



ผลของอุณหภูมิต่อระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลชนิดที่เอ็มอาร์ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะเขียนและอ่านข้อมูล

Effects of Temperature on Flying Height of TMR Recording Head in Hard Disk Drive during Writing and Reading Operations

รัตนสิทธิ์ ใจศีล^{1,2}, รุ่ง ศิวารัตน์¹, อนันต์ เครือทรัพย์ถาวร³, วิชัย เปรมชัยสวัสดิ์¹, จิรณ โพนินักขา¹,
วิชัย ประเสริฐเจริญสุข¹, อภิรัฐ ศิริธราธิวัตร¹ และ อาคม แก้วระวัง^{1*}

Ratanasit Jaisil^{1,2}, Roong Sivaratana², Anan Kruesubthaworn³, Wichai Premchaisavadi¹, Jirun Ponukka¹,
Vichai Prasertchoreonsuk¹, Apirat Siritaratiwat¹ and Arkom Kaewrawang^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

²บริษัท ซันเทค เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จ.นครราชสีมา

³วิทยาการคอมพิวเตอร์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น วิทยาเขตหนองคาย

*Correspondent author: arkom@elec.kku.ac.th

บทคัดย่อ

ปัจจุบันความต้องการฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการเก็บข้อมูลมีจำนวนมากขึ้น ในขณะเดียวกัน คุณภาพฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน เพื่อป้องกันไม่ให้อายุการใช้งานเกิดความเสียหาย ระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลมีผลต่อประสิทธิภาพการบินของหัวบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลชนิดที่เอ็มอาร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะเขียนและอ่านข้อมูล ผลการทดลองพบว่าอุณหภูมิมีผลต่อระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลขณะเขียนและอ่านข้อมูล ซึ่งทำให้อายุการใช้งานเกิดความผิดพลาดได้

Abstract

Currently, the requirement of hard disk drive for storing data is increasing. At the same time, the quality of hard disk drive is also important to prevent damages of data. The flying height of recording head affects on the recording performance. In this paper, an experimental method is used to characterize the effects of temperature on flying height with TMR recording head during writing and reading operations. The results show that the temperature affects on the flying height of recording head during writing and reading operation that can cause data errors.

คำสำคัญ: ระยะการบิน หัวบันทึกข้อมูลชนิดที่เอ็มอาร์ อุณหภูมิ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

Keywords: Flying height, TMR recording head, Temperature, Hard disk drive

1. บทนำ

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard disk drive) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูล เช่น ในคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น เพื่อตอบสนองความต้องการในการเก็บข้อมูลของผู้ใช้งานมีมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ของบิตเพิ่มขึ้น โดยการลดขนาดของบิตให้เล็กลง จึงทำให้ส่วนประกอบต่างๆ ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ รวมถึงหัวบันทึกข้อมูลเล็กลงตามไปด้วย (1) ดังนั้นการพัฒนาประสิทธิภาพของหัวบันทึกข้อมูลให้มีขนาดเล็กลง ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูงนั้นมีความท้าทายเป็นอย่างมาก

เทคโนโลยีหัวบันทึกในปัจจุบันเป็นหัวอ่านชนิดทีเอ็มอาร์ (Tunneling magneto-resistance, TMR) เพื่อป้องกันการกระแทกกันระหว่างหัวบันทึกข้อมูลกับจานแม่เหล็ก ซึ่งอาจจะทำให้หัวบันทึก จานแม่เหล็ก และข้อมูลเกิดความเสียหายได้ (2-4) จึงต้องมีการควบคุมหัวบันทึกข้อมูลให้มีระยะห่างกับจานแม่เหล็ก ซึ่งเรียกว่า ระยะการบิน (Flying height) ให้เหมาะสม นอกจากนี้ระยะการบินยังมีส่วนต่อสัญญาณแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วย ระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (Signal to noise ratio, SNR) และอัตราบิตผิดพลาด (Bit error rate, BER) ดังนั้นในการเขียนและอ่านข้อมูลของหัวบันทึก เทคโนโลยีหนึ่งที่ใช้สำหรับทำให้หัวบันทึกข้อมูลเขียนและอ่านได้อย่างมีประสิทธิภาพและควบคุมระยะการบิน คือ การให้ความร้อนเพื่อควบคุมระยะการบิน (Thermal fly height control, TFC) (5) เป็นการให้ความร้อนจากชุดควบคุมโดยการป้อนกระแสไปที่ขดลวดบริเวณหัวบันทึกข้อมูลให้ขยายตัวเข้าใกล้จานแม่เหล็กจึงทำให้ระยะการบินของหัวบันทึกลดลง

