

การออกแบบ วิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะ
ที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

DESIGN, ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION OF PIEZOELECTRIC
PMN-PT BASED DUAL-STAGE ACTUATOR FOR HARD DISK DRIVES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2562

KMITL-2019-EN-D-018-051

การออกแบบ วิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะ
ที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

DESIGN, ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION OF PIEZOELECTRIC
PMN-PT BASED DUAL-STAGE ACTUATOR FOR HARD DISK DRIVES



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2562
KMITL-2019-EN-D-018-051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN, ANALYSIS AND PERFORMANCE EVALUATION OF PIEZOELECTRIC
PMN-PT BASED DUAL-STAGE ACTUATOR FOR HARD DISK DRIVES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2019

KMITL-2019-EN-D-018-051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2019

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบ วิเคราะห์และประเมินสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
นักศึกษา	นาย ปริญญา วัฒนกุลชัย
รหัสประจำตัว	57601045
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2562
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ดอน อิศรากร

บทคัดย่อ

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะถือเป็นเทคโนโลยีที่สำคัญ ที่เข้ามาช่วยเรื่องการเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของข้อมูลบนแผ่นจานแม่เหล็กหมุน และสมรรถนะของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับเทคโนโลยีขั้นสูงของหัวอ่าน ความต้องการคือ ประสิทธิภาพในการเข้าถึงแถบข้อมูล ไม่เพียงแต่ต้องการความแม่นยำและถูกต้องในตำแหน่งข้อมูลเท่านั้น แต่ในการอ่าน-เขียนข้อมูลจากแตรีกหนึ่งไปอีกแตรีกหนึ่งจะต้องรวดเร็ว ดังนั้นเองความต้องการอย่างยิ่งของอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือต้องการตัวขับเคลื่อนที่มีช่วงทำงานที่กว้าง เพื่อจะสามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นในการวิเคราะห์ และประเมินสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในงานวิจัยนี้ถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน เริ่มจากการศึกษาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT เพื่อให้แน่ใจว่ามีสมรรถนะเหมาะสมสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยทดสอบเปรียบเทียบเฉพาะตัววัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้ง PZT และ PMN-PT ในแบบจำลองรูปแบบคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว ส่วนถัดมานำวัสดุเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT มาประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อทดสอบสมรรถนะเชิงสถิติศาสตร์ และเชิงพลศาสตร์ โดยเฉพาะค่าระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านจะเห็นว่ามียะยะมากกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดเดิมถึงสองเท่า และในส่วนของความถี่การสั่นพ้องจะไม่ส่งผลกระทบต่อ การเปลี่ยนแปลง ในส่วนท้ายจะทำการทดสอบความน่าเชื่อถือ ในด้านการเสื่อมคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริก จากการทดสอบด้วยความร้อนสูง แสดงให้เห็นว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส และความสามารถในการทนต่อแรงกด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก PZT โดยมีค่าความแข็งแรงต่อแรงกด จนกระทั่งแตกหักมากกว่าถึง 2 เท่า

Thesis	Design, Analysis and Performance Evaluation of Piezoelectric PMN-PT based Dual-Stage Actuator for Hard Disk Drives
Student	Mr. Parinya Wattananukulchai
Student ID.	57601045
Degree	Doctor of Engineering
Program	Electrical Engineering
Year	2019
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Don Isarakorn

ABSTRACT

Dual-stage actuation is an important technology enabler for advancing hard disk drive capacity and performance. Advanced high-performance technologies for the actuator and servo control are required in order to achieve not only accurate positioning control on data tracks but also high-speed access onto another data track. There is strong demand for hard disk drives manufacturers with high-speed access performance, which generally requires actuators with a wider servo bandwidth. This research focuses on the design analysis and performance evaluation of piezoelectric PMN-PT based dual-stage actuator for hard disk drives. In this research, several aspects related to the development of the piezoelectric PMN-PT based dual-stage actuator for hard disk drives are investigated, which cover the following topics: study the properties and comparative piezoelectric materials based unimorph cantilever model with PZT and PMN-PT; evaluate the performance of piezoelectric PMN-PT based dual-stage actuator in terms of mechanical and electrical characteristics aiming at a useful compromise performance in the stroke travel of the R/W head more than twofold improvement; investigate the degradation in ferroelectric and piezoelectric properties of PMN-PT due to high temperature of 150 °C and was 2 times harder than PZT piezoelectric.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดอน อิศรากร อาจารย์ที่ปรึกษาของข้าพเจ้า ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนการทำงานวิจัยครั้งนี้จนสำเร็จได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณในความเมตตาและกรุณาที่ท่านอาจารย์มีต่อตัวข้าพเจ้า ทั้งในด้านวิชาการและจริยธรรมอันดีงาม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานร่วมกับคนอื่นทั้งในงานวิจัยและในการดำเนินชีวิตในอนาคต

ขอขอบพระคุณ คุณ รุ่ง ศิวารัตน์ อดีตผู้อำนวยการอาวุโสฝ่ายวิศวกรรม คุณ ชัยรัตน์ ประเสริฐไทย ผู้อำนวยการอาวุโสฝ่ายวิศวกรรม คุณ สัญชัย ทองจันทร์ ผู้อำนวยการอาวุโสฝ่ายวิศวกรรม คุณ เขาวลิต จิญาธรรม ผู้จัดการอาวุโสฝ่ายวิศวกรรม คุณ ราม เทพอัมพร ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรม คุณ วีรศักดิ์ พนางาม ผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรมพัฒนา และ คุณ กิตติคุณ พิศาลวงศ์วาน อดีตรองผู้จัดการฝ่ายวิศวกรรม และผู้มีส่วนร่วมทุกคนใน บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด เป็นอย่างสูง ที่ให้คำแนะนำ และความช่วยเหลือตลอดการทดลองที่โรงงานเป็นอย่างดีในการวิจัยชิ้นนี้ จนกระทั่งได้ผลสำเร็จสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ โครงการพัฒนานักวิจัยและงานวิจัยเพื่ออุตสาหกรรม โดยเป็นความร่วมมือระหว่าง บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด และ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย ที่ได้ให้ทุนในการวิจัยนี้ วิทยานิพนธ์นี้จะไม่สำเร็จหากขาดทุนวิจัยดังกล่าว

และขอขอบพระคุณท่านประธานกรรมการและกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่ได้สละเวลาเพื่อตรวจทานงานวิจัยครั้งนี้จนกระทั่งงานวิจัยสำเร็จอย่างสมบูรณ์

ผลสัมฤทธิ์จากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบเป็นพระคุณอันยิ่งใหญ่ของ บิดา - มารดา คุณ วิษณุ - คุณ อุไรวรรณ วัฒนนุกุลชัย ภรรยา - บุตร น.ส. เบ็ญจมาศ สุขเกียรติภัย - ด.ช. เบ็ญจมิตร วัฒนนุกุลชัย คุณครู อาจารย์ ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่าน ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่าท่านผู้สนใจ จะได้รับประโยชน์อย่างยิ่งในการศึกษางานวิจัยเล่มนี้

ปริญญา วัฒนนุกุลชัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.6 รายละเอียดของดุษฎีนิพนธ์.....	4
บทที่ 2 หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	5
2.1 ส่วนประกอบของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	7
2.2 หลักการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	8
2.3 ตัวขับเร้าแบบทุติยภูมิในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	9
2.4 คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริก.....	12
2.4.1 คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง.....	12
2.4.2 คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม.....	13
บทที่ 3 การประเมินสมรรถนะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	16
3.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบ.....	16
3.2 รูปแบบการทดสอบสมรรถนะ.....	17
3.2.1 สมการคานเปลี่ยนรูปแบบขั้นเดียว.....	17
3.2.2 ชุดจับยึดคานเปลี่ยนรูปแบบขั้นเดียว.....	19
3.3 การวิเคราะห์และทดสอบเชิงพลศาสตร์.....	20
3.3.1 การจำลองหาความถี่การสั่นพ้อง.....	20
3.3.2 การวัดความถี่การสั่นพ้อง.....	22
3.4 การวิเคราะห์และทดสอบเชิงสถิตยศาสตร์.....	25
3.4.1 การคำนวณหาการเคลื่อนที่.....	25
3.4.2 การวัดการเคลื่อนที่.....	25
3.5 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	27
3.6 สรุปผลการทดลอง.....	29
บทที่ 4 การประเมินสมรรถนะของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	30
4.1 ขนาดและข้อกำหนดของวัสดุเพียโซสำหรับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 การเตรียมวัสดุสำหรับการติดตั้ง.....	31
4.3 ขั้นตอนการติดเพียโซอิเล็กทริกบนหัวอ่าน.....	32
4.3.1 หยอดกาวไม่นำและนำไฟฟ้าบนหัวอ่าน.....	33
4.3.2 การวางวัสดุเพียโซอิเล็กทริกบนหัวอ่านและกาวนำไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อ วงจรไฟฟ้า.....	34
4.4 การทดสอบการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของหัวอ่าน.....	34
4.5 เครื่องทดสอบสมรรถนะของหัวอ่าน.....	35
4.6 การทดสอบเชิงพลศาสตร์.....	37
4.7 การทดสอบเชิงสถิตยศาสตร์.....	40
4.8 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	42
4.9 สรุปผลการทดลอง.....	43
บทที่ 5 การประเมินความน่าเชื่อถือของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	44
5.1 การออกแบบงานด้วยความร้อน.....	44
5.2 ความน่าเชื่อถือเชิงพลศาสตร์.....	45
5.3 ความน่าเชื่อถือเชิงสถิตยศาสตร์.....	45
5.4 ความน่าเชื่อถือเชิงความคงทน.....	46
5.5 ผลการทดลองและการอภิปราย.....	48
5.6 สรุปผลการทดลอง.....	50
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
6.1 สรุปผลการทดลอง.....	51
6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา.....	52
เอกสารอ้างอิง.....	53
ภาคผนวก.....	57
ภาคผนวก ก บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์.....	58
ภาคผนวก ข การจดอนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์.....	87
ประวัตินักวิจัย.....	100

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลการทดลองวางวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งต่างๆบนหัวอ่านจากงานวิจัยที่ผ่านมา....	11
3.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและสแตนเลสเกรด 304.....	17
3.2 ความยาว กว้าง หนา และจำนวนของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง.....	19
3.3 ความถี่การสั่นพ้องโหมดที่ 1-5 ของวัสดุทั้ง 5 กลุ่ม.....	24
3.4 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของปลายคานระหว่างการคำนวณและการวัด.....	28
4.1 ข้อกำหนดในการควบคุมวัสดุเพียโซอิเล็กทริก.....	30
4.2 ค่าความถี่สั่นพ้องแต่ละโหมดความถี่ของวัสดุ PZT และ PMN-PT.....	42
4.3 สรุปค่าการเกิดวงฮีสเทอรีซิสและระยะเวลาเคลื่อนที่ของวัสดุ PZT และ PMN-PT.....	42
5.1 อุณหภูมิต่อความถี่การสั่นพ้องที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน.....	48



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 อัตราการเติบโตของความหนาแน่นในการจัดเก็บข้อมูล [11].....	5
2.2 ส่วนประกอบหลักของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	8
2.3 ส่วนประกอบการอ่าน-เขียนข้อมูลบนจานแม่เหล็ก.....	9
2.4 ชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (ก) ตัวขับเร้าแบบปฐมภูมิ และ (ข) ตัวขับเร้าแบบทุติยภูมิ.....	10
2.5 ตำแหน่งติดตั้งตัวขับเร้าแบบทุติยภูมิ (ก) แขนจับ (ข) ใต้หัวอ่าน และ (ค) ในหัวอ่าน.....	10
2.6 การกำหนดทิศทางของหัวอ่าน.....	11
2.7 สภาวะเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (ก) ไม่มีการกระทำ (ข) มีการบีบ และ (ค) มีการดึง....	12
2.8 สภาวะเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (ก) ไม่มีการกระทำ (ข) มีการป้อนโฟลบ และ (ค) มีการป้อนไฟบวก.....	13
2.9 ทิศทางของโพลาริเซชัน (ก) บนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก และ (ข) บนชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์.....	15
3.1 โครงสร้างคานเปลี่ยนรูปแบบขั้นเดียว (ก) ส่วนประกอบ และ (ข) การเคลื่อนที่ของจุดปลาย.....	18
3.2 ชุดทดสอบรูปแบบคานเปลี่ยนรูปแบบขั้นเดียว.....	19
3.3 สภาวะชุดทดสอบ ก) ชุดยึดจับ (ข) การโหลด (ค) การประกบ และ (ง) การเซตระยะ.....	20
3.4 ผลจากANSYS (ก) แบบจำลอง (ข) ความถี่การสั่นพ้องแต่ละโหมด.....	21
3.5 ภาพจำลองความถี่การสั่นพ้อง (ก) โหมดที่ 1 (ข) โหมดที่ 2 (ค) โหมดที่ 3 (ง) โหมดที่ 4 และ (จ) โหมดที่ 5.....	21
3.6 เครื่องทดสอบสแกนบนผิววัสดุ.....	22
3.7 การกำหนดจุดสแกนบนผิววัสดุ.....	22
3.8 จุดเริ่มต้นของเลเซอร์สแกน.....	23
3.9 ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม.....	23
3.10 ภาพแบบจำลองความถี่การสั่นพ้องจริง (ก) โหมดที่ 1 (ข) โหมดที่ 2 (ค) โหมดที่ 3 (ง) โหมดที่ 4 และ (จ) โหมดที่ 5.....	24
3.11 ระยะเวลาการเคลื่อนที่ในโหมดที่ 1 ของความถี่การสั่นพ้อง ทั้ง 5 ตัวอย่าง.....	25
3.12 เครื่องวัดระยะเชิงสถิติศาสตร์ ยี่ห้อ wyko รุ่น NT9100.....	26
3.13 การวัดระยะเคลื่อนที่ของปลายของคานเปลี่ยนรูปแบบขั้นเดียวด้วยเครื่อง wyko.....	26
3.14 ความถี่การสั่นพ้องที่วัดได้จริง และจากการจำลองทั้ง 5 โหมด.....	27
3.15 แสดงแนวโน้มของการเปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ จากการคำนวณและการวัดจริง.....	28
3.16 เปรียบเทียบระยะเวลาการเคลื่อนที่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่และเก่า ทั้ง 5 ตัวอย่าง..	29
4.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก (ก) ขนาด และ (ข) ชั้นผิววัสดุ.....	30
4.2 การเตรียมประกอบ (ก) หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (ข) วัสดุเพียโซอิเล็กทริก และ (ค) กาว.....	31
4.3 การระบุทิศทางของพื้นผิววัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการประกอบ.....	31
4.4 แสดงปริมาณกาวที่ควบคุมในการประกอบด้านบน.....	32
4.5 ภาพตัดขวางด้านข้าง แสดงปริมาณกาวที่ควบคุมในการประกอบ.....	32

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 การเตรียมประกอบ (ก) หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และ (ข) กาว.....	33
4.7 ทิศทางการหยอดกาวไม่นำไฟฟ้า.....	33
4.8 ทิศทางหยอดกาวนำไฟฟ้า (ก) จุดด้านซ้าย (ข) จุดด้านขวา.....	33
4.9 ลำดับการวางแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและกาวนำไฟฟ้า.....	34
4.10 วัดค่าตัวเก็บประจุ (ก) ชุดทดสอบ และ (ข) วงจรทางไฟฟ้าและค่าตัวเก็บประจุ.....	34
4.11 การวัดผ่านกล้องจุลทรรศน์.....	35
4.12 เครื่องทดสอบสมรรถนะของหัวอ่าน.....	35
4.13 หัวอ่านก่อนเคลื่อนที่ไปยังชุดแผ่นจานแม่เหล็กหมุน.....	36
4.14 การตั้งค่าอุปกรณ์จากกล้องถ่ายวิดีโอ.....	36
4.15 ชุดเลเซอร์ LDV.....	37
4.16 การกำหนดทิศทางแนวแกนของระบบ.....	38
4.17 ขั้นตอนการวัดค่าความถี่การสั่นพ้อง.....	38
4.18 โหมดความถี่การสั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT.....	39
4.19 โหมดความถี่การสั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT.....	39
4.20 ขั้นตอนการวัดระยะของหัวอ่าน.....	40
4.21 ระยะเคลื่อนที่ และการเกิดวงฮีสเทอรีซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT.....	41
4.22 ระยะเคลื่อนที่ และการเกิดวงฮีสเทอรีซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT.....	41
4.23 เปรียบเทียบระยะเคลื่อนที่และการเกิดวงฮีสเทอรีซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT และ PZT.....	43
5.1 เครื่องทำความร้อนยี่ห้อ Thermotron รุ่น ATSS-80-10-10.....	44
5.2 การทดลองวัดค่าความถี่การสั่นพ้องหัวอ่าน.....	45
5.3 การวัดระยะเคลื่อนที่ของหัวอ่าน.....	46
5.4 ระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านและฮีสเทอรีซิสลูป.....	46
5.5 ภาพกำลังขยายสูงถึง 2,000 เท่า (ก) PZT และ (ข) PMN-PT.....	47
5.6 เครื่องมือวัดหาค่าแรงกดสูงสุด (ก) เครื่องวัด และ (ข) การกดให้แตก.....	47
5.7 ผลของการวัดระยะเคลื่อนที่ของหัวอ่านต่ออุณหภูมิ.....	49
5.8 พื้นที่การเกิดวงฮีสเทอรีซิสต่ออุณหภูมิ.....	49
5.9 ค่าแรงกดสูงสุดระหว่าง PZT และ PMN-PT เทียบกับอุณหภูมิ.....	50

บทที่ 1

บทนำ

การอ่าน-เขียนข้อมูลด้วยหัวฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์แบบตัวขับเคลื่อนสองสถานะ (Dual-stage actuator) ที่ขับเคลื่อนด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ถือเป็นเทคโนโลยี และตัวแปรสำคัญในการพัฒนาความสามารถในการตอบสนอง การเพิ่มปริมาณความหนาแน่นของข้อมูลบนจานแม่เหล็กหมุน (disk) ในอุปกรณ์เก็บข้อมูลแบบดิจิทัลหรือที่เรียกว่าฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ (HDD, Hard Disk Drive) กล่าวคือเมื่อจานแม่เหล็กเก็บข้อมูลมีความจุข้อมูลหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์จะต้องมีสมรรถนะในการเข้าถึงขนาดข้อมูลที่เล็กลง และมีความไวสูงในการเข้าถึง

โดยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเริ่มจากความเป็นมา แรงจูงใจ ในการพัฒนาหัวฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ และความจำเป็นในการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่มาประยุกต์ใช้ในหัวฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ เพื่อตอบสนองปริมาณความจุข้อมูลและสมรรถนะที่เพิ่มขึ้นตามแนวโน้มการใช้งานในอนาคต โดยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นผลึกแบบเชิงเดี่ยว (single crystal) ชนิด lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-PT) ได้ถูกนำมาใช้ในหัวฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์จริงในการทดสอบ และเพื่อทำการเปรียบเทียบกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีโครงสร้างเป็นผลึกแบบเชิงซ้อน (polycrystalline) ชนิด Lead zirconate titanate (PZT) ที่ใช้กันในภาคอุตสาหกรรมการผลิตในฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ปัจจุบัน ผลลัพธ์ที่ได้คือ หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่มีความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลมากกว่าถึงสองเท่า และยังมีการทดสอบความน่าเชื่อถือของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการทนต่ออุณหภูมิความร้อน เพื่อให้มั่นใจได้ว่า สามารถนำไปใช้งานในภาคอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ได้จริง รวมถึงความคงทนต่อแรงกดที่มีค่ามากกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดที่ใช้ในปัจจุบันถึงสองเท่า ทำให้สามารถลดข้อเสีย จากการแตกหักของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และลดต้นทุนในกระบวนการผลิตได้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของการวิจัย

ในปัจจุบันหัวใจหลักของการเก็บข้อมูลในรูปแบบดิจิทัล ทั้งแบบออนไลน์ (online) และออฟไลน์ (offline) ส่วนใหญ่ล้วนบันทึกข้อมูลลงบนจานแม่เหล็กในคอมพิวเตอร์ คือชุดเก็บข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ (HDD) [1-2] โดยในฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ รหัสของข้อมูลจะถูกเก็บลงในแถบข้อมูลบนจานแม่เหล็กแบบหมุน และอ่าน-เขียนข้อมูลด้วยชุดหัวอ่านที่ถูกออกแบบทางกลเพื่อรองรับการหมุนของแผ่นแม่เหล็ก เป็นเวลาหลายปีอย่างต่อเนื่องมาที่ความจุข้อมูล และความเร็วของฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ได้เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบก้าวกระโดด ในปัจจุบันความจุในการเก็บข้อมูลแบบบิตต่อนิ้ว (BPI) ได้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ โดยใช้เทคโนโลยีในหัวอ่าน-เขียนข้อมูลขั้นสูง และเทคโนโลยีของจานแม่เหล็ก ในขณะที่จำนวนแทร็คต่อนิ้ว (TPI) ยังคงเพิ่มในอัตราที่ต่ำกว่า [3] เพื่อรองรับจำนวนแถบข้อมูลที่หนาแน่นเพิ่มขึ้น สิ่งสำคัญที่ตามมา คือหัวอ่าน-เขียนข้อมูลจะต้องสามารถเข้าถึงข้อมูลที่จัดเรียงอย่างหนาแน่นได้อย่างแม่นยำ ในลักษณะการเข้าถึงข้อมูล จะใช้ระบบควบคุมทำงานร่วมกันของ 2 ระบบซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ระบบปฐมภูมิ (primary actuator) เป็นระบบแรกที่ทำหน้าที่เข้าถึงข้อมูลแบบรวดเร็วแต่ไม่ละเอียด โดยการเคลื่อนที่ใช้ มอเตอร์ขดลวดเสียง (VCM, Voice Coil Motor) และระบบที่สองเรียกว่า ระบบทุติยภูมิ (second actuator) คือใช้ตัวขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบเพียโซอิเล็กทริกที่มีความละเอียดสูง ซึ่งวิธีการนี้จะทำให้ระบบควบคุมมีความแม่นยำและรวดเร็ว [4] รวมถึงขบวนการอ่าน-เขียนในระบบเซอร์โวคอนโทรล [5] มอเตอร์แบบขดลวดเสียงจะทำงานเพื่อให้หัวอ่าน-เขียนบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ในการวิ่งอ่านข้อมูลในช่วงความถี่ต่ำ ในขณะที่ตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกจะถูกติดตั้งระหว่างมอเตอร์ขดลวดเสียงและหัวอ่านเขียนข้อมูลเพื่อควบคุมในการอ่านเขียนข้อมูลที่ใช้ความไวสูง ตำแหน่งของตัวขับเคลื่อนเพียโซอิเล็กทริกได้มีงานวิจัยหลากหลายในการเลือกใช้วัสดุ ไม่ว่าจะเป็นแบบเพียโซอิเล็กทริก [6-7] คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า [8] และแบบไฟฟ้าสถิต [9-10] โดยที่หนึ่งในวัสดุเหล่านี้ได้ถูกพัฒนาเพื่อให้ตรงกับความต้องการของเทคโนโลยีในปัจจุบัน

ตัวขับเคลื่อนแบบวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ถือเป็นกุญแจที่สำคัญมากในด้านการพัฒนาด้านเทคโนโลยีของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในหลากหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นด้านสมรรถนะความน่าเชื่อถือในระบบควบคุม ความรวดเร็วในการเข้าถึงข้อมูล ราคาต้นทุนที่ถูกลงเนื่องจากจำนวนชิ้นส่วนทางกลที่ลดลง และความจุข้อมูลที่เพิ่มขึ้น ดังที่เห็นในปัจจุบันปริมาณความจุของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีเพิ่มขึ้นอย่างมากทุกปี เป็นเหตุผลที่ทำให้ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ต้องมีการพัฒนาด้วยเทคโนโลยีขั้นสูงขึ้นไป เพื่อให้มีความสามารถเข้าถึงตำแหน่งข้อมูลที่เล็กลง และความแม่นยำที่ละเอียดมากขึ้นในการอ่าน-เขียนข้อมูลบนแถบแม่เหล็ก

ในปัจจุบันวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ชนิด PZT ถูกนำมาใช้เพื่อเป็นตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ (second actuator) กันอย่างกว้างขวางสำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ (second actuator) จะทำงานเมื่อป้อนสนามไฟฟ้าเหนี่ยวนำเพื่อให้เกิดความเครียดในวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ทั้งในแนวตามยาว แนวตามขวาง และแนวความเครียดเฉือน ซึ่งเป็นผลมาจากค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก d_{33} , d_{31} และ d_{15} ตามลำดับ อย่างไรก็ตามวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่ใช้ในปัจจุบันไม่สามารถให้การเคลื่อนที่มากพอได้เนื่องมาจากค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกไม่มากพอ

ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงได้มุ่งเน้นในเรื่องการศึกษาเปรียบเทียบ และวิเคราะห์วัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้งแบบเก่า (PZT) และใหม่ (PMN-PT) โดยเริ่มทดสอบเฉพาะวัสดุเพียโซอิเล็กทริกภายใต้รูปแบบคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) เพื่อพิสูจน์ความสามารถที่เหนือกว่าของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบใหม่ หลังจากนั้นจะนำไปประยุกต์ใช้กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริง โดยมีการทดสอบทั้งสมรรถนะเชิงพลศาสตร์และเชิงสถิตยศาสตร์ ในส่วนท้าย จะทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบตัวขับเคลื่อนสองสถานะด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT เมื่อเจอความร้อนสูง เพื่อเป็นการยืนยันสมรรถนะของหัวอ่านในการรับประกันการทนต่ออุณหภูมิ

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาหลักการทำงาน การประยุกต์ใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโครงสร้างผลึกแบบเชิงเดี่ยว (single crystal) ชนิด “PMN-PT”
2. เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด “PMN-PT” มาใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริง ในเชิงอุตสาหกรรม
3. พัฒนา ทดลอง เปรียบเทียบ ทดสอบความน่าเชื่อถือ และสรุปข้อดี ข้อเสีย เพื่อสามารถนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกผลึกแบบเชิงเดี่ยว มาประยุกต์ใช้ในหัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคตให้ได้สมรรถนะสูงที่สุด

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

โครงการงานวิจัยนี้เป็นการศึกษา ทดสอบสมรรถนะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ในรูปแบบคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) ทั้งการจำลองจากการคำนวณ และการวัดข้อมูลจริงที่เกิดขึ้น เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยมีการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT มาทดสอบในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จริง โดยทำการประเมินสมรรถนะจากวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ในรูปแบบความถี่การสั่นพ้อง และสถิตยศาสตร์การวิเคราะห์การเคลื่อนที่ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่ใช้ในปัจจุบัน และการทดสอบในท้ายสุดจะทำการทดสอบประสิทธิภาพความน่าเชื่อถือทั้งในด้านความแข็งแรง และการทนต่อความร้อนของวัสดุ เพื่อนำข้อมูลที่ได้นำไปใช้ในการพัฒนาหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคต

1.4 ขั้นตอนการวิจัย

ขั้นตอนการศึกษาและวิจัยถูกแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนดังนี้

1. ศึกษาค้นคว้า คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและความต้องการของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
 ในขั้นตอนนี้จำเป็นต้องศึกษาและทำความเข้าใจถึงคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เพื่อเป็นข้อมูลยืนยันในการตัดสินใจในการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และรวมถึงการศึกษาการทำงานและองค์ประกอบของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
2. ทดสอบวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
 หลังจากที่ได้เลือกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT แล้ว ทำการทดสอบสมรรถนะในรูปแบบคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) ทั้งการจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการวัดค่าข้อมูลจริง เพื่อพิสูจน์สมรรถนะของระยะการเคลื่อนที่ เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบเดิมที่ใช้ในปัจจุบัน
3. ทดสอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
 นำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ที่เลือกแล้ว มาติดตั้งบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เพื่อนำไปทดสอบสมรรถนะ เปรียบเทียบ กับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในปัจจุบัน โดยจะใช้ชุดเครื่องมือตรวจวัดด้วยแสงเลเซอร์ Laser Doppler vibrometer (LDV) ที่ทาง บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ใช้ในการวัดข้อมูลทั้งทางด้านเชิงพลศาสตร์และเชิงสถิตยศาสตร์
4. ทดสอบความน่าเชื่อถือ
 เนื่องจากการประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT เป็นวัสดุชนิดใหม่ ทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จึงจำเป็นต้องทดสอบความน่าเชื่อถือ ในแง่การทนความร้อน เพื่อแสดงถึงขีดความสามารถของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ยังมีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิแต่ละช่วง และคุณสมบัติความแข็งแรงที่มากกว่า โดยที่จะเข้ามาช่วยลดต้นทุนของเสียจากกระบวนการผลิต
5. วิเคราะห์สรุปผล
 วิเคราะห์ผลของข้อมูล และสรุปผลการประยุกต์ใช้งานวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ เพื่อยืนยันสมรรถนะ และประสิทธิผลในการนำไปใช้จริงในอนาคต รวมถึงข้อมูลเชิงลึกที่ได้จากการทดลอง สามารถนำไปประยุกต์ใช้งาน และพัฒนาอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย และงานอุตสาหกรรมต่อไปได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ข้อมูลการประยุกต์ใช้และทดสอบวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ที่สามารถนำไปใช้ในการออกแบบ และพัฒนาอุปกรณ์ในอนาคตได้
2. หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ที่มีสมรรถนะในระยะการเคลื่อนที่ ที่มากกว่าของเดิมในปัจจุบัน และค่าการเกิดวงฮิสเทอรีซิส (hysteresis loop) มีค่าที่ต่ำกว่า เพื่อพัฒนาหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ให้มีสมรรถนะสูงสุดทางด้านการอ่าน-เขียนข้อมูลลงจานแม่เหล็ก (disk)
3. วัสดุเพียโซอิเล็กทริกโครงสร้างผลึกแบบเชิงเดี่ยว (single crystal) ชนิด PMN-PT ที่ผ่านการทดสอบเทียบกับแบบปัจจุบัน PZT มีความแข็งแรงคงทนมากกว่า สามารถลดจำนวนของเสียในกระบวนการผลิต ช่วยทำให้ลดต้นทุน เพิ่มผลผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้

1.6 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย

บทที่ 2 ภาพรวมของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และวัสดุเพียโซอิเล็กทริก ในส่วนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะกล่าวถึงแนวโน้มของความต้องการ ส่วนประกอบ และการทำงานเบื้องต้น สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเกริ่นถึงที่มาของวัสดุ และประเภทของวัสดุเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจถึงการทำงาน และนำไปใช้งาน

บทที่ 3 จะทำการวิเคราะห์ และทดลองสมรรถนะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในรูปแบบคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) โดยผ่านการจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดสอบวัดข้อมูลจริง เพื่อทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้

บทที่ 4 ทำการประยุกต์ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และทดสอบสมรรถนะเปรียบเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT โดยทำการทดสอบทั้งในเชิงพลศาสตร์และเชิงสถิตยศาสตร์

บทที่ 5 ทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ภายใต้ความร้อน และทดสอบความแข็งแรงเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT

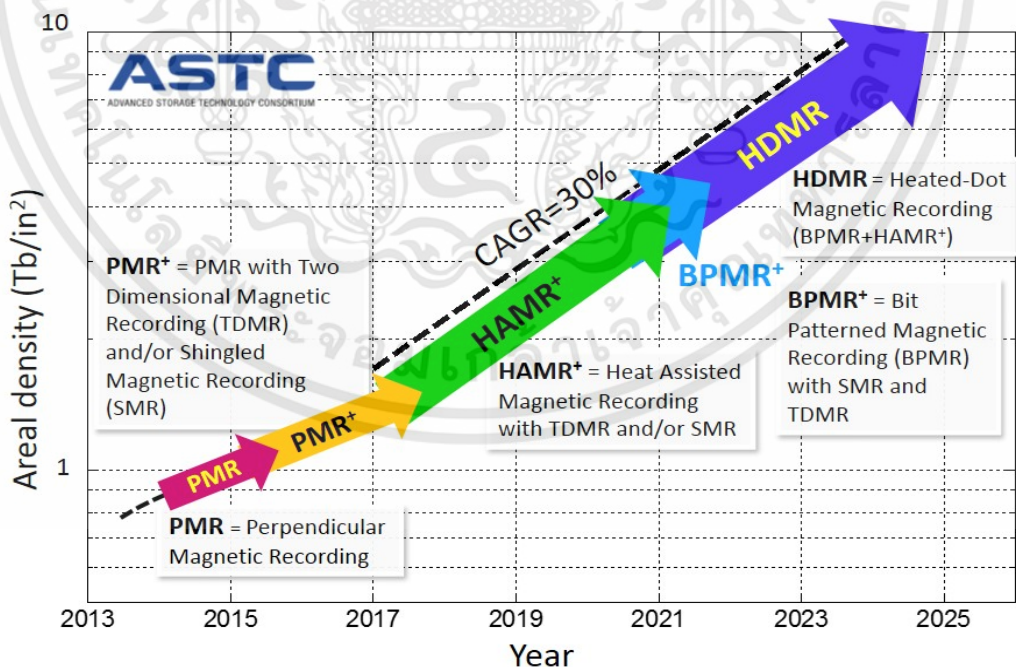
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ จะกล่าวถึงบทสรุปของการวิจัย ผลลัพธ์ที่ได้ และแนวทางในการพัฒนาต่อยอดการวิจัย

บทที่ 2

หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

หลักสำคัญของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในการอ่าน-เขียนข้อมูล บนจานแม่เหล็ก (disk) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีปริมาณความหนาแน่นของจำนวนของข้อมูล (areal density) สูงขึ้น คือความสามารถในการเข้าถึงข้อมูลอย่างรวดเร็ว จากรูปที่ 2.1 จะเห็นว่าความหนาแน่นของจำนวนของข้อมูลมีอัตราการเติบโต 30% ต่อปีโดยเฉลี่ย (Compound Annual Growth Rate, CAGR) โดยค่าที่ได้มาจากสูตรการคำนวณตามสมการที่ 2.1

แนวโน้มปริมาณความหนาแน่นของจำนวนของข้อมูลเพิ่มขึ้นแต่ขนาดของตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะไม่เพิ่มขึ้นหรือไม่เปลี่ยนแปลงตามความจุ เนื่องจากโครงสร้างสำหรับการจัดเก็บฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ถูกกำหนดให้มีขนาดมาตรฐาน 2 ขนาด คือขนาด 2.5 นิ้ว และ 3.5 นิ้ว กล่าวคือ เมื่อปริมาณการใช้ข้อมูลมีเพิ่มมากขึ้นและสูงขึ้นทุกปี ไม่ว่าจะเป็นการเก็บไฟล์ข้อมูลส่วนตัวผ่าน คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล หรือ การเข้าถึงข้อมูลออนไลน์ โดยการทำงานจะดึงข้อมูลจากเซิร์ฟเวอร์ (storage server) เช่น การเปิดไฟล์วิดีโอจากยูทูป (youtube) ภาพจากเฟสบุ๊ค (facebook) การแชทข้อมูลผ่านโปรแกรมไลน์ (line application) ฉะนั้นการเพิ่มความจุ ด้วยการเปลี่ยนอุปกรณ์ทั้งหมดจะมีผลต่อการลงทุนสูงมาก ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้ออกแบบให้เพิ่มความจุได้โดยแค่เปลี่ยนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใหม่ ส่งผลให้ผู้พัฒนาและผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะต้องพัฒนาเทคโนโลยี และนวัตกรรมให้ขึ้นส่วนภายในตัวฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถรองรับปริมาณความหนาแน่นของจำนวนของข้อมูลเพิ่มขึ้นโดยที่มีขนาดของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ยังคงเท่าเดิม



รูปที่ 2.1 อัตราการเติบโตของความหนาแน่นในการจัดเก็บข้อมูล [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการอัตราการเติบโตของปริมาณข้อมูล

$$CAGR = \left[\left(\frac{\text{End year}}{\text{First year}} \right)^{1/(n-1)} - 1 \right] \quad (2.1)$$

เมื่อ

End year = ข้อมูลปีสุดท้าย

First year = ข้อมูลปีแรก

n = จำนวนปีทั้งหมด

และจากรูปที่ 2.1 แสดงแนวโน้มของเทคโนโลยีการจัดเก็บข้อมูลบนจานแม่เหล็ก (disk) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยจะอธิบายเรียงลำดับจากความจุเทคโนโลยีจากน้อยไปมาก ดังนี้

PMR (Perpendicular Magnetic Recording) คือ การบันทึกข้อมูลแบบแนวตั้ง ทำให้การจัดเรียงข้อมูลได้มากกว่าเทคโนโลยีก่อนหน้าที่มีการจัดเก็บข้อมูลแบบแนวอน โดยมีความหนาแน่นสูงสุดถึง 1 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tbit/in²) [12-14]

PMR+ บวกในที่นี่คือเทคโนโลยีการบันทึกแม่เหล็กแบบสองมิติ (two-dimensional magnetic recording) ซึ่งมีอีกชื่อย่อคือ SMR (Shingled Magnetic Recording) คือ การจัดเรียงข้อมูลแบบ 2 มิติ กล่าวคือ การจัดเรียงข้อมูลให้มีการซ้อนทับกันของแถบข้อมูลบางส่วน เปรียบเสมือนการปูหลังคากระเบื้องของบ้านที่มีการซ้อนทับของกระเบื้องบางส่วน ด้วยวิธีนี้จะทำให้การจัดเก็บข้อมูลสามารถเพิ่มขึ้นได้อีก 25% ในขนาดเท่าเดิม

HAMR (Heat-Assisted Magnetic Recording) คือ เทคโนโลยีนี้จะใช้เลเซอร์ยิงความร้อนเพื่อช่วยขยายตำแหน่งที่จะทำการเขียนอ่าน-ข้อมูล ส่งผลให้สามารถเขียน บิต (bits) ด้วยขนาดเล็กลงและทำให้ความหนาแน่นของจำนวนของข้อมูลสูงขึ้นด้วย ซึ่งสามารถเพิ่มความจุจากเดิมได้ถึง 5 เท่า

HAMR+ (HAMR with SMR) คือ เทคโนโลยี HAMR แต่มีการเพิ่มการจัดเรียงข้อมูลแบบ 2 มิติ ทำให้สามารถจุข้อมูลได้มากขึ้นได้อีก 25 %

BPMR+ (Bit Patterned Magnetics Recording with SMR) คือ เทคโนโลยีการจัดสรรพื้นที่เก็บบิตข้อมูล โดยรูปแบบการจัดเก็บเป็นกลุ่มก้อน ดังนั้นในการจัดเป็นกลุ่มก้อนข้อมูลจะได้จำนวนบิตข้อมูลที่เยอะขึ้นแต่ขนาดเล็กลงมาก ส่งผลให้มีความหนาแน่นสูงสุดประมาณ 4 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tbit/in²) [15-17] และบวกกับเทคโนโลยีการจัดเรียงข้อมูลแบบ 2 มิติ จะทำให้สามารถจุข้อมูลได้มากขึ้นได้อีก 25 %

HDMMR (Heated-Dot Magnetic Recording) คือ การบันทึกข้อมูลเชิงแม่เหล็กแบบใช้ความร้อนเฉพาะจุด โดยมีความหนาแน่นสูงสุดประมาณ 10 เทระบิตต่อตารางนิ้ว (Tbit/in²) [18-20]

2.1 ส่วนประกอบของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

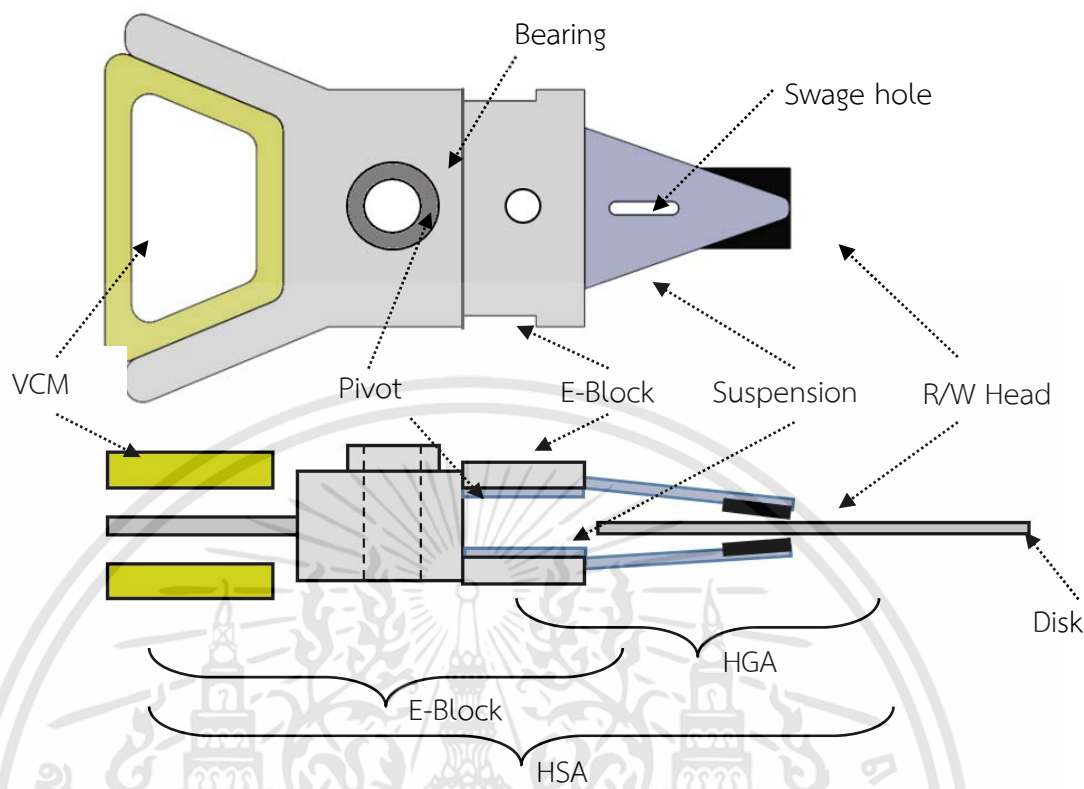
ในการพัฒนาหรือออกแบบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์มีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจส่วนประกอบหลักก่อน สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.2 โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักดังนี้

1. HGA (Head Gimbal Assembly) คือ ชุดย่อยส่วนปลายของชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ที่ประกอบไปด้วย หัวอ่าน-เขียนข้อมูล (R/W Head) ทำหน้าที่แปลงรหัสที่แถบข้อมูลด้วยสนามไฟฟ้า โดย หัวอ่าน-เขียนข้อมูล จะมีขดลวดหรือคอยล์ (coil) เพื่อเหนี่ยวนำสนามแม่เหล็กตรงปลายหัว โดยจะรับส่งข้อมูลบนจานแม่เหล็ก (disk) ตามตำแหน่งที่หัวอ่าน-เขียนข้อมูลส่งงาน โดยจะยกตัวสูงขึ้นเมื่อจานแม่เหล็กหมุนทำงาน การยกตัวของหัวอ่าน จะอาศัยการออกแบบและคำนวณแขนจับหัวอ่าน (suspension) โดยแรงลมจากการหมุนของจานแม่เหล็ก จะส่งผลให้แขนจับหัวอ่านยกตัวขึ้น ในกรณีที่ฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์หยุดทำงาน หัวอ่านจะเคลื่อนที่ออกไปจอดบริเวณนอกจานแม่เหล็กหมุนทันทีเพื่อป้องกันการหัวอ่านสัมผัสกับจานแม่เหล็กจนเกิดความเสียหายได้

2. E-block คือ ชุดขั้วต่อรูปอักษร E หรือเรียกอีกชื่อว่า แขนหัวอ่าน (actuator arm) จะเป็นส่วนที่อยู่ด้านท้ายของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ มีความสำคัญในการช่วยให้หัวอ่าน-เขียนข้อมูลเคลื่อนที่ ขึ้นส่วนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ เรียกว่ามอเตอร์ขดลวดเสียง (Voice Coil Motor, VCM) โดยบริเวณนี้จะถูกพันด้วยขดลวด เมื่อมีการป้อนสัญญาณทางไฟฟ้า จะเกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าผ่านขดลวดแล้วก่อให้เกิดการเคลื่อนที่ ในการเคลื่อนที่จะใช้จุดหมุนแกนหัวอ่าน (pivot) ที่มีชุดตลับลูกปืน (bearing) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้รองรับการหมุนและช่วยลดแรงเสียดทานระหว่างผิวสัมผัส

3. HSA (Head Stack Assembly) คือ ชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ ที่นำชุดชิ้นส่วนด้านบนมาประกอบกันเป็นชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ โดยการประกอบจะนำเอา HGA มาประกบกับ E-block ที่บริเวณรูยิงลูกบอล (swage hole) เมื่อลูกบอลถูกยิงผ่านรู ลูกบอลจะทะลุรูทั้ง swage hole และ HGA โดยที่รูบน HGA จะมีขนาดเล็กกว่ารู swage hole เมื่อลูกบอลผ่านจะเกิดการขยายรูบน HGA ทำให้ชิ้นส่วนของ HGA ยึดติดที่ E-block เมื่อยึดติดสมบูรณ์ก็จะเรียกทั้งชิ้นว่า HSA

