

## การควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม สำหรับเครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์

ปราการเกียรติ ยังกง<sup>1</sup> และ ประสิทธิ์ วงศ์เลิศศักดิ์<sup>2</sup>

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษา พัฒนาและออกแบบการควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับเครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ มุ่งเน้นให้ความแปรผันของแถบความสูงของตัวแปรสัญญาณบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ที่ติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์จัดแถวขัดเดียวกันลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โครงข่ายประสาทเทียมที่มีการเรียนรู้แบบเฮบที่ไม่มีการฝึกสอนถูกประยุกต์ใช้ในการปรับค่า  $K_p$  ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน จากการทดสอบตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้ในการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ 10,000 ชิ้นงานของสองผลิตภัณฑ์ที่มีค่าแถบความสูงของตัวแปรสัญญาณสุดท้ายแตกต่างกัน พบว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้ที่มี  $K_{pc}=13$  และ  $K_{dc}=16$  อัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.20 สามารถทำให้ร้อยละ 89.41 ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ภายหลังการขัดมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยน้อยกว่า 6 ไมโครโอห์ม

**คำสำคัญ :** การควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้ / หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ / ความแปรผันของแถบความสูง / การเรียนรู้แบบเฮบ

\* Corresponding author: E-mail : youngkong@fibo.kmutt.ac.th

<sup>1</sup> อาจารย์ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

<sup>2</sup> นักศึกษาปริญญาโท หลักสูตรวิทยาการหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

## An Adaptive Compensated Proportional – Derivative Controller Using Artificial Neural Networks for Hard Disk Drive Lapping Machines

Prakarnkiat Youngkong<sup>1\*</sup> and Prasit Wonglersak<sup>2</sup>

King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangmod, Thungkru, Bangkok 10140

### Abstract

In this paper, an adaptive compensated proportional – derivative controller using the artificial neural networks was presented for hard disk drive head lapping machines where standard deviation reduction of the final stripe height was determined to be a key performance. Hebbian learning technique was applied to adjust the gains. More than 10,000 heads from two different products that final stripe heights are different, were lapped using learning rate = 0.20,  $K_{pc}=13$  and  $K_{dc}=16$ . As a result, 89.41 percent of the heads with standard deviation less than  $6 \mu\Omega$  was obtained.

**Keywords :** Adaptive Compensated Proportional – Derivative Control (ACPD) / Hard Disk Drive Head / Deviation of Stripe Height / Hebbian learning

---

\* Corresponding author: E-mail : [youngkong@fibo.kmutt.ac.th](mailto:youngkong@fibo.kmutt.ac.th)

<sup>1</sup> Lecturer, Institute of Field Robotics.

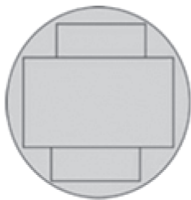
<sup>2</sup> Graduate Student, Institute of Field Robotics.

## 1. บทนำ

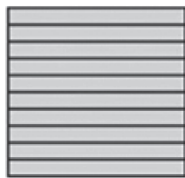
ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) รายใหญ่ของโลก ที่ต้องการนำเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลที่ทันสมัยและทรงประสิทธิภาพส่งไปยังผู้บริโภคทั่วโลก การขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นกระบวนการหนึ่งที่มีผลกระทบต่อคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาดของแถบความสูงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความสำคัญยิ่งต่อความจุในการบันทึกข้อมูล ดังนั้นผู้ผลิตจำเป็นต้องให้ความสำคัญและควบคุมการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ให้ถูกต้องและแม่นยำ โดยทั่วไปเป้าหมายหลักของกระบวนการผลิตเป็นการนำเนื้อวัสดุออกไปในปริมาณที่ต้องการ แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในแต่ละครั้งเกิดขึ้นพร้อมๆ กัน Marinescu และคณะ [1] ระบุไว้ว่าการทำให้ความแปรผันของแถบความสูงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ผลิตในเวลาเดียวกันเกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้เป็นเรื่องที่ผู้ผลิตจะต้องดูแลอย่างใกล้ชิด ในอดีต กระบวนการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้ระบบการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) ที่มีตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional controller) เป็นค่าคงที่ที่ปรับเปลี่ยนไปตามช่วงเวลาของ

การขัด กล่าวคือ เริ่มต้นการขัด ขัดแบบหยาบและขัดแบบละเอียด โดยผู้ปฏิบัติงานจะทำการปรับตั้งตามความเหมาะสม จะเห็นได้ว่าวิธีการดังกล่าวไม่เอื้ออำนวยต่อการทำงานให้มีประสิทธิภาพ เพราะเครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในสายการผลิตมีอยู่เป็นจำนวนมาก

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ผ่านกระบวนการผลิตแผ่นเวเฟอร์ (Wafer fabrication) จะถูกนำมาประกอบเข้ากับอุปกรณ์จัดแถว (Row tool) ในอัตราส่วน 55 หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต่อ 1 อุปกรณ์จัดแถว ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อเข้าสู่กระบวนการขัด ในทางปฏิบัติ ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถวัดแถบความสูงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้โดยตรงในขณะที่เครื่องขัดกำลังทำงาน ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงได้รับการเชื่อมต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าโดยใช้ทองคำบริสุทธิ์เพื่ออ่านค่าความต้านทานที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2 แล้วจึงคำนวณหาแถบความสูง อย่างไรก็ตามการเชื่อมต่อเพื่ออ่านค่าความต้านทานนี้เกิดขึ้นเพียง 40 ตำแหน่ง ซึ่งน้อยกว่าจำนวนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ทำการขัด ทำให้การควบคุมคุณภาพของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่สามารถเกิดขึ้นได้อย่างเป็นอิสระเชิงเส้น



หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์บนแผ่นเวเฟอร์



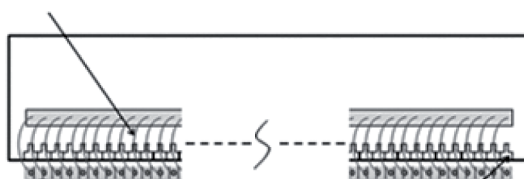
หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หลังผ่านกระบวนการผลิต



หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์บนอุปกรณ์จัดแถว

รูปที่ 1 หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์บนอุปกรณ์จัดแถวเมื่อผ่านออกจากกระบวนการผลิตแผ่นเวเฟอร์ [1]

การเชื่อมต่อเพื่อวัดค่าความต้านทาน



ก้านส่งแรง

รูปที่ 2 การเชื่อมต่อแถวของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เข้ากับวงจรวัดความต้านทาน

การทำงานของเครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าความต้านทานที่วัดได้ กล่าวคือ เครื่องขัดจะกดอุปกรณ์จัดแถวลงบนจานขัดเมื่อความต้านทานที่วัดได้ในตำแหน่งของก้านส่งแรงนั้นๆ มีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานทั้งหมดที่วัดได้ และเครื่องขัดจะดึงอุปกรณ์จัดแถวขึ้นจากจานขัดเมื่อความต้านทานที่วัดได้ในตำแหน่งของก้านส่งแรงนั้นๆ มีค่ามากกว่าค่าเฉลี่ยของความต้านทานทั้งหมดที่วัดได้

บทความนี้นำเสนอวิธีการระบุค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปรการควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยของกระบวนการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สามารถปรับค่าได้ พร้อมทั้งได้สร้างโปรแกรมขึ้นทดสอบความสามารถในการควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์

## 2. การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Al-Mamun และคณะ [2] ระบุว่าระบบที่ใช้อธิบายการทำงานของกระบวนการนี้ได้เป็นอย่างดีมีประสิทธิภาพมีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (Highly nonlinear) และไม่สามารถแสดงให้อยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์อย่างง่ายได้ อีกทั้งการควบคุมระบบต้องคำนึงถึงเสถียรภาพและสภาพคงทน (Robustness) ทำให้โครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกนำมาใช้กับปัญหาประเภทนี้ Scott และคณะ [3] Chen และ Huang [4] และ D'Emilia และคณะ [5] ต่างมุ่งเน้นไปยังการตอบสนองที่รวดเร็ว มีประสิทธิภาพตรงตามความต้องการของระบบภายหลังการควบคุม

Mei และ Stelson [6] อธิบายการเปลี่ยนแปลงแถบความสูงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ว่าแปรผันตรงกับแรงกดที่มากระทำกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และความเร็วสัมพัทธ์ระหว่างจานขัดกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการขัด เขาเลือกใช้ระบบควบคุมเชิงเส้นคงค่าแบบเหมาะสมที่สุดตามสมการกำลังสอง (Linear quadratic regulator optimal control) เป็นระบบการควบคุม ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความถูกต้องในการควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ

การไม่คำนึงถึงเวลาเว้นว่าง (Dead time) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการควบคุมการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์รวมถึงเป้าหมายเคลื่อนที่ (Moving target) นำพามาซึ่งความ

สามารถในการควบคุมที่ลดลง Hagglund [7] Julio และคณะ [8] และ Aidan [9] นำเทคนิคการควบคุมโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network control) แบบต่างๆ มาใช้เพื่อแก้ไขปัญหาเหล่านี้

Wonglersak และคณะ [10] นำรูปแบบความต้านทานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จากจุดวัด 40 ตำแหน่งไปทำนายค่าอัตราขยายสัดส่วน (Proportional gain) โดยใช้ Radial basis function neural network และใช้ Two-way ANOVA วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ พบว่ารูปแบบของแถบความสูงก่อนขัดและค่าอัตราขยายสัดส่วนมีผลกระทบต่อค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยภายหลังการขัดอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ ถ้ารูปแบบของแถบความสูงสามารถอธิบายโดยใช้สมการพหุนามลำดับสูงและเลือกใช้อัตราขยายสัดส่วนที่มีค่าน้อย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยที่ได้ภายหลังการขัดจะมีค่าน้อย แต่ถ้ารูปแบบของแถบความสูงสามารถอธิบายโดยใช้สมการพหุนามลำดับต่ำและเลือกใช้อัตราขยายสัดส่วนที่มีค่าน้อย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยที่ได้ภายหลังการขัดจะมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นต้น

## 3. ระเบียบวิจัย

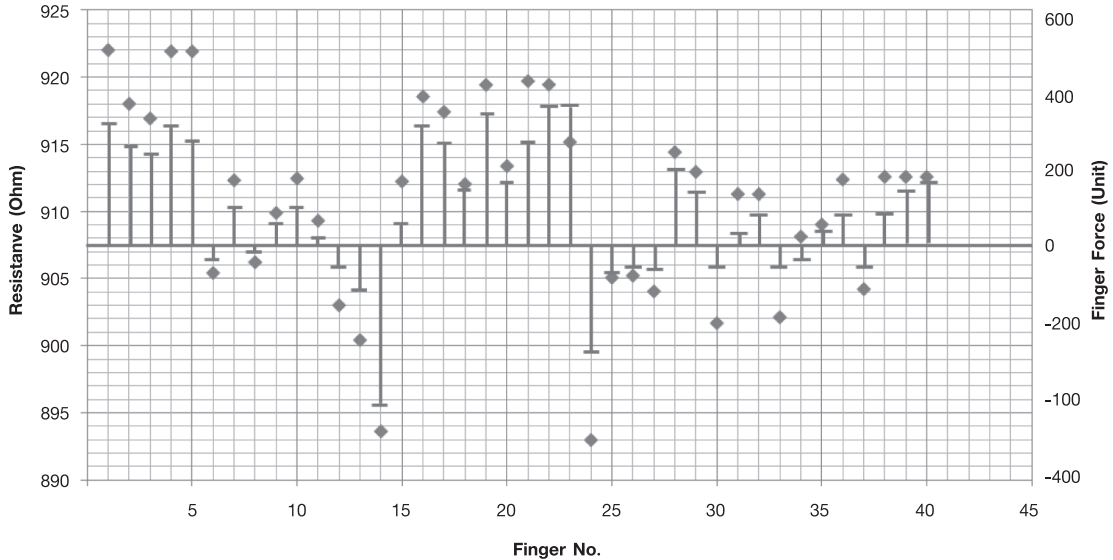
งานวิจัยนี้พิจารณาค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สะท้อนให้เห็นถึงแถบความสูงของตัวแปรสัญญาณบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ติดตั้งอยู่บนอุปกรณ์จัดแถวขัดเดียวกัน หัวข้อ 3.1 แสดงรายละเอียดของการวัดค่าความต้านทานดังกล่าว หัวข้อ 3.2 แสดงการนำตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้มาประยุกต์ใช้เพื่อให้ความแปรผันของค่าความต้านทานมีคาลดลง อย่างไรก็ตามก็ตีผลลัพท์ที่ได้แสดงให้เห็นว่าค่าความแปรผันดังกล่าวสามารถลดลงได้อีกเมื่อประยุกต์ใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้ดังแสดงในหัวข้อ 3.3 และหัวข้อ 3.4 แสดงการนำค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานมาใช้เป็นตัวชี้วัด