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้มีการจำลองสภาวะการใช้งานจริงของผู้ใช้งานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลชนิดทีเอ็มอาร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะเขียนและอ่านข้อมูล ซึ่ง

เป็นสาเหตุให้ข้อมูลเกิดความเสียหาย ทั้งนี้เพื่อนำไปสู่วิธีการป้องกันและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการจัดเก็บข้อมูล

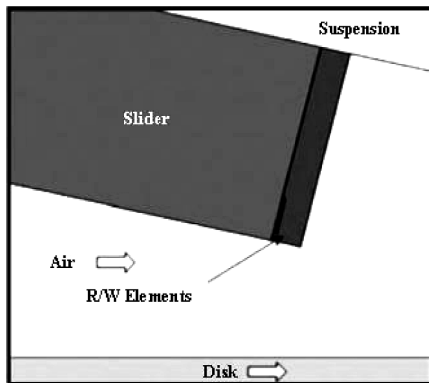
2. วิธีวิจัย

2.1 ทฤษฎีและหลักการ

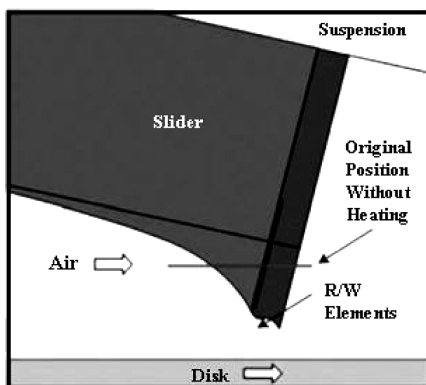
การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อระยะห่างระหว่างจานแม่เหล็กกับหัวบันทึกข้อมูลหรือระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลมีระยะเวลามากกว่า 20 ปีแล้ว (6) และระยะการบินมีผลต่อประสิทธิภาพการบันทึกข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากอุณหภูมิเป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีผลต่อระยะการบิน จึงมีการนำเทคโนโลยีที่ใช้ในการควบคุมระยะห่างระหว่างจานแม่เหล็กกับหัวบันทึกข้อมูลคือการให้ความร้อน มาใช้ควบคุมระยะการบิน

2.1.1 เทคโนโลยีการกำหนดระยะการบิน (Thermal fly height control, TFC)

พารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อการเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และอัตราบิตผิดพลาดคือ ระยะการบินที่น้อยลง แต่เนื่องจากอุณหภูมิขณะกระบวนการอ่านและกระบวนการเขียนของหัวบันทึกข้อมูลมีผลต่อระยะการบินที่กำลังทำงานอยู่ ดังนั้นการควบคุมระยะการบินให้อยู่ในระยะที่เหมาะสมตลอดกระบวนการอ่านและกระบวนการเขียนจึงมีความจำเป็น เทคโนโลยีที่ได้นำมาใช้คือเทคโนโลยีการกำหนดระยะการบิน ซึ่งมีการกำหนดระยะการบินโดยการติดตั้งเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและชุดควบคุมกระแสที่ชุดหัวบันทึกข้อมูล ทำให้สามารถตรวจสอบและควบคุมอุณหภูมิได้ หลักการทำงานก็คือที่หัวบันทึกข้อมูลจะมีตัวทำความร้อนโดยทำหน้าที่เพิ่มความร้อนที่หัวบันทึกข้อมูลทำให้เกิดการขยายตัวหรือยืดตัวเข้าใกล้จานแม่เหล็กระยะการบินจึงลดลงดังรูปที่ 1 ซึ่งแสดงหัวบันทึกข้อมูลก่อนให้ความร้อนและหลังให้ความร้อน (5)