จากรูปที่ 2.2 อธิบายเพิ่มเติมคุณสมบัติของแผ่นจานแม่เหล็กหรือดิสก์ ถึงแม้ไม่ใช่ส่วนประกอบในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ แต่เป็นองค์ประกอบที่จำเป็นในการบันทึกข้อมูลดิจิทัล กล่าวคือ จานแม่เหล็ก (disk) จะถูกฉาบเคลือบด้วยสารแม่เหล็กที่ไวต่อแสงอยู่ผิวทั้ง 2 ด้าน สารแม่เหล็กนี้สามารถลบหรือเขียนได้ใหม่อยู่ตลอดเวลา การเก็บข้อมูลลงใน จานแม่เหล็ก (disk) จะเป็นรหัสสัญญาณดิจิทัลในรูปลักษณะ “0” และ “1” ในการบันทึกข้อมูลนั้นใช้หลักการการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กในการสลับสัญญาณดิจิทัล

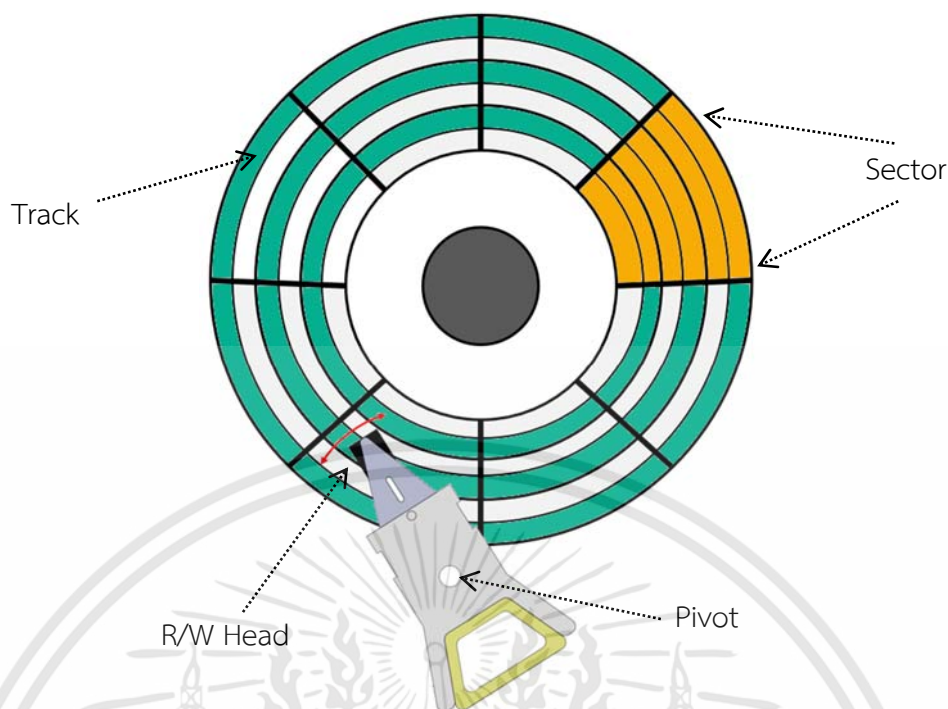


รูปที่ 2.2 ส่วนประกอบหลักของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

2.2 หลักการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

การเข้าถึงข้อมูลของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ จะเริ่มจากการทำงานของชุดหัวอ่าน-เขียนข้อมูล เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของข้อมูลที่ถูกฝังรหัสแทบข้อมูลไว้บนผิวจานแม่เหล็ก (disk) ในฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ ตามที่สัญญาณควบคุมสั่งการตามตำแหน่งเคลื่อนที่ โดยตำแหน่งหัวอ่าน-เขียนข้อมูล จะเคลื่อนที่อยู่บน แทร็ค (track) และ เซกเตอร์ (sector) ข้อมูล โดยแทร็คจะแบ่งจำนวนข้อมูลเป็นแนววงแหวน รอบวงกลมดูได้จากสีเขียวในรูปที่ 2.3 ในการระบุเลขตำแหน่งแทร็คจะเริ่มจากวงด้านนอกสุดเข้ามายังวงด้านใน ส่วนสีส้มในรูป คือ ส่วนของเซกเตอร์ โดยความหมายจะแบ่งแทร็คออกเป็นส่วนๆ ของเสี้ยวหนึ่งของวงกลม ดังนั้นหัวอ่าน-เขียนข้อมูลจะทำหน้าที่เข้าถึงข้อมูลตามตำแหน่ง แทร็คและเซกเตอร์ที่ถูกกำหนดขึ้น โดยการทำงานจะเริ่มจากตัวควบคุมคอนโทรลเลอร์แปลงคำสั่งสัญญาณตำแหน่งการเคลื่อนที่เป็นกระแสไฟฟ้าไหลผ่านเข้าสู่มอเตอร์ขดลวดเสียงซึ่งมีระบบการควบคุมแบบย้อนกลับ (feedback control system) ส่งผลให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งแถบข้อมูลที่ระบุได้อย่างแม่นยำ การเคลื่อนที่ที่จะแบ่งออกเป็น 2 จังหวะ โดยในจังหวะแรกจะเคลื่อนที่ด้วยความไวเพื่อหาตำแหน่งที่อยู่คร่าวๆ เรียกจังหวะนี้ว่า แทร็คค้นหา (track-seeking) หลังจากนั้นหัวอ่าน-เขียนข้อมูล จะอ่านค่าตำแหน่ง แล้วส่งค่าตำแหน่งป้อนกลับไปในรูปแบบของสัญญาณคลาดเคลื่อน จังหวะนี้เรียกการเคลื่อนที่ติดตาม (track-following) และจะเคลื่อนที่จนกว่าหัวอ่าน-เขียนข้อมูล อยู่ตรงจุดกึ่งกลางแทร็คหรือตำแหน่งสัญญาณคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์

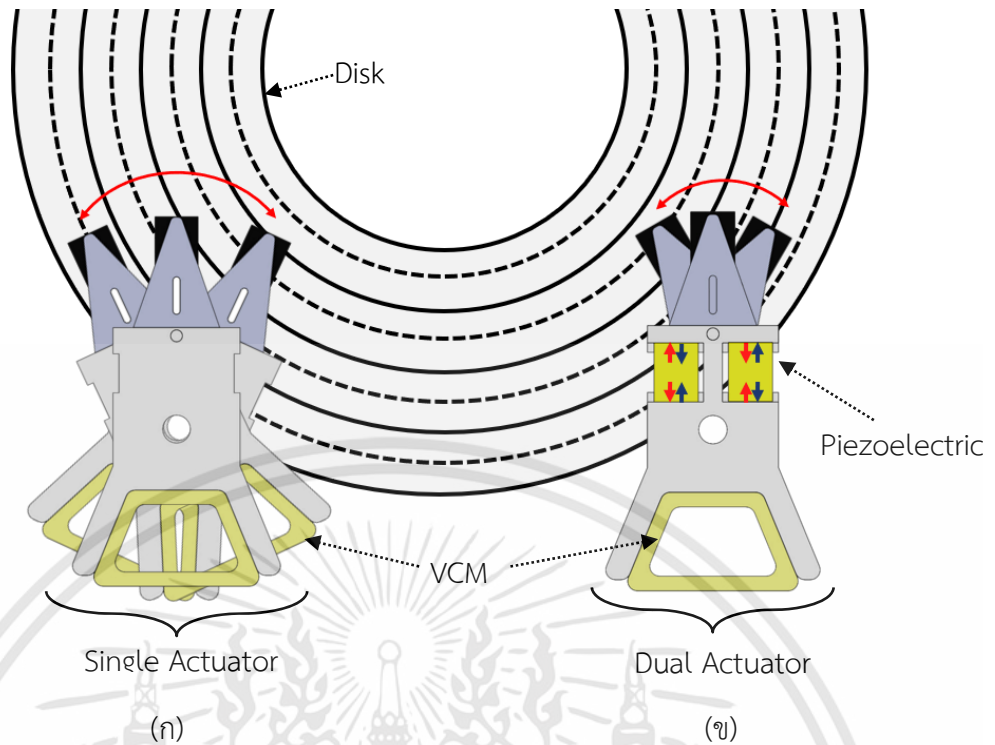
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ส่วนประกอบการอ่าน-เขียนข้อมูลบนจานแม่เหล็ก

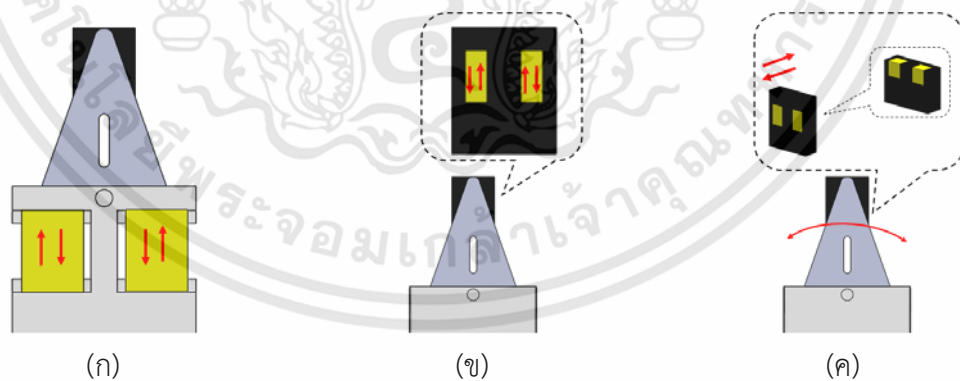
2.3 ตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของจำนวนของข้อมูลมีมากขึ้นทุกๆปี ส่งผลให้วิวัฒนาการของการพัฒนาเทคโนโลยีในการเคลื่อนที่หัวอ่าน โดยชุดหัวอ่าน-เขียนข้อมูล ถูกพัฒนาเริ่มต้นโดย Heath ในปี 1976 [21] ปริมาณความหนาแน่นของจำนวนของข้อมูลในขณะนั้นมีเพียงแค่ ระดับเมกะไบต์ต่อตารางนิ้ว (Mb/in^2) และช่วงการเคลื่อนที่ (servo bandwidth) อยู่ระหว่าง 500-1,000 เฮิรตซ์ (Hz) ดังนั้นการใช้ตัวขับเคลื่อนแบบปฐมภูมิ (single stage actuator) ที่เป็นตัวขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ขดลวดเสียงดังรูปที่ 2.4 (ก) ก็เพียงพอสำหรับเคลื่อนที่ไปยังแทร็คข้อมูลได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ ด้วยการพัฒนาความจุของความหนาแน่นของจำนวนของข้อมูลเพิ่มขึ้นมากถึง 500 เท่าในเวลาเพียงสิบกว่าปี เป็นระดับกิกะไบต์ต่อตารางนิ้ว (Gb/in^2) ในปี 1990 Yen et al [22] เป็นคนแรกที่เริ่มแนวคิดในการเพิ่มตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ (second stage actuator) มาใช้ โดยมีการพัฒนาแนวคิดของ Zappe [23] และ Fujita [24] ตามลำดับ หลังจากนั้นในปี 1991 ต้นแบบแรกของชุดหัวอ่าน-เขียนข้อมูล ถูกพัฒนาขึ้นโดย Mori [25] เพื่อแก้ปัญหาความหนาแน่นของแทร็คระหว่างแทร็คมีขนาดเล็กกว่า 1.5 ไมโครเมตร (μm) ที่ความสามารถของมอเตอร์ขดลวดเสียงดังไม่สามารถเข้าถึงได้ การเพิ่มตัวขับเคลื่อนทุติยภูมิ (second stage actuator) ทำให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์สามารถเข้าไปอ่าน-เขียนข้อมูลในแทร็ค (track) ที่มีขนาดเล็กได้ ดูได้จากรูปที่ 2.4 (ข) เป็นการทำงานร่วมกันระหว่างตัวขับเคลื่อนแบบปฐมภูมิ (single stage actuator) และตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ (second stage actuator) เรียกว่าตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะ (dual-actuator)



รูปที่ 2.4 ชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ (ก) ตัวขับเคลื่อนแบบปฐมภูมิ และ (ข) ตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ โดยมีงานวิจัยในการทดลองติดตั้งตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 2.5

1. ติดตั้งบริเวณแขนจับหัวอ่าน-เขียนข้อมูล (actuator suspension) [26-31]
2. ติดตั้งบริเวณใต้หัวอ่าน-เขียนข้อมูล (actuator slider) [32-33]
3. ติดตั้งบริเวณในหัวอ่าน-เขียนข้อมูล (actuator head) [34-35]

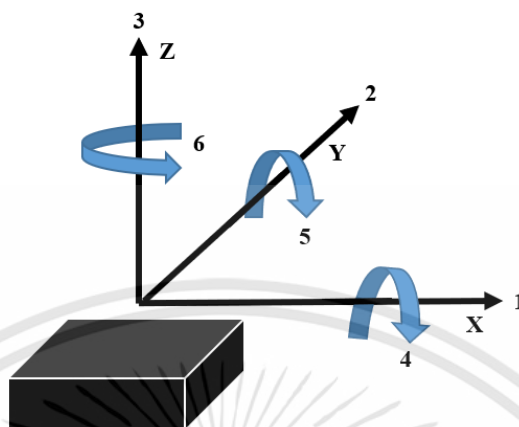


รูปที่ 2.5 ตำแหน่งติดตั้งตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ (ก) แขนจับ (ข) ใต้หัวอ่าน และ (ค) ในหัวอ่าน

จากรูปที่ 2.5 ตำแหน่งการติดตั้งมีผลต่อระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล โดยสรุปจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังในตารางที่ 2.1 การกำหนดทิศของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล ดังรูปที่ 2.6 เมื่อกำหนดทิศทาง ด้านหน้าของหัวอ่านด้วยแกน X ด้านข้างด้วยแกน Y และ ด้านบนด้วยแกน Z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวตรงกำหนดเลขในแนวแกนเป็น 1, 2 และ 3 ตามลำดับ และการเคลื่อนที่ในแนวหมุนรอบแกนเป็น 4, 5 และ 6 ตามลำดับเช่นกัน



รูปที่ 2.6 การกำหนดทิศทางของหัวอ่าน

ตารางที่ 2.1 ผลการทดลองวางวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งต่างๆบนหัวอ่านจากงานวิจัยที่ผ่านมา

Position	Materials	Mode	Bandwidth (kHz)	Normalized stroke (nm/V)	Reference
Suspension	PZT	Lateral (d_{31})	1	96	[26]
	PZT	Lateral (d_{31})	7	28	[27]
	PZT	Lateral (d_{31})	10	300	[28]
	PZT	Lateral (d_{31})	10	280	[29]
	PZT	Lateral (d_{31})	20	50	[30]
	PZT	Lateral (d_{31})	20	200	[31]
Slider	PZT	Lateral (d_{31})	7	15	[32]
	PMN-PZT	Lateral (d_{31})	22	29	[33]
Head	PZT	Shear (d_{15})	2	14	[34]
	PMN-PT	Shear (d_{15})	50	1.6	[35]

จากตารางที่ 2.1 จะเห็นว่างานวิจัยส่วนใหญ่เลือกที่จะติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในตำแหน่งแขนจับหัวอ่าน (suspension) เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่ติดตั้งได้จริง ง่ายและต้นทุนถูกที่สุดเมื่อเทียบกับอีกสองวิธี ดังนั้นตำแหน่ง แขนจับหัวอ่าน (suspension) จะเป็นตำแหน่งที่สามารถใช้งานได้จริง ในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ แต่สำหรับการติดตั้งบริเวณหัวอ่านจะมีข้อดีคือสามารถทำงานในช่วงความถี่สูงกว่าตำแหน่งแขนจับหัวอ่าน (suspension) ได้เนื่องจากจุดเคลื่อนที่อยู่บริเวณหัวอ่าน แต่สำหรับการติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในหัวอ่าน-เขียนข้อมูล จะสามารถเข้าถึงแถบข้อมูลได้ละเอียดกว่าแต่ข้อเสียคือการผลิตที่ซับซ้อนและใช้เวลามากในการขึ้นรูป ดังนั้นเองจึงไม่สามารถเกิดขึ้นจริงได้ในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

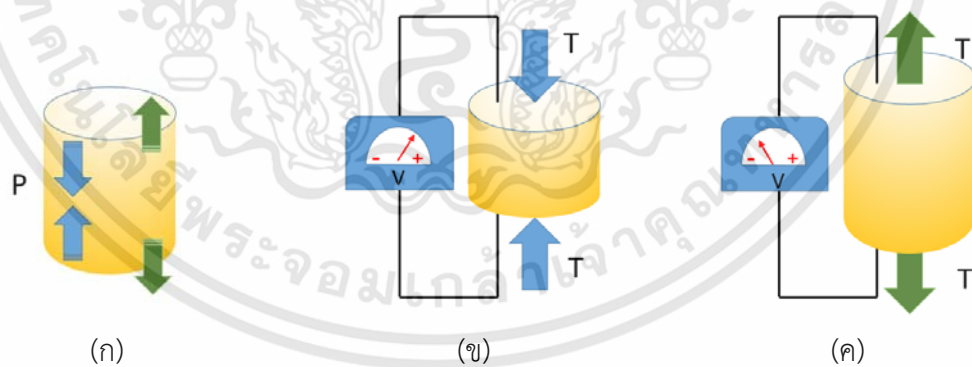
2.4 คุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกจัดเป็น วัสดุเซรามิกชั้นสูง เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษทางไฟฟ้าที่สามารถจัดเรียงโครงสร้างตามทิศสนามไฟฟ้าที่ป้อนให้ได้ เรียกปรากฏการณ์การเกิด โพลาริเซชัน (polarization) คือการจัดเรียงทิศทางของไฟฟ้า การเตรียมสารวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดจากสารอนินทรีย์ (inorganic compound) มาประกอบกันเกิดปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง จนอนุภาคของวัสดุรวมชิดติดกันจนเกิดเป็นอนุภาคขนาดเปลี่ยนไปหรือเกิดเฟสใหม่ขึ้น ซึ่งเรียกว่าการเผาอบผนึก (sintering) และทำให้โครงสร้างผลึกเปลี่ยนไปจากเดิม โดยวัสดุเพียโซอิเล็กทริก มีทั้งที่พบในธรรมชาติและจากการสังเคราะห์ โดยวัสดุที่พบในธรรมชาติ ได้แก่ แร่ควอตซ์ (quartz) แร่ทัวร์มาลีน (tourmaline) และเกลือร็อกเซลล์ (rochelle salt) เป็นต้น และจากการสังเคราะห์ผลึกขึ้นมาเพื่อสามารถนำมาจัดเรียงทิศทางโพลาริเซชัน และเลือกตัดหน้าผลึกตามทิศทางโครงสร้างผลึกที่ตอบสนองสมบัติเพียโซอิเล็กทริกได้ดีที่สุด ได้แก่ PZT, PMN-PT และแบเรียมไททานेट (BaTiO_3) เป็นต้น

สำหรับการใช้งานของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก สามารถแบ่งจำแนกออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือ สมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (direct effect) และสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (converse effect) โดยเป็นดังนี้

2.4.1 คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง

โดยมีคุณสมบัติพิเศษที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถเกิดขั้วไฟฟ้า (electrical polarization) เมื่อได้รับแรงกดหรือแรงดึงจะเปลี่ยนรูปพลังงานกล (mechanical force) ไปเป็นไฟฟ้า (voltage) จากรูปที่ 2.7 (ก) แสดงสถานะไม่มีการกระทำกล่าวคือตัววัสดุยังไม่มีแรงกระทำมาเปลี่ยนรูป เมื่อเจอแรงกดมากระทำดูรูปที่ 2.7 (ข) จะเห็นว่ามีการผลิตพลังงานไฟฟ้าออกมาในด้านบวก และในทางกลับกัน รูปที่ 2.7 (ค) เมื่อดึงวัสดุจะได้พลังงานไฟฟ้าในทิศทางลบ หากพิจารณาเป็นสมการจะได้ดังนี้



รูปที่ 2.7 สถานะเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง (ก) ไม่มีการกระทำ (ข) มีการบีบ และ (ค) มีการดึง

สมการวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบทางตรง โดยสัญลักษณ์ P แทนเวกเตอร์ของความเป็นขั้วไฟฟ้า จะได้ว่า

$$D = \frac{Q}{A} = dT \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อกำหนดให้

T คือ แรงที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัด หรือที่เรียกว่า ความเค้น (stress) มีหน่วยเป็น (N/m²)

D คือ ความหนาแน่นประจุบนผิวไดอิเล็กทริก (dielectric displacement) (pC/N)

Q คือ ประจุไฟฟ้า มีหน่วยเป็น (C)

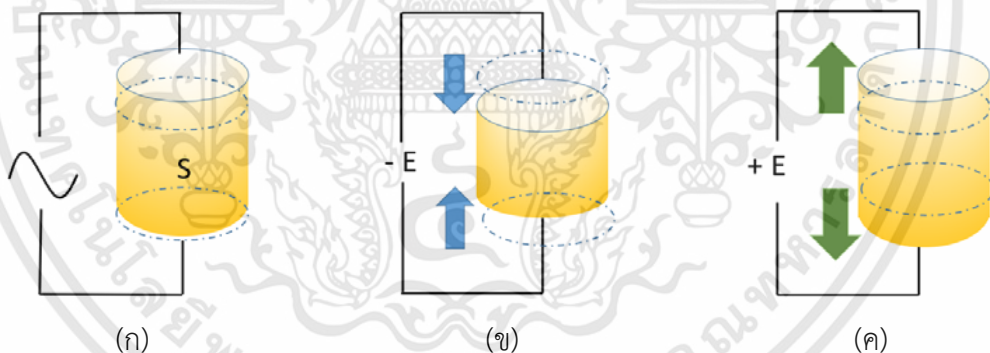
d คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric constant) ของสาร มีหน่วยเป็น (C/N)

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเนื้อสาร มีหน่วยเป็น (m²)

จากหลักการดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เช่น พื้นเก็บเกี่ยวพลังงาน (energy harvesting floor) ใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับความดัน (pressure sensor) ใช้เป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (electric generator) อุปกรณ์จุดแก๊ส (gas ignitor) เป็นต้น

2.4.2 คุณสมบัติเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม

คุณสมบัติพิเศษที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกสามารถเกิดการยืดหรือหดของวัสดุเองได้ เมื่อได้รับแรงดันไฟฟ้า จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (deformation) ขนาดของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับ ดังรูปที่ 2.8 (ก) แสดงสภาวะยังไม่มีการจ่ายไฟไปยังวัสดุ หากมีการป้อนแรงดันลบจะเกิดการหดตัวของวัสดุดังรูปที่ 2.8 (ข) และหากป้อนแรงดันบวกวัสดุจะเกิดการขยายดังรูปที่ 2.8 (ค) หากพิจารณาเป็นสมการจะได้ดังนี้



รูปที่ 2.8 สภาวะเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อม (ก) ไม่มีการกระทำ (ข) มีการป้อนไฟลบ และ (ค) มีการป้อนไฟบวก

สมการเพียโซอิเล็กทริกแบบทางอ้อมจะได้ว่า

$$S = \frac{\Delta L}{L_0} = dE \quad (2.3)$$

เมื่อกำหนดให้

S คือ ความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อวัสดุ (pm/V)

E คือ สนามไฟฟ้า (Electric field) มีหน่วยเป็น (V/m)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไป

L_0 คือ ความยาวทั้งหมด

โดยความหมายของ d คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริกทั้งแบบปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกทางตรงและทางอ้อมได้ เนื่องจากเป็นอัตราส่วนของการเปลี่ยนแปลงรูปพลังงาน เมื่อนำสมการที่ 2.2 (ปรากฏการณ์ทางตรง) และ 2.3 (ปรากฏการณ์ทางอ้อม) มาพิจารณาถึงคุณสมบัติของค่าความยืดหยุ่น (elastic) และค่าไดอิเล็กทริกของเนื้อวัสดุ สามารถเขียนเป็นสมการพื้นฐานที่ใช้อธิบายปรากฏการณ์เพียโซอิเล็กทริกได้ดังนี้

$$D = dT + \epsilon^T E \quad (2.4)$$

$$S = S^E T + dE \quad (2.5)$$

เมื่อกำหนดให้

D คือ ความหนาแน่นประจุบนผิวไดอิเล็กทริก (dielectric displacement) (C/m^2)

S คือ ความเครียด (strain)

d คือ ค่าคงที่เพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric constant) ของสาร มีหน่วยเป็น (C/N)

T คือ แรงที่มากระทำต่อพื้นที่หน้าตัด หรือที่เรียกว่า ความเค้น (Stress) มีหน่วยเป็น (N/m^2)

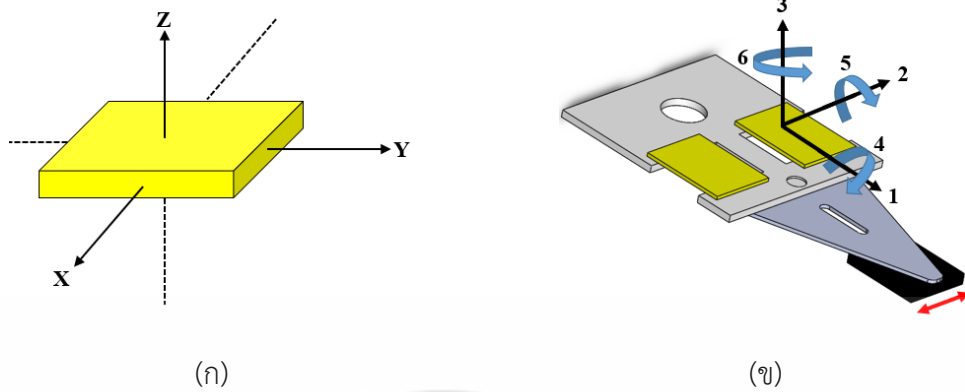
ϵ^T คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริก (dielectric constant, permittivity) โดยสัญลักษณ์ด้วย T แทนแรงกดคงที่ (F/m)

E คือ สนามไฟฟ้า (N/C)

S^E คือ สัมประสิทธิ์ความยืดหยุ่นของสาร (Elastic coefficient) โดยสัญลักษณ์ด้วย E แทนสนามไฟฟ้าคงที่

สำหรับตัวยกกำลังในสมการที่ 2.4 และ 2.5 แสดงถึงปริมาณค่าคงที่ความเค้นและสนามไฟฟ้าตามลำดับ จากรูปแบบของสองสมการจะแสดงถึงความแตกต่างของการจัดเรียงตัวในวัสดุ ซึ่งจะสัมพันธ์กับคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดนั้น และนอกจากนี้ที่สำคัญวัสดุเพียโซอิเล็กทริกยังมีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับทิศทาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องระบุทิศทางเป็นตัวห้อยในตัวแปรเพื่อแสดงถึงเงื่อนไขสถานะทิศทางที่กำหนด เช่น หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เลือกทิศทางเป็น d_{31} ซึ่งเป็นสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่แสดงถึงความสัมพันธ์ในการเกิดโพลาริเซชัน (ปรากฏการณ์ทางตรง) ในแนวตั้งฉากกับขั้วไฟฟ้าในทิศทางที่ 3 หรือในแนวตั้งของวัสดุ เมื่อทำให้เกิดความเค้นในทิศทางที่ 1 หรือด้านข้างของวัสดุ ดังแสดงในรูปที่ 2.9

จากรูปที่ 2.9 (ก) แสดงถึงการกำหนดแกนหลัก 3 ทิศทาง ส่วนรูปที่ 2.9 (ข) ใช้สำหรับเป็นตัวเลขกำกับ โดยทั่วไปสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริก มักจะระบุเป็นตัวเลขห้อยท้าย 2 ตัว เช่น d_{31} ซึ่งอธิบายได้ว่าตัวเลขแรกหมายถึง ทิศทางโพลาริเซชัน ตัวเลขที่สองหมายถึงทิศทางของความเครียด



รูปที่ 2.9 ทิศทางของโพลาริเซชัน (ก) บนแผ่นเพียโซอิเล็กทริก และ (ข) บนชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

จากหลักการดังกล่าวสามารถนำไปประยุกต์เป็นทรานสดิวเซอร์ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ดังเช่น ระบบหัวฉีดน้ำมันเชื้อเพลิง (fuel injection) ระบบควบคุมถุงลมนิรภัย (air bag) ระบบเบรค ระบบป้องกันขโมย สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ หัวอ่าน-เขียนข้อมูลฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ หัวฉีดน้ำหมึก ในเครื่องพิมพ์ กล้องถ่ายภาพดิจิทัล สำหรับอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ล้างเครื่องมือแพทย์ เครื่องกระตุ้นกล้ามเนื้อ โดยใช้คลื่นอัลตราโซนิค (ultrasonic) สำหรับอุตสาหกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น

บทที่ 3

การประเมินสมรรถนะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

ในบทนี้จะกล่าวถึงการประเมินสมรรถนะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยทำการเปรียบเทียบแบบที่ใช้ในปัจจุบันที่เรียกว่า PZT และแบบใหม่ที่น่าเสนอที่เรียกว่า PMN-PT ผ่านการจำลองโดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element analysis) และทดสอบสมรรถนะจริงผ่านคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) เพื่อให้มั่นใจได้ว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่แบบ PMN-PT มีสมรรถนะเหนือกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในปัจจุบันจริง ก่อนจะมีการนำไปประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

3.1 วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ทดสอบ

วัสดุเพียโซอิเล็กทริกในปัจจุบันถูกนำมาประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยถูกใช้เป็นตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ (second stage actuator) ในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล ในปัจจุบันมีการเลือกใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT เนื่องจากมีข้อได้เปรียบของวัสดุชนิดนี้คือมีความคงทนต่ออุณหภูมิสูง เนื่องจากบางขั้นตอนในกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีการใช้อุณหภูมิสูงถึง 150 องศาเซลเซียส เพื่อให้การยึดติดชิ้นงานแข็งตัว หากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีค่าอุณหภูมิคูรี (curie temperature, T_c) ต่ำก็จะเกิดการเสียสภาพโพลาไรเซชันเมื่อใช้งานเกินอุณหภูมิที่กำหนด จึงส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ (second stage actuator) ถึงแม้ว่าวัสดุแบบใหม่ PMN-PT มีค่าสัมประสิทธิ์เพียโซอิเล็กทริกที่สูงมาก เมื่อเทียบกับแบบ PZT ที่ใช้กันอยู่ปัจจุบัน แต่ข้อเสียคือ ค่าคงที่อุณหภูมิคูรีต่ำ ซึ่งโดยทั่วไปไม่เกิน 100 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) แต่เนื่องด้วยปัจจุบันข้อจำกัดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ในการทนต่อความร้อน และขั้นตอนการผลิตที่ซับซ้อนส่งผลให้ราคาสูง ได้มีผู้ผลิตวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเข้ามาช่วยเหลือในการพัฒนาวัสดุให้มีคุณสมบัติตามที่อุตสาหกรรมการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ต้องการได้ กล่าวคือ มีอุณหภูมิคูรีที่สูง รวมถึงต้นทุนในการผลิตให้ราคาถูกลง โดยมีผู้ผลิต 2 บริษัทที่ช่วยพัฒนาคือ TRS Technology และ HC Materials ทั้ง 2 ผู้ผลิตโรงงานที่ตั้งอยู่ในสหรัฐอเมริกา ได้พัฒนาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและได้นำมาทดลองในงานวิจัยในบทนี้

ในการทดลองได้แบ่งกลุ่ม เป็น 5 ชุด และวัสดุแบ่งเป็น 2 กลุ่ม โดยประกอบไปด้วย ดังนี้

1. กลุ่มของ PZT ประกอบด้วยวัสดุจาก บริษัท Morgan รุ่น PZT-508 และ บริษัท APC รุ่น PZT-855 สาเหตุที่เลือกใช้ เนื่องจากว่ารุ่นเหล่านี้ได้ถูกพัฒนามาใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
2. กลุ่มของ PMN-PT ประกอบด้วยวัสดุจาก บริษัท HC-MAT รุ่น PMN-PT และ บริษัท TRS Technology รุ่น TRS-4XB และ TRS-5XB

โดยค่าคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกแต่ละชนิดแสดงได้ดังตารางที่ 3.1 สำหรับค่าคุณสมบัติในตารางนี้จะถูกนำไปใช้ในการคำนวณผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ตารางที่ 3.1 ค่าคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและสแตนเลสเกรด 304

Physical and Piezoelectric property	MORGAN PZT-508	APC PZT-855	HC-MAT PMN-PT	TRS PMN-PT TRS-4XB	TRS PMN-PT TRS-5XB	SUS304 cantilever
Piezoelectric Charge Constant (10^{-12}C/N)	$d_{31} = -97$ $d_{33} = 225$ $d_{15} = 330$	$d_{31} = -175$ $d_{33} = 400$ $d_{15} = 590$	$d_{31} = -1750$ $d_{33} = 400$ $d_{15} = 590$	$d_{31} = -1650$ $d_{33} = 2820$ $d_{15} = 146$	$d_{31} = -1700$ $d_{33} = 400$ $d_{15} = 590$	-
Relative Dielectric Constant [ϵ_0]	$\epsilon_{11} = 1290$ $\epsilon_{33} = 1000$	$\epsilon_{11} = 1290$ $\epsilon_{33} = 1000$	$\epsilon_{11} = 1290$ $\epsilon_{33} = 1000$	$\epsilon_{11} = 1600$ $\epsilon_{33} = 8250$	$\epsilon_{11} = 1290$ $\epsilon_{33} = 1000$	-
Elastic Compliance Constant ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$)	$S_{11}^E = 11.5$ $S_{12}^E = -3.7$ $S_{13}^E = -4.8$ $S_{33}^E = 13.5$ $S_{44}^E = 31.9$ $S_{66}^E = 35.0$	$S_{11}^E = 11.5$ $S_{12}^E = -3.7$ $S_{13}^E = -4.8$ $S_{33}^E = 13.5$ $S_{44}^E = 31.9$ $S_{66}^E = 35.0$	$S_{11}^E = 11.5$ $S_{12}^E = -3.7$ $S_{13}^E = -4.8$ $S_{33}^E = 13.5$ $S_{44}^E = 31.9$ $S_{66}^E = 35.0$	$S_{11}^E = 70.2$ $S_{12}^E = -13.1$ $S_{13}^E = -56.0$ $S_{33}^E = 119.4$ $S_{44}^E = 14.5$ $S_{66}^E = 15.2$	$S_{11}^E = 11.5$ $S_{12}^E = -3.7$ $S_{13}^E = -4.8$ $S_{33}^E = 13.5$ $S_{44}^E = 31.9$ $S_{66}^E = 35.0$	-
Density (kg m^{-3})	7600	7600	8100	8200	8100	8000
Young's Modulus (GPa)	-	-	-	-	-	190
Poisson's Ratio	-	-	-	-	-	0.28
Size (WxLxH) (mm)	4x15x1	4x15x1	4x15x1	4x15x1	4x15x1	4x15x0.1

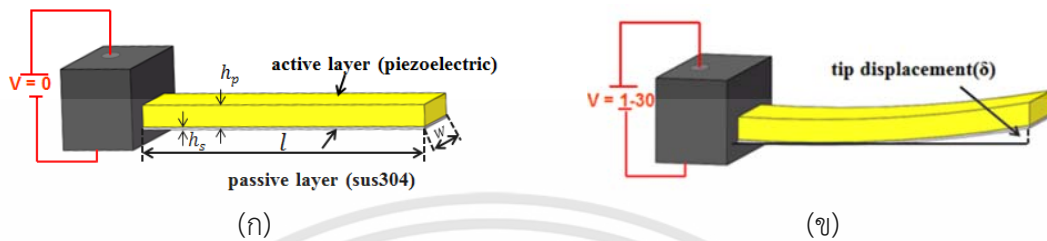
3.2 รูปแบบการทดสอบสมรรถนะ

ในการออกแบบทดสอบสมรรถนะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะทำการทดลอง ทั้งในรูปแบบการจำลอง การทดสอบวัดค่าจริงจากอุปกรณ์เครื่องมือวัด และศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 5 ชนิด ทั้งในด้านการวิเคราะห์เชิงพลศาสตร์ และเชิงสถิติศาสตร์ เพื่อนำผลลัพธ์ที่ได้มาพิจารณาเลือกวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับนำไปติดตั้งในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับรูปแบบการวิเคราะห์ ได้เลือกรูปแบบทดลองมาตรฐานที่เรียกกันว่า คานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) ในการทดลอง โดยที่สมการของคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) จะนำมาคำนวณระยะการเคลื่อนที่ และผ่านโปรแกรม ANSYS เพื่อจำลองการสมรรถนะผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ หลังจากนั้นจะทำการทดสอบสมรรถนะจริงด้วยการวัด การเคลื่อนที่ของปลายคานเปลี่ยนรูปด้วยอุปกรณ์วัด LDV ค่าข้อมูลที่ได้สามารถสรุปสมรรถนะของวัสดุได้

3.2.1 สมการคานเปลี่ยนรูปแบบชั้นเดียว

สำหรับสมการคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว จะมีสมการมาตรฐานในการคำนวณระยะของปลายคานในการเคลื่อนที่ [31] โดยในสมการมีส่วนประกอบดังแสดงต่อไปนี้ จากรูปที่ 3.1 (ก) รูปแบบโมเดลนี้ประกอบไปด้วยวัสดุหลัก 2 ชั้น คือชั้นด้านบนจะเรียกว่า ชั้นตัวกระทำ (active layer) ซึ่งจะเป็นวัสดุที่ทำให้ปลายคานเปลี่ยนรูปเมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้า ในงานวิจัยนี้จะใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก ส่วนชั้นด้านล่างเรียกว่า ชั้นถูกกระทำ (passive layer) จะเป็นวัสดุประเภทเหล็ก สแตนเลส หรือไททานเนียมก็ได้ จากรูปที่ 3.1 (ข) แสดงระยะการเคลื่อนที่ของด้านปลาย

คาน (s) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า โดยการทดสอบจำเป็นต้องทำชุดยึดจับด้านตำแหน่งเริ่มต้นของคาน เปลี่ยนรูปขึ้นเดียว และถือว่าเป็นตำแหน่งจุดกำเนิด โดยความเครียดและระยะการเคลื่อนที่ในแนวแกน Y ถือว่าเป็น 0 เพื่อให้ด้านปลายเคลื่อนที่เท่านั้น



รูปที่ 3.1 โครงสร้างคานเปลี่ยนรูปแบบขึ้นเดียว (ก) ส่วนประกอบ และ (ข) การเคลื่อนที่ของจุดปลาย

สมการรูปแบบคานเปลี่ยนรูปขึ้นเดียว แสดงได้ดังนี้

$$(3.1) \quad \delta = \frac{-3s_s s_p h_s (h_s + h_p) l^2}{4s_s s_p h_p h_s^3 + 4s_s s_p h_p h_s^3 + s_p^2 h_s^3 + s_s^2 h_p^4 + 6s_s s_p h_s^2 h_p^3} d_{31} V$$

เมื่อ

- δ คือ ระยะการเคลื่อนที่บริเวณปลายชิ้นงาน
- s_s คือ ค่าคงที่เฉพาะของวัสดุสแตนเลสเกรด 304
- s_p คือ ค่าคงที่เฉพาะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (m^2/N)
- h_s คือ ความหนาของวัสดุสแตนเลสเกรด 304
- h_p คือ ความหนาของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก
- V คือ แรงดันไฟฟ้า
- l คือ ความยาวของคาน
- d_{31} คือ ค่าคงที่เฉพาะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในการเก็บประจุ (pC/N)

ในการการทดลองนี้สำหรับชั้นฉลุกระทำจะเลือกใช้วัสดุสแตนเลสเกรด 304 (SUS304) เนื่องจากเป็นวัสดุชนิดเดียวกับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และการยึดติดของชั้นวัสดุทั้งสองจะยึดติดด้วยกาวยี่ห้อ 3M™ Scotch Weld™ รุ่น DP-460 EG แต่จากในสมการกำหนดให้ชั้นของกาวไม่มีผลต่อการทำงาน เนื่องจากชั้นกาวมีความบางมาก ดังนั้นสมการ 3.1 จะไม่นำชั้นกาวมาคิด โดยที่ความยาวและความกว้างของวัสดุทั้ง 2 ชั้นจะต้องเท่ากัน แต่จะต่างกันที่ความหนา โดยขนาดเป็นไปตามตารางที่ 3.1

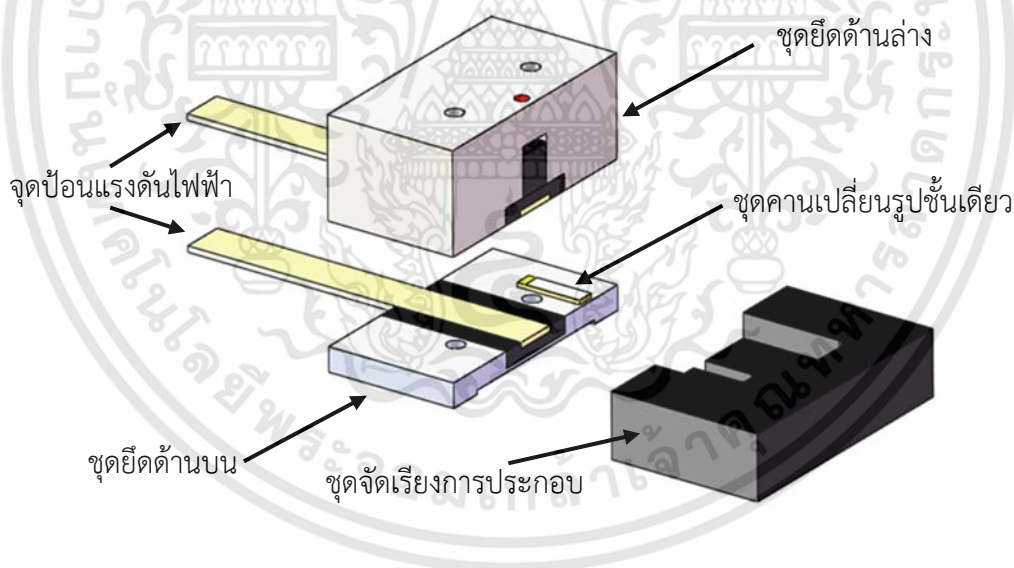
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ความยาว กว้าง หนา และจำนวนของวัสดุที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุ	ผู้ผลิต/รุ่น	ความยาว (mm)	ความกว้าง (mm)	ความหนา (mm)	จำนวน (ชิ้น)
SUS304	-	15	4	0.1	25
PZT	APC 855	15	4	1	5
PZT	Morgan 508	15	4	1	5
PMN-PT	HC-MAT	15	4	1	5
PMN-PT	TRS X4B	15	4	1	5
PMN-PT	TRS X5B	15	4	1	5

3.2.2 ชุดจับยึดคานเปลี่ยนรูปแบบชิ้นเดียว

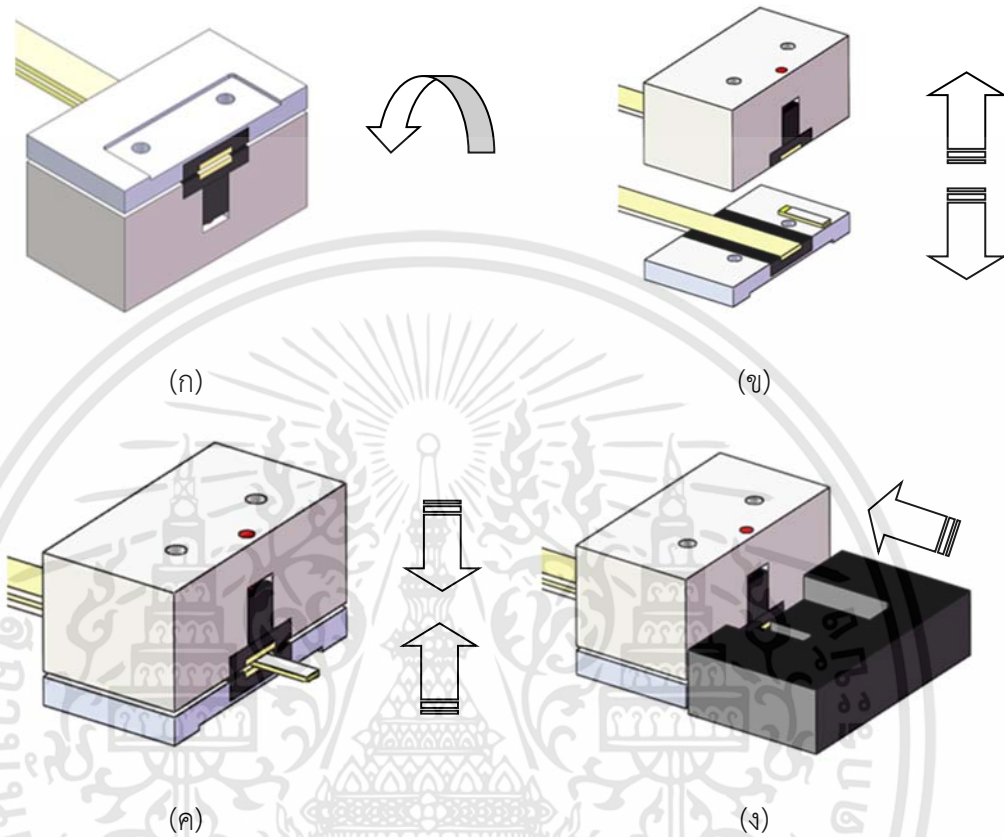
การออกแบบชุดยึดจับชิ้นงานมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคำนึงถึงการวัด ที่สามารถทำซ้ำ และได้ค่าที่แม่นยำได้ ดังนั้นการออกแบบชุดทดสอบ จึงแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนแรก เป็นส่วนยึดจับ บริเวณด้านท้ายของคานเปลี่ยนรูปชิ้นเดียว ในส่วนนี้ได้ออกแบบจุดป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกด้วย และส่วนที่สองคือชุดจัดเรียงการประกอบระหว่างชุดคานเปลี่ยนรูปชิ้นเดียว และชุดยึดด้านบนกับด้านล่าง แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ชุดทดสอบรูปแบบคานเปลี่ยนรูปชิ้นเดียว

