รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

เรื่อง

การวิเคราะห์คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

Analysis of Transition Characteristics of Perpendicular Heat Assisted Magnetic Recording Systems

โดย

อดิศร แก้วภักดี

ได้รับสนับสนุนงบประมาณรายได้ จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

งบประมาณ 2555 ปี พ.ศ. ที่วิจัยสำเร็จ 2556

ภายใต้โครงการวิจัยเชิงวิชาการ 2555

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ไดรับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม เรื่องการวิเคราะห์คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (Analysis of Transition Characteristics of Perpendicular Heat-Assisted Magnetic Recording Systems) ได้รับทุนสาขาทุนวิจัยสาขาวิชาไฟฟ้าสื่อสาร (การประมวลผลสัญญาณการจัดเก็บข้อมูลดิจิทัล) ปีงบประมาณ 2555 จากมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จได้ด้วยความร่วมมือจากคณะวิจัย ทั้งภายในและภายนอกสถาบัน

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ที่ได้ให้ทุนอุดหนุนโครงการวิจัยเชิงวิชาการนี้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมถึงทรัพยากรในการช่วยให้งานวิจัยสำเร็จ

อดิศร แก้วภักดี

บทคัดย่อ

ปัจจุบันวิธีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งมีความจุของข้อมูลต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้นเข้าใกล้ขีดจำกัด ซูเปอร์พาราแมกเนติกในทางแม่เหล็ก เทคโนโลยีใหม่คือระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (HAMR) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มความจุต่อหน่วยพื้นที่ให้สูงขึ้น และสามารถข้ามผ่านข้อจำกัดดังกล่าวได้ ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการปรับค่าตัวแปรต่างๆ อุณหภูมิสูงสุด ช่องว่างของหัวเขียน ระยะของหัวเขียนกับแผ่นบันทึก เป็นต้น และศึกษาผลกระทบเมื่อค่าความผันแปรของอุณหภูมิสูงสุด ความผันแปรของตำแหน่งของหัวเขียนเกิดขึ้นกับระบบ เพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพในการทำงานตัวแปรต่างๆ ของระบบจะถูกทำการหาจุดใช้งานที่เหมาะสมที่สุด เพื่อให้ระบบสามารถจำลองสัญญาณอ่านกลับได้ จากการคำนวณตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ ซึ่งจะได้สัญญาณผลตอบสนองรวมของระบบ HAMR

Abstract

Currently, a conventional magnetic recording system is approaching its storage capacity known as a superparamagnetic limit. Heat-assisted magnetic recording (HAMR) is one of new technologies that can achieve an areal density beyond this limit. In this paper, we study the transition characteristics of perpendicular HAMR systems by varying some concerned parameters (e.g., peak temperature, write head gap, deep gap field, etc.) to optimize the performance of the HAMR system. Results show that the write head gap and the deep gap field are crucial parameters that are needed to be minimized so as to achieve high performance. In addition, this paper studies the effect of peak temperature and cross-track variations on the transition characteristics of a perpendicular HAMR system. Numerical results based on thermal Williams-Comstock and micro-track models show that these two variations cause the transition center and the transition parameter to vary, thus affecting the transition response of the HAMR system.

สารบัญ

หน้า

กิตติกรรมประกาศ I
บทคัดย่อ II
Abstract III
สารบัญ IV
สารบัญตาราง VI
สารบัญรูป VII

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 หลักการและเหตุผล 1
1.2 วัตถุประสงค์ 2
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย 2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
1.5 ระยะเวลาและสถานที่ในการดำเนินการ 3
1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย 3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 5
2.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบแนวตั้ง 6
2.2 กระบวนการเขียนแบบ HAMR 6
2.3 แบบจำลองวิลลเลียม-คอมสต็อกเชิงความร้อน 7
2.3.1 การกระจายความร้อน 7
2.3.2 สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนแบบคาร์ลควิสท์ 9
2.3.3 ฮิสเทอรีซิสลูป 10
2.3.4 ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ 12
2.3.5 ระบบการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวนอนที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 17
2.3.6 ระบบการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 19
2.4. แบบจำลองไมโครแทร็ก 21
2.5. คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 22

บทที่ 3 แบบจำลองระบบ 23
3.1 แบบจำลองระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 23
3.2 บล็อกไดอะแกรมระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 25

บทที่ 4 การทดลองและผล 26
4.1 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 26
4.1.1 การทดลอง และบันทึกผลการทดลอง 27
4.1.2 สรุปและวิเคราะห์ผล 29
4.2 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยกับการความผันแปรของอุณหภูมิสูงสุดและตำแหน่งของหัวเขียนในแนวข้ามแทร็ก 30
4.2.1 ความผันแปรของอุณหภูมิสูงสุด 30
4.2.2 ความผันแปรของตำแหน่งของหัวเขียน 32

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง 36
5.1 สรุปและวิเคราะห์ผล 36

บทความที่ได้รับการเผยแพร่ 37
เอกสารอ้างอิง 38
ประวัติผู้วิจัย 39

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย 3
ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้น..... 27
ตารางที่ 4.2 การกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้น..... 30
ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะที่มีเปอร์เซ็นต์ความผันของอุณหภูมิสูงสุดแปรแตกต่างกัน..... 32
ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะที่มีเปอร์เซ็นต์ความผันแปรของหัวเขียนแนวข้ามแทร็กแตกต่างกัน 35

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบอุดมคติ 6
รูปที่ 2.2 การเขียนข้อมูลของระบบการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 7
รูปที่ 2.3 การกระจายความร้อนในทิศทางตามแนวแทร็กและตามแนวตรงข้ามแทร็ก 8
รูปที่ 2.4 สนามแม่เหล็กที่เกิดของหัวเขียนแบบคาร์ลค์วิสท์ในแนวนอน (x) 9
รูปที่ 2.5 สนามแม่เหล็กที่เกิดของหัวเขียนแบบคาร์ลค์วิสท์ในแนวตั้ง (y) 10
รูปที่ 2.6 (ก) ลูปฮิสเทอรีซิสหรือลูป *M-H* ณ อุณหภูมิปกติ (หรือ Loop 1) และอุณหภูมิสูง (หรือ Loop 2), และ (ข) ลูป *M-h* หรือลูป *M-H* ที่ถูกนอร์มอลไลซ์ด้วยค่าสัมบูรณ์ $|H_c|$ ทำให้ได้เป็นสนามประสิทธิผลโดยสมมุติว่าค่า *M* และ *h* แปรผันตามอุณหภูมิ 11
รูปที่ 2.7 กระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง และตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ x_0 13
รูปที่ 2.8 การบันทึกแบบแนวนอนสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนและระยะของพารามิเตอร์ 17
รูปที่ 2.9 การบันทึกแบบแนวตั้งสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนและระยะของพารามิเตอร์ 18
รูปที่ 2.10 แบบจำลองไมโครแทร็กของช่องสัญญาณแบบ HAMR 22
รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ซ้าย) ระบบเดิม (conventional system) ขวา) ระบบที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (HAMR system) 23
รูปที่ 3.2 แบบจำลองไมโครแทร็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 24
รูปที่ 3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณในอุดมคติของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย 25
รูปที่ 4.1 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะแนวข้ามแทร็กไปทางด้านซ้ายของ gap center (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ 27
รูปที่ 4.2 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะแนวข้ามแทร็กไปทางด้านขวาของ gap center (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ 28
รูปที่ 4.3 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะกับค่าอุณหภูมิสูงสุด (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ 28
รูปที่ 4.4 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามความผันแปรของค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ป้อน 10 % (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ 31
รูปที่ 4.5 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามความผันแปรของค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ป้อน 10 % (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ ณ แทร็กที่ 1, 4 และ 8 31

รูปที่ 4.6 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามความผันแปรของค่าตำแหน่งของหัวเขียน 10 % (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ 33
รูปที่ 4.7 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามความผันแปรของค่าตำแหน่งของหัวเขียน 10 % (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ ณ แทร็กที่ 1, 4 และ 8 34

บทที่ 1
บทนำ

ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความจุข้อมูลต่อหน่วยพื้นที่เพิ่มขึ้น หมายความว่าพื้นที่เท่าเดิมแต่ขนาดของบิตข้อมูลเล็กลงจนเข้าใกล้ข้อจำกัด ปัจจุบันฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ผลิตใช้ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (Perpendicular magnetic recording: PMR) ศึกษาวิธีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย หรือ (Perpendicular HAMR) ที่คาดว่าจะนำมาใช้ในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใหม่ในอนาคต เพื่อเพิ่มความจุข้อมูลต่อหน่วยพื้นที่ แต่ก็ขึ้นอยู่กับความสำเร็จในส่วนของการศึกษาค้นคว้าแนวทางที่จะให้สามารถนำไปใช้งานได้จริง ซึ่งงานวิจัยฉบับนี้จะได้ทำการศึกษาและจำลองระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย ในบทนี้จะได้กล่าวถึงที่มาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตของการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ แผนการดำเนินงานวิจัย

1.1 หลักการและเหตุผล

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (hard disk drive) เป็นเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่เป็นที่นิยมอย่างมากในการจัดเก็บข้อมูลแบบดิจิทัล ซึ่งในปัจจุบันได้นำฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มากมาย ที่สำคัญประเทศไทยเป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของบริษัทชั้นนำ ดังนั้นงานวิจัยที่เกี่ยวของกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จึงส่งผลกระทบต่อการพัฒนาอุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ภายในประเทศเป็นอย่างมาก ระบบการบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบันได้ใช้เทคโนโลยีการบันทึกที่เรียกว่า การบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording) การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density) ของข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทำให้ระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งกำลังเข้าใกล้ขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamegnetic limit) [1] โดยขีดจำกัดนี้จะทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่สามารถจัดเก็บข้อมูลได้อีก นักวิจัยได้คิดค้นหาเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และข้ามขีดจำกัดดังกล่าว ซึ่งเทคโนโลยีการบันทึกเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (HAMR: heat-assisted magnetic recording) [2] เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีใหม่ ซึ่งสามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้มากกว่า 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว และสามารถข้ามผ่านขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติกได้ สำหรับการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบ HAMR จะทำการบันทึกข้อมูลโดยอาศัยความร้อน เพื่อช่วยลดสภาพลบล้างแม่เหล็ก H_c ของสื่อบันทึกลงที่มีค่าสูง ให้สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนสามารถเปลี่ยนทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็ก M_r ของสื่อบันทึกได้

เมื่อระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กที่ต้องใช้ความร้อนในกระบวนการเขียนข้อมูลอย่างต่อเนื่อง จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาทางด้านทฤษฎี วิธีการทำงานผ่านแบบจำลอง ก่อนที่จะนำระบบไปใช้งานจริง จะได้กล่าวถึงแบบจำลองวิลเลียม-คอมสต็อกเชิงความร้อน [2] การจำลองสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแบบแนวตั้ง [3] การจำลองไมโครแทร็ก [2] การจำลองกระบวนการเขียน-อ่านข้อมูลผ่านช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย perpendicular heat assisted magnetic recording) หรือเรียกสั้นๆ ว่า “perpendicular HAMR” ผลตอบสนองของสัญญาณการเปลี่ยนสถานะ การประมวลผลสัญญาณ การสร้างแบบจำลองระบบเพื่อศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยสถานะที่เกิดขึ้นจึงเป็นสิ่งจำเป็น การได้มาซึ่งคุณลักษณะของผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะ (transition response) ในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยจะนำไปสู่การสร้างสัญญาณอ่านกลับ (readback signal) ของระบบ เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการวิเคราะห์ผลกระทบที่เกิดขึ้นเมื่อพารามิเตอร์ต่างๆ ในระบบ อาทิเช่น อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature) สภาพลบล้างแม่เหล็ก (coercivity: H_c) สภาพความเป็นแม่เหล็ก (magnetization: M_r) ความกว้างของหัวเขียน เป็นต้น เกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วจะส่งผลกระทบกับคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะ อาทิเช่น ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (transition center: x_0) และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ (transition parameter: a) หาค่าความกว้าง ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของสัญญาณเปลี่ยนสถานะ (PW50) ที่ได้ สุดท้ายแล้วจะต้องแสดงค่าที่เหมาะสมของพารามิเตอร์ เพื่อทำให้การนำไปประยุกต์ใช้งานจริงเกิดข้อผิดพลาดให้น้อยที่สุด

1.2 วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะในระบบ หาตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและพารามิเตอร์การเปลี่ยสถานะ

2. เพื่อหาค่าความกว้างของสัญญาณ (PW50) ผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะเมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เปลี่ยนแปลง

3. เพื่อนำเสนอค่าปรับแต่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมเมื่อนำไปใช้งานจริง

4. เพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะของระบบ Perpendicular HAMR เปรียบเทียบกับแบบเดิม

5. เพื่อนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมวิชาการระดับชาติหรือระดับนานาชาติ

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. ศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นในระบบการบันทึกแบบ Perpendicular HAMR

2. ศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบ Perpendicular HAMR เมื่อพารามิเตอร์ต่างๆ เปลี่ยนแปลง อาทิเช่น อุณหภูมิสูงสุด (peak temperature), สภาพลบล้างแม่เหล็ก (coercivity: H_c), สภาพความเป็นแม่เหล็ก (magnetization: M_r) เป็นต้น

3. หาค่าความกว้างของสัญญาณผลตอบสนอง (PW50) เมื่อค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เปลี่ยนแปลง

4. นำเสนอสมรรถนะของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบ Perpendicular HAMR กับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบเดิม (conventional systems) ทำไมระบบการบันทึกแบบ HAMR จึงให้ค่าความจุต่อหน่วยพื้นที่ที่สูงกว่าระบบการบันทึกแบบเดิม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อัลกอริทึมที่ใช้สร้างสัญญาณอ่านกลับ ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

2. ได้แบบจำลองช่องสัญญาณการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

3. ได้บทความวิจัยจำนวน 1 บทความ เพื่อนำเสนอในงานประชุมวิชาการระดับชาติหรือระดับนานาชาติ

4. นำงานวิจัยที่คิดค้นมาสอนนักศึกษาโปรแกรมวิศวกรรมโทรคมนาคม ในรายวิชา 6550215 หัวข้อพิเศษทางวิศวกรรมโทรคมนาคม ซึ่งเป็นหัวข้อที่เป็นที่น่าสนใจ

1.5 ระยะเวลาและสถานที่ในการดำเนินการ

ระยะเวลา 12 เดือน (นับตั้งแต่วันที่ได้รับอนุมัติโครงการ)

ศูนย์วิจัยเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล อาคารวิศวกรรมและเทคโนโลยี

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย

กิจกรรม	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. ศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณแบบแนวตั้ง	←	→										
2. ศึกษากระบวนการเขียนแบบ HAMR		←	→									

กิจกรรม	เดือนที่											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
3. ศึกษาแบบจำลองวิลลเลียม-คอมสต็อกเชิงความร้อน				↔	↔							
4. ศึกษาแบบจำลองไมโครแทร็ก					↔	↔	↔					
5. ศึกษาคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบ perpendicular HAMR							↔	↔				
6. เขียนโปรแกรมแบบจำลองระบบ perpendicular HAMR		↔	↔	↔	↔	↔	↔					
7. การทดลอง และบันทึกผลการทดลอง								↔	↔	↔		
8. นำผลงานไปใช้ในการเรียนการสอนในห้องเรียน											↔	↔
9. เขียนร่างรายงานวิจัย												↔
10. ทำรายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์												↔

