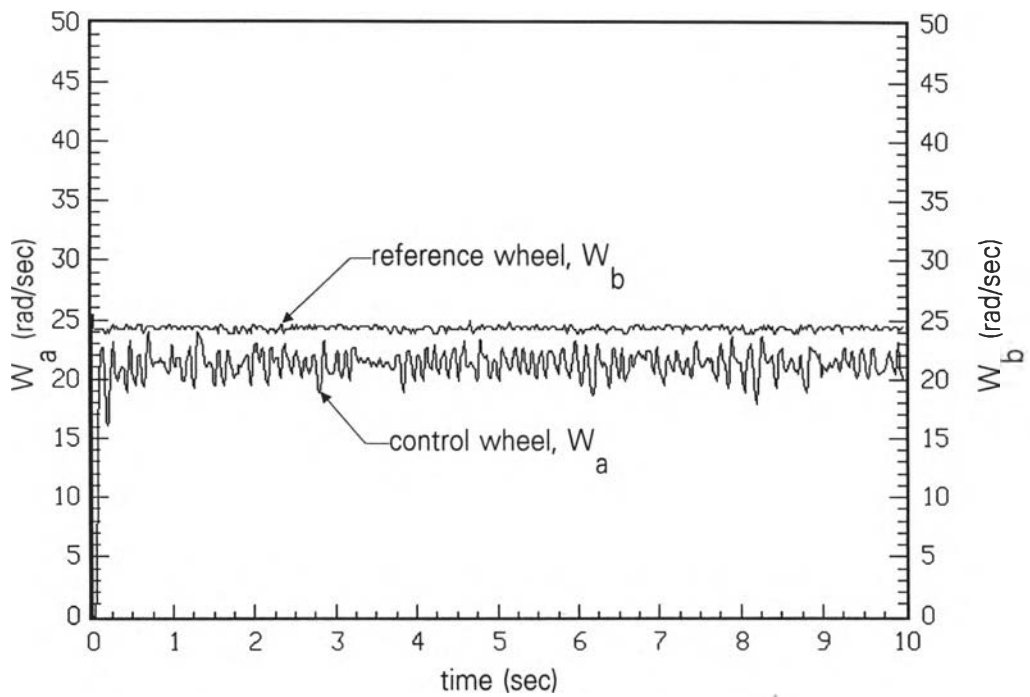


รูปที่ 6.9 แสดงค่าอัตราลื่นไถลต่อเวลา ใช้วิธีอัลทิเมท ไซเคิล ปรับจนมีการแกว่งตัว
 ก.) แสดงช่วงเวลา 0 - 10 วินาที ข.) ทำการขยายภาพใช้ช่วงเวลาที่ 2 - 3 วินาที