การประกอบชุดทดสอบคานเปลี่ยนรูปชิ้นเดียว โดยเริ่มจากการนำชุดยึดจับ แสดงในรูปที่ 3.3 (ก) โดยชุดยึดจับในการประกอบต้องพลิกด้านประกอบ ดังรูปที่ 3.3. (ข) เพื่อให้ง่ายในการจัดเรียงระยะการยึดคานเปลี่ยนรูปชิ้นเดียว และให้ผลการทดลองซ้ำมีความน่าเชื่อถือ กล่าวคือระยะความยาวของคานเปลี่ยนรูปชิ้นเดียว จะต้องมีค่าคงที่เสมอ และวัสดุแต่ละชนิดจะมีการทดลอง 5 ครั้ง แต่ละครั้งใช้วัสดุประเภทเดียวกันแต่เป็นชิ้นใหม่เสมอ เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนและผลกระทบจากการติดกาว หลังจากนั้นทำการประกอบชุดยึดจับดังรูปที่ 3.3 (ค) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดจับยึดคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว จะประกบกันระหว่างชั้นบนและชั้นล่างในขั้นตอนนี้จะยังยึดไม่แน่น เนื่องจากต้องทำการจัดเรียง ให้ระยะเท่ากันทุกครั้ง ดังรูปที่ 3.3 (ง) นำอุปกรณ์เซตระยะ มาจัดเรียง ชิ้นงานก่อน และทำการยึดชุดทดสอบให้แน่นก่อนการทดลอง



รูปที่ 3.3 สภาวะชุดทดสอบ (ก) ชุดยึดจับ (ข) การโหลด (ค) การประกบ และ (ง) การเซตระยะ

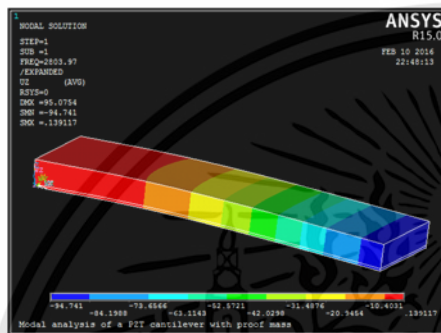
3.3 การวิเคราะห์และทดสอบเชิงพลศาสตร์ (Dynamic analysis)

การทดลองและศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเชิงพลศาสตร์เป็นสิ่งที่สำคัญมากสำหรับการนำไปออกแบบอุปกรณ์หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เนื่องจากผลกระทบจากความถี่การสั่นพ้อง (resonant frequency) จะส่งผลต่อความเสียหายให้อุปกรณ์ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ ดังนั้นในส่วนนี้จึงทำการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ผ่านโปรแกรม ANSYS และทดสอบวัดค่าจริงจากเครื่องมือวัดเลเซอร์สแกนพื้นที่ผิวด้านบนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก เพื่อยืนยันความถูกต้องของการวิเคราะห์ผ่านแบบจำลองและการวัดค่าข้อมูลจริงที่เกิดขึ้น

3.3.1 การวิเคราะห์หาความถี่สั่นพ้อง (Resonance analysis)

การจำลองในรูปแบบโมเดลของคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) โดยนำสมการมาเขียนโปรแกรมเพื่อจำลองการเกิดความถี่สั่นพ้องด้วยโปรแกรม ANSYS สำหรับค่าคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกและค่าคุณลักษณะทางกายภาพแต่ละชนิดสามารถนำค่าจากตารางที่ 3.1 และตารางที่ 3.2 นำไปใช้ในการจำลองความถี่การสั่นพ้อง ซึ่งความถี่ที่ใช้ในการทดสอบการจำลองด้วยช่วงความถี่ตั้งแต่ 100 เฮิรตซ์ (Hz) ถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) ความถี่ในช่วงนี้เป็นย่านเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ที่ใช้ในงานในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งส่งผลต่อการออกแบบและการเขียนโปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล ให้หลีกเลี่ยงช่วงความถี่สั่นพ้องเพราะจะทำให้เกิดความเสียหายได้ จากการจำลองผ่านโปรแกรมจะให้ความถี่สั่นพ้องของวัสดุ PZT และ PMN-PT สอดคล้องกัน กล่าวคือ วัสดุ PZT และ PMN-PT จะมีโหมดความถี่สั่นพ้องเหมือนกัน โดยแต่ละโหมดมีดังนี้ โหมดที่ 1 มีค่า 2.8 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) โหมดที่ 2 มีค่า 8.1 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) โหมดที่ 3 มีค่า 17 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) โหมดที่ 4 มีค่า 27 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) และ โหมดที่ 5 มีค่า 43 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) ผลลัพธ์ที่ได้จากโปรแกรมจะแบ่งเป็น 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 จะเป็นภาพการจำลอง ดังรูปที่ 3.4 (ก) และค่าความถี่สั่นพ้องทั้ง 5 โหมด ดังรูปที่ 3.4 (ข)



(ก)

SET,LIST Command

File

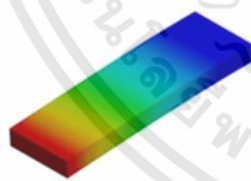
***** INDEX OF DATA SETS ON RESULTS FILE *****

SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	2804.0	1	1	1
2	8192.2	1	2	2
3	17099.	1	3	3
4	27737.	1	4	4
5	43521.	1	5	5

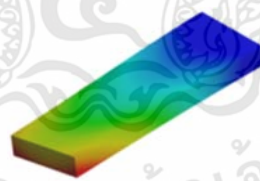
(ข)

รูปที่ 3.4 ผลจากANSYS (ก) แบบจำลอง (ข) ความถี่การสั่นพ้องแต่ละโหมด

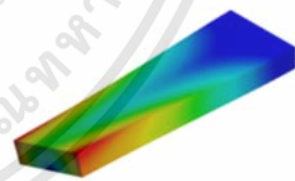
สำหรับภาพจำลองการเกิดความถี่การสั่นพ้องทั้ง 5 โหมดเป็นดังรูปที่ 3.5 (ก-จ) เป็นรูปที่แสดงความถี่การสั่นพ้องโหมดที่ 1-5 ตามลำดับ



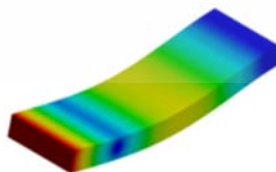
(ก)



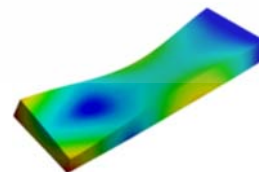
(ข)



(ค)



(ง)



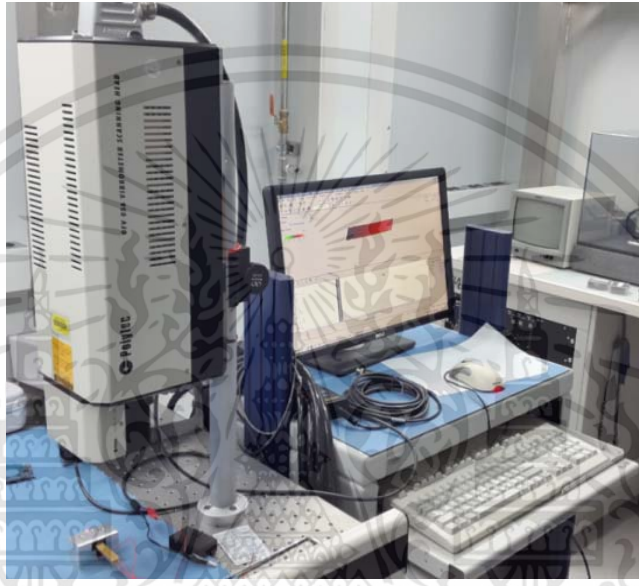
(จ)

รูปที่ 3.5 ภาพจำลองความถี่การสั่นพ้อง (ก) โหมดที่ 1 (ข) โหมดที่ 2 (ค) โหมดที่ 3 (ง) โหมดที่ 4 และ (จ) โหมดที่ 5

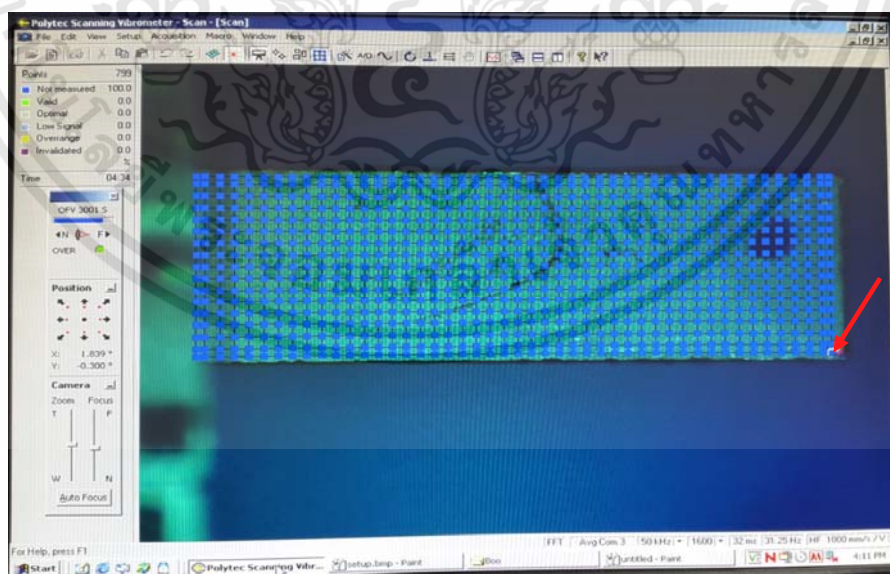
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 การวัดความถี่การสั่นพ้อง

เพื่อเป็นการยืนยันความถูกต้อง ของแบบจำลองที่ได้จากโปรแกรม ANSYS จึงได้ทำการทดลองวัดค่าความถี่การสั่นพ้อง ที่เกิดขึ้นจริงบนแบบจำลองคานเปลี่ยนรูปชิ้นเดียว โดยใช้เครื่องมือวัดเลเซอร์สแกนพื้นที่ผิวบนของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกโดยใช้ชุดทดสอบเลเซอร์ของยี่ห้อ Polytec รุ่น OFV056 ดังรูปที่ 3.6 โดยกำหนดเงื่อนไขทดลองเป็น ป้อนแรงดันคงที่ 10 โวลต์ ความถี่ใช้ใน ช่วงตั้งแต่ 100 เฮิรตซ์ (Hz) ถึง 50 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) บริเวณจุดที่สแกนทำการกำหนดจุดจำนวน 1,569 จุด ดังรูปที่ 3.7



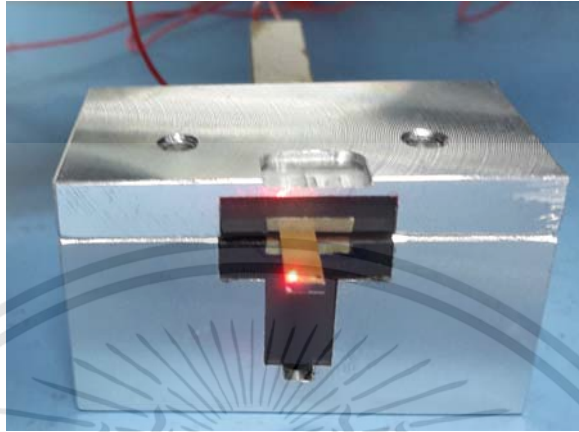
รูปที่ 3.6 เครื่องทดสอบสแกนบนผิววัสดุ



รูปที่ 3.7 การกำหนดจุดสแกนบนผิววัสดุ

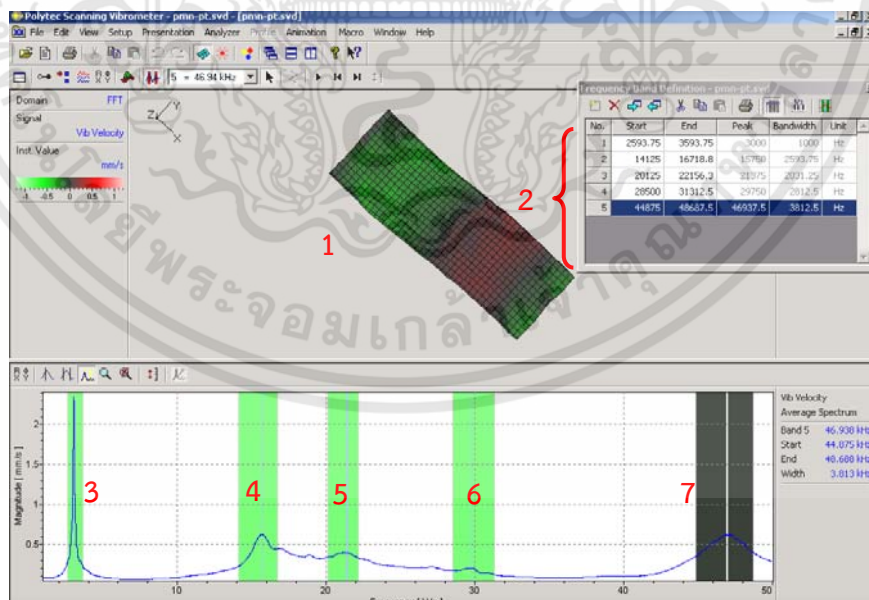
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกำหนดจุดเริ่มต้นสแกน จะกำหนดไว้ที่ปลายคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว ดังรูปที่ 3.7 โดยตำแหน่งปลายลูกศรสีแดงคือจุดเริ่มต้น และการทดสอบจริงเป็นดังรูปที่ 3.8 จากรูปจะเห็นจุดเลเซอร์สีแดงในบริเวณด้านปลายของคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว



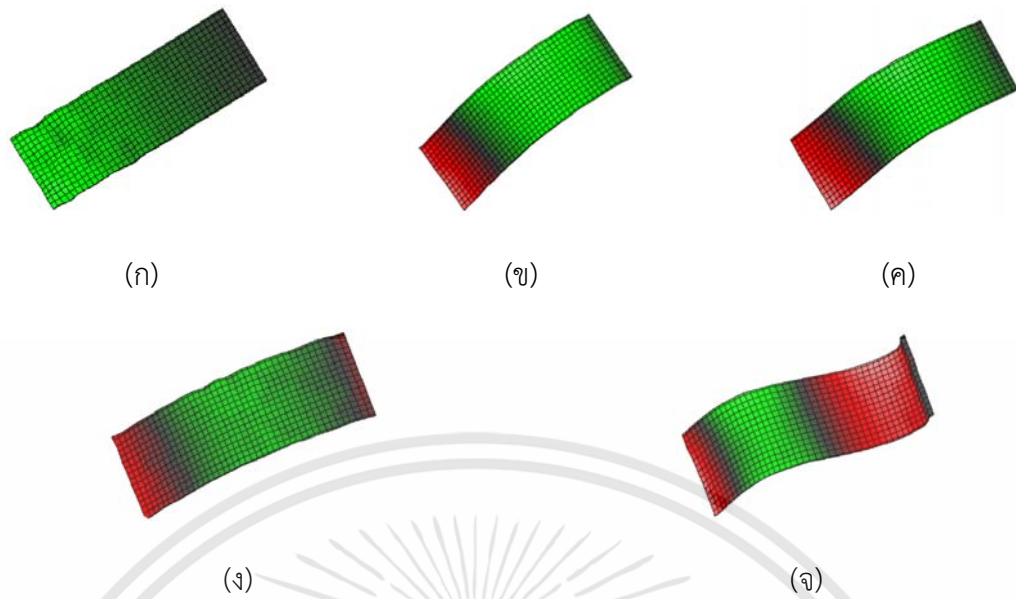
รูปที่ 3.8 จุดเริ่มต้นของเลเซอร์สแกน

ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรมจะเป็นดังรูปที่ 3.9 จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนตามหมายเลข โดยที่เลข 1 จะเป็นภาพจำลองการเคลื่อนที่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก หมายเลขที่ 2 จะเป็นข้อมูลสรุปความถี่การสั่นพ้องแต่ละโหมดโดยจะบอกช่วงเริ่มต้นและสิ้นสุดของแต่ละโหมดและสรุปตัวเลขความถี่สูงสุดในช่วงนั้น สำหรับหมายเลข 3-7 จะเป็นกราฟแสดงความถี่การสั่นพ้องแต่ละช่วงโดยเป็นความถี่การสั่นพ้องตั้งแต่โหมดที่ 1-5 ตามลำดับ



รูปที่ 3.9 ผลการทดลองที่ได้จากโปรแกรม

สำหรับภาพแบบจำลองจริงที่เกิดความถี่การสั่นพ้องทั้ง 5 โหมด เป็นดังรูปที่ 3.10 (ก-จ) เป็นรูปที่แสดงความถี่การสั่นพ้องโหมดที่ 1-5 ตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



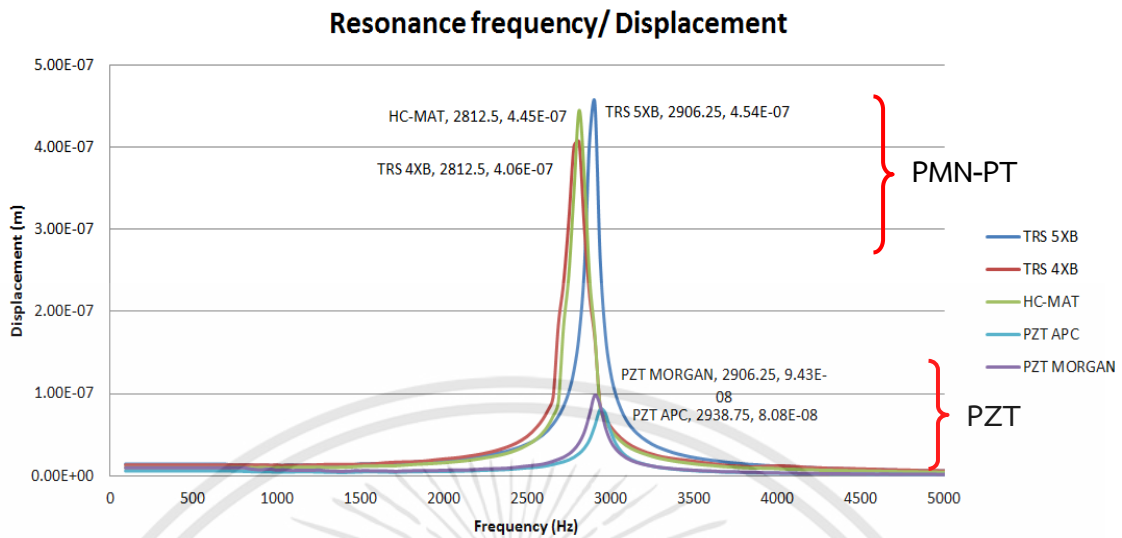
รูปที่ 3.10 ภาพแบบจำลองความถี่การสั่นพ้องจริง (ก) โหมดที่ 1 (ข) โหมดที่ 2 (ค) โหมดที่ 3 (ง) โหมดที่ 4 และ (จ) โหมดที่ 5

เมื่อนำค่าที่ได้จากการจำลองผ่านโปรแกรม ANSYS และการทดลองวัดค่าจริงจาก LDV มาเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 3.3 พบว่ามีค่าสอดคล้องกัน

ตารางที่ 3.3 ความถี่การสั่นพ้องโหมดที่ 1-5 ของวัสดุทั้ง 5 กลุ่ม

Material	Model	Tester	Frequency Modes (kHz)				
			1 st Mode	2 nd Mode	3 rd Mode	4 st Mode	5 st Mode
PMN-PT	TRS	LDV	2.92	8.14	17.15	27.77	43.56
		ANSYS	2.85	8.15	17.06	27.74	43.51
	4XB	LDV	2.83	8.16	17.05	27.52	43.56
		ANSYS	2.82	8.21	17.09	27.75	43.68
	HC-MAT	LDV	2.85	8.22	17.18	27.59	43.61
		ANSYS	2.86	8.15	17.14	27.58	43.58
PZT	APC	LDV	2.95	8.19	17.15	27.66	43.52
		ANSYS	2.82	8.18	17.09	27.83	43.64
	Morgan	LDV	2.93	8.23	17.25	27.82	43.66
		ANSYS	2.85	8.22	17.16	27.68	43.55

หากนำความถี่การสั่นพ้องในโหมดที่ 1 ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้ง PZT และ PMN-PT ดังรูปที่ 3.11 จะเห็นว่ากลุ่มของวัสดุ PMN-PT มีค่าการเคลื่อนที่ที่สูงกว่า PZT ถึง 4-5 เท่า



รูปที่ 3.11 ระยะเวลาเคลื่อนที่ในโหมดที่ 1 ของความถี่การสั่นพ้อง ทั้ง 5 ตัวอย่าง

3.4 การวิเคราะห์และทดสอบเชิงสถิตยศาสตร์ (Static analysis)

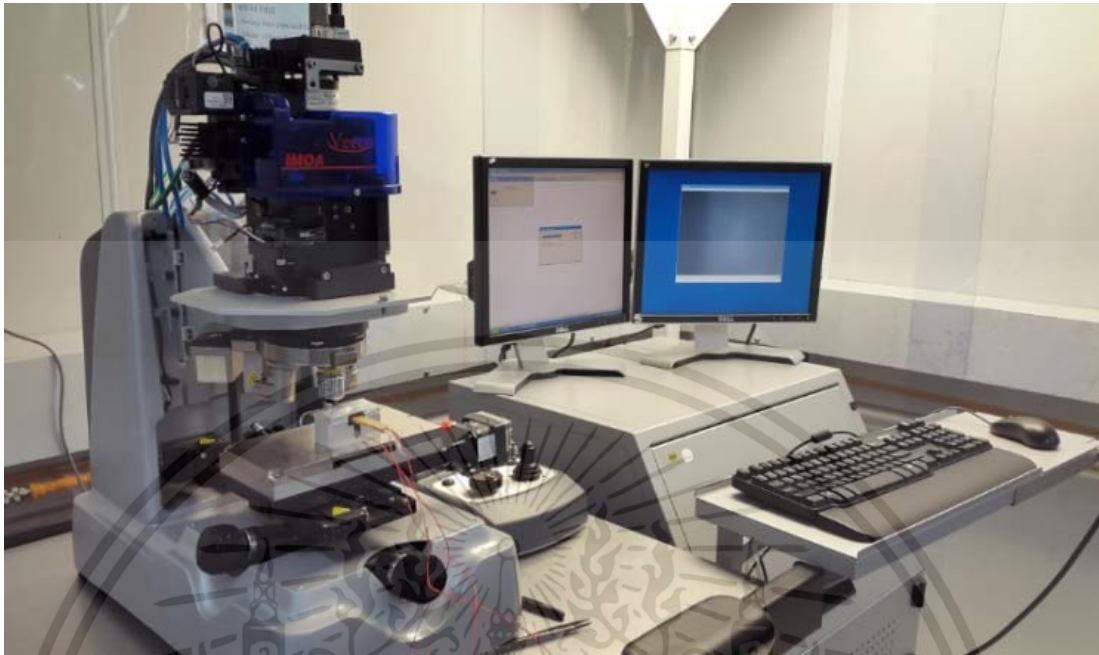
ในการหาระยะการเคลื่อนที่ของแบบจำลองคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว ได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณจากสมการที่ 3.1 และการวัดระยะจริงที่เกิดขึ้นจากการทดลอง เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าคงที่ให้กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก และวัดระยะเคลื่อนที่ในสภาวะหยุดนิ่งสามารถวัดได้จากเครื่องวัดด้วยแสง (optical profiling system) ซึ่งเป็นอุปกรณ์เครื่องมือวัดในห้องปฏิบัติการของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด โดยการคำนวณและการทดลองเป็นดังนี้

3.4.1 การคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่

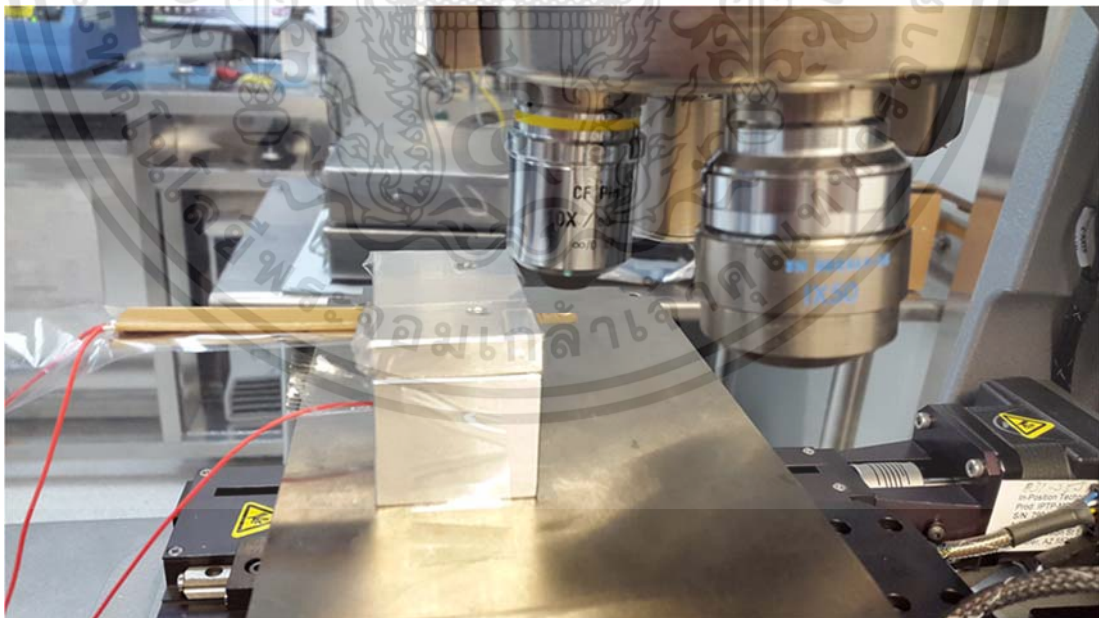
คำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ของรูปแบบคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว สามารถคำนวณจากสมการมาตรฐานที่ 3.1 โดยทำการแทนค่าแรงดันไฟฟ้าคงที่ ในช่วงตั้งแต่ 0-30 โวลต์ โดยจะแทนค่าเพิ่มขึ้นครั้งละ 5 โวลต์ สำหรับค่าตัวแปรคุณสมบัติของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและสแตนเลสเกรด 304 ในสมการ สามารถนำค่าจากตารางที่ 3.2 ไปแทนค่าในสมการ เมื่อแทนค่าที่ต้องการแล้วจะได้ระยะเวลาเคลื่อนที่ของปลายคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว ดังตารางที่ 3.4

3.4.2 การวัดการเคลื่อนที่

สำหรับการวัดการเคลื่อนที่จริงจะใช้เครื่องมือวัดแบบ optical profiling system ยี่ห้อ wyko รุ่น NT9100 ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยเงื่อนไขการวัด จะทำการป้อนแรงดันคงที่เพิ่มขึ้นละ 5 โวลต์แล้วทำการวัดระยะโดยกำหนดจุดปลายในการวัด ดังรูปที่ 3.13 จะวัดระยะที่จุดปลายเคลื่อนที่ เทียบระหว่างไม่ป้อนแรงดันและป้อนแรงดันที่กำหนด ค่าที่ได้แสดงในตารางที่ 3.4 เช่นกัน

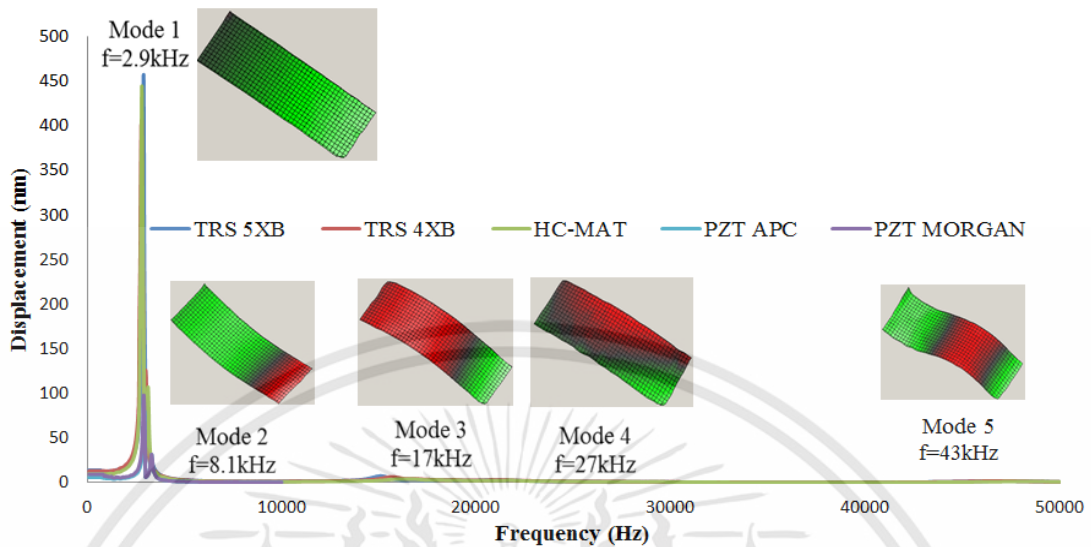


รูปที่ 3.12 เครื่องวัดระยะเชิงสถิติศาสตร์ ยี่ห้อ wyko รุ่น NT9100



รูปที่ 3.13 การวัดระยะเคลื่อนที่ของปลายของคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียวด้วยเครื่อง wyko

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 ความถี่การสั่นพ้องที่วัดได้จริง และจากการจำลองทั้ง 5 โหมด

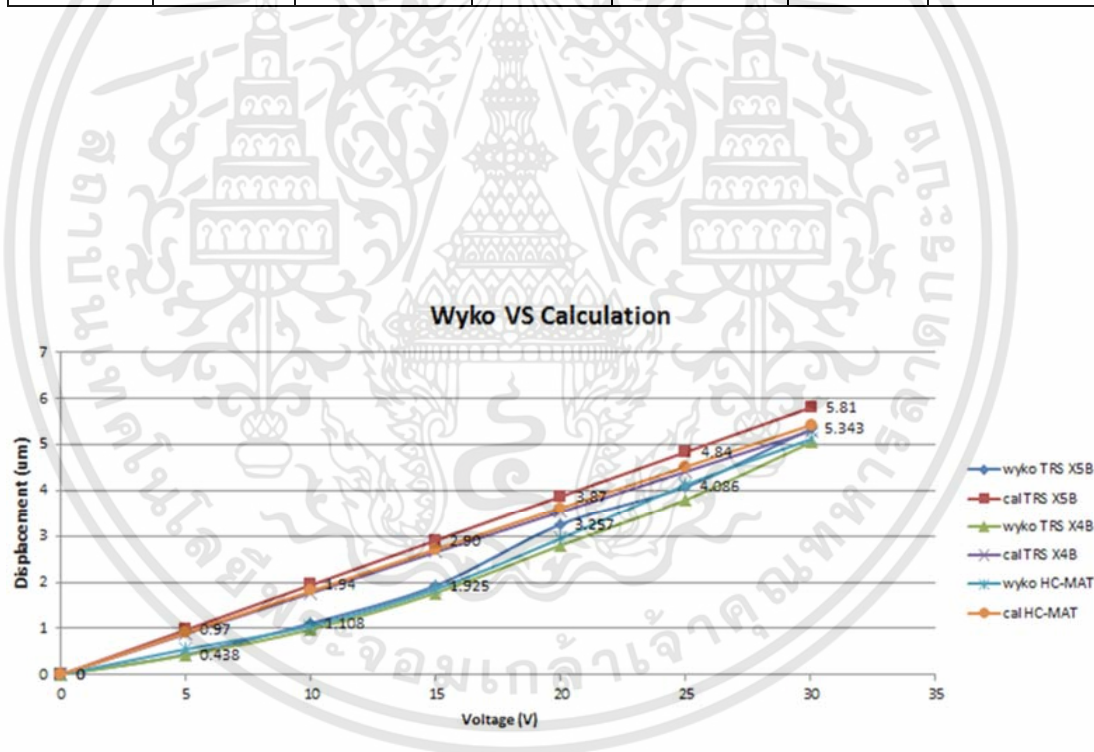
3.5 ผลการทดลองและการอภิปราย

จากผลการทดสอบสมรรถนะเชิงพลศาสตร์ในการจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการวัดค่าจริงที่เกิดขึ้น พบว่ามีความสอดคล้องกัน ทั้ง 5 โหมด ของความถี่การสั่นพ้อง จากรูปที่ 3.14 จะเห็นว่าเส้นกราฟของตัวอย่างทั้ง 5 ชนิด มีความถี่การสั่นพ้องซ้อนทับกันทั้ง 5 โหมดความถี่ ส่งผลให้สามารถนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ คือ PMN-PT มาใช้แทนที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดปัจจุบันบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้ โดยไม่จำเป็นต้องออกแบบหัวอ่านใหม่ เพราะลักษณะการเกิดความถี่การสั่นพ้องอยู่ในโหมดความถี่เดียวกัน โดยมีข้อดีคือ ไม่เสียค่าใช้จ่ายในการออกแบบชุดหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ และรวมถึงซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการควบคุมสามารถใช้ชุดคำสั่งชุดเดิมได้

สำหรับผลการทดลองทางสถิติศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่ของ บริเวณจุดปลายของคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว สามารถสรุปการเปรียบเทียบระหว่างการคำนวณ (calculation) และทดลองวัดจริง (Wyko) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT แสดงดังตารางที่ 3.4 และจะเห็นว่ามีแนวโน้มเหมือนกัน แต่ข้อมูลที่วัดได้จริงจะมีค่าน้อยกว่าทุกช่วงข้อมูล ดังรูปที่ 3.15 เนื่องมาจากสมการในการคำนวณไม่ได้มีตัวแปรที่เป็นขั้นของการติดกาวมาคำนวณ เนื่องจากในสมการมองว่าผลของชั้นกาวที่เกิดขึ้นส่งผลน้อยมากและขึ้นอยู่กับชนิดของกาว ดังนั้น ผลจากการคำนวณจะได้ค่าระยะที่เคลื่อนที่สูงกว่าค่าที่วัดได้จริง หากนำค่าการคำนวณมาเปรียบเทียบระหว่างวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้งชนิดใหม่และเก่า จะพบว่าวัสดุชนิดใหม่มีสมรรถนะสูงกว่าของเดิมถึง 9 เท่า ดังรูปที่ 3.16

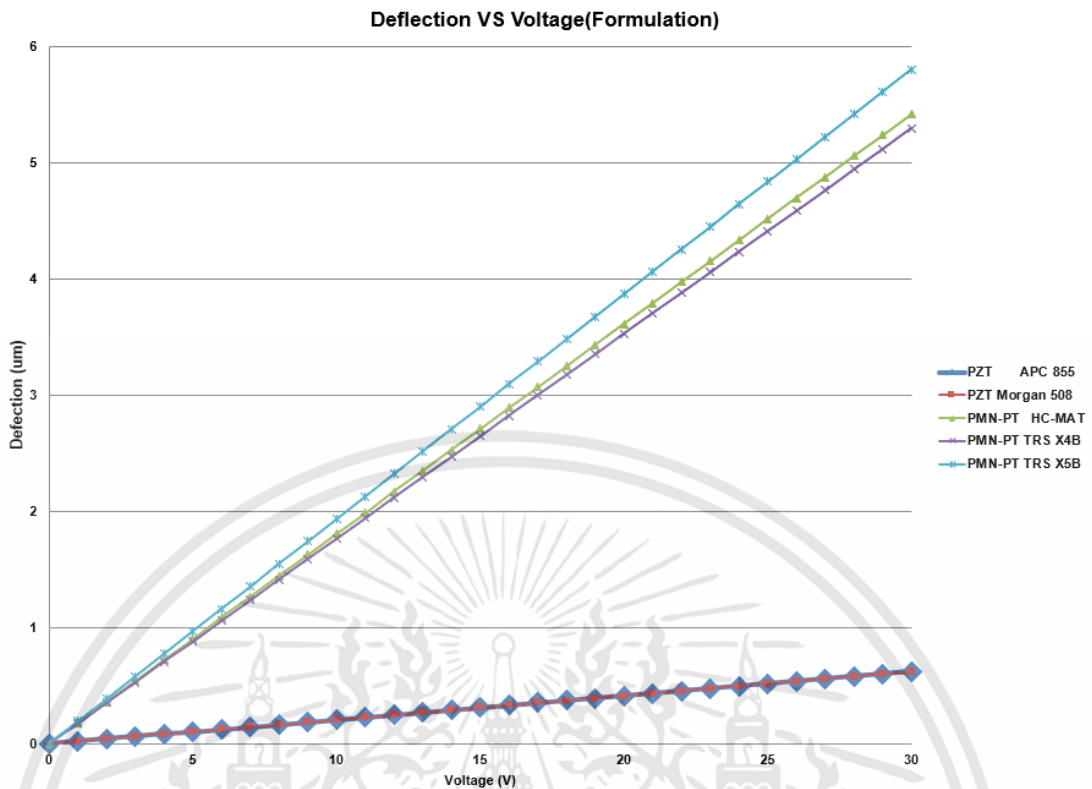
ตารางที่ 3.4 ระยะการเคลื่อนที่ของปลายคานระหว่างการคำนวณและการวัด

Voltage (V)	PMN-PT TRS X5B		PMN-PT TRS X4B		PMN-PT HC-MAT	
	Wyko (um)	Calculation (um)	Wyko (um)	Calculation (um)	Wyko (um)	Calculation (um)
0	0	0	0	0	0	0
5	0.438	0.97	0.42	0.88	0.55	0.90
10	1.108	1.94	0.98	1.77	1.05	1.81
15	1.1925	2.90	1.77	2.65	1.85	2.71
20	3.257	3.87	2.80	3.53	2.95	3.62
25	4.086	4.84	3.80	4.42	4.13	4.52
30	5.343	5.81	5.05	5.30	5.12	5.42



รูปที่ 3.15 แสดงแนวโน้มของการเปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ จากการคำนวณและการวัดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 เปรียบเทียบระยะการเคลื่อนที่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่และเก่า ทั้ง 5 ตัวอย่าง

3.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบ PZT และ PMN-PT บนแบบจำลองรูปแบบคาบเปลี่ยนรูปชั้นเดียว จากข้อมูลของผลการทดสอบสมรรถนะทั้งในด้านพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์ ไม่ว่าจะเป็นการคำนวณตามทฤษฎีการจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดลองวัดค่าจริง ผลของข้อมูลล้วนสอดคล้องกัน ดังนั้นในการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในอนาคตที่ต้องการนำเพียโซอิเล็กทริกชนิดใหม่ สามารถนำสมการและแบบจำลองจากงานวิจัยฉบับนี้ ไปใช้ในการออกแบบ ซึ่งไม่จำเป็นจะต้องทดลองจากวัสดุจริงเพื่อประหยัดต้นทุน และที่สำคัญงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หากมีการนำวัสดุชนิดใหม่ไปใช้จริง จะเพิ่มสมรรถนะของหัวอ่านอย่างมากด้วยระยะการเคลื่อนที่ ที่มากกว่าถึง 9 เท่า ทั้งยังไม่มีผลกระทบทางด้านราคากับกระบวนการผลิตเนื่องจากความถี่การสั่นพ้องที่เกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกับปัจจุบัน ทำให้ไม่ต้องมีการแก้ไขคำสั่งควบคุมเพื่อหลีกเลี่ยงย่านความถี่ ที่ทำให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เกิดความเสียหาย และการออกแบบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใหม่เพื่อหลีกเลี่ยงความถี่การสั่นพ้องที่เกิดขึ้นด้วยเช่นกัน

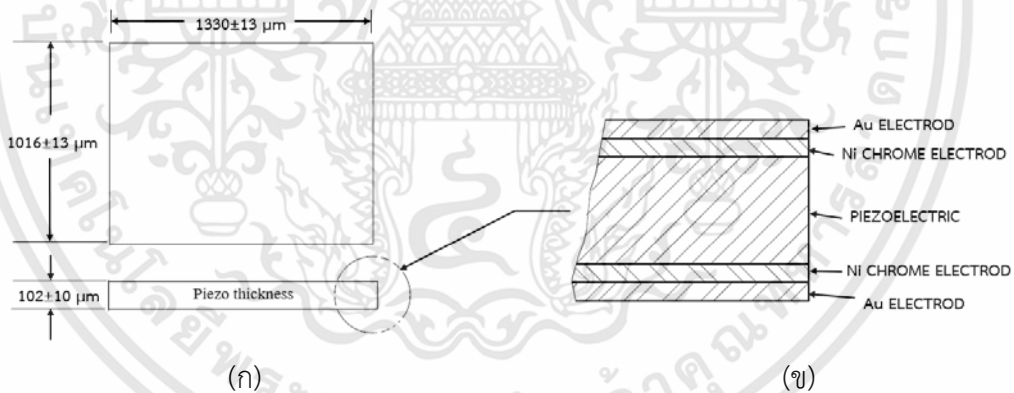
บทที่ 4

การประเมินสมรรถนะของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

ผลจากการวิเคราะห์และทดสอบในบทที่ 3 ได้ดำเนินการทดสอบผ่านแบบจำลองและการทดลองสมรรถนะจริงของวัสดุ PMN-PT และ PZT ภายใต้แบบจำลอง “คานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model)” ผลที่ได้จากการทดลอง แสดงให้เห็นถึงสมรรถนะของวัสดุ PMN-PT ที่เหนือกว่า ดังนั้นงานวิจัยในบทที่ 4 จึงได้ทำการทดสอบวัสดุ PMN-PT บนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์จริง โดยเริ่มตั้งแต่การติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกลงบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ ไปจนกระทั่งการทดสอบทั้งพฤติกรรมในด้าน พลศาสตร์ และ สถิติศาสตร์

4.1 ขนาดและข้อกำหนดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกสำหรับหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

เนื่องจากวัสดุเพียโซที่ใช้ในการทดลอง จะต้องมีขนาดและข้อกำหนดให้ถูกต้องตามมาตรฐานของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด กำหนดขึ้นเพื่อให้มั่นใจได้ว่า ใช้มาตรฐานเดียวกันกับการประกอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ในปัจจุบัน ดังแสดงในรูปที่ 4.1 (ก) และ รูปที่ 4.1 (ข) ภาพตัดขวางแสดงถึงชั้นสารของวัสดุจะเห็นว่าบนชั้นผิวของเพียโซอิเล็กทริกจะเคลือบด้วยชั้นนิกเกิล (Ni CHROME) และทอง (Au) เพื่อให้การเหนี่ยวนำทางไฟฟ้าดีขึ้นและปกป้องชั้นผิวของวัสดุเพียโซอีกด้วย สำหรับสำหรับค่ามาตรฐานในการควบคุมวัสดุแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเป็นดัง ตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผ่นเพียโซอิเล็กทริก (ก) ขนาด และ (ข) ชั้นผิววัสดุ

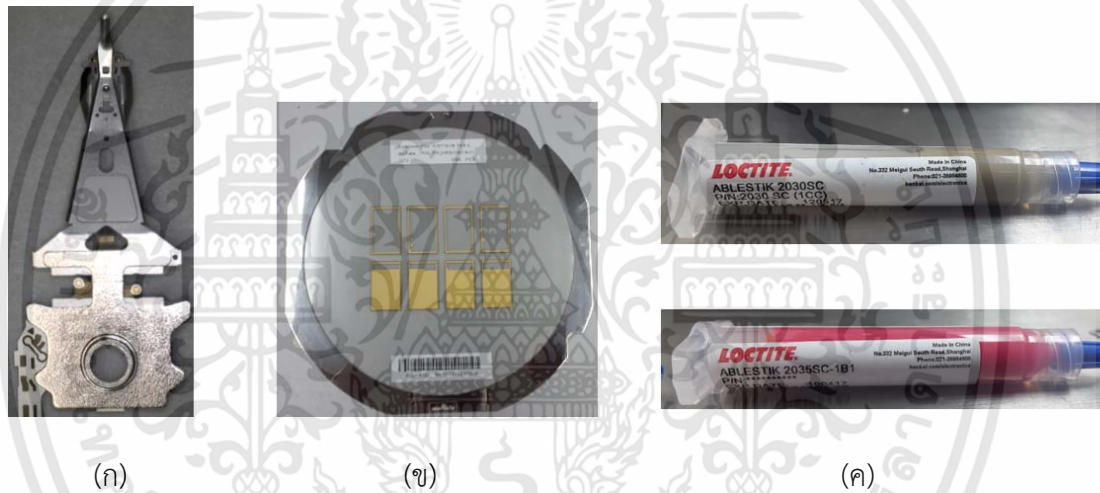
ตารางที่ 4.1 ข้อกำหนดในการควบคุมวัสดุเพียโซอิเล็กทริก

Material Layer	PMN-PT (μm)	Ni CHROME (nm)	Au (nm)
Thickness	102±10	90 ± 30	175 ± 60
Length	1330±13	na	na
Width	1016±13	na	na

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การเตรียมวัสดุสำหรับการติดตั้ง