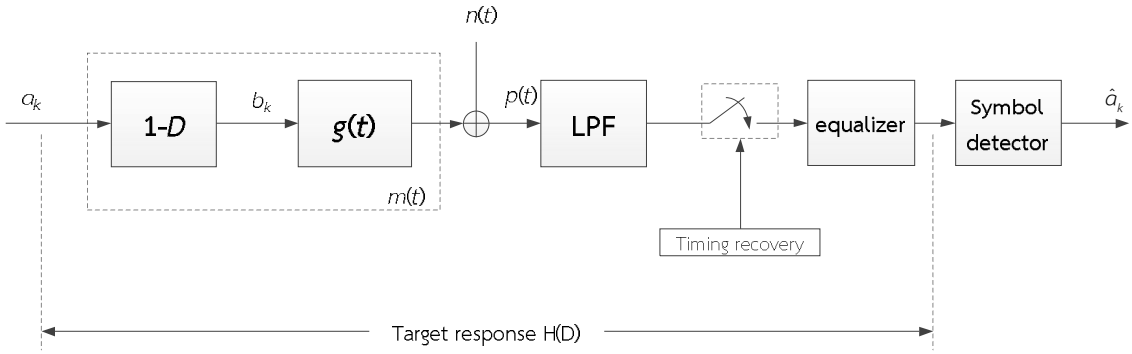
↔ การดำเนินงานตามแผน

▭ การดำเนินงานจริง

บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

มีนักวิจัยจำนวนมากที่พยายามศึกษาค้นหาวิธีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใหม่ ด้วยเหตุผลเดียวคือต้องการเพิ่มความจุเชิงพื้นที่ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถข้ามขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติก [1] อาทิเช่น เทคโนโลยี BPMR (bit-patterned magnetic recording) [11] เทคโนโลยี TDMR (two-dimensional magnetic recording) [12] และที่สนใจคือ เทคโนโลยี HAMR (heat-assisted magnetic recording) [13] ด้วยเหตุผลที่ว่าเป็นเทคโนโลยีที่กำลังเป็นที่สนใจของบริษัทผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั่วโลก คาดว่าจะเป็นเทคโนโลยีแรกที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง โดยเริ่มแรกเทคโนโลยี HAMR ถูกจำลองขึ้นร่วมกับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวนอนก่อน (longitudinal HAMR system) [2] โดย T. Rausch et al., ซึ่งพัฒนามาจากแบบจำลองของวิลเลียม-คอมสต็อก [4, 6] ที่ได้ทำการหาค่าประมาณระยะการเปลี่ยนสถานะ (transition length) ในกระบวนการเขียนของการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวนอน เมื่อมีความร้อนเข้ามาช่วยในกระบวนการเขียนเพื่อที่จะทำการลดค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก H_C ลง T. Rausch et al., จึงได้สร้างแบบจำลองขึ้นโดยเพิ่มเติมในส่วนของการให้ความร้อนกับสื่อบันทึก ทำการทดลองหาระยะการเปลี่ยนสถานะกับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวนอน ทั้งที่ได้จากการทดลองจริง และผลที่ได้จากการคำนวณ จะต้องปรับแต่งเพื่อให้ได้ค่าระยะการเปลี่ยนสถานะน้อยๆ อาทิเช่น พารามิเตอร์ตำแหน่งของความร้อนที่ป้อนให้กับสื่อบันทึก (thermal position) กระแสที่ใช้ในการเขียนข้อมูล (write current) พลังงานของเลเซอร์ (laser power) ผลก็คือมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถลดระยะการเปลี่ยนสถานะที่ได้จากการบันทึกข้อมูล

ต่อมา M. Fatih Erden et al., [7] ได้ศึกษาการเปลี่ยนสถานะในแนวข้ามแทร็ก และค่าพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ (a-parameter) โดยแสดงลักษณะของโปรไฟล์ที่เกิดขึ้น ด้วยวิธีการจำลองไมโครแทร็ก (micro-track model) [6] หาค่าการเปลี่ยนสถานะเอกเทศที่เป็นผลกระทบจากความร้อน จากการศึกษาของ R. Radhakrishnan et al., [8] มีความละเอียดและแม่นยำมากขึ้นโดยเป็นการศึกษาคุณลักษณะผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะ ที่ใช้แบบจำลองวิลเลียม-คอมสต็อกทางความร้อน ร่วมกับแบบจำลองไมโครแทร็ก ผลที่ได้แสดงค่าพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ (transition parameter: a) ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนสถานะตามแนวแทร็ก (transition center: x_0) ทั้งสองตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลงไปตามตำแหน่งที่ให้ความร้อน และแสดงความกว้างของสัญญาณผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะที่ครึ่งหนึ่ง (PW50) ที่เปลี่ยนแปลงตามค่าความร้อนสูงสุดที่ป้อน ไปตามแนวแทร็ก (along track) โดยแสดงให้เห็นทั้งระบบการบันทึก HAMR แบบแนว และระบบการบันทึก HAMR แบบแนวตั้ง สุดท้ายได้แสดงสมรรถนะของระบบอัตราบิตผิดพลาด (bit error rate: BER) ของ MTR



รูปที่ 2.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบอุดมคติ

โค้ด มีหลายตัวแปรที่ยังไม่ได้มีการศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดกับการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งจะได้ทำการศึกษาและนำเสนอต่อไป

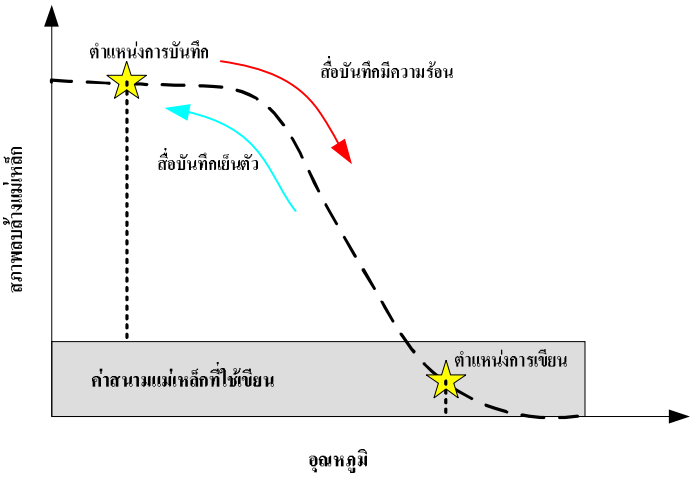
2.1 แบบจำลองช่องสัญญาณแบบแนวตั้ง

เทคโนโลยีปัจจุบันเป็นการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular magnetic recording) ที่ทำให้ความหนาแน่นเชิงพื้นที่ (areal density) ของข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สูงขึ้นพบว่าฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความจุสูงขึ้นจะทำให้เข้าใกล้ขีดจำกัดซูเปอร์พาราแมกเนติก (superparamagnetic limit) [1] ซึ่งในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งจะมีความหนาแน่นเชิงพื้นที่จำกัดอยู่ที่ประมาณ 600 Gbits/in^2 ถ้าเกินจากนี้ไปสเถียรภาพของการจัดเก็บข้อมูลของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยิ่งน้อยลง จะเกิดปรากฏการ์ซูเปอร์พาราแมกเนติกได้ นักวิจัยได้คิดค้นหาวิธีที่จะเพิ่มความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และข้ามขีดจำกัดดังกล่าว ซึ่งเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (heat-assisted magnetic recording: HAMR) [2] เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีใหม่ ซึ่งสามารถเพิ่มความหนาแน่นเชิงพื้นที่ได้มากกว่า 1 Tbits/in^2

เมื่อนำเทคโนโลยี HAMR มาใช้ร่วมกับระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง หรือเรียกเป็นชื่อเดียวกันคือ ระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (perpendicular HAMR) จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาแบบจำลองช่องสัญญาณของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง

2.2 กระบวนการเขียนแบบ HAMR

ในกระบวนการเขียนข้อมูลของระบบการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยสามารถอธิบายได้หลักๆ ดังนี้ จากรูปที่ 2.2 เป็นความสัมพันธ์ของสองตัวแปรในระบบการบันทึกแม่เหล็ก ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก (coercivity) เป็นคุณสมบัติของสื่อบันทึก (medium) กับอุณหภูมิที่ป้อนเข้าไปในสื่อบันทึกดังที่ได้กล่าวมาแล้ว การเพิ่มความจุต่อหน่วยพื้นที่โดยหลักคือการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์



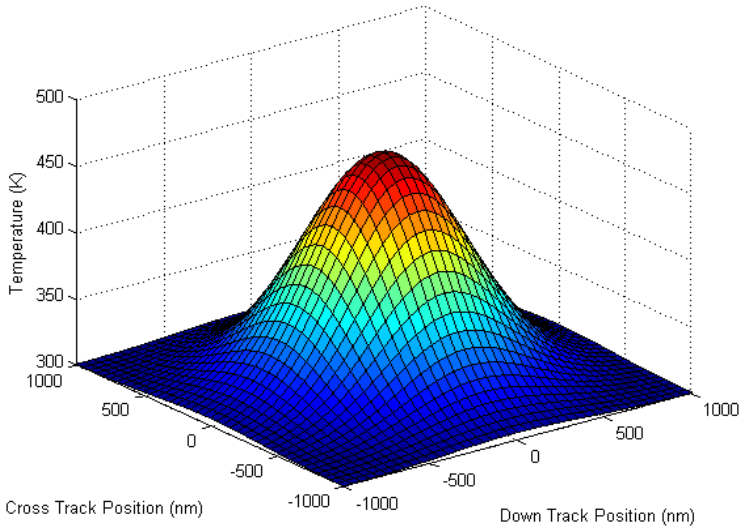
รูปที่ 2.2 การเขียนข้อมูลของระบบการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

แอนไอโซทรอปีแบบแกนเดี่ยว (uniaxial anisotropy coefficient) K_u จะทำให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กของสื่อบันทึกเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เป็นการยากที่จะเขียนข้อมูลหรือการเปลี่ยนทิศทางของสภาพความเป็นแม่เหล็ก จึงได้นำความร้อนเข้ามาช่วยเพื่อที่จะทำให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กลดลง ให้สามารถเขียนข้อมูลหรือเปลี่ยนทิศทางสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ง่าย ในรูปที่ 2.2 ปกติสภาพลบล้างแม่เหล็กของสื่อบันทึกในระบบการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยจะมีค่าสูง เมื่อให้ความร้อนเข้าไปยังสื่อบันทึก ณ ตำแหน่งที่ต้องการเขียนข้อมูล จะทำให้ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กลดลง จนมาถึงตำแหน่งที่สามารถเปลี่ยนทิศทางสภาพความเป็นแม่เหล็กได้ ด้วยค่าสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนที่ตำแหน่งของการเขียน หลังจากนั้นสื่อบันทึกจะเย็นตัวอย่างรวดเร็วกลับเข้าสู่ตำแหน่งของการบันทึกข้อมูล ที่มีค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กสูง ช่วยคงเสถียรภาพขความเป็นแม่เหล็กให้ได้นาน

2.3 แบบจำลองวิลลเลียม-คอมสต็อกเชิงความร้อน

2.3.1 การกระจายความร้อน

จากทฤษฎีของวิลเลียม-คอมสต็อก เป็นการพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของสื่อบันทึกในทิศทางตามแทร็ก โดยละเว้นการพิจารณาในทิศทางของแทร็กตรงข้าม แล้วทำการประมาณค่าพารามิเตอร์ของการบันทึกในแบบหนึ่งมิติ สมมติฐานแบบเดิมจะใช้ได้เมื่อความกว้างของหัวเขียนในทิศทางของแทร็กตรงข้ามมีความกว้างกว่าระยะช่องว่างของหัวเขียน (พิจารณาการบันทึกแบบแนวนอน) ในระบบการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย การแพร่ของค่าสภาพลบล้างความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกจะเป็นแบบเกาส์เซียน เพราะเกิดจากการให้ความร้อนด้วยเลเซอร์ เมื่อแผ่นบันทึกไม่มีการเคลื่อนที่ อุณหภูมิในแผ่นบันทึก จะอธิบายได้ด้วยการกระจายแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ดังสมการที่ (2.1)



รูปที่ 2.3 การกระจายความร้อนในทิศทางตามแนวแทร็กและตามแนวตรงข้ามแทร็ก

$$T(x) = T_{peak} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} + 300^{\circ}K \tag{2.1}$$

เมื่อ T_{peak} คืออุณหภูมิสูงสุดในสื่อบันทึก, r คือระยะจากจุดศูนย์กลางของการกระจายความร้อน และ σ คือความกว้างที่ตำแหน่งกึ่งกลางของจุดที่อุณหภูมิสูงสุด (full width half max: FWHM) ในที่นี้กำหนดให้เท่ากับ FWHM = 2.35 [1] จุดศูนย์กลางของการกระจายความร้อนในระบบพิกัดคาร์ทิเซียน r^2 แทนด้วย $x^2 + z^2$ เมื่อ x และ z คือทิศทางตามแนวแทร็ก และทิศทางตรงข้ามแทร็กตามลำดับ

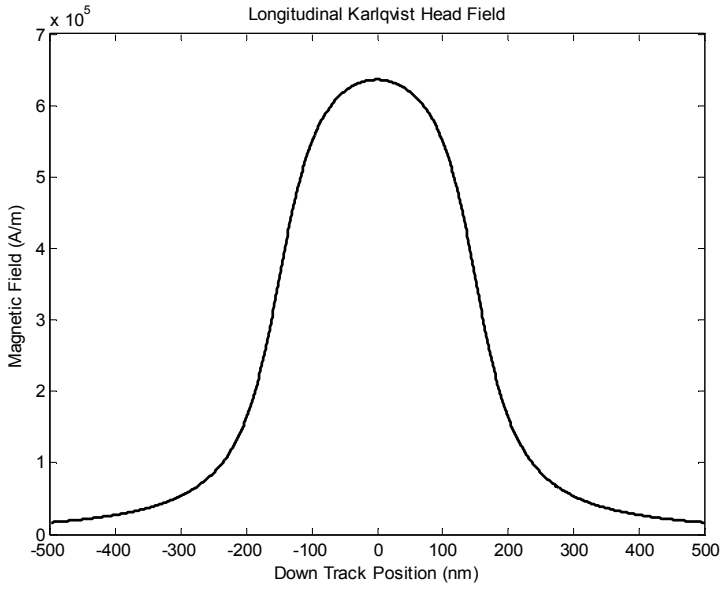
$$T(x) = T_{peak} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} + 300^{\circ}K \tag{2.2}$$

สมการข้างต้นแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 2.3 กำหนดให้ σ = 382 และ T_{peak} = 170° K

โดยยังคงแบบจำลองของวิลเลียม-คอมสต็อกไว้คือผลที่เกิดจากอุณหภูมิในแนวของแทร็กตรงข้ามจะไม่พิจารณา ในแบบสองมิติการกระจายของอุณหภูมิจะประมาณได้จากสมการด้านล่างนี้

$$T(x) = T_{calc} e^{-\frac{(z-c)^2}{2\sigma^2}} + 300^{\circ}K \tag{2.3}$$

c คือตำแหน่งตามแนวแทร็กของจุดศูนย์กลางการกระจายอุณหภูมิจะสัมพันธ์กับพิกัดนั้นๆ และ T_{calc} คือค่าอุณหภูมิในระหว่างที่ทำการเขียน ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงกับค่าอุณหภูมิสุงสุดด้วยสมการที่ (2.4) ให้



รูปที่ 2.4 สนามแม่เหล็กที่เกิดของหัวเขียนแบบคาร์ล์ควิสท์ในแนวนอน (*x*)

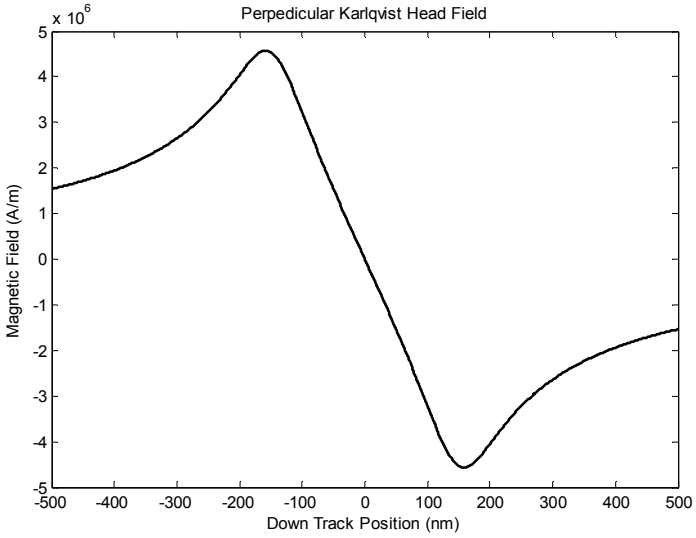
z_0 เป็นตำแหน่งในทิศทางตรงข้ามแทร็ก (เมื่อ $x_0 = 0$ นาโนเมตร) จะได้ค่าอุณหภูมิเป็น T_{calc} การเลือกค่า z_0 ที่เหมาะสมอาจจะเป็นการหามาจากการค่าอุณหภูมิเฉลี่ยที่ได้จากหัวอ่านแล้วใช้สมการที่ (2.4) คำนวณ z_0 ทั้งหมดนี้จะละเว้นการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในทิศทางตรงข้ามแทร็ก เพราะฉะนั้นข้อมูลที่ถูกเขียนในแต่ละแทร็กจะถูกเขียนที่อุณหภูมิที่ T_{calc} สัญญาณอ่านกลับที่ได้จากหัวอ่านวิเคราะห์ด้วยรูปแบบจำลองของไมโครแทร็ก (microtrack model) T_{calc} เป็นอุณหภูมิของแต่ละไมโครแทร็กที่ตำแหน่งตรงกลาง z_0

$$T_{calc} = T_{peak} e^{-\frac{z_0^2}{2\sigma^2}} \tag{2.4}$$

2.3.2 สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนแบบคาร์ลควิสท์

แบบจำลองทางความร้อนเป็นการพัฒนามาจากการหาอนุพันธ์ของวิลเลียม-คอมสต็อก และประยุกต์มาให้ใช้ได้กับการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย ผลที่ได้จากการหาอนุพันธ์ดังนี้ เป็นการประมาณค่าสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนแบบคาร์ลควิสท์ในระนาบแนวนอน (*x*) และในแนวตั้ง (*y*) ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนแสดงด้วยสมการที่ (2.5) และ (2.6) ดังนี้

$$H_x(x,y) = \frac{H_0}{\pi}\left[\tan^{-1}\left(\frac{x+g/2}{y}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{x-g/2}{y}\right)\right] \tag{2.5}$$



