



## บทที่ 5

### การทดลองกับระบบสายพานลำเลียง

#### 5.1 บทนำ

ในบทนี้จะนำวิธีคำนวณสัญญาณของสัญญาณออกและสัญญาณเข้ามาพัฒนาเป็นโปรแกรม ใช้สำหรับวัดสัญญาณออกและสัญญาณเข้า อีกทั้งอธิบายกรรมวิธีและเทคนิคในการเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อให้ได้สัญญาณออกและสัญญาณเข้าตามต้องการ เราได้แสดงให้เห็นตัวอย่างการออกแบบตัวควบคุมพลวัตโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ เนื้อหาในบทนี้ครอบคลุมถึงผลการทดลองจริงกับระบบสายพานลำเลียง ขั้นตอนและวิธีการออกแบบตัวควบคุมพลวัตโดยวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำ ผลที่ได้ในบทนี้คือผลการทดลองตัวควบคุมที่ออกแบบกับระบบจริง โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลสนองเชิงเวลาของสัญญาณออก สัญญาณเข้าควบคุม และดรชนี้สมรรถนะ ในตอนท้ายของบทนี้ ยังได้แสดงการทดสอบโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นกับระบบจริงเพื่อตรวจสอบและประเมินการทำงานของโปรแกรมดังกล่าว

#### 5.2 ขั้นตอนการประยุกต์ใช้งาน

การประยุกต์ใช้งานระบบสายพานลำเลียง เริ่มต้นจากการเขียนโปรแกรม LabVIEW เพื่อเก็บบันทึกสัญญาณที่เกี่ยวข้อง โดยจะคำนวณหาเกรเดียนต์ของสัญญาณออก และเกรเดียนต์ของสัญญาณเข้าควบคุมกับโปรแกรม MATLAB ในขั้นตอนถัดไป สัญญาณที่ถูกเก็บบันทึกเช่น สัญญาณเข้าอ้างอิง สัญญาณออกและสัญญาณผลต่างระหว่างสัญญาณเข้าอ้างอิงกับสัญญาณออก จะถูกเก็บไว้ในคอมพิวเตอร์ทั้งหมด

ขั้นตอนการบันทึกสัญญาณเข้าอ้างอิงสามารถเก็บบันทึกโดยตรงจากโปรแกรม LabVIEW ไปเก็บไว้ในแฟ้มข้อความ (Text file) ส่วนการบันทึกสัญญาณออกจะต้องเก็บบันทึกโดยผ่านการอ่านข้อมูลจากตัวขับ (Driver) ที่ชื่อว่า VISA ของโปรแกรม LabVIEW เนื่องจากข้อมูลสัญญาณออกที่ได้มาจากการแปลงสัญญาณของสัญญาณตำแหน่งจะต้องต่อผ่านช่องทางอนุกรม ส่วนสัญญาณผลต่างระหว่างสัญญาณเข้าอ้างอิงกับสัญญาณออกก็สามารถคำนวณได้โดยใช้หน่วยประมวลผลของโปรแกรม LabVIEW ร่วมกับหน่วยเลขคณิต (Arithmetic) ภายในคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนการหาเกรเดียนต์ของฟังก์ชันจุดประสงค์ โดยหาเกรเดียนต์ของสัญญาณออกและเกรเดียนต์ของสัญญาณเข้าควบคุมที่ได้มาจากการเก็บบันทึกสัญญาณ จะคำนวณผ่านโปรแกรม MATLAB โดยเขียนโปรแกรมเพื่ออ่านข้อมูลที่ถูกบันทึกไว้ในรูปของแฟ้มข้อความ ข้อมูลที่โปรแกรม MATLAB อ่านเข้ามาได้จะเป็นข้อมูลสัญญาณเข้าอ้างอิง, สัญญาณออก, และสัญญาณผลต่างระหว่างสัญญาณเข้าอ้างอิงกับสัญญาณออก ที่ถูกบันทึกด้วยโปรแกรม LabVIEW

### 5.3 ผลการทดลอง

ในการนำวิธีปรับปรุงการป้อนกลับวนซ้ำไปใช้กับระบบสายพานลำเลียง จะทำการทดลองโดยเริ่มต้นกำหนดให้ระบบทำงานในสภาวะที่ไม่มีมวลภาระ แล้วจึงเปลี่ยนแปลงมวลภาระเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ นั่นคือ นำมวลหนัก 300 กรัม (กระป๋องน้ำอัดลม 1 กระป๋อง) เพิ่มให้กับมวลภาระจำนวน 3 ครั้ง ทำให้ระบบจะมีพลวัตเปลี่ยนไปตามมวลภาระ

ในการทดลองสังเคราะห์ตัวควบคุมนี้ กำหนดให้ตัวกรอง  $L_y = 1$ ,  $L_u = 1$  และตัวประกอบ  $\lambda = 1$  เมื่อตั้งให้เวลาสุ่มเป็น 0.01 วินาที และระยะเวลาที่เก็บข้อมูลเท่ากับ 30 วินาที จำนวนข้อมูลที่เก็บเท่ากับ  $N_s = 3,000$  ปัญหาการควบคุมมีรูปแบบเป็นการตามรอยสัญญาณเข้าอ้างอิง โดยให้สัญญาณเข้าอ้างอิงเป็นสัญญาณตำแหน่งของสายพานลำเลียงแบบขั้นบันไดขนาด 50 เซนติเมตร และแบบจำลองอ้างอิง  $T^d(q) = 1$ . จากฟังก์ชันจุดประสงค์ เราพยายามลดค่าสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณออกของระบบกับสัญญาณออกอ้างอิง และพยายามลดสัญญาณเข้าควบคุม ดังนั้นฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าเท่ากับ

$$J(\rho) = \frac{1}{2N_s} E \left[ \sum_{k=1}^{N_s} \tilde{y}_k(\rho)^2 + \sum_{k=1}^{N_s} u_k(\rho)^2 \right] \quad (5.1)$$

สำหรับวิธีวนซ้ำเกาส์-นิวตันเราใช้วิธีการตามรอยถอยหลัง โดยตั้งให้  $\gamma_0 = 1$ ,  $\alpha = 0.5$  และ  $\beta = 0.1$  ส่วนค่าประมาณเฮสเซียนเมทริกซ์ใช้วิธี BFGS ดังนี้

$$B_{i+1} = B_i + \frac{(z_i - B_i s_i)(z_i - B_i s_i)^T}{(z_i - B_i s_i)^T s_i} \quad (5.2)$$

โดยที่  $s_i = \rho_{i+1} - \rho_i$  และ  $z_i = \frac{\partial J(\rho_{i+1})}{\partial \rho} - \frac{\partial J(\rho)}{\partial \rho}$

ในตัวอย่างการสังเคราะห์ตัวควบคุมสำหรับระบบสายพานลำเลียง จะถูกแบ่งการออกเป็น 4 ส่วน คือ การทดลองส่วนแรกระบบสายพานลำเลียงจะทำงานในสภาวะที่ไม่มีมวลภาระ ในส่วนที่สองระบบสายพานลำเลียงจะทำงานโดยมีมวลภาระหนัก 300 กรัม ส่วนที่สามระบบสายพานลำเลียงจะทำงานโดยมีมวลภาระหนัก 600 กรัม และในส่วนสุดท้ายระบบสายพานลำเลียงจะทำงานโดยมีมวลภาระหนัก 900 กรัม ในแต่ละส่วนการทดลองจะพิจารณาปัจจัยที่ผลกระทบต่อควบคุม เช่น ทำการเปรียบเทียบกับที่ตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมพีไอดี

#### 5.3.1 สภาวะที่ไม่มีมวลภาระ

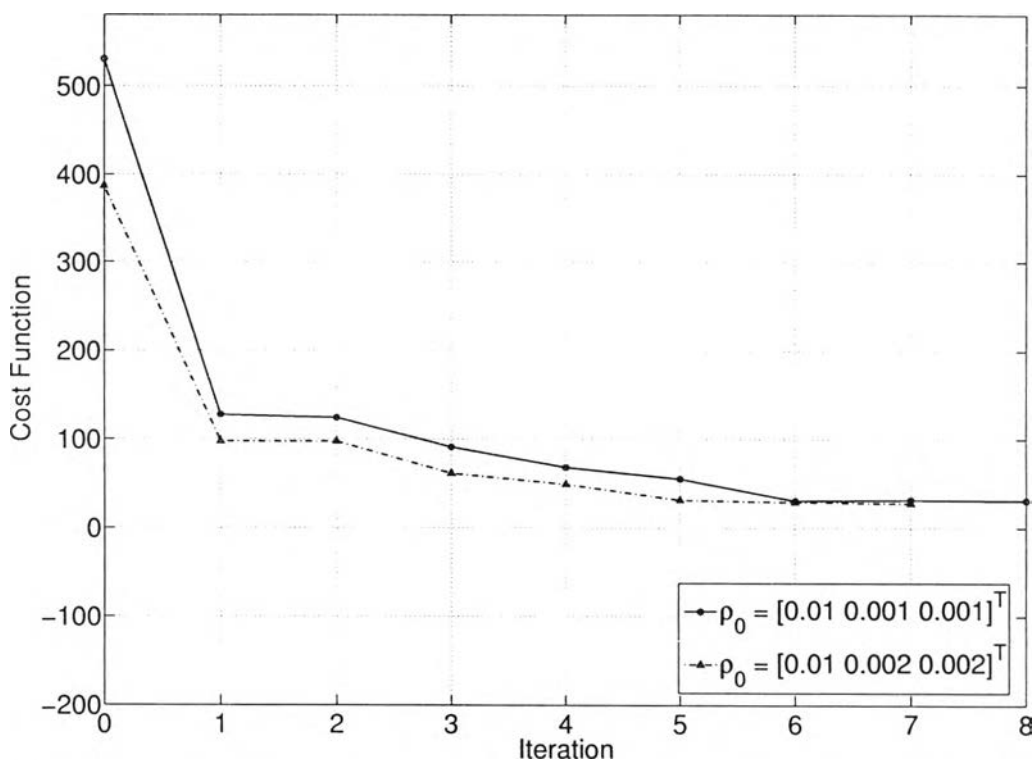
พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [0.01 \quad 0.001 \quad 0.001]^T$$

วิธีปรับปรุงการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 5.1 ในรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 5.2 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัวสูงมาก ประมาณ 33 เซนติเมตร หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 วิธีปรับปรุงการป้อนกลับวนซ้ำให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว

ตารางที่ 5.1: พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในสภาวะที่ไม่มีมวลถ่วง เมื่อ  $\rho_0 = [0.01 \ 0.001 \ 0.001]^T$

การวนซ้ำครั้งที่	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	0.045392	0.00086491	0.024008
2	0.046142	0.00086495	0.024775
3	0.060226	0.00086376	0.040391
4	0.076867	0.00086267	0.058466
5	0.091036	0.00086151	0.073195
6	0.198760	0.00085333	0.185710
7	0.188460	0.00085405	0.174340
8	0.195880	0.00085343	0.181940

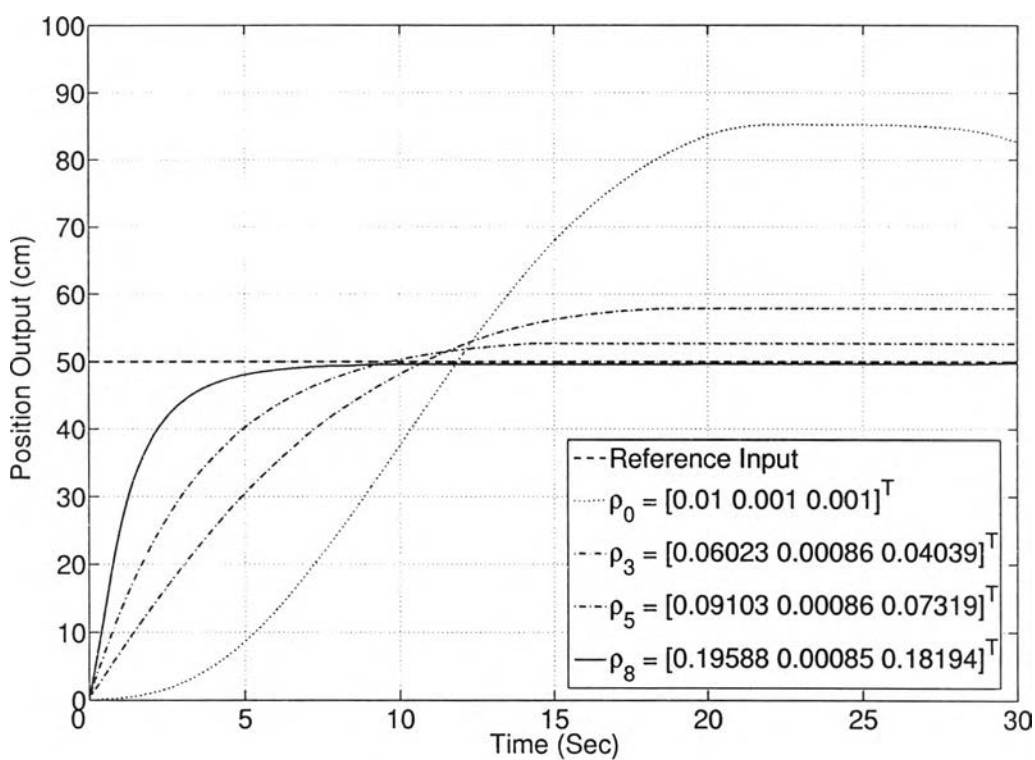


รูปที่ 5.1: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า

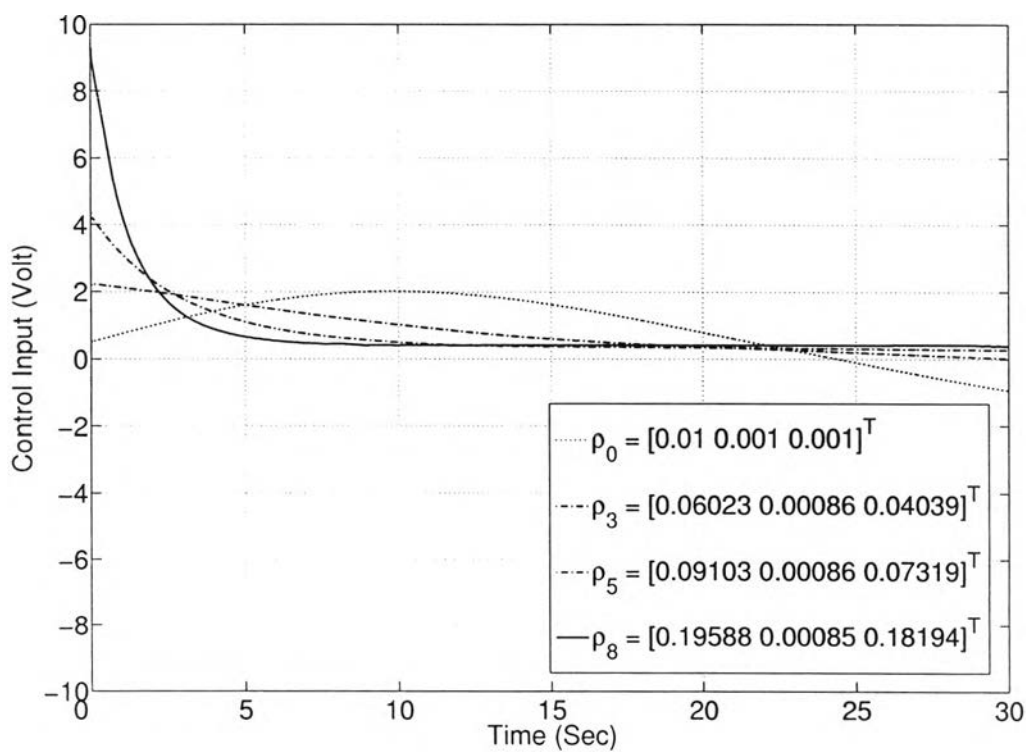
และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 8 วินาที ส่วนรูปที่ 5.3 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ไม่อยู่ตัว หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 8 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำแสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง ช่วงเวลาประมาณ 10 วินาทีมีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.5 โวลต์

ตัวอย่างถัดไปกำหนดให้พลวัตของมวลถ่วงในสภาวะการทำงานยังคงเดิม แต่ปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_0 = [0.01 \ 0.002 \ 0.002]^T$$



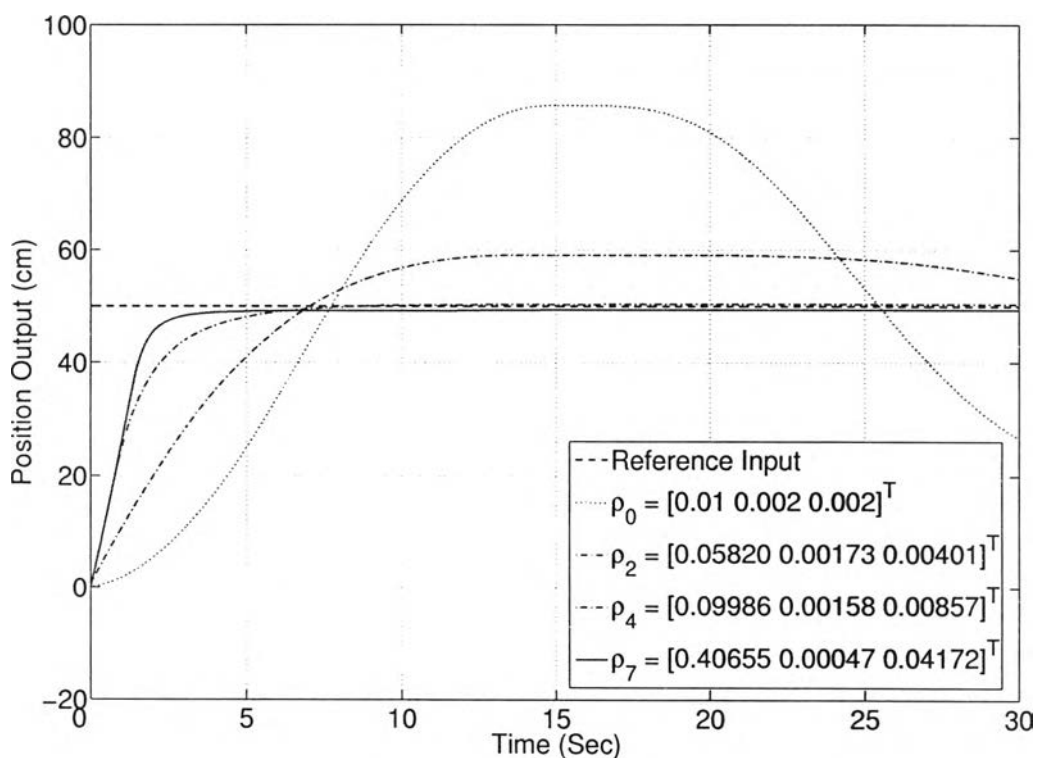
รูปที่ 5.2: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.3: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 8 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