### 3.1 ความต้านทานจากเครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ความต้านทานเป็นตัวแปรสำคัญของกระบวนการขัดที่แสดงการเปลี่ยนแปลงแถบความสูงของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่สามารถวัดได้ในระหว่างการขัด (Real-time) รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างค่าของแรง 40 ตำแหน่ง

ที่เปลี่ยนแปลงไปตามค่าความต้านทานที่วัดได้ ค่าความต้านทานจะถูกอ่านทุกๆ 1 วินาที ซึ่งผู้ผลิตต้องการให้ตัวควบคุมที่จะนำมาใช้สามารถคำนวณค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้อง

ให้เสถียรและสั่งการมายังก้านส่งแรงภายในระยะเวลาดังกล่าว



รูปที่ 3 ค่าความต้านทานของแถบความสูง (◆) และค่าแรงที่ก้านส่งกระทำใน 40 ตำแหน่ง (T)<sup>5</sup>

### 3.2 การระบุค่าความต้านทานที่ผิดปกติ (Outlier)

การทดสอบของ Grubb [11] ถูกนำมาใช้ในการค้นหาค่าความต้านทานที่ผิดปกติภายใต้สมมุติฐานว่าข้อมูลความต้านทานของการพิจารณามีการกระจายตัวแบบเกาส์ (Gaussian) เพื่อแก้ไขปัญหาความผิดพลาดของค่าความต้านทานที่วัดได้จากเซ็นเซอร์และทำให้ค่าความต้านทานที่จะนำไปคำนวณในขั้นตอนต่อไปมีสภาพทนทานสูงสุด โดยในแต่ละครั้งของการทดสอบค่าความต้านทาน  $x$  คะแนนมาตรฐาน ( $Z$  score) สามารถคำนวณได้จากสมการต่อไปนี้

$$Z = \frac{|x - \bar{x}|}{s} \quad (1)$$

โดยที่  $\bar{x}$  และ  $s$  เป็นค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานตามลำดับ

ค่าความต้านทาน  $x$  ถูกระบุให้เป็นค่าผิดปกติ ถ้า

$$Z > \frac{N-1}{N} \sqrt{\frac{t_{\alpha/(2N), N-2}^2}{N-2 + t_{\alpha/(2N), N-2}^2}}$$

โดยที่  $N$  เป็นจำนวนข้อมูลทั้งหมดของการพิจารณา และ  $t_{\alpha/(2N), N-2}^2$  เป็นระดับที่ระบุว่าค่าความต้านทานใดผิดปกติคำนวณได้จากค่าการกระจายตัวแบบที (T-distribution) ที่ระดับความจำเพาะ  $\alpha/2N$

### 3.3 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้

ตัวควบคุมได้รับการออกแบบให้เป็นแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้ในช่วงเริ่มต้น เพื่อศึกษาแนวโน้มประสิทธิภาพการตอบสนองของระบบ จากนั้น ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้จึงได้รับการออกแบบเป็นลำดับถัดไป

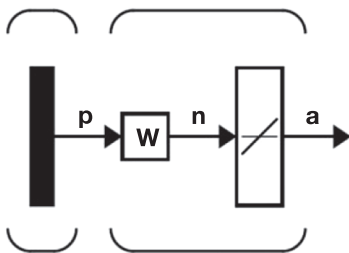
<sup>5</sup> แสดงผลโดยใช้ Microsoft Office Excel 2007

### 3.3.1 การออกแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้

ผู้วิจัยออกแบบและทดสอบตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้กับกระบวนการชัตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการชัตที่เพิ่มขึ้นจากการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนคงที่มีอยู่เดิม โดยกำหนดให้แรงที่ก้านส่งแรงกระทำมีค่าเป็นสัดส่วนกับผลต่างของค่าความต้านทานเฉลี่ยกับความต้านทานที่วัดได้จากก้านส่งแรง  $i$  ดังแสดง

$$F_i(t) = K_p(t)e_i(t) \tag{2}$$

ค่า  $K_p(t)$  ที่เพิ่มขึ้นควรทำให้ระบบสามารถตอบสนองได้รวดเร็วมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ในกรณีกระบวนการชัตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นี้  $K_p(t)$  จะต้องไม่สูงเกินไปจนทำให้ระบบเกิด Overshoot เพราะจะทำให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดความเสียหาย การกำหนดค่า  $K_p(t)$  ที่เหมาะสมสามารถทำได้โดยถูกต้องโดยประยุกต์ใช้ตัวเชื่อมโยงเชิงเส้น (Linear Associator) ของโครงข่ายประสาทเทียม ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ตัวเชื่อมโยงเชิงเส้น

โดยมี  $p$  เป็นข้อมูลขาเข้า และ  $a$  เป็นข้อมูลขาออก ตัวเชื่อมโยงเชิงเส้นนี้ใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นหรือ  $a = n$  เป็นฟังก์ชันส่งผ่าน และประยุกต์ใช้การเรียนรู้แบบเฮบแบบไม่มีผู้ฝึกสอน (Unsupervised Hebb learning) ในการปรับค่าตัวให้น้ำหนัก ( $W$ ) ตามสมการต่อไปนี้