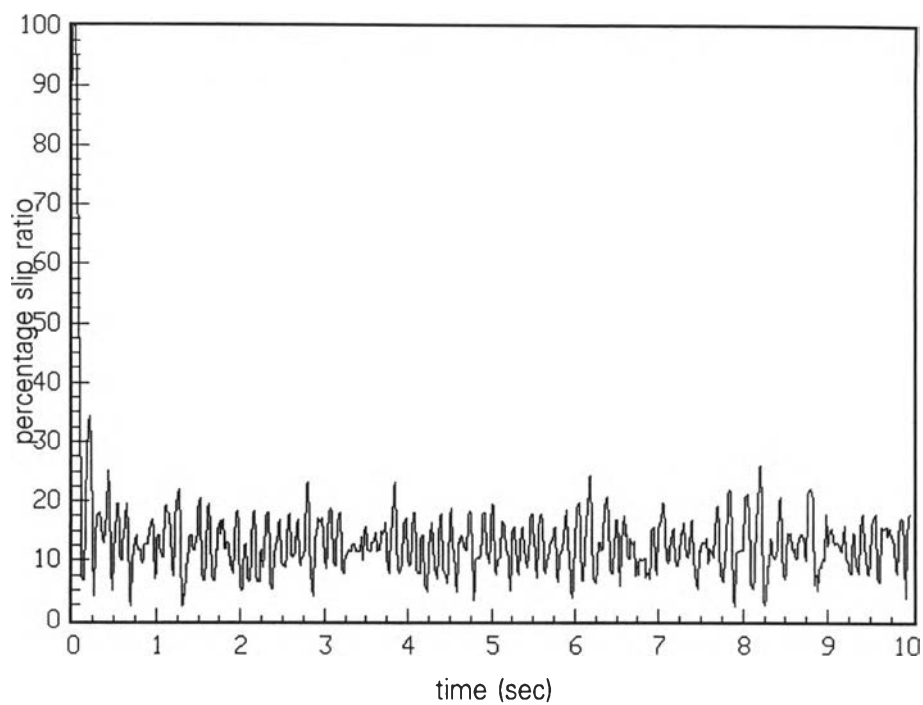
300 กิโลกรัม ตามลำดับ ผลการทดสอบโดยปรับภาระน้ำหนักที่ 450 กิโลกรัม จะแสดงไว้ในรูปที่ 6.10 - 6.13 รูปที่ 6.10 จะแสดงความเร็วเชิงมุมของล้อที่ถูกควบคุมกับล้ออ้างอิงต่อเวลา ซึ่งให้ผลการควบคุมอัตราสิ้นไถลในช่วง 5 - 20% ดังแสดงในรูปที่ 6.11 และเมื่อพิจารณาถึงความคลาดเคลื่อนของอัตราสิ้นไถล โดยตั้งค่าเป้าหมายไว้ที่ 12.5% จะมีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วง $\pm 7.5\%$ ดังแสดงในรูปที่ 6.12 และในรูปที่ 6.13 แสดงคำสั่งความดันสั่งให้ตัวกระตุ้นแบบโซลินอยด์ทำงาน ในรูปที่ 6.13ก แสดงคำสั่งความดัน ในช่วงเวลา 0 - 10 วินาที และในรูปที่ 6.13ข ทำการขยายภาพในช่วงเวลาที่ 0 - 1 วินาที แสดงคำสั่งความดันและความดันที่ตัวกระตุ้นแบบโซลินอยด์ผลิตได้

ในรูป 6.10 เป็นการรับค่าจากเอนโคเดอร์ ที่นำมาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับความเร็วรอบของล้อ เป็นสัญญาณพัลส์ และผ่านดีโคเดอร์ แปลงเป็นค่าไบนารี 12 บิต ค่าที่ได้จะไม่ราบเรียบ โดยดูได้จากการตอบสนองของล้ออ้างอิงที่แสดงในรูปดังกล่าว อีกทั้งการตอบสนองล้อที่ถูกควบคุมในช่วงการตอบสนองชั่วคราวจะหมุนช้ากว่าล้ออ้างอิงมากในช่วงต้น และจะหมุนเร็วขึ้น และมีการแกว่งตัว เมื่อเวลาผ่านไป การตอบสนองคงตัวความเร็วเชิงมุมของล้อที่ถูกควบคุมจะมีการแกว่งตัวน้อยเมื่อทดสอบรับภาระน้ำหนักมาก และจะแกว่งตัวมากเมื่อทดสอบรับภาระน้ำหนักน้อยโดยพิจารณาจากรูปที่ 6.14 และ 6.15 การคำนวณหาอัตราสิ้นไถลโดยใช้สมการ 2.2 ซึ่งแสดงในรูป 6.11 การตอบสนองอัตราสิ้นไถลเมื่อทดสอบภาระน้ำหนักที่ 450 กิโลกรัมมีการแกว่งตัว ซึ่งจะอยู่ภายใต้ขอบเขต 5 - 20% พิจารณารูปที่ 6.16 การตอบสนองอัตราสิ้นไถลจะมีการแกว่งตัวน้อย เมื่อทดสอบรับภาระน้ำหนักมาก และการตอบสนองอัตราสิ้นไถลจะมีการแกว่งตัวมาก เมื่อทดสอบรับภาระน้ำหนักน้อย ดังรูปที่ 6.17 ซึ่งก็ยังอยู่ในขอบเขต 5 - 20% แต่ก็จะมีบางเวลาที่มีการตอบสนองหลุดออกนอกขอบเขต หรือจะพิจารณาจากรูป 6.12 ดูจากความคลาดเคลื่อนที่ $\pm 7.5\%$ ก็ได้ เพราะตั้งเป้าหมายอัตราสิ้นไถลไว้ที่ 12.5% และมีขอบเขตการสิ้นไถลที่ 5 - 20% อธิบายได้ว่าความคลาดเคลื่อนอัตราสิ้นไถลจะมีการแกว่งตัวจะอยู่ในระหว่าง -7.5% ถึง 7.5% ตัวควบคุมแบบ PID ทำการผลิตสัญญาณการควบคุมออกมาเป็นคำสั่งความดัน (pressure command) มาสั่งให้ตัวกระตุ้นแบบโซลินอยด์สร้างความดัน ดังแสดงในรูป 6.13