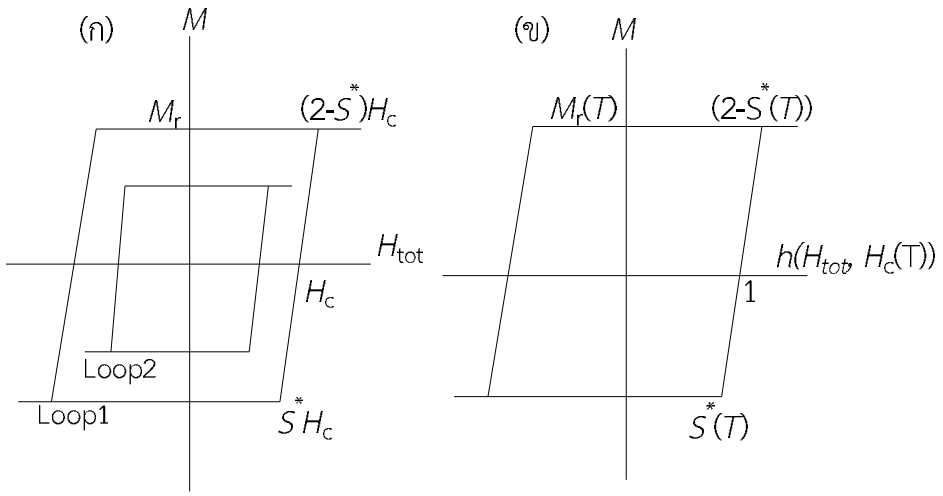
รูปที่ 2.5 สนามแม่เหล็กที่เกิดของหัวเขียนแบบคาร์ลควิสท์ในแนวตั้ง (*y*)

$$H_y(x,y) = -\frac{H_0}{2\pi}\ln\frac{(x+g/2)^2+y^2}{(x-g/2)^2+y^2} \tag{2.6}$$

สมการที่ (2.5) และ (2.6) เป็นสมการที่ใช้ประมาณค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนแบบคาร์ลควิสท์ ในแนวนอน และในแนวตั้ง ตามลำดับ เมื่อ H_0 คือค่าสนามแม่เหล็กในช่องว่างของหัวเขียน, g คือความกว้างของช่องว่างของหัวเขียน, x คือระยะในแนวนอน และ y คือระยะในแนวตั้ง จากสมการที่ (2.5) และ (2.6) ในระบบการบันทึกแม่เหล็กในแนวนอนสื่อบันทึกที่จะทำการเขียนมีการเปลี่ยนแปลงทิศทางสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ไวต่อค่าสนามแม่เหล็กที่จ่ายเข้าไปในแนวนอน ซึ่งในรูปที่ 2.4 เป็นค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นแบบคาร์ลควิสท์ในแนวนอน กำหนดให้ H_0 = 800 kA/m, g = 300 nm, และ y = 50 nm เพราะฉะนั้นในการพิจารณาค่าสนามที่ใช้ในการเขียนลงสื่อบันทึกจึงใช้สนามที่เกิดจากระนาบในแนวนอน

2.3.3 ฮิสเทอรีซิสลูป

แนวความคิดเกี่ยวกับฮีสเทอรีซิสลูปแสดงในรูปที่ 2.6 แบ่งออกเป็นสองแบบ โดยในรูปที่ 2.6 (ก) ฮีสเทอรีซิสลูปที่ 2 คือลูปที่เกิดจากการให้ความร้อนเข้าไปมากกว่าลูปที่ 1 ซึ่งลูปที่ 1 เป็นลูปที่ไม่ได้ให้ความร้อนหรือเป็นลูปปกติ เมื่อสื่อบันทึกได้ถูกให้ความร้อนเข้าไป คุณสมบัติของสารแม่เหล็กที่ตำแหน่งต่างๆ บนแผ่นบันทึก อธิบายได้ด้วยฮีสเทอรีซิสลูปแบบต่างๆ อาทิเช่น ที่ตำแหน่ง x = 0 นาโนเมตร อุณหภูมิจะมีค่าสูงแสดงได้เป็นลูปที่ 2 ส่วนลูปที่ 1 แสดงฮีสเทอรีซิส ณ ตำแหน่งที่ x = 50 นาโนเมตร ซึ่งมีค่าอุณหภูมิต่ำ



รูปที่ 2.6 (ก) ลูปฮิสเทอรีซิสหรือลูป *M-H* ณ อุณหภูมิปกติ (หรือ Loop 1) และอุณหภูมิสูง (หรือ Loop 2), และ (ข) ลูป *M-h* หรือลูป *M-H* ที่ถูกนอร์มอลไลซ์ด้วยค่าสัมบูรณ์ $|H_c|$ ทำให้ได้เป็นสนามประสิทธิผลโดยสมมุติว่าค่า *M* และ *h* แปรผันตามอุณหภูมิ

ค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก(coercivity: H_c) และค่าสภาพความเป็นแม่เหล็ก (remanent magnetization: M_r) ขึ้นกับค่าอุณหภูมิที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 2.3.1 แสดงเป็นฮีสเทอรีซิสลูปในรูปที่ 2.6 จากรูปที่ 2.6 (ก) ทำการนอร์มอลไลซ์ค่าสนามแม่เหล็กที่จ่ายเข้า (total applied field: H_{tot}) ด้วยค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก ให้มีค่าเท่ากับค่าสนามประสิทธิผล (effective field: h) ดังสมการที่ (2.7)

$$h = \frac{H_{tot}}{|H_c|} \tag{2.7}$$

ดังนั้นค่าสนามประสิทธิผล $h\left(H_{tot}, T(x)\right)$ จึงเป็นฟังก์ชันที่เปลี่ยนแปลงกับค่าสนามที่จ่ายเข้าไป H_a และค่าอุณหภูมิ $T(x)$ ตลอดจนค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก $H_c\left(T(x)\right)$ ที่ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็ก $M_r\left(T(x)\right)$ ขึ้นกับอุณหภูมิด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามจะไม่มีการลดทอนกับค่าสถาพความเป็นแม่เหล็กในขณะที่ทำการเขียน หลังจากที่ให้ความร้อนกับสื่อบันทึกกระบวนการย้อนกลับสู่สภาพปกติ ซึ่งสื่อบันทึกจะเย็นตัวลงสู่อุณหภูมิปกติ แล้วค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กจะกลับมามีค่าเท่าเดิม จากฮีสเทอรีซิสลูปพิจารณาความชันของลูปด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กดังสมการที่ (2.8)

$$\frac{dM}{dh} = \frac{M_r(T)}{\left(1 - S^*(T)\right)} = H_c(T)\frac{dM}{dH} \tag{2.8}$$

เมื่อค่าความชันของฮีสเทอรีซิสลูป S^* ขึ้นกับค่าของอุณหภูมิด้วยเช่นกัน พิจารณารูปที่ 2.6 (ข) ที่ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะของลูปจาก $-M_r$ ไปยัง $+M_r$ ค่าสนามประสิทธิผลจะเท่ากับ $h=1$ และที่ตำแหน่งที่ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัว M_s ค่าสนามประสิทธิผลจะเท่ากับ $h=\left(2-S^*\right)$ จะพบว่าตัวแปรที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะจาก $-M_r$ ไปยัง $+M_r$ สามารถพิจารณาได้สองแบบดังนี้

สมมติให้เริ่มต้นสื่อบันทึกมีค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กเป็น $-M_r$ แล้วทำการจ่ายสนามภายนอกป้อนเข้าเป็น $H_{tot}=\left(2-S^*\right)H_c$ ทำให้ค่าสนามประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ $h=\left(2-S^*\right)$ เท่านี้ก็เพียงพอที่ทำให้สื่อบันทึกมีค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวได้

ในทางกลับกันเป็นการลดค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กเป็น $H_c=H_{tot}\big/\left(2-S^*\right)$ ซึ่งทำให้ค่าสนามประสิทธิผลมีค่าเท่ากับ $h=\left(2-S^*\right)$ เท่านี้ก็เพียงพอที่ทำให้สื่อบันทึกมีค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวได้เช่นเดียวกัน

2.3.4 ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ

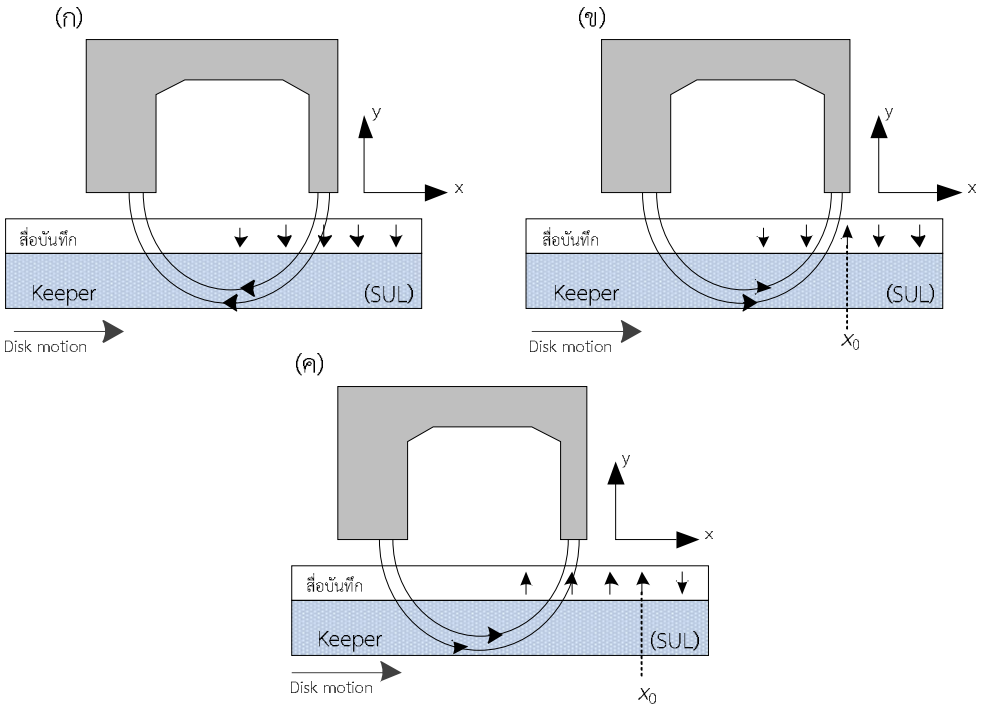
พิจารณากระบวนการเขียนของระบบการบันทึกแบบแนวตั้งในรูปที่ 2.7 เมื่อสื่อบันทึกเคลื่อนที่ไปทางด้านขวา (ทิศทาง $+x$), เส้นลูกศรในสื่อบันทึกแสดงทิศทางของสภาพแม่เหล็กตกค้าง M_r, และเส้นลูกศรที่ออกมาจากหัวเขียนแสดงทิศทางของสนามแม่เหล็กที่หัวเขียนสร้างขึ้น (applied magnetic field) H_h โดยรูปที่ 2.7 (ก) แสดงการเริ่มต้นของระบบที่มีค่า M_r และ H_h ไปในทิศทาง $-y$ จากนั้นเมื่อหัวเขียนมีการเปลี่ยนทิศทางของสนามแม่เหล็กไปในทิศทางตรงข้ามหรือ $+y$ ตาม รูปที่ 2.7 (ข) ก็ทำให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของสภาพความเป็นแม่เหล็ก (จาก $-M_r$ เป็น $+M_r$) ในสื่อบันทึก ณ ตำแหน่ง x_0 ที่อยู่ทางด้านซ้ายของสนามเขียน และเมื่อสื่อบันทึกเคลื่อนที่ห่างออกไปจากหัวเขียนมากขึ้นตามรูปที่ 2.7 (ค) ก็จะทำให้การเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นในรูปที่ 2.7 (ข) ถูกจัดเก็บในสื่อบันทึก ณ ตำแหน่ง x_0 คงเดิมถ้าพิจารณาตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนสถานะใดๆ แล้วจะได้ว่า ค่าสนามแม่เหล็กทั้งหมดที่จ่ายเข้ายังแผ่นบันทึกจะมีค่าเท่ากับ

$$H_{tot}(x)=H_a(x)+H_d(x) \tag{2.9}$$

กำหนดให้ $H_a(x)=H_h(x)$

เมื่อ $H_h(x)$ คือค่าสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน และ $H_d(x)$ คือค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็ก

สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึกขึ้นอยู่กับสนามแม่เหล็กรวมทั้งหมด ดังนั้นค่าความเป็นแม่เหล็กในทิศทางตามแนวแทร็กสามารถคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.10)



รูปที่ 2.7 กระบวนการเขียนข้อมูลแม่เหล็กแบบแนวตั้ง และตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ x_0

$$M(x) = M\left[H_{tot}(x)\right] = M\left[H_a(x) + H_d(x)\right] \tag{2.10}$$

วิลเลียม-คอมสต็อก ได้กล่าวไว้ว่า สมการที่ (2.10) มีความเป็นไปได้ที่แก้สมการเพื่อที่จะหาค่าตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะ (transition center: x_0) เมื่อค่าสนามแม่เหล็กรวมมีค่าเท่ากับค่าสถาพลบล้างแม่เหล็ก (coercivity: H_c) ดังนั้นทำการแก้สมการที่ (2.10) โดยทำการอนุพันธ์ที่ตำแหน่งที่ x_0 จะได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \left.\frac{dM(x)}{dx}\right|_{x_0} &= \left.\frac{dM(H)}{dH_{tot}}\right|_{H_c} \left.\frac{dH_{tot}(x)}{dx}\right|_{x_0} \\ &= \left.\frac{dM(H)}{dH_{tot}}\right|_{H_c} \left[\left.\frac{dH_a(x)}{dx}\right|_{x_0} + \left.\frac{dH_d(x)}{dx}\right|_{x_0}\right] \end{aligned} \tag{2.11}$$

สมการที่ (2.11) เป็นที่รู้กันดีคือสมการความชันของวิลเลียม-คอมสต็อก ถ้าให้การเปลี่ยนสถานะแทนด้วยฟังก์ชันอาร์คเทนเจนต์สมมติเป็นพริออริ “*a priori*” ทั้งการกระจายของสภาพความเป็นแม่เหล็กและสนามต้านสภาพเป็นแม่เหล็ก จากการวิเคราะห์แล้วสามารถให้ค่าออกมาเป็นค่าๆ หนึ่งเป็นระยะการเปลี่ยนสถานะ (transition parameter: a) นอกจากนั้นแล้วสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน H_h หรือ H_g และสภาพความเป็นแม่เหล็ก M_r ด้วยค่าสนามแม่เหล็กที่ป้อนเข้าไป H_a สามารถคำนวณหาค่าและ

แสดงออกมาได้จากการวิเคราะห์แบบคาร์ลควิซท์ และ *M-H* ลูป ของสื่อบันทึกตามลำดับ ข้อสมมติฐานต่างๆ เหล่านี้สามารถใช้สมการที่ (11) เพื่อทำการหาค่า a ซึ่งมีความสัมพันธ์กับตัวแปรทั้งหมดในกระบวนการบันทึกข้อมูล

แบบจำลองของวิลเลียม-คอมสต็อกเดิมใช้กับเฉพาะฮีสเทอรีซิสลูปเพียงลูปเดียว เพราะว่าไม่ว่าจะเป็นที่ตำแหน่งใดๆ บนสื่อบันทึกสามารถนิยามได้ด้วยฮีสเทอรีซิสลูปเดียวกันได้ ในระบบการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยไม่เหมือนกับกรณีแบบปกติทั่วไป เมื่อได้มีการให้ความร้อนกับสื่อบันทึกในระหว่างกระบวนการบันทึกเพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสื่อบันทึก ทั้งนี้ได้แสดงฮีสเทอรีซิสลูปให้เห็นในรูปที่ 2.6 (ก) แบ่งเป็นสองแนวความคิดจากฮีสเทอรีซิสลูป เมื่อลูปที่ 2 สมมติให้เป็นลูปที่ถูกให้ความร้อนสูงกว่าลูปที่ 1 และด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็ก และสภาพลบล้างแม่เหล็กในสื่อบันทึกลดลงด้วย จากรูปจะเห็นว่า สนามแม่เหล็กโดยรวมที่ป้อนเข้าไปจะทำให้ลูปที่ 2 มีค่าความเป็นแม่เหล็กอิ่มตัวไวกว่า ในขณะที่ลูปที่ 1 ยังไม่อิ่มตัว อันนี้คุณลักษณะพิเศษของระบบการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยทำให้สื่อบันทึกสามารถอิ่มตัวได้เร็ว โดยใช้ค่าสนามที่จ่ายเข้าไปน้อยๆ