$$W(t) = W(t-1) + \alpha a(t)p(t)$$

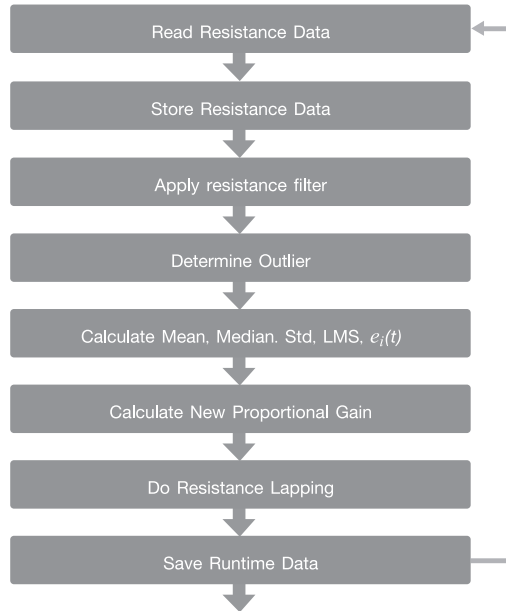
โดยที่  $\alpha$  เป็นอัตราการเรียนรู้ ดังนั้น  $K_p(t)$  ที่ได้จึงมีค่าเท่ากับ

$$K_p(t) = K_p(t-1) + \alpha a(t)p(t) \tag{4}$$

โดยที่  $K_p(t)$ ,  $a(t)$  และ  $p(t)$  เป็นอัตราขยายสัดส่วน, ค่าความต้านทานที่วัดได้และค่าความผิดพลาดที่เวลา  $t$  ตามลำดับ อนึ่ง การเรียนรู้แบบเฮบแบบไม่มีผู้ฝึกสอนนี้เป็นเทคนิคการปรับค่าตัวแปรอย่างง่ายที่แสดงให้เห็นในงานวิจัยนี้ว่าอัตราขยายสัดส่วนมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลขาเข้าและขาออกได้อย่างถูกต้องเหมาะสมมากน้อยเพียงใด สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดที่เกิดขึ้นได้ง่าย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสายการชัตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ต้องการการประมวลผลที่รวดเร็ว ระบบคอมพิวเตอร์ไม่สิ้นเปลืองหน่วยความจำมากนักและสามารถควบคุมการผลิตได้อย่างรวดเร็ว เทคนิคนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นพื้นฐานสำคัญในการปรับปรุงระบบให้มีความสามารถสูงขึ้นได้ในอนาคต

อัตราการเรียนรู้เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบต่อโดยตรงกับการทำงานของตัวควบคุมแบบสัดส่วน แนวคิดสำคัญของการออกแบบและปรับอัตราการเรียนรู้ คือ การทำให้เครื่องชัตสามารถปรับเปลี่ยนอัตราขยายสัดส่วนได้รวดเร็วเพียงพอที่จะไม่ทำให้ผลต่างของค่าความต้านทานเฉลี่ยกับความต้านทานที่วัดได้เพิ่มมากขึ้นตามเวลาชัต ผู้วิจัยได้ทดลองนำหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำนวน 1,000 ชิ้นงานที่มีรูปแบบที่เหมือนกันมาทำการชัตบนเครื่องชัตเดิม โดยแบ่งชิ้นงานออกเป็นกลุ่มๆ ละ 100 ชิ้นงาน กำหนดให้แต่ละกลุ่มใช้อัตราการเรียนรู้ตั้งแต่ 0.05 ถึง 0.50 ซึ่งเป็นพิสัยของอัตราการเรียนรู้ที่ผู้ปฏิบัติงานจริงแนะนำว่าจะไม่ทำให้ระบบการชัตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดความเสียหาย

จากนั้น อัตราการเรียนรู้ที่เหมาะสมที่สุดจะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้เพื่อชัตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำนวน 10,000 ชิ้นงานกับสองผลิตภัณฑ์ที่มีค่าแถบความสูงของตัวแปรสัญญาณสุดท้ายแตกต่างกัน โดยการปรับค่า  $K_p(t)$  ดำเนินการตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพการปรับค่า  $K_p(t)$

**3.3.2 การออกแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ซดเชย**

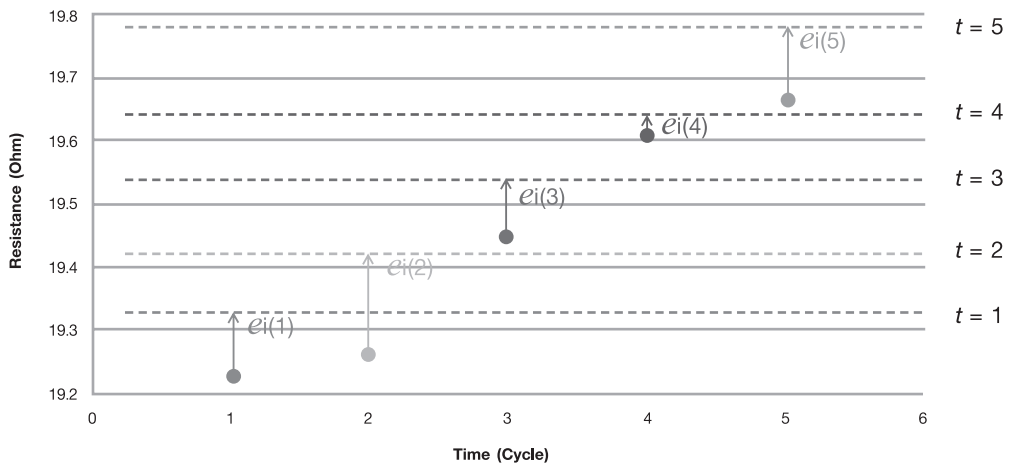
โดยทั่วไป ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์สามารถอธิบายได้ด้วยสมการ ดังแสดง

$$F_i(t) = K_p e_i(t) + K_d \frac{de_i(t)}{dt} \quad (5)$$

โดยที่  $F_i(t)$  เป็นแรงของก้านส่งแรงที่  $i$  กระทำกับอุปกรณ์จัดแถว  $K_p$  และ  $K_d$  เป็นอัตราขยายสัดส่วน

และอัตราขยายอนุพันธ์ (Derivative gain) ตามลำดับ ในขณะที่  $e_i(t)$  เป็นผลต่างของค่าความต้านทานเฉลี่ยกับความต้านทานที่วัดได้จากก้านส่งแรงที่  $i$

