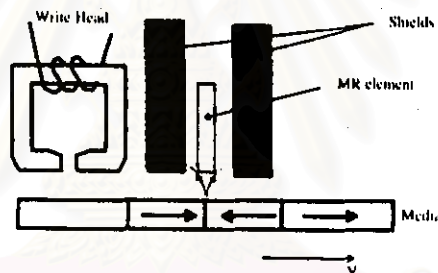


## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ (Magnetoresistive head) [1, 2]

หัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ ประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนที่เรียกว่า หัวอ่านเขียนแบบอินดักทีฟ (Inductive head) ซึ่งใช้ในการเขียน ข้อมูลลงบนแผ่นดิสก์ อีกส่วนหนึ่งเรียกว่าหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ (MR head) ซึ่งใช้ในการอ่านข้อมูลบนแผ่นดิสก์ องค์ประกอบอันหนึ่งของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงองค์ประกอบของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ

หัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟมีสไลด์ฟพิเศษของวัสดุแมกนีโทริซิสทีฟ ซึ่งอยู่ระหว่างขั้วทั้ง 2 ขั้ว ทำจากวัสดุที่มีค่าเพอมีอะบิลิตี (Permeability) สูง และป้องกันส่วนที่เป็นแมกนีโทริซิสทีฟ (MR element) จากสนามแม่เหล็กของแอดเจเชนซ์ทรานสิชัน (Adjacent transition).

หัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟมีความไวต่อสนามแม่เหล็กที่มีแนวตั้งฉาก ซึ่งเป็นสิ่งที่แตกต่างกับหัวอ่านเขียนอินดักทีฟ ซึ่งจะมีความไวต่อสนามแม่เหล็กในแนวนอน หัวอ่านเขียนอินดักทีฟจะดีฟเพื่อเรนทิเอทสัญญาณ ขณะที่สัญญาณของหัวอ่านแบบแมกนีโทริซิสทีฟจะเป็นสัดส่วนของสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง

### 2.1.1 แอนิโซโทรปิก แมกนีโท-รีซิสทีฟ (Anisotropic Magneto-Resistive)

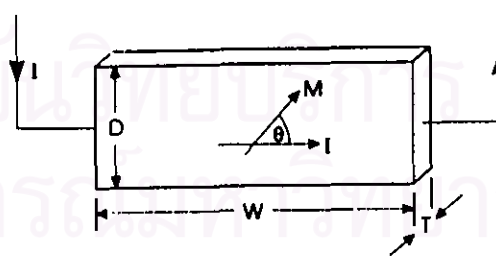
ในปี 1857 , William Thomson ภายหลังเป็น Lord Kelvin ได้ค้นพบว่าความต้านทานทางไฟฟ้าของแท่งเหล็กเปลี่ยนแปลงเมื่อความเป็นแม่เหล็กมีการเปลี่ยนแปลง ปรากฏการณ์นี้ในปัจจุบันเรียกว่า Anisotropic Magneto-Resistive (AMR) effect และปรากฏการณ์นี้ได้รับการสนใจเพียงใน – ระดับสถาบันการศึกษา จนกระทั่ง Bob Hunt คิดค้นหัวอ่านเขียนแมกนีโทรีซิสทีฟ (Magneto-Resistive Head)

ในฟิล์มบางของวัสดุแม่เหล็ก Magnetization สามารถเป็น Single Domain และไม่สามารถแบ่ง Domain Walls ออกเป็น Multidomain-state ได้ ยิ่งไปกว่านั้น ในฟิล์มบาง Demagnetizing field ออกแรงกระทำให้ทิศทางของ Magnetization อยู่ในแนวขนานกับแนวระนาบของฟิล์มบาง

ในสภาวะของฟิล์มบางและ Single Domain ปรากฏการณ์ AMR สามารถอธิบายได้ง่าย จากรูปที่ 2.2 เมื่อมุมระหว่าง Magnetization  $M$  และ กระแส  $I$  คือ  $\theta$  ค่าความต้านทานกระแสไฟฟ้า  $R$  สามารถเขียนเป็น

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2 \theta \quad (2.1)$$

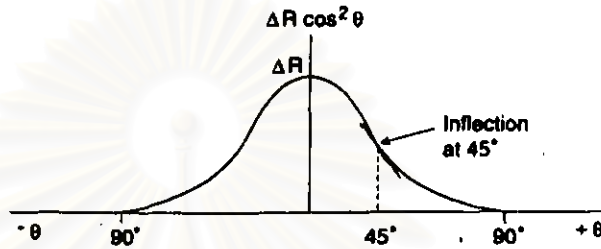
เมื่อ  $R_0$  คือ ค่าคงที่ของความต้านทาน และ  $\Delta R$  คือค่าสูงสุดของความต้านทานที่แปรผัน



รูปที่ 2.2 แสดง AMR effect ใน a single - domain thin - film stripe

ในรูป 2.2 ความหนาของฟิล์มบางคือ  $T$  และความสูงคือ  $D$  และความกว้างของฟิล์มคือ  $W$  ซึ่งเป็นแบบจำลองของ MR sensor หรือ MR element (MRE) ซึ่งจะใช้สมำเสมอในหนังสือเล่มนี้ ความกว้าง  $W$  นี้จะเป็นทั้งทิศทางของกระแสและขนาดของแทร็ก-วิดธ์ (Track - width)

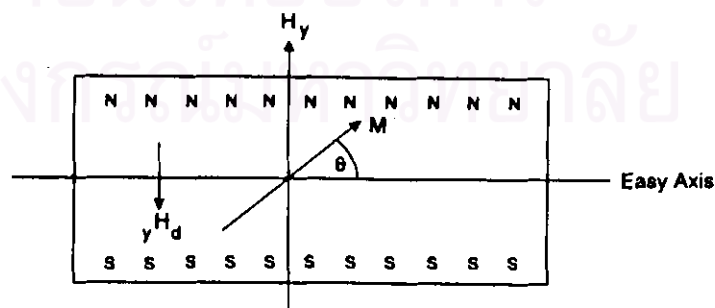
รูปที่ 2.3 แสดงการพล็อตของส่วนที่เป็นตัวแปรของความต้านทานของวัสดุ Permalloy (82% Ni และ 18% Fe) กับ Magnetization angle เนื่องจากค่าสูงสุดของส่วนที่เป็นตัวแปรของความต้านทานเกิดขึ้นเมื่อ  $\theta = 0$  ดังนั้นความต้านทานสูงสุดเมื่อ Magnetization และกระแสอยู่ในแนวขนานกัน จุดเปลี่ยนเว้า (Inflection point) ของการเปลี่ยนแปลงของความต้านทานและมุมของ Magnetization อยู่ที่  $\theta = 45^\circ$  และบริเวณมุมที่ใกล้เคียง ซึ่งโดยมากจะแปรผันตรง (Linear)



รูปที่ 2.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของ Magneto-resistive ระหว่างความต้านทานกับ Magnetization angle

### 2.1.2 แมกนีโท-รีซิสทิฟ เซ็นเซอร์ (Magneto - Resistive Sensors or Elements)

โดยความคิดพื้นฐานหัวอ่านเขียนแมกนีโทรีซิสทิฟทั้งหมดคือ ตัวที่สร้างสนามแม่เหล็กในการเขียนหรือบันทึก Magnetization pattern ในเทปหรือดิสก์ โดยการเปลี่ยนมุมของ MRE Magnetization angle เมื่อ Magnetization angle ใน MRE ถูกไบอัสโดย Vertical bias field การเปลี่ยนความต้านทาน  $\delta R$  ซึ่งโดยมากจะเป็นสัดส่วนตรงกับแอมพลิจูดของสนามแม่เหล็กจากแผ่นบันทึก (Recording medium)



รูปที่ 2.4 แสดง Easy axis , สนามแม่เหล็กจากแผ่นดิสก์ , Magnetic poles ที่ขอบ และ vertical demagnetization field

ในหัวอ่านเขียนแอมป์โทริจิสติกทั้งหมด สัญญาความต่างศักย์เอิร์ททุท ซึ่งเป็นไปตามกฎของ Ohm's Law คือมีค่าเท่ากับ ความต้านทานที่เปลี่ยนไปคูณกับกระแสที่วัดได้ ( $\delta V = I\delta R$ )

เมื่อ Magnetization angle  $\theta$  ใน MRE สูงขึ้น ขั้วของสนามแม่เหล็ก (Magnetic poles) จะถูกสร้างขึ้นที่ด้านบนและด้านล่างของเซ็นเซอร์ ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.4 ขั้วเหนืออยู่ด้านบนและขั้วใต้อยู่ด้านล่าง สนามแม่เหล็กที่ถูกสร้างขึ้นภายในเรียกว่า Demagnetizing field ( $H_d$ ) ถ้า Vertical magnetic field ( $H_v$ ) ซึ่งเป็นการรวมกันของ Vertical Bias field ในแนวตั้ง และสนามแม่เหล็กจากเทปหรือดิสก์ในทิศทางขึ้น ส่วน Demagnetizing field ซึ่งเหนือมาโดย magnetization angle จะอยู่ในทิศที่ตรงกันข้ามซึ่งแสดงไว้ในรูป 2.4 สนามแม่เหล็กที่อยู่ในแนวตั้งจะทำหน้าที่ในการเพิ่มมุม  $\theta$  ส่วน Demagnetization จะทำหน้าที่ในการลด  $\theta$  ค่าของ Demagnetizing field คือสัดส่วนของ T/D ดังนั้นความหนาแน่น และความถี่ของ MRE ค่าของ Demagnetizing field ก็จะมีค่าสูงสำหรับการกำหนดมุม Magnetization angle  $\theta$

ในรูป 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง  $H_v$  ถ้า Demagnetizing field สามารถละเลยได้ (บางและค่าความถี่ D มาก) ดังนั้น Magnetization angle คือ

$$\theta = \sin^{-1}(H_v/H_k) \quad (2.2)$$

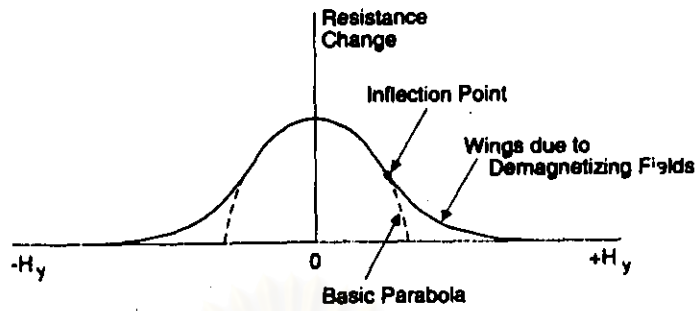
และความต้านทานคือ

$$R = R_0 + \Delta R[1 - (H_v/H_k)^2] \quad (2.3)$$

เมื่อ  $H_k$  คือ Anisotropy field ส่วนที่เป็นตัวแปรความต้านทานคือ ทาราไบติก ซึ่งแสดงด้วยเส้นประในรูป 2.5 และไม่มีจุดเปลี่ยนเว้า ผลของการที่ Demagnetizing field ถูกนำเข้ามาเกี่ยวข้องคือ มีปีกเพิ่มขึ้น แสดงโดยเส้นทึบ ซึ่งจะไม่มีจุดเปลี่ยนเว้า ที่จุดเปลี่ยนเว้า Magnetization angle มีค่าเท่ากับ  $0^\circ$  ที่ขอบด้านบนและด้านล่างของ MRE และ  $60^\circ$  ที่ตรงกลางของความถี่ (D) ของ MRE

การเตรียม Vertical field ไม่เพียงพอที่จะทำให้ MRE อิ่มตัว (Saturate) นั่นคือ  $M_y < M_{\infty}$  ที่ตำแหน่งตรงกลางของความถี่  $Y = D/2$  วิธีการวิเคราะห์สำหรับ magnetization angle ในกรณีทั่วไป เมื่อ Anisotropy field  $H_k$  สามารถละเลยได้ เมื่อเทียบกับ Demagnetizing field  $H_d$  Magnetization angle เป็นฟังก์ชันของตัว MRE ที่ความถี่  $y$  คือ

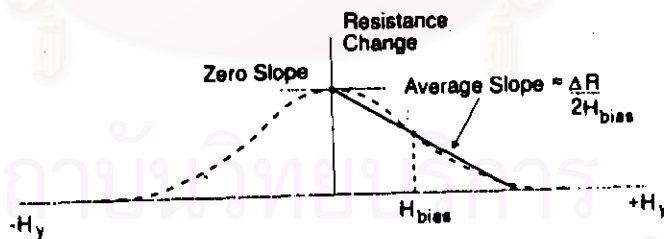
$$\theta_y = \tan^{-1} \{ [H_{\infty} ((D/2)^2 - y^2)^{1/2}] / 2\pi M_y T \} \quad (2.4)$$



รูปที่ 2.5 แสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟกับสนามแม่เหล็กจากแผ่นคิสต์ , แสดงผลกระทบของ Demagnetizing field

ในหลายกรณีนั้นเป็นความสะดวกและเพียงพอที่จะทำการประมาณการเปลี่ยนแปลงของความต้านทาน กับ Vertical field ด้วยเส้นตรงที่บด แสดงในรูป 2.6 ค่าความชันของการประมาณนี้มีค่าเท่ากับ  $-\Delta R/2H_{bias}$  และมันเป็นการแสดงความไวของ MRE เมื่อใช้ Vertical bias

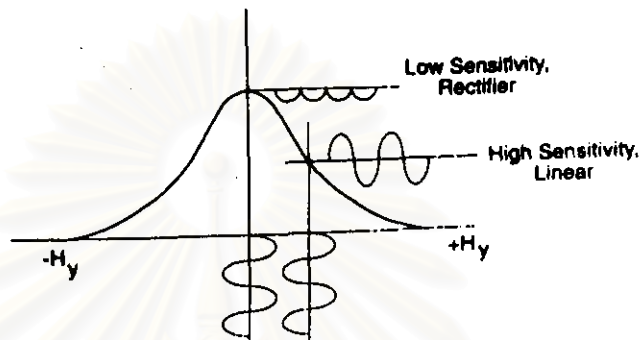
เมื่อไม่มีการใช้ Vertical bias ความไวหรือความชันของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับสนามแม่เหล็กมีค่าเท่ากับศูนย์



รูป 2.6 แสดงการทื่อคของการเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับสนามแม่เหล็กจากคิสต์ และแสดงค่าความชัน และ Bias field