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเตรียมวัสดุสำหรับการนำไปประกอบ โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนตามรูปที่ 4.2 เมื่อกำหนดให้ รูปที่ 4.2 (ก) คือ หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สำหรับการทดลองจะใช้หัวอ่านรุ่นเดียวกันกับที่ติดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT แต่เป็นรุ่นที่ใช้ทางบริษัท ซีเกท ไม่ได้ใช้แล้ว แต่สามารถที่จะนำมาทดสอบเปรียบเทียบ เพื่อนำผลที่ได้ไปใช้กับรุ่นใหม่ๆของทางบริษัทได้ สำหรับรูปที่ 4.2 (ข) จะเป็นวัสดุแผ่นเพียโซอิเล็กทริกที่บรรจุลงบนแผ่นเทปฟิล์มกาว โดยมีการระบุทิศทางขั้วไฟฟ้า ดังนี้คือ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ด้านบนเป็นบวก (POS) และวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ด้านล่างเป็นลบ (NEG) เนื่องจากลดความผิดพลาด และเวลาในขบวนการประกอบ โดยมีการระบุสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าด้านบน ดังรูปที่ 4.3 สำหรับการยึดติดวัสดุเพียโซอิเล็กทริกบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะใช้กาว 2 ชนิด คือ 1.กาวไม่นำไฟฟ้ายี่ห้อ Loctite ABLESTIK รุ่น 2035SC-1B1 (กาวสีแดง) และ 2. กาวนำไฟฟ้ายี่ห้อ Loctite ABLESTIK รุ่น 2030SC (กาวสีเทา) ซึ่งกาวทั้งสองชนิดแสดงดังรูปที่ 4.2 (ค)



รูปที่ 4.2 การเตรียมประกอบ (ก) หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (ข) วัสดุเพียโซอิเล็กทริก และ (ค) กาว

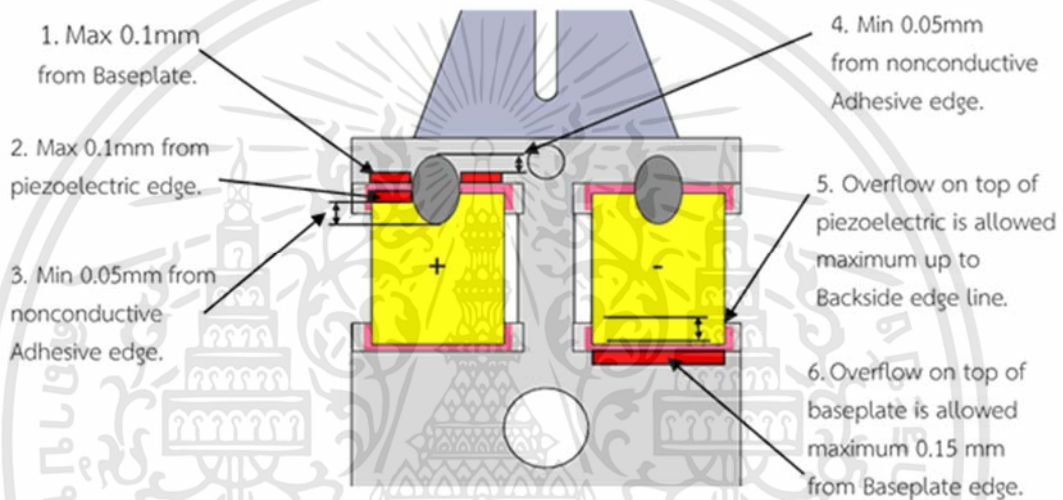


รูปที่ 4.3 การระบุทิศทางของพื้นผิววัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่ใช้ในการประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

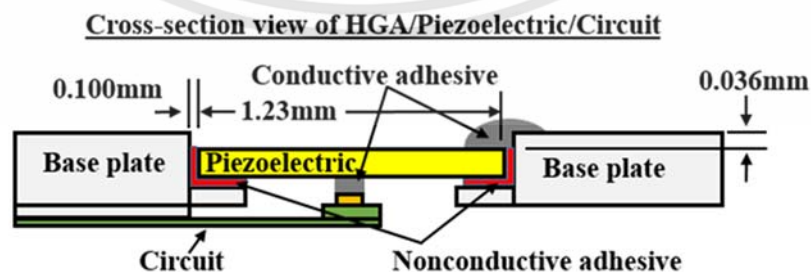
4.3 ขั้นตอนการติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกบนหัวอ่าน

ในขั้นตอนนี้ หลักการสำคัญอยู่ที่การหยอดกาวต้องมีการควบคุมปริมาณ เพื่อประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือในการทดลอง โดยมีรายละเอียดตามรูปที่ 4.4 ดังนี้ ลำดับที่ 1 กาวสีแดงที่ล้นออกมาข้างขอบบนหัวอ่านได้สูงสุดไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร (mm) ลำดับที่ 2 กาวสีแดงล้นบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะต้องไม่เกิน 0.1 มิลลิเมตร (mm) ลำดับที่ 3 กาวสีเทาบนแผ่นเพียโซอิเล็กทริกจะต้องไม่น้อยกว่า 0.05 มิลลิเมตร (mm) ลำดับที่ 4 กาวสีเทา ล้นออกมาข้างขอบบนหัวอ่านต้องไม่น้อยกว่า 0.05 มิลลิเมตร (mm) ลำดับที่ 5 กาวสีแดงที่ล้นออกด้านหลังแผ่นเพียโซอิเล็กทริกขึ้นไปยังหัวอ่านจะต้องไม่ไหลเกินขอบของหัวอ่านที่แผ่นเพียโซอิเล็กทริกวางอยู่ และลำดับที่ 6 กาวสีแดงที่ล้นจากด้านล่างแผ่นเพียโซอิเล็กทริกขึ้นไปยังหัวอ่านจะต้องไม่เกิน 0.15 มิลลิเมตร (mm)



รูปที่ 4.4 แสดงปริมาณกาวที่ควบคุมในการประกอบด้านบน

สำหรับรูปที่ 4.5 เป็นภาพตัดขวางด้านข้างของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เมื่อประกอบเสร็จแล้ว โดยจะเห็นว่าแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนหัวอ่านจะต้องให้ขอบด้านล่างมีระยะเว้น 0.1 มิลลิเมตร (mm) และระดับแผ่นเพียโซอิเล็กทริกเมื่อเทียบระดับของหัวอ่านจะต้องไม่เกิน 0.036 มิลลิเมตร (mm) โดยขั้นตอนการติดตั้งมีดังนี้

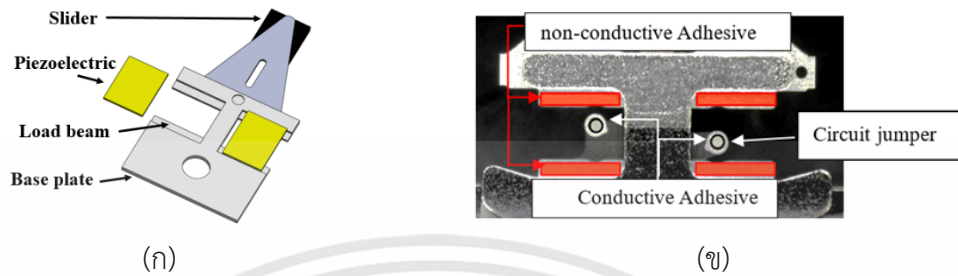


รูปที่ 4.5 ภาพตัดขวางด้านข้าง แสดงปริมาณกาวที่ควบคุมในการประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

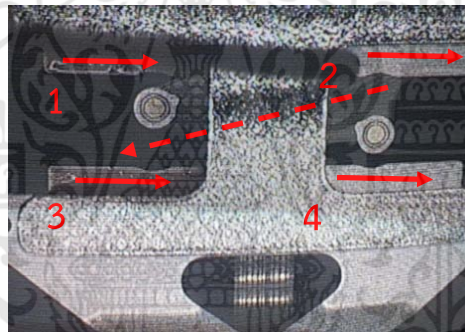
4.3.1 หยอดกาวไม่นำและนำไฟฟ้าบนหัวอ่าน

ในการเริ่มต้นประกอบ จะหยอดกาวไม่นำไฟฟ้าลงบนตำแหน่งช่องคานรองรับ (load beam) ในบริเวณรูปที่ 4.6 (ก) และ กาวนำไฟฟ้าไปยังจุดเชื่อมไฟฟ้า (circuit jumper) ดังรูปที่ 4.6 (ข)



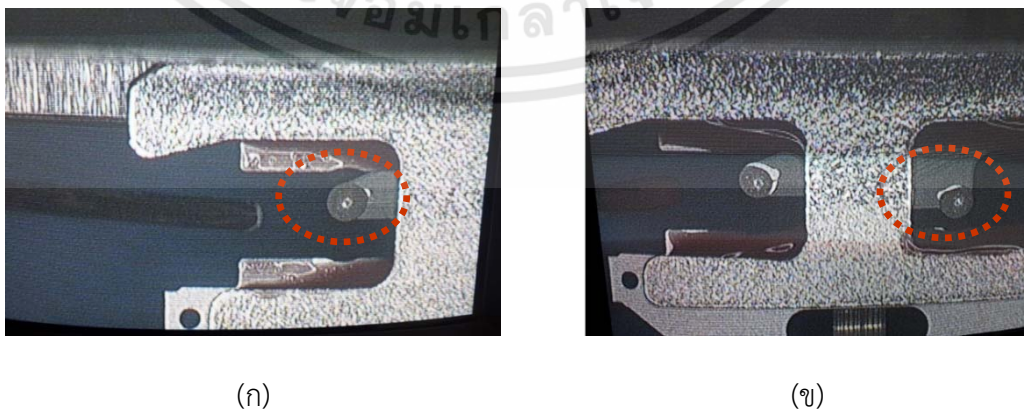
รูปที่ 4.6 การเตรียมประกอบ (ก) หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ และ (ข) กาว

สำหรับทิศทางการหยอดกาวไม่นำไฟฟ้าทั้งขอบบนและขอบล่าง จะเริ่มจากทิศทางซ้ายไปขวา ตามลำดับหมายเลขที่ 1-4 ดังแสดงในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ทิศทางการหยอดกาวไม่นำไฟฟ้า

และการหยอดกาวนำไฟฟ้าลงบนจุดเชื่อมไฟฟ้า โดยเริ่มจากการหยอดกาวทางด้านซ้าย รูปที่ 4.8 (ก) และไปยังด้านขวาตาม รูปที่ 4.8 (ข) ตามลำดับ

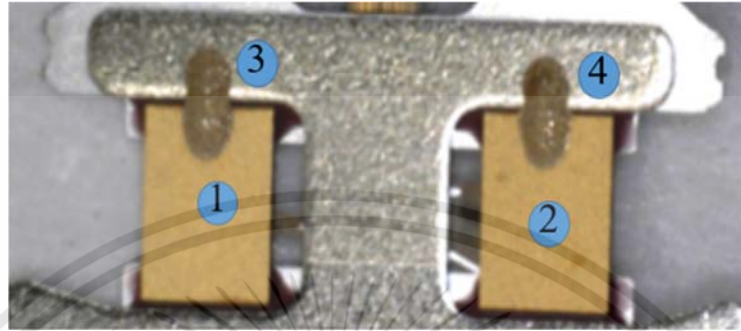


รูปที่ 4.8 ทิศทางหยอดกาวนำไฟฟ้า (ก) จุดด้านซ้าย (ข) จุดด้านขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การวางวัสดุเพียโซอิเล็กทริกบนหัวอ่านและกาวนำไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า

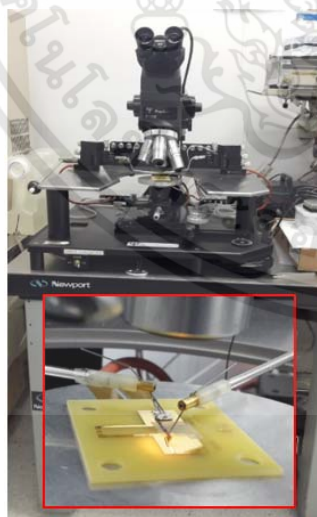
ขั้นตอนการวางแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แสดงลำดับขั้นตอน 1-2 ดังในรูปที่ 4.9 โดยการวางจากด้านซ้ายและขวาตามลำดับ หลังจากนั้นจึงทำการหยอดกาวนำไฟฟ้าเพื่อเชื่อมต่อวงจรอย่างสมบูรณ์แบบ ตามลำดับที่ 3-4 ในรูปที่ 4.9



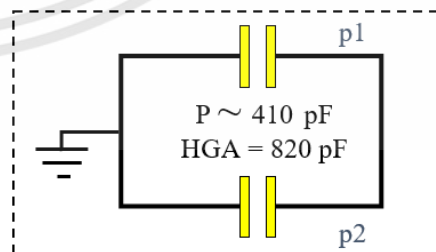
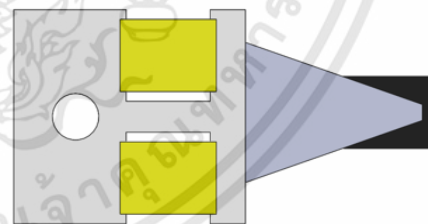
รูปที่ 4.9 ลำดับการวางแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกและกาวนำไฟฟ้า

4.4 การทดสอบการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของหัวอ่าน

การทดสอบการเชื่อมต่อทางไฟฟ้าของหัวอ่าน เพื่อตรวจสอบการประกอบแผ่นเพียโซอิเล็กทริกบนหัวอ่าน มีความสมบูรณ์หรือไม่ ผ่านการทดสอบวัดค่าตัวเก็บประจุ โดยเครื่องมือวัดค่าแสดงในรูปที่ 4.10 (ก) และรูปที่ 4.10 (ข) แสดงถึงวงจรทางไฟฟ้าและค่าตัวเก็บประจุ โดยกำหนดให้ P คือค่าตัวเก็บประจุ มีค่าตัวละประมาณ 410 pF และหากนำสองตัวมารวมกัน $p1 + p2$ จะอยู่ในช่วง $810\text{-}830 \text{ pF}$ ในการทดสอบหากมีค่านอกเหนือจากนี้ หมายถึงชิ้นงานอาจได้รับความเสียหายจากขบวนการประกอบ



(ก)

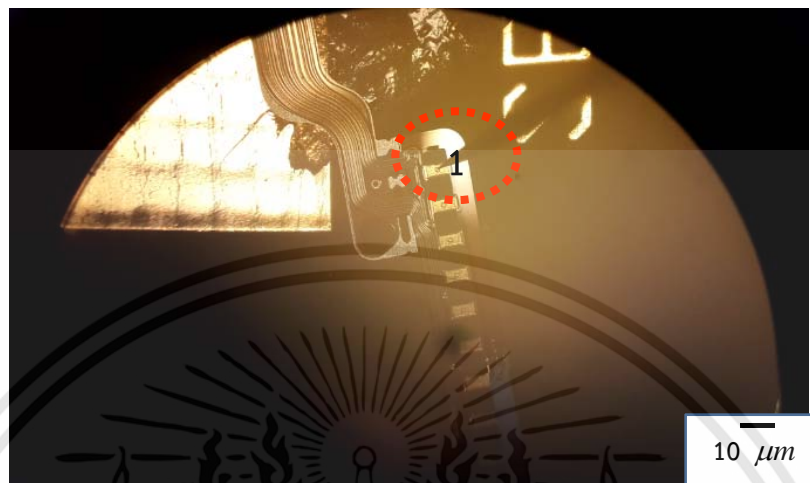


(ข)

รูปที่ 4.10 วัดค่าตัวเก็บประจุ (ก) ชุดทดสอบ และ (ข) วงจรทางไฟฟ้าและค่าตัวเก็บประจุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

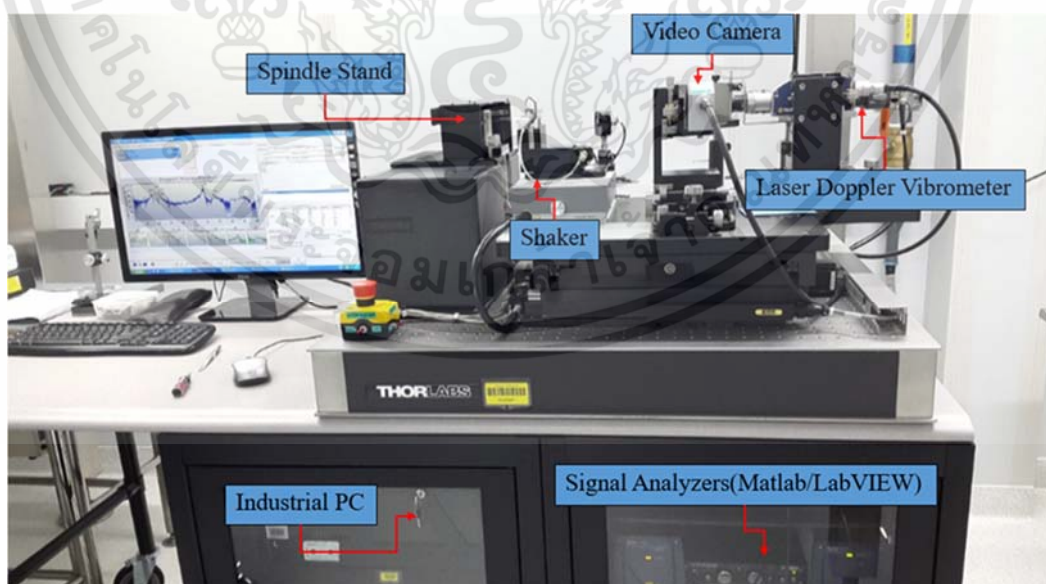
โดยในการวัดค่าตัวเก็บประจุ จะทำการวัดผ่านกล้องจุลทรรศน์ (microscope) ดังรูปที่ 4.11 ในรูปจะเห็นในวงกลมสีแดง คือตำแหน่งขาที่ 1 ของวงจรถั่วอ่าน มีขนาดความกว้างประมาณ 10 ไมโครเมตร (μm) ในการวัดจะทำการวัดที่ขาที่ 1 นี้เทียบกับกราวด์บนตัวหัวอ่าน



รูปที่ 4.11 การวัดผ่านกล้องจุลทรรศน์

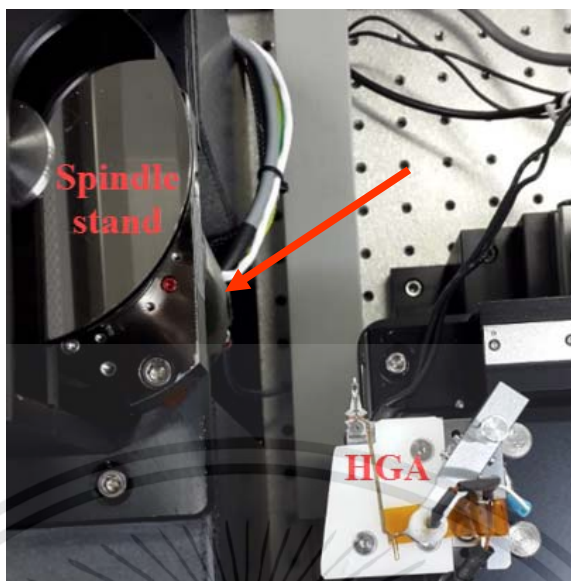
4.5 เครื่องทดสอบสมรรถนะของหัวอ่าน

การทดลองสมรรถนะของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ได้ใช้เครื่องทดสอบมาตรฐานที่ทางบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ได้ออกแบบและสร้างขึ้นมา ซึ่งสามารถทดสอบวัดระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านและวิเคราะห์เชิงความถี่ได้ โดยตัวเครื่องทดสอบเป็นดังรูปที่ 4.12 ประกอบด้วย 6 ส่วนหลัก ดังนี้



รูปที่ 4.12 เครื่องทดสอบสมรรถนะของหัวอ่าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 หัวอ่านก่อนเคลื่อนที่ไปยังชุดแผ่นงานแม่เหล็กหมุน

1. ชุดแผ่นงานแม่เหล็กหมุน (spindle stand) ดังรูปที่ 4.13 โดยแผ่นงานแม่เหล็กหมุนสามารถปรับความเร็วรอบได้ เพื่อให้หัวอ่านขณะเคลื่อนที่เข้ามายังแผ่นแม่เหล็กเกิดการยกตัวหรือบินเหนือแผ่นแม่เหล็กได้โดยไม่สัมผัส หากสัมผัสจะเกิดการเสียหาย ในการทดลองนี้จะใช้ความเร็วที่ 1,000 รอบต่อนาที

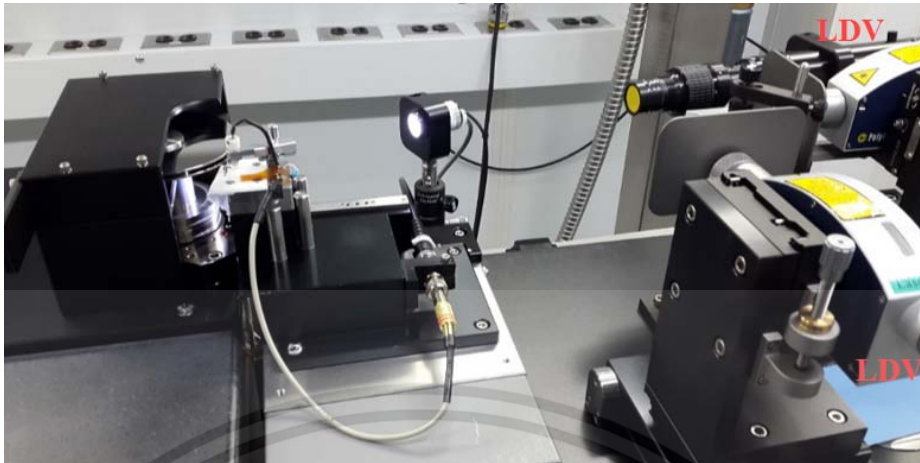
2. ชุดระบบสั่น (Shaker) การจำลองความถี่ให้กับหัวอ่าน ทำได้โดยใช้ชุดระบบสั่นสร้างความถี่ตามที่ต้องการทดสอบได้ ในการทดลองใช้ความถี่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz)

3. กล้องถ่ายวิดีโอ (Video camera) ใช้สำหรับการตรวจสอบการตั้งค่าความถูกต้องของอุปกรณ์ ไม่ว่าจะเป็นตำแหน่งของหัวอ่าน ตำแหน่งเลเซอร์ รวมถึงบันทึกการทำงานในขณะทดสอบ จากรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าหัวอ่าน-เขียนข้อมูล กำลังเคลื่อนที่ไปยังงานแม่เหล็ก (disk) โดยสามารถสังเกตการณ์ทำงานผ่านกล้องวิดีโอได้



รูปที่ 4.14 การตั้งค่าอุปกรณ์จากกล้องถ่ายวิดีโอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ชุดเลเซอร์ LDV

4. ชุดเลเซอร์สำหรับการวัด LDV เป็นชุดที่ปล่อยแสงเลเซอร์แล้วนำสัญญาณที่สะท้อนกลับมาประมวลผล ดังรูปที่ 4.15

5. ชุดคอมพิวเตอร์สำหรับอุตสาหกรรม (Industrial PC) เนื่องจากระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ของระบบเครื่องทดสอบ ใช้ทรัพยากรของระบบคอมพิวเตอร์ค่อนข้างมาก จึงจำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์สำหรับอุตสาหกรรม เนื่องจากมีหน่วยประมวลผลสมรรถนะสูงและรวดเร็ว

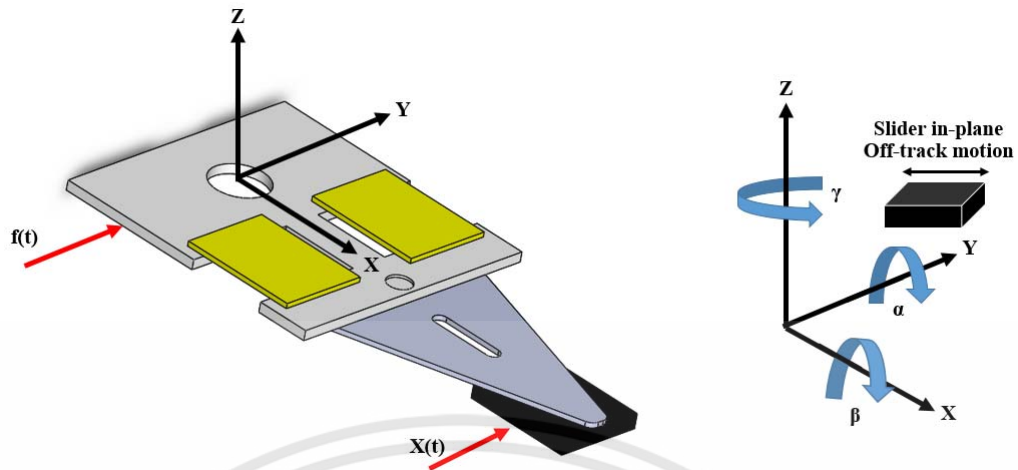
6. ระบบโปรแกรมซอฟต์แวร์ Matlab และโปรแกรม Labview โปรแกรมที่ใช้ในการนำสัญญาณดิจิทัลมาประมวลผล คือโปรแกรม Matlab และ Labview ซึ่งเป็นโปรแกรมที่มีความสามารถคำนวณสมการทางคณิตศาสตร์ได้อย่างแม่นยำ

4.6 การทดสอบเชิงพลศาสตร์

ความถี่การสั่นพ้องของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ มีความสำคัญมากเนื่องจากเป็นข้อมูลที่บ่งบอกถึงการประมาณเสถียรภาพของระบบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยรวม อย่างเช่นเวลาและความเร็วในการเข้าถึงข้อมูล ความถี่การสั่นพ้องของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล สามารถปรับแต่งและประเมินจากการออกแบบได้หลายส่วนของชุดหัวอ่าน อย่างเช่น ความยาว ความหนา น้ำหนัก รูปร่าง ค่าคงตัวสปริง ตำแหน่งของมวลที่ปรับเพิ่มเข้ามา องค์ประกอบเหล่านี้ล้วนมีผลกับความถี่การสั่นพ้องที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากมีค่าตัวแปรที่เปลี่ยนไป จะเกิดผลจะกระทบกับค่าความถี่การสั่นพ้องทันที ดังนั้นถ้าหากเปลี่ยนวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT เป็น PMN-PT จะมีผลกระทบหรือไม่ จากสมการที่ใช้คำนวณ มีการกำหนดทิศทางแนวแกนของเครื่องทดสอบ และทิศทางอ้างอิงจากการอ่านค่าจากหัวอ่าน ดังรูปที่ 4.16 และจากรูปเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

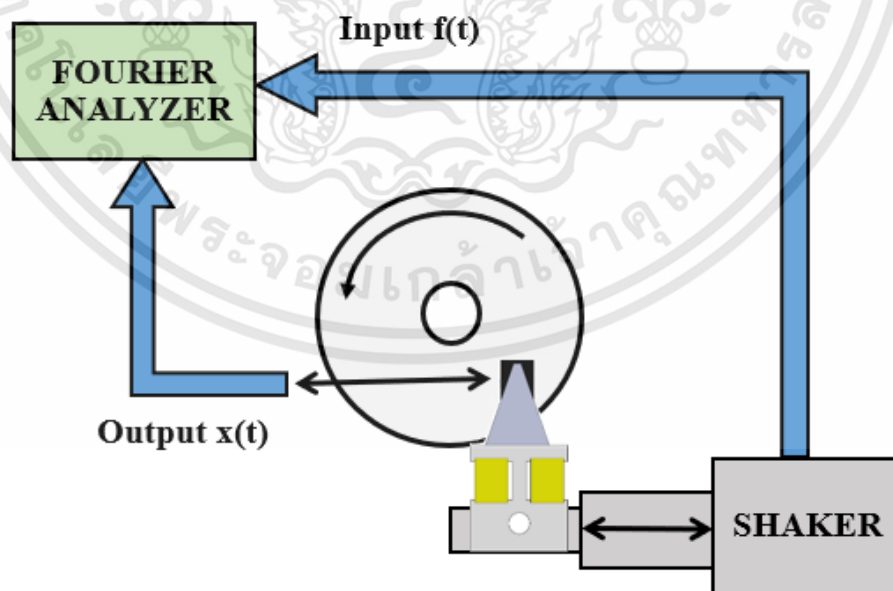
$$Gain(dB) = 20 \log_{10} \left(\frac{Output\ x(t)}{Input\ f(t)} \right) \quad (4.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



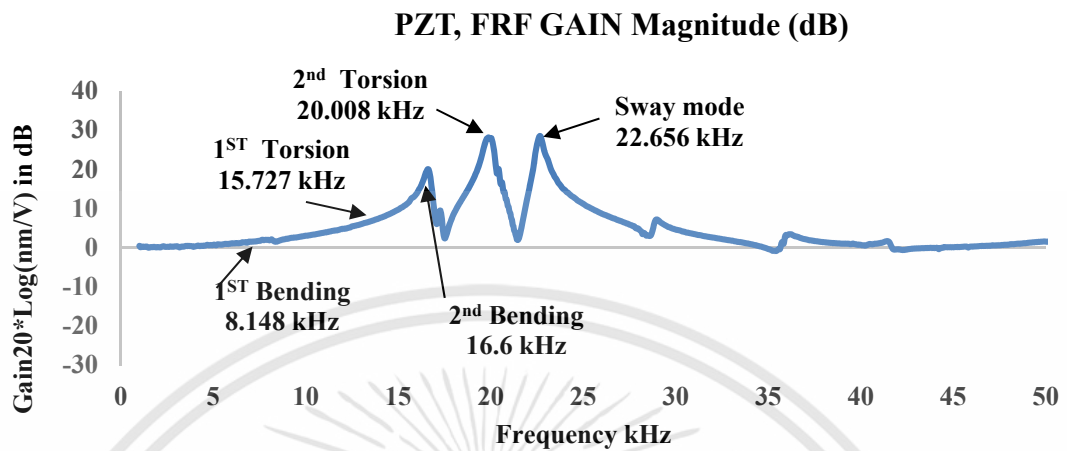
รูปที่ 4.16 การกำหนดทิศทางแนวแกนของระบบ

การทำงานของระบบการวัดความถี่สั่นพ้องแสดงดังรูปที่ 4.17 โดยเริ่มจากหัวอ่านที่ยึดติดกับชุดระบบสั่น (shaker) เคลื่อนที่เข้าไปยังแผ่นแม่เหล็กหมุน หัวอ่านจะเกิดการยกตัวขึ้น ลอยเหนืออยู่บนจากแม่เหล็กจากนั้นสัญญาณอินพุต ($Input\ f(t)$) ที่ป้อนช่วงความถี่ตั้งแต่ 1-100 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) เข้าไปยังชุดระบบสั่น (shaker) ชุดวัดการเคลื่อนที่ LDV จะทำการวัดสัญญาณเอาต์พุต ($Output\ x(t)$) ในรูปความถี่การเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล โดยนำค่าที่ได้มาผ่านสมการที่ 4.1 หลังจากการคำนวณแล้วจะได้ค่า โหมดความถี่สั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT และ PMN-PT ดังรูปที่ 4.18-4.19

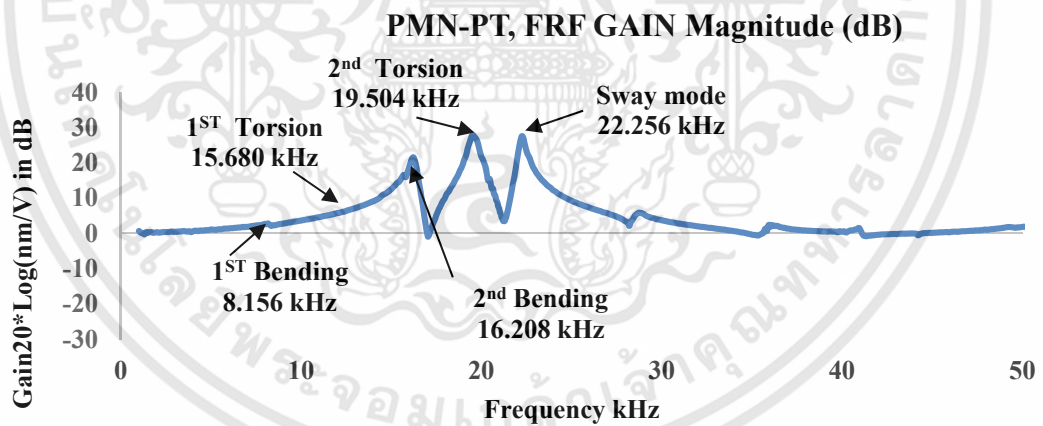


รูปที่ 4.17 ขั้นตอนการวัดค่าความถี่การสั่นพ้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 โหมดความถี่การสั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT

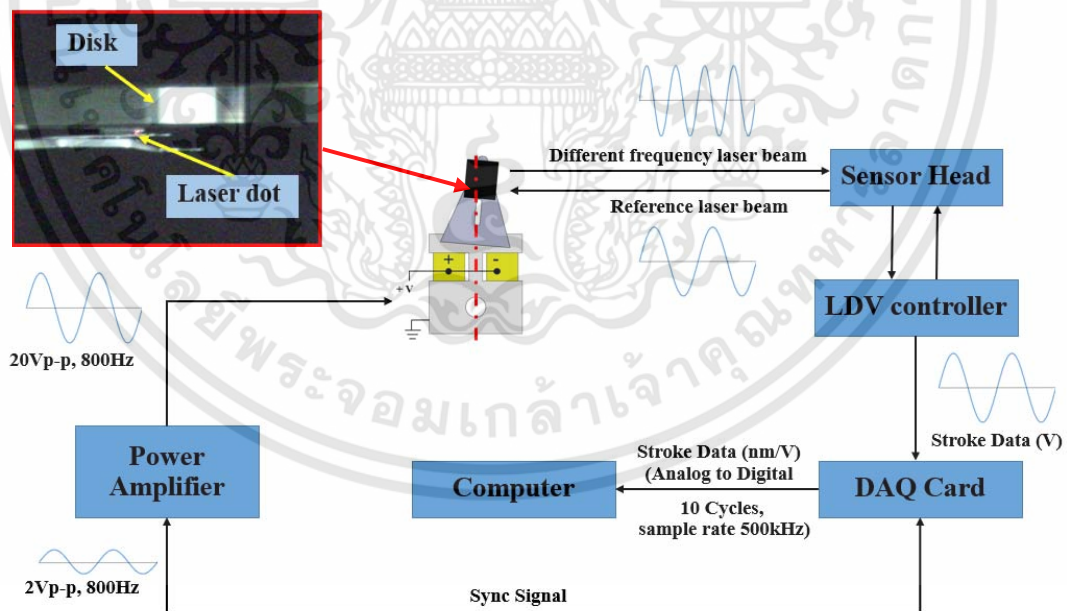


รูปที่ 4.19 โหมดความถี่การสั่นพ้องของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT

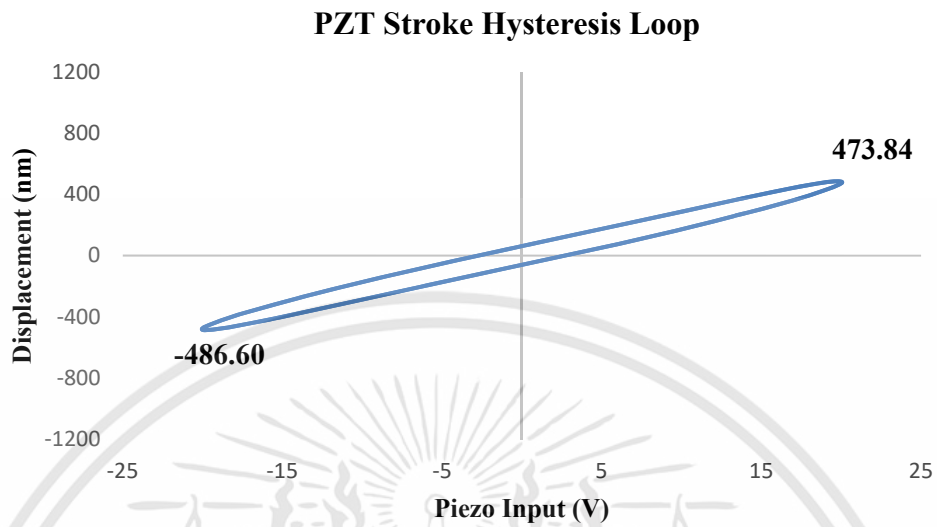
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การทดสอบเชิงสถิติศาสตร์

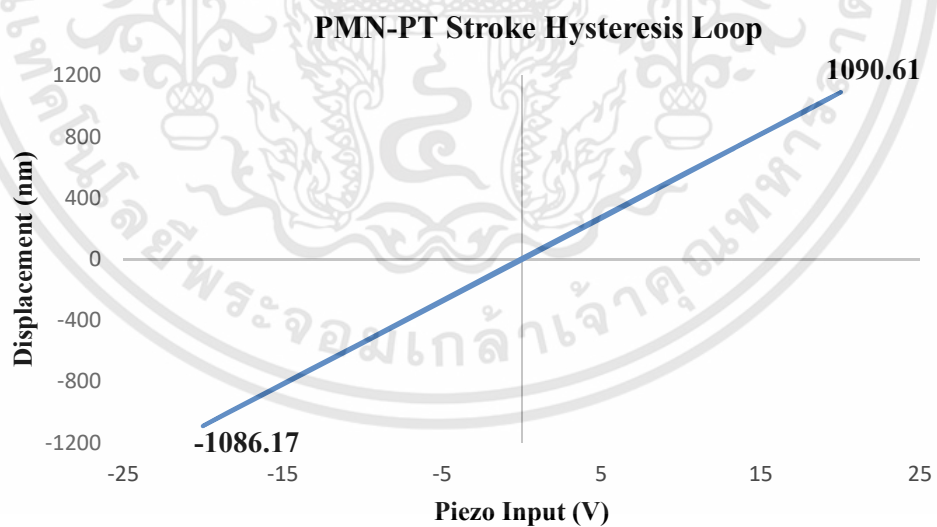
ระยะเวลาเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียนข้อมูลมีความสำคัญมาก เนื่องจากเป็นตัวบ่งบอกถึงสมรรถนะความเร็วในการเข้าถึงแทบข้อมูลบนจานแม่เหล็ก (disk) หากเมื่อเปรียบเทียบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ที่มีระยะเวลาเคลื่อนที่ ที่มากกว่าย่อมมีสมรรถนะเหนือกว่า สำหรับขั้นตอนการวัดหาระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ อธิบายได้ดังรูปที่ 4.20 การทำงานจะเริ่มจากหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ เคลื่อนที่ไปยังไต้จานแม่เหล็ก (disk) และกำหนดจุดที่จะวัดการเคลื่อนที่ ที่ด้านข้างของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล ตามจุดเลเซอร์ที่ระบุ (laser dot) ทำการป้อนสัญญาณความถี่ 800 เฮิรตซ์ (Hz) แรงดัน 2 โวลต์ (V) ผ่านไปยังวงจรถยาย (power amplifier) ขยายเป็น 20 โวลต์ (V) ไปยังตัววัสดุเพียโซอิเล็กทริก ที่ติดตั้งบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ โดยหัวอ่าน-เขียนข้อมูลจะเกิดการเคลื่อนที่ทำการวัดการเคลื่อนที่เปรียบเทียบกันระหว่างสัญญาณเลเซอร์อ้างอิง (reference laser beam) และสัญญาณความถี่ต่างของคลื่นความถี่ (different frequency laser beam) โดยสัญญาณรับ-ส่งจะผ่านหัวเซ็นเซอร์ (sensor head) ที่ส่งการผ่านชุดควบคุม LDV (LDV controller) โดยค่าที่ได้เป็นข้อมูลระยะเวลาเคลื่อนที่ (stroke data) ในรูปแบบของสัญญาณไฟฟ้า ดังนั้นในการประมวลผลข้อมูลจะผ่านตัวแปลงสัญญาณไฟฟ้ามาเป็นดิจิทัล (DAQ card) ในการแปลงผลจะทำทั้งหมด 10 รอบด้วยอัตราการสุ่มข้อมูล 500 กิโลเฮิรตซ์ (kHz) แสดงผลผ่านโปรแกรมบนคอมพิวเตอร์ (computer) โดยผลที่ได้จะเป็นระยะของเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ และการเกิดวงฮีสเทอรีซิส (Hysteresis Loop) ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT และ PMN-PT แสดงดังรูปที่ 4.21-4.22 ตามลำดับ



รูปที่ 4.20 ขั้นตอนการวัดระยะของหัวอ่าน



รูปที่ 4.21 ระยะเคลื่อนที่ และการเกิดวงฮิสเทอรีซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT



รูปที่ 4.22 ระยะเคลื่อนที่ และการเกิดวงฮิสเทอรีซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT

4.8 ผลการทดลองและการอภิปราย

ในการทดลองสิ่งที่สำคัญที่สุดของการประเมินสมรรถนะของตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT สำหรับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ คือพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ และพฤติกรรมเชิงสถิตยศาสตร์ โดยผลการทดลองที่ได้แบ่งการนำเสนอเป็น 2 ส่วนดังนี้

1. พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ในเชิงรูปแบบความถี่สั่นพ้อง เมื่อนำผลทดลองจากรูปที่ 4.18 และ รูปที่ 4.19 มาสรุปลงในตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีค่าความถี่สั่นพ้องในโหมดเดียวกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT และค่ากำลังอัตราขยาย (gain) ก็มีผลสอดคล้องไปในทางเดียวกันด้วย กล่าวคือ ในปัจจุบันที่หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีการติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยระบบควบคุมที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหัวอ่านเมื่อทำงานภายใต้ความเร็วในการอ่าน-เขียนข้อมูล ระบบควบคุมจะหลีกเลี่ยงการทำงานในช่วงความถี่สั่นพ้อง ดังนั้นเองหากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ที่จะมาใช้แทนชนิด PZT สามารถนำมาติดตั้งบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ได้เลย โดยที่ไม่ต้องปรับเปลี่ยนหรือแก้ระบบควบคุมใหม่

ตารางที่ 4.2 ค่าความถี่สั่นพ้องแต่ละโหมดความถี่ของวัสดุ PZT และ PMN-PT

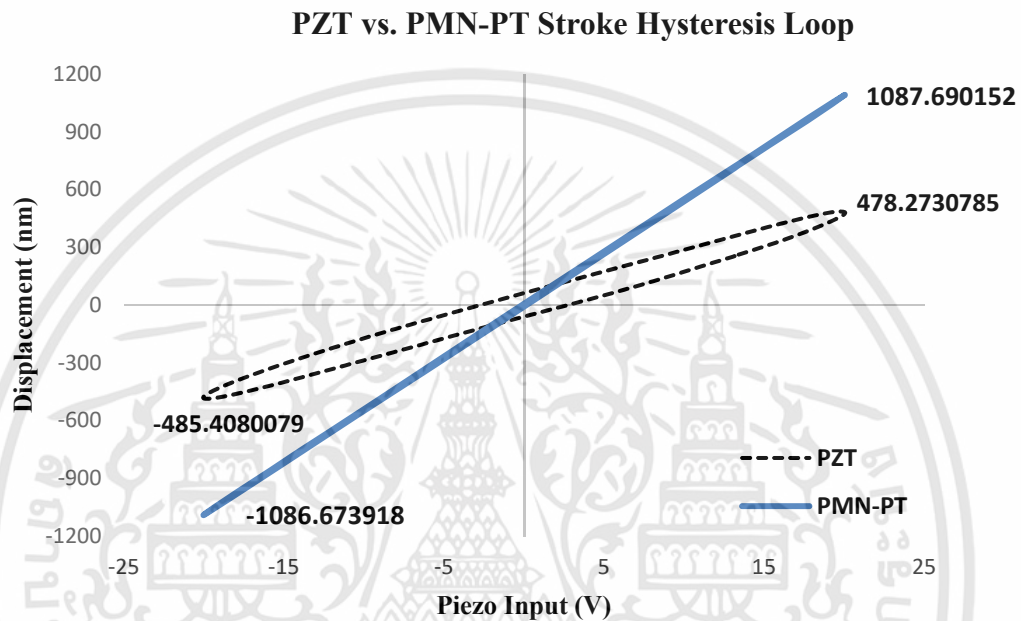
Mode	Frequency (kHz)		Gain (dB-nm)	
	PZT	PMN-PT	PZT	PMN-PT
1 st bending mode	8.148	8.132	1.874	2.237
1 st torsion mode	15.727	15.048	14.194	14.610
2 nd bending mode	16.600	16.152	19.628	21.430
2 nd torsion mode	20.008	19.688	27.825	26.573
Sway mode	22.656	21.856	27.581	26.173

2. พฤติกรรมเชิงสถิตยศาสตร์ในเชิงรูปแบบของระยะเคลื่อนที่และการเกิดวงฮิสเทอรีซิสของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลจากการทดลองนำมาสรุปลงในตารางที่ 4.3 จะเห็นว่าเมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ เท่ากันระหว่างหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT และ PZT จะได้ระยะการเคลื่อนที่สูงสุดเป็น 54.61 และ 24.36 นาโนเมตรต่อโวลต์ ตามลำดับ พบว่าหัวอ่านที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีการเคลื่อนที่สูงสุดมากกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ถึง 2.24 เท่า และค่าพื้นที่การเกิดวงฮิสเทอรีซิสที่น้อยกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ถึง 10 เท่า

ตารางที่ 4.3 สรุปค่าการเกิดวงฮิสเทอรีซิสและระยะเคลื่อนที่ของวัสดุ PZT และ PMN-PT

Peak Voltage (V)		Peak Stroke (nm/V)		Hysteresis Area (V-nm)	
PZT	PMN-PT	PZT	PMN-PT	PZT	PMN-PT
20	20	24.36	54.61	4191.2	419.8

จากรูปที่ 4.23 ทำการเปรียบเทียบระยะเคลื่อนที่และการเกิดวงฮิสเทอรีซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT และ PZT โดยเส้นสีน้ำเงินคือวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT และเส้นปะคือวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT เมื่อเปรียบเทียบการเกิดวงฮิสเทอรีซิสจะเห็นว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีลักษณะเป็นเส้นตรงมากกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ซึ่งบ่งบอกเสถียรภาพในการควบคุมที่แม่นยำและง่ายกว่าเนื่องจากการป้อนแรงดันไปกลับ ตำแหน่งการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจึงไม่ซับซ้อนในการควบคุมเมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบ PZT



รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบระยะเคลื่อนที่และการเกิดวงฮิสเทอรีซิสของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT และ PZT

4.9 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง แสดงให้เห็นถึงการเปรียบเทียบสมรรถนะของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีตัวขับเร็วแบบสองสถานะที่ขับด้วยเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT และ PZT เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์พบว่ามีความถี่การสั่นพ้องที่สอดคล้องกัน ทำให้การควบคุมระบบในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่จำเป็นต้องการไฮโปรแกรมในการหลีกเลี่ยงช่วงความถี่การสั่นพ้อง เนื่องจากสามารถใช้โปรแกรมเดิมได้เลย และเมื่อพิจารณาในส่วนพฤติกรรมเชิงสถิตยศาสตร์จะพบว่าระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีค่ามากกว่าสูงถึง 2.24 เท่า และที่สำคัญมีค่าพื้นที่การเกิดวงฮิสเทอรีซิสน้อยกว่าถึง 10 เท่าเช่นกัน ส่งผลให้มีเสถียรภาพในการควบคุมที่แม่นยำและง่ายกว่าแบบ PZT มาก

บทที่ 5

การประเมินความน่าเชื่อถือของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

ในบทนี้ทำการศึกษาและทดลองวิจัย มุ่งเน้นในเรื่องความน่าเชื่อถือของผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทนภายใต้เงื่อนไขที่ทดสอบและขีดความสามารถของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกส์แบบ PMN-PT จากผลการทดลองในบทที่ 4 จะเห็นว่า หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ที่มีตัวขับเคลื่อนด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีสมรรถนะสูงมากเมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT แต่ถ้าหากนำไปใช้งานจริงจะต้องคำนึงถึงสภาวะการเสื่อมคุณภาพจากอุณหภูมิเป็นสำคัญ เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจะเสียความสามารถในการเคลื่อนที่หากอยู่ในอุณหภูมิเกินค่าที่กำหนด ในงานวิจัยนี้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT สามารถทนความร้อนได้สูงถึง 150 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) ตามที่ผู้ผลิตพัฒนามาให้ โดยปกติจะทนอยู่ได้ไม่เกิน 100°C ดังนั้นเพื่อใช้พิสูจน์เป็นข้อมูลที่เหมาะสมกับการรับประกันคุณภาพของฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ ในการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกทดสอบวัดสมรรถนะการเสื่อมคุณภาพของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ภายใต้อุณหภูมิสูงสุดที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ยังสามารถทำงานได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงต่ออุณหภูมิ ส่วนที่สองเป็นการทดสอบความแข็งแรงของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT เทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT แบบที่ใช้ในปัจจุบัน เพื่อนำผลที่ได้ไปช่วยลดปริมาณของเสียจากการแตกหักของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในกระบวนการประกอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์

5.1 การอบชิ้นงานด้วยความร้อน

การทนต่ออุณหภูมิของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์สำหรับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกส์ชนิด PMN-PT มีเงื่อนไขการทดลอง โดยนำหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไทรฟ์ที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ไปอบในตู้ทำความร้อนคงที่โดยอุณหภูมิจะเริ่มต้นที่ความร้อน 100°C โดยทำการคงชิ้นงานไว้ในตู้ทำความร้อนเป็นเวลา 30 นาที และนำชิ้นงานออกมาไว้ข้างนอกเป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนจะนำชิ้นงานไปทดสอบวัดค่าต่อไป หลังจากนั้นทำซ้ำแต่เพิ่มความร้อนเป็น 120°C 140°C 150°C 160°C และ 180°C ตามลำดับ ในรูปที่ 5.1 คือ เครื่องทำความร้อนยี่ห้อ Thermotron โดยใช้เครื่องยี่ห้อ Thermotron เป็นเครื่องที่ใช้งานใน บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ในห้องปฏิบัติการของแผนก calibration Labs

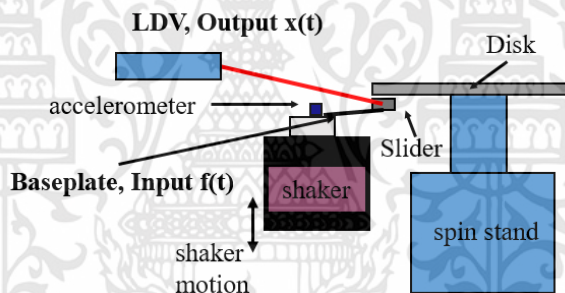


รูปที่ 5.1 เครื่องทำความร้อนยี่ห้อ Thermotron รุ่น ATSS-80-10-10

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ความน่าเชื่อถือเชิงพลศาสตร์

การทดสอบนี้จะศึกษาผลกระทบระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับพฤติกรรมในการเกิดความถี่สั่นพ้องของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโหมดความถี่หรือไม่ หากมีการเปลี่ยนแปลงจะทำให้หัวอ่าน-เขียนข้อมูลเกิดความเสียหายได้ ในการทดลองใช้เครื่องวัดสมรรถนะของหัวอ่าน-เขียนข้อมูลเหมือนบทที่ 4 โดยเงื่อนไขการทดลองเป็นดังรูปที่ 5.2 เริ่มกระบวนการทดลองการวัดค่าความถี่สั่นพ้องของหัวอ่าน-เขียนข้อมูล โดยจานแม่เหล็ก (disk) จะถูกหมุนด้วยมอเตอร์ใต้แผ่นจานแม่เหล็ก (spin stand) เมื่อหัวอ่านเคลื่อนที่เข้าไปยังใต้แผ่นแม่เหล็กจานหมุนชุดสั่นสะเทือน (shaker) จะถูกสั่นด้วยความถี่ที่กำหนด 0-50 กิโลเฮิร์ตซ์ (kHz) โดยมีตัวตรวจวัดความเร่ง (accelerometer) เป็นตัวควบคุมป้อนกลับสั่งให้ชุดสั่นสะเทือนปรับเพิ่ม-ลดแรงดันให้ได้ความถี่ที่ต้องการ การสั่นนี้ถือเป็นสัญญาณเข้า (input $f(t)$) ของระบบ โดยการสั่นของหัวอ่านมีผลกับการออกแบบ เนื่องจากแรงการสั่นของแผ่นวางหัวอ่าน (baseplate) จะมีผลมาจากการออกแบบเมื่อระบบทำงานจะใช้ LDV วัดผลที่เกิดขึ้นในบริเวณด้านข้างของหัวอ่านเป็นสัญญาณออก (output $x(t)$) ของระบบ จากการทดลองพบว่าค่าของอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ไม่ส่งผลต่อโหมดของความถี่การสั่นพ้อง สำหรับผลการทดลองจะเป็นดังตารางที่ 5.1 โดยตารางจะอยู่ในส่วนของหัวข้อ 5.5 ผลการทดลองและอภิปรายผล

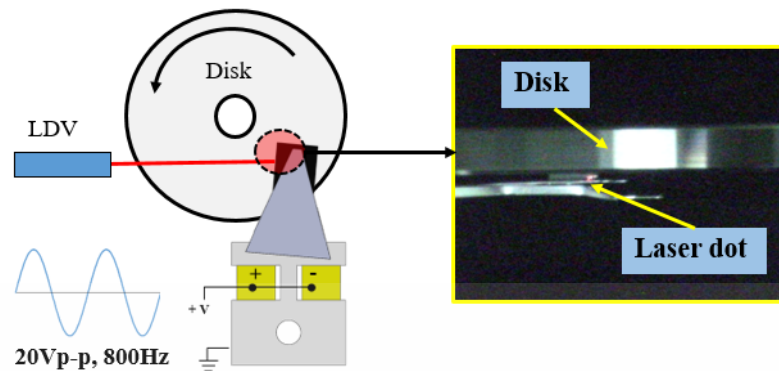


รูปที่ 5.2 การทดลองวัดความถี่การสั่นพ้องหัวอ่าน

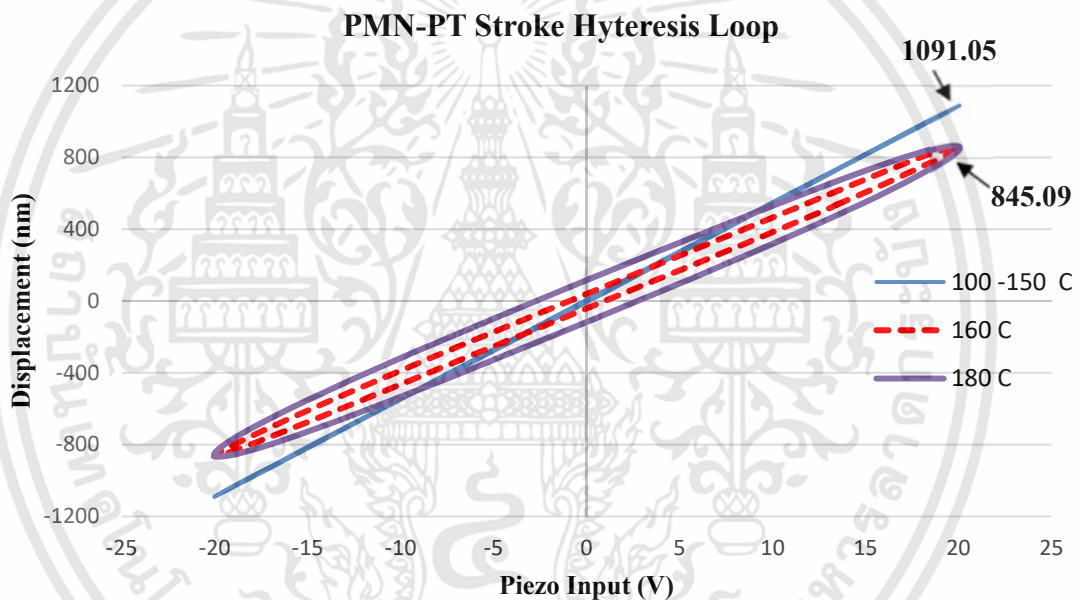
5.3 ความน่าเชื่อถือเชิงสถิติศาสตร์

การวัดระยะเคลื่อนที่ของหัวอ่าน จะใช้เครื่องมือวัดระยะการเคลื่อนที่แบบ LDV ยี่ห้อ Polytec รุ่น OFV-534 โดยกำหนดเงื่อนไขด้วยการป้อนสัญญาณคลื่นแบบไซน์ (sinusoidal wave form) ความถี่ 800 เฮิร์ตซ์ (Hz) ที่แรงดันไฟฟ้า 20 โวลต์ จำนวน 10 รอบ ดังรูปที่ 5.3 เมื่อทำการทดลองป้อนสัญญาณคลื่นความถี่ตามเงื่อนไขทดลองไปยังหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะเกิดการเคลื่อนที่แกว่งไปมา เมื่อทำการวัดการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน-เขียน ออกมาเป็นสัญญาณเอาต์พุตจากสัญญาณ LDV จะสามารถนำมาคำนวณระยะการเคลื่อนที่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5.4 จากรูปจะเห็นระยะการเคลื่อนที่เป็น 2 กลุ่ม กล่าวคือ กลุ่มที่มีอุณหภูมิระหว่าง 130-150 °C จะมีระยะการเคลื่อนที่สูงสุดอยู่ที่ 1091.05 นาโนเมตร (nm) และกลุ่มที่ 2 จะมีอุณหภูมิ 160 และ 180 °C มีระยะการเคลื่อนที่สูงสุดประมาณ 845.09 นาโนเมตร (nm) จะเห็นได้ว่าเมื่อ อุณหภูมิมากกว่า 150 °C ระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะเริ่มลดลง และผลจากการป้อนสัญญาณคลื่นแบบไซน์สามารถนำค่าข้อมูลที่ได้ไปแสดงค่าการเกิดวงฮีสเทอรีซิส จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิมากกว่า 150 °C การเกิดวงฮีสเทอรีซิสจะเริ่มมีค่ามากขึ้น ส่งผลให้เกิดการลดลงของเสถียรภาพในการควบคุมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.3 การวัดระยะเคลื่อนที่ของหัวอ่าน



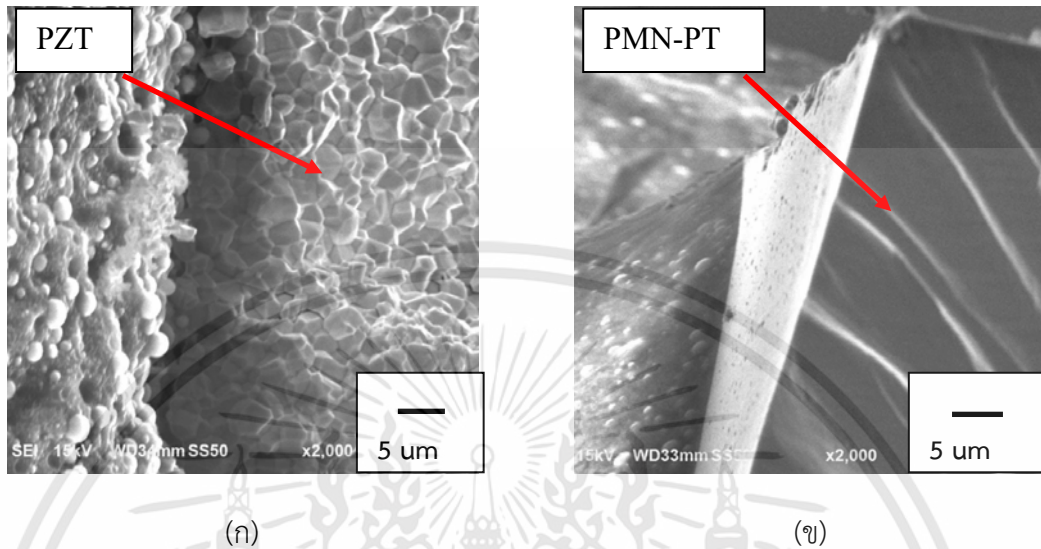
รูปที่ 5.4 ระยะเวลาเคลื่อนที่ของหัวอ่านและการเกิดวงฮีสเทรีซิส

5.4. ความน่าเชื่อถือเชิงความคงทน

สิ่งสำคัญสำหรับหัวอ่าน-เขียนข้อมูล คือ ความคงทนของอุปกรณ์ในการใช้งาน รวมถึงขบวนการผลิตที่สามารถลดของเสียจากระบบได้ หนึ่งในปัญหาที่สำคัญคือ วัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่มีข้อเสียในปัจจุบัน คือ ยากต่อการแตกหักเสียหาย และเมื่อเกิดการเสียหายจะต้องทิ้งหัวอ่าน-เขียนข้อมูลเกือบทั้งหมดทันที เนื่องจากกระบวนการติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกมีกระบวนการติดกาวแบบถาวรในขั้นตอนประกอบ สำหรับงานวิจัยนี้แนะนำวัสดุชนิดใหม่คือ PMN-PT มาลองใช้แทนแบบเดิมที่เป็นชนิด PZT เนื่องจาก PMN-PT มีความแข็งแรงมากกว่า สามารถดูได้จากโครงสร้างอะตอมภายใน ดังรูปที่ 5.5 เป็นการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) ตั้งกำลังขยาย 2,000 เท่า เพื่อดูลักษณะโครงสร้าง โดยที่รูป 5.5 (ก) จะเป็นของ PZT โดยจะเห็นเป็นลักษณะเนื้อเป็นอนุภาคเล็กๆ ขนาด 2-3 ไมโครเมตร (μm) ยึดติดกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับรูป 5.5 (ข) จะเป็นของ PMN-PT ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบเนื้อเดียวกัน ทำให้เชื่อได้ว่าจะมี ความแข็งแรงกว่าโครงสร้าง PZT ดังนั้นการทดสอบความแข็งแรงโดยวัดค่าแรงกดสูงสุดในการทำให้วัสดุ เพียโซอิเล็กทริกแตกหัก จะเป็นข้อมูลสำคัญในการพิสูจน์ความแข็งแรงของ PMN-PT ได้



รูปที่ 5.5 ภาพกำลังขยายสูงถึง 2,000 เท่า (ก) PZT และ (ข) PMN-PT

ในการทดสอบวัดแรงกดไปยังบริเวณผิวของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกให้แตก จะใช้เครื่องมือวัด ยี่ห้อ IMADA รุ่น PZ-4 (digital force gauge) เป็นดังรูปที่ 5.5 (ก) สำหรับการบันทึกค่าแรงกดสูงสุด เครื่องจะทำการบันทึกค่าอัตโนมัติเมื่อหัวสัมผัสของเครื่องกดแผ่นวัสดุเพียโซอิเล็กทริกจนแตก ดังแสดงในรูปที่ 5.5 (ข) ข้อกำหนดในการทดสอบจะนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT และ PMN-PT ไปผ่านความร้อนที่อุณหภูมิ 100 °C 120 °C 140 °C 150 °C 160 °C และ 180 °C หลังจากนั้นทำ การทดสอบวัดแรงกดสูงสุดที่ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกแตกหัก



(ก)



(ข)

รูปที่ 5.6 เครื่องมือวัดหาค่าแรงกดสูงสุด (ก) เครื่องวัด และ (ข) การกดให้แตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 ผลการทดลองและการอภิปราย

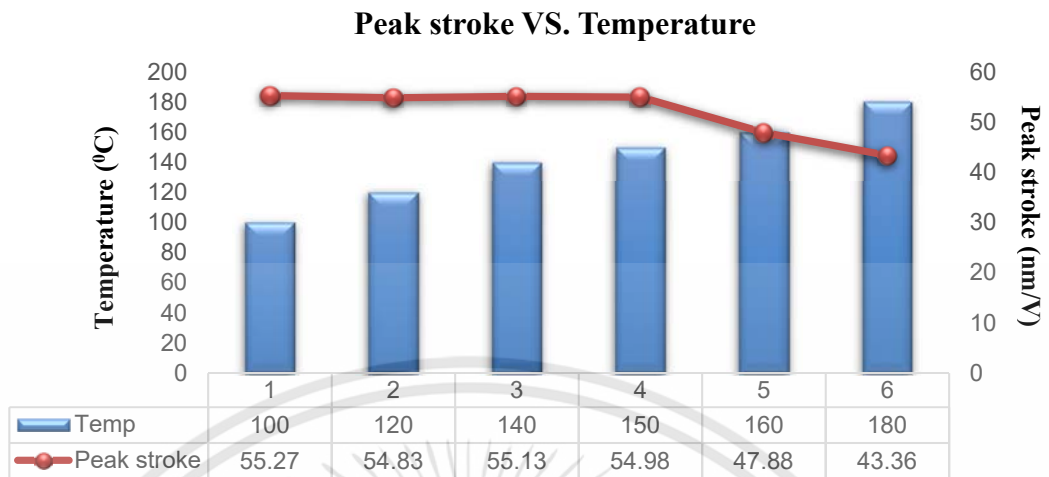
ผลการทดลองนี้จะศึกษาผลกระทบระหว่างอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับสมรรถนะของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT โดยผลการทดลองถูกแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มดังนี้

1. พฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ที่แสดงออกมาในรูปความถี่การสั่นพ้องที่มีการแสดงลักษณะทั้งหมด 5 โหมดความถี่ด้วยกัน โดยที่ผลของแต่ละโหมด และแต่ละอุณหภูมิที่ทดสอบ แสดงดังตารางที่ 5.1 จากตารางจะสังเกตเห็นได้ว่าแม้มีการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 100-180 °C ค่าความถี่การสั่นพ้องทั้ง 5 โหมดความถี่ ก็ไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT จะสูญเสียความสามารถในการเคลื่อนที่เมื่ออุณหภูมิเกิน 150 °C ก็จะไม่กระทบกับโหมดความถี่การสั่นพ้อง ดังนั้นเองในการควบคุมระบบการทำงานของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT จะยังมีเสถียรภาพในการควบคุมในการหลบเลี่ยงความถี่สั่นพ้องได้ดีกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT มาก

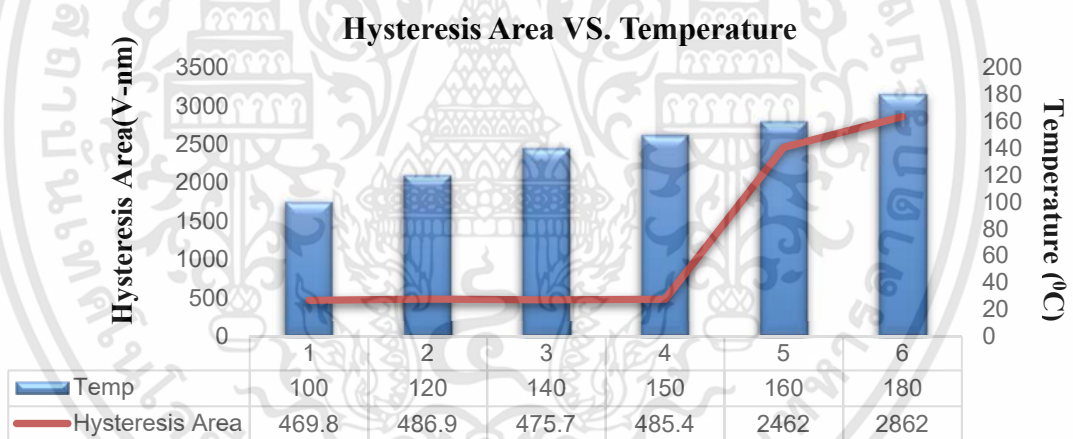
ตารางที่ 5.1 อุณหภูมิต่อความถี่การสั่นพ้องที่เกิดขึ้นบนหัวอ่าน

Temperature (°C)	1 st Bending Mode (Hz)	1 st Torsion Mode (Hz)	2 nd Bending Mode (Hz)	2 nd Torsion Mode (Hz)	Sway mode (Hz)
100	8,148	15,727	16,600	20,008	22,656
120	8,612	15,184	16,024	19,640	21,952
140	8,132	15,048	16,152	19,688	21,856
150	8,084	14,636	17,760	19,416	20,488
160	8,172	16,052	17,248	19,840	21,856
180	8,108	15,680	16,208	19,504	22,256

2. พฤติกรรมของระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เมื่อทำงานภายใต้อุณหภูมิที่สูงขึ้น จากผลการทดลองจะเห็นว่าหัวอ่าน ที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT จะทำงานได้ดี และทนอุณหภูมิสูงสุดที่ 150 °C ดังแสดงในรูปที่ 5.7 โดยปกติวัสดุ PMN-PT ทั่วไปจะทนความร้อนได้ไม่เกิน 100 °C โดยวัสดุ PMN-PT ที่ใช้ในการทดลองถือว่ามีพัฒนาให้ทนความร้อนสูงกว่าปกติมาก ดังนั้นหากจะนำหัวอ่าน ไปใช้กับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ สามารถนำไปใช้กับผลิตภัณฑ์ที่ทนความร้อนได้ไม่เกิน 150 °C ในกรณีเดียวกันกับค่าพื้นที่การเกิดวงฮีสเทอรีซิส ที่วัดการเคลื่อนที่ไปกลับ หากมีค่าสูงแสดงถึงสมรรถนะการควบคุมเสถียรภาพต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 5.8 จะเห็นว่าค่าพื้นที่การเกิดวงฮีสเทอรีซิสจะเริ่มมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 150 °C

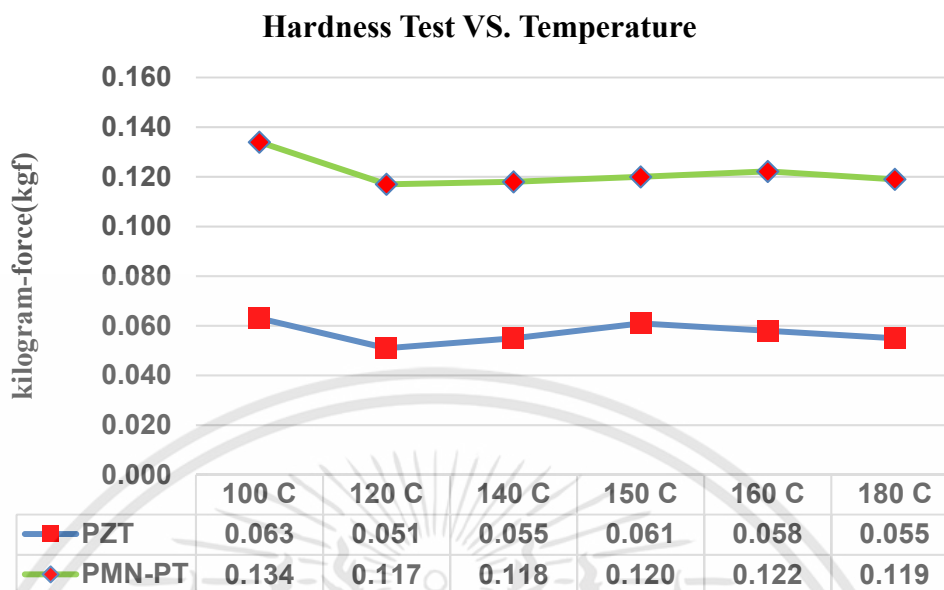


รูปที่ 5.7 ผลของการวัดระยะเคลื่อนที่ของหัวอ่านต่ออุณหภูมิ



รูปที่ 5.8 พื้นที่การเกิดวงฮิสเทอรีซิสต่ออุณหภูมิ

3. สำหรับพฤติกรรมความถี่การสั่นสูงสุดที่ทำให้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกเกิดการแตกหักเมื่อทดสอบด้วยการเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยผลการทดสอบแรงกดแต่ละช่วงอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 5.9 จะเห็นได้ว่าผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลต่อความแข็งของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 ชนิด แต่จะเห็นว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีความแข็งและทนแรงกดมากกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ถึงสองเท่า



รูปที่ 5.9 ค่าแรงกดสูงสุดระหว่าง PZT และ PMN-PT เทียบกับอุณหภูมิ

5.6 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองความน่าเชื่อถือของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT สามารถสรุปได้ว่ามีความทนต่อความร้อนสูงสุดถึง 150 °C สำหรับการเสื่อมของระยะการเคลื่อนที่ ถ้าหากดูผลกระทบของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกในเชิงพลศาสตร์ด้านความถี่สั่นพ้องที่เกิดขึ้น ไม่มีผลต่ออุณหภูมิ และความถี่ของวัสดุเช่นเดียวกัน ถึงแม้หัวอ่านที่มีตัวขับเราแบบทุติยภูมิด้วยวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ที่ผ่านความร้อนเกิน 150 °C ค่าความถี่สั่นพ้อง และความถี่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก โดยที่อุณหภูมิจะไม่ส่งผลกระทบต่อระยะการเคลื่อนที่เท่าที่จำเป็น สำหรับการทดสอบแรงกดจะเห็นว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีความแข็งแรงมากกว่าถึง 2 เท่า เมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่ใช้ในปัจจุบันกับกระบวนการผลิตหัวอ่านอาร์ติสก์ไดรฟ์

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มาประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์โดยทำหน้าที่เป็นตัวขับเคลื่อนแบบทุติยภูมิ ซึ่งเป็นการนำไปประยุกต์ใช้จริงในอุตสาหกรรมผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของบริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ในการทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน โดยในส่วนแรกจะทำการทดลองเฉพาะตัววัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้งแบบ PZT และ PMN-PT ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก แบบ PZT และ PMN-PT ผ่านการจำลองรูปแบบคานเปลี่ยนรูปชั้นเดียว (unimorph cantilever model) จากข้อมูลของผลการทดสอบประสิทธิภาพทั้งในด้านพลศาสตร์และสถิตยศาสตร์ ไม่ว่าจะเป็นการคำนวณตามทฤษฎีการจำลองผ่านระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และการทดลองจริง ผลของข้อมูลล้วนสอดคล้องกัน และแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกที่เกิดความถี่สั่นพ้องทั้ง 5 โหมด เมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกทั้ง 2 แบบ จะเกิดขึ้นเป็นลักษณะเดียวกัน แต่ระยะการเคลื่อนที่มากกว่าแบบ PZT ถึง 9 เท่า

ในส่วนที่สองเป็นการนำเอาวัสดุเพียโซอิเล็กทริกไปประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริกทั้งแบบ PMN-PT และ PZT เมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์พบว่ามีความถี่สั่นพ้องที่สอดคล้องกัน แต่เมื่อพิจารณาในส่วนพฤติกรรมเชิงสถิตยศาสตร์จะพบว่าระยะการเคลื่อนที่ของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีค่ามากกว่าสูงถึง 2.24 เท่า ส่งผลให้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT เคลื่อนที่เข้าถึงแถบข้อมูลบนจานแม่เหล็กได้รวดเร็วกว่าแบบที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ในปัจจุบัน และที่สำคัญมีค่าพื้นที่การเกิดวงฮิสเตอร์ซิสน้อยกว่าถึง 10 เท่า ส่งผลให้มีเสถียรภาพในการควบคุมที่แม่นยำและง่ายกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT มาก

ส่วนสุดท้ายเป็นการทดสอบความน่าเชื่อถือของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก PMN-PT สามารถทนต่อความร้อนสูงสุดถึง 150°C และเมื่ออุณหภูมิเกิน 150°C จะเกิดการเสื่อมของระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ถ้าหากดูผลกระทบของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกเชิงพลศาสตร์ในด้านความถี่การสั่นพ้องที่เกิดขึ้น จะไม่มีผลกระทบต่ออุณหภูมิที่เพิ่มมากขึ้น กล่าวคือไม่ว่าอุณหภูมิมีค่าสูงเกินอุณหภูมิคูรีก็ตาม โหมดในการเกิดความถี่การสั่นพ้องก็จะไม่เปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ และในส่วนของความแข็งแรงทนต่อแรงกดของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีความแข็งแรงมากกว่า 2 เท่า เมื่อเทียบกับวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ที่ใช้ในปัจจุบันของกระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

สรุปได้ว่าหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริกแบบ PMN-PT มีประสิทธิภาพสูงกว่าในแบบปัจจุบันคือ PZT ในเชิงของระยะการเคลื่อนที่ของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มากกว่าถึง 2 เท่า และพฤติกรรมในช่วงความถี่สั่นพ้องไม่เปลี่ยนแปลงสามารถนำไปติดตั้งบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์กับรุ่นปัจจุบันของ บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด ได้โดยไม่ต้องทำการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบใหม่ เนื่องจากว่าโหมดความถี่การสั่นพ้องยังอยู่ในช่วงความถี่เดิม เท่ากับว่าไม่ต้องเสียเวลาและเงินลงทุน ในการพัฒนา

โปรแกรม อีกประเด็นที่สำคัญคือความแข็งแรงทนต่อแรงกดที่มากกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ถึง 2 เท่า เนื่องจากหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์นับเป็นชิ้นส่วนที่มีราคาแพงที่สุด หากเมื่อวัสดุเพียโซอิเล็กทริกบนหัวอ่านเกิดการแตกหัก จะไม่สามารถนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกออกแล้วเปลี่ยนใหม่ได้ จะต้องทำการทิ้งหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ทั้งชุด ดังนั้นหากนำวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มาใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ จะส่งผลให้กระบวนการประกอบหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ลดจำนวนของเสียจากการแตกหักของวัสดุเพียโซอิเล็กทริกลงได้ ทำให้บริษัทลดของเสียและเพิ่มกำไรขึ้นได้

6.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการค้นคว้าพัฒนา

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ทดสอบประยุกต์ติดตั้งวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ลงในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และวัดประสิทธิภาพในเชิงการเคลื่อนที่ของหัวอ่านที่ได้ค่าระยะการเคลื่อนที่มากกว่าวัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PZT ถึง 2 เท่า ในทางทฤษฎีระบุว่าจะระยะช่วงการทำงานของหัวอ่าน-เขียนข้อมูลแบบละเอียดที่มีค่ามาก จะสามารถเข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นเองแนวทางในการพัฒนาต่อยอดจากงานวิจัยนี้สามารถนำหัวอ่านที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT ไปพัฒนาการอ่าน-เขียนของหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แบบใหม่ที่มีความไวสูงได้ กล่าวคือในปัจจุบันการเข้าถึงข้อมูลบนแถบแม่เหล็กหัวอ่านจะเคลื่อนที่ 2 จังหวะคือ จังหวะแรกจะเคลื่อนที่ด้วยแตร็กค้นหา (track-seeking) และจังหวะที่สองเป็นแตร็กติดตาม (track-following) กล่าวคือ

1 การเคลื่อนที่ = 1 แตร็กค้นหา และ 1 แตร็กติดตาม

หากสามารถนำไปพัฒนาระบบควบคุม ให้การทำงานของหัวอ่าน-เขียนข้อมูลเคลื่อนที่ด้วยชุดคำสั่ง

1 การเคลื่อนที่ = 1 แตร็กค้นหา และ หลายแตร็กติดตาม

เนื่องจากหัวอ่านที่ใช้วัสดุเพียโซอิเล็กทริกชนิด PMN-PT มีระยะเคลื่อนที่กว้างมาก ดังนั้นหากมีการพัฒนาระบบควบคุมการอ่าน-เขียนข้อมูลแบบใหม่ที่สามารถเคลื่อนที่ 1 ครั้งแล้วสามารถอ่านหลายแตร็ก ติดตามได้ จะได้หัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่มีความไวในการเข้าถึงข้อมูลสูงมาก

เอกสารอ้างอิง

- [1] Guo W., Huang T., Bi C., Chang K.T. and Low T.S. “A high bandwidth piezoelectric suspension for high track density magnetic data storage devices.” **IEEE Trans. on Magnetics.** vol. 34. 1998. pp. 1907–1909.
- [2] Soeno Y., Ichikawa S., Tsuna T., Sato Y. and Sato I. “Piezoelectric piggy-back microactuator for hard disk drive.” **IEEE Trans. on Magnetics.** vol. 35. 1999 pp. 983–987.
- [3] Niu Y.M., Guo W., Guo G.X., Eng H.O., Sivadasan K.K. and Huang T. “Track-following control of a dual-for high TPI hard disk servo systems.” **IEEE Trans. on Magnetics.** vol. 36. 2000. pp. 2241–2243.
- [4] Mori K., Munemoto T., Otsuki H., Yamaguchi Y. and Akagi K. “A Dual Stage Magnetic Disk Drive Actuator Using A Piezoelectric Device for a High Track Density.” **IEEE Trans. on Magnetics.** vol. 27. 1991. pp. 5298-5300.
- [5] Thum C.K., Du C., Zhang J., Tan K.P., Chen B.M. and Ong E.H. “Servo Control Design for a High TPI Servo Track Writer with Microactuators.” **IEEE Trans. on Magnetics.** vol. 44. 2008. pp. 2227-2234.
- [6] Evans R.B., Griesbach J.S. and Messner W.C. “Piezoelectric Microactuator for Dual Stage Control” **IEEE Trans. on Magnetics.** vol. 35. 1999. pp. 977-982.
- [7] Koganezawa S., Uematsu Y. and Yamada T. “Dual-stage Actuator System for Magnetic Disk Drives using a Shear Mode Piezoelectric Microactuator.” **IEEE Trans. on Magnetics.** vol. 35. 1999. pp. 988-992.
- [8] Miu D.K. “Silicon Microactuators for Rigid Disk Drives.” **Data Storage.** Jul.-Aug. 1995. pp. 33.
- [9] Horsley D.A., Wongkomet N., Horowitz R. and Pisano A.P. “Precision Positioning using a Microfabricated Electrostatic Actuator.” **IEEE Trans. on Magnetics.** vol. 35. 1999. pp. 993-999.
- [10] Kim B.H. and Chun K. “Fabrication of an Electrostatic Track-following Microactuator for Hard Disk Drives using SOI Wafer.” **J. Micromech. Microeng.** vol.11. 2001. pp. 1-6.
- [11] Anandtech. “**Seagate: hard disk drives set to stay relevant for 20 years**” [Online]. Available : <https://www.anandtech.com/show/9858/seagate-hard-disk-drives-set-to-stay-relevant-for-20-years>. Dec. 2015.
- [12] Nabavi S. “**Signal processing for bit-patterned media channel with inter-track interference**” Ph.D. Carnegie Mellon University. 2008.

- [13] Hu J., Duman T.M., Erden M.F. and Kavcic A. “Achievable information rates for channels with insertions, deletions and intersymbol interference with i.i.d inputs.” **IEEE Transactions on Communications**. vol. 58. 2010. pp. 1102–1111.
- [14] Shiroishi Y., Fukuda K., Tagawa I., Iwasaki H., Takenoiri S., Tanaka H., Mutoh H. and Yoshikawa N. “Future options for HDD storage” **IEEE Transactions on Magnetics**. vol. 45. 2009. pp. 3816–3822.
- [15] Seagate. “How storage solutions are evolving to meet insatiable global data demands” [Online]. Available : <http://www.seagate.com/files/www.content/promos/highcapacitydrives/shared/docs/high-capacity-tp687-1-1601us.pdf>. Apr. 2017.
- [16] Hughes G.F. “Read channels for patterned media.” **IEEE Transactions on Magnetics**. vol. 35. 1999. pp.2310-2312.
- [17] Hughes G.F. “Patterned media write designs.” **IEEE Transactions on Magnetics**. vol. 36. 2000. pp.521-527.
- [18] Tipcharoen W., Warisarn C., Kaewrawang A. and Kovintavewat P. “Effect of hotspot position fluctuation to writing capability in heated-dot magnetic recording” **Japanese Journal of Applied Physics**. vol.55. 2016. pp. 07MB01.
- [19] Seagate. “Tech talk on HDD areal density” [Online]. Available : http://www.seagate.com/www-content/investors/_shared/docs/tech-talk-mark-re-20150825.pdf. Apr. 2017.
- [20] Ng Y., Vijaya Kumar B.V.K., Cai K., Nabavi S. and Chong T.C. “Picket-shift code for bit-patterned media recording with insertion/deletion errors.” **IEEE Transactions on Magnetics**. vol. 46. 2010. pp.2268–2271.
- [21] Heath J. “Design of a Swinging Arm Actuator for a Disk File” **IBM Journal of research and Development**. 1976. pp.389-97.
- [22] Yen J., Hallamasek K. and Horowitz R. “Track-Following Controller Design for a Compound Disk Drive Actuator” **Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control**. 1990. pp.391-402.
- [23] Zappe H. “The 2--stage control concept for magnetic recording: Technology challenges in magnetic recording.” **IEEE Micro Electro Mechanical Systems**. 1990.
- [24] Fujita H., Gabriel K. “New opportunities for micro actuators” **Digest of Technical Papers, Transducers**. 1911. pp. 14-20.
- [25] Mori K., Munemoto T., Otsuki H., Yamaguchi Y., Akagi K. “A Dual-Stage Magnetic Disk Drive Actuator Using A Piezoelectric Device for a High Track Density” **IEEE Trans. on Magnetics**. 1991. pp. 5298-5330.

- [26] Takaishi K., et al. “Microactuator Control for Disk Drive.” **IEEE Transactions on Magnetics**. 1996. pp. 1863-1866.
- [27] Horowitz R., Cheung P. and Howe R. “Position Sensing and Control of Electrostatically-driven Polysilicon Microactuators” **Magnetic Recording conference**. 1995
- [28] Kobayashi M., Yamaguchi T., Horowitz R. “Track-Seeking Controller Design for Dual-Stage Actuator in Magnetic Disk Drives.” **Proc. of American Control Conference**. 2000. pp. 2610-2614.
- [29] Naniwa et al. “Low Voltage Driven Piggy-Back Actuator of Hard Disk Drives” **IEEE Micro Electro Mechanical Systems**. 1999. pp 45-52.
- [30] Soeno Y., et al. “Piezoelectric Piggy-Back Microactuator for Hard Disk Drive” **Trans. On Magnetics**. 1999. pp.983-87.
- [31] Nakamura S., Suzuki K., Ataka M. and Mukasa K. “An Electrostatic Microactuator for a Magnetic Head Tracking System of Hard Disk Drives” **Advances in Information Storage Systems**. 1997. pp.83-99.
- [32] Tang W., Temesvary V., Yao J., Tai Y.C., Miu D. “Silicon Microactuators for Computer Disk Drives” **Japanese Journal of Applied Physics**. 1996. pp. 350-356.
- [33] Jing Y, Luo J, Yang W and Ju G. “Fabrication of piezoelectric ceramic micro-actuator and its reliability for hard disk drives” **IEEE Trans Ultrason Ferroelectric Freq Control**. Nov. 2004. pp.1470-6.
- [34] Koganezawa S., Uematsu Y. and Yamada T. “Dual-Stage Actuator System for Magnetic Disk Drives” **IEEE Trans. on Magnetics**. 1999. pp.988-992. 1999.
- [35] Wernow J., Horowitz R. “Quasi-shear mode piezoelectric microactuator for head-based servo control in hard disk drives” **IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)**. 2012. pp.1169-1172.
- [36] Sasaki M., Suzuki T., Ida E., Fujisawa F., Kobayashi M. and Hirai H. “Track-following control of a dual-stage hard disk drive using a neuro-control system” **Eng. Appl. Artif. Intell.** vol.11. 1998. pp.707-716.
- [37] Liu X., Liu J. and Lim C.K. “FEM and experimental analysis of the actuator butterfly mode in a hard-disk drive” **Mech. Syst. Signal Process.** vol.17. 2003. pp. 955-964.
- [38] Shiraishi M. and Yao M.G. “**Method and apparatus for the physical and electrical coupling of a hard disk micro-actuator and magnetic head to a drive arm suspension**” WO Patent no. 060886. 2003.
- [39] Kueppers H., Leuerer T., Schnakenberg U., Mokwa W., Hoffmann M., Schneller T., Boettger U. and Waser R. “PZT thin films for piezoelectric microactuator applications” **Sensor and Actuator A**. vol. 97-98. 2002. pp 680-684.

- [40] Hsueh C.C., Tamagawa T. and Ye C. “Sol-gel derived ferroelectric thin films in silicon micromachining” **Int. Ferroelectrics**. vol.3. 1993. pp.21-32.
- [41] Mori K., Hirai H., Takahashi T., Naruse J., Nishimura Y. and Kawamoto M. “**Disk systems with sub-actuators for fine head displacement**” US patent no. 5189578. 1993.
- [42] Mei S. “**Microactuated disk drive suspension with heightened stroke sensitivity**” US Patent no. 6239953. 2001.
- [43] Tokuyama M., Shimizu T., Masuda H., Nakamura S., Hanya M., Iriuchijima O. and Soga J. “Development of a phi-shaped actuated suspension for 100-kTPI hard disk drives” **IEEE Trans. Magazine**. vol.37. 2001. pp. 1884-1886.
- [44] Sitti M., Campolo D., Yan J. and Ronald S. “Fearing, Development of PZT and PZN-PT Based Unimorph Actuators for Micromechanical Flapping Mechanisms” **ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation**. 2001
- [45] Khadraoui S. and Rakotondrabe M. “Optimal design of piezoelectric cantilevered actuators with guaranteed performances by using interval techniques” **IEEE/ASME TRANSACTIONS ON MECHATRONICS**.
- [46] Huang C., Lin Y. and Tang T.A. “Study on the tipdeflection of a piezoelectric bimorph cantilever in the static state” **J. Micromech. Microeng.** vol. 14. 2004. pp. 530-534.
- [47] Wattananukulchai P., Isarakorn D. “A comparative study based on classical and newer piezoelectric materials based unimorph actuators for Hard Disk Drive” **IEEE Region 10 Conference**. 2016. pp.3464-3467.
- [48] Yanagisawa M. “**Magnetic Disc Apparatus and Magnetic Head in which a Recording/Reproduction Element is Mounted on a Slider Via a Piezoelectric Element**” U.S. Patent no. 6928722B2. 2005.
- [49] Imamura T., Koshikawa T., Katayama M. “Transverse Mode Electrostatic Microactuator for MEMS-Based HDD Slider” **IEEE Micro Electro Mechanical Systems**. 1996. pp.216-21.
- [50] Horsley D., Singh A., Pisano A., Horowitz R. “Angular Micropositioner for Disk Drives” **IEEE Micro Electro Mechanical Systems**. 1997. pp.454-459.
- [51] Fan L., Ottensen H., Reiley R., Wood R. “Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator-Based Two--Stage Servo System” **IEEE Transactions on Industrial Electronics**. 1995. pp.222-233.
- [52] Oldham K., Huang X., Chahwan A. and Horowitz R. “Design, Fabrication, and Control of a High-Aspect Ratio Microactuator for Vibration Supression in a Hard Disk Drive” **IFAC 6th**. 2005.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [ก-1] Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn “Performance Evaluation using Laser Doppler Vibrometer Sensing Technique on Advanced Lead Magnesium Niobate-Lead Titanate Piezoelectric-Material-Based Microactuator for Hard Drive Head” **Sensors and Materials**. Vol. 30. No. 10.
- [ก-2] Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn “Reliability of PMN-PT Piezoelectric Material as an Actuator for High Density Hard Disk Drive” **15th ECTI-CON**. Jul. 2018. pp. 188-192.
- [ก-3] Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn “A comparative study based on classical and newer piezoelectric materials based unimorph actuators for Hard Disk Drive” **IEEE Region 10 Conference (TENCON)**. Nov. 2016. pp. 3468-3471.