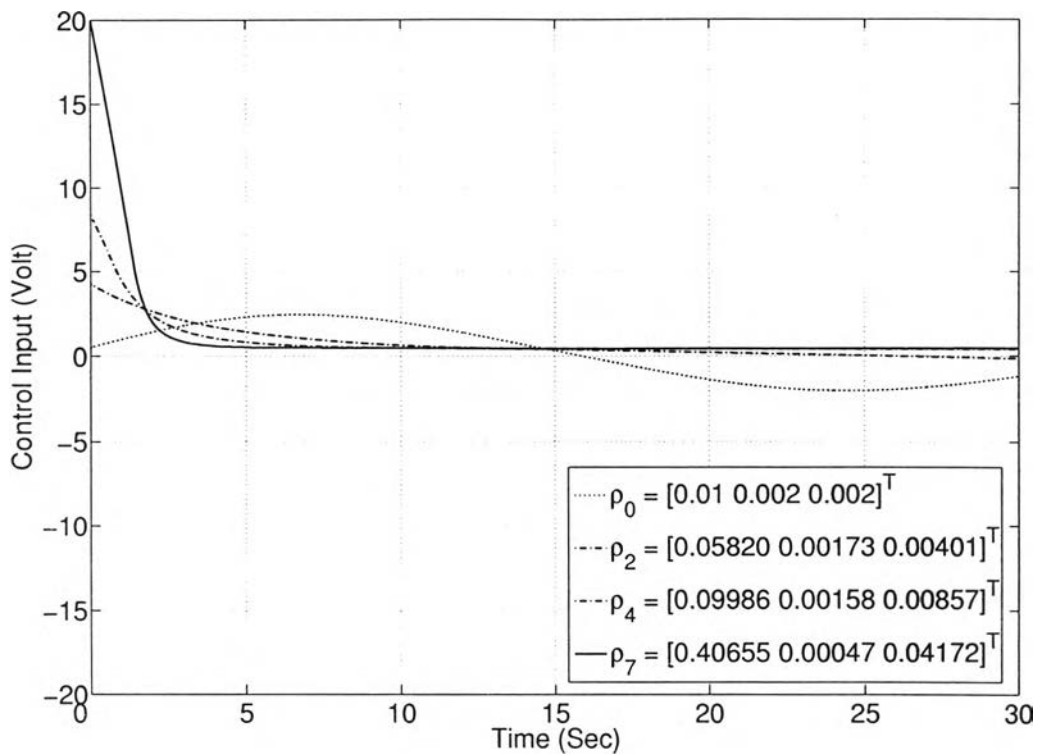
ตารางที่ 5.2: พารามิเตอร์ของตัวควบคุมในสถานะที่ไม่มีมวลภาวะ เมื่อ  $\rho_0 = [0.01 \ 0.002 \ 0.002]^T$

การวนซ้ำครั้งที่	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	0.056980	0.0017387	0.0039084
2	0.058202	0.0017341	0.0040164
3	0.085088	0.0016349	0.0069756
4	0.099866	0.0015809	0.0085784
5	0.168760	0.0013313	0.0160120
6	0.224240	0.0011304	0.0220140
7	0.406550	0.0004700	0.0417240



รูปที่ 5.4: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 7 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 5.2 ในรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 5.4 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีส่วนพุ่งเกินสูงมาก คิดเป็น 60% หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 7 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ไม่มีค่าความผิดพลาดสถานะอยู่ตัว และเข้าสู่สถานะอยู่ตัวเร็วขึ้นประมาณ 3 วินาที ส่วนรูปที่ 5.5 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ไม่อยู่ตัว หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 7 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำแสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลงช่วงเวลาประมาณ 3 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.4 โวลต์



รูปที่ 5.5: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 7 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

ตารางที่ 5.3: พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 300 กรัม เมื่อ  $\rho_0 = [0.012 \ 0.0017 \ 0.0018]^T$

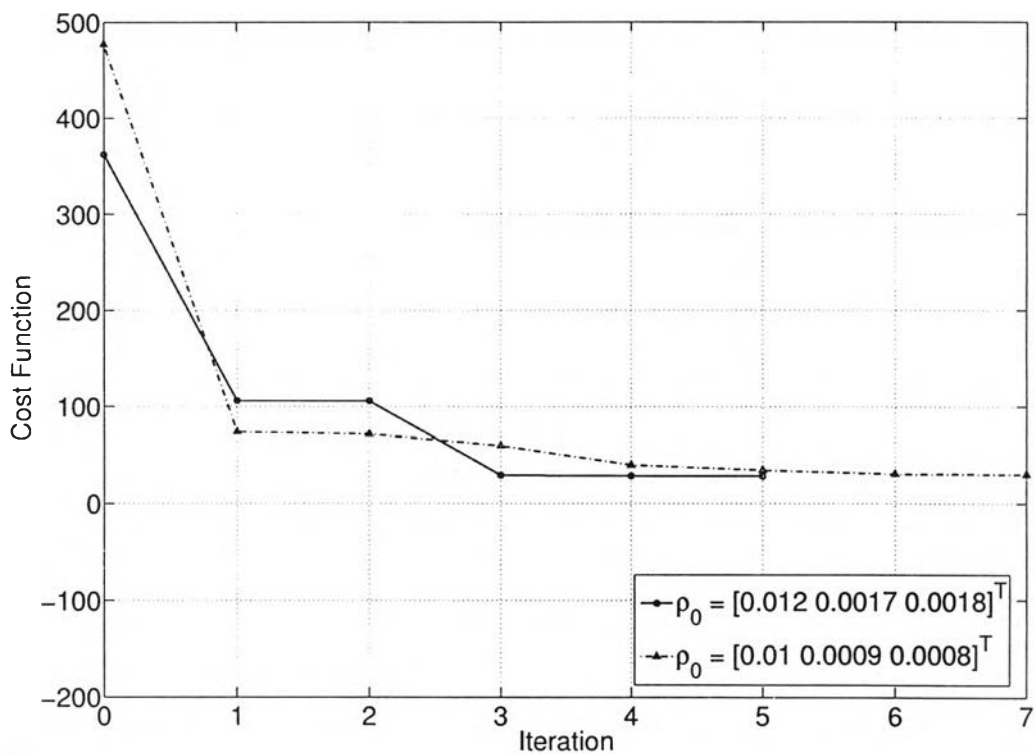
การวนซ้ำครั้งที่	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	0.049866	0.00144450	0.0088157
2	0.050924	0.00144050	0.0093856
3	0.308970	0.00047892	0.1387300
4	0.325420	0.00041763	0.1469300
5	0.325420	0.00041763	0.1469300

### 5.3.2 สภาวะการทำงานที่มีมวลภาระหนัก 300 กรัม

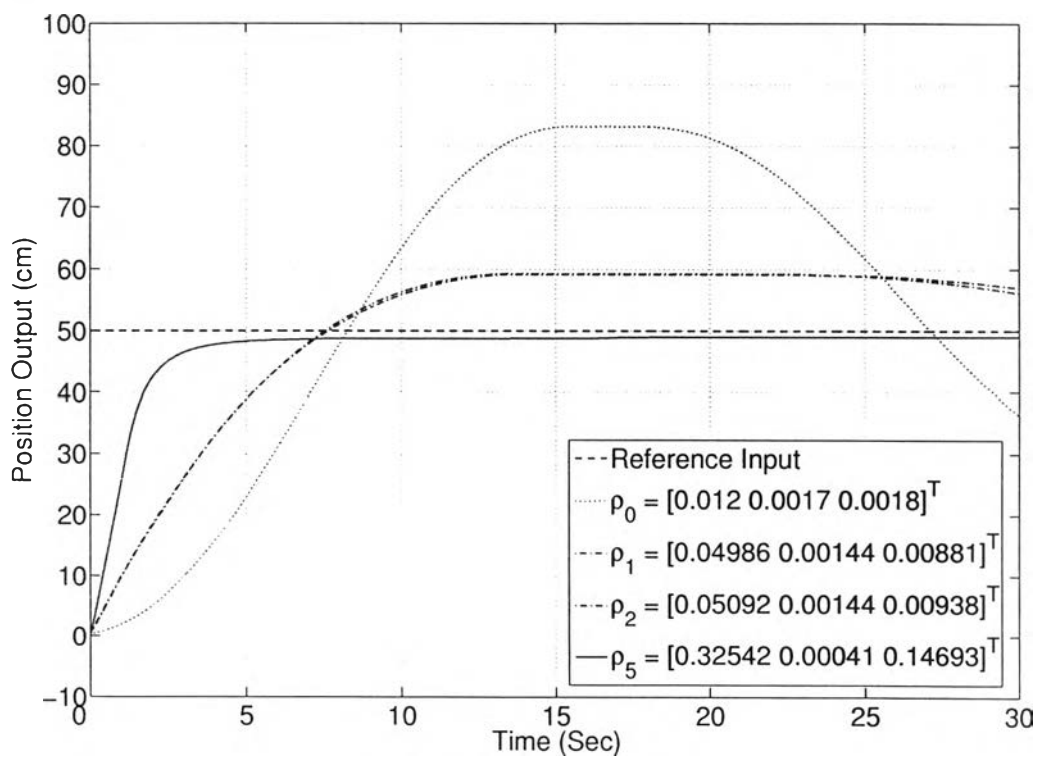
สมมุติเหตุการณ์ต่อเนื่องจากสภาวะการทำงานแรก และเพิ่มมวลภาระน้ำหนัก 300 กรัมให้กับระบบ ทำให้พลวัตของมวลภาระเปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [0.012 \ 0.0017 \ 0.0018]^T$$