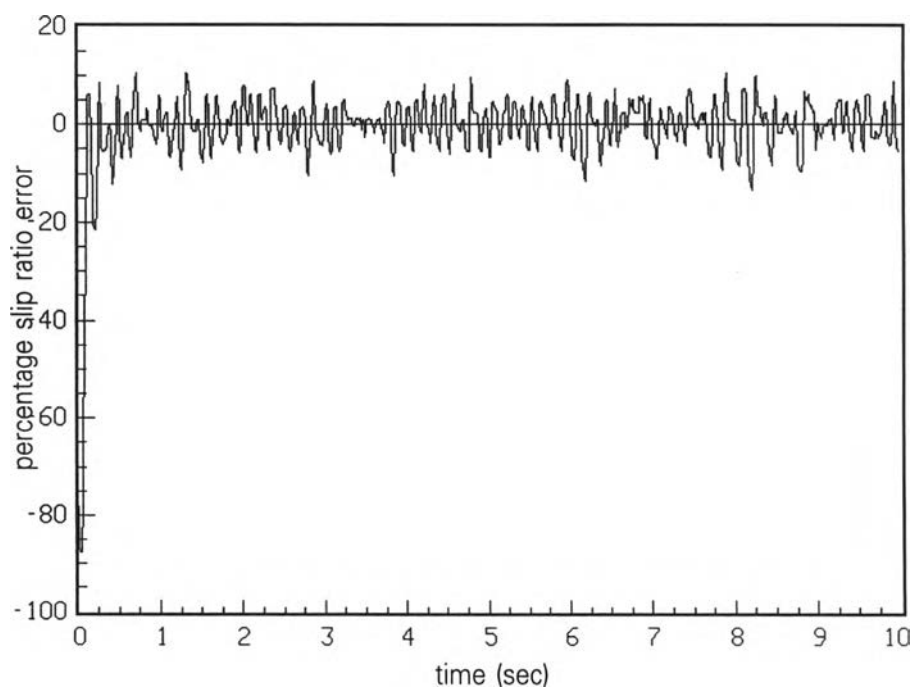
ผลการตอบสนองความเร็วเชิงมุมของล้อที่ถูกควบคุมกับล้ออ้างอิงต่อเวลาและ อัตราการลื่นไถลต่อเวลา ในการทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 600 , 550 , 500 , 450 , 400 , 350 และ 300 กิโลกรัม ตามลำดับ ดังแสดงไว้ที่ภาคผนวก ข.