(ก) หัวบันทึกข้อมูลก่อนให้ความร้อน



(ข) หัวบันทึกข้อมูลหลังให้ความร้อน

รูปที่ 1. ระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลก่อนให้ความร้อนและหลังให้ความร้อน

2.1.2 ประสิทธิภาพของระบบสื่อสารดิจิทัล

ค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบสื่อสารดิจิทัลคือ ค่าเอสเอ็นอาร์และอัตราบิดผิดพลาด (7) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

เอสเอ็นอาร์ (SNR)

เอสเอ็นอาร์ เป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบ เช่น ให้ระบบ 2 ระบบมี อัตราบิดผิดพลาดและกำลังในการส่งข้อมูลเท่ากัน ระบบที่มี เอสเอ็นอาร์มากกว่า จะมีประสิทธิภาพมากกว่า ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของการประมวลผลสัญญาณของ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สัญญาณรบกวนที่ใช้ในการคำนวณหา ค่าเอสเอ็นอาร์ประกอบด้วยสัญญาณรบกวนหลายชนิด

รวมกันก็ได้ เช่น สัญญาณรบกวนหัวบันทึกข้อมูลและ สัญญาณรบกวนจานแม่เหล็ก เป็นต้น

อัตราบิดผิดพลาด (BER)

อัตราบิดผิดพลาด เป็นค่าที่ใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบได้เช่นเดียวกับ เอสเอ็นอาร์ ระบบใดที่มีค่าอัตราบิดผิดพลาดน้อยกว่า ก็จะถือว่าระบบนั้นมีประสิทธิภาพมากกว่า โดยทั่วไป อัตราบิดผิดพลาดจะเป็นฟังก์ชันของเอสเอ็นอาร์นั้นคือ ระบบที่ใส่เอสเอ็นอาร์มากขึ้น ทำให้อัตราบิดผิดพลาดที่ลดลง ค่าอัตราบิดผิดพลาดใช้เป็นตัวกำหนดระดับ ความน่าเชื่อถือของระบบในงานต่างๆ เช่น การรับส่ง สัญญาณเสียง จะมีคุณภาพดีก็ต่อเมื่ออัตราบิดผิดพลาด $\leq 10^{-3}$ การรับส่งสัญญาณข้อมูล จะมีคุณภาพดีก็ต่อเมื่อ อัตราบิดผิดพลาด $\leq 10^{-5}$ การรับส่งสัญญาณผ่านสายใยแก้วนำแสง จะมีคุณภาพดีก็ต่อเมื่ออัตราบิดผิดพลาด $\leq 10^{-12}$ และอุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะมีคุณภาพดีก็ต่อเมื่ออัตราบิดผิดพลาด $\leq 10^{-20}$

ตัวอย่างความหมายของอัตราบิดผิดพลาด $\leq 10^{-12}$ คือ ใน 1 ล้านล้านบิตที่ทำการบันทึกข้อมูลลงบน จานแม่เหล็กจะต้องมีบิตที่ผิดพลาดไม่เกิน 1 บิต โดยอัตรา บิดผิดพลาดคำนวณได้จากสูตร

อัตราบิดผิดพลาด = (จำนวนบิตที่ผิดพลาด) / (จำนวนบิตทั้งหมด)

2.2 การสร้างแบบจำลองและกระบวนการทดลอง

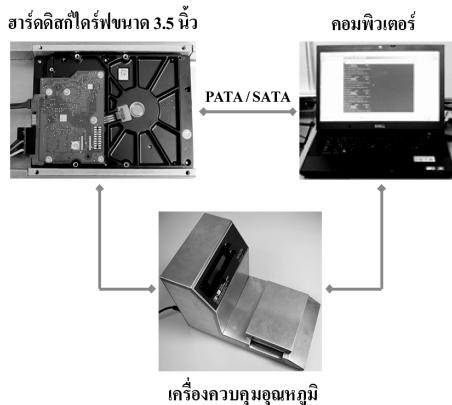
2.2.1 เครื่องมือในกระบวนการทดลอง

1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ POND ENGINEERING รุ่น K49 มีประสิทธิภาพการทำงาน ดังตารางที่ 1

2. เครื่องคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรม ในการติดต่อและสั่งงานฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

3. ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ความจุ 500 GB ขนาด 3.5 นิ้ว หมุนด้วยความเร็ว 7,200 รอบต่อนาที

เครื่องมือในกระบวนการทดลองดังรูปที่ 2 โดยทำการทดสอบกับหัวบันทึกข้อมูลชนิดที่เอ็มอาร์ใน ช่วงของอุณหภูมิที่ศึกษาระหว่าง 5 ถึง 55 องศาเซลเซียส เนื่องจากช่วงของอุณหภูมิที่ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน ถูกจำกัดให้สามารถใช้งานคือ 0 ถึง 60 องศาเซลเซียส (8)



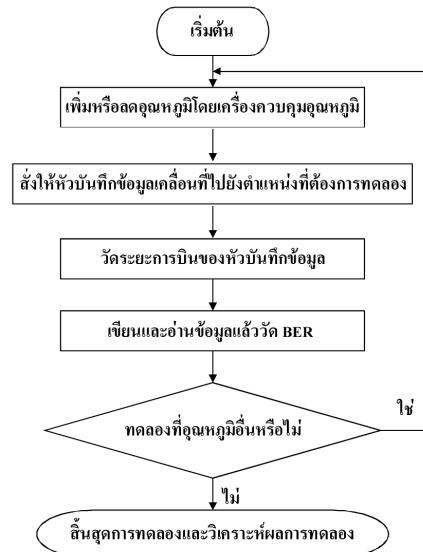
รูปที่ 2. เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 1. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ ยี่ห้อ POND ENGINEERING รุ่น K49

ช่วงอุณหภูมิที่สามารถควบคุม	-5 ถึง 75 องศาเซลเซียส
ความเร็วในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ	20 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง
ขนาดฮาร์ดดิสก์ไครฟ์	3.5 นิ้ว
หน่วยวัดอุณหภูมิ	องศาเซลเซียส

2.2.2 กระบวนการทดลอง

กระบวนการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูลชนิดที่เอ็มอาร์ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขณะเขียนและอ่านข้อมูล ดังแสดงในรูปที่ 3 เริ่มจากการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิ เมื่อได้อุณหภูมิที่ต้องการจึงสั่งให้หวั่นปีกข้อมูลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการทดลองแล้ววัดระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูล จากนั้นเขียนและอ่านข้อมูลลงบนตำแหน่งที่ต้องการทดลอง ขั้นตอนสุดท้ายคือวัดค่าอัตราบิดผิดพลาดเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการบันทึกข้อมูลจึงเป็นอันสิ้นสุดการทดลอง ณ อุณหภูมิที่กำหนด ถ้าต้องการทดลองที่อุณหภูมิอื่นๆ จึงกลับไปเพิ่มหรือลดอุณหภูมิ โดยเครื่องควบคุมอุณหภูมิแล้วทดลองเช่นเดิม

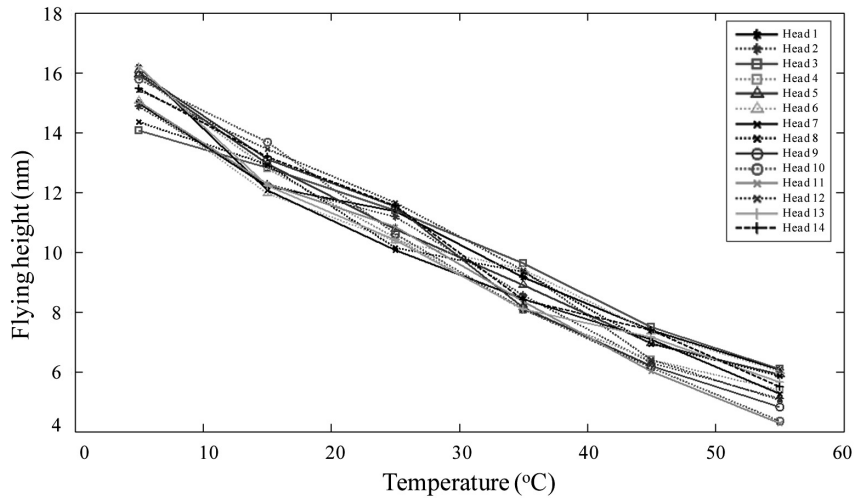


รูปที่ 3. กระบวนการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ต่อระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูลชนิดที่เอ็มอาร์ ในฮาร์ดดิสก์ไครฟ์ขณะเขียนและอ่านข้อมูล