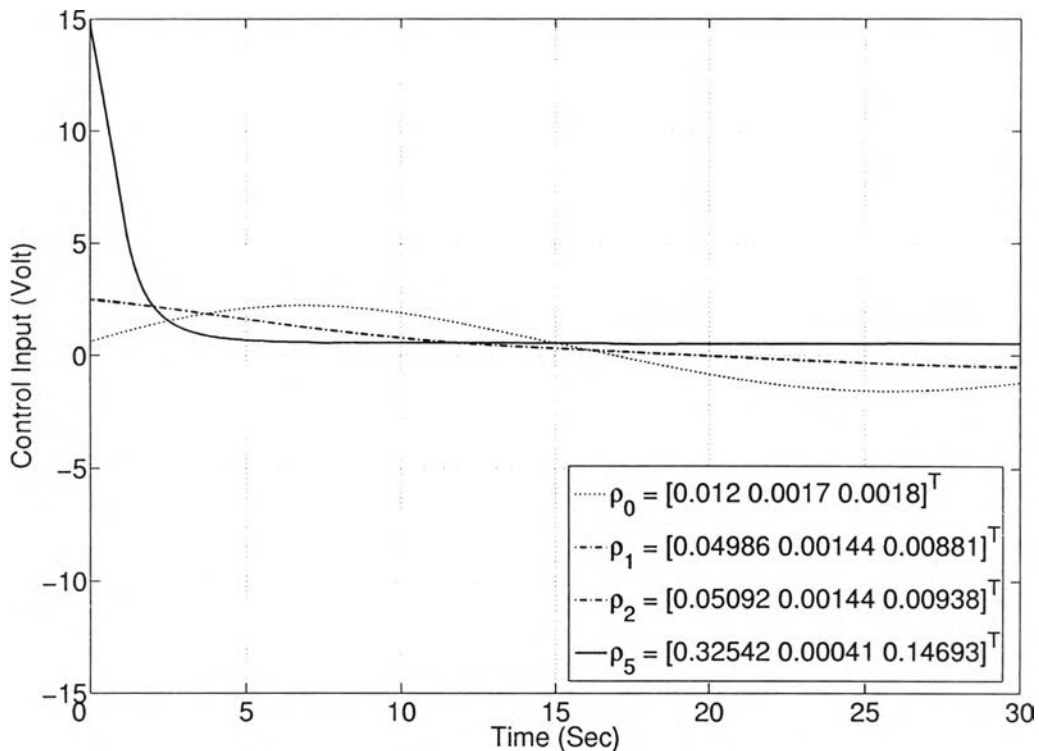
วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 5.3 ในรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 5.7 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลภาระของระบบขณะที่ยังไม่มี การปรับจูนตัวควบคุม ผลตอบสนองมีส่วนพุ่งเกินสูงมาก คิดเป็น 60% หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 ปรากฏว่า วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้นอย่างชัดเจน ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้า



รูปที่ 5.6: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า



รูปที่ 5.7: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.8: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

ตารางที่ 5.4: พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มวลภาระหนัก 300 กรัม เมื่อ  $\rho_0 = [0.01 \ 0.0009 \ 0.0008]^T$

การวนซ้ำครั้งที่	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	0.073034	0.00076640	0.008251
2	0.074064	0.00076732	0.008464
3	0.085927	0.00077715	0.010960
4	0.121470	0.00080636	0.018386
5	0.145090	0.00082530	0.023258
6	0.183070	0.00085513	0.031158
7	0.183070	0.00085513	0.031158

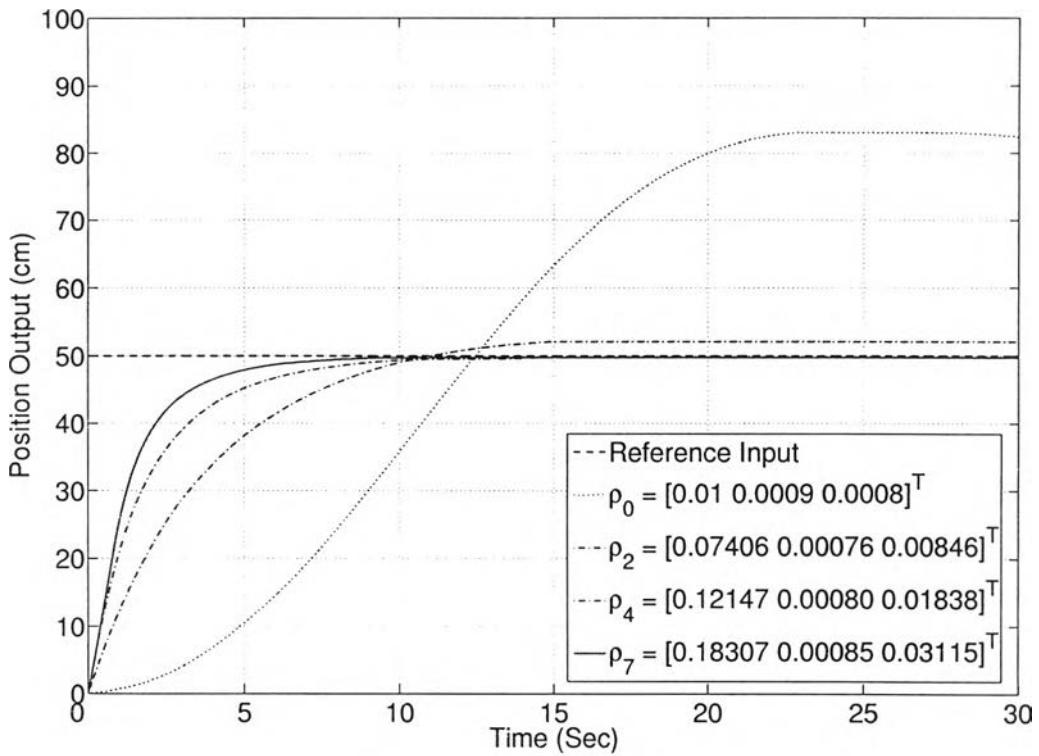
สู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 3 วินาที ส่วนรูปที่ 5.8 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ไม่อยู่ตัว หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำแสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง ช่วงเวลาประมาณ 3 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.2 โวลต์

ตัวอย่างถัดไปกำหนดให้พลวัตของมวลภาระในสภาวะการทำงานยังคงเดิม แต่ปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

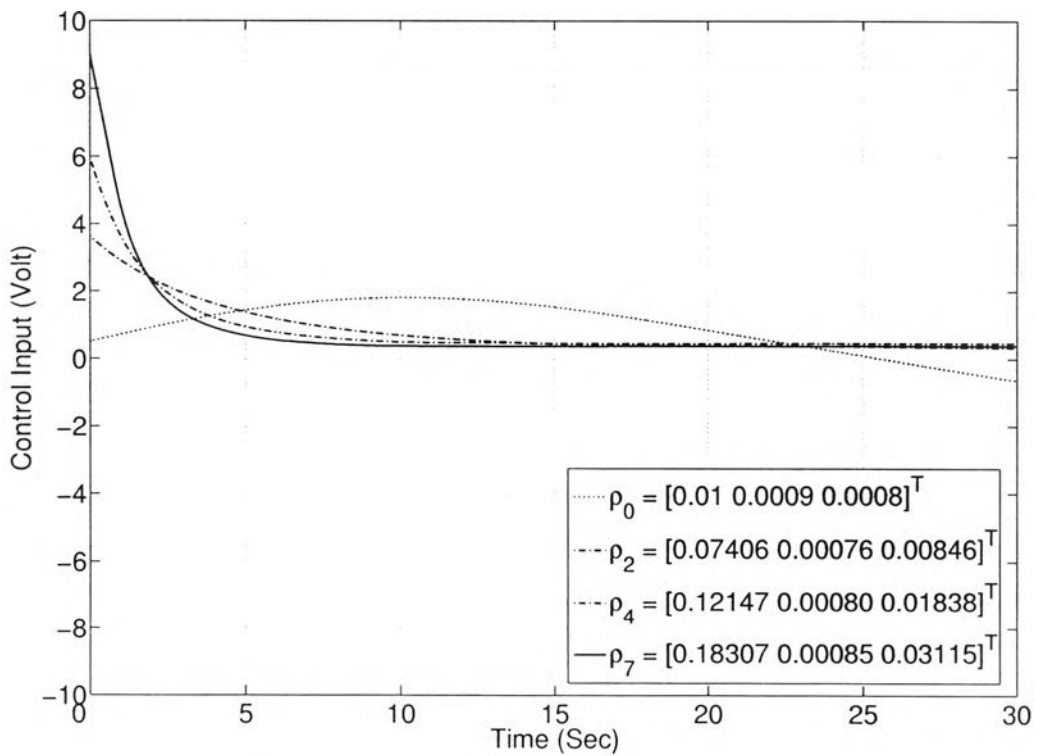
$$\rho_0 = [0.01 \ 0.0009 \ 0.0008]^T$$

วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 5.4 ในรูปที่ 5.6 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 5.9 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวล





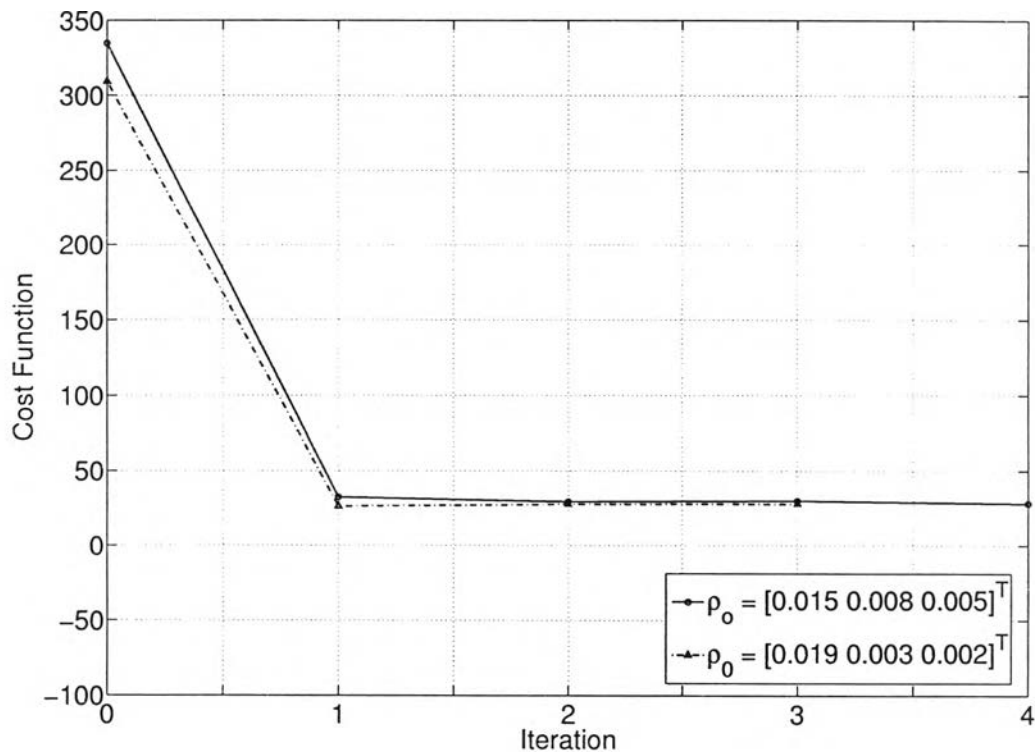
รูปที่ 5.9: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 7 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.10: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 7 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

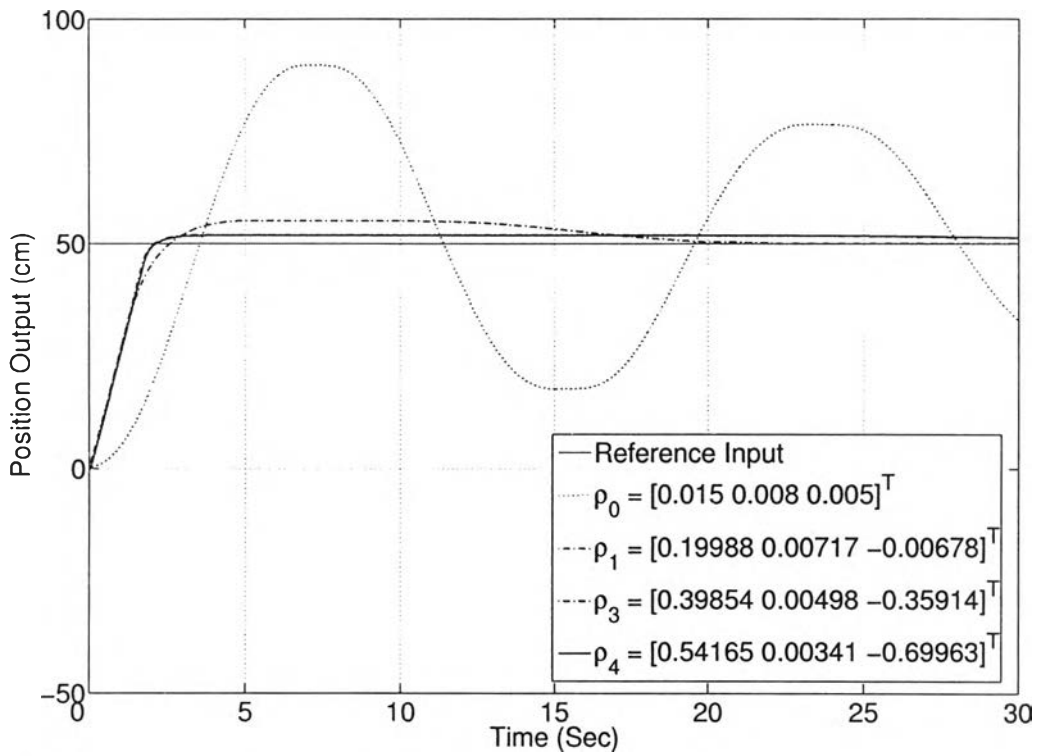
ตารางที่ 5.5: พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มวลภาระหนัก 600 กรัม เมื่อ  $\rho_0 = [0.015 \ 0.008 \ 0.005]^T$

การวนซ้ำครั้งที่	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	0.199880	0.0071793	-0.0067868
2	0.385570	0.0051232	-0.3277000
3	0.398547	0.0049809	-0.3591400
4	0.541650	0.0034144	-0.6996300

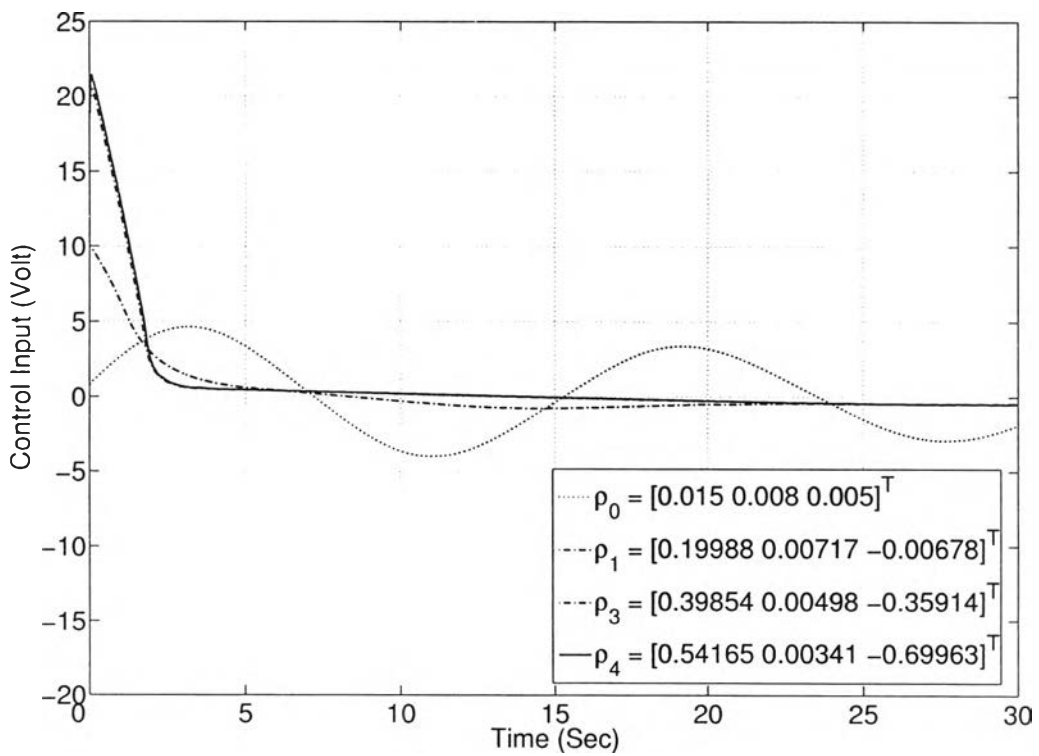


รูปที่ 5.11: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า

ภาวะของระบบขณะที่ยังไม่มีการปรับจูนตัวควบคุม ผลตอบสนองมีส่วนพุ่งเกินสูงมาก คิดเป็น 65% หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 7 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้นอย่างชัดเจน ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 10 วินาที ส่วนรูปที่ 5.10 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ไม่อยู่ตัว หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 7 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำแสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง ช่วงเวลาประมาณ 5 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์