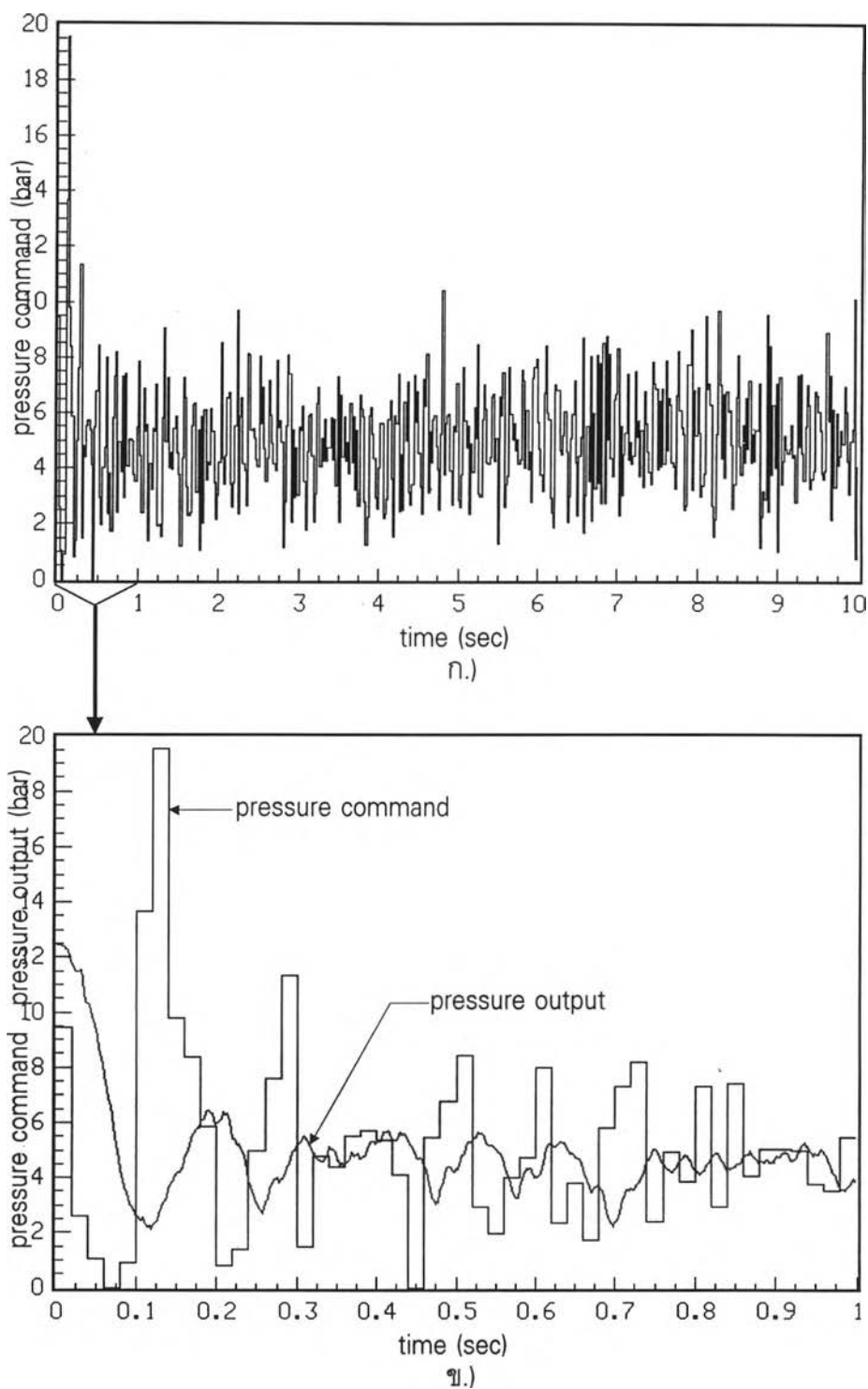
รูปที่ 6.10 แสดงความเร็วเชิงมุมของล้อที่ถูกควบคุมกับล้ออ้างอิงต่อเวลา
ทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 450 กิโลกรัม



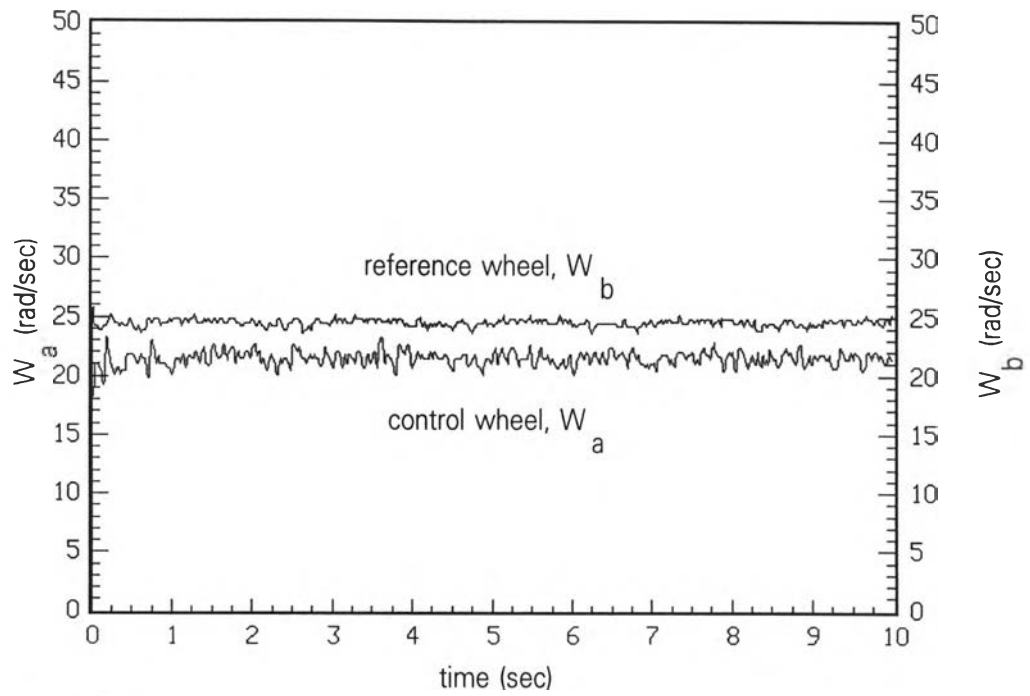
รูปที่ 6.11 แสดงอัตราสิ้นไถลต่อเวลา
ทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 450 กิโลกรัม