เนื่องจากระบบ HAMR แตกต่างจากแบบจำลองของวิลเลียม-คอมสต็อก ความร้อนในระบบ HAMR ต้องแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนด้วยสมการที่ (2.11) ส่วนนอกเหนือจากนี้มีฮีสเทอรีซิสลูปโดยพิจารณาในรูปแบบของค่าสนามประสิทธิผล (effective field: h) ค่าสนามประสิทธิผลถูกกำหนดได้จากสนามแม่เหล็กรวมที่ป้อนให้ (total applied field: H_{tot}) นอร์มอลไลซ์ด้วยค่าลบล้างแม่เหล็ก (coercivity: H_c) เมื่อค่าลบล้างแม่เหล็กนั้นขึ้นอยู่กับตำแหน่งของความร้อน (temperature: $T(x)$)

$$h(x)=\frac{H_{tot}(x)}{H_c\left(T(x)\right)} \tag{2.12}$$

M-h ลูปแสดงในรูปที่ 6 ข) กล่าวได้ว่าที่จุดอิ่มตัวของสื่อบันทึกจะอยู่ที่ตำแหน่งค่าสนามประสิทธิผล $h=\left(2-S^*\right)$ ให้ S^* เป็นค่าความเป็นสี่เหลี่ยมของ *M-H* ลูป จากสมการที่ (2.12) จะเห็นได้ว่ามีสองตัวแปรที่ทำให้เกิดการเปลี่ยน อันแรกคือพิจารณาค่าลบล้างแม่เหล็ก H_c สื่อบันทึกจะสามารถอยู่จุดอิ่มตัวได้ด้วยการจ่ายสนามรวมทั้งหมดเป็น $H_{tot}=\left(2-S^*\right)H_c$ หรือในทางกลับกัน ให้ค่าสนามรวมทั้งหมดมาให้ H_{tot} แล้วค่าลบล้างแม่เหล็กสามารถลดลงได้ด้วยการให้ความร้อนเข้าไป จะได้ $H_c=H_{tot}\Big/\left(2-S^*\right)$ เทคนิคทั้งสองเป็นขั้นตอนที่ไม่สามารแสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 2.6 ข) ใน *M-h* ลูปค่าสภาพความเป็นแม่เหล็ก และค่าความเป็นสี่เหลี่ยมของ M-H ลูปจะขึ้นอยู่กับความร้อน

ในสมการที่ (2.10) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของค่าสนามประสิทธิผลในสมการที่ (2.12) ได้ดังนี้

$$M(x)=M\left[h_{tot}(x)\right] \tag{2.13}$$

ให้ทำการอนุพันธ์สมการที่ (2.13) ที่ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (transition center: x_0) เมื่อค่าสนามรวมเท่ากับค่าลบล้างแม่เหล็ก $H_{tot} = H_c$ และความร้อนของสื่อบันทึกเป็น $T_0 = T\left(x_0\right)$ จะได้

$$\left.\frac{dM(x)}{dx}\right|_{x_0} = \left.\frac{dM(h)}{dh}\right|_{H_c} \left.\frac{dh(x)}{dx}\right|_{x_0} \tag{2.14}$$

จากรูปที่ 2.6 ก) และ ข) M-h ลูป ให้ทำการอนุพันธ์ที่ค่าลบล้างแม่เหล็กอยู่ที่ตำแหน่งการเกิดการเปลี่ยนสถานะ ที่ขึ้นกับความร้อนที่ T_0 จะได้ค่าความชันของเส้นดังนี้

เมื่อ $H_{tot} = H_c$

$$\left.\frac{dM(h)}{dh}\right|_{H_c(T_0)} = \frac{M_r\left(T_0\right)}{\left(1 - S^*\left(T_0\right)\right)} = \left.\frac{H_c\left(T_0\right) dM(H)}{dH_{tot}}\right|_{H_c(T_0)} \tag{2.15}$$

ในเทอมสุดท้ายให้คูณด้วย $H_c\left(T_0\right) \Big/ H_c\left(T_0\right)$ (คือการคูณด้วย 1 นั่นเอง) แล้วใช้ความชันของค่าลบล้างแม่เหล็กจากรูปที่ 2.6 ก) อนุพันธ์ของค่าสนามประสิทธิผลสามารถหาได้จากการอนุพันธ์ผลต่างของสมการที่ (2.12)

$$\frac{dh(x)}{dx} = \frac{d}{dx}\left(\frac{H_{tot}(x)}{H_c\left(T(x)\right)}\right)$$

$$\frac{dh(x)}{dx} = H_c\left(T(x)\right)\frac{dH_{tot}(x)}{dx} - H_{tot}(x)\frac{dH_c\left(T(x)\right)}{dx} \Bigg/ H_c^2\left(T(x)\right)$$

ที่ตำแหน่งเกิดการเปลี่ยนสถานะ x_0, กำหนดให้ $H_a\left(x_0\right) + H_d\left(x_0\right) = H_{tot}\left(x_0\right)$

$$\begin{aligned}\frac{dh(x)}{dx} &= H_c\left(T\left(x_0\right)\right)\frac{dH_{tot}\left(x_0\right)}{dx} - H_{tot}(x)\frac{dH_c\left(T\left(x_0\right)\right)}{dx} \Bigg/ H_c^2\left(T\left(x_0\right)\right) \\ &= \frac{1}{H_c\left(T_0\right)}\left.\frac{dH_a\left(x_0\right)}{dx}\right|_{x_0} + \frac{1}{H_c\left(T_0\right)}\left.\frac{dH_d\left(x_0\right)}{dx}\right|_{x_0} \\ &\quad - \frac{dH_a\left(x_0\right) + dH_d\left(x_0\right)}{H_c^2\left(T_0\right)}\left.\frac{dH_c(T)}{dT}\right|_{T_0}\left.\frac{dT\left(x\right)}{dx}\right|_{x_0}\end{aligned} \tag{2.16}$$

ที่ตำแหน่งการเกิดการเปลี่ยนสถานะ (transition center: x_0) ค่าสนามแม่เหล็กรวมทั้งหมดเท่ากับค่าสภาพลบล้างแม่เหล็ก $H_a\left(x_0\right) + H_d\left(x_0\right) = H_c\left(T_0\right)$ สมการที่ (2.16) จะกลายเป็นดังนี้

$$\left.\frac{dh(x)}{dx}\right|_{x_0} = \frac{1}{H_c(T_0)}\left[\left.\frac{dH_a(x)}{dx}\right|_{x_0} + \left.\frac{dH_d(x)}{dx}\right|_{x_0} - \left.\frac{dH_c(T_0)}{dT}\right|_{T_0}\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x_0}\right] \tag{2.17}$$

แทนสมการที่ (2.15) และ (2.17) ลงในสมการที่ (2.14) จะได้สมการความชันของวิลลเลียม-คอมสต็อกที่ขึ้นกับความร้อนดังนี้

$$\left.\frac{dM(x)}{dx}\right|_{x_0} = \left\{\frac{H_c(T_0)dM(H)}{dH_{tot}}\right\}\left\{\frac{1}{H_c(T_0)}\left[\left.\frac{dH_a(x)}{dx}\right|_{x_0} + \left.\frac{dH_d(x)}{dx}\right|_{x_0} - \left.\frac{dH_c(T_0)}{dT}\right|_{T_0}\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x_0}\right]\right\}$$

$$\left.\frac{dM(x)}{dx}\right|_{x_0} = \left.\frac{dM(H)}{dH_{tot}}\right|_{H_c(T_0)}\left[\left.\frac{dH_a(x)}{dx}\right|_{x_0} + \left.\frac{dH_d(x)}{dx}\right|_{x_0} - \left.\frac{dH_c(T_0)}{dT}\right|_{T_0}\left.\frac{dT}{dx}\right|_{x_0}\right] \tag{2.18}$$

สมการที่ (2.18) เหมือนกับแบบจำลองวิลเลียม-คอมสต็อกในสมการที่ (2.11) ยกเว้นเพิ่มเทอมที่เป็นความร้อนเข้ามาคือ $\left(dH_c/dt \times dT/dx\right)$ และถ้าไม่มีผลกระทบของความร้อนเข้าไปเกี่ยวข้องในทุกเทอมในสมการที่ (2.18) ทำให้ลดรูปสมการได้เป็นสมการที่ (2.11)

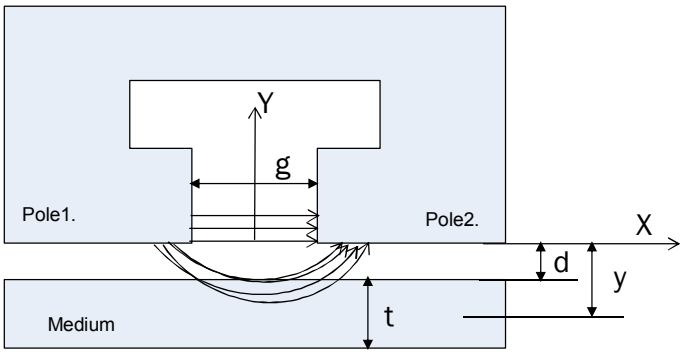
พารามิเตอร์ที่ใช้อธิบายการเกิดการเปลี่ยนสถานะของแม่เหล็ก ประกอบด้วยสองพารามิเตอร์ด้วยกันคือ ตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะ (transition center: x_0) และ ระยะของการเปลี่ยนสถานะ (transition parameter: a) โดยตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะจะเกิดขึ้น เมื่อค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กมีการเปลี่ยนทิศทางแม่เหล็ก ซึ่งจะเกิดขึ้นเมื่อค่าสนามแม่เหล็กที่จ่ายเข้าไปมีค่าเท่ากับค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กของสื่อบันทึก $H_{tot} = H_h + H_d$ ดังนั้นหาตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะได้จาก

$$H_c(x) = H_h(x) + H_d(x) \tag{2.19}$$

เดิมการเปลี่ยนสถานะของแม่เหล็กได้ใช้ฟังก์ชันอาร์เทนเจนต์อธิบายรูปร่างการเปลี่ยนสถานะ แล้วเมื่อมีค่าความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้อง ฟังก์ชันการเปลี่ยนสถานะแบบอาร์เทนเจนต์แสดงดังสมการที่ (2.20)

$$M(x) = \frac{2M_r(T(x))}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{x - x_0}{a}\right) \tag{2.20}$$

เมื่อกำหนดให้ x_0 เป็นตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะ, a เป็นระยะที่เกิดการเปลี่ยนสถานะ หรืออาจจะประมาณระยะการเปลี่ยนสถานะเป็น πa โดยจุดประสงค์หลักของแบบจำลองวิลเลียม-



รูปที่ 2.8 การบันทึกแบบแนวนอนสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนและระยะของพารามิเตอร์

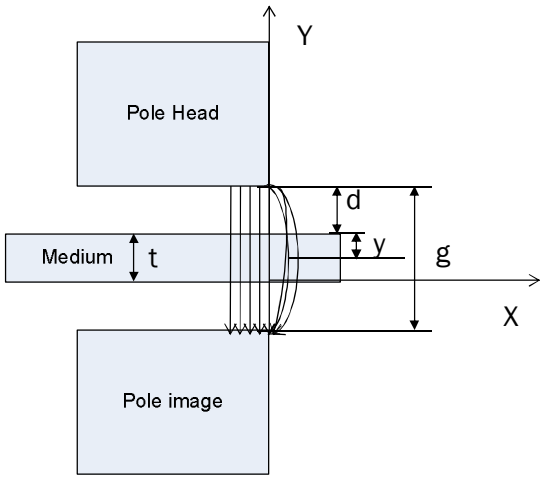
คอมสต็อกนั่นคือการหาค่า a และ x_0 ของการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นในระบบ HAMR ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้นตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะจะใช้สมการที่ (2.19) ในการหาค่า ส่วนระยะของการเปลี่ยนสถานะนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการความชัน ทำการอนุพันธ์เพื่อจะได้ระยะของการเปลี่ยนสถานะ

ค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็กจะขึ้นกับตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และระยะของการเปลี่ยนสถานะ จากสมการที่ (2.18) และ (2.19) ใช้ในการคำนวณวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่าคือ a และ x_0 เพื่อที่จะศึกษาผลกระทบจากค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็ก แต่ถ้าขนาดของแสงเลเซอร์ที่ให้ความร้อนกับสื่อบันทึกมีขนาดที่ใหญ่ จะเป็นการง่ายในการศึกษาคือจะไม่พิจารณาค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็ก ในการหาค่าตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ x_0 และระยะของการเปลี่ยนสถานะ a

ถ้าขนาดของแสงเลเซอร์ที่ให้ความร้อนกับสื่อบันทึกมีขนาดที่เล็ก ค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็กถูกนำมาพิจารณา ดังนั้นสมการที่ (18) และ (19) จะหาค่าของตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และระยะของการเปลี่ยนสถานะได้จะต้องทำวนซ้ำหลายรอบ ในรอบแรกให้สุ่มค่าของ a แล้วทำการคำนวณหาค่าของ x_0 ด้วยสมการที่ (19) หลังจากนั้นให้ใช้ค่า x_0 ที่หามาได้คำนวณหาค่าของ a ในรอบที่สองค่า a ค่าใหม่นำมาใช้ในการคำนวณหาค่า x_0 ใหม่ แล้วทำต่อไปเรื่อยๆ จนกระทั่งค่าทั้งสอง x_0 และ a ลู่เข้าสู่ค่าความแม่นยำที่ต้องการ

2.3.5 ระบบการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวนอนที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

ในการบันทึกแบบแนวนอนสภาพความเป็นแม่เหล็กที่บันทึกลงไปในแผ่นบันทึกมีทิศทางตามแนวนอน (หรือตามแนวระนาบของแผ่นบันทึก) ในรูปที่ 8 แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในระหว่างขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2 ของหัวเขียนและแผ่นบันทึก พบว่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นเป็นแนวนอนจากขั้วที่ 1



รูปที่ 2.9 การบันทึกแบบแนวตั้งสนามแม่เหล็กจากหัวเขียนและระยะของพารามิเตอร์

ไปยังขั้วที่ 2 ทำให้ทิศทางของแม่เหล็กในแผ่นบันทึกเป็นแนวนอนเช่นกัน สมมติให้หัวเขียนมีความยาวและกว้างแบบไม่จำกัด แต่ระยะห่างระหว่างขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2 มีความกว้างจำกัด จากสมมติฐานดังกล่าวสามารถใช้การวิเคราะห์สนามแม่เหล็กจากหัวเขียนแบบคาร์ลควิสท์เพื่อหาความเข้มของสนามที่เข้าไปยังแผ่นบันทึก ดังสมการที่ (21) ใช้แสดงสนามแม่เหล็กแบบแนวนอน

$$H_x(x,y)=\frac{H_g}{\pi}\left[\tan^{-1}\left(\frac{x+g/2}{y}\right)-\tan^{-1}\left(\frac{x-g/2}{y}\right)\right] \tag{2.21}$$

เมื่อ g เป็นระยะห่างระหว่างขั้วที่ 1 และขั้วที่ 2 ของหัวเขียน, H_g เป็นสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียน จากแบบจำลองความร้อนของวิลเลียม-คอมสต็อก สนามแม่เหล็กที่ต้องการศึกษาคือตำแหน่งตรงกลางของความหนาของแผ่นบันทึก ให้ t เป็นความหนาของแผ่นบันทึก และ d เป็นระยะจากด้านล่างของหัวเขียนมายังผิวของแผ่นบันทึก จากนั้นให้ทำการศึกษาค่าของสนามในระนาบแกน x เป็น H_x เป็นระยะ $y=d+t/2$ ส่วนของค่าสนามในแนวระนาบแกน y ที่เป็น H_y จะไม่สนใจในการบันทึกแบบแนวนอน

ค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.22)

$$H_d(x)=-\frac{dM}{dx}*H_x^{step}(x) \tag{2.22}$$

เมื่อค่าสนามจากตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะของสื่อบันทึก เขียนได้เป็นดังนี้

$$H_x^{step}(x)=\frac{1}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{t}{2x}\right) \tag{2.23}$$