รูปที่ 5.12: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 4 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.13: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 4 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

ตารางที่ 5.6: พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 600 กรัม เมื่อ  $\rho_0 = [0.019 \ 0.003 \ 0.002]^T$

การวนซ้ำครั้งที่	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	0.30762	0.0028600	0.029081
2	0.31002	0.0028549	0.029427
3	0.43715	0.0025254	0.047565

### 5.3.3 สภาวะการทำงานที่มีมวลภาระหนัก 600 กรัม

สมมุติเหตุการณ์ต่อเนื่องจากสภาวะการทำงานแรก และเพิ่มมวลภาระน้ำหนัก 600 กรัมให้กับระบบ ทำให้พลวัตของมวลภาระเปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

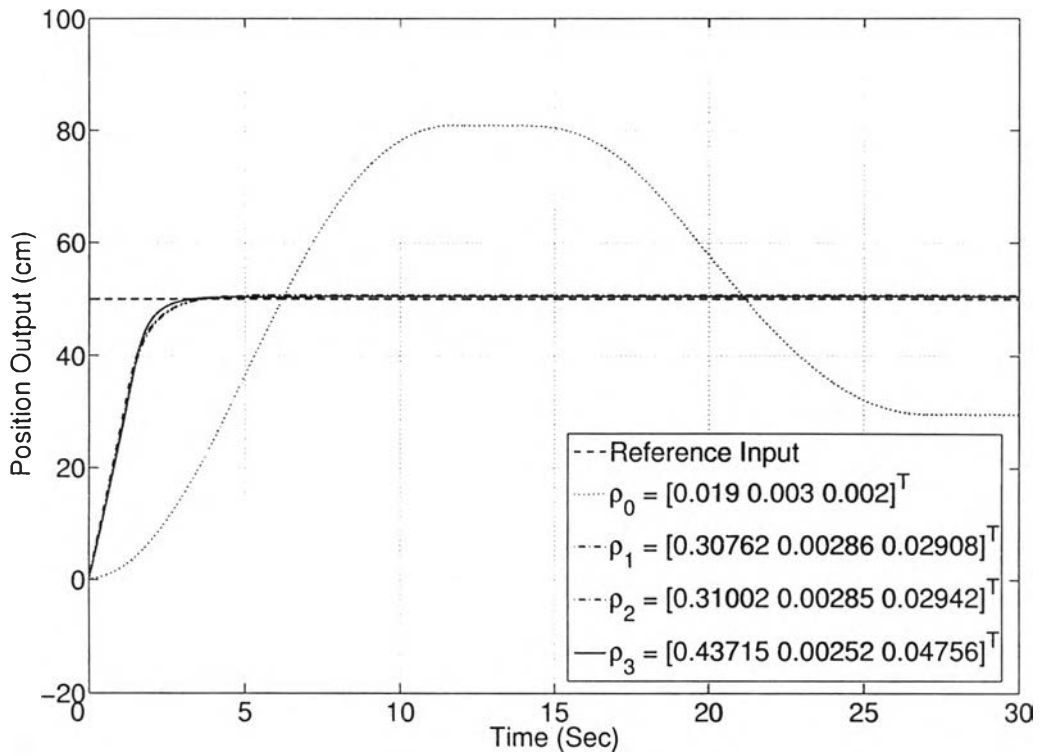
$$\rho_0 = [0.015 \ 0.008 \ 0.005]^T$$

วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 5.5 ในรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 5.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลภาระของระบบขณะที่ยังไม่มี การปรับจูนตัวควบคุม ผลตอบสนองมีการแกว่งไกว (Oscillation) หลังจากวนซ้ำครั้งที่ 4 ปรากฏว่า วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้นอย่างชัดเจน ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 2 วินาที ส่วนรูปที่ 5.13 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณควบคุมที่มีการแกว่งไกว หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 4 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำแสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง ช่วงเวลาประมาณ 3 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.3 โวลต์

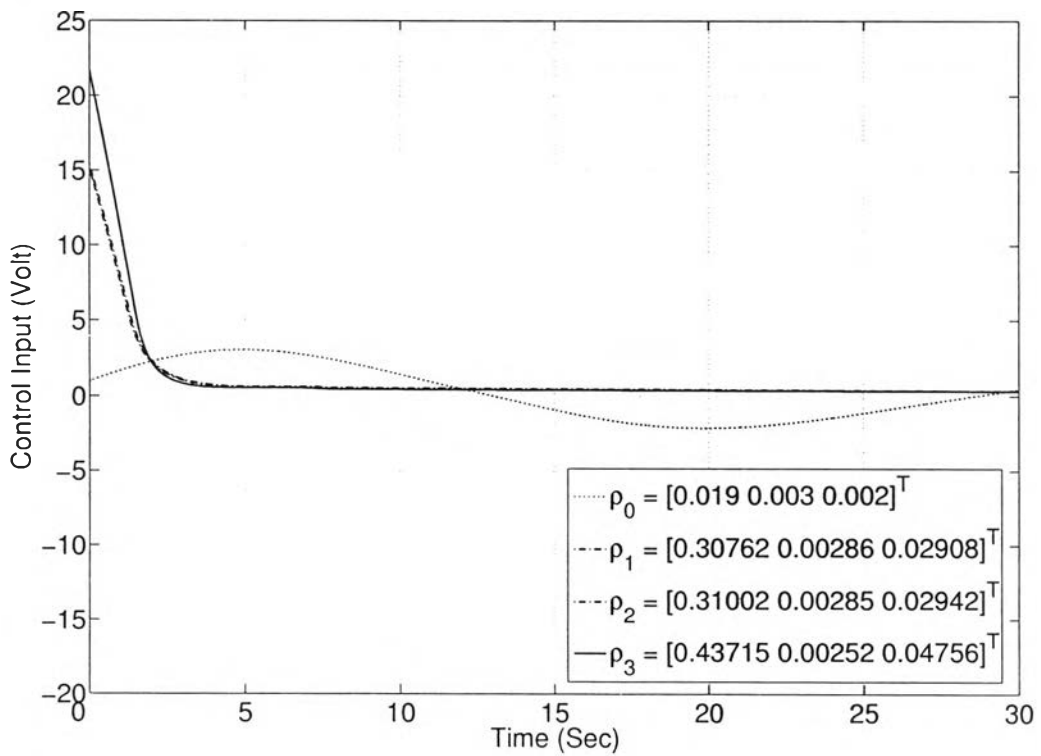
ตัวอย่างถัดไปกำหนดให้พลวัตของมวลภาระในสภาวะการทำงานยังคงเดิม แต่ปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_0 = [0.019 \ 0.003 \ 0.002]^T$$

วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 5.6 ในรูปที่ 5.11 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 5.14 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลภาระของระบบขณะที่ยังไม่มี การปรับจูนตัวควบคุม ผลตอบสนองมีส่วนพุ่งเกินสูงมาก คิดเป็น 60% หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 3 ปรากฏว่า วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้นอย่างชัดเจน ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 2 วินาที ส่วนรูปที่ 5.15 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณควบคุมที่ไม่อยู่ตัว หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 3 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำแสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง ช่วงเวลาประมาณ 3 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์



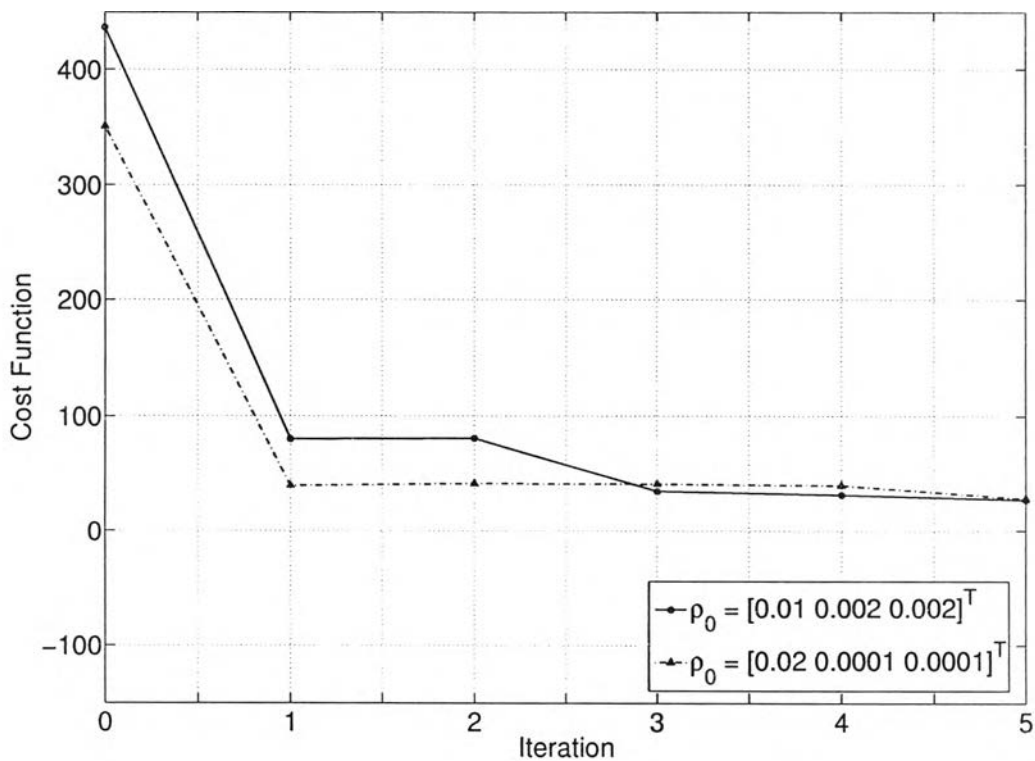
รูปที่ 5.14: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 3 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.15: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 3 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