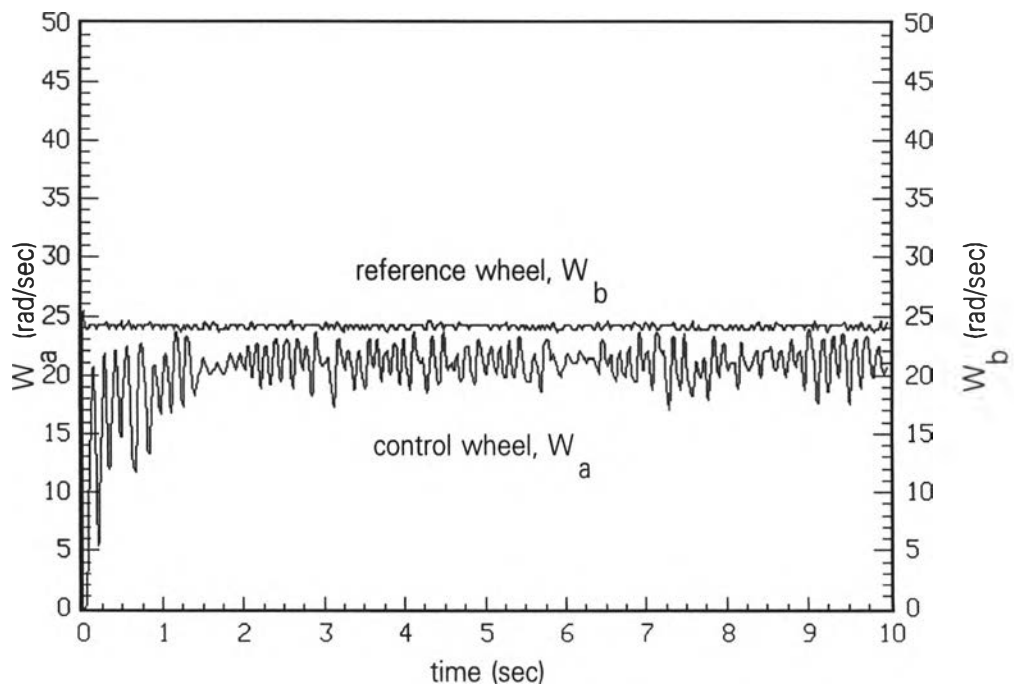
รูปที่ 6.12 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนอัตราสิ้นไถลต่อเวลา
ทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 450 กิโลกรัม