รูปที่ 2.7 แสดงการเปลี่ยนความต้านทาน  $\Delta R$  ตอบสนองต่อการกระตุ้นจากสนามแม่เหล็กจาก Written magnetization pattern ในเทปหรือคิสต์ เมื่อให้ Vertical bias field ที่เหมาะสม ความต่างศักย์เออร์ท์ทุกมีค่าเท่ากับ  $I\Delta R$  ที่มีขนาดใหญ่และแปรผันตรง มีค่าความเบี่ยงเบนจากแนวเส้นตรงประมาณ

-20 dB ของฮาร์โมนิกอันดับคู่ (Even harmonic distortion) ซึ่งยอมรับได้สำหรับช่องทาง (Channel) ของข้อมูลแบบไบนารีและดิจิตอล แต่ไม่เพียงพอสำหรับช่องทางแบบอนาล็อก ในอีกทางหนึ่ง ถ้า Vertical biasing ไม่ได้ใช้การตอบสนอง (Response) จะมีความไวต่ำ และนอนลิเนียร์ (Nonlinear) ซึ่งจะปฏิบัติตัวเหมือนกับเครื่องปรับไฟกระแสสลับให้เป็นกระแสตรงแบบเต็มถูกคลื่น (full-wave rectifier)

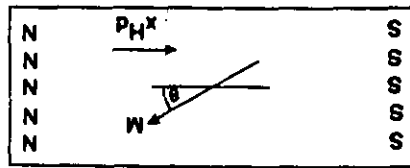


รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการอ่านของแมกนีโทริซิสทีฟ ของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในแบบที่มี และ ไม่มี Bias field

สิ่งที่สำคัญก็คือ ถึงแม้ว่าใช้การไบอัสในแนวตั้งที่เหมาะสม (Optimum vertical bias) เอาท์พุทของ MRE ยังมีนอนลิเนียร์ สำหรับสนามแม่เหล็กที่มีขนาดเล็กจากเทปหรือดิสก์ ซึ่งแตกต่างจากหัวอ่านเขียนอินคักทีฟเส้นแข็ง ดังนั้นหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ โดยทั่วไปมักจะแสดงพัลส์แอมพลิจูดแบบไม่สมมาตร (Pulse amplitude asymmetry) และฮาร์โมนิกอันดับคู่ นั้นหมายถึง โพลีทีฟแอมพลิจูดมีค่าไม่เท่ากับเนกาทีฟแอมพลิจูด

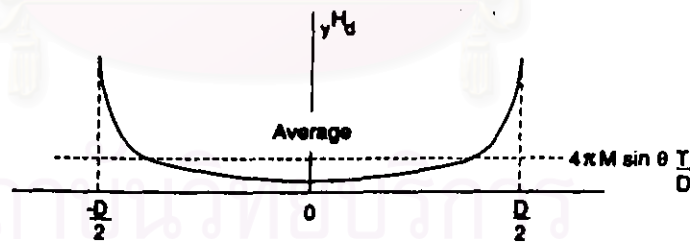
ความลึก D ของ MRE เป็นสาเหตุให้เกิด Vertical demagnetizing fields  $H_v$  ซึ่งได้อธิบายไปแล้ว ขนาดความกว้าง W เป็นสาเหตุให้เกิด Horizontal Demagnetizing field  $H_h$  ซึ่งแสดงไว้ในรูป 2.8

ทั้ง Vertical และ Horizontal demagnetizing fields ขึ้นกับขนาดของ MRE และ Magnetization angle  $\theta$  รูปที่ 2.9 และ 2.10 แสดงการพล็อตการผันแปรและค่าเฉลี่ยของ Demagnetization ในแนวตั้ง และแนวนอน ตามลำดับ



รูป 2.8 แสดงขั้วสนามแม่เหล็กและ Horizontal demagnetizing field

ในการรักษา Single - domain magnetization ใน MRE ให้มีเสถียรภาพ และไม่มีฮิสเทอรีซิส (Hysteresis) จำเป็นต้องมี Horizontal bias field เพิ่มขึ้นจาก Vertical bias field ซึ่งได้อธิบายไว้แล้ว การมีฮิสเทอรีซิสเป็นสาเหตุการเปลี่ยนความต้านทาน ในการเพิ่มสนามแม่เหล็กในแนวตั้งแตกต่างจากการลดลงของสนามแม่เหล็กในแนวตั้ง การมีฮิสเทอรีซิสอยู่เป็นค้วงบ่งบอกว่า ในบางส่วนของ MRE ซึ่งโดยมากจะเป็นที่บริเวณด้านปลาย มี Domain Wall ซึ่งมีการเคลื่อนที่อย่างไม่ต่อเนื่องจากด้านหนึ่งไปยังตำแหน่งอื่น การเคลื่อนที่ในลักษณะนี้เป็นสาเหตุเกิดการกระโดดใน MRE magnetization angle ความต้านทาน และความต่างศักย์เอาท์พุท การกระโดดของสัญญาณเหล่านี้เรียกว่าบาร์ควอเซนน็อยส์ (Barkhausen noise) มันเป็นสิ่งจำเป็นอย่างมากที่จะต้องกำจัดฮิสเทอรีซิสและบาร์ควอเซนน็อยส์



รูป 2.9 การพล็อตของ Vertical demagnetizing field กับความลึก D และแสดงค่าเฉลี่ย

### 2.1.3 Magneto - Resistive Coefficient $\Delta\rho/\rho_0$

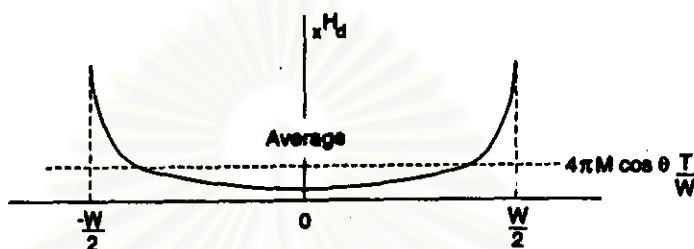
ความต้านทาน R ของ MRE ในเทอมของรีซิสติวิตี (Resistivity)  $\rho$  ของวัสดุคือ

$$R = \rho W / TD \quad (2.5)$$

ในวัสดุ Magneto - resistive

$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2\theta \quad (2.6)$$

เมื่อ  $\rho_0$  เป็นส่วนคงที่ และ  $\Delta\rho$  คือส่วนที่มีค่าสูงสุดของส่วนแปรผันของรีซิสติวิตี



รูป 2.10 การพล็อตของ Horizontal demagnetizing field กับความกว้างและแสดงค่าเฉลี่ย

ค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโท-รีซิสทีฟ (Magneto - resistive coefficient) คือ  $\Delta\rho/\rho_0$  และมันเป็นค่าสูงสุดของสัดส่วนการเปลี่ยนแปลงรีซิสติวิตี  $\Delta\rho/\rho_0$  มีค่าเท่ากับ  $\Delta R/R_0$

เพอแมลลอย (Permalloy) คือ ส่วนผสมของนิกเกิลและเหล็กในสัดส่วน 82Ni / 18Fe ค่าสัมประสิทธิ์แมกนีโท-รีซิสทีฟของเพอแมลลอยมีค่าประมาณ 4% ในฟิล์มที่มีความหนามากกว่า 1000 Å สำหรับฟิล์มบางค่าสัมประสิทธิ์ลดลง เนื่องจากการกระจายของอิเล็กตรอนที่ผิวมากขึ้น ซึ่งเป็นส่วนที่เพิ่มขึ้นของส่วนที่คงที่ของรีซิสติวิตี สำหรับฟิล์มบางหนา 200 - 300 Å ซึ่งใช้โดยส่วนมากในปัจจุบัน มีค่าสัมประสิทธิ์เพียง 2 %

#### 2.1.4 การไบอัสในแนวตั้ง (Vertical Bias Techniques)

การไบอัสในแนวตั้ง (Vertical bias) หรือในบางครั้งเรียกเพอเพนดิคิวลาร์ไบอัส (Perpendicular bias) ซึ่งมีอยู่หลายเทคนิค แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคนิคซอฟต์แวร์แอดเจซันท์เลเยอร์ (Soft Adjacent Layer) ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กับหัวอ่านเขียนแมกนีโทรีซิสทีฟของ IBM และหัวอ่านเขียนแมกนีโทรีซิสทีฟที่ใช้ในการทดลองของวิทยานิพนธ์นี้

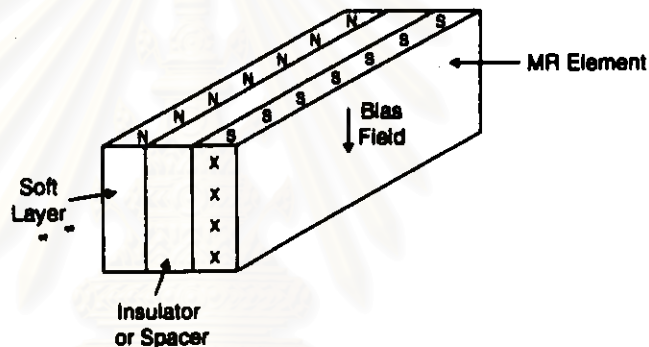
โครงสร้างของซอฟต์แวร์แอดเจซันท์เลเยอร์ (Soft Adjacent Layer Vertical bias) ได้แสดงไว้ในรูป 2.11 แผ่นฟิล์มทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็ก แต่มีโคเออร์ซิวิตีต่ำ และเพอมีบิลิตีสูง (High -



permeability) วางในตำแหน่งด้านข้าง โดยมีการชั้นด้วยฉนวน (Insulator) วางชั้นอยู่ตรงกลางระหว่าง MRE และ SAL

SAL ทำจากเฟอร์ไรต์ออย แต่บางแบบอาจใช้วัสดุอื่น อย่างเช่น  $\text{AlFeSi}$  หรือ  $\text{NiFeCr}$  ส่วนชั้นของฉนวนคือ  $\text{SiO}_2$  หรือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  หรือ Ta ซึ่งมีค่าความต้านทานสูง และนิยมใช้กันในปัจจุบัน รวมทั้งหัวอ่านเขียนที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

หลักการในการทำงานของ SAL ในการให้เวอร์ติคัลไบอัสมีดังนี้ กระแสที่ไหลผ่าน MRE จะทำให้เกิดการแมกนีไทเซชันในแนวดิ่ง โดยใช้กฎมือขวา ในรูป 2.11 กระแสที่ไหลผ่าน MRE เป็นสาเหตุทำให้เกิดสนามแม่เหล็กบน SAL ในทิศทางขึ้น การเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กใน SAL เกิดจาก  $\rho = -\nabla \cdot \mathbf{M}$  ของขั้วสนาม และขั้วสนามเหล่านี้ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กในแนวดิ่งทิศทางลงใน MRE

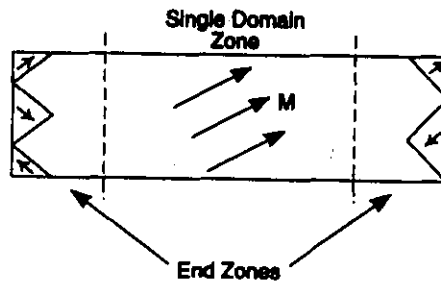


รูป 2.11 โครงสร้างของ SAL

### 2.1.5 เทคนิคการไบอัสในแนวนอน (Horizontal Biasing Techniques)

การไบอัสในแนวนอน เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับหัวอ่านเขียนแมกนีโทรีซิสทิฟ เพื่อให้สภาวะ Single-domain magnetization ของ MRE อยู่ในสภาวะเสถียรต่อสิ่งรบกวน สิ่งรบกวนเหล่านี้หมายถึง สนามแม่เหล็กภายนอก ความร้อน และความเค้นเชิงกล

ในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นว่าที่บริเวณปลายทั้งสองข้างของ MRE จะไม่อยู่ในสภาวะ Single Domain แต่สนามแม่เหล็กจะทำให้เกิดมัลติโดเมน (Multidomain) ขึ้น ถ้ามัลติโดเมนไม่เกิดขึ้นที่บริเวณด้านปลายทั้งสอง ดีแมกนีไทเซชันฟิลด์ที่บริเวณดังกล่าวจะมีค่าสูง ( $H_d \approx 47M_s \cos\theta$ ) ในความเป็นจริง Demagnetizing field ที่บริเวณปลายของ MRE มีค่าไม่สูงเนื่องจากเกิดโดเมนวอลชัน และเกิดสภาวะเป็นมัลติโดเมนขึ้น



รูปที่ 2.12 แสดงแมกนีโทริซิสที่ฟลักแมกนีโทซ์จะมี Single domain ที่บริเวณตรงกลางและจะมี Multi domain ที่บริเวณปลาย

หน้าที่ของฮอริซอนทอลไบอัส (Horizontal Bias) คือรักษาภาวะของโดเมนวอลที่ปลายทั้งสองของ MRE ให้อยู่หรือคงในตำแหน่งคงที่ เมื่อไรก็ตามโดเมนวอลเคลื่อนที่ในช่วงสั้น ๆ พวกมันเคลื่อนที่กลับไปมาเพื่อให้อยู่ในตำแหน่งภาวะสมดุล การเกิดการเคลื่อนที่ในลักษณะนี้ทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส ซึ่งก็คือวัสดุที่มีคุณสมบัติแม่เหล็กและมีโคเออซีวิตีต่ำ (low-coercivity)

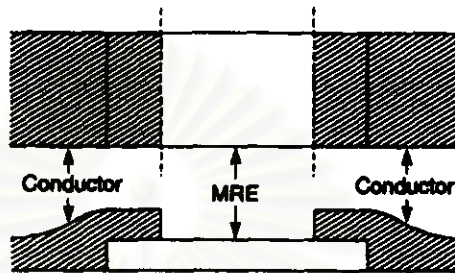
เมื่อฮอริซอนทอลไบอัสไม่เพียงพอที่จะคงโดเมนวอลที่บริเวณปลายทั้งสองข้างให้อยู่ในตำแหน่ง Domain wall จะเคลื่อนที่ในลักษณะกระโดด (Jumps) จะเปลี่ยน Demagnetizing field ใน MRE การที่ Single-Domain Magnetization กับมุมของกระแส และเปลี่ยนความต้านทานกับสนามแม่เหล็กภายนอกใน Characteristic curve เนื่องจากการกระโดดของโดเมนวอลทำให้เกิดฮิสเทอรีซิส ฮิสเทอรีซิสในกราฟดังกล่าว หมายถึง กราฟความต้านทานขณะเพิ่มสนามแม่เหล็กไม่เหมือนกับกราฟความต้านทานขณะลดสนามแม่เหล็ก