ตารางที่ 5.7: พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มีมวลภาระหนัก 900 กรัม เมื่อ  $\rho_0 = [0.01 \ 0.002 \ 0.002]^T$

การวนซ้ำครั้งที่	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	0.065299	0.00171720	0.0051489
2	0.066325	0.00171460	0.0053135
3	0.142900	0.00154710	0.0169340
4	0.165650	0.00149750	0.0203090
5	0.458920	0.00085978	0.0638760



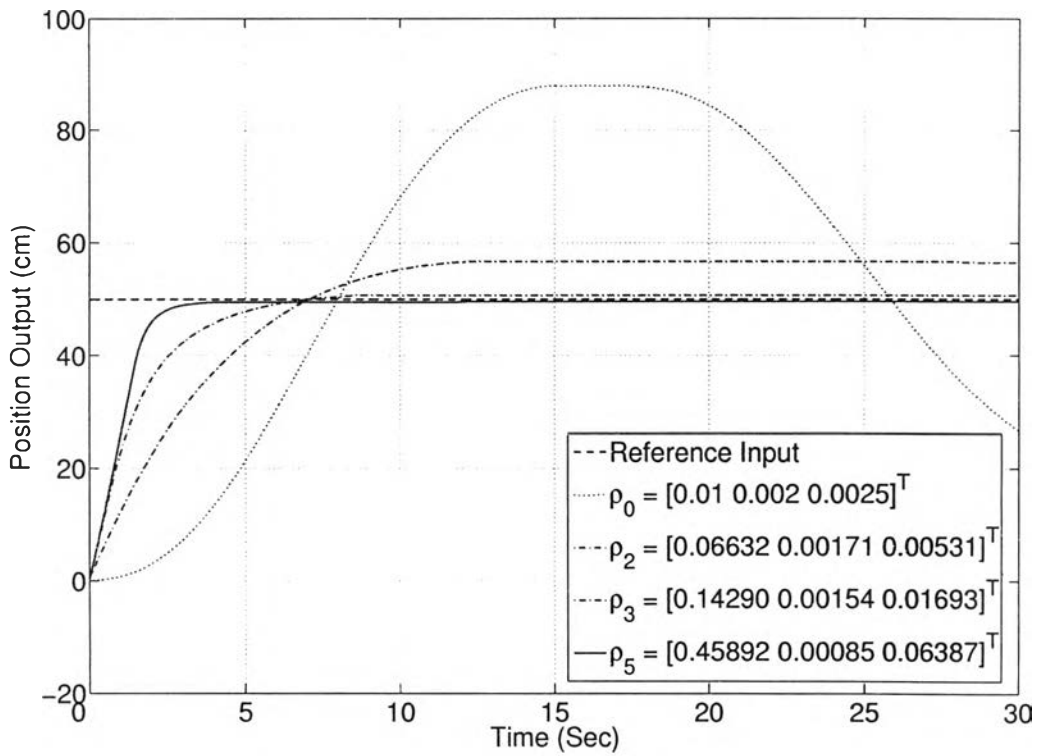
รูปที่ 5.16: ค่าจุดประสงค์ในแต่ละรอบการวนซ้ำ เปรียบเทียบระหว่างค่าเริ่มต้นของตัวควบคุม 2 ค่า

### 5.3.4 สภาวะการทำงานที่มีมวลภาระหนัก 900 กรัม

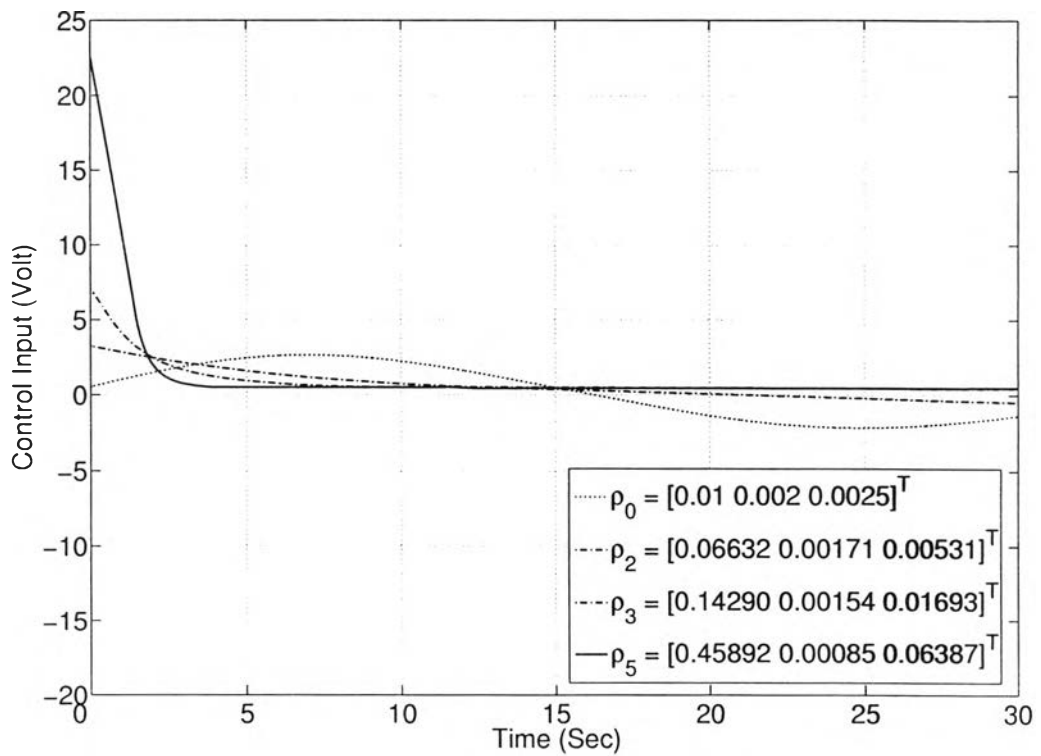
สมมุติเหตุการณ์ต่อเนื่องจากสภาวะการทำงานแรก และเพิ่มมวลภาระน้ำหนัก 900 กรัมให้กับระบบ ทำให้พลวัตของมวลภาระเปลี่ยนแปลงไป พารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมมีค่าเท่ากับ

$$\rho_0 = [0.01 \ 0.002 \ 0.002]^T$$

วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 5.7 ในรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 5.17 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลภาระของระบบขณะที่ยังไม่มีการปรับจูนตัวควบคุม ผลตอบสนองมีส่วนพุ่งเกินสูงมาก คิดเป็น 70% หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 ปรากฏว่า วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้นอย่างชัดเจน ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่



รูปที่ 5.17: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.18: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ

ตารางที่ 5.8: พารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่มวลภาระหนัก 900 กรัม เมื่อ  $\rho_0 = [0.02 \ 0.0001 \ 0.0001]^T$

การวนซ้ำครั้งที่	$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	0.14244	0.00040760	0.0094396
2	0.14194	0.00040799	-0.0024638
3	0.14591	0.00040827	-0.0203120
4	0.14909	0.00040715	-0.0179080
5	0.64152	0.00024159	0.2307100

สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 3 วินาที ส่วนรูปที่ 5.18 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ไม่อยู่ตัว หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำแสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง ช่วงเวลาประมาณ 3 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์

ตัวอย่างถัดไปกำหนดให้พลวัตของมวลภาระในสภาวะการทำงานยังคงเดิม แต่ปรับเปลี่ยนการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมเป็น