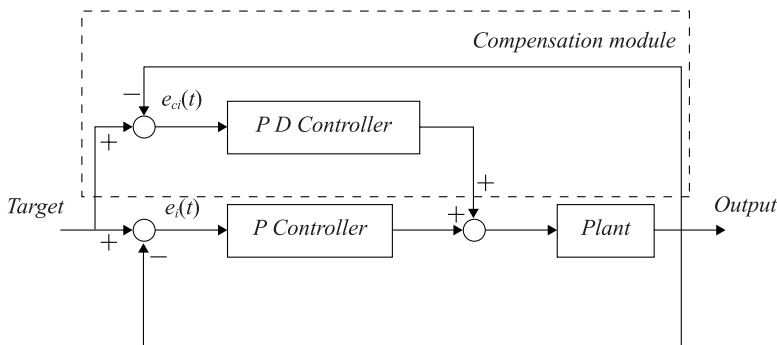
การนำค่าความต้านทานเฉลี่ยที่เวลา  $t$  (เส้นประ) มาใช้เป็นเป้าหมายเพียงประการเดียวในการควบคุมแรงของแต่ละก้านส่งแรงที่ใช้ในการชดทำให้เกิดความผิดพลาดในช่วงเวลาต่อเนื่องกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 อนึ่ง Li [12] แสดงให้เห็นว่าแถบความสูงที่ถูกขีดออกไม่มีค่าความต้านทานเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นใน 5 ช่วงเวลาที่ต่อเนื่องกัน

การที่ตัวควบคุมตอบสนองต่อเป้าหมายที่เปลี่ยนแปลงไปในแต่ละช่วงเวลาทำให้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้เพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเข้าสู่ศูนย์ได้ตามต้องการ ดังนั้น ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชย (Compensation module) ดังแสดงในรูปที่ 7 จึงได้รับการออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อช่วยให้ตัวควบคุมสามารถตอบสนองได้อย่าง

มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยที่เป้าหมาย (Target) เป็นค่าความต้านทานเฉลี่ยที่เครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์อ่านได้ก่อนสั่งให้มีการขัด ข้อมูลขาออก (Output) เป็นค่าความต้านทานเฉลี่ยที่เครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์อ่านได้ภายหลังการขัด และเครื่องจักร (Plant) เป็นเครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์

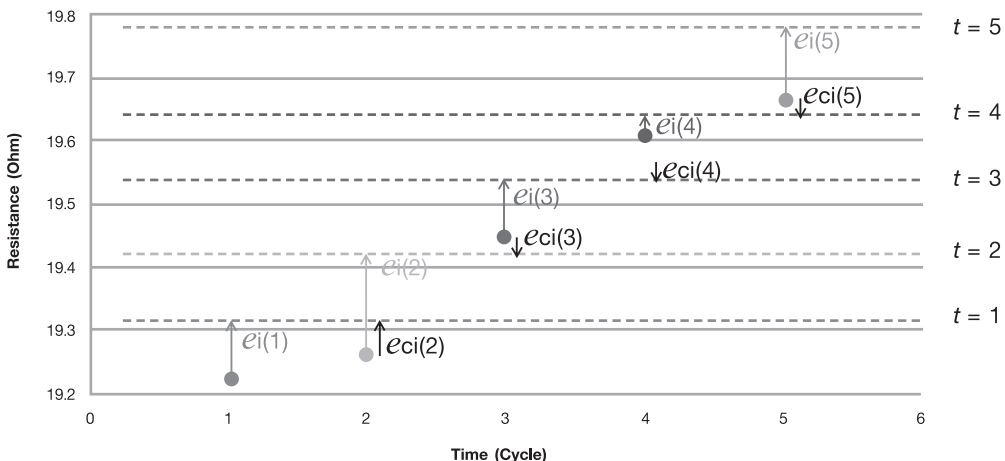


รูปที่ 7 การเชื่อมต่อตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชย

การคำนวณค่าความผิดพลาดปรับเปลี่ยนไปในทิศทางที่ตัวควบคุมพยายามทำให้ค่าความผิดพลาดลดลง โดยเพิ่มการเปรียบเทียบค่าความต้านทานในปัจจุบันกับค่าความต้านทานเฉลี่ยที่คำนวณได้ในครั้งก่อน และเขียนเป็นสมการได้ ดังนี้

$$e_c(t) = avg\_res(t-1) - res_i(t) \tag{6}$$

โดยที่  $e_c(t)$  เป็นค่าความผิดพลาดชดเชย  $avg\_res(t-1)$  เป็นค่าความต้านทานเฉลี่ยที่เวลา  $t-1$  และ  $res_i(t)$  เป็นค่าความต้านทานที่วัดได้จากก้านส่งแรง  $i$  ที่เวลา  $t$



รูปที่ 8 ค่าความผิดพลาดและค่าความผิดพลาดชดเชยที่เกิดขึ้นใน 5 ช่วงเวลาที่ต่อเนื่องกัน



จากรูปที่ 8 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชย ซึ่งเปรียบเทียบค่าความต้านทานในปัจจุบันกับค่าความต้านทานเฉลี่ยที่คำนวณได้ในครั้งก่อน ทำให้ตัวควบคุมได้รับข้อมูลป้อนกลับจากการส่งแรง  $F_i(t)$  ออกไปในแต่ละรอบว่าค่าความต้านทานเปลี่ยนแปลงเข้าสู่เป้าหมายได้มากน้อยเพียงใด

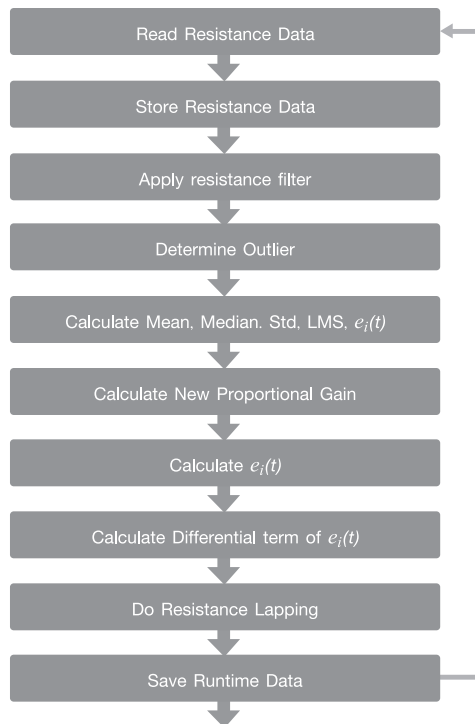
เป้าหมายเคลื่อนที่หรือความต้านทานเฉลี่ยที่เปลี่ยนแปลงไปทุกๆ 1 วินาทีนี้ทำให้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้มีสมการเท่ากับ

$$F_i(t) = K_p(t)e_i(t) + K_{pc}e_{ci}(t) + K_{dc} \frac{de_{ci}(t)}{dt} \quad (7)$$