ดังนั้น สมมติให้การเปลี่ยนสถานะมีฟังก์ชันเป็นอาร์เทนเจนต์ ค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็กหาได้จากสมการที่ (2.24) แต่ถ้าขนาดของแสงเลเซอร์มีค่าความเข้มสูง ดังนั้นค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็กจะสามารถประมาณค่าได้ดังสมการที่ (2.25)

$$H_d(x)=\frac{-2}{\pi^2}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[\frac{M_r(x')a}{a^2+(x_0-x')^2}+\tan^{-1}\left(\frac{x'-x_0}{a}\right)\frac{dM_r(T(x'))}{dx'}\right]\tan^{-1}\left(\frac{t}{2(x-x')}\right)dx' \tag{2.24}$$

$$\frac{dH_d}{dx}=-\frac{2M_r(T)_0\,t}{\pi a(a+t/2)} \tag{2.25}$$

2.3.6 ระบบการบันทึกแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

ในระบบการบันทึกแบบแนวตั้งสภาพความเป็นแม่เหล็กที่ใช้ในการเขียนมีทิศทางเป็นแนวตั้ง ดังนั้นจึงทำให้สนามที่ถูกบันทึกในแผ่นบันทึกมีทิศทางเป็นแนวตั้งด้วย ได้แสดงแบบจำลองสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน และสื่อบันทึกดังรูปที่ 2.9 ในรูปที่ 2.9 แบบจำลองการบันทึกสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง แสดงสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียน ที่ใช้ทำการบันทึกลงในแผ่นบันทึก โดยในชั้นของแผ่นบันทึกจะมีชั้นของแม่เหล็กอยู่ด้านล่างของชั้นบันทึก เป็นขั้วแม่เหล็กจำลอง ซึ่งในความเป็นจริงคือชั้นของแม่เหล็กแบบซอร์ฟ ที่ช่วยให้ทิศทางสนามแม่เหล็กของการบันทึกเป็นแนวตั้ง ดังรูปที่ 2.9 ในการวิเคราะห์ค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดจากหัวเขียนยังคงใช้สมการสนามแม่เหล็กของหัวเขียนแบบคาร์รควิสท์ เพียงแค่เปลี่ยนพิกัดแกนควบคุม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.26) ใช้อธิบายค่าสนามแม่เหล็กของการบันทึกแบบแนวตั้ง

$$H_y(x,y)=\frac{H_g}{\pi}\left[\tan^{-1}\left(\frac{y+g/2}{x}\right)-\tan^{1}\left(\frac{y-g/2}{x}\right)\right] \tag{2.26}$$

เมื่อ g คือระยะห่างระหว่างหัวเขียนในที่นี้คือ ระยะจากขั้วของหัวเขียนไปยังขั้วจำลอง (pole image), d คือระยะห่างระหว่างหัวเขียนและสื่อบันทึก และ t คือความหนาของสื่อบันทึก ดังนั้นแล้ว $g=2d+2t$ และจากสมการของวิลเลียม-คอมสต็อกจะทำการศึกษาค่าของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง $y=t/2$ คือจุดศูนย์กลางของความหนาของสื่อบันทึก เพราะฉะนั้นค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกน x คือ $H_x(x,y)$ จะไม่ถูกพิจารณาของการบันทึกแบบแนวตั้ง สมการที่ (2.26) จะประมาณค่าสนามได้เมื่อค่า $X>0$ ปกติการเปลี่ยนสถานะจะเกิดจากตำแหน่งขอบของขั้วหัวเขียนอธิบายด้วยสมการวิลเลียม-คอมสต็อกเพื่อหาคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะ ส่วนค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็กคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.22) แต่ใช้ค่าสนามจากหัวเขียนแบบแนวตั้งเป็นสมการที่ (2.26) ดังนี้

$$H_d(x) = -\frac{dM}{dx} * H_y^{step}(x) \tag{2.27}$$

ให้ค่าสนามที่ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะของสื่อบันทึกเป็นสมการที่ (28)

$$H_y^{step}(x) = \frac{1}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{2x}{t}\right) \tag{2.28}$$

ดังนั้น เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะเป็นฟังก์ชันอาร์คแทนเจนต์ ค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็กสามารถหาได้จากสมการที่ (2.29) ดังนี้

$$H_d(x) = \frac{-2}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left[\frac{M_r(x')a}{a^2+(x_0-x')^2} + \tan^{-1}\left(\frac{x'-x_0}{a}\right)\frac{dM_r(T(x'))}{dx'}\right]\tan^{-1}\left(\frac{2(x-x')}{t}\right)dx' \tag{2.29}$$

ในเทอมที่ 2 ของสมการที่ (2.29) จะไม่มีความสำคัญเลย เมื่อขนาดแสงเลเซอร์ที่ให้ความร้อนมีค่าสูงๆ ทำให้สามารถลดรูปสมการที่ (2.29) เป็นสมการที่ (2.30)

$$\begin{aligned} H_d(x) &\approx \frac{-2}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{M_r(x')a}{a^2+(x_0-x')^2}\tan^{-1}\left(\frac{2(x-x')}{t}\right)dx' \\ H_d(x) &= \frac{2M_r(T(x))}{\pi}\tan^{-1}\left(\frac{x-x_0}{t/2+a}\right) \end{aligned} \tag{2.30}$$

และเกรเดียนต์ของค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็ก แสดงเป็นแบบง่ายๆ ดังสมการที่ (31) ถ้าไม่พิจารณาเกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่มีผลต่อค่าสภาพความเป็นแม่เหล็ก

$$\frac{dH_d(x)}{dx} \approx -\frac{2M_r(T(x))}{\pi(a+t/2)} \tag{2.31}$$

นอกจากนี้ คล้ายๆ กับการหาอนุพันธ์ในแบบการบันทึกแบบแนวนอน หาค่าระยะการเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นกับการบันทึกแบบแนวตั้ง ด้วยสมการที่ (2.32)

$$a = -\frac{\gamma}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{\gamma^2 + \frac{4H_c(1-S^*)}{\Delta\pi}}\Bigg|_{x_0} \tag{2.32}$$

เมื่อ

$$\Delta = -\frac{dH_h}{dx} - \frac{dH_c}{dT}\frac{dT}{dx}\bigg|_{x_0} = \frac{H_g g}{\pi\left(x_0^2 + (g/2)^2\right)} - \frac{dH_c}{dT}\frac{dT}{dx}\bigg|_{x_0}$$

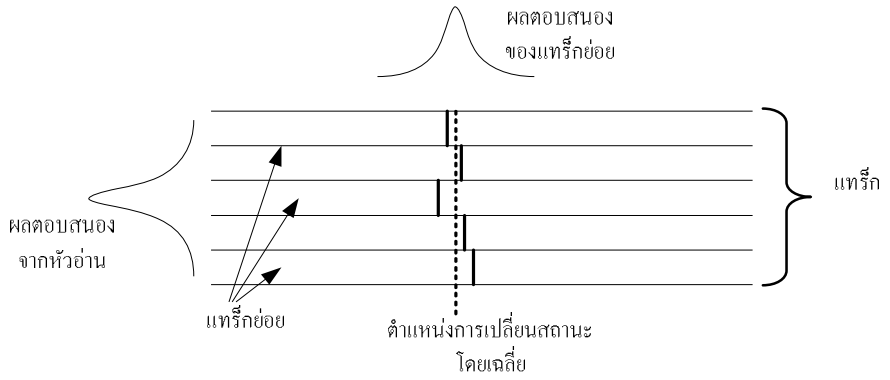
$$\gamma = \frac{2M_r}{\Delta\pi} - \frac{t}{2} + \frac{2H_c\left(1 - S^*\right)}{\Delta\pi} \tag{2.33}$$

ในสมการแบบเดิมของวิลเลียม-คอมสต็อกกับแบบสมการความร้อนของวิลเลียม-คอมสต็อก ส่วนมากในสมการยังคงมีความคล้ายคลึงกันในหลายๆ เทอม สมการแบบที่สองเป็นการเพิ่มเทอมที่เป็นผลจากการให้ความเข้าไปยังสื่อบันทึกแล้วศึกษาพฤติกรรมที่เกิดขึ้นกับสื่อบันทึก ถ้าหากไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนคือ $dT/dx = 0$ แล้วค่าสภาพความเป็นแม่เหล็ก และค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กที่ขึ้นกับอุณหภูมิจะเป็นศูนย์เช่นกัน $dM/dT = dH_c/dT = 0$ เพราะฉะนั้นแบบสมการความร้อนของวิลเลียม-คอมสต็อกจะกลายเป็นสมการรูปแบบเดิม เมื่อ T_0 แทนอุณหภูมิห้องนั่นเอง

2.4. แบบจำลองไมโครแทร็ก

แบบจำลองไมโครแทร็ก (Microtrack modeling) ช่วยในการศึกษาระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย ที่เกิดการเปลี่ยนในสองมิติคือ การเปลี่ยนแปลงในด้านตามแนวแทร็ก (along down track) และการเปลี่ยนแปลงในด้านตรงข้ามแทร็ก (cross track) ในรูปที่ 2.10 เป็นแบบจำลองไมโครแทร็กของช่องสัญญาณการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย ได้แบ่งแทร็กออกเป็นแทร็กย่อยๆ ที่มีความกว้างเท่ากัน จากนั้นให้ความร้อนในรูปแบบจำลองทางความร้อนของวิลเลียม-คอมสต็อค เข้าไปยังแต่ละแทร็กย่อย ทำให้คาดการณ์ลักษณะของการเปลี่ยนสถานะของแต่ละแทร็ก ด้วยระยะของการเปลี่ยนสถานะ (transition parameter: a) และตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะ (transition center: x_0) สัญญาณการเปลี่ยนสถานะหรือผลตอบสนองของสัญญาณอ่านกลับในแต่ละแทร็กย่อยคือ $h(t,a)$, ดังนั้นผลตอบสนองรวมทั้งหมดของการเปลี่ยนสถานะแสดงด้วยสมการดังนี้

$$p(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} h(a_i, t - \tau_i) \tag{2.34}$$



รูปที่ 2.10 แบบจำลองไมโครแทร็กของช่องสัญญาณแบบ HAMR

เมื่อ τ_i คือตำแหน่งของการเปลี่ยนสถานะ และ a_i คือระยะของการเปลี่ยนสถานะ ซึ่งในแต่ละลำดับที่ i คือในแต่ละแทร็กย่อยนั่นเอง ส่วนของการเปลี่ยนสถานะที่ต่างกันของการบันทึกแบบแนวนอน และการบันทึกแบบแนวตั้ง คือแสดงได้ด้วยการใช้ฟังก์ชันลอเรนต์เซียน (lorentzian function) และฟังก์ชันความผิดพลาด (error function) ตามลำดับ [9]

2.5. คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

ในการออกแบบระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยนี้จะต้องพิจารณาส่วนต่างๆ หลายด้านเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุดของระบบ โดยระบบแล้วจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็กเพียงอย่างเดียวแต่จะประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ แนวการแพร่ของความร้อน และตำแหน่งของความร้อนสูงสุด เพราะตำแหน่งการยิงแสงเลเซอร์จะต้องเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เมื่อได้ติดตั้งระบบการให้ความร้อนเข้ากับหัวเขียน ที่เป็นไปได้ควรจะเป็นแนวเดียวกันกับตำแหน่งกลางของหัวเขียน (gap center) หรือให้ใกล้เคียงที่สุด ในหัวข้อนี้จะแสดงคุณลักษณะของระบบการบันทึกแบบแนวนอนที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย ใช้สมการความร้อนของวิลเลียม-คอมสต็อก และแบบจำลองไมโครแทร็ก ในการศึกษาหาค่าตำแหน่ง และระยะของการเปลี่ยนสถานะ ของสภาพความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึก

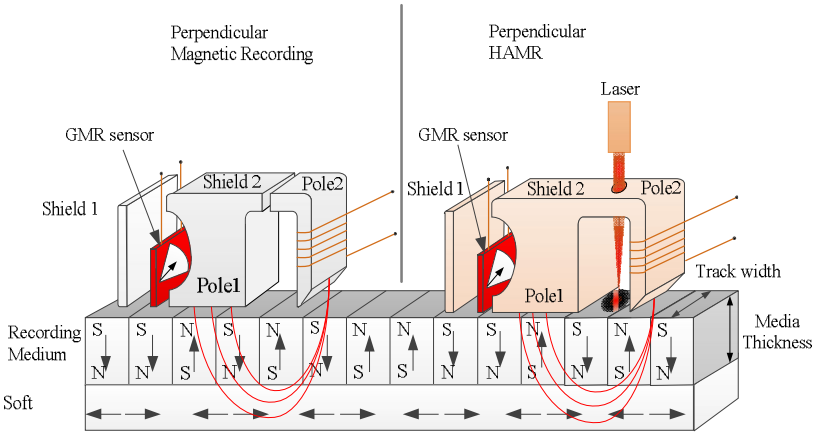
การเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นในแนวตรงข้ามแทร็กจะมีตำแหน่งที่ต่างกัน หรือไม่เป็นแนวเดียวกัน และรูปร่างความชันของการเปลี่ยนสถานะพิจารณา ณ ตำแหน่งตรงกลางแทร็กย่อย ค่อยๆ ลดลงที่ขอบของแทร็กนั้นๆ เมื่อพิจารณาแนวการแพร่ของความร้อนที่ป้อนเข้าไปยังสื่อบันทึก ให้มีการแพร่แบบเกาส์เซียนมีความสมมาตรทั้งสองด้าน จุดที่ความร้อนสูงสุดคือตำแหน่งตรงกลางแทร็กและต่ำสุดที่ตำแหน่งที่ขอบของแทร็ก ดังนั้นแล้วเมื่อให้ความร้อนเข้าไปยังสื่อบันทึกค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยสัมพันธ์เชิงเส้นกับความร้อน การเปลี่ยนแปลงจะต่างกันไปในแต่ละแทร็กย่อย

บทที่ 3
แบบจำลองระบบ

ระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งแบบเดิม คือยังไม่มีระบบให้ความร้อนเพื่อลดสภาพความเป็นแม่เหล็กลง เทคโนโลยีใหม่คือการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยเป็นระบบที่เพิ่มในส่วนของการให้ความร้อนก่อนที่จะทำการเขียนข้อมูลลงแผ่นบันทึก ในบทนี้จะทำการจำลองในส่วนระบบการให้ความร้อนของหัวเขียน นำวิธีการเชิงตัวเลขแบบจำลองไมโครแทร็กใช้คำนวณหาตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ

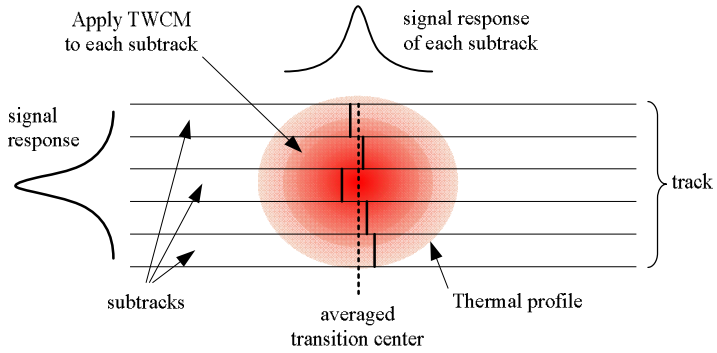
3.1 แบบจำลองระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

เมื่อแผ่นบันทึกข้อมูลที่ใช้ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กที่สูง เพื่อช่วยรักษาเสถียรภาพความเป็นแม่เหล็กไว้ได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงกับสภาพแวดล้อม หรืออุณหภูมิทั่วไป ดังนั้นเพื่อให้ระบบการเขียนของหัวเขียนสามารถบันทึกข้อมูล เป็นการเปลี่ยนทิศทางขั้วแม่เหล็กในแผ่นบันทึก โดยจากระบบเดิมที่เป็นแผ่นบันทึกมีค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กน้อย กระแสที่ใช้เขียนสามารถกลับขั้วแม่เหล็ก



รูปที่ 3.1 เปรียบเทียบระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง ซ้าย) ระบบเดิม (conventional system) ขวา) ระบบที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย (HAMR system)