$$\rho_0 = [0.02 \ 0.0001 \ 0.0001]^T$$

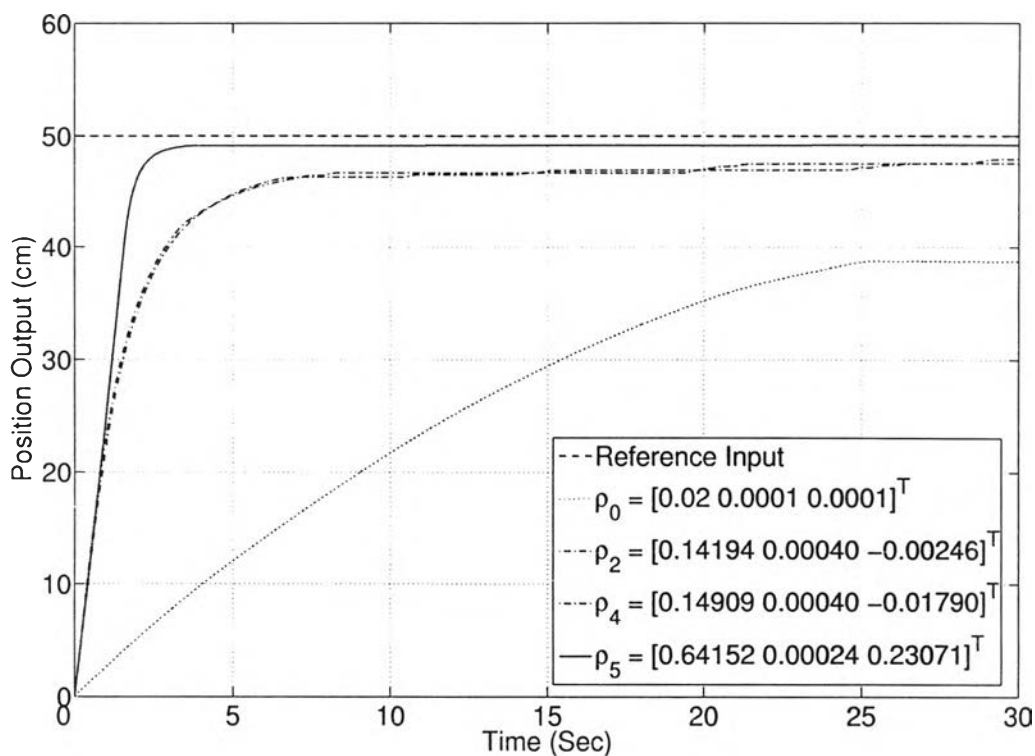
วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้พารามิเตอร์ของตัวควบคุมตามตารางที่ 5.8 ในรูปที่ 5.16 แสดงให้เห็นถึงฟังก์ชันจุดประสงค์มีค่าลดลงตามลำดับการวนซ้ำ รูปที่ 5.19 แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงมวลภาระของระบบขณะที่ยังไม่มีการปรับจูนตัวควบคุม ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวช้ามาก มากกว่า 30 วินาที หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 ปรากฏว่า วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำให้ผลตอบสนองมีแนวโน้มปรับตัวได้ดีขึ้น นั่นคือ ผลตอบสนองเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้นอย่างชัดเจน ไม่มีค่าความผิดพลาดสภาวะอยู่ตัว และเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวเร็วขึ้น ประมาณ 3 วินาที ส่วนรูปที่ 5.20 แสดงให้เห็นว่าผลตอบสนองที่จุดเริ่มต้นยังคงมีสัญญาณเข้าควบคุมที่ไม่อยู่ตัว หลังจากการวนซ้ำครั้งที่ 5 แสดงให้เห็นถึงสัญญาณควบคุมที่ลดลง ช่วงเวลาประมาณ 3 วินาทีที่มีค่าลดลงเหลือเพียงประมาณ 0.1 โวลต์

#### 5.4 วิเคราะห์ผลการทดลอง

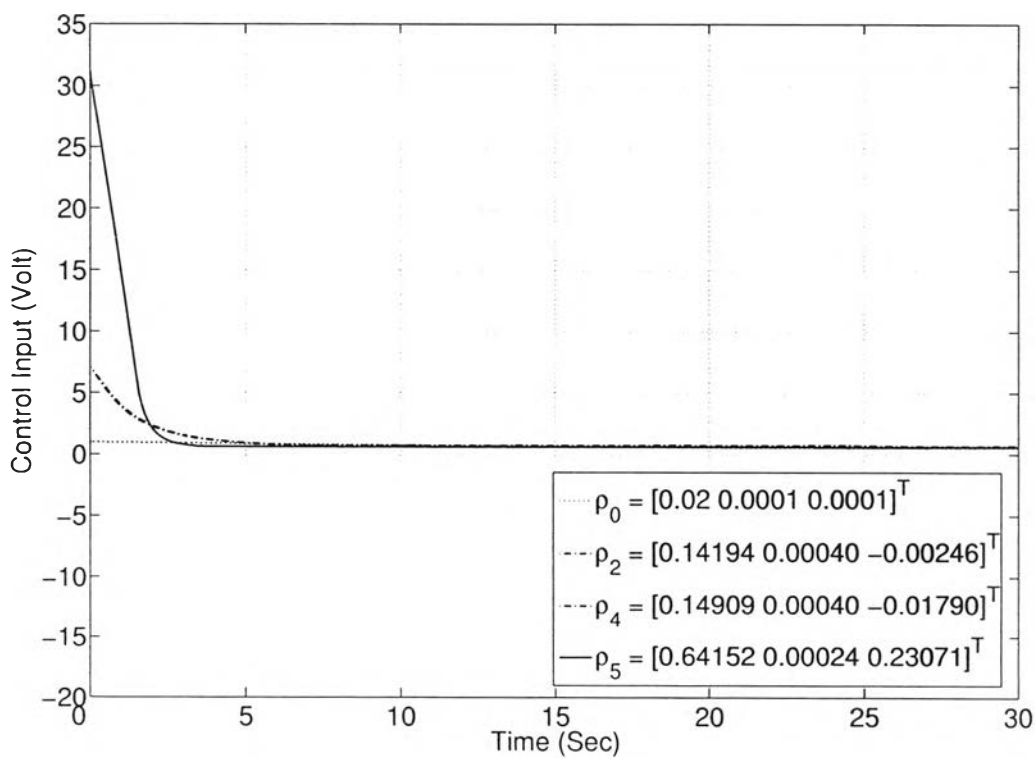
การทดลองพบว่าการนำวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำไปใช้กับระบบสายพานลำเลียง สามารถสังเคราะห์ตัวควบคุมและทำให้ระบบมีตรรกะนี้สมรรถนะสูงขึ้นได้ ภายใต้การเปลี่ยนแปลงของสภาวะการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงมวลภาระของระบบ ซึ่งในกรณีที่เราเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุม วิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำก็ยังคงสามารถสังเคราะห์ตัวควบคุมได้ แต่ค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของตัวควบคุมที่แตกต่างกันจะส่งผลต่อค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดด้วย เนื่องจากวิธีปรับจูนการป้อนกลับวนซ้ำเป็นการสังเคราะห์ตัวควบคุมที่เป็นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local optimization)

ปัญหาที่เกิดขึ้นกับการทดลองคือสัญญาณเข้าควบคุมที่ส่งไปให้กับมอเตอร์กระแสดังนั้น มีขีดจำกัดจากมอเตอร์กระแสดังคือ ประมาณ 24 โวลต์ ถ้าหากสัญญาณเข้าควบคุมเกินจาก 24 โวลต์ จะเกิดสภาวะอิ่มตัว (Saturation) ของมอเตอร์ สภาวะอิ่มตัวของมอเตอร์เป็นอุปสรรคของการทดลองมาก ดังแสดงในรูปที่ 5.21 ขีดจำกัดของสัญญาณเข้าควบคุมมีผลมากในกรณีที่สัญญาณเข้าควบคุมมีขนาดใหญ่ ทำให้

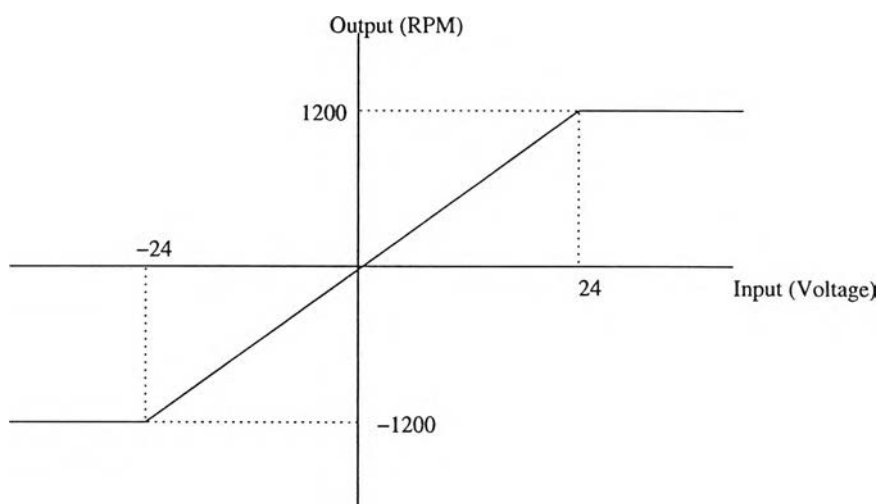




รูปที่ 5.19: ผลตอบสนองจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.20: สัญญาณควบคุมจากค่าเริ่มต้นจนถึงครั้งที่ 5 ปรับปรุงดีขึ้นตามลำดับรอบการวนซ้ำ



รูปที่ 5.21: สภาวะอิ่มตัวของมอเตอร์

สัญญาณควบคุมจริงจึงมีค่าแตกต่างจากสัญญาณควบคุมที่คำนวณได้จากตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ เพราะฉะนั้นสมรรถนะของระบบจึงเปลี่ยนแปลงไป

จากปัญหาของความไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างมากในระบบจริงนี้เอง เราจึงทำการทดลองที่มีค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมมีค่าน้อยๆ เพื่อให้ค่าสัญญาณเข้าควบคุมมีค่าน้อยกว่า 24 โวลต์ ทำให้สัญญาณเข้าควบคุมมีขนาดไม่เกินขีดจำกัด และไม่ต่ำจนเกินไปซึ่งจะทำให้เซตไร์ผลสนองมีผลมากด้วยเช่นกัน