เทคนิคในการสร้าง Horizontal bias เพื่อที่จะลดผลที่เกิดจากโดเมนวอลที่อยู่ในภาวะไม่เสถียรที่ด้านปลายทั้งสองข้างของ MRE วิธีการเหล่านี้มีดังนี้

#### 2.1.6 การเคลือบด้วยวัสดุนำไฟฟ้า (Conductor Overcoat)

วิธีการนี้เป็นวิธีการที่ง่ายที่สุด ซึ่งแสดงในรูป 2.13 MRE จะถูกสร้างให้กว้างขึ้นมากกว่าความกว้างของแทร็ก (Track width)  $W$  ดังนั้นที่บริเวณปลายทั้งสองของ MRE จะไม่เกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานด้วยกระแสที่ขึ้นเกิดจากสนามแม่เหล็กภายนอก ในรูปที่ 2.13 ส่วนบริเวณด้านปลายทั้งสองจะถูกเคลือบคลุมด้วยความหนาพอเพียงของชั้นวัสดุนำไฟฟ้า โดยไม่ให้มีกระแสไหลผ่านที่บริเวณด้านปลายทั้งสองข้าง ดังนั้นบริเวณด้านปลายทั้งสองไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับสัญญาณเอาท์พุทของ MRH

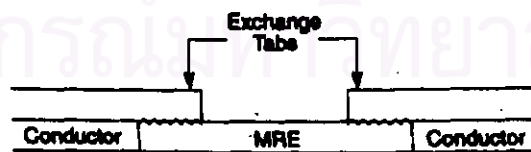
ยิ่งไปกว่านั้น หัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟในดิสก์ไดรฟ์ (Disk Drives) จะใช้สัญญาณของกระแสที่บริเวณตรงกลางของ MRE เป็นตัวตรวจจับสัญญาณ ดังนั้นผลกระทบจากสภาวะไม่เสถียรของโดเมนวอลต์มีผลน้อยมาก มีความคิดอีกอันหนึ่งก็คือการลดความหนาที่บริเวณปลายทั้งสองข้าง การทำให้บางลงเป็นการเพิ่มโคเออร์ซิวิตีของฟิล์ม และช่วยในการสร้างโดเมนวอลต์



รูป 2.13 แสดงการเคลือบวัสดุนำไฟฟ้าบนแมกนีโทริซิสทีฟ

### 2.1.7 เอ็กซ์เชนจ์ แท็บ (Exchange Tabs)

เอ็กซ์เชนจ์ แท็บ เป็นอีกวิธีการหนึ่งในการสร้างโดเมนวอลต์ที่บริเวณปลายทั้งสอง ในรูป 2.14 เมื่อมีสนามแม่เหล็กที่เพียงพอกจากเอ็กซ์เชนจ์ แท็บ ซึ่งจะทำหน้าที่อยู่สองอย่างคือ ประการแรก ทำการสร้างโดเมนวอลต์ที่บริเวณปลายทั้งสองของ MRE และไม่มีฮิสเทอรีซิสเกิดขึ้น ในกราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงความต้านทานกับสนามแม่เหล็กภายนอก ประการที่สอง ถึงแม้ว่ามีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน MRE ภายใต้อเอ็กซ์เชนจ์ แท็บ แต่ไม่มีสัญญาณการเปลี่ยนความต้านทานเนื่องจากสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น เพราะว่าแมกนีโทเซชันกับมุมของกระแสไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในบริเวณที่โดเมนวอลต์ถูกสร้างไว้



รูป 2.14 โครงสร้างของเอ็กซ์เชนจ์ แท็บ

ได้มีการใช้เอ็กซ์เชนจ์ แท็บ จาก MnFe ในผลิตภัณฑ์ดิสก์ไดรฟ์สองรุ่นแรกของ IBM ที่ชื่อ "Sawmill" และ "Corsair"

### 2.1.8 ฮาร์ดฟิล์ม (Hard films)

รูปที่ 2.15 อธิบายถึงอีกวิธีการหนึ่งที่จะทำการเรียงแมกนีไทเซชันที่บริเวณด้านปลายทั้งสอง โดยใช้ฟิล์มของวัสดุที่มีค่าโคเออร์ซิวิตีสูงวางชิดกับปลายทั้งสองข้างของ MRE ดังรูป เราสามารถทำความเข้าใจว่ามันทำงานได้มีอยู่สองทาง ประการแรกโดยการจัดให้มีฟลักซ์ (flux) สนามแม่เหล็ก — ( $B_y \cos \theta_{TD}$ ) ไหลภายใน MRE เท่ากับฟลักซ์สนามแม่เหล็กที่ไหลผ่านฮาร์ดฟิล์ม ซึ่งเราจะเห็นว่าเนื่องจากไม่มีขั้วสนามแม่เหล็กอยู่ที่บริเวณรอยต่อทำให้ดีแมกนีไทเซชันฟิล์มที่บริเวณปลายหายไป ในอีกทางหนึ่งเราสามารถจินตนาการได้ว่า ขั้วแม่เหล็กที่บริเวณปลายของฮาร์ดฟิล์มสร้างฮอริซอนทอลไบอัสที่เพียงพอใน MRE

ในรูปที่ 2.15 ความกว้างของแตรีก ถูกกำหนดด้วยตัวนำไฟฟ้า (conductor)

ฮาร์ดฟิล์ม ฮอริซอนทอล ไบอัส ได้ถูกนำมาใช้แทนที่เอ็กซ์เซนไบอัสในรุ่นต่อมาของ IBM ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เช่น "Allicat", "Spitfire", "Starfire" และ "Ultra"

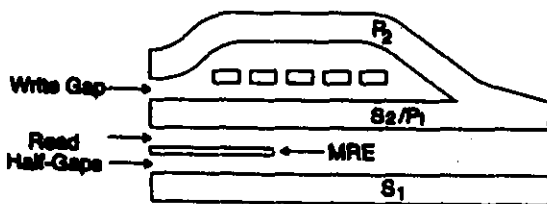


รูปที่ 2.15 โครงสร้างของฮาร์ดฟิล์ม

### 2.1.9 การออกแบบชนิดของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ (Shield MRH Designs)

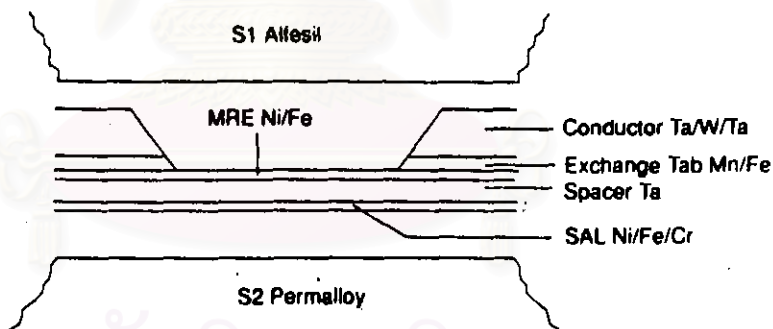
การออกแบบชนิด (Shield) ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ อันแรกได้ทำการออกแบบให้ ส่วนของแมกนีโทริซิสทีฟ และ โครงสร้างของสนามแม่เหล็กในการไบอัสอยู่ระหว่างตรงกลางของหัวบันทึก (Writing head) คืออยู่ระหว่าง P1 และ P2

แต่การออกแบบในสมัยแรกนั้น พบว่าเป็นไปไม่ได้ที่จะรักษาอินิทิยัลไลเซชัน (Initialization) ของส่วนของแมกนีโทริซิสทีฟ สนามแม่เหล็กจากหัวบันทึกที่รบกวนสถานะแมกนีไทเซชัน ซึ่งปกติสนามแม่เหล็กจากหัวบันทึกจะมีค่าสูงเท่ากับของโคเออร์ซิวิตีของแผ่นดิสก์ที่ใช้บันทึกข้อมูล



รูปที่ 2.16 ภาพตัดขวางของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ ซึ่งเกิดจากการรวมหัวอ่านเขียนอินดักทีฟและ โครงสร้างขั้วของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ

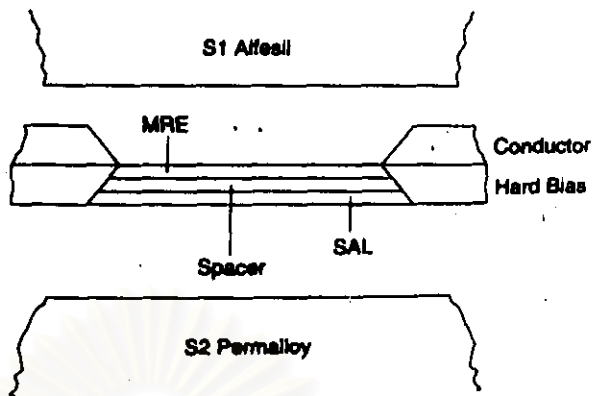
แนวความคิดต่อมา คือทำการแยกสองส่วนนี้ออกจากกัน คือการแยก P1 และ P2 ออกจากหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟชนิด S1 และ S2 ซึ่งเป็นการแยกสนามแม่เหล็กออกจากกันได้เป็นอย่างดีระหว่างสนามแม่เหล็กที่ใช้ในการบันทึกที่มีค่าสูงและส่วนของแมกนีโทริซิสทีฟ โครงสร้างเหล่านี้ อ้างอิงถึง Piggyback



รูป 2.17 โครงสร้างของ SAL-biased ซึ่งใช้เอ็กซ์เชน แท๊ป

ต่อมาพบว่า การแยกหัวอ่านบันทึกออกจากหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ โดยใช้หัวสนามร่วมกัน โดยใช้ S2 และ P1 ร่วมกัน ซึ่งแสดงในรูป 2.16

ในรูป 2.17 เป็นโครงสร้างที่ใช้กับ IBM ไดรฟ์ที่ชื่อ "Corsair" ซึ่งใช้เอ็กซ์เชน แท๊ปสำหรับฮอริซอนทอลไบอัส และใช้ SAL สำหรับเวอติคัลไบอัส ชั้นของ SAL ทำจาก Ni/Fe/Cr ซึ่งเป็นอัลลอยที่มีความต้านทานสูงกว่าพอมัลลอย ส่วนชั้นฉนวนใช้วัสดุที่มีความต้านทานสูง ในที่นี้ใช้แทนทาลัม ส่วนชั้นตัวนำไฟฟ้าต้องการความต้านทานต่ำ ในที่นี้ ใช้ทังสเตน



รูป 2.18 โครงสร้างของ SAL-biased ซึ่งใช้ฮาร์ดไบอัส

รูป 2.18 แสดงโครงสร้างในรุ่นต่อมาของ IBM คิสก์ไดรฟ์ เช่น “Allicar”, “Spitfire” และ “Starfire” ในรุ่นเหล่านี้ใช้ฮาร์ด-ฟิล์ม วางประกบชนิดด้านทั้งสองของ MRE และ SAL วิธีการนี้ Domain wall ทั้งสองส่วนของ MRE และ SAL จะถูกควบคุมด้วยฮาร์ดฟิล์ม ไบอัส

## 2.2 อิเล็กโทรไมเกรชันในฟิล์มบาง (Electromigration in thin films) [3]

อิเล็กโทรไมเกรชันเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในแผ่นฟิล์มโลหะบาง ทำให้เกิดการเคลื่อนย้ายมวลสารของวัสดุ (Material Transportation) อันเป็นผลมาจากการผ่านของกระแสไฟฟ้าตรง และมีปฏิสัมพันธ์กับอะตอมของแผ่นฟิล์มโลหะบาง การเปลี่ยนแปลงมวลสารจะเกิดขึ้นที่บริเวณเกรนบาวนด์ (Grain boundary) ของฟิล์มโลหะบาง ในอิเล็กโทรไมเกรชัน แรงกระทำ (Driving Force) ที่เกิดขึ้นมีผลจากสองสาเหตุรวมกันคือ

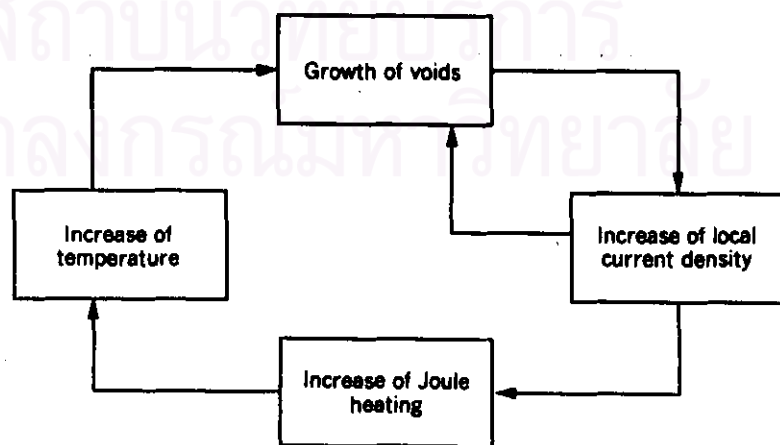
1. ไฟฟ้าสถิตย์ที่เป็นปฏิริยาระหว่างสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากับประจุของอะตอมและอิเล็กตรอน
2. แรงเสียดทาน (Friction Force) ระหว่างประจุของอะตอมเหล่านี้และการไหลของประจุซึ่งมักจะเรียกว่า “Electron Wind Force”

อิเล็กโทรไมเกรชันไม่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะของกระแสไฟฟ้าสลับ เพราะไม่เกิดการย้ายมวลสารเนื่องจากการสลับไปมาของทิศทาง สำหรับกระแสไฟฟ้าตรงที่มีความหนาแน่นของกระแสต่ำสามารถที่จะละเลยเกี่ยวกับอิเล็กโทรไมเกรชันได้ แต่ในปัจจุบันในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์และ

คอมพิวเตอร์ใช้ฟิล์มโลหะบางเป็นคัมพา และใช้ความหนาแน่นกระแสที่สูงกว่า 100 ถึง 1000 เท่ากว่า ความหนาแน่นปกติ ภาสได้สภาวะของอิเล็กโทรไมเกรชันสามารถทำให้เกิดความเสียหายอย่างมากกับฟิล์มบาง โดยทำให้เกิดโพรงภายในแผ่นฟิล์ม จนกระทั่งเป็นรอยแตกออกจากกัน ทำให้เกิดการประลัดในสภาพของความเป็นคัมพา