หัวเขียนแบบใหม่ถูกสร้างร่วมกับระบบให้ความร้อนด้วยเลเซอร์ ร่วมเข้ากับหัวเขียนแบบแนวตั้งก่อนที่จะเขียนข้อมูลลงแผ่นบันทึกถูกป้อนความร้อนด้วยเลเซอร์ ดังรูปที่ 3.1 (ขวา) หัวเขียนทำการเขียนโดยเปลี่ยนทิศทางเส้นแรงแม่เหล็กให้กลับขั้ว ณ ตำแหน่งแผ่นบันทึกที่ถูกให้ความร้อน ทำให้เกิดตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะจะหาค่าได้ตามที่ได้อธิบายไว้ในบทที่ 3 พร้อมกับคำนวณค่าพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ ซึ่งจะนำไปคำนวณหาค่าระยะของสัญญาณพัลส์การเปลี่ยนสถานะต่อไป



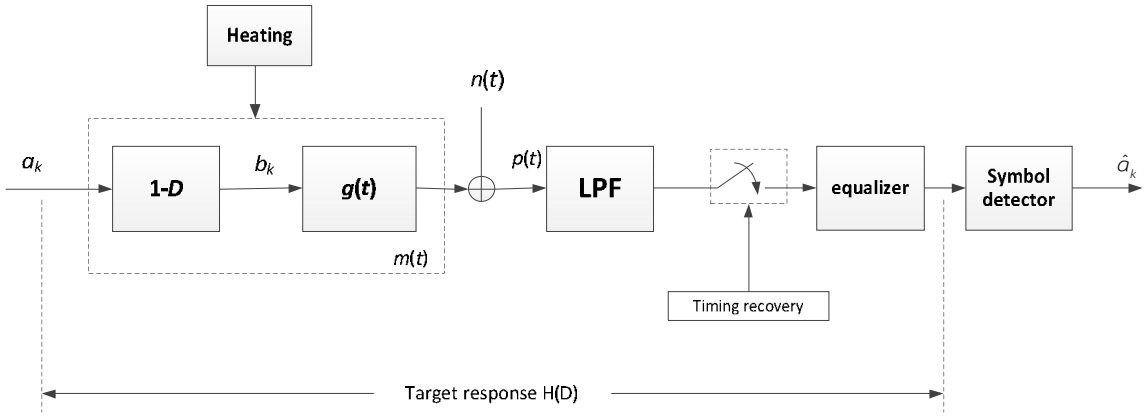
รูปที่ 3.2 แบบจำลองไมโครแทร็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

จากสมการที่ 2.26 เมื่อ g คือระยะห่างระหว่างหัวเขียนในที่นี้คือ ระยะจากขั้วของหัวเขียนไปยังขั้วจำลอง (pole image) ให้มีค่าเท่ากับ 100 นาโนเมตร, d คือระยะห่างระหว่างหัวเขียนและสื่อบันทึก กำหนดให้ค่าเท่ากับ 20 นาโนเมตร และ t คือความหนาของสื่อบันทึก คำนวณได้จากสมการ $g = 2d + 2t$ และจากสมการของวิลเลียม-คอมสต็อกจะทำการศึกษาค่าของสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่ง $y = t/2$ คือจุดศูนย์กลางของความหนาของสื่อบันทึก เพราะฉะนั้นค่าสนามแม่เหล็กที่เกิดขึ้นในแนวแกน x คือ $H_x(x,y)$ จะไม่ถูกพิจารณาของการบันทึกแบบแนวตั้ง สมการที่ (2.26) จะประมาณค่าสนามได้เมื่อค่า $X > 0$ ปกติการเปลี่ยนสถานะจะเกิดจากตำแหน่งขอบของขั้วหัวเขียน อธิบายด้วยสมการวิลเลียม-คอมสต็อกเพื่อหาคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะ ส่วนค่าสนามต้านสภาพความเป็นแม่เหล็กคำนวณหาได้จากสมการที่ (2.22) แต่ใช้ค่าสนามจากหัวเขียนแบบแนวตั้งเป็นสมการที่ (2.26) ดังนี้

เมื่อให้ความร้อนลงไปที่แผ่นบันทึกข้อมูลก่อนที่จะทำการเขียนจำลองระบบด้วยไมโครแทร็กดังที่แสดงในรูปที่ 3.2 แบ่งแทร็กข้อมูลออกเป็นจำนวน N แทร็กย่อย ดังพารามิเตอร์ที่ได้ติดตั้งในบทที่ 4 ให้พิจารณาสัญญาณผลตอบสนองของแต่ละแทร็กย่อย เมื่อป้อนความร้อนลงไปมีการกระจายของอุณหภูมิเป็นแบบเกาส์เซียน ทำให้แต่ละแทร็กย่อยของแบบจำลองไมโครแทร็กมีค่าของอุณหภูมิที่ไม่เท่ากัน ที่ขอบของแทร็กหลักจะมีค่าอุณหภูมิที่ต่ำกว่าที่จุดตรงกลางของแทร็กหลัก ทำให้แต่ละแทร็กมีสัญญาณผลตอบสนองของแต่ละแทร็กที่ไม่เหมือนกัน โดยผลที่จะทำการวิเคราะห์คือ ผลที่เกิดจากอุณหภูมิสูงสุดที่ป้อนเข้าไปในระบบ ค่าสภาพความเป็นแม่เหล็กของแผ่นบันทึก ช่องว่างระหว่างหัวเขียน ระยะทางระหว่างหัวเขียนกับแผ่นบันทึก และตัวแปรอื่นๆ ที่จะได้ศึกษาในบทที่ 4 ต่อไป เมื่อได้สัญญาณผลตอบสนองของแต่ละแทร็กย่อย เราสามารถคำนวณหาค่าผลตอบสนองรวมของระบบได้จากหัวอ่าน เพื่อสามารถจำลองสัญญาณอ่านกลับที่เกิดขึ้นในระบบ HAMR

3.2 บล็อกไดอะแกรมระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

ในส่วนรูปที่ 3.3 เป็นการแสดงระบบให้อยู่ในรูปของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ กล่าวคือ ลำดับข้อมูลอินพุตแบบไบนารีถูกส่งผ่านเข้าไปยังระบบวงจรหาอนุพันธ์อุดมคติ (ideal differentiator) 1-*D* เมื่อ *D* คือตัวดำเนินการหน่วงเวลา *T* หน่วย ทำให้ได้เป็นลำดับข้อมูล $b_k \in \{1, 0, 1\}$ เมื่อ $b_k = \pm 1$ การเปลี่ยนสถานะแบบบวก (positive transition) หรือแบบลบ (negative transition) และ $b_k = 0$ คือไม่มีการเปลี่ยนสถานะ ในระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยนี้จะต้องการศึกษาวิเคราะห์ผลตอบสนองสัญญาณการเปลี่ยนสถานะของระบบเมื่อป้อนความร้อน (heating) เข้ามายังระบบ ก่อนที่จะได้สัญญาณอ่านกลับเป็น g(t) และถูกรบกวนด้วยสัญญาณรบกวน n(t) สัญญาณอ่านกลับ p(t) จะถูกกรองด้วยวงจรกรองผ่านต่ำ (LPF) เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนที่อยู่นอกแถบความถี่ (out of band noise) จากนั้นก็จะถูกทำการชักตัวอย่าง (sampling) ณ เวลาที่ถูกควบคุมโดยระบบไทมมิ่งริคัฟเวอรี (timming recovery) ข้อมูลเอาต์พุตของวงจรชักตัวอย่างจะถูกส่งผ่านไปยังอีควอไลเซอร์ และวงจรตรวจหาสัญลักษณ์ (symbol detector) เพื่อหาลำดับข้อมูลอินพุตที่เป็นไปได้มากที่สุด นั่นคือประมาณค่า a_k หรือ $\hat{a}_k$



รูปที่ 3.3 แบบจำลองช่องสัญญาณในอุดมคติของการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

จากแบบจำลองช่องสัญญาณของระบบเดิมได้เพิ่มในส่วนของระบบให้ความร้อนที่ใช้กับแผ่นบันทึกที่มีค่าสภาพความแม่เหล็กสูง และระบบการเย็นตัวของแผ่นบันทึก ทำให้ต้องศึกษาวิเคราะห์ผลตอบสนองสัญญาณการเปลี่ยนสถานะ (transition response) ของระบบที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยในการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้ง (perpendicular HAMR system)

บทที่ 4
การทดลองและผล

จากแบบจำลองระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย ได้ออกแบบการทดลองระบบที่มีผลกระทบต่อสัญญาณการเปลี่ยนสถานะแม่เหล็ก (Magnetic transition) โดยทำการทดลองศึกษาคุณลักษณะของการเปลี่ยนสถานะของระบบที่ได้รับไบอัสความร้อน ศึกษาตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (transition center: x_0) และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ (transition parameter) และศึกษาสัญญาณการเปลี่ยนสถานะจาก PW50 โดยการทดลองเปลี่ยนตำแหน่งที่ให้ความร้อนตามแนวข้ามแทร็ก (Cross-track) จากจุดกึ่งกลางของหัวเขียน และการทดลองศึกษาความผันแปรที่เกิดจากอุณหภูมิสูงสุดและตำแหน่งของหัวเขียน ดังที่จะได้อธิบายในการทดลองและผลที่ได้จากการทดลองต่อไป

4.1 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย

ในการออกแบบระบบการบันทึกแม่เหล็กที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยนี้จะต้องพิจารณาส่วนต่างๆ หลายด้านเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ดีที่สุดของระบบ โดยระบบแล้วจะไม่ได้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารแม่เหล็กเพียงอย่างเดียวแต่จะประกอบด้วย การเปลี่ยนแปลงกับอุณหภูมิ แนวการแพร่ของความร้อนและตำแหน่งของความร้อนสูงสุด เพราะตำแหน่งการยิงแสงเลเซอร์จะต้องเป็นตำแหน่งที่เหมาะสมที่สุด เมื่อได้ติดตั้งระบบการให้ความร้อนเข้ากับหัวเขียน ที่เป็นไปได้ควรจะเป็นแนวเดียวกันกับตำแหน่งกลางของหัวเขียน (gap center) หรือให้ใกล้เคียงที่สุด ในหัวข้อนี้จะแสดงคุณลักษณะของระบบการบันทึกแบบแนวนอนที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย ใช้สมการความร้อนของวิลเลียม-คอมสต็อกและแบบจำลองไมโครแทร็ก ในการศึกษาหาค่าตำแหน่ง และระยะของการเปลี่ยนสถานะ ของสภาพความเป็นแม่เหล็กในสื่อบันทึก

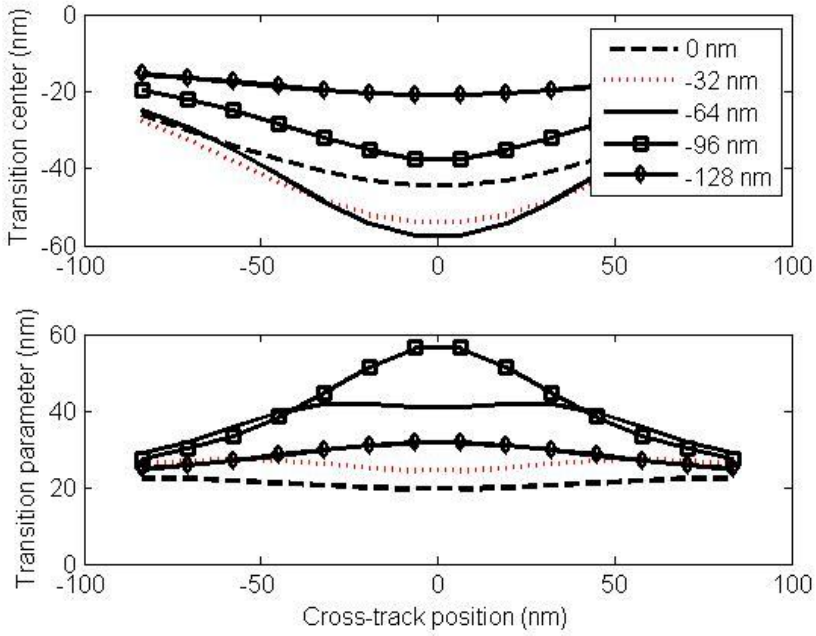
การเปลี่ยนสถานะที่เกิดขึ้นในแนวตรงข้ามแทร็กจะมีตำแหน่งที่ต่างกัน หรือไม่เป็นแนวเดียวกัน และรูปร่างความชันของการเปลี่ยนสถานะพิจารณา ณ ตำแหน่งตรงกลางแทร็กย่อย ค่อยๆ ลดลงที่ขอบของแทร็กนั้นๆ เมื่อพิจารณาแนวการแพร่ของความร้อนที่ป้อนเข้าไปยังสื่อบันทึก ให้มีการแพร่แบบเกาส์เซียนมีความสมมาตรทั้งสองด้าน จุดที่ความร้อนสูงสุดคือตำแหน่งตรงกลางแทร็กและต่ำสุดที่ตำแหน่งที่ขอบของแทร็ก ดังนั้นแล้วเมื่อให้ความร้อนเข้าไปยังสื่อบันทึกค่าสภาพลบล้างแม่เหล็กเกิดการเปลี่ยนแปลงโดยสัมพันธ์เชิงเส้นกับความร้อน การเปลี่ยนแปลงจะต่างกันไปในแต่ละแทร็กย่อย

4.1.1 การทดลอง และบันทึกผลการทดลอง

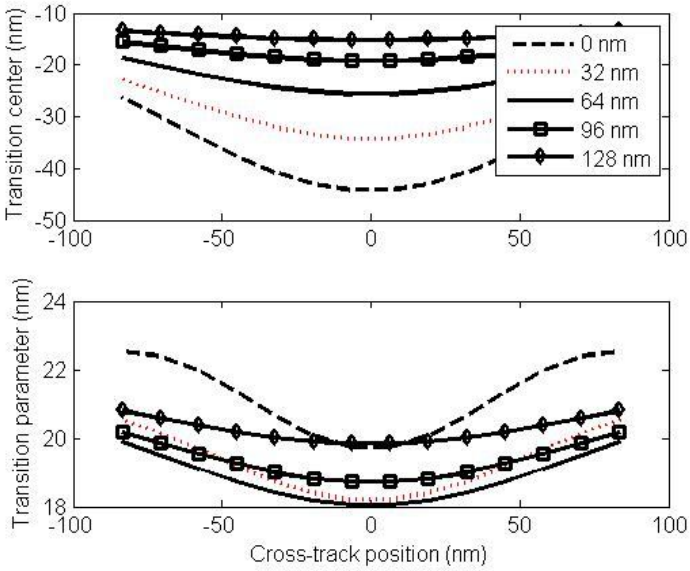
ทดลองในตารางที่ 4.1 เป็นการกำหนดค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลองระบบเพื่อคำนวณหาค่าตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะเกิดการเปลี่ยนแปลง

ตารางที่ 4.1 การกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้น

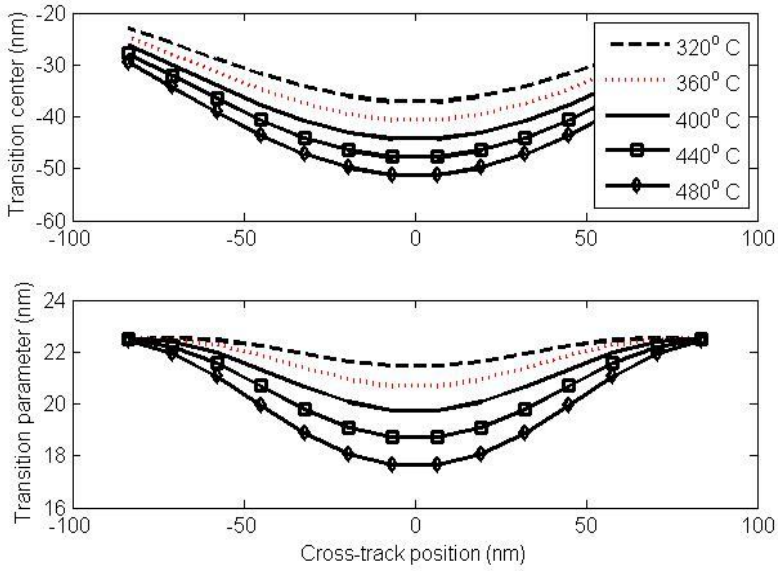
ตัวแปร	ค่าเริ่มต้น
ความเป็นสภาพแม่เหล็ก (H_c)	-2000 $T(x)$ + 16.10^5 A/m
สภาพความเป็นแม่เหล็ก (M_r)	-1200 T(x) + 12.10^5 A/m
ค่าสนามแม่เหล็กจากหัวเขียน (H_g)	19.10^5 A/m
ค่าความชันของลูป Squareness (S^*)	0.7
อุณหภูมิสูงสุด peak temperature (T_{peak})	400
ระยะห่างระหว่างหัวเขียนกับสื่อบันทึก (d)	20 นาโนเมตร
ระยะห่างของหัวเขียน (g)	100 นาโนเมตร
ความกว้างแทร็ก track width	120 นาโนเมตร
ความกว้างของหัวอ่าน (c)	5 นาโนเมตร
จำนวนแทร็กย่อย (N)	14