โดยที่  $F_i(t)$  เป็นแรงที่ก้านส่งแรง  $i$  กระทำกับอุปกรณ์จัดแถว  $K_p(t)$   $K_{pc}$  และ  $K_{dc}$  เป็นอัตราขยายสัดส่วนที่เวลา  $t$  อัตราขยายสัดส่วนชดเชยและอัตราขยาย

อนุพันธ์ชดเชย ตามลำดับ ในขณะที่  $e_i(t)$  เป็นผลต่างของค่าความต้านทานเฉลี่ยกับความต้านทานที่วัดได้จากก้านส่งแรงที่  $i$  และ  $e_{ci}(t)$  เป็นผลต่างของค่าความต้านทานเฉลี่ยของเวลา  $t-1$  กับค่าความต้านทานที่วัดได้จากก้านส่งแรงที่  $i$  อนึ่ง พจน์ที่สองและสามของสมการการควบคุมเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้ตัวควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากการพิจารณาเพิ่มเติมค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น ณ เวลา  $t-1$  เพื่อที่จะทำให้ตัวควบคุมที่ได้รับข้อมูลป้อนกลับจากการส่งแรงที่กระทำกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์สามารถชดเชยแรงได้อย่างเหมาะสม

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์จำนวน 10,000 ชิ้นงานของสองผลิตภัณฑ์ที่มีค่าแถบความสูงของตัวแปรสัญญาณสุดท้ายแตกต่างกัน ถูกนำไปทดลองชัดโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่มีการทำงานตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ขั้นตอนการทำงานของตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้

### 3.4 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เป้าหมายสำคัญสองประการที่ผู้ปฏิบัติงานต้องการได้รับจากหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายหลังผ่านกระบวนการขัด คือ 1) การทำให้ขนาดของแถบความสูงหรือความต้านทานที่วัดได้จากก้านส่งแรงในแต่ละตำแหน่งมี

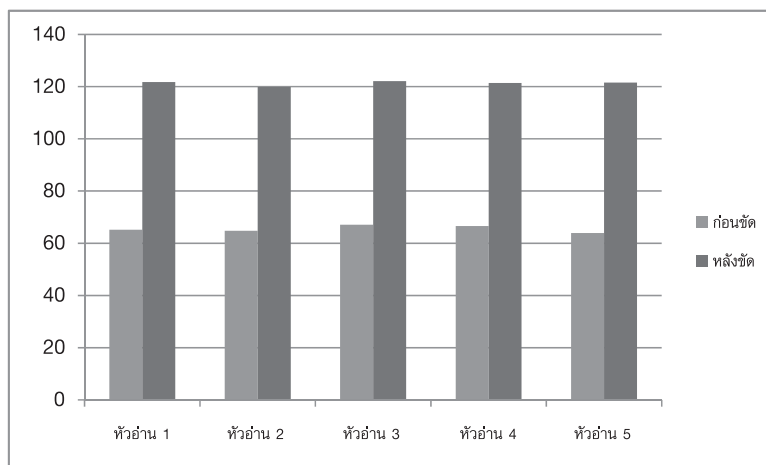
ค่าตามต้องการ และ 2) ค่าความต้านทานดังกล่าวต้องอยู่ภายในค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กำหนด เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ชัดเจน ไม่สับสน ผู้วิจัยขอยกตัวอย่างการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำนวน 5 ชิ้นงานที่มีค่าความต้านทานก่อนขัดและหลังขัดดังแสดงในตารางที่ 1

**ตารางที่ 1** ค่าความต้านทานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่วัดได้ก่อนขัดและหลังขัดในหน่วยไมโครโอมห์

	หัวอ่าน 1	หัวอ่าน 2	หัวอ่าน 3	หัวอ่าน 4	หัวอ่าน 5	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน
ก่อนขัด	65.2	64.8	67.1	66.6	63.9	65.52	1.31
หลังขัด	121.8	119.9	122.1	121.4	121.6	121.36	0.86

โดยเครื่องขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะหยุดทำงานเมื่อความต้านทานเฉลี่ยมากกว่า 121.3 ไมโครโอมห์ และพบว่าหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายหลังการขัด

มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานลดลง สะท้อนให้เห็นว่าหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แต่ละชิ้นมีคุณภาพที่ทัดเทียมกัน สรุปเป็นแผนภูมิแท่งดังแสดงในรูปที่ 10



**รูปที่ 10** เปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้ก่อนขัดและหลังขัดในหน่วยไมโครโอมห์

ในทางปฏิบัติกระบวนการขัดจะหยุดลงอัตโนมัติเมื่อค่าความต้านทานเฉลี่ยของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั้ง 40 ชิ้นงานมีค่าเท่ากับค่าความต้านทานที่ผู้ปฏิบัติงานได้กำหนดไว้ ซึ่งแน่นอนว่าหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แต่ละหัวไม่ได้มีค่าความต้านทานเท่ากับค่าต้านทานที่กำหนดไว้ ดังนั้น การพิจารณาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญยิ่ง

#### 3.4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย (Average standard deviation)

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างระหว่างค่าความต้านทานที่วัดได้จากก้านส่งแรงกับค่าความต้านทานเฉลี่ย ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{40} (R_i - \bar{R})^2}{N}} \quad (8)$$

โดยที่  $\sigma$  เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย  $R_i$  เป็นค่าความต้านทานที่วัดได้จากก้านส่งแรงที่  $i$  ในขณะที่  $\bar{R}$  เป็นค่าความต้านทานเฉลี่ยและ  $N$  เป็นจำนวนการทดสอบทั้งหมด

### 3.4.2 การกระจายตัวของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย

ผู้ผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ให้ความสำคัญไม่เพียงแต่ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของผลิตภัณฑ์เท่านั้น แต่ยังต้องการให้อัลกอริทึมของตัวควบคุมสามารถทำให้ค่าเบี่ยง