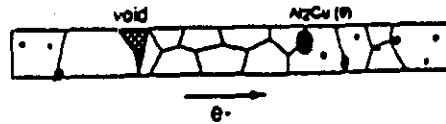
ความสนใจในการศึกษาเรื่องอิเล็กโทรไมเกรชันเริ่มจากประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา หลังจาก Blech and Sello สังเกตเห็นอิเล็กโทรไมเกรชันในแผ่นฟิล์มบางอลูมิเนียมที่เป็นคัมพา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำให้แผงวงจรในเซมิคอนดักเตอร์ประลัด การค้นพบดังกล่าวอยู่ในช่วงที่กำลังสนใจเกี่ยวกับปรากฏการณ์อิเล็กโทรไมเกรชัน

กระบวนการเร่งด้วยความร้อน (Accelerating process) อ้างอิงถึงกระบวนการเร่งของการเสื่อมสภาพหรือเสียหายของอิเล็กโทรไมเกรชัน เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิเฉพาะถิ่น (local temperature rising) การกระจายความร้อนแบบสุ่มฟอรัมของแผ่นฟิล์มนำไฟฟ้าเป็นไปได้ในช่วงก่อนที่จะเกิดความเสียหายจากอิเล็กโทรไมเกรชันเกิดขึ้น เมื่อเกิดโพรง (Void) ภายในแผ่นฟิล์มนำไฟฟ้าเป็นสาเหตุให้ความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้า (Current density) เพิ่มขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ โพรง เนื่องจากโพรงดังกล่าวเป็นจุดลัดที่หน้าคักของแผ่นฟิล์มนำไฟฟ้า การเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าเป็นผลให้อุณหภูมิเฉพาะถิ่นสูงขึ้นที่บริเวณรอบ ๆ โพรง ซึ่งเป็นตัวเร่งให้โพรงมีขนาดใหญ่อขึ้น กระบวนการทั้งหมดนี้จะต่อเนื่องจนกระทั่งโพรงมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้แผ่นฟิล์มนำไฟฟ้าขาดจากกัน ซึ่งเรียกว่า เทอร์มอลรัน-อเวย์ (Thermal run-away) [4] กระบวนการนี้สามารถอธิบายได้โดยใช้วงจรป้อนกลับทางบวก (Positive feedback cycle) ในรูปที่ 2.19 เมื่อการกระจายความร้อนของแผ่นซับสเตรท (Substrate) ไม่ดี หรืออยู่ภายใต้สภาวะที่มีการไบอัส ความหนาแน่นกระแสสูงมาก เทอร์มอลรัน-อเวย์มักจะเป็นส่วนสำคัญของกลไกการประลัดของอิเล็กโทรไมเกรชัน



รูป 2.19 แสดงวงจรเทอร์มอลแอ็คเซอเรชันระหว่างการเกิดอิเล็กโทรไมเกรชัน

รูปที่ 2.20 แสดงการเกิดโพรงภายในฟิล์มบาง Al-Cu อันเนื่องมาจากอิเล็กโทรไมเกรชัน



รูป 2.20 แสดงลักษณะการประลัยของอิเล็กโทรไมเกรชันในฟิล์มบาง Al - Cu

การพัฒนาการทดสอบและเทคนิคในการวัด เพื่อให้ได้วิธีการวัดคุณภาพเชิงปริมาณ ซึ่งประสบความสำเร็จเป็นอย่างดีกับฟิล์มบางบริสุทธิ์และฟิล์มบางออสลอย ในที่นี้จะสนใจการนำโมเดลของอาร์เธียเนียสมาทำนายอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์

2.3 โมเดลการเร่งทางกายภาพ (Physical Acceleration Models) [ 6 ]

ในกรณีที่เรามีข้อมูลการทดสอบที่เพียงพอ วิธีการทางสถิติทำให้สามารถหาโมเดลที่เหมาะสมของการกระจายของอายุ (Life distribution model) และสามารถประเมินตัวแปรที่ไม่ทราบได้ อย่างไรก็ตามในปัจจุบัน บ่อยครั้งที่ไม่สามารถได้รับข้อมูลการทดสอบที่เชื่อถือได้เมื่อใช้สภาวะปกติที่เหมาะสม ดังนั้นจึงมีการบังคับส่วนประกอบต่าง ๆ ให้ประลัยโดยการทดสอบที่สภาวะที่สูงกว่าที่ดึงไว้ การทดสอบด้วยวิธีนี้จะได้ข้อมูลที่ประลัย ซึ่งสามารถถูกทำให้สอดคล้องกับ โมเดลการกระจายของอายุ (Life distribution models) โดยสัมพันธ์กับขนาดตัวอย่างการทดสอบขนาดเล็กและเวลาการทดสอบที่เหมาะสม ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในการทดสอบลงได้

แบบโครงสร้างที่ใช้ในโมเดลการเร่ง (Acceleration models) ในการทดสอบความเร่ง (acceleration testing) ได้ถูกอธิบายไว้ ได้แก่ อาร์เธียเนียสโมเดล (Arrhenius model)

ความคิด (concept) พื้นฐานของการเร่ง (Acceleration) นั้นง่าย เราตั้งสมมติฐานว่า ส่วนประกอบอย่างหนึ่ง การปฏิบัติภายใต้ระดับที่ถูกต้องของการเพิ่มแรงกดดันจะมีการประลัยที่เหมือนกันอย่างแน่นอนกับเมื่อใช้แรงกดดันปกติ ความแตกต่างเพียงสิ่งเดียวคือ เวลาที่ทำให้เกิดขึ้นเร็วกว่า ตัวอย่างเช่น ถ้าการประลัยด้วยการสึกกร่อน (corrosion failures) เกิดขึ้นที่อุณหภูมิและความชื้นที่



มาตรฐานที่ใช้ ดังนั้นการสึกกร่อน (corrosion) แบบเดียวกันจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วกว่าในเคาห้องปฏิบัติการที่ชื้นและอุณหภูมิสูงขึ้น

ในอีกทงหนึ่ง การประลัยที่เกิดขึ้นภายใต้ความกดดันสูง เหมือนกับการประลัยที่เกิดขึ้นในสภาวะปกติ โดยที่กลไกของการประลัยที่เกิดขึ้นทางเคมีและฟิสิกส์ถูกทำให้เกิดเร็วขึ้น ดังนั้น เป็นช่วงเวลาของการวัดที่ถูกเปลี่ยนไป

เมื่อสามารถหาช่วงของค่าความกดดัน จากสมมติฐานนี้ สามารถเรียกว่าเป็นทวูแอ็คเซอเรชัน (True acceleration) จากเหตุผลดังกล่าวทวูแอ็คเซอเรชันเป็นเพียงการเปลี่ยนรูปของสเกลเวลา ดังนั้น ถ้าทราบช่วงสเกลเวลาที่เหมาะสม ก็สามารถเปลี่ยนรูปไปสู่สภาวะความกดดันที่ต่ำกว่า โดยใช้คณิตศาสตร์ในการหาอัตราการประลัยและการกระจายข้อมูลของอายุที่สภาวะกดดันที่ต่ำกว่า

ในทางทฤษฎีการเปลี่ยนรูปพฤติกรรมต่าง ๆ สามารถเป็นรูปโครงสร้างหนึ่งสำหรับทวูแอ็คเซอเรชัน อย่างไรก็ตามในทอมของการประยุกต์ จะควบคุมตัวค่าคงที่ที่เพิ่มทวีคูณของสเกลเวลา เมื่อทุก ๆ เวลาของการประลัยและทุก ๆ การกระจายเปอร์เซนต์ไทล์ ถูกเพิ่มทวีคูณโดยค่าคงที่ที่เหมือนกัน แล้วได้รับผลการวิจัยที่ความกดดันอีกระดับหนึ่ง จะได้ความเร่งแบบเส้นตรง ภายใต้สมมติฐานความเร่งแบบเส้นตรง จะได้ความสัมพันธ์คือเวลาประลัยที่ความกดดัน

$$S_1 = AF \times \text{เวลาประลัยที่ความกดดัน } S_2 \quad (2.7)$$

โดยที่  $AF$  คือ ค่าคงที่การเร่งซึ่งสัมพันธ์กับเวลาที่ประลัยที่ความกดดัน 2 แบบ  
 $AF$  ถูกเรียกแทนปัจจัยของการเร่งระหว่างความกดดัน

ถ้าเราให้  $S_1, S_2, \dots$  แทนความกดดันระดับต่าง ๆ ในห้องทดลอง  
 $U$  คือ ระดับความกดดันในการใช้งาน

ในตารางที่ 2.1

$t_1$  แทนเวลาที่ประลัยที่สภาวะการใช้งานปกติ

$t_2$  แทนเวลาที่เกิดการประลัยที่เหมือนกัน ในสภาวะความกดดันที่สูงกว่า

$F_U, f_u$  และ  $h_u$  คือ ฟังก์ชันการกระจายสะสม (Cumulative Distribution Function ; CDF) ,

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function ; PDF) และ อัตราการประลัย (Failure rate) ที่สภาวะใช้งานปกติ ตามลำดับ

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ทั่วไปของลิเนียร์แอ็คเซอติเรชัน (General Linear Acceleration Relationships)

1. Time to fail	$t_s = AF X t$
2. Failure probability	$F_U = F_s(t/AF)$
3. Density function	$f_s(t) = (1/AF) f_s(t/AF)$
4. Failure rate	$h_s(t) = (1/AF) h_s(t/AF)$

สมการที่ 1 ของตารางที่ 2.1 คือสมมติฐานลิเนียร์แอ็คเซอติเรชัน และสมการอื่น ๆ จะมีความหมายตามตัวแปรต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในสมการนั้น ๆ ตัวอย่างเช่น  $F_U(t)$  คือความน่าจะเป็นของการประลัยที่เวลา  $t$  ในสภาวะการใช้งานปกติ ซึ่งเท่ากับว่า การประลัยที่เวลาที่เท่ากับ  $(t/AF)$  ในสภาวะกดดัน (ตามสมการที่ 1) ความสัมพันธ์ถูกกำหนดไว้ในสมการที่ 2 และ สองสมการถัดมาเป็นผลเนื่องมาจากมาตรฐานการเปลี่ยนของวิธีการเปลี่ยนตัวแปร (Standard changes of variable methods)

ในตารางที่ 2.1 กล่าวถึงกฎทางคณิตศาสตร์ของความสัมพันธ์ CDF และ อัตราการประลัย จากความกดดันหนึ่งไปยังอีกความกดดันหนึ่ง กฎเหล่านี้เป็นหลักทั่วไปซึ่งสมบูรณ์ และขึ้นอยู่กับสมมติฐานของแอ็คเซอติเรชัน และองค์ประกอบของลิเนียร์แอ็คเซอติเรชัน

#### 2.4 อาร์ฮีเนียสโมเดล (Arrhenius model) [ 6 ]

เมื่อความกดดันทางอุณหภูมิมีความสำคัญ ซึ่งเป็นรูปแบบโครงสร้างชนิดหนึ่งที่ได้จากประตบการณ หรือการทดลองหรือการสังเกตโดยไม้อาศัยวิทยาศาสตร์หรือทฤษฎี ซึ่งรู้จักกันในชื่อ อาร์ฮีเนียสโมเดล (Arrhenius model) รูปแบบโครงสร้างนี้ถูกใช้และประสบความสำเร็จอย่างมาก รูปแบบของโครงสร้างนี้มีรูปแบบดังนี้

$$t_{50} = A e^{\Delta H/RT} \quad (2.8)$$

โดยที่

- $t_{50}$  = เวลาที่ 50% ของประชากรตัวอย่างเกิดการประลัย
- $A$  และ  $\Delta H$  = ค่าคงที่ที่ไม่ทราบค่า (unknown constant)
- $k$  = ค่าคงที่ของโบลท์ซมาน (Boltzmann's constant)
- $T$  = อุณหภูมิในหน่วยของเคลวิน (Kelvin) ณ ตำแหน่งของอุปกรณ์เกิดการประลัย

ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์วงจรรวม (Integrated circuits) ถูกทดสอบในอุปกรณ์ (เช่นตู้ทำความร้อน) จำนวนอุณหภูมิภายใน (เรียกว่า "junction") ของอุปกรณ์ (device) รวมกับความร้อนจากตัวเองที่เพิ่มขึ้นโดยการสลายพลังงานของอุปกรณ์ [ดู Tummala and Rymaszewski, 1989 สำหรับการอภิปรายในเรื่องการพิจารณาอุณหภูมิในไมโครอิเล็กทรอนิกส์แพคเกจจิ้ง (microelectronic packaging)] Boltzmann's constant มีค่าเท่ากับ  $8.617 \times 10^{-5}$  ในหน่วย eV/K หรือ  $1.380 \times 10^{-16}$  ในหน่วย erg/K อุณหภูมิในหน่วยองศาเคลวินคิดได้จากการรวมค่า 273.16 กับอุณหภูมิในหน่วยองศาเซลเซียส

ตัวแปร  $\Delta H$  มีบทบาทสำคัญในการกำหนดอุณหภูมิในการแอ็คเซลิเรชัน (temperature acceleration) บางครั้ง  $\Delta H$  ถูกกล่าวถึงเหมือนแอ็คติเวชันเอนเนอจี้ (activation energy;  $E_A$ ) และค่าของมันขึ้นอยู่กับกลไกการประลัย (failure mechanism) ในอีกทางหนึ่ง  $E_A$  ถูกใช้บ่งแทน  $\Delta H$  ในสิ่งตีพิมพ์ที่น่าเชื่อถือ แสดงว่าเราสามารถเขียนอาร์เรเนียนิสโมเดลในรูปแบบ หรือ เปอร์เซนต์ไทล์ของการกระจายช่วงอายุ (life distribution) ตามที่เราต้องการ ค่าคงที่ A จะเปลี่ยนแปลง แต่ตามที่เรากำหนดค่าคงที่นี้ไม่มีผลต่อปัจจัยการแอ็คเซลิเรชัน (acceleration factor) เพื่อเป็นการสะดวก เราจะใช้ค่า  $t_{50}$  ใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับการทำนายอายุของผลิตภัณฑ์