Volume 30 Number 10(1) 2018

ISSN 0914-4935
CODEN: SENMER

Sensors and Materials

An International Journal on Sensor Technology

EDITOR-IN-CHIEF

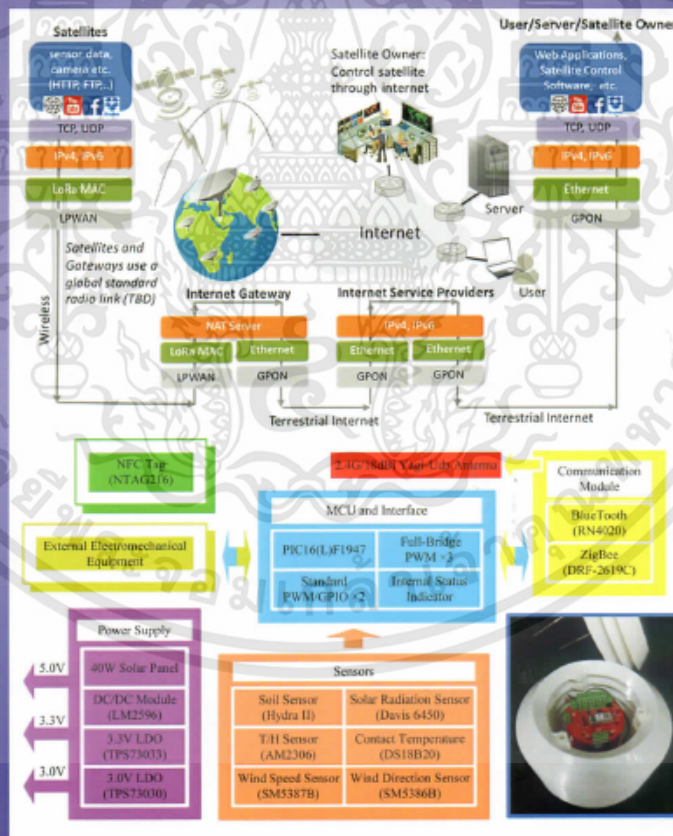
M. Ishida

EDITORS

J. Wilde K. Toko S. Roy

ASSOCIATE EDITORS

K. Maenaka K. Mitsubayashi



MYU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Performance Evaluation Using Laser Doppler Vibrometer Sensing Technique on Advanced Lead Magnesium Niobate-lead Titanate Piezoelectric-material-based Microactuator for Hard Drive Head

Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn*

Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

(Received December 15, 2017; accepted February 13, 2018)

Keywords: PZT, PMN-PT, HDD, HGA, TPI, resonance, stroke, DSA

This paper presents a microactuator for a dual-stage actuator (DSA) of hard disk drive (HDD) based on a lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-PT) piezoelectric material and a comparative evaluation of its performance versus that of a traditional lead zirconate titanate (PZT) microactuator using the laser Doppler vibrometer (LDV) sensing technique. PZT microactuator technology has commonly been implemented in the read/write (R/W) magnetic head of HDD. It has a significant function, that is, it moves the magnetic head rapidly and accurately. In order to achieve both accurate positioning control on data tracks and high-speed access across another data track, advanced high-performance actuators and servo control technologies are necessary. An actuator with a wide stroke travel range is essential for HDD as it gives a high-speed access performance. In this study, we focused on comparing the proposed dual-stage PMN-PT head-based actuator with the existing PZT actuator that were mounted on a commercial head gimbal assembly (HGA) using an LDV to determine whether the proposed device could be a worthy replacement of the traditional PZT microactuator. Our experimental results show that the proposed PMN-PT microactuator provided more than twofold improvement in the stroke travel of the R/W magnetic head. Moreover, its dynamic behavior was suitable for assembling a high-density HDD in the future for big data storage without any needs to redesign the HGA nor to costly invest in new assembling machines in a production line. The comparative data of dynamic and static behaviors of PMN-PT versus PZT obtained in this study may be put to good use by sensor designers. Moreover, for many cyber-physical system designers, our data may make them take interest in PMN-PT as a better-performing sensor and an actuator for their systems.

1. Introduction

Setting a technological roadmap for the hard disk drive (HDD) industry is the key to expanding storage capacity for supporting the analysis of a huge volume of cyber data in cloud computing. One of the most challenging issues that is a consequence of tremendously increased

*Corresponding author: e-mail: don.is@kmitl.ac.th
<https://doi.org/10.18494/SAM.2018.1848>

areal density is that it requires extremely smaller HDD track widths. HDD track widths have been getting smaller at a rate of approximately 15% annually for concentric recording,⁽¹⁾ in which bits are written in concentric segments across the radius of each disk. The write-read head in HDD is a mechanically positioned magnetic head. A radially traversing head reads data that are stored on concentric data tracks on a rotating disk. The recording density and spindle rotation speed of HDD have been developed and have advanced at a remarkable rate over the past decade, but the number of tracks per inch (TPI) has been much more difficult to develop. Fortunately, the number of bits per inch (BPI) can be increased by using highly advanced head and media technologies.⁽²⁾ An extremely precise track-following system is necessary for attaining higher track densities. A second-stage actuator for finely moving a read/write (R/W) magnetic head is considered to be a good solution that meets the higher accuracy and speed requirements of the more advanced servomechanism in today's HDD.^(3,4) For second-stage actuation, a precise actuator assembly is integrated into the head gimbal assembly (HGA) at a location near the magnetic heads and isolated from the voice coil motor (VCM) that is used to drive the whole actuator. To perform track-seeking, a conventional VCM moves the entire head and arm assembly at a low frequency, and the motion of the slider enables the microactuator mounted between the VCM and the slider head to perform high-frequency track-following. To meet this objective, various microactuators including piezoelectric,^(5,6) electromagnetic,⁽⁷⁾ and electrostatic^(8,9) ones have been developed.

In most solutions for second-stage actuators, the common piezoelectric material used is lead zirconate titanate [$\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ or polycrystalline lead zirconate titanate (PZT)]. PZT actuators have a very long developmental history in terms of both material and design, but now their mechanical and electrical properties may not be suitable for the future development of today's HDD head: this is because a single-layer PZT plate cannot produce a large displacement. Moreover, although a multilayer PZT plate can provide a large displacement, its cost and manufacturing complexity are prohibitive. Recently, a new piezoelectric material, lead magnesium niobate-lead titanate (PMN-PT), which has good potential for obtaining a larger displacement, has been introduced. PMN-PT has been shown to provide a much better energy harvesting performance than PZT in a paper by Panthongsy and Isarakorn;⁽¹⁰⁾ it provided an energy density of 352.85 J/gm^3 , while PZT provided only 8.44 J/gm^3 . This is the main reason why we were interested in developing PMN-PT as an actuator because their result implies that, for a given applied voltage, PMN-PT should convert the electrical energy into a longer slider head travel. Even though PMN-PT materials have a high dielectric permittivity, high piezoelectric properties, and a high electrostriction, which are much higher than those of existing PZT materials, they have a low Curie temperature and thus were not widely used in HDD. However, a new supplier-developed PMN-PT material is currently available. Therefore, in this study, we aimed to comparatively evaluate the performance characteristics of PZT versus PMN-PT extensively as used in a real actuator. It was expected that PMN-PT would provide a reasonable compromise between the static and dynamic behaviors of the actuator. In addition, the bandwidth of a microactuator crucially depends on the resonance mode: it determines the overall stability of the servo control system and the settling and seek performance characteristics of the HDD system.⁽¹¹⁾ Therefore, in this study, the resonance

mode of the proposed actuator was also determined experimentally whether it remained the same or changed to a certain degree. The comparative data of the dynamic and static behaviors of PMN-PT versus PZT obtained in this study may be put to good use by sensor designers.^(12–14)

2. Principles of HGA and Laser Doppler Vibrometer (LDV) Sensing Technique

In 1976, the first commercially available HGA used a single-stage actuator with a VCM actuator to position the R/W head at the desired location and to reduce the seek time, as shown in Fig. 1(a). To increase the HDD data density, the size of the bits that represents a piece of information stored on the disk and the spacing between HDD concentric tracks were reduced. With these reductions, it became more difficult to position the R/W head's transducer element over the center of the data track. In addition, the actuator's arm and suspension that extend from the VCM to the R/W head swing the head from the load/unload ramp beyond the disk's outer diameter to the inner-diameter data track near the central motor hub. The relatively large mass of the head stack assembly results in a relatively low vibrational resonance frequency, which makes an accurate head positioning over high-density tracks very difficult and slow. For the next-generation HDD that can meet today's areal density target of much smaller track widths, a dual-stage actuator (DSA) is needed, as shown in Fig. 1(b). A new piezoelectric material in the DSA is required to meet the technology roadmap of higher areal density.⁽¹⁵⁾ The key to achieving a DSA design is choosing the right piezoelectric materials. Generally, polycrystalline PZT is used in manufacturing HDD as it is cheaper than single-crystalline PMN-PT. However, a new fabrication technology for a PMN-PT material that is as cheap as a PZT multilayer is now available. The physical and piezoelectric properties of both are shown in Table 1.

2.1 Second-stage actuator in HGA

A DSA implemented in a HGA consists of a conventional VCM first stage and a piezoelectric actuator second stage. The second stage consists of two piezoelectric actuators attached to a

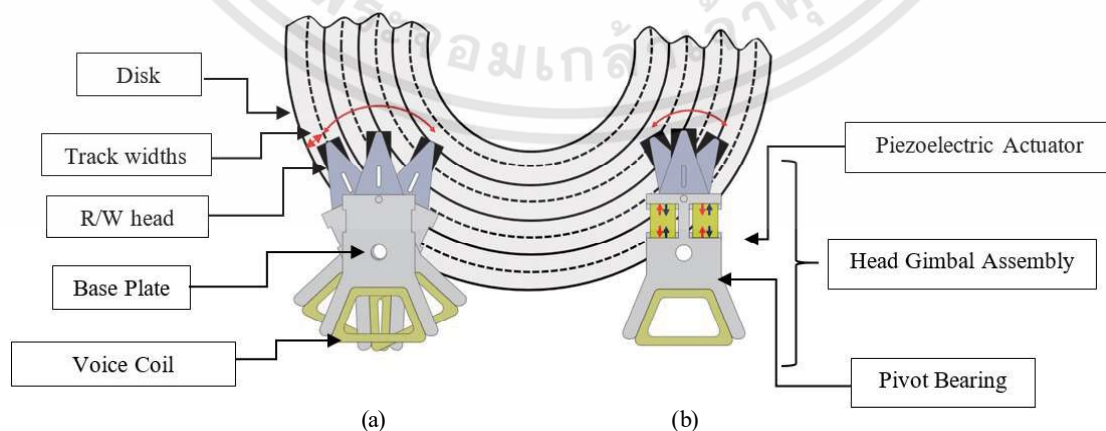


Fig. 1. (Color online) HGA designs: (a) single-stage actuator and (b) DSA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 1
Physical and piezoelectric properties.

Composition	Unit (N/A)	PZT	PMN-PT
Density (ρ)	kg/m ²	7500	8200
Dissipation ($D/\tan\delta$)	N/A	0.025	0.01
Elastic compliance (S_{11})	pm ² /N	10	14
Electromechanical coupling coefficient (k_p)	N/A	0.72	0.85
Initial depolarization field (E_c)	V/mil	20	38
Mechanical Q (Q_m)	N/A	30	42
Piezoelectric coefficient (d_{31})	pC/N	250	620
Polarization field (E_p)	V/mil	65	70
Relative dielectric constant (K_{33})	N/A	3200	4100

suspension's baseplate in a robust design as shown in Fig. 1(a). The first-stage (coarse) actuator is characterized by a large travel range, but generally poor accuracy and slow response. The second-stage (fine) actuator moves more accurately with faster response but only for a limited travel range. By combining both actuators with an appropriate control strategy, the limitations of the single-stage actuator can be overcome; a combined performance of both high precision and large travel range can be achieved.

The operation of the second-stage actuator with voltage applied to the microactuator circuit is shown in Fig. 2(b); one piezoelectric die expands as the other contracts as shown in Fig. 2(a). An application of opposite voltages causes the slider to move in opposite directions. This action causes a R/W head movement that is less than one millionth of a meter, but it is exquisitely finely controlled. Since the piezoelectric actuator stroke at the head element is very short and the moving mass is very small and light, this element's vibrational resonance frequency is much higher than that of the VCM single-stage actuator. As a result, the DSA can rapidly and accurately position the head element over the correct data track.

2.2 Piezoelectric material selection

For the past few years, the dual-stage positioning of a magnetic head in HDD by using a PZT microactuator has been favored. A piezoelectric PZT material can only actuate a very short displacement despite its advantages such as a high Curie temperature and long-term reliability. To move an R/W head through a large amount of data stored in HDD, an actuator that can cause a wide range of displacement is required. A single crystal of PMN-PT solid solution, $(1-x)[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]-x[\text{PbTiO}_3]$ (PMN-PT), is a new-generation piezoelectric material. This new material was formulated to exhibit a large electromechanical coupling coefficient, a large piezoelectric coefficient, a large dielectric constant, and a low dielectric loss. All of these properties result in the vast improvement of stroke bandwidth.

The single-crystal PMN-PT material exhibits desirable piezoelectric properties. If all of its domains were perfectly aligned, it can provide ten times the strain of a comparable polycrystalline PZT element.⁽¹⁶⁾ Nevertheless, its main weak points are its low Curie temperature and high cost.

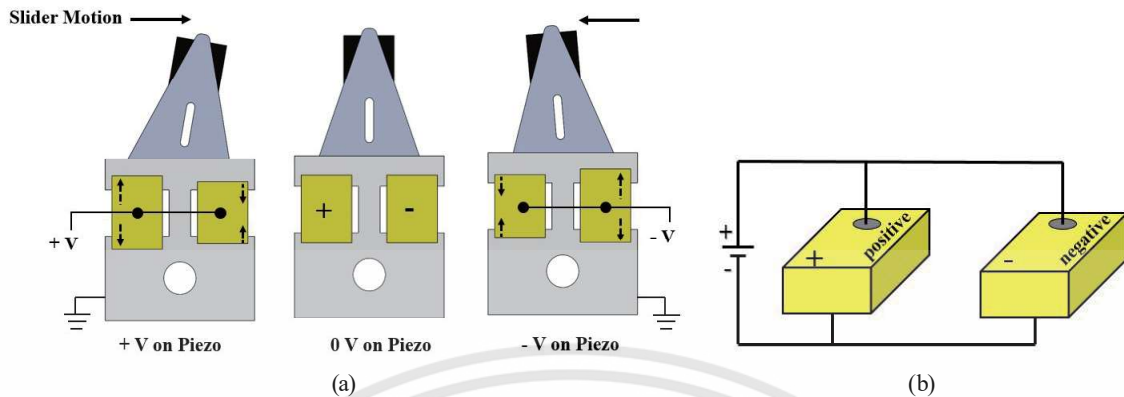


Fig. 2. (Color online) (a) R/W head movement of the second-stage piezoactuator in operation and (b) piezoelectric circuit.

Therefore, with a recent supplier development of a high-Curie-temperature and low-cost PMN-PT single crystal, it was found that PMN-PT was able to truly provide a larger displacement than PZT. This study is an extension of a previous simulation study of the displacement and resonance modes of HGA,⁽¹⁷⁾ which also suggest that the improvement could be expected. The dimensions of each layer of both piezoelectric materials are shown in Table 2. The cross-sectional electrode surface is plated with Ni chrome and Au electrodes [Figs. 3(a) and 3(b)].

Piezoelectric wafers were supplied and attached to UV release tape. It was easy to verify the poling direction; a label with either a positive (+) or negative (−) symbol was affixed to the tape to designate the positive or negative pole, respectively, as shown in Fig. 4(a), and a raw HGA nonattached piezoelectric is shown in Fig. 4(b).

2.3 LDV sensing technique

An LDV is a device for making noncontact measurements of a vibrating surface. A laser beam from an LDV is pointed at a surface of interest, and the reflected beam and its Doppler shift are extracted from the surface vibration amplitude and frequency that are the outcomes of the motion of the surface. The output of an LDV is a continuous analog voltage that is directly proportional to the target surface velocity component along the direction of the laser beam.

An LDV can be used in many types of measurement techniques that depend on a specific application purpose, such as single-point vibrometry, scanning vibrometry, three-dimensional (3D) vibrometry, rotational vibrometry, differential vibrometry, multibeam vibrometry, self-mixing vibrometry, and continuous scan laser Doppler vibrometry. In this study, we used a single-point vibrometer. It is a standard equipment for measuring the velocity of any point of a target surface under observation. In general, a laser interferometer uses two beams to measure the vibration of a target surface (a slider head in this study) with a frequency domain difference between the internal reference beam (laser signal input) and the test beam (laser signal output), as shown in Fig. 5(a). The raw data from the LDV is shown in Fig. 5(b), where the *x*-axis is the data point and the *y*-axis is the position of the moving slider head.

Table 2
Piezoelectric material dimensions and tolerance specifications.

Material layer	PZT (μm)	PMN-PT (μm)	Ni chrome (μm)	Au (μm)
Thickness	102 ± 10	102 ± 10	0.09 ± 0.03	0.175 ± 0.06
Length	1330 ± 13	1330 ± 13	1330 ± 13	1330 ± 13
Width	1016 ± 13	1016 ± 13	1016 ± 13	1016 ± 13

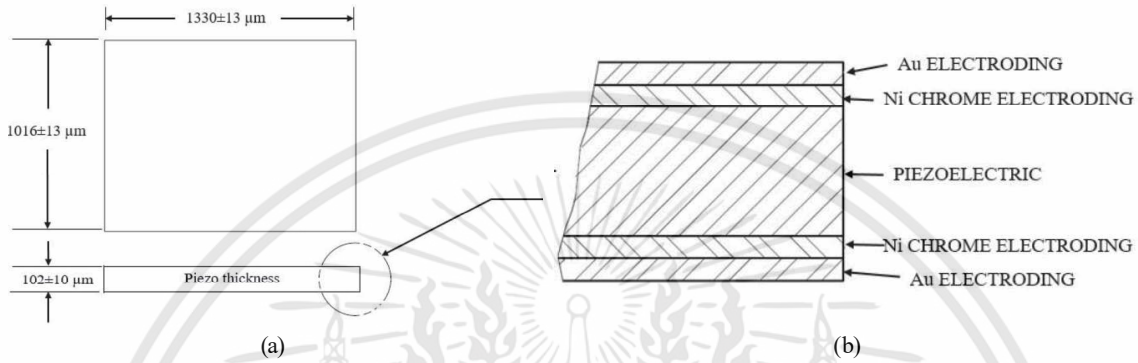


Fig. 3. (a) Piezoelectric material dimensions and (b) cross-sectional view.

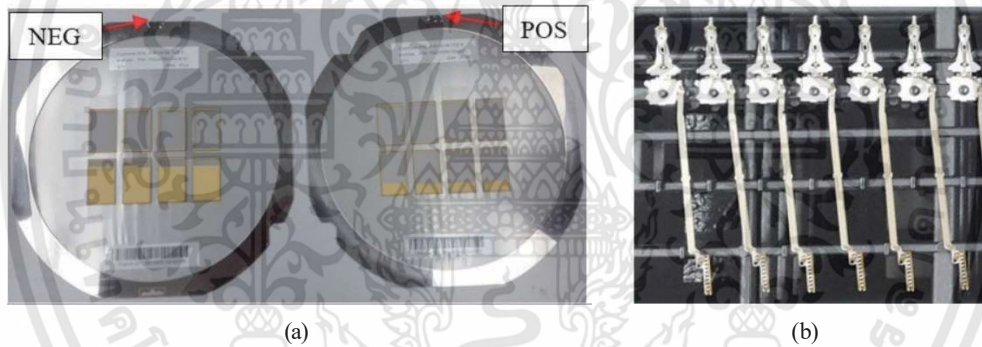


Fig. 4. (Color online) (a) Plate piezoelectric wafer and (b) raw HGA.

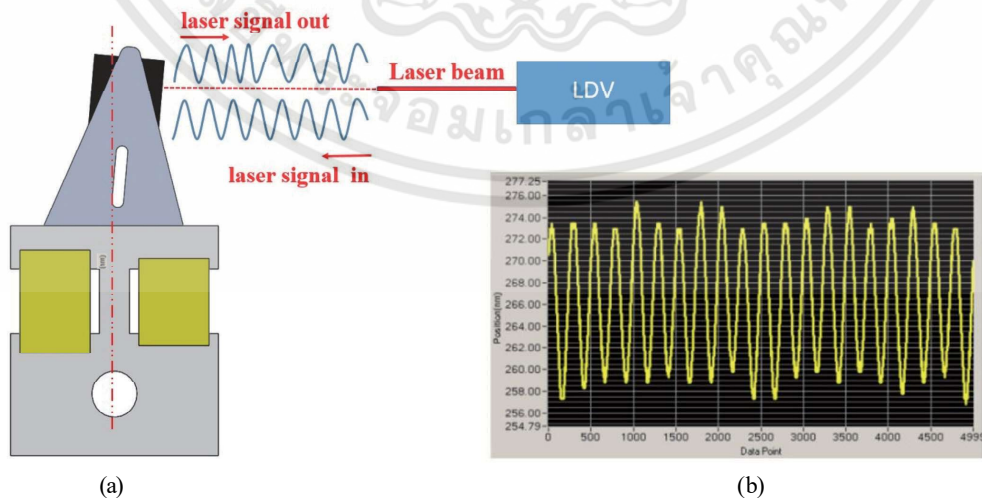


Fig. 5. (Color online) (a) LDV sensing of slider head and (b) raw data from LDV.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Piezoelectric Die Assembling Steps

The second-stage actuator of an HGA consisted of two piezoelectric dies of which the poling direction of the left die was positive and that of the right die was negative. The top surface was connected to the electrical ground with a conductive adhesive, while the bottom surface was connected to the positive pole of the driver circuit also with a conductive adhesive. At the time of the study, a suspension-based actuator was assembled by a pick-and-place machine. As shown in Fig. 6(a), the piezoelectric dies were bonded to the load beams of the HGA. Piezoelectric dies must be placed very carefully and accurately so as to avoid short-circuiting the piezoelectric or creating a non-ohmic electrical contact and to not cause a crack.

The three die assembling steps were as follows.

3.1 Dropping nonconductive and conductive adhesives on the HGA

A few drops of nonconductive adhesive, Loctite ablestik 2035SC-1B1, were applied to the load beam of HGA for securing the piezoelectric material to it and preventing short-circuiting, while a drop of conductive adhesive, Loctite ablestik 2030SC, was applied to each circuit jumper shown in Fig. 6(b) to electrically connect the piezoelectric die to the positive pole of the driver circuit.

3.2 Attaching the piezoelectric die

The piezoelectric actuator was assembled by a pick-and-place machine that placed piezoelectric dies on the load beam of the HGA that was already applied with adhesives to within stringent placement tolerances, as shown in Figs. 7(a) and 7(b). The piezoelectric dies sat on a nonconductive adhesive layer that acted as an adhesive “dam” between the surface of the piezoelectric material and that of the load beam. The nonconductive adhesive overflow distance was allowed to be up to 0.1 mm (0.004”) from the top edge of the piezoelectric plate to its body and from the top edge of the piezoelectric plate to the base plate as shown in Fig. 7(a). Similarly, the nonconductive adhesive overflow distance at the bottom edge of the piezoelectric plate was

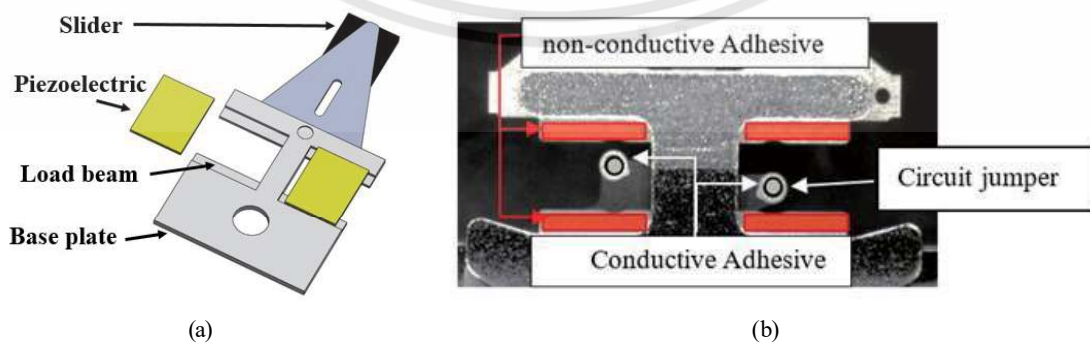


Fig. 6. (Color online) (a) Schematic of HGA and (b) area for applying adhesives.

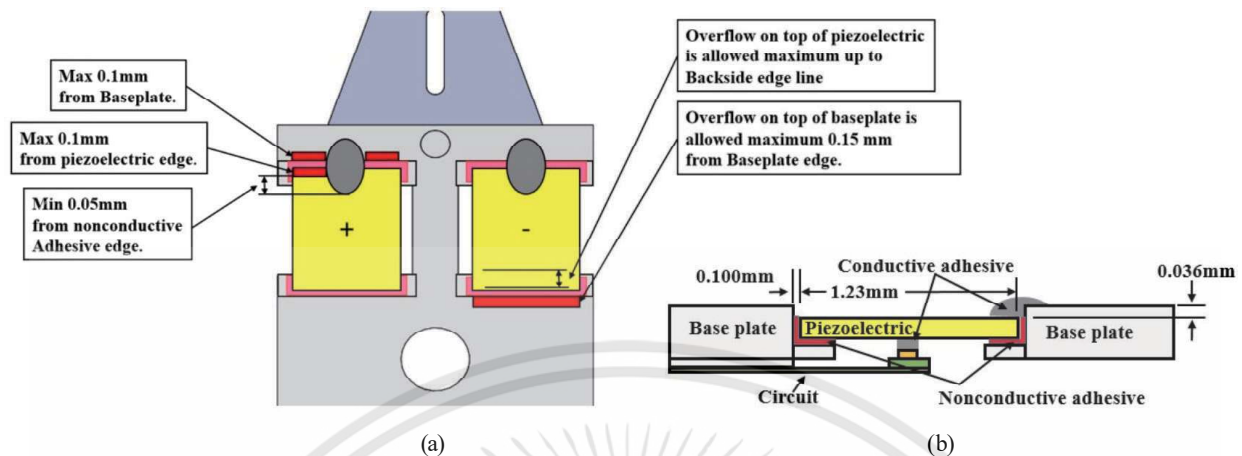


Fig. 7. (Color online) (a) Tolerances of adhesive application and (b) cross section of the side view of HGA.

allowed to be 0.15 mm (0.006"). Figure 7(b) shows the tolerance of the gap between the side of the base plate and that of the piezoelectric plate of 0.100 mm at both sides and the tolerance of the height of the piezoelectric plate relative to the height of the base plate of no more than 0.036 mm.

3.3 Electrically connecting the piezoelectric plate to the driver circuit

Electrical connection points between the HGA and the piezoelectric plate appeared as a raised conductive adhesive "line" that also physically secured the piezoelectric plate to the HGA, as shown in Fig. 8(a). If the conductive adhesive did not make good contact with the plate and HGA, the part would be rejected. A minimum adhesive line length of 0.05 mm (0.002") was required to ensure good electrical ground connection. Also, the circuit jumpers at the bottom side of the piezoelectric plate needed to be verified to make good electrical contact as shown in Fig. 8(b). The verification was performed by an LCR meter, but the details of the verification procedure are not reported in this paper, but will be reported in our next paper.

4. Experimental Procedures and Results

HGA performance concerns its dynamic and static behaviors. The most important parameter of its dynamic behavior is its resonance frequency of a certain vibrational mode. For our purpose, it was sufficient to determine whether the resonance frequency of this developed HGA fell in the manufacturing specification range, because if it did, there would be no need to modify the manufacturing process. The base plate was excited by using a shaker and the lateral motion of the slider was measured by a Polytec OFV-534 LDV and the resonance frequency of each mode of interest was determined and displayed as a graph by the HGA testing system. The most important parameter of the HGA static behavior is its stroke travel range. To measure it, only the piezoelectric plates themselves were excited by applying a sinusoidal voltage at 20 Vp-p

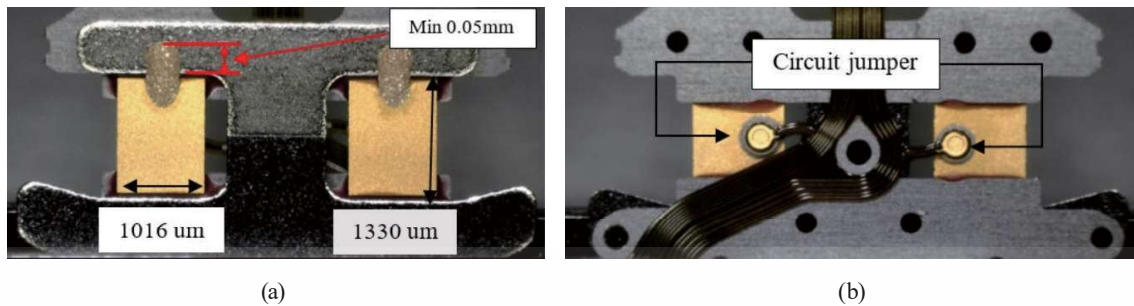


Fig. 8. (Color online) (a) Specifications of conductive adhesive line on the top surface of the piezoelectric plate and (b) points of contact of the circuit jumpers.

to them and the displacement range of the slider was determined by the same LDV. In the next two sections, the experimental procedures and the measurement results of these parameters are reported in detail.

4.1 Resonance analysis

A servo control system controls the position of the slider of the HGA over a track on the magnetic disk. HGA resonant frequencies are very important to the overall stability of the servo control system and the settling and seek performance characteristics of the drive system. They depend on several HGA design features such as length, thickness, mass, rail height, spring rate, and mass distribution.

An HGA has many natural vibrational modes depending on a particular design. Normally, an HGA design would have the following five important mode shapes: 1st bending, 1st torsion, 2nd bending, 2nd torsion, and sway. Resonant mode shapes are considered to be the most critical HGA design parameters that are optimized during the design phase and monitored during the production cycle as items of specifications. The specifications of our design exactly followed those of the manufacturer and are shown in Table 3.

For measuring the resonance frequencies, the HGA testing system used several devices, namely, a shaker assembly, a spindle stand, an LDV, a video camera, a signal analyzer (Matlab/Labview), and an industrial PC, as shown in Fig. 9.

HGA resonant measurement is an open loop measurement of the transfer function between the input at the baseplate and the output at the R/W head [see Fig. 10(a)]. The settings of the tester were as follows: a sinusoidal frequency range of 1–50 kHz, a disk spindle speed of 10000 rpm, and a flying distance of 0.635 mm between the disk and the slider head (*Z* height). The measurement operation started with the shaker excitation of the baseplate of the HGA, hence off-track motion was generated by the shaker and the displacement, velocity, and acceleration of the slider were determined. The shaker provided a persistent excitation of the desired frequency bands with adequate energy.

Figure 10(b) shows $f(t)$, the baseplate velocity excited by the shaker, and $x(t)$, the slider velocity measured by the LDV. The relationship between the gain (the logarithmic ratio

Table 3
Specifications of resonance frequency of important modes.

Resonance mode	Unit	Min.	Target	Max.
1st bending mode	Hz	7350	8150	8950
1st torsion mode	Hz	14700	15500	16300
2nd bending mode	Hz	16800	16800	17600
2nd torsion mode	Hz	19000	20800	21600
Sway mode	Hz	21600	22800	24000

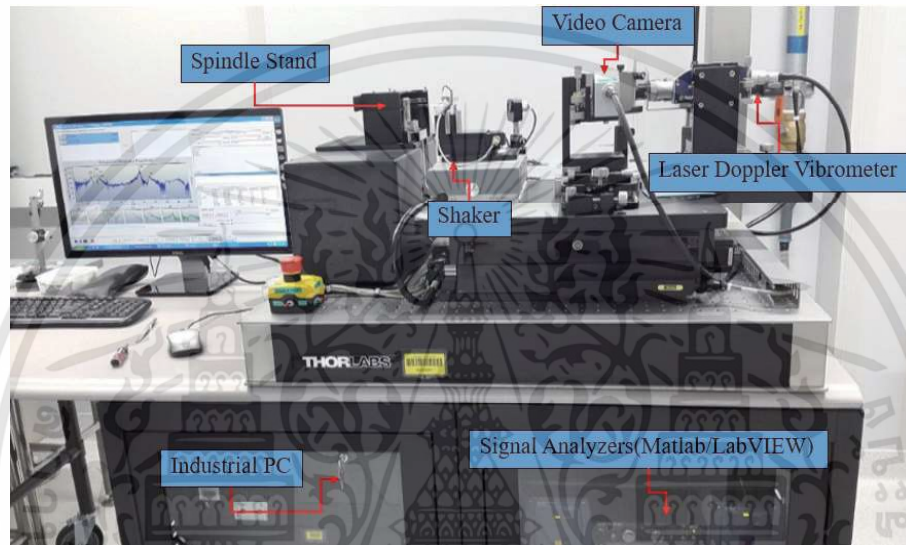


Fig. 9. (Color online) HGA tester overview.

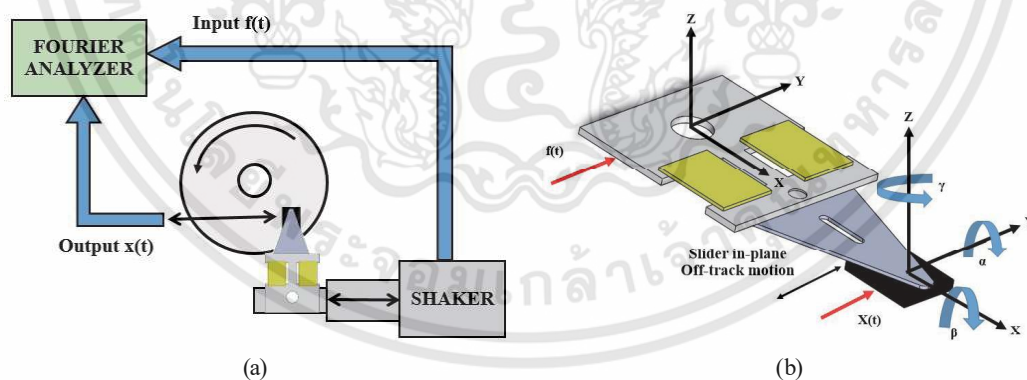


Fig. 10. (Color online) Transfer function measurement of HGA: (a) process diagram and (b) directions of shaker modes mapping to the slider.

between base plate and slider velocities) and the HGA vibrational frequency is shown in Figs. 11 (for PZT) and 12 (for PMN-PT). If the base plate and slider velocities are expressed in the same unit, then the limit of the gain as the frequency approaches zero is zero.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

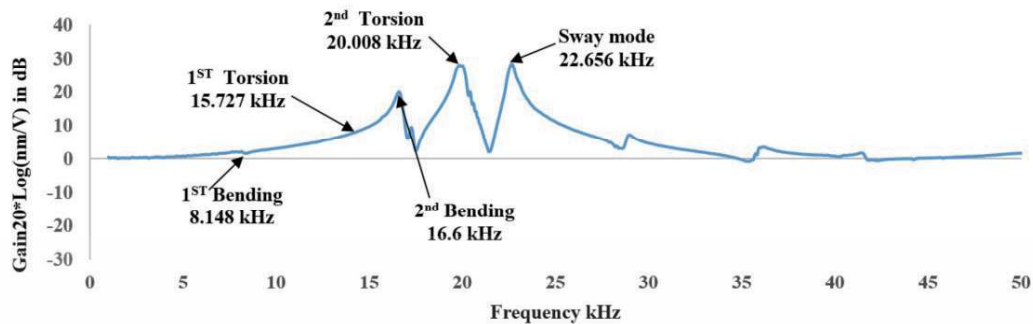


Fig. 11. (Color online) Resonance frequencies of PZT-based HGA.

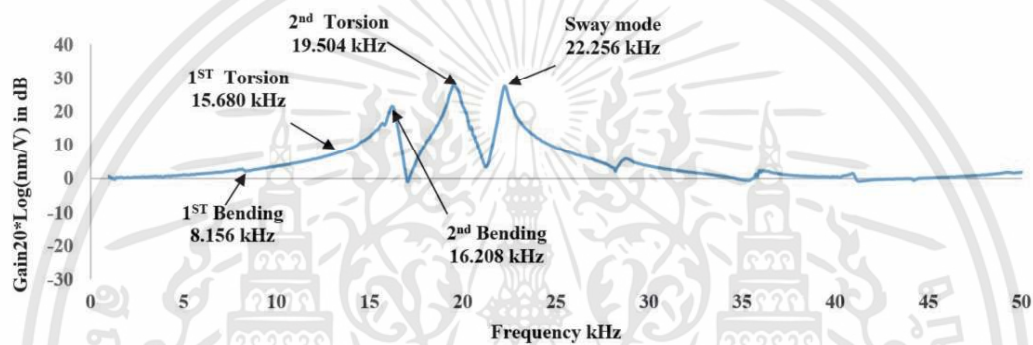


Fig. 12. (Color online) Resonance frequencies of PMN-PT-based HGA.

4.2 Stroke analysis

The maximum stroke of a microactuator affects the settling and track-following performance characteristics of a design. In this work, the piezoelectric plates were excited by a sinusoidal voltage at 20 V_{p-p} at 800 Hz for 10 cycles in order to reduce the chance of electrostatic discharge in the HDD as shown in the flow diagram in Fig. 13.

The stroke and hysteresis data were collected by pointing a laser beam to the R/W head that was being tested, and the reflected beam was detected by a laser interferometer system, which outputted the displacement for each input voltage as shown in Fig. 14.

5. Discussion

The most important performance characteristics of a microactuator are considered to be those of its dynamic and static behaviors. The performance parameters of its dynamic behavior investigated here were its resonance frequency and slider head gain. Shown in Table 4 are resonant frequencies of five vibrational modes of PZT and PMN-PT microactuators and their corresponding slider head gains. Since the resonance frequencies were not much different, indicating that their mechanical stiffnesses were not very different, modal performance characteristics such as the resonance frequency of the HGA were dominant and it was not

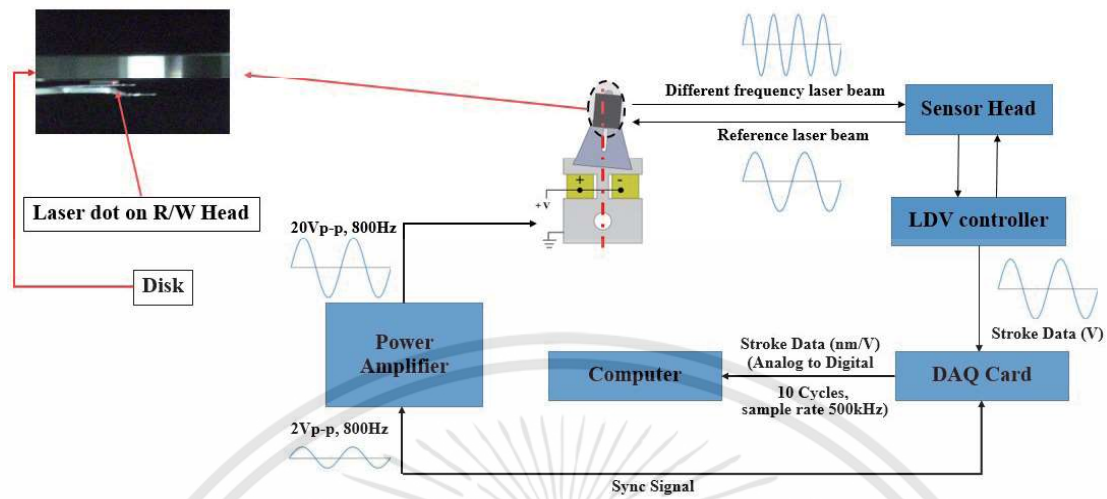


Fig. 13. (Color online) Flow diagram of stroke analysis procedure.

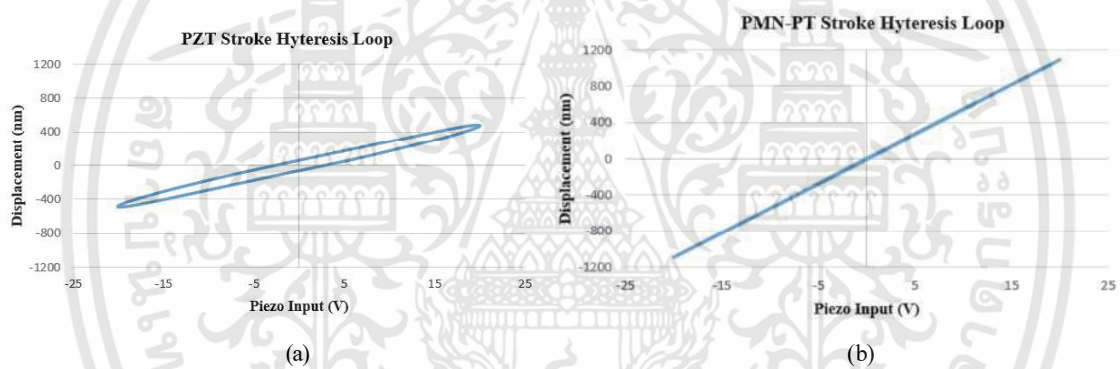


Fig. 14. (Color online) Measured response of stroke linearity and hysteresis loop.

Table 4
Results of frequencies and gains of PMN-PT and PZT actuators.

Mode	Frequency (kHz)		Gain (dB-nm)	
	PZT	PMN-PT	PZT	PMN-PT
1st bending mode	8.148	8.156	1.874	2.237
1st torsion mode	15.727	15.680	14.194	14.610
2nd bending mode	16.600	16.208	19.628	21.43
2nd torsion mode	20.008	19.504	27.825	26.573
Sway mode	22.656	22.256	27.581	26.173

necessary to rewrite the notch filter in the servo code in order to replace the PZT actuator with the PMN-PT actuator in the HDD as well as to change the original HGA design. Moreover, the gain levels of the PMN-PT microactuator were not much different from those of the PZT microactuator, signifying that this new actuator can replace the traditional PZT actuator without any need to redesign the mechanical structure of the HGA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 5

Results of stroke travel and area of hysteresis loop of stroke travel of the PMN-PT and the PZT microactuators.

Peak voltage (V)		Peak stroke (nm/V)		Hysteresis area (V-nm)	
PZT	PMN-PT	PZT	PMN-PT	PZT	PMN-PT
20.06	20.06	24.36	54.61	4191.20	419.80

For the static behavior, the performance parameters investigated were stroke travel and the hysteresis loop of stroke travel. In general, a wider range of slider head stroke travel results in desirable lower track seeking time and track-seeking error rate because a single actuation can cover a larger number of data tracks, which were the purposes of the development of this new actuator. In the same vein, a smaller area of the hysteresis loop of travel makes it easier and faster to control the movement of the slider head because of the more linear control characteristic, which was also the other purpose of this development. The results in Table 5 show that the peak stroke travel enabled by the PMN-PT-based actuator was more than two times longer than that provided by the original PZT-based actuator, and the area of the hysteresis loop provided by the new actuator was smaller than that provided by the original PZT actuator. This longer stroke travel afforded by PMN-PT is in full agreement with an investigation by Kim *et al.*,⁽¹⁸⁾ which demonstrated that the tip displacement of a unimorph actuator provided by PMN-PT was 15 times larger than that provided by PZT. From all of the better performance results mentioned above, we concluded that this new PMN-PT microactuator is a step above the original PZT microactuator and can readily replace the PZT microactuator.

6. Conclusions

In this research study, PMN-PT was implemented in a DSA of HDD. This was the first time that PMN-PT was investigated in an actual comparative experiment with traditional PZT as a microactuator of an HGA of HDD. Comparisons were made on 2 parameters of their dynamic behavior—resonance frequencies and slider head gains of 5 vibrational modes—and 2 parameters of their static behavior—slider head stroke travel and area of the hysteresis loop of stroke travel. The experimental results of all 4 parameters indicate that this new PMN-PT actuator performs better than the traditional PZT actuator; in particular, it has a more than 2 times wider stroke travel range than the PZT actuator. Moreover, this new technology can be applied to current manufacturing lines with no need to upgrade the existing assembling machines and can enable the fast and precise positioning of the R/W magnetic head of extremely high density HDD for large data storage in the future. Besides demonstrating the superiority of PMN-PT over PZT as a microactuator, the comparative data of dynamic and static behaviors of PMN-PT versus PZT obtained in this study can be put to good use by sensor designers. Moreover, in current research works on cyber-physical systems, PZT has been used as sensors and actuators for many types of systems such as wireless piezoelectric sensors and actuators for structural health monitoring⁽¹⁹⁾ and energy harvesting.⁽²⁰⁾ The data from our study should point a way for researchers in search of a better-performing piezoelectric material to take interest in PMN-PT as a practical replacement of PZT.

Acknowledgments

This work was financially supported by the Thailand Research Fund and Seagate Technology Thailand (No. PHD5810005). The authors would also like to thank Seagate Technology Thailand for providing excellent research facilities for this study.