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูลกับอุณหภูมิ

จากผลการทดลองเมื่อศึกษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียสแล้วเพิ่มอุณหภูมิขึ้นทุกๆ 10 องศาเซลเซียส จนถึง 55 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อหวั่นปีกข้อมูลทำงานที่สถานะอุณหภูมิสูง ระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูลจะบินต่ำและในทางกลับกัน เมื่อหวั่นปีกข้อมูลทำงานที่สถานะอุณหภูมิต่ำ ระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูลจะบินสูง เช่น ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส ระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูลอยู่ที่ระดับช่วงประมาณ 4 ถึง 6 นาโนเมตร แต่ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูลอยู่ที่ระดับช่วงประมาณ 14 ถึง 16 นาโนเมตร ดังรูปที่ 4 ดังนั้นอุณหภูมิส่งผลต่อระยะการบินของหวั่นปีกข้อมูลเนื่องจากหวั่นปีกข้อมูลทำจากเซรามิก ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiC}$) (9) จะมีการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งเกิดการขยายตัวเมื่อได้รับความร้อนและหดตัวเมื่อได้รับความเย็น ทำให้ระยะการบินเปลี่ยนแปลง (5) นั่นคือ เมื่อหวั่นปีกข้อมูลทำงานที่สถานะอุณหภูมิสูง หวั่นปีกข้อมูลจะยึดตัว ทำให้ระยะการบินต่ำลงและในทางตรงกันข้าม เมื่อหวั่นปีกข้อมูลทำงานที่สถานะอุณหภูมิต่ำ หวั่นปีกข้อมูลจะหดตัว ทำให้ระยะการบินสูงขึ้น

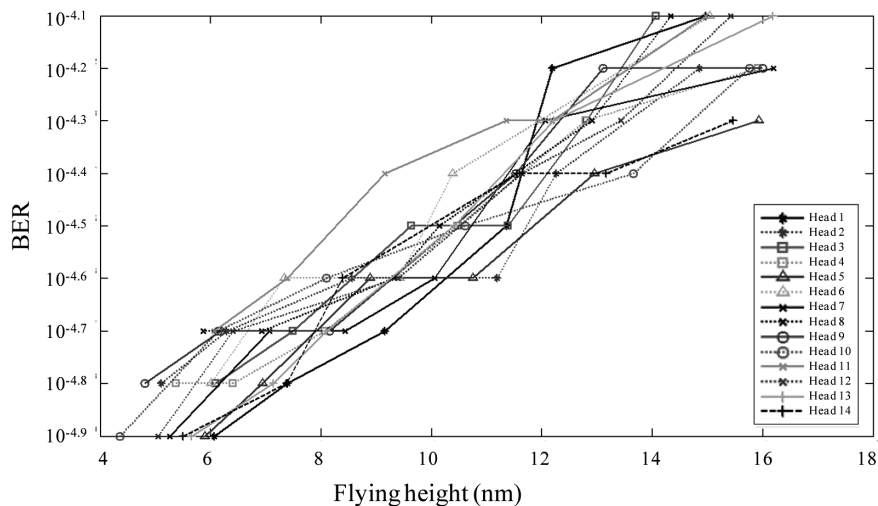


รูปที่ 4. ระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลจำนวน 14 ตัวกับอุณหภูมิช่วง 5 ถึง 55 องศาเซลเซียส

3.2 อัตราบิดผิดพลาดกับระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูล

หลังจากวัดระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลเรียบร้อยแล้ว จึงสั่งให้หัวบันทึกข้อมูลเขียนและอ่านข้อมูล จากนั้นวัดอัตราบิดผิดพลาดทันที เพื่อให้ได้ผลการทดลองที่ถูกต้องมากที่สุด จากผลการทดลองพบว่า หัวบันทึกข้อมูลมีระยะการบินสูงจะมีค่าอัตราบิดผิดพลาดมากกว่าหัวบันทึกข้อมูลที่มีระยะการบินต่ำ เนื่องจากที่ระยะการบินสูงจะมีค่าระยะห่างระหว่างแผ่น