เราแก้ปัญหาสำหรับปัจจัยการแอ็คเซลิเรชัน (Acceleration Factor; AF) ระหว่างอุณหภูมิ  $T_1$  และ  $T_2$  โดยใช้อัตราส่วนของเวลาซึ่งใช้เพื่อบรรลุถึงฟังก์ชันการกระจายสะสมแบบเปอร์เซนต์ไทล์อื่น ๆ ในอีกทางหนึ่ง ปัจจัยการแอ็คเซลิเรชัน (Acceleration Factor; AF) ระหว่างความกดดัน 1 และ 2 ถูกอธิบายเป็นอัตราส่วนของเวลาซึ่งใช้เพื่อบรรลุถึงอัตราการประลัยที่ความกดดัน 1 หากด้วยเวลาที่นำไปเพื่อบรรลุถึงอัตราการประลัยที่ความกดดัน 2 ข้อสมมติฐานของทฤษฎีแอ็คเซลิเรชัน ทำให้ปัจจัยนี้เหมือนกันสำหรับทุก ๆ เปอร์เซนต์ไทล์ การใช้อาร์เรเนียนิสโมเดล และ  $t_{50}$  เป็นดังนี้

$$AF = \frac{t_{50_1}(\text{at } T_1)}{t_{50_2}(\text{at } T_2)} = \frac{Ae^{\frac{\Delta H}{kT_1}}}{Ae^{\frac{\Delta H}{kT_2}}} \quad (2.9)$$

จะได้

$$AF = e^{\frac{\Delta H}{k} \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)} \quad (2.10)$$

ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า การรู้ค่า  $\Delta H$  เพียงค่าเดียวก็จะทำให้คำนวณปัจจัยการแอ็คเซลิเรชัน

ระหว่างอุณหภูมิ 2 ค่าใด ๆ ได้ ในทางตรงข้าม ถ้าเราทราบค่าปัจจัยการแอ็คเซอติเวชัน (acceleration factor) ก็สามารถคำนวณ  $\Delta H$  ได้ดังนี้

$$\Delta H = \frac{k \ln \left( \frac{t_{90_1}}{t_{90_2}} \right)}{\left( \frac{1}{T_1} \right) - \left( \frac{1}{T_2} \right)} = \frac{k \ln (AF)}{\left( \frac{1}{T_1} \right) - \left( \frac{1}{T_2} \right)} \quad (2.11)$$

สมการชุดนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการประมาณค่า  $\Delta H$  จากกลุ่มของข้อมูลการทดลองของเวลาขึ้นทดสอบประตัยที่อุณหภูมิ  $T_1$  และขึ้นทดสอบประตัยที่อุณหภูมิ  $T_2$  ทั้งหมดนี้เราต้องทำเพื่อประมาณเปอร์เซ็นต์ไทด์ เช่น  $t_{90}$  ในแต่ละกลุ่ม ค่อมานแทนอัตราส่วนของเวลาและสมการที่ได้ประมาณค่า  $\Delta H$  วิธีการนี้จะถูกต้องสำหรับการกระจายอายุใด ๆ

## 2.5 การวิเคราะห์การถดถอย [7]

การถดถอยเป็นเทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการหาสมการเส้นตรงหรือเส้นโค้ง สมการเหล่านี้จะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรสองประเภท คือ ตัวแปรตาม (Dependent Variable) หนึ่งตัวและตัวแปรอิสระ (Independent Variable) อีกตัวหนึ่ง หรือมากกว่า สมการที่ได้จากเทคนิคดังกล่าวจะแสดงว่าตัวแปรตามจะมีการผันแปรตามตัวแปรอิสระที่ผู้วิเคราะห์เลือกใช้อย่างไร

การวิเคราะห์การถดถอยแบ่งได้เป็นสองประเภทใหญ่ๆ คือ การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหนึ่ง ตัวเช่น แด้มเฉลี่ยสะสมของนิสิตแปรตามคะแนนจากการสอบแต่ละภาคการศึกษา หรือ น้ำหนักจะแปรตามความสูง เป็นต้น และ การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระตั้งแต่สองตัวขึ้นไป เช่น ยอดการขายสินค้าแปรตามการโฆษณาทางวิทยุ ทางหนังสือพิมพ์ และทางโทรทัศน์ เป็นต้น

### 2.5.1 การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)

การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย เป็นการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหนึ่งตัว โดยที่ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเป็นเส้นตรง ตัวอย่างเช่น การหาความสัมพันธ์ระหว่างแต้มสะสมเฉลี่ยกับคะแนนสอบในแต่ละภาคการศึกษา

$$\begin{aligned} \text{ถ้าให้ } x_i &= \text{คะแนนสอบของนิสิตคนที่ } i \\ y_i &= \text{แต้มเฉลี่ยสะสมของนิสิตคนที่ } i \end{aligned}$$

ดังนั้นถ้ามีนิสิต  $n$  คน เราจะได้ข้อมูล  $n$  คู่ คือ  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$

จากความเป็นจริงว่าแต้มเฉลี่ยสะสมของนิสิตจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อผลการสอบเปลี่ยนไป นั่นคือ  $x$  เป็นตัวแปรอิสระและ  $y$  เป็นตัวแปรตามซึ่งอาจเขียนความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรทั้งสองได้เป็น

$$y = f(x)$$

ถ้า  $f(x)$  เป็นสมการเส้นตรง

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2.12)$$

โดยที่  $\beta_0$  คือค่าที่เท่ากับจุดตัดบนแกน  $y$  เมื่อกำหนดให้  $x=0$  และ  $\beta_1$  เป็นความชันของเส้นตรง

ดังนั้นทุกๆ คู่ของข้อมูลจะมีความสัมพันธ์ดังกล่าวด้วย นั่นคือ

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i \quad i = 1, 2, \dots, n$$

โดยที่  $n$  เท่ากับจำนวนคู่ของข้อมูลที่เราต้องการเก็บ

รูปแบบของสมการที่ 2.12 เรียกว่า Deterministic Mathematical Model นั่นคือ ที่ค่าใดๆ ของ  $x$  ซึ่งเป็นตัวแปรอิสระ เราจะหาค่าของ  $y$  ซึ่งแปรตาม  $x$  ได้ทุกๆค่า แต่ในการวิเคราะห์ทางสถิติใดๆ ซึ่งการวิเคราะห์จะต้องอาศัยข้อมูลจริงนั้น เป็นที่ยอมรับกันว่าการที่จะได้ข้อมูลที่ไม่มีควมผิดพลาดเลยนั้นเป็นไปได้ยาก ผลจากการที่ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์จะมีความผิดพลาดอยู่ร่วมด้วยเสมอทำให้สมการ

ถดถอยเชิงเส้นตรงซึ่งแต่เดิมเป็น  $y = \beta_0 + \beta_1 x$  ไม่อาจผ่านข้อมูลทุกค่า นั่นคือจะมีข้อมูลบางตัวที่ไม่ตกอยู่บนเส้นตรงของสมการ ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่าง  $x$  กับ  $y$  จะเป็น

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + e \quad (2.13)$$

ความสัมพันธ์แบบสมการที่ 2.13 เรียกว่า Probabilistic Mathematical Model ซึ่งมีสมมติฐานดังนี้

1.  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  เป็นค่าคงที่ของสมการเส้นตรง
2.  $y$  เป็นตัวแปรตามซึ่งมีความสัมพันธ์กับ  $x$  ในรูปของสมการเส้นตรง
3.  $e$  คือค่าของความแตกต่างของ  $y$  ที่เกิดขึ้นจริงกับ  $y$  บนเส้นถดถอย นั่นคือ  $e = y - \hat{y}$  โดยที่  $\hat{y}$  คือค่าของ  $y$  บนเส้นถดถอย
4. ค่าของ  $e$  เป็นอิสระแก่กัน กล่าวคือ ความเบี่ยงเบนออกจากเส้นถดถอยของข้อมูลตัวหนึ่ง ไม่มีผลต่อความเบี่ยงเบนของข้อมูลตัวอื่นๆ โดยที่ค่าเฉลี่ยของ  $e$  เท่ากับ 0 และความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma_e^2$
5. ความเบี่ยงเบน  $e$  มีลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นแบบนอร์มอล

ถ้ากำหนดให้  $y|_x$  ค่าของ  $y$  เมื่อ  $x$  มีค่าใดๆ

$$\mu_{y|_x} \text{ ค่าเฉลี่ยของ } y \text{ เมื่อ } x \text{ มีค่าใดๆ}$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \mu_{y|_x} &= E(y|_x) \\ &= E(\beta_0 + \beta_1 x + e) \\ &= E(\beta_0 + \beta_1 x) + E(e) \\ &= \beta_0 + \beta_1 x + 0 \\ &= \beta_0 + \beta_1 x \end{aligned} \quad (2.14)$$

สมการ  $\mu_{y|_x} = \beta_0 + \beta_1 x$  เรียกว่าสมการเส้นถดถอยของ  $y$  บน  $x$  สมการนี้จะแทนค่าความสัมพันธ์เฉลี่ยระหว่าง  $x$  และ  $y$  ในประชากร

$$\beta_0 = \text{จุดตัดบนแกน } y \text{ มีค่าเท่ากับ } E(y) \text{ เมื่อ } x=0$$

$\beta_1$  = ความชันของเส้นถดถอย มีความหมายว่าค่าของ  $y$  จะเปลี่ยนไป  $= E(y)$  เมื่อ  $x$  เปลี่ยนไป 1 หน่วย

$\beta_0$  และ  $\beta_1$  เรียกว่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของประชากร (Population Regression Coefficients)

จากรูปที่ 2.21 และ 2.22 แสดงให้เห็นสมมติฐานของการถดถอยเชิงเส้นอย่างง่ายคือ

1. ค่าเฉลี่ยของประชากร (Population Mean) จะอยู่บนเส้นตรง  $\mu_{y|x} = \beta_0 + \beta_1 x$
2. ความแปรปรวนของความเบี่ยงเบน (คือ  $\sigma^2_{y|x} = \sigma^2_e$ ) มีค่าคงที่ไม่ว่า  $x$  จะมีค่าใดๆ

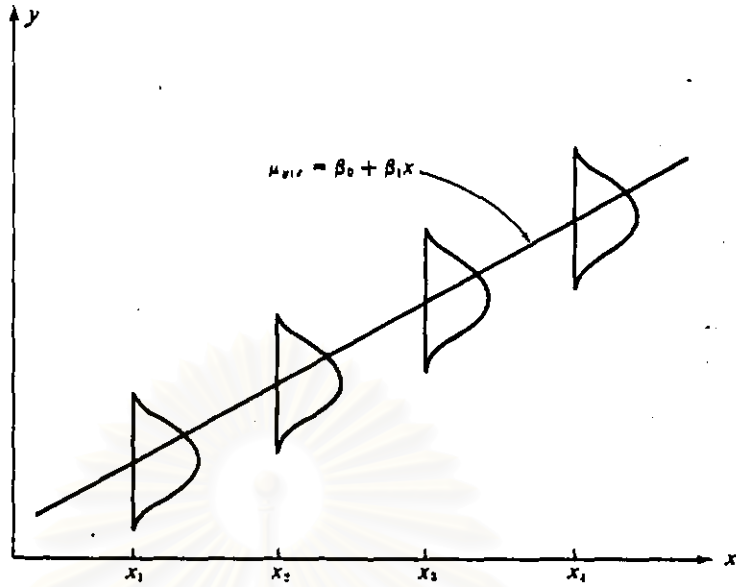
ลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นของ  $e$  เป็นการกระจายแบบนอร์มอล นั่นคือ ลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นของ  $y$  เป็นการกระจายแบบนอร์มอลที่มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $\beta_0 + \beta_1 x$  และความแปรปรวนเท่ากับ  $\sigma^2_e$

### 2.5.2 การคำนวณหาค่า $\beta_0, \beta_1$

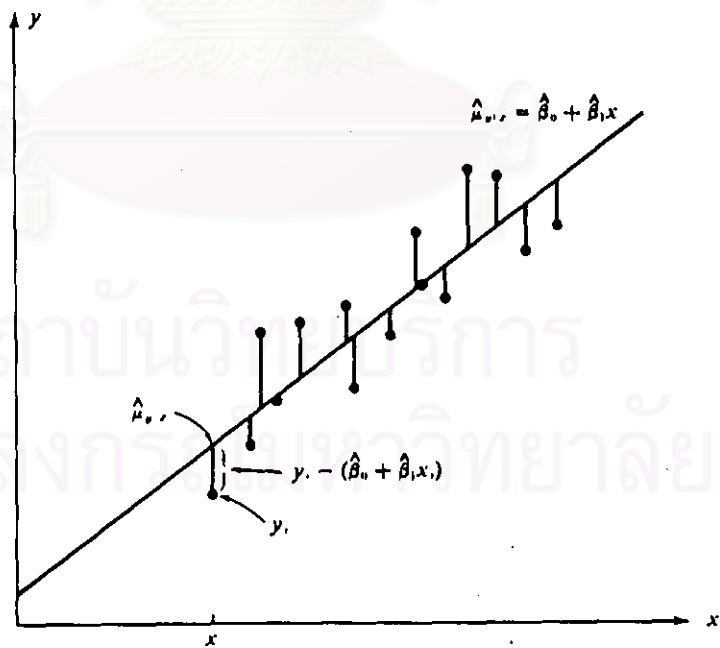
เมื่อเลือกเก็บข้อมูล  $n$  คู่ จากค่าของ  $x$  และ  $y$  นำไปเขียนกราฟเพื่อดูลักษณะความสัมพันธ์คร่าวๆ ของ  $x$  และ  $y$  กราฟดังกล่าวมีชื่อเรียกว่า แผนภาพการกระจาย (Scatter Diagram) จากภาพการกระจายนี้เราจะพอมองออกว่าลักษณะความสัมพันธ์ควรจะเป็นเส้นตรงหรือเส้นโค้งในกรณีที่คุณเหมือนว่าจะเป็นเส้นตรง ปัญหาก็คือ เราจะลากเส้นตรงให้ผ่านข้อมูลเหล่านี้โดยที่เส้นที่ลากขึ้นนี้จะสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $x$  และ  $y$  ได้อย่างไร