References

- 1 W. Guo, T. Huang, C. Bi, K. T. Chang, and T. S. Low: *IEEE Trans. Magn.* **34** (1998) 1907.
- 2 Y. Soeno, S. Ichikawa, T. Tsuna, Y. Sato, and I. Sato: *IEEE Trans. Magn.* **35** (1999) 983.
- 3 Y. M. Niu, W. Guo, G. X. Guo, H. O. Eng, K. K. Sivadasan, and T. Huang: *IEEE Trans. Magn.* **36** (2000) 2241.
- 4 K. Mori, T. Munemoto, H. Otsuki, Y. Yamaguchi, and K. Akagi: *IEEE Trans. Magn.* **27** (1991) 5298.
- 5 C. K. Thum, C. Du, J. Zhang, K. P. Tan, B. M. Chen, and E. H. Ong: *IEEE Trans. Magn.* **44** (2008) 2227.
- 6 R. B. Evans, J. S. Griesbach, and W. C. Messner: *IEEE Trans. Magn.* **35** (1999) 977.
- 7 S. Koganezawa, Y. Uematsu, and T. Yamada: *IEEE Trans. Magn.* **35** (1999) 988.
- 8 D. K. Miu: *Data Storage Mag.* **4** (1995) 33.
- 9 D. A. Horsley, N. Wongkomet, R. Horowitz, and A. P. Pisano: *IEEE Trans. Magn.* **35** (1999) 993.
- 10 P. Panthongsy and D. Isarakorn: *Proc. 2016 Int. Conf. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON 2016)*.
- 11 B. H. Kim and K. Chun: *J. Micromech. Microeng.* **11** (2001) 1.
- 12 L. Chengkuo, I. Toshihiro, and S. Tadatomo: *Sens. Actuators, A* **72** (1999) 179.
- 13 S. Katsuhiko and M. Takeshi: *Sens. Actuators, A* **226** (2015) 760.
- 14 Y. Li, R. Horowitz, and R. Evans: *IEEE Trans. Magn.* **39** (2003) 932.
- 15 C. Huang, Y. Lin, and T. A. Tang: *J. Micromech. Microeng.* **14** (2004) 530.
- 16 S. Mei: *US Patent 6239953* (2001).
- 17 P. Wattananukulchai and D. Isarakorn: *Proc. 2016 Int. Conf. IEEE Region 10 (TENCON2016)*.
- 18 K. C. Kim, Y. S. Kim, H. J. Kim, and S. H. Kim: *J. Curr. Appl. Phys.* **6** (2006) 1064.
- 19 A. Abdelgawad and K. Yelamarthi: *Proc. 2016 Int. Conf. Circuits and Systems (MWSCAS2016)*.
- 20 G. M. Siddesh, G. C. Deka, K. G. Srinivasa, and L. M. Patnaik: *Cyber-Physical Systems—A Computational Perspective: Energy Sources* (CRC Press, Florida, 2015) p. 192.

About the Authors



Don Isarakorn is currently an assistant professor of Electrical Engineering in King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand. He is also the Head of the Multi-Scale Electromechanical Systems Laboratory of the Department of Instrumentation and Control Engineering, where he leads the activities on mechatronic system integration. He received his B.Eng. degree in electronics engineering and his M.Eng. degree in control engineering from KMITL in 2000 and 2003, respectively, and his Ph.D.

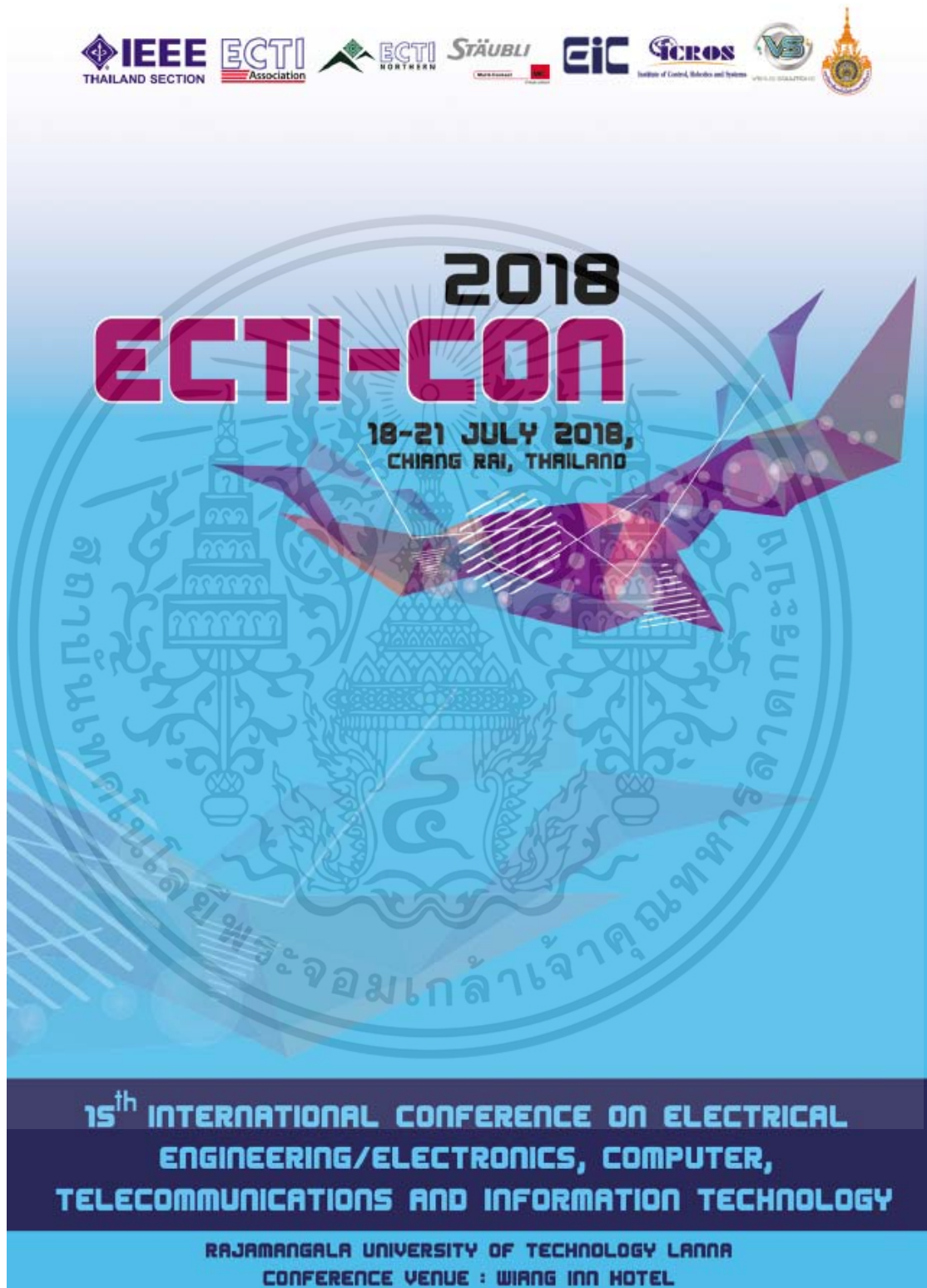
degree in piezoelectric microelectromechanical systems from the Sensors, Actuators, and Microsystems Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, in 2011. His main research interests include piezoelectric materials for sensing and actuating applications, energy harvesting systems, robotics, mechatronics, automatic control systems, and biomedical instruments.



Parinya Wattananukulchai is currently an innovation technology advisor of the innovation center in SME Development Bank and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL), Bangkok, Thailand. He has been working on HSA metrology and as a mechanical engineer in Seagate Technology (Thailand) Ltd., an NPI engineer in Focuz Manufacturing Co., Ltd., a tooling and maintenance engineer in Hitachi Global Storage Technologies Thailand Co., Ltd., and a process engineer in Fabrinet Co., Ltd.

He received his M.Eng. degree in mechanical engineering from Chulalongkorn University and B.Eng. degree in mechatronic engineering from KMITL in 2009 and 2005, respectively. Now, his research interests focus on the design, performance, and evaluation of advanced PMN-PT piezoelectrics for dual-stage actuators in hard drive heads, robotics, mechatronics, automatic control systems, and biomedical instruments.





IEEE THAILAND SECTION ECTI Association ECTI NORTHERN STÄUBLI EIC SCROS Institute of Control, Robotics and Systems VS RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LANNA

2018 ECTI-CON

18-21 JULY 2018,
CHIANG RAI, THAILAND

15th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL
 ENGINEERING/ELECTRONICS, COMPUTER,
 TELECOMMUNICATIONS AND INFORMATION TECHNOLOGY

RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LANNA
 CONFERENCE VENUE : WIANG INN HOTEL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Comparative Study Based on Classical and Newer Piezoelectric Materials Based Unimorph Actuators for Hard Disk Drive

Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn
Department of Instrumentation and Control Engineering,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand
don.is@kmitl.ac.th

Abstract—The piezoelectric actuator technology for moving the read-write head of Hard Disk Drive (HDD) is very important and widely used. Advanced high-performance technologies for the actuator and servo control are required in order to achieve not only accurate positioning control on data tracks but also high-speed access onto another data track. There is strong demand for hard disk drives with high-speed access performance, which generally requires actuators with a wider servo bandwidth. This paper focuses on the comparative piezoelectric materials based unimorph actuators with classical piezo (Polycrystalline PZT) and newer piezo (Single-crystalline PMN-PT) ceramics. The advantages of piezoelectric materials in terms of mechanical and electrical characteristics aiming at a useful compromise performance displacement and resonant frequency are studied and analyzed.

Keywords—Unimorph actuators, PZT, PMN-PT, HDD.

I. INTRODUCTION

The hard disk drive (HDD) is the main data storage device in a computer system [1, 2]. In HDDs, the write-read head will store and read data by mechanically positioned magnetic head. The data will be stored on concentric data tracks on rotating disks and read by a radially traversing. Over the past decade, the recording density and spindle rotation speed of HDDs have been developed to advance at a remarkable rate. Currently, using advanced head and media technology can significantly increase the bit density (BPI), but the track density (TPI) still remains at a relatively low level [3]. To achieve higher track densities, extremely accurate track following is required. As storage density increases, dual-stage actuation, in which a precise actuator mechanism is integrated near the magnetic heads separately from the voice coil motor (VCM) used to drive the overall actuator. It is believed to be a solution in order to meet the higher accuracy and speed requirements on the servo mechanism in a HDD [4] and during the process of servo writing [5]. In the dual-stage actuation, a conventional VCM would move the entire head and arm at low frequency to perform track seeking, and a microactuator mounted between the VCM and head slider would control the motion of the slider enabling it to perform high-frequency track following. Various microactuators, including piezoelectric [6,7], electromagnetic [8] and electrostatic [9-10] ones, have been developed to meet the above requirements.

Nowadays, $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ (PZT) solid solutions are widely used as microactuators on dual-stage hard disk drives. PZT microactuators use directly the electric field induced strain, including longitudinal, transversal and shear strain derived by piezoelectric coefficient d_{33} , d_{31} and d_{15} , respectively. However, the bulk single PZT plate cannot produce large displacement because of the relatively small piezoelectric coefficient.

An alternative to PZT is the relaxor-based systems, that is, the $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ (PMN-PT) material. PMN-PT-based materials are characterized by a high dielectric permittivity, high piezoelectric properties, high electrostriction, and are suitable for applications in multilayer capacitors, actuators, sensors, and electro-optical devices. The value of d_{33} , d_{31} (Piezoelectric Constant) and K_{33} (Electromechanical Coupling Factor) affects characteristics of piezoelectric materials, and the value of PMN-PT single crystal is much higher than that of the existing PZT. Superiority of property of material shows its exceptional effect which applies to practical device

The purpose of this paper is to clarify a comparative performance analysis of piezoelectric materials between PZT and PMN-PT based on unimorph actuator model as aiming at a useful compromise performance for static and dynamic behaviors.

II. MATERIALS AND DESIGN OF ACTUATOR

A. Materials selection

The use of microactuator in HDD utilizes PZT for a dual stage positioning on a magnetic head is still favorable in recent years. Even though, the advantages of piezoelectric PZT material are fairly high curie temperature and long term reliability, it can actuate the very short displacement. Since the actuator that is able to actuate in wide range displacement is needed for moving the read-write head in high data storage HDD. So, the PMN-PT material providing the longer displacement is selected to study. In order to obtain the high performance actuator, the some commonly used piezoelectric materials having the high piezoelectric strain constant (d_{31}) in Table.I are selected and investigated.

B. Design of piezoelectric unimorph actuator

A piezoelectric unimorph actuator is designed as illustrated in Fig. 1(a). The designed actuator consists of two layers as a piezoelectric layer and elastic layer. An elastic layer is made of stainless steel grade 304 (AISI304), which is the same as material of head gimbal suspension. Two layers are attached together by using epoxy 3M™ Scotch Weld™ Epoxy Adhesive DP-460 EG. An elastic layer will cause the bend of moving piezoelectric layer. The length and width of the two layers are identical but the thicknesses are different. In Fig. 2, instead of soldering the wire to piezoelectric element, the PCB plates are directly pressed into both side of piezoelectric surface by stainless steel in order to simplify the configuration and tuning the clamped range.

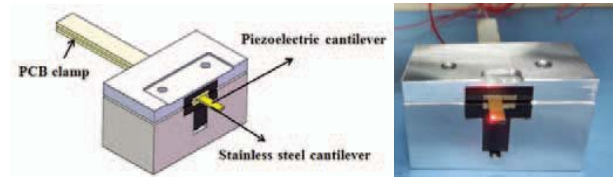


Fig. 2 Design model of piezoelectric unimorph

TABLE I. PHYSICAL AND PIEZOELECTRIC PROPERTIES

Physical and Piezoelectric properties	MORGAN PZT-508	APC PZT-855	HC-MAT PMN-PT	TRS PMN-PT TRS-4XB	TRS PMN-PT TRS-5XB	SUS302 cantilever
Piezoelectric Charge Constant ($10^{-12}C/N$)	$d_{31} = -97$ $d_{33} = 225$ $d_{15} = 330$	$d_{31} = -175$ $d_{33} = 400$ $d_{15} = 590$	$d_{31} = -1750$ $d_{33} = 400$ $d_{15} = 590$	$d_{31} = -1650$ $d_{33} = 2820$ $d_{15} = 146$	$d_{31} = -1700$ $d_{33} = 400$ $d_{15} = 590$	-
Relative Dielectric Constant [ϵ_0]	$\epsilon_{11} = 1290$ $\epsilon_{33} = 1000$	$\epsilon_{11} = 1290$ $\epsilon_{33} = 1000$	$\epsilon_{11} = 1290$ $\epsilon_{33} = 1000$	$\epsilon_{11} = 1600$ $\epsilon_{33} = 8250$	$\epsilon_{11} = 1290$ $\epsilon_{33} = 1000$	-
Elastic Compliance Constant ($10^{-12} m^2/N$)	$S_{11}^E = 11.5$ $S_{12}^E = -3.7$ $S_{13}^E = -4.8$ $S_{33}^E = 13.5$ $S_{44}^E = 31.9$ $S_{66}^E = 35.0$	$S_{11}^E = 11.5$ $S_{12}^E = -3.7$ $S_{13}^E = -4.8$ $S_{33}^E = 13.5$ $S_{44}^E = 31.9$ $S_{66}^E = 35.0$	$S_{11}^E = 11.5$ $S_{12}^E = -3.7$ $S_{13}^E = -4.8$ $S_{33}^E = 13.5$ $S_{44}^E = 31.9$ $S_{66}^E = 35.0$	$S_{11}^E = 70.2$ $S_{12}^E = -13.1$ $S_{13}^E = -56.0$ $S_{33}^E = 119.4$ $S_{44}^E = 14.5$ $S_{66}^E = 15.2$	$S_{11}^E = 11.5$ $S_{12}^E = -3.7$ $S_{13}^E = -4.8$ $S_{33}^E = 13.5$ $S_{44}^E = 31.9$ $S_{66}^E = 35.0$	-
Density ($kg\ m^{-3}$)	7600	7600	8100	8200	8100	8000
Young's Modulus (GPa)	-	-	-	-	-	190
Poisson's Ratio	-	-	-	-	-	0.28
Size($W \times L \times H$) (mm)	$4 \times 15 \times 1$	$4 \times 15 \times 1$	$4 \times 15 \times 1$	$4 \times 15 \times 1$	$4 \times 15 \times 1$	$4 \times 15 \times 0.1$

*some of the properties are estimated.

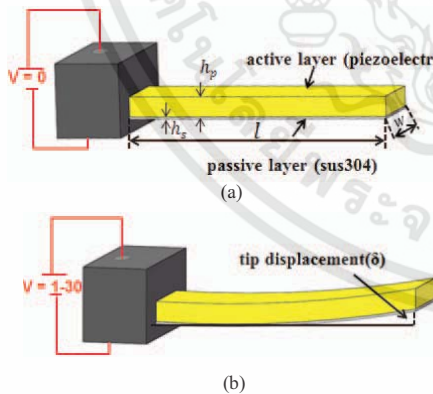


Fig. 1 (a) Unimorph actuator structure and (b) applied voltage

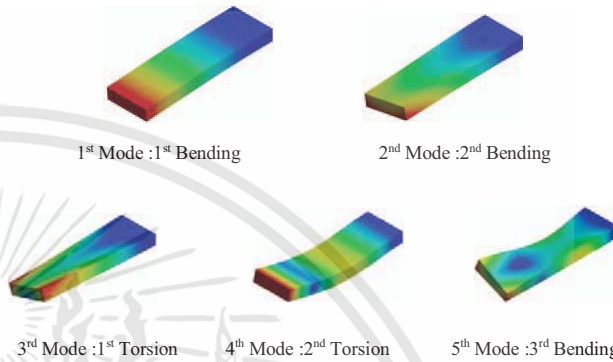


Fig. 3 The corresponding modal shapes

When a voltage is applied across the surface of the piezoelectric layer, longitudinal and transverse strains will be presented as shown in Fig. 1(b).

III. EXPERIMENT AND VERIFICATION

In order to achieve the reliable comparison of performance, the dynamic and static behavior of fabricated piezoelectric actuators are investigated as:

A. Dynamic analysis

Frequency analysis was carried out in order to obtain the maximum displacement at resonance; ANSYS software was used for estimating the resonant frequencies and model shapes of piezoelectric unimorph. The contributed physical and piezoelectric properties of the materials in the simulation are given in Table 1. In fact, resonant frequency is always the design concern of the dual-stage actuator in HDD. Figure 3 shows the modal shapes corresponding to the first resonance appeared at 2.8 kHz, the second at 8.1 kHz, the third at 17 kHz, the fourth at 27 kHz, and the fifth at 43 kHz.

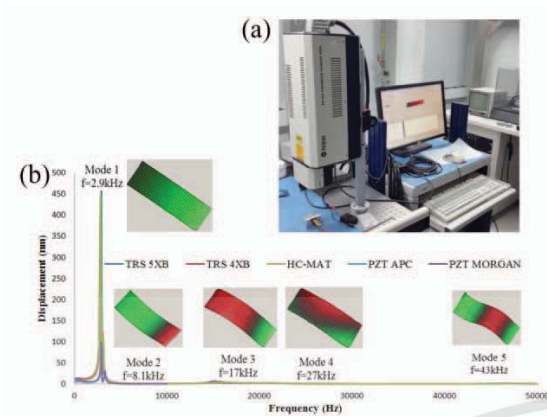


Fig. 4 (a) Polytec vibrometer OFV056, (b) The corresponding modal shapes.

B. Static analysis

An analytical relation for the tip deflection (δ) of the unimorph cantilever can be written as the following equations [11]:

$$\delta = \frac{-3s_s s_p h_s (h_s + h_p) l^2}{K} d_{31} V, \quad (1)$$

$$K = 4s_s s_p h_s h_p^3 + 4s_s s_p h_p h_s^3 + s_p^2 h_s^3 + s_s^2 h_p^3 + 6s_s s_p h_s^2 h_p^2. \quad (2)$$

where δ is the tip displacement, s_s is the compliance of the sus304, s_p is the compliance of piezoelectric material, V is the applied bias voltage, l is the cantilever length, h_s and h_p are the thickness of the sus304 and piezoelectric material respectively, and d_{31} is the piezoelectric coefficient. The equation (1) is valid only when the lengths of the piezoelectric and elastic layers of actuator are equal.

In the experiment, the deflection on the tip of cantilever in Z direction has been performed by using a DC bias voltage no more than ± 30 V due to our spec requirement for hard disk drive and measured using an interferometric profiler (Wyko NT9100) as shown in Fig.5(a).

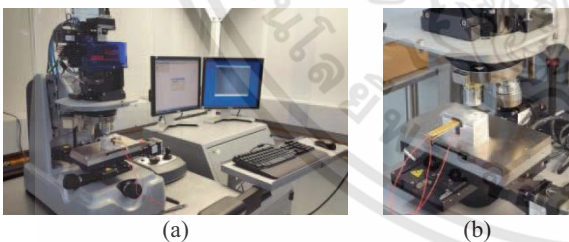


Fig. 5 (a) Measurement system (b) specimen on clamp fixture

IV. RESULTS AND DISCUSSIONS

As the results of finite element (FE) and harmonic analysis, the simulated and measured resonant frequency of fabricated actuator are approximately equal. Fig.6 illustrates the tip displacement and resonant frequency of actuator in first

vibration mode. With the same dimension, the unimorph actuators based on piezoelectric PMN-PT and PZT materials resonate at about the same frequency. So, it verifies that the PZT material in dual actuator can be directly replaced with the PMN-PT material.

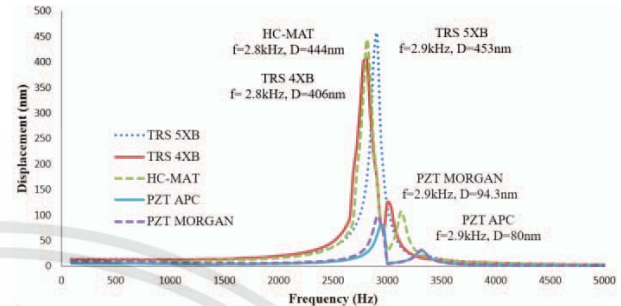


Fig. 6 Displacement VS Resonance frequency at first mode of 5 piezoelectric materials

Table II shows the tip deflection values of actuators that derived by theoretical calculation and experimental measurement. The theoretical results are significantly difference to measured results since the equation (1) does not include the term of epoxy bonding. However, in this case the mathematical formula is can be used to design the unimorph piezoelectric actuator with the maximum displacement.

In Fig.7 and 8, By applying voltage in the range of 0 - 30V to the piezoelectric unimorph actuators, the tip displacements of actuators are proportional to the applied voltage. The increasing of displacement is not exactly linear due to nonlinear response of piezoelectric material. All PMN-PT piezoelectric unimorph actuators have the approximately performance, and can provide the higher displacement range than PZT piezoelectric unimorph actuators, which are appropriate for moving the write-read head in high data-storage density HDD.

TABLE II. COMPARISON BETWEEN THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESULTS

Voltage (V)	PMN-PT TRS 5XB		PMN-PT TRS 4XB		PMN-PT HC-MAT	
	Theoretical (μm)	Experiment (μm)	Theoretical (μm)	Experiment (μm)	Theoretical (μm)	Experiment (μm)
0	0	0	0	0	0	0
5	0.97	0.438	0.88	0.42	0.9	0.55
10	1.94	1.108	1.77	0.98	1.81	1.05
15	2.90	1.925	2.65	1.77	2.71	1.85
20	3.87	3.257	3.53	2.8	3.6	2.95
25	4.84	4.086	4.42	3.8	4.52	4.13
30	5.81	5.343	5.30	5.05	5.42	5.12

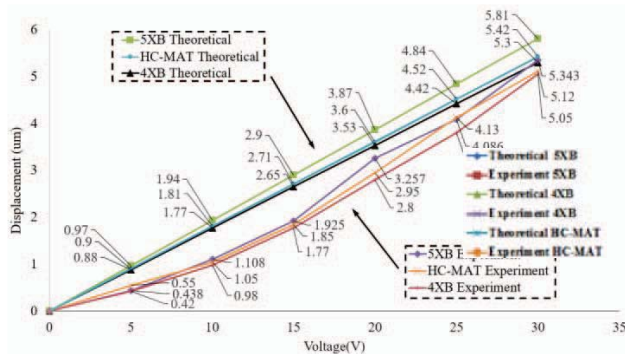


Fig. 7 The tip of displacement of PMN-PT from Theoretical vs Experiment

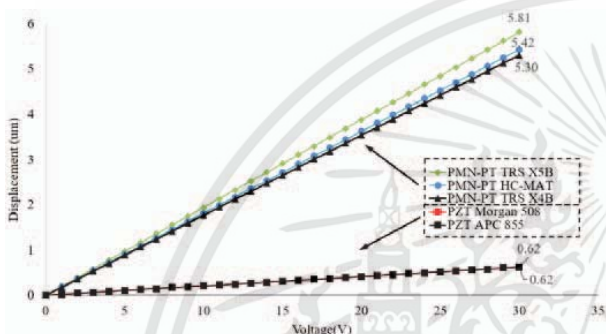


Fig. 8 The tip of displacement of 5 piezoelectric materials

V. CONCLUSIONS

This paper presented the comparative study of unimorph piezoelectric actuator based on PZT and PMN-PT materials. The comparison is focused on capable of actuation. In the research implantation, the designed actuators were analyzed by using the finite element and analytical method. The harmonic analysis is carried out in order to investigate the performance of fabricated actuators. From the experimental results, the PMN-PT piezoelectric unimorph actuators can actuate the wide displacement than PZT piezoelectric unimorph actuators, which are appropriate actuator for the write-read head of high data-storage density HDD.

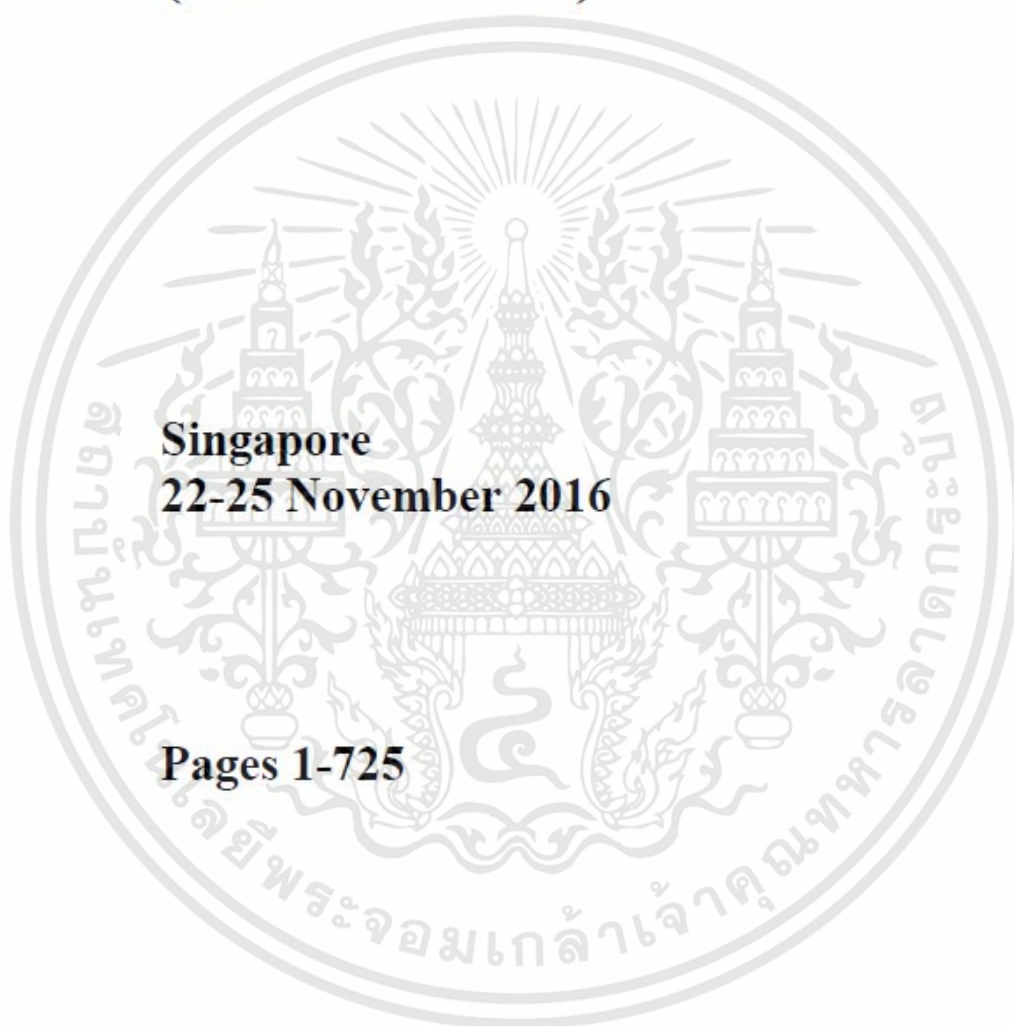
ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by Thailand Research Fund and Seagate technology Thailand (No. PHD5810005) and thanks Seagate Technology Thailand for providing the excellent research facilities.

REFERENCES

- [1] W. Guo, T. Huang, C. Bi, K.T. Chang, T.S. Low, A high bandwidth piezoelectric suspension for high track density magnetic data storage devices, *IEEE Trans. on Magnetics.*, Vol. 34 (1998) 1907–1909.
- [2] Y. Soeno, S. Ichikawa, T. Tsuna, Y. Sato, I. Sato, Piezoelectric piggy-back microactuator for hard disk drive, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35 (1999) 983–987.
- [3] Y.M. Niu, W. Guo, G.X. Guo, H.O. Eng, K.K. Sivadasan, T. Huang, A PZT micro-actuated suspension for high TPI hard disk servo systems, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 36 (5) (2000) 2241–2243.
- [4] K. Mori, T. Munemoto, H. Otsuki, Y. Yamaguchi, K. Akagi, A Dual Stage Magnetic Disk Drive Actuator Using A Piezoelectric Device for a High Track Density, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 27(6), pp. 5298-5300, 1991
- [5] C.K. Thum, C. Du, J. Zhang, K.P. Tan, B.M. Chen, E.H. Ong, Servo Control Design for a High TPI Servo Track Writer with Microactuators, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 44, no. 9, pp. 2227-2234, 2008
- [6] R.B. Evans, J.S. Griesbach, W.C. Messner, Piezoelectric Microactuator for Dual Stage Control, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35 (1999) 977-982
- [7] S. Koganezawa, Y. Uematsu, T. Yamada, Dual-stage Actuator System for Magnetic Disk Drives using a Shear Mode Piezoelectric Microactuator, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35 (1999) 988-992
- [8] D.K. Miu, Silicon Microactuators for Rigid Disk Drives, *Data Storage (July/August)* (1995) 33
- [9] D.A. Horsley, N. Wongkomet, R. Horowitz, A.P. Pisano, Precision Positioning using a Microfabricated Electrostatic Actuator, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol. 35 (1999) 993-999
- [10] B.H. Kim, K. Chun, Fabrication of an Electrostatic Track-following Microactuator for Hard Disk Drives using SOI Wafer, *J. Micromech. Microeng.* 11 (2001) 1-6
- [11] C. Huang, Y. Lin and T.A. Tang, "Study on the tipdeflection of a piezoelectric bimorph cantilever in the static state," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 14, pp. 530-534, Jan. 2004.
- [12] S. Mei, Microactuated disk drive suspension with heightened stroke sensitivity, *US Patent 6239953* (2001).
- [13] M. Tokuyama, T. Shimizu, H. Masuda, S. Nakamura, M. Hanya, O. Iriuchijima, J. Soga, Development of a phi-shaped actuated suspension for 100-kTPI hard disk drives, *IEEE Trans. Magn.* 37 (2001) 1884-1886.

2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON 2016)



Singapore
22-25 November 2016

Pages 1-725



IEEE Catalog Number: CFP16TEN-POD
ISBN: 978-1-5090-2598-5

Reliability of PMN-PT Piezoelectric Material as an Actuator for High Density Hard Disk Drive

Parinya Wattananukulchai and *Don Isarakorn
Department of Instrumentation and Control Engineering,
Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Bangkok 10520, Thailand
*don.is@kmitl.ac.th

Abstract—In the latest high-density hard disk drives (HDDs), the piezoelectric actuator of head gimbal assembly (HGA) is the key technology for precisely positioning the magnetic head. To increase HDD's areal density, a smaller track pitch and a faster spindle speed should be used but the faster the spindle rotates the larger the disturbance is. Hence, a newer PMN-PT piezoelectric actuator is needed to overcome the displacement bandwidth limitation restricted by the current PZT piezoelectric actuator.

This paper investigated the reliability and performance of PMN-PT piezoelectric single crystal that was implemented on the a commercial HGA for the first time in an experiment. The objectives were to ensure that PMN-PT would not crack during the HDD assembly process and the performance of HDD equipped with this material was still reliable under thermal degradation. From the experiments on a prototype HGA, it was found that PMN-PT had a high degradation temperature of 150°C and was 2 times harder than PZT piezoelectric.

Keywords—HDD, PZT, PMN-PT, HGA, Thermal degradation

I. INTRODUCTION

Demand for data storage is ever increasing due to the modern trends of massive cloud storage from many devices such as mobile phone, surveillance camera and Internet of thing devices (IoT). Moreover, data service is not only just for storing data but also includes big data analysis by some kinds of algorithms such as artificial intelligence (AI), machine learning and deep learning. Both of these functions crucially need high-capacity data storage device.

Recent HDDs use a dual-stage actuator for moving the slider head: first, coarsely moving the actuator arm for a relatively large distance by a voice coil motor (VCM) that generates a torque on it; this kind of movement has a poor accuracy and slow response time; the second-stage actuator gives a highly accurate travel and faster response time for a relatively short distance. The key to the development of a future second stage actuator is for it to have a larger travel bandwidth. In many research studies, researchers have tried to design a more-effective placement of the piezoelectric plates. Their designs can be divided into three categories. First, an actuated suspension is a design that places the actuator along the suspension arm [1-4]; second, an actuated slider is a design that places the actuator between the gimbal and slider [5-7]; and third, an actuated head is a design that places it on the slider [8-10]. The two most importance figures of quality for a dual-stage actuator are resonance frequency and stroke

bandwidth. Resonance frequency relates to the mechanical design of HGA and stroke displacement bandwidth depends on the piezoelectric actuator location and the type of piezoelectric material such as single layer or multilayers which affects the manufacturing cost. Regarding these issues, the HDD industries are developing a new second-stage actuator to have a larger stroke bandwidth, to be reliable and low cost.

Piezoelectric single crystal of lead magnesium niobate-lead titanate with chemical structural formula of $(1-x)[\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3]_x[\text{PbTiO}_3]$ (PMN-PT) is an advanced piezoelectric materials compared to Polycrystalline PZT, lead zirconate titanate ($\text{Pb}[\text{Zr}_x\text{Ti}_{(1-x)}\text{O}_3]$) that has been commonly used so far.

The stroke displacement bandwidth produced by this single crystal material was larger than that produced by PZT. It also has a high piezoelectric coefficient, large electromechanical coupling coefficient, high dielectric constant and low dielectric loss. However, its cost and complexity were of concern. In one of our previous studies [11], we have collaborated with a piezoelectric material manufacturer and requested that they provided a PMN-PT sample that would meet the requirements for the HDD market. They had provided it and we did experiments on it. the results showed that the stroke displacement bandwidth of this PMN-PT sample was 9 times larger than that of PZT, so we actually implemented it on a real, commercial HGA and tested its performance and reliability.

The objective of this investigation was to evaluate the reliability of the single crystal PMN-PT implemented on a hard disk drive head, especially on the degradation of stroke displacement bandwidth and hysteresis loop at high temperature. We also measured its hardness to see whether it would withstand the rigor of HDD assembly process.

A. Piezoelectric Materials

PMN-PT has a comparable cost to PZT. The advancement in the manufacturing of single crystal PMN-PT piezoelectric material enabled it to meet the HDD requirements that some manufacturers were adopting, especially the high curie temperature. In our selection of PMN-PT sample for HDD, we look at its piezoelectric charge constant and direction (d_{xx}) where the first subscript represented the electric component direction meaning that the input voltage would be applied in that direction and the second subscript represented the direction

of the mechanical effect meaning that the piezoelectric plate would expand and contract in that direction, as shown in Fig. 1.

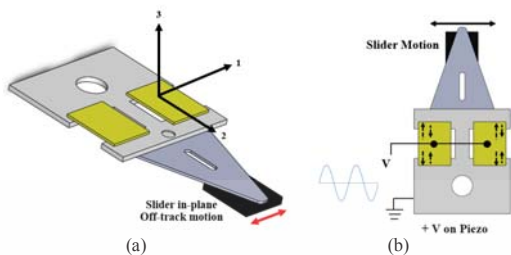


Fig. 1: Piezo actuator on HGA (a) Direction, and (b) Operation

Table I shows the piezoelectric coefficient d_{31} of PZT and PMN-PT. PMN-PT had a higher piezoelectric coefficient d_{31} which led to a larger stroke displacement bandwidth as indicated by the unimorph cantilever equation [12]

$$\delta = \frac{-3s_p s_r h_s (h_s + h_p) l^2}{K} d_{31} V \quad (1)$$

where δ is the stroke displacement. It can be seen in equation 1 that δ is directly proportional to d_{31} , so we selected a high d_{31} value for this high density hard disk drive study.

Table. I PIEZOELECTRIC PROPERTY.

Piezoelectric property	PZT	PMN-PT
Piezoelectric Charge Constant ($10^{-12}C/N$)	$d_{31} = -280$	$d_{31} = -578$

B. Hard drive Head and piezoelectric die assembly

In the first generation, hard disk drives moved their read/write heads to access data along concentric tracks by using only VCM. In 2005, longitudinal magnetic recording (LMR) was replaced by perpendicular magnetic recording (PMR) which was a more advanced technology for storing more data than LMR and led to smaller track pitch such that VCM could not perform well with PMR.

This led to an introduction of a second-stage actuator for supporting high areal density as shown in Fig. 2(a): single actuator moved by VCM, (b) Dual actuator moved by VCM (coarse tuning) and piezoelectric (fine tuning).

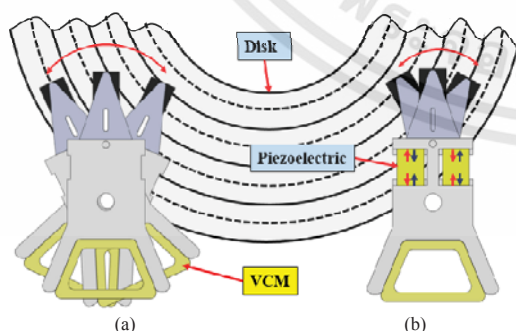


Fig. 2: HGA (a) Single, and (b) Dual Stage Actuator.

For the HGA assembly, we used a commercial suspension with a piezoelectric plate that had the dimension and tolerance specifications as shown in table II below.

Table. II DIMENSIONS AND TOLERANCES OF PIEZOELECTRIC PLATE.

Material Layer	PMN-PT(μm)	Ni Chrome(μm)	Au(μm)
Thickness	102 ± 10	0.102 ± 0.01	0.175 ± 0.06
Length	1330 ± 13	1330 ± 13	1330 ± 13
Width	1016 ± 13	1016 ± 13	1016 ± 13

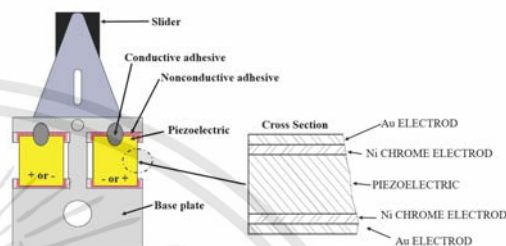


Fig. 3: HGA component and cross section of piezo plate

As can be seen in Fig.3, The second stage actuator of HGA was composed of two piezoelectric plates per suspension but each had a different voltage poling direction: one side had a negative direction while the other had a positive direction. The top surface was connected to electrical ground with conductive adhesive (Loctite ablestik 2030SC) while the bottom surface was attached to the base plate with non-conductive adhesive (Loctite ablestik 2035SC-1B1)

After the attachment of the piezoelectric plates, the electric circuit needed to be checked with an LCR meter that measured its capacitance which had to be in the range of 800-840 pF as shown in Fig.4.

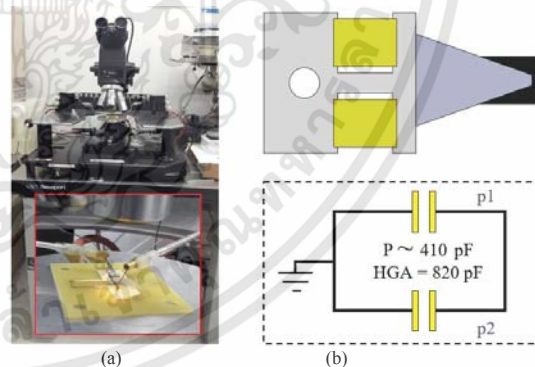


Fig. 4: (a) LCR meter, and (b) piezo circuit diagram

II. EXPERIMENT AND VERIFICATION

In this study, the PMN-PT plates were tested of their stroke displacement, resonance frequency, and hardness in comparison with those of a traditional piezoelectric PZT. Before the first and second tests, their thermal degradation

characteristics were determined by placing the PMN-PT equipped HGA in a thermal chamber (Thermotron ATSS-80-10-10) at 100 °C, 120°C, 140°C, 150°C, 160°C and 180°C. It was kept at each temperature for 30 minutes then left standing outside the thermal chamber for 1 hour before measurements of stroke displacement bandwidth and resonance frequency were done with a Laser Doppler Vibrometer (LDV). The third test was measurements of the hardness of PZT and PMN-PT plates with a hardness tester.

A. Stroke displacement test

For the PMN-PT stroke displacement bandwidth test as illustrated in Fig.5, an LDV (Polytec OFV-534) was used to measure it with the HGA moving under the condition of sinusoidal voltage at 20 V_{p-p} and 800 Hz for 10 cycles to excite the piezoelectric plates and prevent electrostatic discharges during the test process (i.e., the maximum potential was ±20V). Not only stroke travels were recorded, but the hysteresis loops of displacement were also recorded since the characteristics of the loops highly affected the operation of the servo mechanism that moves the read/write head.

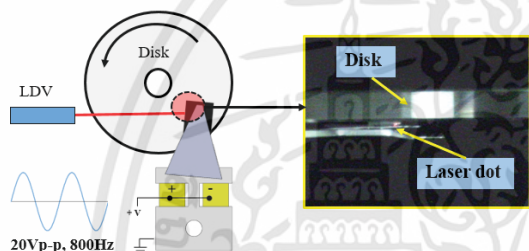


Fig. 5: stroke displacement test in operation

B. Resonance frequency test

The HGA resonance frequency was measured as follows. A transfer function between the input at the baseplate and the output at the slider head was determined as illustrated in Fig. 6. The 3 conditions set up in this test were 10,000 RPM for disk spindle speed, 1kHz- 50kHz sinusoidal frequency and the distance between the slider head (Z height) and the disk of 0.635mm during head flying.

At the start of the test, the shaker generated an off-track motion at the baseplate of the HGA and the displacement was measured by LDV (Polytec OFV-534). The transfer function determination needed the input and output to be in the same unit of acceleration, so an accelerometer was mounted on the shaker to obtain its acceleration.

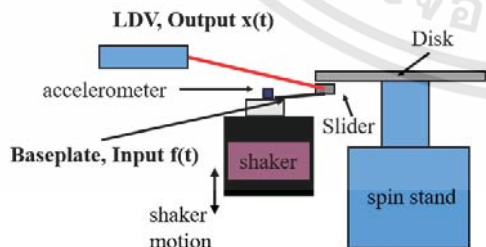


Fig. 6: Resonance test setup

A “Frequency Response Function” (FRF) is often used to present resonance information. The FRF between the specified base-plate off-track displacement motion and the slider off-track displacement motion were determined. During the resonant test on the HGA, the important parameter measured was the slider physical displacement. This response amplitude is shown in the form of the dB gain of the ratio of output (slider head) to input (shaker motion) and calculated mathematically according to the equation below,

$$Gain(dB) = 20 \log_{10} (\text{Output } x(t) / \text{Input } f(t)) \quad (2)$$

where $x(t)$ is the baseplate acceleration obtained from the accelerometer mounted on the shaker and $f(t)$ is the slider acceleration obtained from the LDV. From Eq.2, the gains of five modes of resonance frequencies were plotted as shown in Fig. 7.

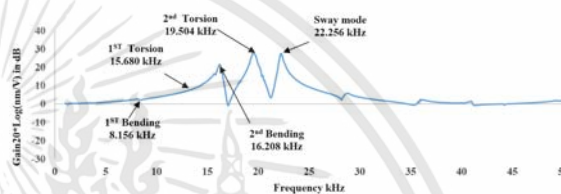


Fig. 7: Five modes of resonance frequencies.

C. Hardness test

HDD manufacturers have faced a problem of cracks of piezoelectric plates while the other parts of the HGA were still functional. In general, the whole HGA would be disposed of as the attached PZT plates could not be replaced. This was because the PZT material was made from ceramic powder that was easy to develop cracks. Although current PZT manufacturer continues to improve ceramic powder by making its grain size smaller to produce stronger plate. However, PZT’s hardness is still much lower than that of PMN-PT. PMN-PT material is made from single crystal that is homogenous and not in granular form like piezoelectric polycrystalline PZT as can be clearly seen in the 2,000x magnification SEM (Scanning electron microscope, Jeol JSM-6010) images in Fig. 8. PZT had a granular structure with grain size around 2-3 um but PMN-PT had a single crystal structure with stronger bonds between atoms.

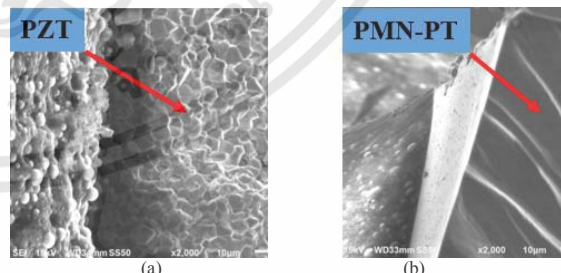


Fig. 8: SEM , (a) PZT, and (b) PMN-PT

We performed a hardness test to prove that PMN-PT was harder than PZT by using an IMADA force tester and a PZ-4 digital force gauge that could measure the maximum force that can cause a piezo material to crack as shown in Fig.9.