แม่เหล็กกับหัวบันทึกข้อมูลมากขึ้น สนามแม่เหล็กต่อพื้นที่หนึ่งหน่วยและระดับสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจึงลดลง เป็นสาเหตุให้อัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้น (10) เช่น ระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูล 5 นาโนเมตร มีอัตราบิดผิดพลาดอยู่ที่ช่วงประมาณ $10^{-4.7}$ ถึง $10^{-4.9}$ แต่ที่ระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูล 14 นาโนเมตร จะมีอัตราบิดผิดพลาดอยู่ที่ช่วงประมาณ $10^{-4.2}$ ถึง $10^{-4.4}$ ดังแสดงในรูปที่ 5

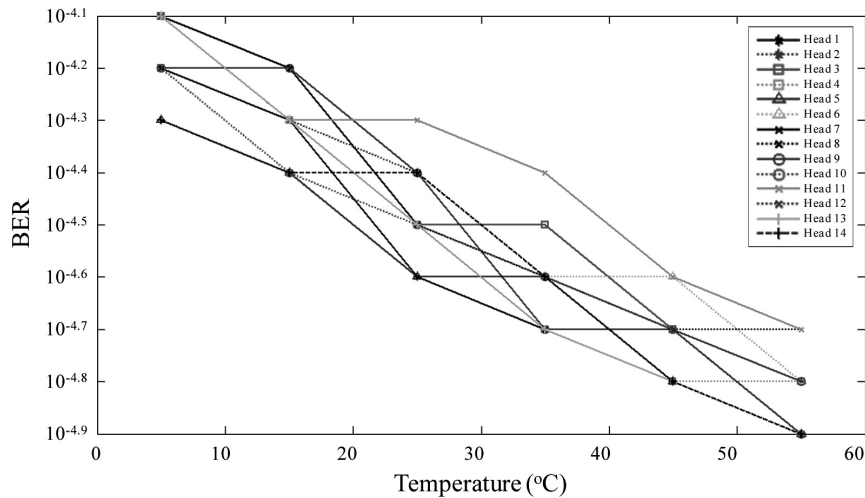


รูปที่ 5. อัตราบิดผิดพลาดกับระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลจำนวน 14 ตัว ช่วง 5 ถึง 55 องศาเซลเซียส

3.3 อัตราบิดผิดพลาดกับอุณหภูมิ

เมื่อวิเคราะห์ค่าอัตราบิดผิดพลาดและอุณหภูมิ จะได้ความสัมพันธ์ดังรูปที่ 6 พบว่า หัวบันทึกข้อมูล เขียนและอ่านข้อมูลที่สภาวะอุณหภูมิต่ำจะเกิดอัตราบิดผิดพลาดมากกว่าการเขียนและอ่านข้อมูลที่สภาวะอุณหภูมิสูง เนื่องจากที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ หัวบันทึก

ข้อมูลจะหดตัว ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับ หัวบันทึกข้อมูลมีค่ามากขึ้น ระยะการบินของหัวบันทึก ข้อมูลจึงบินสูงเป็นสาเหตุให้ค่าอัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้น (11) เช่น ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส มีอัตราบิดผิดพลาด ในช่วง $10^{-4.1}$ ถึง $10^{-4.3}$ แต่ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส มีอัตราบิดผิดพลาดในช่วงประมาณ $10^{-4.7}$ ถึง $10^{-4.9}$



รูปที่ 6. อัตราบิดผิดพลาดกับอุณหภูมิของหัวบันทึกข้อมูลจำนวน 14 ตัว ช่วง 5 ถึง 55 องศาเซลเซียส