เทคนิคหนึ่งที่น่ามาใช้ในการหาสมการของเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $x$  และ  $y$  ที่เป็นที่นิยมแพร่หลายก็คือ วิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares) ซึ่งจะให้สมการเส้นตรงที่ลากขึ้นแล้วทำให้ค่าความเบี่ยงเบนระหว่างข้อมูลจริงกับค่าที่พยากรณ์มีค่าน้อยที่สุด วิธีดังกล่าวจะให้ผลรวมของกำลังสองของความเบี่ยงเบนในแนวตั้งของเส้นถดถอยมีค่าน้อยกว่าผลรวมของกำลังสองของความเบี่ยงเบนในแนวตั้งที่ได้จากเส้นตรงที่ลากขึ้นด้วยวิธีอื่นๆ

สมมติว่าเก็บข้อมูล  $n$  คู่ ข้อมูลจะประกอบด้วย  $(x_i, y_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) และถ้าต้องการคาดคะเนค่าเฉลี่ยของประชากร  $\mu_{y|x_i}$   $i = 1, 2, \dots, n$



รูป 2.21 แสดงค่าเฉลี่ยของประชากรและลักษณะการกระจายของความน่าจะเป็นของ e



รูป 2.22 แสดงค่าเฉลี่ยของประชากรและค่า y ที่จุดใดๆ



จากสมการ

$$\mu_{y|x_i} = \beta_0 + \beta_1 x_i$$

จะเห็นได้ว่าการที่จะได้มาซึ่งค่า  $\mu_{y|x_i}$  จะต้องหาค่า  $\beta_0$  และ  $\beta_1$  ก่อน

$$\begin{aligned} \text{ให้ } \hat{\mu}_{y|x_i} & \text{ เป็นค่าโดยประมาณของ } \mu_{y|x_i} \\ \hat{\beta}_0 & \text{ เป็นค่าโดยประมาณของ } \beta_0 = a \\ \hat{\beta}_1 & \text{ เป็นค่าโดยประมาณของ } \beta_1 = b \end{aligned}$$

นั่นคือ 
$$\hat{\mu}_{y|x_i} = a + bx_i$$

ค่าเบี่ยงเบนของ  $y_i$  จากค่าเฉลี่ยของประชากรเท่ากับ  $y_i - \hat{\mu}_{y|x_i}$  ดังนั้นผลบวกกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนคือ 
$$\sum_{i=1}^n (y_i - (a + bx_i))^2$$

วิธีการกำลังน้อยที่สุดก็คือการหาค่า  $a$  และ  $b$  ซึ่งทำให้ผลบวกกำลังสองของค่าเบี่ยงเบนมีค่าน้อยที่สุด การคำนวณกระทำได้โดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ในการจุดต่ำสุดหรือสูงสุดดังนี้

$$\text{minimize } \sum_{i=1}^n (y_i - (a + bx_i))^2 = S$$

$$\partial S / \partial a = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n y_i = na + b \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.15)$$

$$\partial S / \partial a = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a - bx_i) (x_i) = 0$$

$$\sum_{i=1}^n x_i y_i = a \sum_{i=1}^n x_i + b \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (2.16)$$

สมการ 2.15 และ 2.16 เรียกว่าสมการปกติ (Normal Equation) ของสมการถดถอย  $a$  และ  $b$  หาก

$$b = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - (\sum_{i=1}^n x_i) (\sum_{i=1}^n y_i)}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.17)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n x_i y_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}$$

$$\sum_{i=1}^n y_i / n = na/n + b \sum_{i=1}^n x_i / n$$

$$\bar{y} = a + b\bar{x}$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x} \quad (2.18)$$

$$\hat{\sigma}_e^2 = \frac{\text{ผลบวกของกำลังสองของความเบี่ยงเบน}}{n - 2}$$

$$= \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{\mu}_{y|x_i})^2}{n - 2}$$

$$= \frac{1}{n - 2} \left[ \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n y_i)^2}{n} - \frac{b}{n} (n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i) \right] \quad (2.19)$$

ดังนั้นความแปรปรวนของสัมประสิทธิ์การถดถอยก็คือ

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_o^2 \sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.20)$$

$$\sigma_b^2 = \frac{\sigma_o^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.21)$$

## 2.6 ความเชื่อถือได้ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive Reliability) [8]

วัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้คือต้องการที่จะอธิบาย MTBF (Mean Time Between Failure) และเกี่ยวข้องกับความเชื่อถือได้และการรับประกัน ยิ่งไปกว่านั้นจะกล่าวการทำนาย MTBF และความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF กับ Annualized Failure Rate (AFR)

### 2.6.1 ความเชื่อถือได้ (Reliability)

ความเชื่อถือได้ สามารถนิยามได้สองประการ คือ ความน่าจะเป็นที่ของหรือผลิตภัณฑ์สามารถทำงานได้ภายใต้สภาพการทำงานที่อยู่ในข้อกำหนด และความน่าจะเป็นของชิ้นส่วนอุปกรณ์, ผลิตภัณฑ์ หรือระบบจะทำงานภายใต้การออกแบบของการทำงานนั้น ๆ โดยไม่มีการประลัยภายใต้สภาวะแวดล้อมในช่วงระดับความเชื่อมั่น การวัดที่ใช้กันบ่อยมากที่สุดซึ่งใช้ในการเป็นตัววัดทางอ้อมของการวัดความเชื่อถือได้ เรียกว่า MTBF (Mean Time Between Failure)

MTBF เป็นเทอมที่ใช้ในอุตสาหกรรมดิสก์ไดรฟ์ในการวัดความเชื่อถือได้ของไดรฟ์ MTBF คือค่าที่ทำนายและเป็นตัววัดผลิตภัณฑ์ของคู่แข่ง ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะใช้ MTBF เป็นตัวประกันผลิตภัณฑ์

MTBF มักจะใช้วัดความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์ที่สามารถซ่อมได้ เช่น CPU board หรือ ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ อย่างไรก็ตามในกรณีที่มีการคำนวณ MTBF สำหรับระบบที่มีการประลัยเกิดขึ้นจะมีการนำไปซ่อม หรือคืนไปที่หน่วยบริการ สำหรับดิสก์ไดรฟ์ บ่อยครั้งมากจะเป็นการเปลี่ยนแทนที่ตัวที่ประลัย และด้วยเหตุนี้ MTBF จึงไม่ถูกต้องสำหรับการวัดความเชื่อถือได้ในอุตสาหกรรม

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ใช้ Mean Time To First Failure (MTTF) หรือในบางครั้งเรียก Mean Time To Failure (MTTF) MTTF เป็นตัวที่ใช้ในการวัดความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์หรืออุปกรณ์ที่ไม่สามารถซ่อมได้ อย่างเช่นอุปกรณ์ IC หลอดไฟ และหัวอ่านบันทึกของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

เมื่อเราพูดว่าไดรฟ์ตัวนี้ได้ถูกทำนาชหรือมีค่า MTBF เท่ากับ 800,000 ชั่วโมง MTBF (หรือ MTTF) ไม่ได้หมายถึงการทำนาชอายุของไดรฟ์เพียงตัวเดียวหรือกลุ่มตัวอย่างจำนวนน้อย การที่จะถึงเวลานี้ได้ไดรฟ์ต้องทำงานจนกระทั่งมันถึงช่วงสิ้นสุดหรือประต้อ และทำการเปลี่ยนไดรฟ์ตัวใหม่ที่มีความน่าเชื่อถือได้คล้ายกัน ในกรณีนี้ในทางทฤษฎีอาจจะถึง 800,000 ชั่วโมง ได้ก่อนที่จะเกิดการประต้อกับกลุ่มประชากรขนาดใหญ่

เมื่อไม่นานมานี้ ดิสก์ไดรฟ์ถูกทำให้อยู่ใน " ก่อองค่า " ซึ่งถูกทดสอบภายใต้สภาวะที่แตกต่างมากมาย การพล็อตความล้มเหลว และ MTBF ถูกประเมินด้วยการคำนวณ ขณะที่การทำในลักษณะนี้สำหรับระบบที่มี MTBF ค่าซึ่งมันไม่ขึ้นอยู่กับข้อมูล และด้วยเหตุนี้ข้อมูลมีไม่เพียงพอสำหรับการทำนาชผลิตภัณฑ์ที่ออกแบบใหม่กับเทคโนโลยีแตกต่างกัน

การใช้เทคนิคการประมาณ (Budgeting Technique) ที่เหมาะสมสำหรับการโมเดลความน่าเชื่อถือของดิสก์ไดรฟ์ และได้มาซึ่งการประมาณค่า MTBF ที่สมเหตุผล จะทำสิ่งนี้ได้โดยองค์ประกอบหรือชิ้นส่วนต้องมีความน่าเชื่อถือ โดยรวมถึงเป้าหมายของไดรฟ์ที่กำหนดไว้

โมเดลเริ่มจากการแบ่งองค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ออกเป็น สามส่วนคือ Hard Disk Assembly (HDA) ซึ่งประกอบไปด้วยชิ้นส่วนทางกล ส่วนควบคุมหรือทางอิเล็กทรอนิกส์ และ Flex assembly ที่รวมไดรฟ์ทรีแอมป์ด้วย

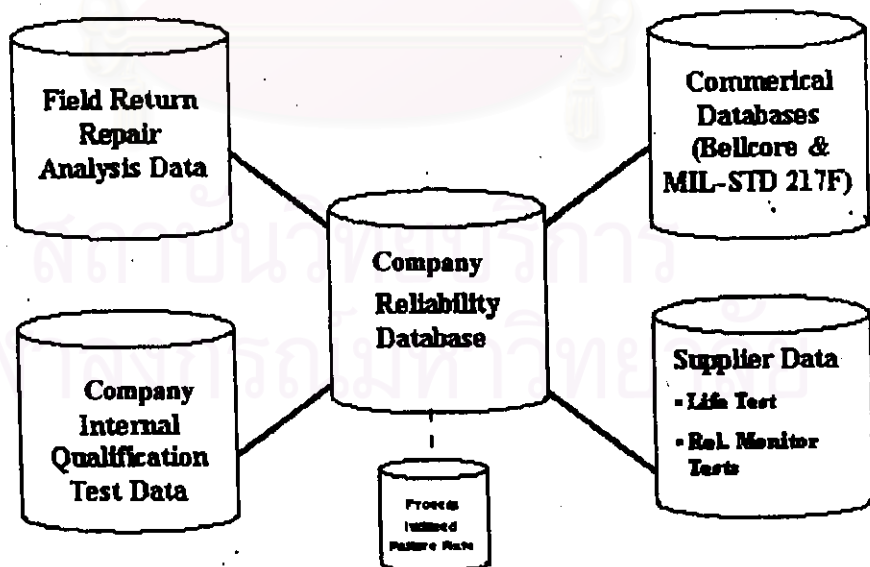
Flex assembly จะถูกโมเดลแยกออกต่างหากเพราะว่ามันรวมคุณลักษณะของชิ้นส่วนทั้งทางกล (Flex cable) และ ทางไฟฟ้า (ทรีแอมป์) อีกเหตุผลหนึ่งสำหรับการโมเดล Flex assembly แยกออกต่างหาก เนื่องจากมันอยู่ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ต่างจาก HDA เพราะว่ามันอยู่ใน HDA มันจึงไม่มีผล กระทบจากความชื้นของลมภายนอกเช่นเดียวกับ HDA และ ชิ้นส่วนทางไฟฟ้าของส่วนควบคุมได้พบตั้งไปก่อนนั้น ภายใน HDA มีอุณหภูมิสูงกว่า  $10^{\circ}\text{C}$  หรือมากกว่า อุณหภูมิรอบๆ ไดรฟ์นั้น

สุดท้ายส่วนที่ถูกนำเข้ามารวมในโมเดล คือ กระบวนการประกอบสำหรับทั้ง PCBA และ ไดรฟ์ การประต้อเหล่านี้ในช่วง "Early Life"

PCB surface mount assembly process สามารถทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นกับหน้าที่ของ ชิ้นส่วนแต่ละตัว เช่นการเชื่อมของตะกั่วไม่ดี ความสกปรก และชิ้นส่วนถูกทำให้หมดสภาพจากการกดทับ ขั้นตอนการประกอบไคร์ฟสามารถทำให้เกิดการผิดพลาดขึ้นได้ เช่น การขันตกรู ไม่แน่น และลืม ประกอบชิ้นงานบางตัวหรือการประกอบแผ่นคิสก์ที่มีปัญหาเข้าไป และเป็นผลให้เกิดปัญหาทางกลหรือทางไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ ฐานข้อมูลเกี่ยวกับความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์ได้มาจากข้อมูลความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์ก่อนหน้านี้ โดยการพัฒนาจากความถูกต้องของการทำนาอ และวิเคราะห์ข้อมูลเกี่ยวกับการประลัษของชิ้นส่วนได้จาก โมเดลที่ใช้ในการทำนาอสำหรับผลิตภัณฑ์ก่อนหน้านี้มาใช้ในการประเมิน โมเดลที่ใช้ในการทำนาอถูกนำมาใช้ร่วมกับโมเดลของความเชื่อถือได้เพื่อให้เกิดความเข้าใจเกี่ยวกับการประลัษของชิ้นส่วนสำหรับการออกแบบ แนวทางการทำแผนงานการทำนาอความเชื่อถือได้ของชิ้นส่วนหรือผลิตภัณฑ์มีดังนี้

1. การทำนาอความเชื่อถือได้ของชิ้นส่วน (โดยการเก็บข้อมูลในอดีต)
2. การวิเคราะห์ผลกระทบทางความร้อนทางทฤษฎี
3. การทำนาอความเชื่อถือได้ โดยการทดสอบภายใต้สภาวะกดดัน
4. การทำนาอความเชื่อถือได้ โดยการทดสอบเกี่ยวกับความร้อนในการวิเคราะห์
5. ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดการประลัษ และข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการ

เกิดการประลัษ



รูป 2.23 แสดงฐานข้อมูลความเชื่อถือได้ (Reliability Database)

จุดมุ่งหมายในการทำนายความเชื่อถือได้คือ การลดช่องว่างระหว่าง MTBF ที่ได้จากการทำนาย กับ MTBF ที่ได้จากภาคสนามโดยรวมจากประสบการณ์บนผลิตภัณฑ์กระบวนการผลิต และ อัตราการประลัย