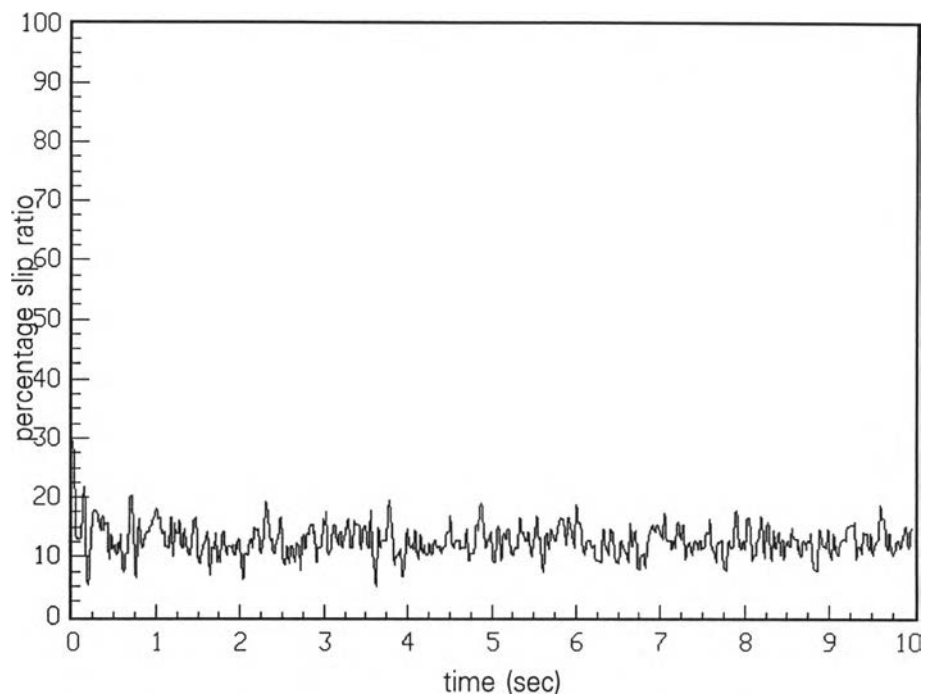
รูปที่ 6.13 แสดงคำสั่งความดันต่อเวลา ทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 450 กิโลกรัม
 ก.) แสดงช่วงเวลา 0 - 10 วินาที ข.) ทำการขยายภาพให้ช่วงเวลาที่ 0 - 1 วินาที
 แสดงคำสั่งความดันกับความดันที่ผลิตได้ต่อเวลา



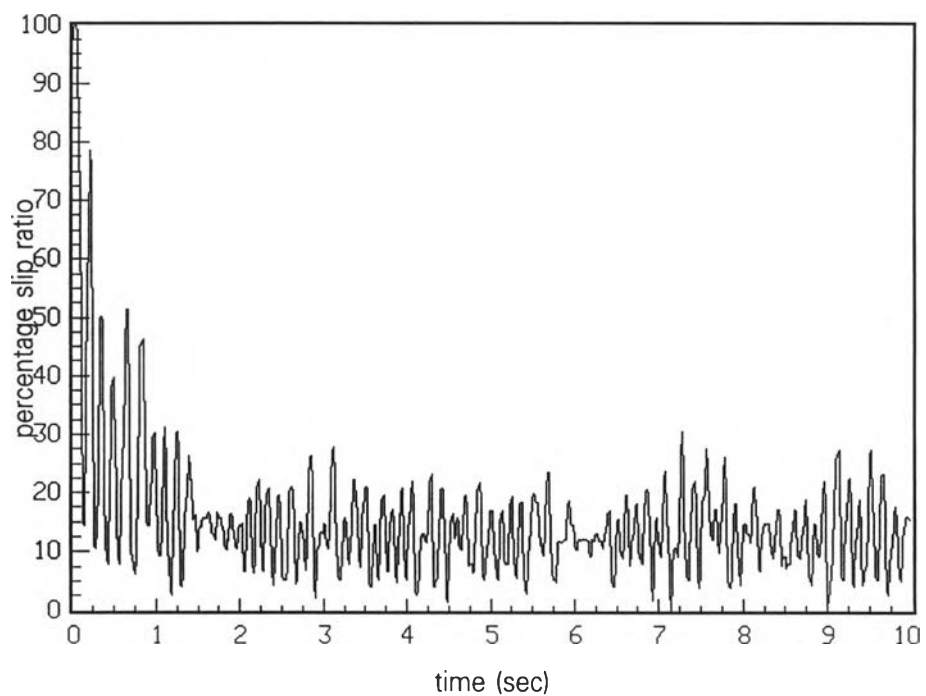
รูปที่ 6.14 แสดงความเร็วเชิงมุมของล้อที่ถูกควบคุมกับล้ออ้างอิงกับเวลา
ทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 600 กิโลกรัม



รูปที่ 6.15 แสดงความเร็วเชิงมุมของล้อที่ถูกควบคุมกับล้ออ้างอิงกับเวลา
ทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 300 กิโลกรัม



รูปที่ 6.16 แสดงค่าอัตราลื่นไถลกับเวลา
ทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 600 กิโลกรัม



รูปที่ 6.17 แสดงค่าอัตราลื่นไถลกับเวลา
ทดสอบรับภาระน้ำหนักที่ 300 กิโลกรัม