4. สรุป

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิ ที่มีต่อระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูลชนิดที่เอ็มอาร์ใน ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขณะเขียนและอ่านข้อมูล ซึ่งมีความจุ 500 GB ขนาด 3.5 นิ้ว หมุนด้วยความเร็ว 7,200 รอบต่อนาที พบว่าอุณหภูมิส่งผลต่อระยะการบินของหัวบันทึกข้อมูล นั่นคือ เมื่อหัวบันทึกข้อมูลทำงานที่สภาวะอุณหภูมิต่ำ หัวบันทึกข้อมูลจะหดตัว ทำให้ระยะห่างระหว่างแผ่น แม่เหล็กกับหัวบันทึกข้อมูลมีค่ามากขึ้น ระยะการบิน ของหัวบันทึกข้อมูลสูง ทำให้ระดับสัญญาณต่อสัญญาณ รบกวนลดลง เป็นสาเหตุให้ค่าอัตราบิดผิดพลาดเพิ่มขึ้น ในทางตรงกันข้าม เมื่อหัวบันทึกข้อมูลทำงานที่สภาวะ อุณหภูมิสูง หัวบันทึกข้อมูลจะขยายตัว ทำให้ระยะห่าง ระหว่างแผ่นแม่เหล็กกับหัวบันทึกข้อมูลมีค่าลดลง ระยะ

การบินของหัวบันทึกข้อมูลต่ำ ทำให้ระดับสัญญาณ ต่อสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น เป็นสาเหตุให้ค่าอัตราบิด ผิดพลาดลดลง ดังนั้นอุณหภูมิส่งผลต่อระยะการบิน ของหัวบันทึกข้อมูลเป็นสาเหตุให้การบันทึกข้อมูลของ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดความผิดพลาด

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด จ.นครราชสีมา, ห้องปฏิบัติการวิจัย ร่วมมหาวิทยาลัยขอนแก่น-ซีเกทและห้องปฏิบัติการวิจัย EMC/EMI ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่สนับสนุนอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ ในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- (1) Siritaratiwat A. Electrostatic discharge effects in recording heads. National Electronics and Computer Technology Center(NECTEC); 2006. Thai.
- (2) Yu SK, Liu B, Zhou WD, Hua W, Gonzaga L. Dynamic Stability Analysis for Surfing Head-Disk Interface. IEEE Trans. Magn., 2009;45(11): 4979-83.
- (3) Juang JY, Kubotera H, Bogy DB. Effects of Track-Seeking Motion on the Flying Attitudes of Ultralow Flying. IEEE Trans. Magn., 2006;42(10): 2522-24.
- (4) Jang GH, Seo CH. Finite-Element Shock Analysis of an Operating Hard Disk Drive Considering the Flexibility of a Spinning Disk-Spindle, a Head-Suspension-Actuator and a Supporting Structure. IEEE Trans. Magn., 2007;43(9): 3738-43.
- (5) Schultz BE. Thermal fly-height control (TFC) technology in Hitachi hard disk drives [Internet]. 2007 [cited 2008 Nov 19]. Available from: [http://www.hitachigst.com/tech/techlib.nsf/techdocs/98EE13311A54CAC886257171005E0F16/\\$file/TFC_whitepaper041807.pdf](http://www.hitachigst.com/tech/techlib.nsf/techdocs/98EE13311A54CAC886257171005E0F16/$file/TFC_whitepaper041807.pdf)
- (6) Strom BD, Lee SC, Tyndall GW, Khurshudov A. Hard Disk Drive Reliability Modeling and Failure Prediction. IEEE Trans. Magn., 2007; 43(9): 3676-84.
- (7) Kovintavewat P. Signal Processing for Digital Data Storage : Basic Read-Write Channels. National Electronics and Computer Technology Center(NECTEC); 2007. Thai.
- (8) Seagate Data Sheet [Internet]. 20011 [cited 2011 Nov]. Available from: <http://www.seagate.com/files/staticfiles/docs/pdf/datasheet/disc/barracuda-ds1737-1-1111us.pdf>
- (9) Yuan ZM, Ong CL, Leong SH, Liu B, Liu J, Yoshida S. Slider Optical Constant Distribution, n and k Correlation, and FH Measurement Accuracy. IEEE Trans. Magn., 2008;44(11): 3687-90.
- (10) Shiramatsu T, Kurita M, Miyake K, Suk M, Ohki S, Tanaka H, Saegusa S. Drive Integration of Active Flying-Height Control Slider with Micro Thermal Actuator. IEEE Trans. Magn., 2006;42(10): 2513-15.
- (11) Lee J, Yun J. Temperature Control Method of Hard Disk Drives with TuMR Head. Intermag, 2006. P.650.