## 2.6.2 ข้อจำกัดโมเดลในการทำนาย MTBF

โมเดลที่ใช้ในการทำนายเป็นเทคนิคที่ใช้ในการประมาณซึ่งมีข้อจำกัดดังนี้

1. ไม่สามารถทำนายชิ้นส่วนอุปกรณ์ไดรฟ์ หรือผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการออกแบบผิดพลาด
2. ไม่สามารถทำนายสิ่งที่เกิดจากกระบวนการผลิต
3. มีข้อจำกัดเกี่ยวกับ โมเดลทางคณิตศาสตร์ที่สัมพันธ์กับกฎพื้นฐานทางฟิสิกส์
4. ไม่สามารถทำนายข้อผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์

## 2.6.3 Annualized Failure Rate

Annualized Failure Rate (AFR) เป็นวิธีการที่ใช้กันมากในอุตสาหกรรมไดรฟ์ สำหรับการวัดความเชื่อถือได้ในภาคสนาม และเป็นคำที่ใช้กันมากในการวัดอัตราการประลัย หรือแนวโน้มของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ติดตั้ง มันสามารถนำมาใช้ทำนายความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์ AFR คิดจากการส่งคืนกลับของไดรฟ์ที่ประลัยจากลูกค้าในแต่ละเดือนหารด้วยจำนวนสะสมของไดรฟ์ที่ติดตั้ง และคูณด้วย 12 ซึ่งก็จะได้ AFR ค่า MTBF สามารถประมาณจากค่าเฉลี่ยของจำนวนชั่วโมงการทำงาน หรือ เรียกว่า Power-On-Hours (POH) หารด้วย AFR MTBF ที่ได้จาก AFR model สามารถใช้ในการเปรียบเทียบ กับ MTBF โมเดลที่ได้จากการสะสมการทำงานเพื่อความถูกต้อง

## 2.6.4 ข้อสมมติฐานของ AFR

1. ค่าเฉลี่ย Power-On-Hours (POH) ซึ่งใช้สำหรับ โมเดลของ AFR ขึ้นอยู่กับรอบของการทำงาน ( Drive Duty Cycle ) รอบการทำงานคือค่าเฉลี่ยของ POH ต่อปี ในการทำงานของระบบและ อาจแบ่งออกเป็น 3 แบบ คือ

1.1 100% Duty Cycle , POH 8,760 ชั่วโมงซึ่งใช้กับเวิร์คสเตชัน (Workstation) หรือ ระบบเซิร์ฟเวอร์

1.2 71% Duty Cycle , POH 6,240 ชั่วโมง ซึ่งใช้กับคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personnel Computer )

1.3 24% Duty Cycle , POH 2,080 ชั่วโมง ซึ่งใช้กับระบบ Portable Personnel Computer

2. เพื่อให้อัตราการประลัยในแต่ละเดือนมีความสัมพันธ์มามากขึ้นและใช้ในการติดตามการทำงานของไครฟ์ที่อยู่ภาคสนามควร ใช้มูฟวิงเอเวอร์เรทแบบตามเดือน

3. ผลของความเชื่อถือได้ของภาคสนามสามารถกระทำได้ดังนี้

3.1 อัตราการประลัยจากภาคสนามเพื่อป้อนเข้าสู่ระบบฐานข้อมูล

3.2 การจัดการให้มีระบบปิด (Closed loop) ของการป้อนกลับของการประเมินโปรแกรมความเชื่อถือได้

3.3 ระบุโอกาสสำหรับการออกแบบความน่าเชื่อถือได้ (Design For Reliability , DFR) สำหรับผลิตภัณฑ์ในอนาคต

3.4 ได้ข้อมูลของต้นทุนอายุการใช้งานการคาดการณ์อัตราการผลิตสินค้าและการเติบโตของความเชื่อถือได้

#### 2.6.5 ค่าถามที่มักจะพบบ่อย ๆ ของความเชื่อถือได้ของไครฟ์

1. อะไรคือความหมาย “Predicted (Theoretical) MTBF” และ “Operational MTBF” ? ปัจจุบันนี้ผลิตภัณฑ์ไครฟ์มีความเชื่อมั่นสูงมาก และในความเป็นจริงหลายบริษัทผู้ผลิตผลิตภัณฑ์ไครฟ์ได้ระบุ MTBF เท่ากับ 800,000 ชั่วโมง หรือประมาณ 92 ปี หรือมากกว่านั้น มันเป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่จะแสดงระดับความเชื่อถือ ได้ของในระดับดังกล่าวเนื่องจากมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

ในการที่จะหาความเชื่อถือได้ของผลิตภัณฑ์ใหม่ และการพัฒนาต้องใช้เวลาและทางคณิตศาสตร์ ซึ่งใช้อธิบายไว้ในช่วงแรกในการทำนายคุณลักษณะความเชื่อถือได้กับข้อมูลทางภาคสนามผลที่ได้จากโมเดล เหล่านี้เรียกว่า “ Predicted (Theoretical ) MTBF “ ในขณะที่มีการผลิตปริมาณมากและมีชั่วโมงการทำงาน สะสมของไครฟ์ที่มีนัยสำคัญ ข้อมูลภาคสนามจะเป็นตัว Validate โมเดล

ฐานข้อมูลการทำนาคจากการส่งกลับคืนและการวิเคราะห์การประลัย (Failure Analysis) Predicted (Theoretical) MTBF ไม่ได้รวมกรณีที่ไม่สามารถตรวจพบปัญหาหรือที่เรียกว่า NTF (No Trouble Found) และการประลัยจากสาเหตุอื่นเช่น การประลัยจากสาเหตุที่ไม่ได้คาดไว้ในการออกแบบ และเป็นของเสียจากการผลิต

ในทางเทคนิคแล้ว Operational MTBF นิยามว่าการเกิดการประลัยของระบบซึ่งถูกค้ำไว้ว่า ใคร์ฟเสียจนมีผลให้ทำการเปลี่ยน ใคร์ฟตัวใหม่ Operational MTBF คือการคำนวณจากการคืนกลับของ ใคร์ฟซึ่งมีการประลัยซึ่งไม่รวมการประลัยที่มาจาก การถือ (Handling damage) การอัฟเกรด และการคืน ใคร์ฟเพื่อเคล็ด โคอปคิ Operational MTBF มักจะต่ำกว่า Theoretical MTBF

2. เราสามารถที่จะคาดหวัง ได้หรือไม่ว่า ใคร์ฟที่มี 800,000 ชั่วโมง MTBF (92ปี) สามารถทำงานแบบ ไม่มีข้อผิดพลาดตลอดช่วงเวลาดังกล่าว ?

ไม่ได้เนื่องจากฮาร์ดดิสก์ ใคร์ฟมีการรับประกันหรือมีช่วงอายุประมาณ 2-5 ปีหรือมี อายุที่สามารถใช้งาน ได้หลังจากนี้ไม่กี่ปีหรือจากนั้น ช่วงอายุใช้งาน ได้ (Useful life) ของ ใคร์ฟ ประมาณ 6-7 ปี (45,000 ถึง 60,000 ชั่วโมง) อย่างไรก็ตามถ้ามีการเปลี่ยน ใคร์ฟตัวใหม่ที่มีความเชื่อถือ ได้เทียบเท่ากัน เมื่อมันถึงช่วงหมดอายุและกระบวนการคำนวณอย่างต่อเนื่อง ในทางทฤษฎี อาจเป็นไปได้สำหรับกลุ่มประชากรใหญ่ของ ใคร์ฟที่สะสมถึง 800,000 ชั่วโมง มีค่ามากอย่างที่บอกกล่าว ไว้ในเบื้องต้นความเชื่อถือ ได้ของ ใคร์ฟ คือ โอกาสความน่าจะเป็นที่ ใคร์ฟสามารถทำหน้าที่ของมันภายใต้สภาวะที่กำหนดในช่วงเวลาที่กำหนดไว้ สภาพของสภาวะแวดล้อมและการใช้งานจะเป็นตัวกระทบ ต่อความเชื่อ ได้ โดยทั่วไปความเชื่อถือ ได้ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

3. อะไรคือความสัมพันธ์ระหว่าง MTBF (92ปี) และการออกแบบช่วงอายุการใช้งาน (5ปี)

ความสัมพันธ์สามารถอธิบายได้ดังนี้

3.1 MTBF คือ ค่าเฉลี่ยของเวลาที่เกิดการประลัยของประชากรตัวอย่างภายใต้สภาวะที่กำหนด (ข้อกำหนดคือ 92ปี)

3.2 การออกแบบช่วงอายุการใช้งาน (Design Useful Life) คือการคาดหวังเวลาการใช้งานของผลิตภัณฑ์ (5ปี)

$$R = e^{(-\text{Useful Life} / \text{MTBF})} = 95\%$$



เมื่อ R = Probability of Survival , สมมติให้โมเดลมีอัตราการประลัยคงที่

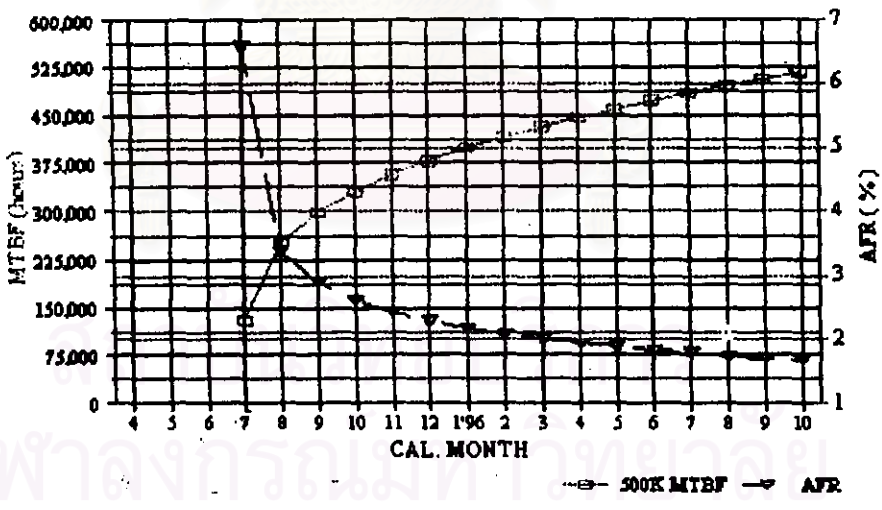
#### 4. AFR คำนวณอย่างไร

AFR มักจะคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์โดยใช้สูตรการคำนวณต่อไปนี้ เพื่อคำนวณจำนวนวินาทีคาดหวังว่ามีการส่งกลับคืนของผลิตภัณฑ์

$$\text{Theoretical AFR\%} = 1/\text{MTBF} * \text{POH} * 100 \tag{2.22}$$

AFR สามารถอนุมานได้จากจำนวนของการประลัยของผลิตภัณฑ์ที่ได้รับระหว่างเดือนนั้นและคูณด้วย 12 เพื่อเปลี่ยนเป็นปี และด้วยจำนวนหน่วยที่จำกัดที่ถูกค้า ดังนั้น AFR จะมีค่าความแปรปรวนสูงและไม่คงที่ ซึ่งแตกต่างมากกับที่ข้อมูล AFR แบบภาพรวม 12 เดือน ด้วยเหตุนี้การวัด AFR จะขึ้นกับความแปรปรวนทางสถิติระดับความแปรปรวนจะขึ้นอยู่กับจำนวนโคจรที่ใช้ในการวัด เมื่อมีจำนวนโคจรที่มีการติดตั้งมากความแปรปรวนจะน้อยลง

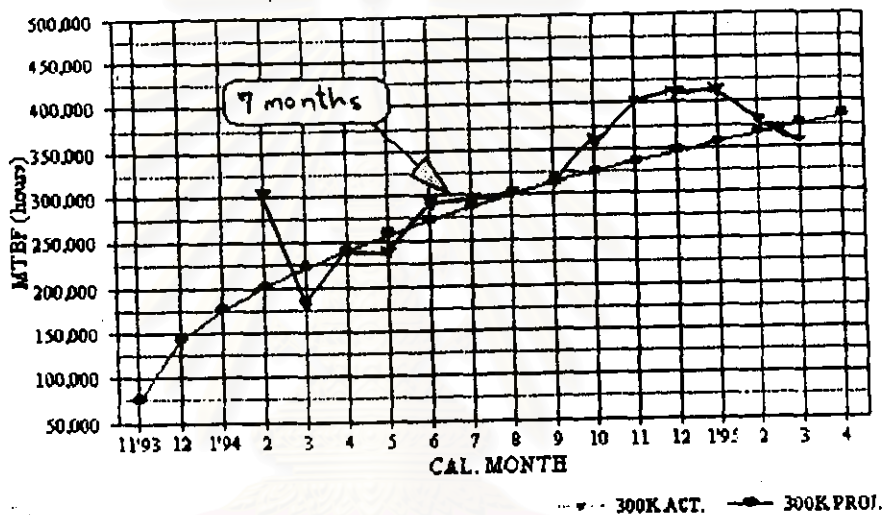
รูปที่ 2.24 แสดง MTBF 500,000 ชั่วโมง (AFR 1.75 %)



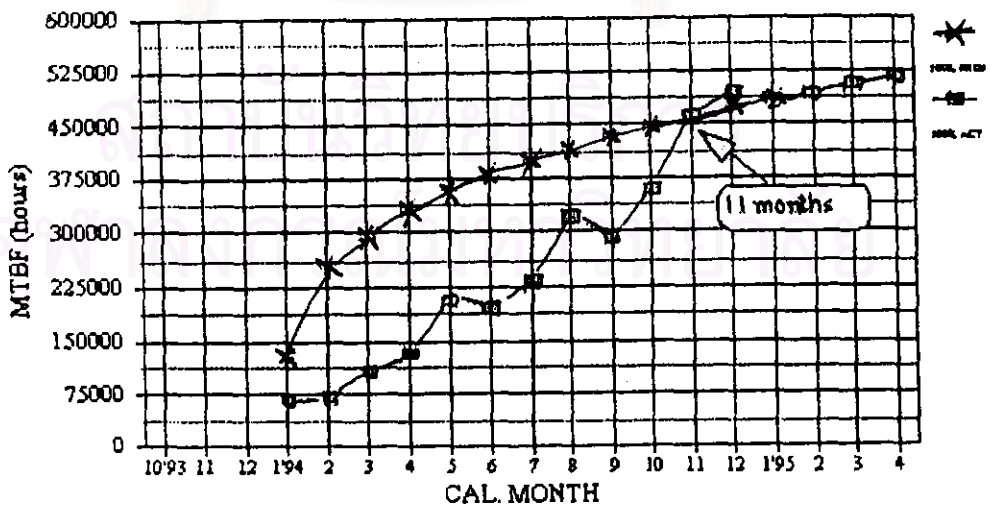
รูปที่ 2.24 แสดง MTBF ภาคสนามและ AFR ของฮาร์ดดิสก์โคจร