เบนมาตรฐานเฉลี่ยมีการกระจายตัวอยู่ในระดับที่ต่ำกว่า 6 ไมโครโอห์ม หรือต้องการให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยที่สูงกว่า 6 ไมโครโอห์มเกิดขึ้นน้อยที่สุด

## 4. ผลการทดลอง

### 4.1 ผลการทดลองการออกแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้

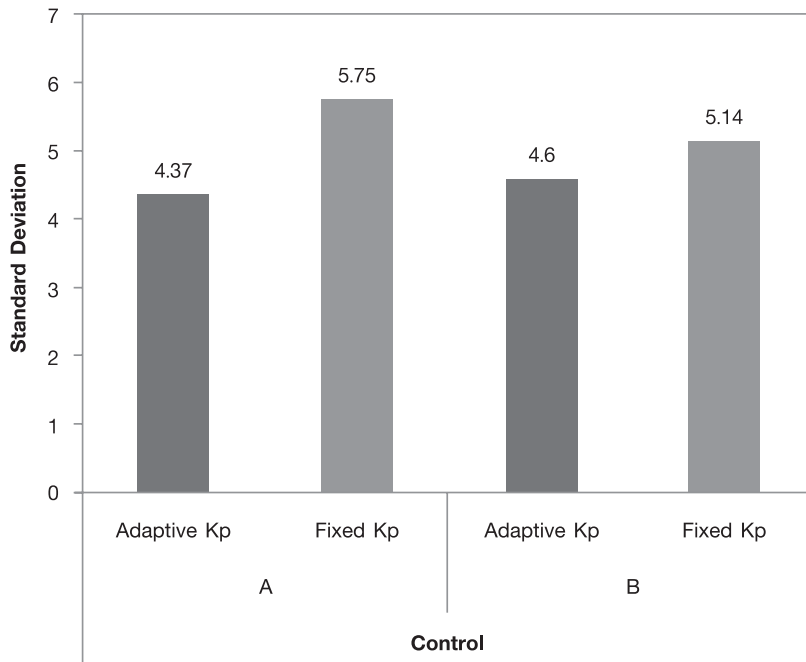
ร้อยละสะสมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการเรียนรู้สูงขึ้นและได้รับค่าสูงสุดเมื่ออัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.20 ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ร้อยละสะสมของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยในแต่ละอัตราการเรียนรู้

อัตราการเรียนรู้	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ย			
	$\sigma < 4$	$4 \leq \sigma < 6$	$6 \leq \sigma < 8$	$8 \leq \sigma < 10$
0.05	70.20	82.12	88.08	89.40
0.10	67.27	81.21	86.06	90.30
0.15	75.68	85.71	90.73	93.05
0.20	78.35	86.64	92.17	94.93
0.25	73.12	84.72	87.59	90.23
0.30	71.88	80.19	85.67	87.11
0.35	71.56	78.22	81.73	84.92
0.40	65.40	72.45	77.83	79.01
0.45	60.08	65.41	68.29	69.62
0.50	45.45	49.77	51.12	52.94

ตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้ที่มีอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.20 ถูกนำไปทดลองใช้จริงกับการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ของสองผลิตภัณฑ์ A และ B (ชื่อผลิตภัณฑ์สมมุติ) ที่มีค่าแถบความสูงของตัวแปรสัญญาณสุดท้ายแตกต่างกัน ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า

ระบบมีการตอบสนองเป็นไปตามสมมุติฐานทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ของผลิตภัณฑ์ A และ B ลดลงร้อยละ 24 ( $\frac{5.75-4.37}{5.75} \times 100\%$ ) และ 10.51 ( $\frac{5.14-4.6}{5.14} \times 100\%$ ) ตามลำดับ

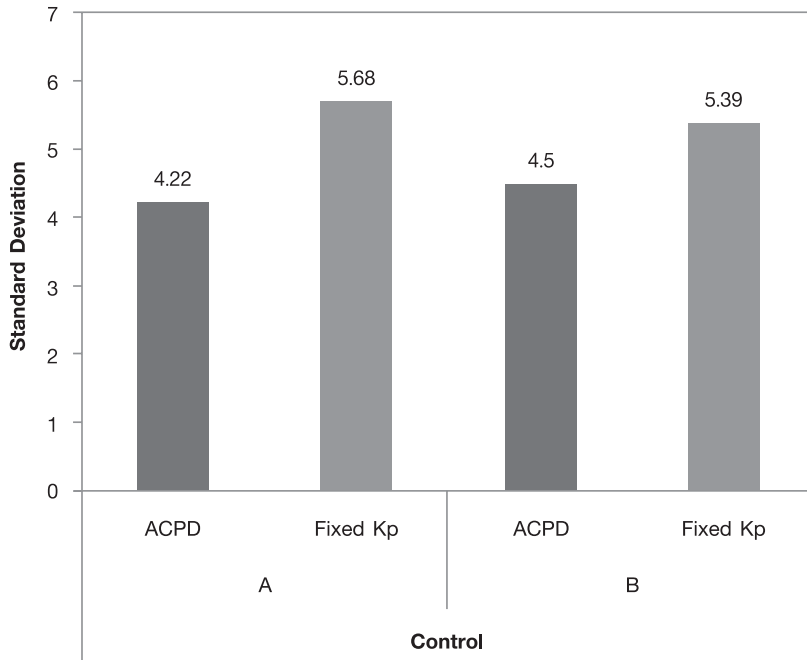


รูปที่ 11 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนคงที่กับแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้ในการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ของผลิตภัณฑ์ A และ B

#### 4.2 ผลการทดลองการออกแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้

ผู้วิจัยได้ทดลองปรับเปลี่ยนค่า  $K_{pc}$  โดยกำหนดให้  $K_{pc} = 0$  เพื่อหาค่า  $K_{dc}$  ที่เหมาะสมที่สุด พบว่า  $7 \leq K_{pc} \leq 20$  จากนั้น จึงทดลองปรับเปลี่ยนค่า  $K_{dc}$  เพื่อให้ได้การตอบสนองของระบบที่ดีที่สุด และพบว่า  $K_{pc} = 13$  และ  $K_{dc} = 16$  ทำให้ความผิดพลาดและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานภายหลังการขัดมีค่าน้อยที่สุด

ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ชดเชยที่สามารถปรับค่าได้ที่มี  $K_{pc} = 13$  และ  $K_{dc} = 16$  อัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.20 ถูกนำไปทดลองใช้จริงกับการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ของสองผลิตภัณฑ์ A และ B ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรว์ของผลิตภัณฑ์ A และ B ลดลงร้อยละ 25.7 ( $\frac{5.68-4.22}{5.68} \times 100\%$ ) และ 16.51 ( $\frac{5.39-4.5}{5.39} \times 100\%$ ) ตามลำดับ



**รูปที่ 12** ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนคงที่กับแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ซดเซยที่สามารถปรับค่าได้ในการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของผลิตภัณฑ์ A และ B

ร้อยละสะสมของจำนวนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ดังแสดงในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์ซดเซยที่สามารถปรับค่าได้ทำให้ร้อยละ 89.41 ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายหลังการขัดมีค่าเบี่ยง

เบนมาตรฐานเฉลี่ยน้อยกว่า 6 ไมโครโอห์ม ดีกว่าการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนคงที่และตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้อยู่ร้อยละ 37.56 (89.41 – 51.85) และ 2.77 (89.41 – 86.64) ตามลำดับ

**ตารางที่ 3** ร้อยละสะสมของจำนวนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยในแต่ละช่วง

ตัวควบคุม	ร้อยละสะสมของจำนวนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์			
	$\sigma < 4$	$4 \leq \sigma < 6$	$6 \leq \sigma < 8$	$8 \leq \sigma < 10$
แบบสัดส่วนคงที่	37.04	51.85	65.49	76.16
แบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้	78.35	86.64	92.17	94.93
แบบสัดส่วน-อนุพันธ์ซดเซยที่สามารถปรับค่าได้	83.79	89.41	94.03	96.47

## 5. สรุปและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ประยุกต์ใช้โครงข่ายประสาทที่มีการเรียนรู้แบบเฮบที่ไม่มีผู้ฝึกสอนเพื่อปรับค่า  $K_p$  ของตัวควบคุมแบบสัดส่วนโดยวิเคราะห์จากการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำนวน 1,000 ชิ้นงาน ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่าค่าการเรียนรู้เท่ากับ 0.20 เหมาะสมที่สุด

สำหรับตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่สามารถปรับค่าได้ ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของผลิตภัณฑ์ A และ B ที่มีค่าแถบความสูงของตัวแปรสัญญาณสุดท้ายแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 10 ลดลงร้อยละ 24 และ 10.51 ในการขัดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 10,000 ชิ้นงาน

สำหรับการออกแบบตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์-อินทิเกรตที่สามารถปรับค่าได้โดยพิจารณาประเด็นปัญหาเวลาเว้นว่างและเป้าหมายเคลื่อนที่ พบว่า  $K_{pc}=13$  และ  $K_{dc}=16$  ที่มีอัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.20 ทำให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยของการชดหั่วอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของผลิตภัณฑ์ A และ B ดังแสดงในรูปที่ 12 ลดลงร้อยละ 25.7 และ 16.51 ในการชดหั่วอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ 10,000 ชิ้นงาน ซึ่งเมื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์-อินทิเกรตที่สามารถปรับค่าได้สามารถทำให้ร้อยละ 89.41 ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายหลังการชดหั่วมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยน้อยกว่า 6 ไมโครโอห์ม

อย่างไรก็ดี อัตราการเรียนรู้และอัตราขยายสัดส่วนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์-อินทิเกรตที่สามารถปรับค่าได้นี้อาจมีความเหมาะสมกับเครื่องชดและผลิตภัณฑ์ที่นำมาใช้ในการทดสอบ การทำให้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์-อินทิเกรตที่สามารถปรับค่าได้ สามารถปรับค่าอัตราการเรียนรู้และอัตราขยายสัดส่วนให้เหมาะสมที่สุดได้เองกับเครื่องชดและผลิตภัณฑ์ใดๆ น่าจะทำให้การนำตัวควบคุมแบบสัดส่วน-อนุพันธ์-อินทิเกรตที่สามารถปรับค่าได้นี้ไปใช้ได้จริงในการผลิตหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

## 6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยร่วมเฉพาะทางด้านการผลิตขั้นสูงในอุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ และ Western Digital (Thailand) Co., Ltd.

## 7. เอกสารอ้างอิง

1. Marinescu, I.D., Uhlmann, E. and Doi, T.K., 2007, *Handbook of Lapping and Polishing*, CRC Press Taylor & Francis Group, pp. 462.
2. Al-Mamun, A., Guo, G. and Bi, C., 2007, *Hard Disk Drive Mechatronics and Control*, CRC Press Taylor & Francis Group, p. 88-116.
3. Scott, G.M., Shavlik, J.W. and Ray, W.H.,

1991, "Refining PID Controllers using Neural Networks", *Neural Computation*, Vol.4, pp.746-757.

4. Chen, J. and Huang, T.C., 2004, "Applying Neural Networks to On-line Updated PID Controllers for Nonlinear Process Control", *Journal of Process Control*, Vol.14, pp.211-230.

5. D'Emilia, G., Marra, A. and Natale, E., 2007, "Use of Neural Networks for Quick and Accurate Auto-Tuning of PID Controller", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.23, pp.170-179.

6. Mei, Y. and Stelson, K.A., 2001, "Lapping Control of Hard Disk Drive Heads", *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol.123, pp.439-448.

7. Hagglund, T., 1996, "An Industrial Dead-Time Compensating PI Controller," *Control Eng. Practice*, vol.4, pp.749-756.

8. Julio, E., Normey, R. and Eduardo, F.C., 2008, "Dead-time compensators: A survey," *Control Eng. Practice*, vol.16, pp. 407-428.

9. Aidan, O.D., 2003, "PID compensation of time delayed processes 1998-2002: a survey," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 1494-1499.

10. Wonglersak, P., Youngkong, P. and Cheowanish, I., 2011 "Classification of Initial Stripe Height Patterns using Radial Basis Function Neural Network for Proportional Gain Prediction" *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.76, pp.481-483.

11. Grubb, F.E. 1950, "Sample criteria for testing outlying observations", *Annual Math Stat*, Vol.21, pp.27-58.

12. Li, Y. 2001, "Effect of current density and stripe height on the amplitude of a dual-synthetic GMR head", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.37, No.4, pp.1695-1697.