รูปที่ 4.1 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะแนวข้ามแทร็กไปทางด้านซ้ายของ gap center (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ



รูปที่ 4.2 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะแนวข้ามแทร็กไปทางด้านขวาของ gap center (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ



รูปที่ 4.3 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะกับค่าอุณหภูมิสูงสุด (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ

ดังรูปที่ 4.1 และ 4.2 มีความเกี่ยวข้องกันทำให้คุณลักษณะของการเปลี่ยนสถานะที่แตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.1 ทำการเลื่อนตำแหน่งศูนย์กลางของหัวเขียนออกไปทางด้านซ้าย รูปที่ 4.2 ทำการเลื่อน

ตำแหน่งศูนย์กลางของหัวเขียนออกไปทางด้านขวา ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีผลกระทบกับตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะด้วยเช่นกัน

ดังรูปที่ 4.3 มีความเกี่ยวข้องกันทำให้คุณลักษณะของการเปลี่ยนสถานะที่แตกต่างกัน โดยรูปที่ 4.3 ทำการเปลี่ยนค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ป้อนให้กับระบบของหัวเขียน จาก 320 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 480 องศาเซลเซียส ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่ามีผลกระทบกับตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะด้วยเช่นกัน ดังแสดงดังรูปที่ 4.3 ตำแหน่งจุดศูนย์กลางการเปลี่ยนสถานะ x_0 และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ a ที่เกิดขึ้นในแต่ละแทร็กย่อย ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเลเซอร์ไปทางด้านซ้ายและด้านขวาของจุดกึ่งกลางช่องว่าง ซึ่งจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า x_0 และ a ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับระบบ HAMR แบบนอนแนว เมื่อเปรียบเทียบกับระห่างออกไปตำแหน่งทางด้านซ้ายและด้านขวา มีค่าเฉลี่ยแล้วลดลง เนื่องการสนามแม่เหล็กของหัวเขียน H_h ณ บริเวณขอบของโพล (pole edges) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง

4.1.2 สรุปและวิเคราะห์ผล

เทคโนโลยี HAMR สามารถช่วยเพิ่มความจุข้อมูลได้มากกว่า 1 Tb/in^2 และยังสามารถนำมาใช้งานจริงในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ภายในระยะเวลาอันใกล้ แบบจำลองวิลเลียม-คอมสต็อกเชิงความร้อนในสมการ (18) และแบบจำลองไมโครแทร็กได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบ HAMR เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนสถานะ (ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ x_0 และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ a) รวมทั้งค่า PW50 ของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากหัวอ่าน โดยทั่วไป PW50 ยิ่งมีค่าน้อย ก็จะทำให้ระบบมีความจุข้อมูลมาก ดังนั้นระบบ HAMR ที่มีค่า PW50 น้อยจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ อย่างไรก็ตามค่า x_0, a และ PW50 จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง ได้แก่ ตำแหน่งของเลเซอร์, อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้, ลักษณะของหัวเขียนและหัวอ่าน, และคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสื่อบันทึก เป็นต้น ในทางปฏิบัติค่า PW50 จะแปรผันตรงตามค่า a และแปรผกผันกับความโค้งของการเปลี่ยนสถานะ (พิจารณาจากค่า x_0 ของแต่ละแทร็กย่อย) เพราะฉะนั้นการศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของระบบ HAMR จึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมกับระบบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงสุด

ความสำคัญกับกระบวนการเขียน (write process) ของระบบ HAMR ซึ่งมีผลทำให้สัญญาณอ่านกลับที่ได้จากหัวอ่านมีลักษณะแตกต่างจากสัญญาณอ่านกลับของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบที่ใช้กันทั่วไป (แบบแนวนอนและแบบแนวตั้ง) อย่างไรก็ตามกระบวนการอ่านและการถอดรหัสข้อมูลที่ใช้ในระบบ HAMR จะยังคงเหมือนกับที่ใช้อยู่ในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบที่ใช้กันทั่วไป นั่นคือสามารถใช้วงจรภาครับแบบเดิม (หรือวงจรตรวจหา PRML) ที่ใช้อยู่ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ปัจจุบันได้

4.2 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วยกับการความผันแปรของอุณหภูมิสูงสุดและตำแหน่งของหัวเขียนในแนวข้ามแทร็ก

ตารางที่ 4.2 การกำหนดค่าตัวแปรเบื้องต้น

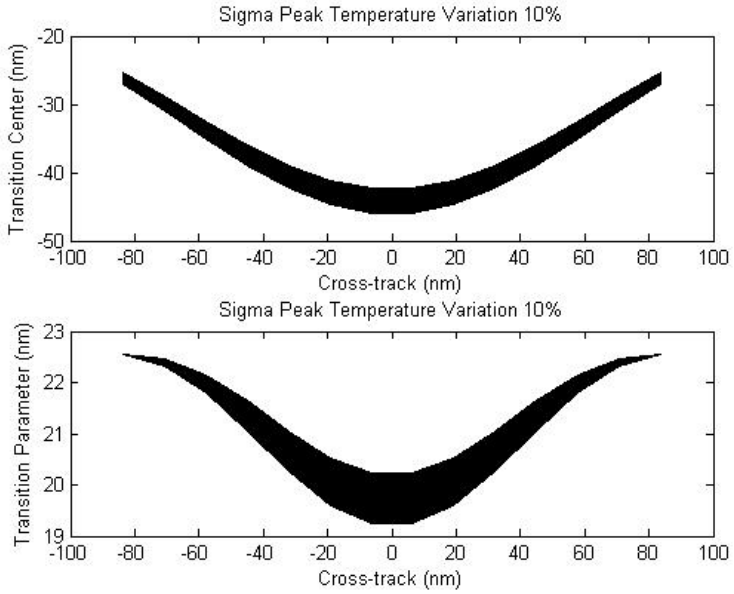
Coercivity (H_c)	-2000 $T(x)$ + 21×10^5 A/m
Remanent magnetization (M_r)	-1200 $T(x)$ + 12×10^5 A/m
Coercive squareness (S^*)	0.7
Media thickness (t)	17 นาโนเมตร
Write head to keeper layers	80 นาโนเมตร
Head field (H_g)	19×10^5 A/m
Read head gap	5 นาโนเมตร
Width of the track (W_t)	180 นาโนเมตร
Number of sub-tracks (N)	14

4.2.1 ความผันแปรของอุณหภูมิสูงสุด

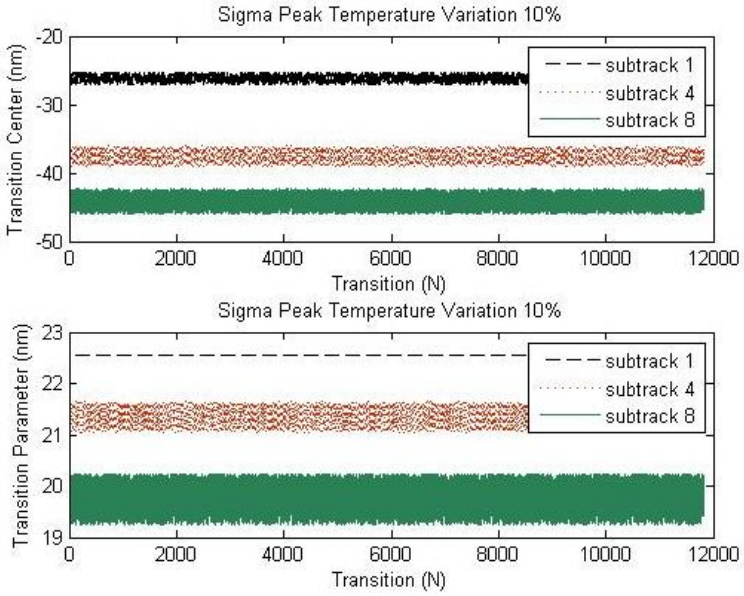
ในการทดลองเพื่อศึกษาการแปรผันของอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้เขียนบิตข้อมูลว่ามีผลกระทบต่อคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบหรือไม่ จะกำหนดให้อุณหภูมิสูงสุด T_{peak} มีการแจกแจงแบบเกาส์เซียน (Gaussian distribution) ที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 400 °C และมีค่าความแปรปรวนเท่ากับ 4 หรือเขียนเป็นสมการคณิตศาสตร์ได้คือ

$$T_{\text{peak}} = \mathcal{N}\left(\mu, \sigma^2\right) \tag{4.1}$$

และกำหนดให้อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้อยู่ภายในช่วง 20 °C จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงสุดที่ป้อนเข้าไปในระบบมีการเปลี่ยนแปลง จะส่งผลกระทบต่อตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ x_0 และค่าพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ a รูปที่ 4.4 แสดงผลที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิสูงสุดเป็น 10% ทำให้เกิดความแปรปรวน (variation) ทั้งตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะในแต่ละแทร็กย่อย และสังเกตเห็นว่าค่าความแปรปรวนในรูปที่ 4.4 จะมีค่าใกล้เคียงกัน ตั้งแต่ขอบของแทร็กที่ตำแหน่ง-40 ถึง -50 นาโนเมตร ทางด้านซ้าย และเช่นกันทางด้านขวา ตรงกลางแทร็กที่ตำแหน่ง 0 นาโนเมตร จะพบว่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.4 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามความผันแปรของค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ป้อน 10 % (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ



รูปที่ 4.5 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามความผันแปรของค่าอุณหภูมิสูงสุดที่ป้อน 10 % (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ ณ แทร็กที่ 1, 4 และ 8

รูปที่ 4.5 แสดงผลกระทบของอุณหภูมิสูงสุดที่เปลี่ยนแปลงไป 10% ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ด้านบน) และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ (ด้านล่าง) ทำการเปรียบเทียบระหว่างแทร็กที่ 1, 4 และ 8 ลักษณะของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นของทั้งสามแทร็กจะพบว่ามีลักษณะที่แตกต่างกัน แทร็กที่ 1 มีความแปรปรวนที่เกิดขึ้นน้อย และค่อยๆ เพิ่มขึ้นในแทร็กที่ 4 และแทร็กที่ 8 จะพบว่ามีค่าความแปรปรวนของตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะที่สูงมาก

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะที่มีเปอร์เซ็นต์ความผันของอุณหภูมิสูงสุดแปรแตกต่างกัน

Peak Temperature Variation					
1st sub-track		**0%**	**3%**	**5%**	**10%**
Mean	x_0 (nm)	-26.181	-26.164	-26.171	-26.163
	a (nm)	22.557	22.556	22.556	22.556
Std.	x_0 (nm)	0.0000	0.15335	0.19678	0.2206
	a (nm)	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
4th sub-track		**0%**	**3%**	**5%**	**10%**
Mean	x_0 (nm)	-37.559	-37.526	-37.539	-37.523
	a (nm)	21.363	21.366	21.362	21.365
Std.	x_0 (nm)	0.0000	0.49845	0.6395	0.7172
	a (nm)	0.0000	0.01967	0.0252	0.0283
8th sub-track		**0%**	**3%**	**5%**	**10%**
Mean	x_0 (nm)	-44.167	-44.125	-44.140	-44.120
	a (nm)	19.759	19.768	19.763	19.768
Std.	x_0 (nm)	0.0000	0.7282	0.9342	1.0478
	a (nm)	0.0000	0.0568	0.0729	0.0818
PW_{50}		**0%**	**3%**	**5%**	**10%**
Maximum (nm)		79.585	79.823	79.823	79.823
Minimum (nm)		79.585	79.312	79.314	79.312

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของแต่ละแทร็กเมื่อปรับค่าความเบี่ยงเบนของอุณหภูมิสูงสุดเป็น 0%, 3%, 5% และ 10% ค่าที่แสดงเป็นของแต่ละแทร็กย่อยที่ 1, 4 และ 8 ตามลำดับ เนื่องจากคุณลักษณะของการเปลี่ยนสถานะจะเป็นแนวเส้นโค้ง ตามรูปที่ 4.4 จึงแสดงค่าเฉพาะแทร็กย่อยที่ขอบถึงจุดกลางแทร็ก

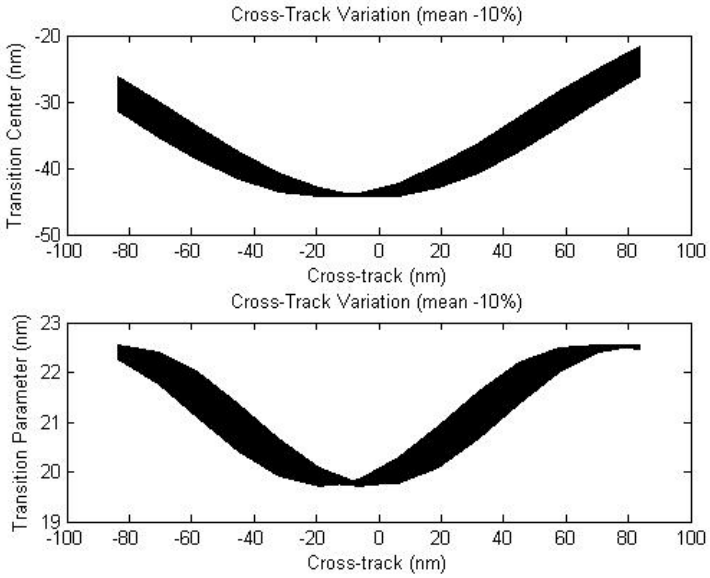
4.2.2 ความผันแปรของตำแหน่งของหัวเขียน

โดยทั่วไปตำแหน่งของหัวเขียนตามแนวขวางแทร็กปกติควรจะอยู่ ณ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางในแนวตามแทร็ก (down-track direction) และในแนวขวางแทร็ก (cross-track direction) เพื่อให้สามารถเขียนบิตข้อมูลลงในสื่อบันทึกได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริง หัวเขียนอาจจะไม่เคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงตลอด (เพราะความไม่แน่นอนในระบบ) จึงน่าสนใจที่จะศึกษาผลกระทบที่เกิดจากการเคลื่อนที่ที่ไม่แน่นอนนี้ เพราะฉะนั้นการทดลองนี้จะศึกษาการแปรผันของหัว

เขียนตามแนวขวางแทร็กว่ามีผลกระทบต่อคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบหรือไม่ โดยจะกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของหัวเขียนตามแนวขวางแทร็กเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

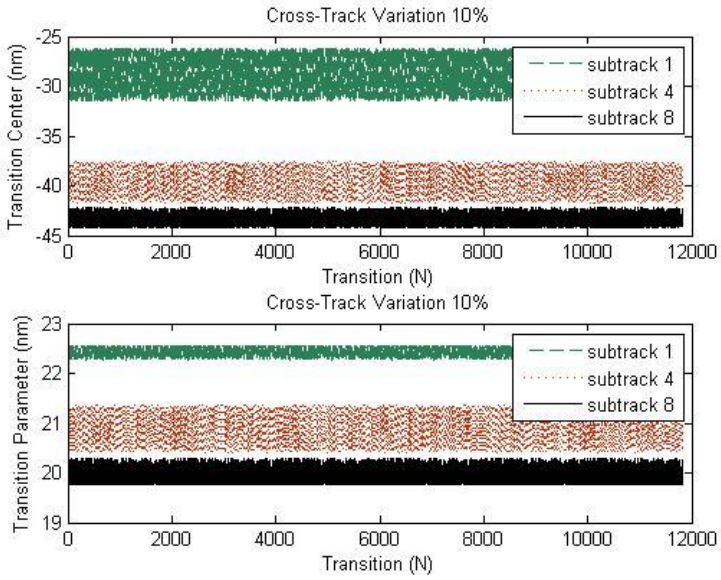
$$d = d_{\text{norm}} - \left[\left(Mean_{CTM}\right)/100\right] \times w \times \log(A) \tag{4.2}$$

เมื่อ d คือตำแหน่งของหัวเขียนในแนวขวางแทร็กที่ใช้จริง, d_{norm} คือตำแหน่งของหัวเขียนตามแนวข้ามแทร็กปกติ, $0 \leq A \leq 1$ คือเลขจำนวนจริงที่ได้จากการสุ่มแบบเอกรูป, w คือความกว้างของแทร็ก และ $Mean_{CTM}$ คือค่าเฉลี่ยตำแหน่งของหัวเขียน



รูปที่ 4.6 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามความผันแปรของค่าตำแหน่งของหัวเขียน 10 % (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ

ตำแหน่งจุดศูนย์กลางการเปลี่ยนสถานะ x_0 และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ a ที่เกิดขึ้นในแต่ละแทร็กย่อย ณ ตำแหน่งต่างๆ ของเลเซอร์ไปทางด้านซ้ายและด้านขวาของจุดกึ่งกลางช่องว่าง ซึ่งจะพบว่าการเปลี่ยนแปลงของค่า x_0 และ a ที่เกิดขึ้นมีลักษณะคล้ายกับระบบ HAMR แบบนอนแนว จะพอว่าที่จุดกึ่งกลางในรูปที่ 4.6 จะมีค่าความแปรปรวนของ x_0 และ a น้อย เมื่อเปรียบเทียบกับระห่างออกไปตำแหน่งทางด้านซ้ายและด้านขวา นอกจากจะแสดงค่าความแปรปรวนแล้วเมื่อหัวเขียนเลื่อนออกไปทางด้านซ้ายและด้านขวาจะพบว่าค่า x_0 และ a มีค่าเฉลี่ยแล้วลดลง เนื่องการสนามแม่เหล็กของหัวเขียน H_h ณ บริเวณขอบของโพล (pole edges) มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 4.7 คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะที่เปลี่ยนแปลงตามความผันแปรของค่าตำแหน่งของหัวเขียน 10 % (บน) ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ล่าง) พารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ ณ แทร็กที่ 1, 4 และ 8

รูปที่ 4.6 แสดงความแปรปรวนของตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะแสดงทุกแทร็ก 1-14 ที่จุดตรงกลางแทร็กค่าความแปรปรวนที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยและเริ่มมากขึ้นที่ขอบของแทร็กหลัก

รูปที่ 4.7 แสดงผลกระทบของความผันแปรของตำแหน่งของหัวเขียนในแนวข้ามแทร็กที่มีการเปลี่ยนแปลงไม่คงที่ 10% ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ (ด้านบน) และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ (ด้านล่าง) ทำการเปรียบเทียบระหว่างแทร็กที่ 1, 4 และ 8 ลักษณะของความแปรปรวนที่เกิดขึ้นของทั้งสามแทร็กจะพบว่ามีลักษณะที่แตกต่างกัน แทร็กที่ 1 มีความแปรปรวนที่เกิดขึ้นน้อยและค่อยๆ เพิ่มขึ้นในแทร็กที่ 4 และแทร็กที่ 8 จะพบว่ามีค่าความแปรปรวนของตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะที่สูงมาก

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าเฉลี่ยและค่าความแปรปรวนของแต่ละแทร็กเมื่อปรับค่าตำแหน่งของหัวเขียนในแนวข้ามแทร็กเป็น 0%, 3%, 5% และ 10% ค่าที่แสดงเป็นของแต่ละแทร็กย่อยที่ 1, 4 และ 8 ตามลำดับ เนื่องจากคุณลักษณะของการเปลี่ยนสถานะจะเป็นแนวเส้นโค้ง ตามรูปที่ 4.6 จึงแสดงค่าเฉพาะแทร็กย่อยที่ขอบถึงจุดกลางแทร็ก ในตารางที่ 4.4 ได้แสดงค่า PW50 สูงสุดและต่ำสุดที่คำนวณได้ เป็นระยะความกว้างของสัญญาณผลตอบสนองการเปลี่ยนสถานะที่ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของสัญญาณ ผลกระทบของการแปรผันของอุณหภูมิและการแปรผันตามแนวขวางแทร็กต่อคุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะ (ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ) ของระบบ HAMR แบบแนวตั้ง โดยได้นำแบบจำลองวิลเลียม-คอมสต็อกเชิงความร้อนและแบบจำลองไมโครแทร็กมาใช้วิเคราะห์คุณลักษณะการเปลี่ยนสถานะของระบบ จากการทดลองพบว่า ศึกษาแสดงให้เห็นว่ามีการ

เปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ เมื่อค่าของพารามิเตอร์ที่ได้ศึกษามีความแปรปรวน (ไม่คงที่)

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะและค่าเฉลี่ยพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะที่มีเปอร์เซ็นต์ความผันแปรของหัวเขียนแนวข้ามแทร็กแตกต่างกัน

Cross-track Variation					
1st sub-track		**0%**	**3%**	**5%**	**10%**
Mean	x_0 (nm)	-26.181	-26.828	-27.268	-28.393
	a (nm)	22.557	22.547	22.533	22.478
Std.	x_0 (nm)	0.0000	0.1988	0.5656	2.3700
	a (nm)	0.0000	0.0000	0.0004	0.0061
4th sub-track		**0%**	**3%**	**5%**	**10%**
Mean	x_0 (nm)	-37.559	-38.165	-38.551	-39.448
	a (nm)	21.363	21.238	21.155	20.951
Std.	x_0 (nm)	0.0000	0.1677	0.4420	1.5124
	a (nm)	0.0000	0.0073	0.0203	0.0779
8th sub-track		**0%**	**3%**	**5%**	**10%**
Mean	x_0 (nm)	-44.167	-44.032	-43.913	-43.510
	a (nm)	19.759	19.797	19.830	19.940
Std.	x_0 (nm)	0.0000	0.0103	0.0404	0.3101
	a (nm)	0.0000	0.0008	0.0031	0.0228
PW_{50}		**0%**	**3%**	**5%**	**10%**
Maximum (nm)		79.585	79.970	80.226	80.885
Minimum (nm)		79.585	79.232	78.997	78.498

บทที่ 5
สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปและวิเคราะห์ผล

เทคโนโลยี HAMR สามารถช่วยเพิ่มความจุข้อมูลได้มากกว่า 1 Tb/in^2 และยังสามารถนำมาใช้งานจริงในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ภายในระยะเวลาอันใกล้ แบบจำลองวิลเลียม-คอมสต็อกเชิงความร้อนในสมการ (2.18) และแบบจำลองไมโครแทร็กได้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ระบบ HAMR เพื่อศึกษาลักษณะเฉพาะของการเปลี่ยนสถานะ (ตำแหน่งการเปลี่ยนสถานะ x_0 และพารามิเตอร์การเปลี่ยนสถานะ a) รวมทั้งค่า PW50 ของสัญญาณอ่านกลับที่ได้จากหัวอ่าน โดยทั่วไป PW50 ยิ่งมีค่าน้อย ก็จะทำให้ระบบมีความจุข้อมูลมาก ดังนั้นระบบ HAMR ที่มีค่า PW50 น้อยจึงเป็นสิ่งที่ต้องการ อย่างไรก็ตามค่า x_0, a และ PW50 จะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายๆ อย่าง ได้แก่ ตำแหน่งของเลเซอร์, อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้, ลักษณะของหัวเขียนและหัวอ่าน, และคุณสมบัติทางแม่เหล็กของสื่อบันทึก เป็นต้น ในทางปฏิบัติค่า PW50 จะแปรผันตรงตามค่า a และแปรผกผันกับความโค้งของการเปลี่ยนสถานะ (พิจารณาจากค่า x_0 ของแต่ละแทร็กย่อย) เพราะฉะนั้นการศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของระบบ HAMR จึงเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการตัดสินใจเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมกับระบบ ซึ่งจะส่งผลทำให้ระบบมีสมรรถนะสูงสุด

ความสำคัญกับกระบวนการเขียน (write process) ของระบบ HAMR ซึ่งมีผลทำให้สัญญาณอ่านกลับที่ได้จากหัวอ่านมีลักษณะแตกต่างจากสัญญาณอ่านกลับของระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบที่ใช้กันทั่วไป (แบบแนวนอนและแบบแนวตั้ง) สภาพความเป็นแม่เหล็กของสื่อบันทึก อย่างไรก็ตามกระบวนการอ่านและการถอดรหัสข้อมูลที่ใช้ในระบบ HAMR จะยังคงเหมือนกับที่ใช้อยู่ในระบบการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบที่ใช้กันทั่วไป นั่นคือสามารถใช้วงจรภาครับแบบเดิม (หรือวงจรตรวจหา PRML) ที่ใช้อยู่ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ปัจจุบันได้

ในอนาคตงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ของระบบที่เกี่ยวข้องการบันทึกเชิงแม่เหล็กแบบแนวตั้งที่ใช้ความร้อนเข้าช่วย อาทิเช่น ระบบการให้ความร้อนไปยังสื่อบันทึก (heating) ระบบการเย็นตัวของสื่อบันทึก (cooling) เมื่อทำการเขียนข้อมูลเสร็จเรียบร้อย ผลกระทบของตัวแปรของระบบแบบไม่เป็นเชิงเส้น (non-linearity) ก็มีความสำคัญที่ผู้วิจัยจะต้องออกแบบให้ระบบสามารถรองรับได้ งานวิจัยที่สำคัญในการประมวลผลสัญญาณเชิงแม่เหล็กที่ใช้ความร้อยเข้าช่วยในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ยังคงต้องพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นคือ การเข้ารหัสข้อมูล (encode) การตรวจจับสัญญาณ (detector) เพื่อที่จะช่วยในส่วนการเพิ่มความจุในการบันทึก และความถูกต้องของข้อมูลเมื่ออ่านข้อมูลกลับคืน

บทความที่ได้รับการเผยแพร่

บทความ

1. นำเสนอบทความ “Transition Characteristics of Perpendicular Heat Assisted Magnetic Recording System” ตีพิมพ์บทความในงานประชุมวิชาการ ISEEC 2012.

2. นำเสนอบทความ “Transition Characteristics of Perpendicular Heat-Assisted Magnetic Recording with Peak Temperature and Cross-Track Variations” ตีพิมพ์บทความในงานประชุมวิชาการ iEECON 2013, Proceedings of The 2013 International Electrical Engineering Congress (iEECON2013), pp. 44-47, 2013.

เอกสารอ้างอิง

[1] T. Rausch, J. A. Bain, D. D. Stancil, and T. E. Schelesinger, “Thermal William-Comstock model for predicting transition length in a heat-assisted magnetic recording system,” IEEE Trans. Magn., vol. 40, no. 1, pp. 137-147, Jan. 2004.

[2] ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์, “การประมวลผลสัญญาณสำหรับการจัดเก็บข้อมูลดิจิตอล เล่ม 1” NECTEC และ HDDI, 2007.

[3] R. Radhakrishan, M. Fatih Erden, C. He and B. Vasic, “Transition response characteristics of heat-assisted magnetic recording and their performance with MTR codes,” IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 6, pp. 2298-2300, Jun. 2007.

[4] Y. Shiroishi, K. Fukuda, I. Tagawa, H. Iwasaki, S. Takenoiri, H. Tanaka, H. Mutoh, and N. Yoshikawa, “Future options for HDD storage,” IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 10, pp. 3816-3822, Oct. 2009.

[5] M. L. William and R. L. Comstock, “An analytic model of the write process in digital magnetic recording,” in Proc. 17th Annu. AIP Conf., 1971, pp. 724-738

[6] S. X. Wang and A. M. Taratorin, “Magnetic information storage technology,” San Diego, CA: Academic Press., 1999, p. 67.

[7] M. Fatih Erden, T. Rausch, and W. A. Challener, “Cross-track transition location and transition parameter effects in heat-assisted magnetic recording,” IEEE Trans. Magn., vol. 41, no.6, pp. 2189-2194, Jun. 2005.

[8] Kanu G. Ashar, “Magnetic disk drive technology,” IEEE Press., 1997.

[9] Alexander M. Taratorin, “Magnetic recording systems and measurements,” San Jose Research Center Hitachi Global Storage Technology., 2004.

[10] B. Vasic and E. Kurtas, “Coding and signal processing for magnetic recording system,” CRC Press, 2004.

[11] A. Kaewpukdee, N. Chirdchoo, P. Kovintavewat “Transition Characteristics of Longitudinal Heat-Assisted Magnetic Recording Systems,” ISEEC 2011,Nakhon Pathom, Thailand, 2-5 Feb 2012.

ประวัติผู้วิจัย

1. ชื่อ - นามสกุล

(ภาษาไทย) นายอดิศร แก้วภักดี

(ภาษาอังกฤษ) Mr. Adisorn Kaewpukdee

2. เลขหมายบัตรประจำตัวประชาชน

3-3302-00291-48-5

3. ตำแหน่งปัจจุบัน

อาจารย์ประจำโปรแกรมวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

4. หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

โปรแกรมวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม เบอร์ 034-261065 ต่อ 1774 เบอร์มือถือ 081-8196339

Email: adisorn@npru.ac.th หรือ adisorn44@hotmail.com

5. ประวัติการศึกษา

ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการบันทึกข้อมูล
จาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

6. สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

6.1 การประมวลผลสัญญาณสำหรับการบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็ก (Signal processing for HDD)

6.2 การออกแบบทาร์เก็ตและอีควอไลเซอร์ (Target and Equalizer design)

6.3 การวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ (Statistics analysis)

6.4 การสื่อสารไร้สายด้วยแสงที่มองเห็น (Optical wireless communication)

7. งานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

1. ***อดิศร แก้วภักดี***, ปิยะ โควินท์ทวีวัฒน์, เจษฎา สาททอง, เฉลิมชนม์ ตั้งวชิรพันธุ์, สาธิต ดำรงประเสริฐ, เพิ่มพล ธนาปุณณมาส และธนภัทร เปรมทองสุข, "เทคโนโลยีการสื่อสารด้วยแสงที่มองเห็น (Visible Light Communications Technology)", The 5th NPRU National Conference (NPRU Conference 5), 18-19 Junly, 2013
2. เจษฎา สาททอง, สุวิพล สิทธิชีวภาค, ***อดิศร แก้วภักดี***, เฉลิมชนม์ ตั้งวชิรพันธุ์, "เทคนิคการกล้ำสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับโครงข่ายคอมพิวเตอร์เฉพาะที่แบบไร้สายในช่องสัญญาณที่มีการจางหายแบบเรลีย์โดยใช้แบบจำลองห่วงโซ่มาร์คอฟแบบไม่ต่อเนื่อง (An Optical Modulation Technique for Wireless Local Area Networks on One-Path Rayleigh fading channel by Using Discrete Markov Chain Model)", The 5th NPRU National Conference (NPRU Conference 5), 18-19 Junly, 2013
3. Jesada Sartthong, Suvepon Sittichivapak, ***Adisorn Kaewpukdee***, Ittibhoom Boonpikum "Binary Exponential Increment Half Decrement Backoff Algorithm for IEEE802.11 Wireless LANs" in Proc. of ECTI - CON 2013, Krabi Thailand May 15-17, 2013
4. ***Adisorn Kaewpukdee***, Nitthita Chirdchoo, Piya Kovintavewat and Lunchakorn Wuttisittikulkij, "Transition Characteristics of Perpendicular Heat-Assisted Magnetic Recording with Peak Temperature and Cross-Track Variation," The 2013 International Electrical Engineering Congress (iEECON 2013), Chiang Mai, Thailand, March 13-15, 2013, pp. 44-47
5. Piya Kovintavewat, ***Adisorn Kaewpukdee***, and Nitthita Chirdchoo, “Effects of Thermal and Cross-Track Variations for Longitudinal Heat-Assisted Magnetic Recording Systems,” International Conference on Applied Physics and material Applications (ICAPMA 2013), Golden Beach Cha-Am, Cha-Am, Thailand, February 20-22, 2013
6. K. Thongkhome, ***A. Kaewpukdee***, P. Kovintavewat, W. Pijitrojana, “Transition Characteriztion for Perpendicular Heat-Assited Magnetic Recording,” Procedia Engineering (33), December 2012
7. J. Sartthong, S. Sittichivapak, ***A. Kaewpukdee***, I. Boonpikum, “A New Discrete Markov Chain Model of Binary Exponential Backoff Algorithm for Wireless Local Area Networks,” Procedia Engineering (33), December 2012
8. ***A. Kaewpukdee***, N. Chirdchoo, P. Kovintavewat, “Transition Characteristics of Longitudinal Heat-Assisted Magnetic Recording Systems”, International Science,

Social Science Engineering and Energy Conference (ISEEC), 2-5 February, Nakhon Pathom, Thailand., 2012

9. ***Adisorn K.***, Somsak Ch., “Products Test Time Imrovement: Statistical Process Control and Process Capability Analysis with Non-normal Data”, International Conference of Business and Industrial Research (ICBIR), 17-18 March, Bangkok, Thailand., 2010
10. ***A. Kaewpukdee***, and S. Choomchuay, “Applications of SPC and PCA of a Product Manufacturing: Energy and Cost Savings”, The International Conference on Embedded Systems and Intelligent Technology (ICESIT) 5-7 February, Chiangmai, Thailand., 2010
11. ***อดิศร แก้วภักดี*** และ สมศักดิ์ ชุมช่วย, “การปรับปรุงเวลาในการทดสอบฮาร์ดดิสก์: การควบคุมกระบวนการด้วยวิธีการทางสถิติ และการวิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 32 (EECON 32) 28-30 ตุลาคม, โรงแรมทวาราวดี รีสอร์ท, ปราจีนบุรี, 2552