จากการเก็บข้อมูลสองปีของการส่งคืนกลับของผลิตภัณฑ์ของบริษัทผู้ผลิตฮาร์ดดิสก์โคจรแห่งหนึ่ง และ รายงานทหารโคจรของการส่งคืนกลับของผลิตภัณฑ์เพื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุการประลัยมากกว่าอื่นสับหน้าด้าน โคจรที่จากถูกค้า ประสิทธิภาพของทางบริษัทที่ทำการติดตาม MTBF ในภาค

สนาม และ AFR ของทั้งผลิตภัณฑ์ในกลุ่มคอมพิวเตอร์แบบเดสก์ทอป (Desktop) ซึ่งได้ตามข้อกำหนดคือ 300,000 ชั่วโมง ในเวลา 4-6 เดือน หลังจากมีการส่งมอบผลิตภัณฑ์ รูปที่ 2.26 แสดง MTBF ภาคสนามของคอมพิวเตอร์แบบเวิร์กสเตชัน (Workstation) ซึ่งได้ตามข้อกำหนดคือ 500,000 ชั่วโมง หลังจากการส่งมอบ ผลิตภัณฑ์ 11 เดือน สิ่งที่แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างชัดเจนก็คือขนาดของการส่งมอบของผลิตภัณฑ์โดยกลุ่มคอมพิวเตอร์เดสก์ทอป มีการส่งมอบ 6.3 ล้านตัว และ กลุ่มคอมพิวเตอร์แบบเวิร์กสเตชัน มีการส่งมอบ 0.5 ล้านตัวจากรูปที่ 2.25 และ 2.26 ได้แสดงตัวอย่างของการ ไปรเจ็กชันของ MTBF เปรียบเทียบกับ MTBF ภาคสนามจากการวัดจริงแสดงให้เห็นว่ามีความสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกันมากดังนั้นสามารถที่จะสรุปได้ว่าวิธีการนี้สามารถที่จะใช้ในการประเมิน MTBF ของผลิตภัณฑ์ที่อยู่ในช่วงของการพัฒนาหรือในช่วงแรกของการส่งมอบผลิตภัณฑ์



รูป 2.25 แสดง MTBF จากภาคสนามของคอมพิวเตอร์แบบเดสก์ทอป



รูป 2.26 แสดง MTBF จากภาคสนามของคอมพิวเตอร์แบบเวิร์กสเตชัน

5. ถ้ามีการตั้งชื่อผลิตภัณฑ์ 10,000 ไคร์ฟ ซึ่งมี 800,000 ชั่วโมง MTBF เราจะสามารถคาดการณ์ได้อย่างไรว่ามีจำนวนเท่าไรที่ไคร์ฟจะเกิดการประดัยในช่วงปีแรก และในช่วง 5 ปีที่รับประกัน ?

ใช้สมการที่ 2.22 และข้อสมมติฐานที่ว่าเมื่อมีไคร์ฟเกิดการประดัยจะมีการเปลี่ยนไคร์ฟตัวใหม่ที่มีความเชื่อถือได้และ MTBF คล้ายกัน และมีการใช้ไคร์ฟแบบ 100% Duty Cycle ดังนั้นการคำนวณเปอร์เซ็นต์การประดัยได้ดังนี้

$$AFR\% = 1/800,000 * 8760 = 1.1\%$$

ค่าเฉลี่ยของการประดัยของไคร์ฟในแต่ละปีน่าจะเป็น  $1.1\% * 10,000 \approx 110$  ตัว

จาก Bellcore prediction theory และอัตราการประดัยเท่ากับ 0.35 จำนวนที่ประดัยในปีแรก ประมาณว่าอยู่ในช่วง 110 ถึง 169 จากหลายระดับความเชื่อมั่นเมื่อมากกว่าห้าปีที่รับประกัน จำนวนไคร์ฟทั้งหมดที่เกิดการประดัยคือการคูณด้วยห้าจากค่าเฉลี่ยของการประดัย ตัว (เพิ่มขึ้น 59 ตัวที่ประดัย) ประมาณการนี้มาจากความแปรปรวนทางสถิติกับหลายระดับความเชื่อมั่น เมื่อมากกว่าห้าปีที่รับประกันจำนวนไคร์ฟทั้งหมดที่เกิดการประดัยคือการคูณด้วยห้าจากค่าเฉลี่ยของการประดัยบวกด้วย 59 ตัวในปีแรกซึ่งจะกลายเป็น 609 ตัว

การประเมินจากการคำนวณด้านบนนี้ขึ้นกับข้อสมมติฐานที่ 10,000 ไคร์ฟ นี้ชื่อและให้ทำงานในเวลาเดียวกัน

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.7.1 การเกิดอิเล็กโทรไมเกรชันบนพินบางของอูมิเนียม

J.D. Veneble และ R.G. Lye [ 9 ] ทำการทดลองอิเล็กโทรไมเกรชันบนอูมิเนียมฟิล์ม พบว่าเวลาในการประดัย ( $t_p$ ) เป็นการกระจายแบบล็อกนอร์มอล และมีสมการของ MTTF คือ

$$t_{50} = AJ^{-n} \exp(-Q/kT)$$

เมื่อ

$t_{50}$	=	เวลาที่ 50% ของประชากรตัวอย่างเกิดการประลัย
A	=	เป็นค่าคงที่
Q	=	Activation for grain boundary

โดยที่

J และ n มีความสัมพันธ์กันดังนี้

J	<	$10^{-5}$	Amp <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup>	,	n	≅	1
J	=	$10^{-5}$ - $10^{-6}$	Amp <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup>	,	n	=	2
J	≥	$10^{-7}$	Amp <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup>	,	n	=	3 - 14

### 2.7.2 การเกิดอิเล็กโทรไมเกรชันบนฟิล์มบางของเพอริออดอ (Ni<sub>3</sub> และ Fe<sub>3</sub>)

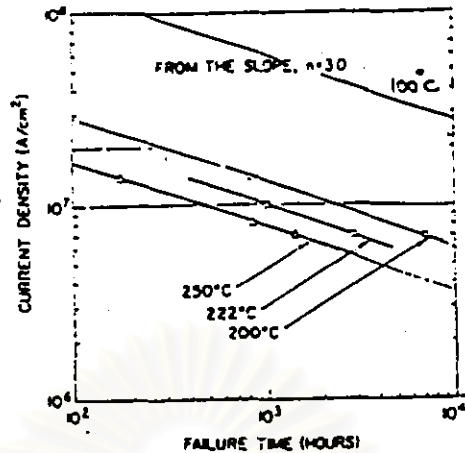
A. Gangulee และ F.M. d'Heurle [10] ได้ทำการทดสอบแบบอิเล็กโทรไมเกรชันบนแผ่นฟิล์มอัลลอยผสมระหว่างนิกเกิลและเหล็ก (ประกอบด้วย 80 wt% Ni และ 20 wt% Fe) ในอุณหภูมิ 200-330 °C ส่วนผสมอัลลอยดังกล่าวใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้ทำแมกนีโทริซิสทีฟไดรฟ์ของหัวอ่านเขียนแบบแมกนีโทริซิสทีฟ ในการทดสอบนี้ใช้สมการ

$$t_f \approx A J^n \exp(\Delta H/kT)$$

เมื่อ

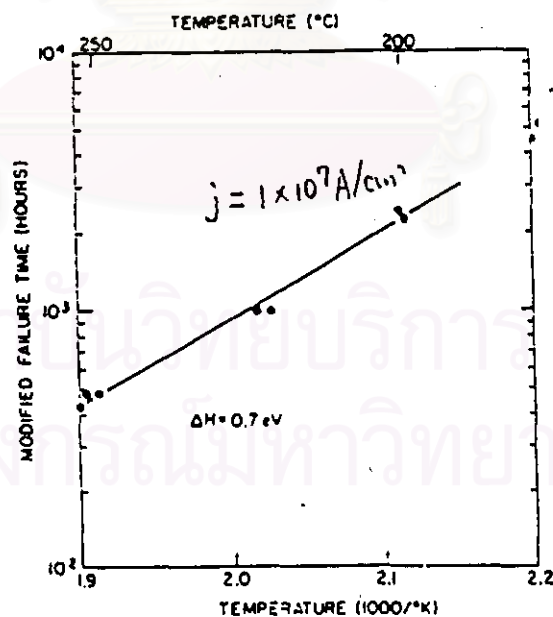
$t_f$	=	เวลาที่ f% ของประชากรตัวอย่างเกิดการประลัย
A	=	ค่าคงที่
J	=	Current Density
n	=	2 หรือ 3
$\Delta H$	=	Activation energy
k	=	Boltzmann's constant
T	=	อุณหภูมิของแผ่นฟิล์มที่เป็นตัวนำไฟฟ้า

ค่า n สามารถหาได้จากการหาความชัน (slope) ของ  $\ln J$  กับ  $\ln t_f$  ที่อุณหภูมิต่างๆ ดังเช่นกราฟรูปที่ 2.27 ซึ่งเป็นการพล็อตที่อุณหภูมิต่างกัน ค่า n จะได้จากค่าความชันซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 3



รูปที่ 2.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระดับต่าง ๆ และเวลาในการประจักษ์ของการทดสอบแบบอิเล็กโทรโมเกรชันในฟิล์มบางของ Ni-Fe

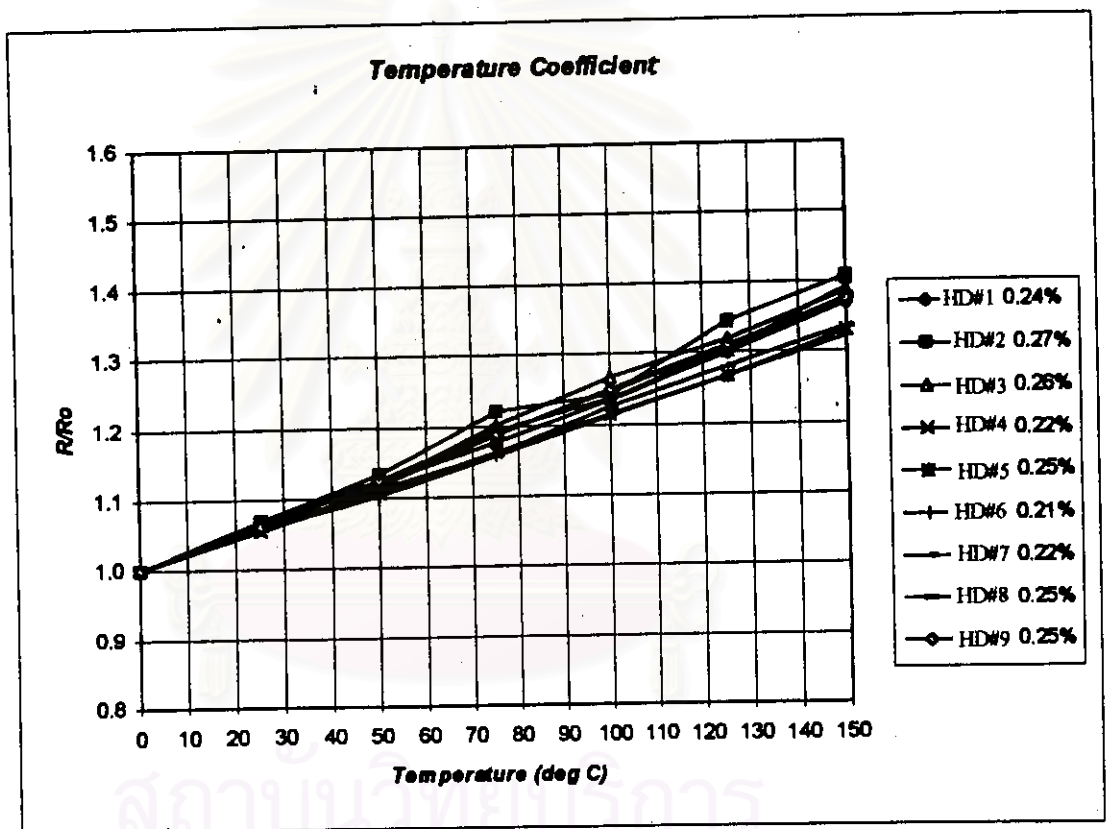
ค่า  $\Delta H$  สามารถหาได้จากกราฟระหว่างเวลาประจักษ์ (Failure time) กับอุณหภูมิ ในรูป 2.28  
ค่า  $\Delta H$  คือค่าความชันจากกราฟนี้ ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.7 \pm 0.1$  eV



รูปที่ 2.28 แสดงการพล็อตลอการิทึมของเวลาในการประจักษ์แบบอิเล็กโทรโมเกรชันของฟิล์มบาง Ni-Fe กับอุณหภูมิที่ระดับต่าง ๆ

### 2.7.3 การหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ [10]

การหาค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิ (Temperature Coefficient of Resistance, TCR) ของหัวอ่านเขียนแมกนีโทริซิสทีฟ โดยการนำหัวอ่านเขียนดังกล่าว ทดสอบด้วยเครื่องทดสอบ EM (Electro-Migration Tester) ด้วยกระแสที่เข้าไว้เท่ากับ 3 มิลลิแอมป์ ทำการวัดค่าความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟ (R) ของแต่ละอุณหภูมิที่ตั้งไว้เท่ากับ 25, 50, 75, 100, 125 และ 150 °C ค่า  $R_0$  คือค่าความต้านทานของแมกนีโทริซิสทีฟที่ 0 °C ซึ่งในรายงานฉบับนี้ใช้การประมาณ และ  $R/R_0$  ถูกนำมาพล็อตแต่ละอุณหภูมิ ดังเช่นรูปที่ 2.29



รูป 2.29 แสดงการพล็อตระหว่าง  $R/R_0$  กับอุณหภูมิที่ระดับต่างๆ

จากกราฟค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิของหัวอ่านเขียนตัวที่ 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 คือ 0.24, 0.27, 0.26, 0.22, 0.25, 0.21, 0.22, 0.25 และ 0.25% ตามลำดับ จากกราฟพบว่าจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานและอุณหภูมิ มีความสัมพันธ์แบบ เส้นตรง

$$\Delta R/R_0 = \alpha \Delta T$$

เมื่อ  $\alpha$  = ค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ (Temperature Coefficient)