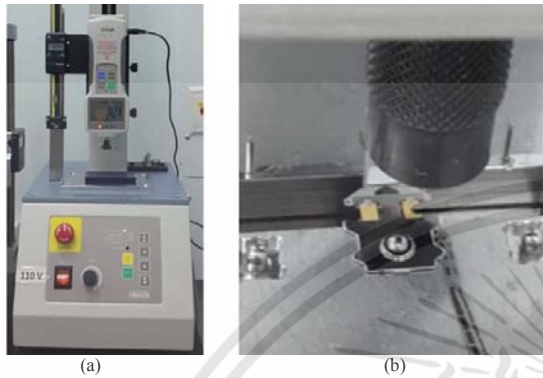


Fig. 9: Hardness tester, (a) the tester, and (b) mounted piezo plates

III. RESULTS AND DISCUSSION

The results of stroke displacement and hysteresis loop tests after thermal degradation at various temperatures are shown in Fig. 10 and 11. The stroke displacement test showed that the PMN-PT stroke displacement bandwidth degraded after a thermal degradation at and over 150 °C; at 160 °C, the degraded extent was 13% and at 180 °C, it was 20%. It was concluded that the maximum temperature that did not negatively affect the thermal reliability of the PMN-PT second stage actuator was 150 °C.

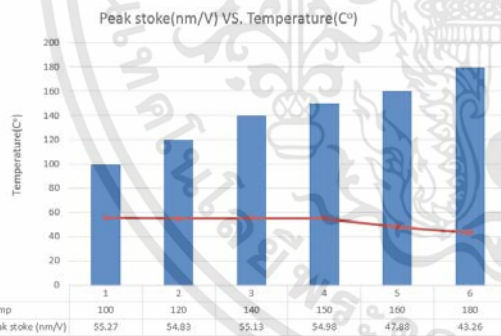


Fig.10 Peak stroke after the HGA was heat-treated at different temperatures

Figure.11 shows the hysteresis loops of PMN-PT after having been heat-treated at different temperatures. PMN-PT hysteresis degraded when the temperature of heat-treatment was over 150 °C; at 160 °C, it degraded 5 times and at 180 °C, it degraded 5.6 times. The maximum temperature that did not

negatively affect the hysteresis reliability of the PMN-PT second stage actuator was 150 °C.

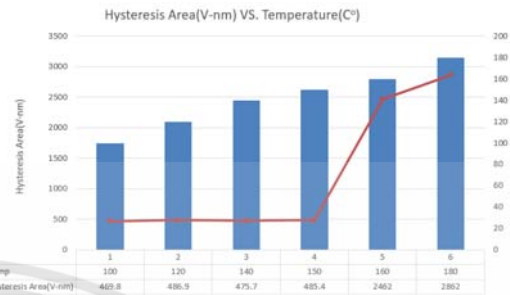


Fig.11: Hysteresis area after the HGA was heat-treated at different temperatures.

Figure 12 shows the hysteresis loops of the PMN-PT material heat-treated at different temperatures. At 150 °C and higher, the hysteresis loop widened up making it difficult for the servo mechanism to control the movement of the read/write head.

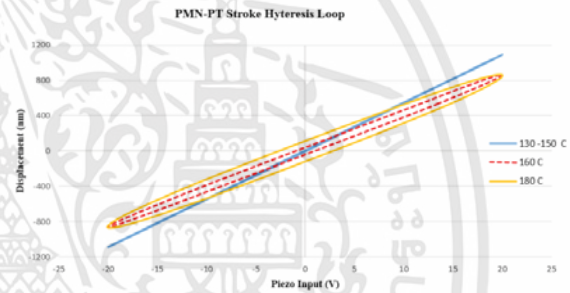


Fig.12: Hysteresis loop degradation.

Table III confirmed that the 5 modes of resonance frequencies did not change after the HGA was heat-treated at different temperatures. Even at 150 °C where the stroke displacement bandwidth started to degrade, the resonance frequencies were not affected.

Table. III Resonance modes after the HGA was heat-treated at different temperatures.

Temp	1 st Bending Mode	1 st Torsion Mode	2 nd Bending Mode	2 nd Torsion Mode	Sway mode
100	8148	15727	16600	20008	22656
120	8612	15184	16024	19640	21952
140	8132	15048	16152	19688	21856
150	8084	14636	17760	19416	20488
160	8172	16052	17248	19840	21856
180	8108	15680	16208	19504	22256

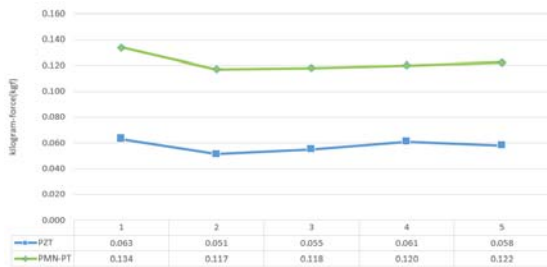


Fig.13: Comparative hardness between 5 PZT and PMN-PT sample pairs

Figure.13 shows a comparison of the hardness of 5 PZT and PMN-PT sample pairs obtained from a hardness test. The average hardness of PMN-PT was 2.12 times higher than that of PZT as mentioned above that the structure of a single crystal is stronger than the granular structure of polycrystals.

IV. CONCLUSION

Single crystal PMN-PT plates were implemented on an HGA and investigated of their stroke performance and reliability. Their hardness was also checked in order to avoid a piezo material crack issue in the HGA assembly process. In this research study, the PMN-PT piezoelectric actuator was analyzed by a Laser Doppler Vibrometer and a hardness tester. Harmonic and displacement analyses were carried out in order to investigate the performance of the actuators after thermal degradation. According to the experiment results, the second stage actuator made from PMN-PT seems to be reliable regarding stroke displacement bandwidth at a temperature of up to 150 °C and the PMT-PT hardness was 2 times higher than that of PZT. Because of its higher hardness, implementing PMN-PT in an HGA should alleviate the piezoelectric material crack issue during an HGA assembly process and lower the production cost of HDD manufacturing. In addition, the resonant frequency of the HGA is mainly depended on the mechanical structure rather than the piezoelectric materials.

ACKNOWLEDGMENT

This work was financially supported by Thailand Research Fund and Seagate technology Thailand (No. PHD5810005). We are grateful to Seagate Technology Thailand for providing us their excellent research facilities to use.

REFERENCES

- [1] Naniwa et al., Low Voltage Driven Piggy-Back Actuator of Hard Disk Drives, IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 45-52, 1999.
- [2] Y. Soeno, S. Ichikawa, T. Tsuna, Y. Sato, I. Sato, "Piezoelectric Piggy-back Microactuator for Hard Disk Drive," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 35 983-987, 1999.
- [3] Nakamura, S., K. Suzuki, M. Ataka, K. Mukasa, An Electrostatic Microactuator for a Magnetic Head Tracking System of Hard Disk Drives, Advances in Information Storage Systems, 83- 99, 1997.
- [4] Koganezawa, S., Y. Uematsu, T. Yamada, Dual- Stage Actuator System for Magnetic Disk Drives, IEEE Trans. on Magnetics, 988- 92, 1999.
- [5] Oldham, K., X. Huang, A. Chahwan, R. Horowitz, Design, Fabrication, and Control of a High- Aspect Ratio Microactuator for Vibration Suppression in a Hard Disk Drive, Proc. of the 16th IFAC, 2005.
- [6] Fan, L., H. Ottensen, R. Reiley, R. Wood, Magnetic Recording Head Positioning at Very High Track Densities Using a Microactuator-- Based Two-- Stage Servo System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 222-33, 1995.
- [7] Horsley, D., A. Singh, A. Pisano, R. Horowitz, Angular Micropositioner for Disk Drives, IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 454- 9, 1997.
- [8] Kim, B., K. Chun, Fabrication of an Electrostatic Track-- Following Micro Actuator for Hard Disk Drives using SOI Wafer, J. Micromechanics and Microengineering, 12880-- 9, 2001.
- [9] Imamura, T., T. Koshikawa, M. Katayama, Transverse Mode Electrostatic Microactuator for MEMS- Based HDD Slider, IEEE Micro Electro Mechanical Systems, 216-21, 1996.
- [10] Yanagisawa, M., Magnetic Disc Apparatus and Magnetic Head in which a Recording/Reproduction Element is Mounted on a Slider Via a Piezoelectric Element. U.S. Patent 6928722B2, 2005.
- [11] P. Wattananukulchai, D. Isarakorn, "A comparative study based on classical and newer piezoelectric materials based unimorph actuators for Hard Disk Drive," IEEE Region 10 Conference, 3464-3467, 2016.
- [12] C. Huang, Y. Lin and T.A. Tang, "Study on the tipdeflection of a piezoelectric bimorph cantilever in the static state," J. Micromech. Microeng., vol. 14, pp. 530-534, 200488.



ภาคผนวก ข
การจตอนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจดอนุสิทธิบัตรการประดิษฐ์

[ข-1] ดอน อิศรากร, ปริญญา วัฒนนกุลชัย และ เซาวลิต จิญาธรรม “ตัวจับเร้าแบบ
สองสถานะที่จับด้วยเพียโซอิเล็กทริก” มิถุนายน 2561.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำเนา

แบบ สป/สพ/อสป/001-ก
หน้า 1 ของจำนวน 2 หน้า



คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร

- การประดิษฐ์
 การออกแบบผลิตภัณฑ์
 อนุสิทธิบัตร

ข้าพเจ้าผู้ลงลายมือชื่อในคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้
ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ตามพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522
แก้ไขเพิ่มเติมโดยพระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2535
และ พระราชบัญญัติสิทธิบัตร (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2542

สำหรับเจ้าหน้าที่	
วันรับคำขอ 29 ต.ย. 2561	เลขที่คำขอ 1803001469
วันยื่นคำขอ 29 ต.ย. 2561	
สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	
ใช้กับแบบผลิตภัณฑ์ ประเภทผลิตภัณฑ์	
วันประกาศโฆษณา	เลขที่ประกาศโฆษณา
วันออกสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	เลขที่สิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
ลายมือชื่อเจ้าหน้าที่	

- ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์
ตัวซ้ำรับแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก
- คำขอรับสิทธิบัตรการออกแบบผลิตภัณฑ์นี้เป็นคำขอสำหรับแบบผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันและเป็นคำขอลำดับที่
ในจำนวน คำขอ ที่ยื่นในคราวเดียวกัน
- ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร บุคคลธรรมดา นิติบุคคล หน่วยงานรัฐ มูลนิธิ อื่นๆ
ชื่อ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
ที่อยู่ 979/17-21 ชั้น 14 อาคารเอสเอ็ม ทาวเวอร์ ถนนพหลโยธิน
ตำบล/แขวง สามเสนใน อำเภอ/เขต พญาไท จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10400 ประเทศไทย
อีเมล jantarush@trf.or.th
 เลขประจำตัวประชาชน เลขทะเบียนนิติบุคคล เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 0 9 9 4 0 0 0 1 6 5 6 9 2 เพิ่มเติม (ตั้งแนบ)
ในกรณีที่มีการฯ สือสารกับท่าน ท่านสะดวกใช้ทาง อีเมลผู้ขอ อีเมลตัวแทน
- สิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร
 ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบ ผู้รับโอน ผู้ขอรับสิทธิโดยเหตุอื่น
- ตัวแทน (ถ้ามี)
ชื่อ นางสาวจันทร์สม โคมเวียน
ที่อยู่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย 979/17-21 ชั้น 14 อาคารเอสเอ็ม ทาวเวอร์ ถนนพหลโยธิน
ตำบล/แขวง สามเสนใน อำเภอ/เขต พญาไท จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10400 ประเทศไทย
อีเมล jantarush@trf.or.th
เลขประจำตัวประชาชน 1 1 0 2 0 0 1 2 9 3 3 9 6 เพิ่มเติม (ตั้งแนบ)
5.1 ตัวแทนเลขที่ 2504
5.2 โทรศัพท์ 02-278-8200ต่อ8370
5.3 โทรสาร 02-298-0476
- ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ ชื่อและที่อยู่เดียวกับผู้ขอ
ชื่อ นายดอน อิศรากร
ที่อยู่ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและการควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง
ตำบล/แขวง ลาดกระบัง อำเภอ/เขต ลาดกระบัง จังหวัด กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10520 ประเทศไทย
อีเมล kidon@kmitl.ac.th
เลขประจำตัวประชาชน 3 1 0 0 9 0 3 8 7 9 9 2 5 เพิ่มเติม (ตั้งแนบ)
- คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิม
ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้ถือว่าได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ ในวันเดียวกับคำขอรับสิทธิบัตร
เลขที่ _____ วันยื่น _____ เพราะคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้แยกจากหรือเกี่ยวข้องกับคำขอเดิมเพราะ
 คำขอเดิมมีการประดิษฐ์หลายอย่าง ถูกคัดค้านเนื่องจากผู้ขอไม่มีสิทธิ ขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ

หมายเหตุ ในกรณีที่ไม่อาจจะบรรยายละเอียดได้ครบถ้วน ให้จัดทำเป็นเอกสารแนบท้ายแบบพิมพ์นี้โดยระบุหมายเลขกำกับข้อและหัวข้อที่แสดงรายละเอียดเพิ่มเติมดังกล่าวด้วย

สำหรับเจ้าหน้าที่			
จำแนกประเภทสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> กลุ่มวิศวกรรม สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (วิศวกรรม) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ไฟฟ้า) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ฟิล์ม)	<input type="checkbox"/> กลุ่มเคมี สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เคมีเทคนิค) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (ปิโตรเคมี) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เทคโนโลยีชีวภาพ) สิทธิบัตรการประดิษฐ์ (เภสัชภัณฑ์)	สิทธิบัตรการออกแบบ <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 1) <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 2) <input type="checkbox"/> สิทธิบัตรการออกแบบ (ออกแบบผลิตภัณฑ์ 3)	อนุสิทธิบัตร <input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร (วิศวกรรม) <input type="checkbox"/> อนุสิทธิบัตร (เคมี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การยื่นคำขออนุญาตนำเข้า <input type="checkbox"/> PCT <input type="checkbox"/> เพิ่มเติม (ดังแนบ)				
วันยื่นคำขอ	เลขที่คำขอ	ประเทศ	สัญลักษณ์จำแนกการประดิษฐ์ระหว่างประเทศ	สถานะคำขอ
8.1				
8.2				
8.3				
8.4 <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอสิทธิให้ถือว่าได้ยื่นคำขอนี้ในวันที่ได้ยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรในต่างประเทศเป็นครั้งแรกโดย <input type="checkbox"/> ได้ยื่นเอกสารหลักฐานพร้อมคำขอนี้ <input type="checkbox"/> ขอยื่นเอกสารหลักฐานหลังจากวันยื่นคำขอนี้				
9. การแสดงการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรได้แสดงการประดิษฐ์ที่หน่วยงานของรัฐเป็นผู้จัด วันแสดง _____ วันเปิดงานแสดง _____ ผู้จัด _____				
10. การประดิษฐ์เกี่ยวกับจุลชีพ				
10.1 เลขทะเบียนฝากเก็บ	10.2 วันที่ฝากเก็บ	10.3 สถาบันฝากเก็บ/ประเทศ		
11. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอยื่นเอกสารภาษาต่างประเทศก่อนในวันยื่นคำขอนี้ และจะจัดยื่นคำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้จัดทำเป็นภาษาไทยภายใน 90 วัน นับจากวันยื่นคำขอนี้ โดยขอยื่นเป็นภาษา <input type="checkbox"/> อังกฤษ <input type="checkbox"/> ฝรั่งเศส <input type="checkbox"/> เยอรมัน <input type="checkbox"/> ญี่ปุ่น <input type="checkbox"/> อื่นๆ _____				
12. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร ขอให้อธิบดีประกาศโฆษณาคำขอรับสิทธิบัตร หรือรับจดทะเบียน และประกาศโฆษณาอนุสิทธิบัตรนี้ หลังจากวันที่ <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรขอให้ใช้รูปเขียนหมายเลข _____ ในการประกาศโฆษณา				
13. คำขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรนี้ประกอบด้วย		14. เอกสารประกอบคำขอ		
ก. แบบพิมพ์คำขอ	3	หน้า	<input checked="" type="checkbox"/> เอกสารแสดงสิทธิในการขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร	
ข. รายละเอียดการประดิษฐ์ หรือคำพรรณนาแบบผลิตภัณฑ์	3	หน้า	<input type="checkbox"/> หนังสือรับรองการแสดงการประดิษฐ์/การออกแบบผลิตภัณฑ์	
ค. ข้อถ้อยสิทธิ	1	หน้า	<input checked="" type="checkbox"/> หนังสือมอบอำนาจ	
ง. รูปเขียน	4	รูป 3	<input type="checkbox"/> เอกสารรายละเอียดเกี่ยวกับจุลชีพ	
จ. ภาพแสดงแบบผลิตภัณฑ์			<input type="checkbox"/> เอกสารการขอรับวันยื่นคำขอในต่างประเทศเป็นวันยื่นคำขอในประเทศไทย	
<input type="checkbox"/> รูปเขียน		รูป	<input type="checkbox"/> เอกสารขอเปลี่ยนแปลงประเภทของสิทธิ	
<input type="checkbox"/> ภาพถ่าย		รูป	<input type="checkbox"/> เอกสารอื่นๆ	
ฉ. บทสรุปการประดิษฐ์	1	หน้า		
15. ข้าพเจ้าขอรับรองว่า <input checked="" type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ไม่เคยยื่นขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตรมาก่อน <input type="checkbox"/> การประดิษฐ์นี้ได้พัฒนาปรับปรุงมาจาก _____				
16. ลายมือชื่อ <input type="checkbox"/> ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร <input checked="" type="checkbox"/> ตัวแทน ( นางสาวจันทรมิ โคมเวียน)				

หมายเหตุ บุคคลใดยื่นขอรับสิทธิบัตรการประดิษฐ์หรือการออกแบบผลิตภัณฑ์ หรืออนุสิทธิบัตร โดยการแสดงข้อความอันเป็นเท็จแก่พนักงานเจ้าหน้าที่ เพื่อให้ได้ใบซึ่งสิทธิบัตรหรืออนุสิทธิบัตร ต้องระวางโทษจำคุกไม่เกินหกเดือน หรือปรับไม่เกินห้าพันบาท หรือทั้งจำทั้งปรับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใบต่อแนบท้าย แบบสป/สผ/อสป/001ก

3. ผู้ขอรับสิทธิบัตร/อนุสิทธิบัตร (ต่อ)

2. บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย)

อยู่ที่ 1627 ม.7 ถนนเทพารักษ์ ตำบลเทพารักษ์ อำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270
ประเทศไทย

เลขประจำตัวผู้เสียภาษีอากร 0105526012048

5. ตัวแทน (ต่อ)

2. ชื่อ นางวรวรรณินี เต็งสุวรรณ

ตัวแทนเลขที่ 2306

โทรศัพท์ 02-278-8204 โทรสาร 02-298-0476

อยู่ที่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย 979/17-21 ชั้น 14 อาคารเอสเอ็ม ทาวเวอร์ ถนนพหลโยธิน
แขวงสามเสนใน เขตพญาไท กรุงเทพมหานคร 10400 ประเทศไทย

อีเมล worawanninee@trf.or.th

เลขประจำตัวประชาชน 3859900143971

6. ผู้ประดิษฐ์/ผู้ออกแบบผลิตภัณฑ์ (ต่อ)

2. นายปริญญา วัฒนกุลชัย

อยู่ที่ ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและการควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร
ลาดกระบัง เลขที่ 1 ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 ประเทศไทย

อีเมล parinya.wattananukulchai@gmail.com

3. นาย เชาวลิท จิญาธรรม์

สังกัด บริษัท ซีเกท เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด 1627 ม.7 ถนนเทพารักษ์ ตำบลเทพารักษ์ อำเภอเมือง
สมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ 10270 ประเทศไทย

รายละเอียดการประดิษฐ์

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

ตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก

สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- 5 การประดิษฐ์เกี่ยวข้องกับสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการติดตั้งและทำการทดสอบตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะ (dual stage actuator) ที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริกในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

- ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์คืออุปกรณ์เก็บข้อมูลแบบไม่ลบเลือนในระบบดิจิทัลบนแผ่นจานโลหะที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กซึ่งหมุนด้วยความเร็วตั้งแต่ 5,000-15,000 รอบต่อนาที โดยหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จะเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งข้อมูลเพื่อ อ่านหรือเขียน ข้อมูลบนแถบแม่เหล็ก บนแถบแม่เหล็กจะบรรจุข้อมูลเรียงกัน โดยทุกๆปีขนาดของแถบข้อมูลจะมีขนาดเล็กทุกเรื่อยๆ ดังนั้นหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำเป็นต้องพัฒนาให้ อ่าน/เขียน ข้อมูลบนพื้นที่ขนาดเล็กลงได้ เนื่องจากตัวขับเคลื่อนหัวอ่านในปัจจุบันที่ใช้ขดลวดเสียง ไม่สามารถเข้าถึงขนาดแถบข้อมูลที่เล็กมากๆได้ จึงได้พัฒนาตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก ที่เข้าถึงระดับไมโครได้ โดยปัจจุบันใช้วัสดุที่เรียกว่า เพียโซอิเล็กทริกแบบพหุผลึก ชนิดเลดเซอร์โคเนตไททานตหรือที่เรียกว่า พีซีที (polycrystalline, PZT) แต่ด้วยข้อจำกัดของวัสดุไม่สามารถตอบสนองแถบข้อมูลที่เล็กลงในอนาคตได้ เนื่องจากวัสดุเพียโซอิเล็กทริกแบบพหุผลึก ชนิดพีซีที แบบหนึ่งเลเยอร์ จากวัสดุแบบพหุผลึกจะมีข้อเสียในทิศทางของโพลาริเซชันของแต่ละโดเมนไม่สมบูรณ์ เนื่องจากเป็นแบบพหุผลึก ดังนั้นการเปลี่ยนพลังงานจากไฟฟ้าเป็นพลังงานกลให้เป็นการเคลื่อนที่จะได้น้อยหากเทียบกับการใช้แบบพหุผลึกหลายชั้นหรือวัสดุผลึกเชิงเดี่ยว ดังนั้น จึงได้มีการแก้ปัญหาโดย
- 15 เพิ่มขึ้นของวัสดุจาก 1 เลเยอร์ นำมาซ้อนกันกลายเป็นหลายๆเลเยอร์ ทำให้ความสามารถในการเคลื่อนที่ของหัวอ่าน/เขียน ได้มากขึ้น แต่ผลที่ตามมาคือการเพิ่มเลเยอร์ ทำให้การผลิตซับซ้อน ราคาที่สูงขึ้นและที่สำคัญคือ วัสดุมีความเปราะบาง ง่ายต่อการเสียหาย

ดังนั้นทางทีมวิจัยจึงได้ใช้วัสดุชนิดใหม่ที่มีคุณสมบัติเหนือกว่าชนิดปัจจุบัน มาทดลองบนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์เป็นครั้งแรกของวงการฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยเปลี่ยนมาใช้วัสดุแบบพหุผลึกหลายชั้นหรือวัสดุผลึกเชิงเดี่ยวจะทำให้การเคลื่อนที่ได้มากขึ้น ซึ่งเป็นวัสดุชนิดใหม่ที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยวแบบชั้นเดียวที่เรียกว่า เลดแมกนีเซียมไนโอ

เบต-เลตไททานเนต (single crystal, PMN-PT) หรือที่เรียก พีเอ็มเอ็น-พีที มาใช้ในหัวอ่าน/เขียน สำหรับรองรับใน อนาคต เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีคุณสมบัติที่เหนือกว่าแบบพหุผลึก ชนิด พีซีที ทั้งชั้นเดียวและหลายชั้น โดยในเรื่อง ของประสิทธิภาพ ราคาที่เทียบเคียงกับแบบหลายชั้น และที่สำคัญค่าฮีสเทอรีซิสที่น้อยกว่าถึง 10 เท่า

คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

- 5 รูปที่ 1 แสดงการต่อวงจรของตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับด้วยเพียโซอิเล็กทริก (ก) ด้านบน, (ข) ด้านข้าง
- รูปที่ 2 แสดงผลการทดลองระหว่าง PZT และ PMN-PT เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าจะได้ระยะเคลื่อนที่ออกมา โดย (ก) ค่าการป้อนไฟฟ้าและระยะที่ได้ของ PZT , (ข) ค่าการป้อนไฟฟ้าและระยะที่ได้ของ PMN-PT
- รูปที่ 3 (ก) แสดงวงจรการต่อของวัสดุเพียโซ โดยที่วัสดุ 2 ชั้น ด้านบนจะต้องสลับขั้วเสมอ จากรูปที่ 3 (ข) จะเห็น การทำงาน
- 10 รูปที่ 4 แสดงแผนภาพการทดสอบหัวอ่าน-เขียน โดยใช้ชุดเลเซอร์วัดการระยะออกมา

ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

- 15 ตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับด้วยเพียโซอิเล็กทริก ที่มีการนำวัสดุชนิด เลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลด ไททานเนต(PMN-PT) มาประยุกต์ใช้กับหัวอ่านฮาร์ดดิส ประกอบด้วย วัสดุที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยวแบบชั้นเดียวที่ผ่านการ ขึ้นรูปแล้ว หรือ เพียโซอิเล็กทริก(1) ถูกเชื่อมวงจรกับแผงวงจร (5) ผ่านเบสเพลท(Baseplate)และเซอร์กิต จัมพ์ไฟเออร์(7) หัวอ่าน(7)ที่ต่อกับแผงวงจร (5)

- 20 นำวัสดุมาประยุกต์ใช้บนหัวอ่าน-เขียน ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลึกเชิงเดี่ยวแบบชั้นเดียวที่เรียกว่า เลด แมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไททานเนต (single crystal, PMN-PT) หรือที่เรียก พีเอ็มเอ็น-พีที มาใช้ในหัวอ่าน สำหรับ รองรับในอนาคต เพื่อตอบสนองความจุที่มากขึ้นในอนาคต โดยหัวอ่านสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะมากขึ้นจากวัสดุ เดิม

การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

- 25 ตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับด้วยเพียโซอิเล็กทริก ที่มีการนำวัสดุชนิด เลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไท ทานเนต(PMN-PT) มาประยุกต์ใช้กับหัวอ่านฮาร์ดดิส มีผลทำให้หัวอ่านมีการเคลื่อนที่ได้มากกว่าของเดิมและที่มีค่า ฮีสเทอรีซิสน้อย โดยระบบจะเป็นการทำงานแบบเชิงเส้น ทำให้เคลื่อนที่ได้มากกว่า มีผลต่อการอ่านฮาร์ดดิสที่มี ประสิทธิภาพในการเคลื่อนที่ได้ระยะทางมากขึ้น ดังนั้น การประดิษฐ์ตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับด้วยเพียโซ อิเล็กทริก นี้จะช่วยตอบสนองต่อการอ่านหน่วยความจำของฮาร์ดดิสที่มีความจุที่มากขึ้นได้

ตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก ประกอบด้วย วัสดุที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยวแบบชั้นเดียว คือ เลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไททานต (single crystal, PMN-PT) หรือ พีเอ็มเอ็น-พีที โดยสูตร คือ $(1-x)[Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3]-x[PbTiO_3]$ ที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว 2 แผ่น ตัดให้ได้ขนาดตามที่ออกแบบให้เข้ากับวัตถุที่ต้องการติดตั้งหรือในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ พีเอ็มเอ็น-พีทีที่ผ่านการขึ้นรูปแล้วโดยขอเรียกว่า เพียโซอิเล็กทริก (piezoelectric)(1) ถูกเชื่อมวงจรกับแผงวงจร (5) ผ่านเบสเพลท(Baseplate) โดยใช้กาว 2 ชนิด คือ กาวไม่นำไฟฟ้า(2) และกาวนำไฟฟ้า(3) ที่ติดลงบน เบสเพลท(Baseplate) (4) ดังรูปที่ 1 (ก) และ (ข)

การติดตั้งระหว่างแผงวงจร(5) กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (1) โดยที่วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (1) ทั้ง 2 ชั้น ที่ต้องการติดตั้งนั้นหากาวนำไฟฟ้า(2) ในด้านตรงข้ามกันเชื่อมบนเบสเพลท(4) เพื่อให้กระแสไฟฟ้าในวงจรไหลสลับขั้วกันเสมอ และ กาวนำไฟฟ้า(3) หยอดในด้านเดียวกันทั้งสองแผ่น บนเบสเพลท(4) นอกจากนี้ ได้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (1) ทั้ง 2 แผ่นจะเชื่อมกับเซอร์กิต จัมพ์เพอร์(7) โดยกาวนำไฟฟ้า(3) และ หัวอ่าน(6)ถูกติดตั้งกับแผงวงจรในด้านที่หยอดกาวนำไฟฟ้า(3)

ประสิทธิภาพการนำเอาวัสดุชนิด PMN-PT มาประยุกต์ใช้ในหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ตารางที่ 1 แสดงผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง PZT และ PMN-PT

Peak Voltage(V)		Peak Stroke(nm/V)		Hysteresis Area(V-nm)	
PZT	PMN-PT	PZT	PMN-PT	PZT	PMN-PT
20.06	20.06	24.36	54.61	4191.2	419.8

สรุปผลจากตารางที่ 1 จะเห็นว่าวัสดุชนิด PMN-PT ให้การเคลื่อนที่ได้มากกว่าของเดิมมากกว่า 100 % และที่สำคัญลักษณะของฮิสเตอร์ซิส PMN-PT มีค่าต่ำกว่า คือน้อยกว่าประมาณ 10 เท่า โดยระบบจะเป็นเชิงเส้นมากกว่า เพราะการใช้งานทั่วไปจะต้องป้อนสัญญาณไปกลับ ดังนั้นการที่มีฮิสเตอร์ซิสน้อยจะส่งผลดีต่อระบบ

หมายเหตุ

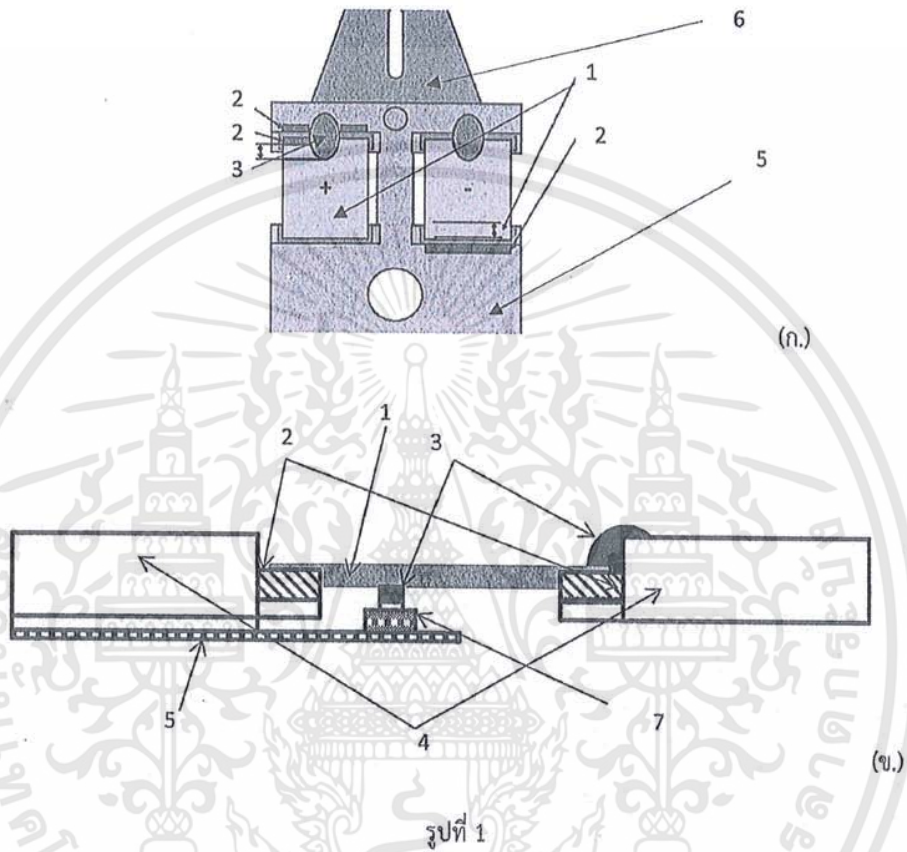
ตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะ (Dual stage actuator) คือตัวขับเคลื่อนหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ตัวที่ 2 โดยตัวแรกใช้คือขดลวดเสียง (Voice Coil Motor) ตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะจะทำหน้าที่เคลื่อนที่แบบละเอียดและเข้าถึงข้อมูลอย่างรวดเร็ว เพียงแต่เคลื่อนที่ได้ระยะสั้นเท่านั้น

วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

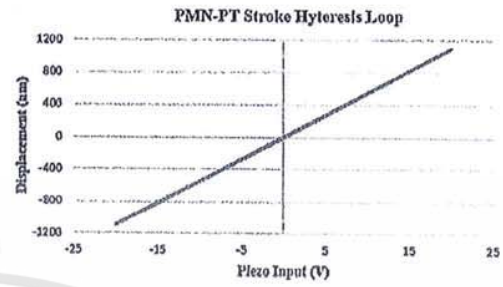
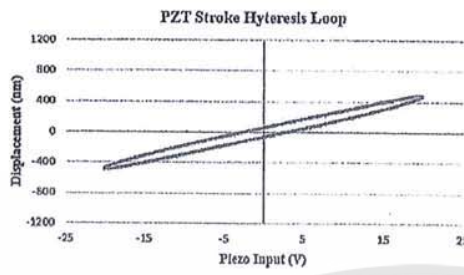
ตามที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

ข้อถ้อยสัญญา

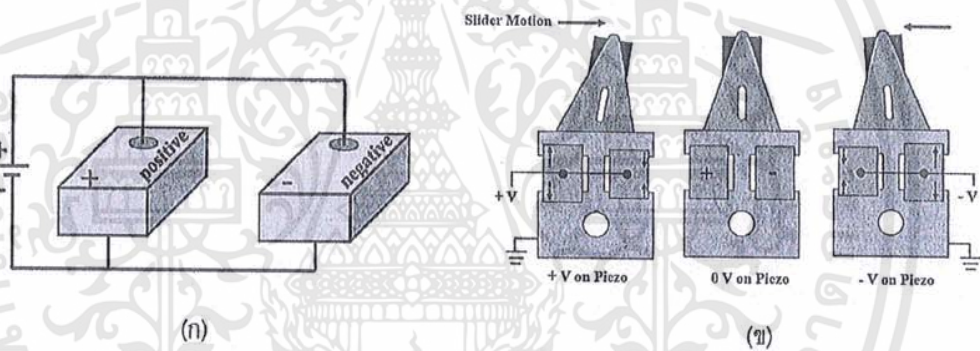
1. ตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก ที่มีการนำวัสดุชนิด เลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไททาเนต(PMN-PT) มาประยุกต์ใช้กับหัวอ่านฮาร์ดดิส ประกอบด้วย
5 วัสดุที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยวแบบชั้นเดียวที่ผ่านการขึ้นรูปแล้ว หรือ เพียโซอิเล็กทริก(1) ถูกเชื่อมวงจรรกับแผงวงจร (5) ผ่านเบสเพลท(Baseplate)และเซอร์กิต จัมพ์เพอร์(7) หัวอ่าน(7)ที่ต่อกับแผงวงจร (5)
2. ตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก ตามข้อถ้อยสัญญาข้อที่ 1 ที่ซึ่งวัสดุที่ใช้เชื่อมเพียโซอิเล็กทริก(piezoelectric)(1) กับเบสเพลท(Baseplate)และเซอร์กิต จัมพ์เพอร์(7) คือ กาว 2 ชนิด คือ กาวไม่นำไฟฟ้า(2) และกาวนำไฟฟ้า(3)
10
3. ตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก ตามข้อถ้อยสัญญาข้อที่ 1-2 ข้อใดข้อหนึ่ง ที่ซึ่งแผงวงจร(5) กับวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (1) ทั้ง 2 ชั้น ที่ติดตั้งบนเบสเพลท(4) มีกระแสไฟฟ้าในวงจรไหลสลับขั้วกันเสมอ
4. ตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก ตามข้อถ้อยสัญญาข้อที่ 1-2 ข้อใดข้อหนึ่ง ที่ซึ่งการ
15 กาวนำไฟฟ้า(3) หยอดในด้านเดียวกันทั้งสองแผ่นของวัสดุเพียโซอิเล็กทริก (1) บนเบสเพลท(4) และด้านใต้วัสดุเพียโซอิเล็กทริก (1) ทั้ง 2 แผ่นจะเชื่อมกับเซอร์กิต จัมพ์เพอร์(7) โดยกาวนำไฟฟ้า(3)
5. ตัวขับเร้าแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก ตามข้อถ้อยสัญญาข้อที่ 1-2 ข้อใดข้อหนึ่ง ที่ซึ่งหัวอ่าน(6) ถูกติดตั้งกับแผงวงจรในด้านเดียวกับที่หยอดกาวนำไฟฟ้า(3) บนเบสเพลท



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

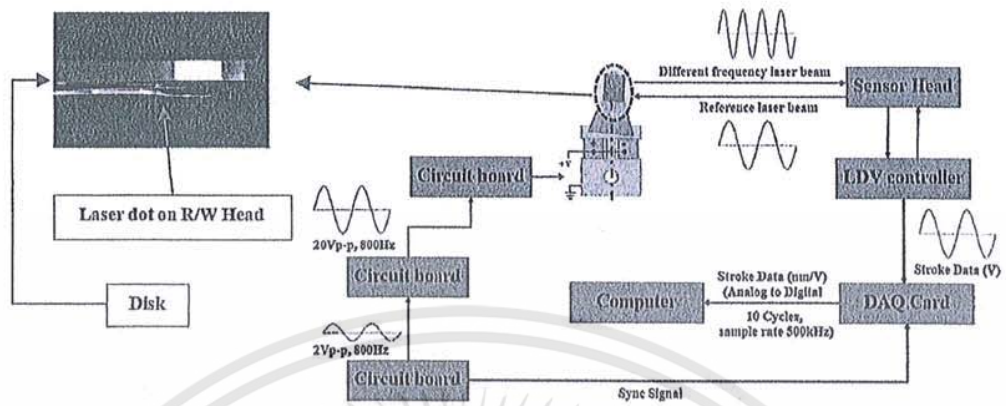


รูปที่ 2

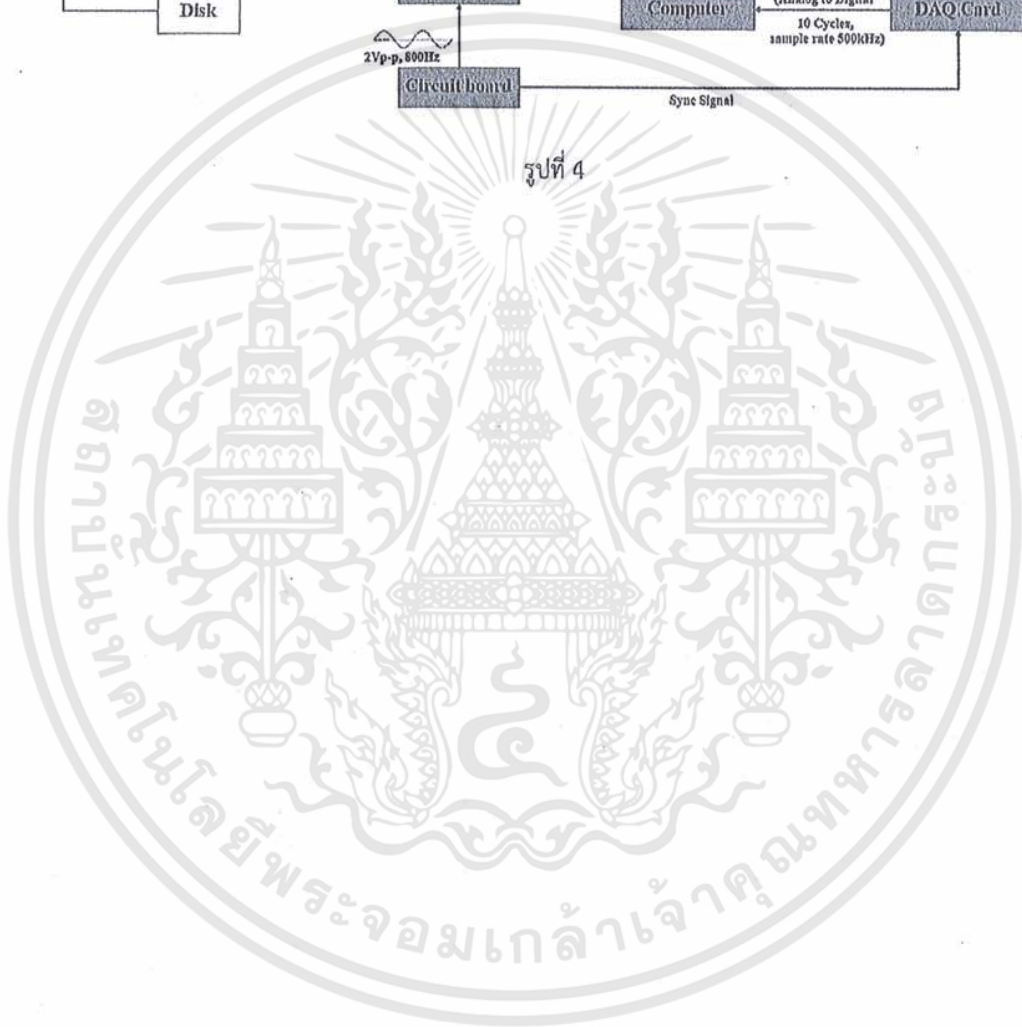


รูปที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทสรุปการประดิษฐ์

ตัวขับเคลื่อนแบบสองสถานะที่ขับเคลื่อนด้วยเพียโซอิเล็กทริก ที่มีการนำวัสดุชนิด เลดแมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไท
ทานเนต(PMN-PT) มาประยุกต์ใช้กับหัวอ่านฮาร์ดดิส ประกอบด้วย วัสดุที่เป็นผลึกเชิงเดี่ยวแบบชั้นเดียวที่ผ่านการ
5 ชั้นรูปแล้ว หรือ เพียโซอิเล็กทริก(1) ถูกเชื่อมวงจรกับแผงวงจร (5) ผ่านเบสเพลท(Baseplate)และเซอร์กิต จัมพ์
เพอร์(7) หัวอ่าน(7)ที่ต่อกับแผงวงจร (5)

นำวัสดุมาประยุกต์ใช้บนหัวอ่าน-เขียน ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผลึกเชิงเดี่ยวแบบชั้นเดียวที่เรียกว่า เลด
แมกนีเซียมไนโอเบต-เลดไททานเนต (single crystal, PMN-PT) หรือที่เรียก พีเอ็มเอ็น-พีที มาใช้ในหัวอ่าน สำหรับ
รองรับในอนาคต เพื่อตอบสนองความจุที่มากขึ้นในอนาคต โดยหัวอ่านสามารถเคลื่อนที่ได้ระยะมากขึ้นจากวัสดุ
10 เดิม



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายปริญญา วัฒนนุกุลชัย
วัน เดือน ปีเกิด	28 มกราคม 2525 ที่อุดรธานี
ที่อยู่	11/305 หมู่ที่ 3 ต.ลำโรง อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ 10130
ประวัติการศึกษา	2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์เชิงกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2552 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา เครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบเครื่องจักรกล (Mechanical Design) 2.) การพัฒนาหัวอ่านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (HSA Development) 3.) ระบบจักรกลไฟฟ้าขนาดเล็ก (Micro Electromechanical System)
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2561-ปัจจุบัน	ตำแหน่ง Founder & CEO บริษัท Innovation Brain Ltd.
พ.ศ.2557-2560	ตำแหน่ง HSA Metrology บริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd.
พ.ศ.2555-2557	ตำแหน่ง Mechanical Reliability Lab บริษัท Seagate Technology (Thailand) Ltd.
พ.ศ.2554-2555	ตำแหน่ง NPI Engineer บริษัท Focuz Manufacturing Co., Ltd.
พ.ศ.2553-2554	ตำแหน่ง Software, Tooling and Maintenance Engineer บริษัท Hitachi Global Storage Technologies Thailand Co., Ltd.
พ.ศ.2552-2553	ตำแหน่ง Process Engineer บริษัท Fabrinet CO., LTD.
ผลงานวิจัย	
พ.ศ.2561	Parinya Wattananukulchai and Don Isarakorn, “Performance Evaluation using Laser Doppler Vibrometer Sensing Technique on Advanced Lead Magnesium Niobate-Lead Titanate Piezoelectric-Material-Based Microactuator for Hard Drive Head”, Sensors and Materials, Vol. 30, No. 10, 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน(ต่อ)

- พ.ศ.2561 **Parinya Wattananukulchai** and Don Isarakorn, “Reliability of PMN-PT Piezoelectric Material as an Actuator for High Density Hard Disk Drive”, 15th ECTI-CON.
- พ.ศ.2560 **Parinya Wattananukulchai** and Don Isarakorn, “A comparative study based on classical and newer piezoelectric materials based unimorph actuators for Hard Disk Drive”, IEEE Region 10 Conference (TENCON)
- พ.ศ.2552 **Parinya Wattananukulchai** and Witaya Wannasuphoprasit, “Experimental study of 2 D Model on a Scaled Vehicle”, The 5th International Conference on Automotive Engineering.
- พ.ศ.2552 Witaya Wannasuphoprasit, Krissada Chundang and **Parinya Wattananukulchai**, “Scaled Vehicle for Interactive Dynamic Simulation (SIS)”, IEEE International Conference on Robotic and Biomimetics.
- พ.ศ.2551 Witaya Wannasuphoprasit and **Parinya Wattananukulchai**, “Essential Parameter for Dynamically Scaling Vehicle”, 4th Society of Automotive Engineers Thailand Conference (TSAE).
- พ.ศ.2551 **Parinya Wattananukulchai** and Witaya Wannasuphoprasit, “Equivalent Dynamic Scaling System for Real Vehicle”, 21st The Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand(ME-NETT).
- พ.ศ.2550 **Parinya Wattananukulchai**, Krissada Chundang and Witaya Wannasuphoprasit, “A Scaling Vehicle for Dynamic Simulation”, 21st The Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand(ME-NETT).