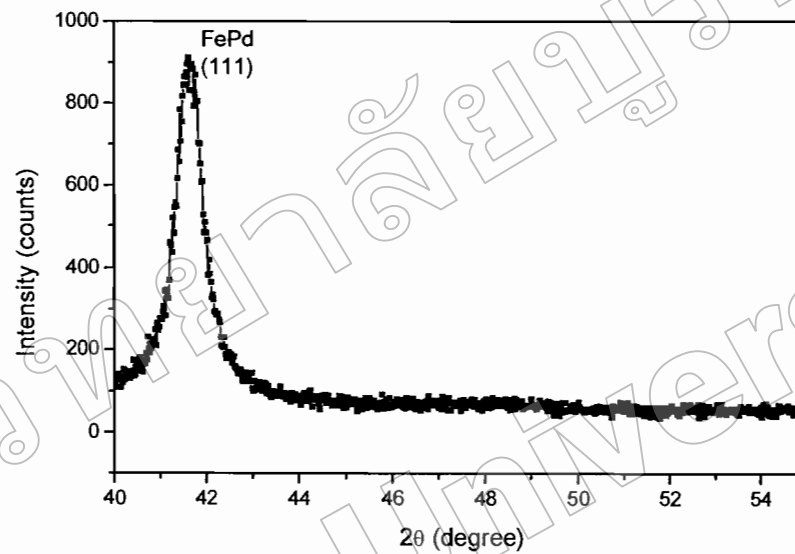


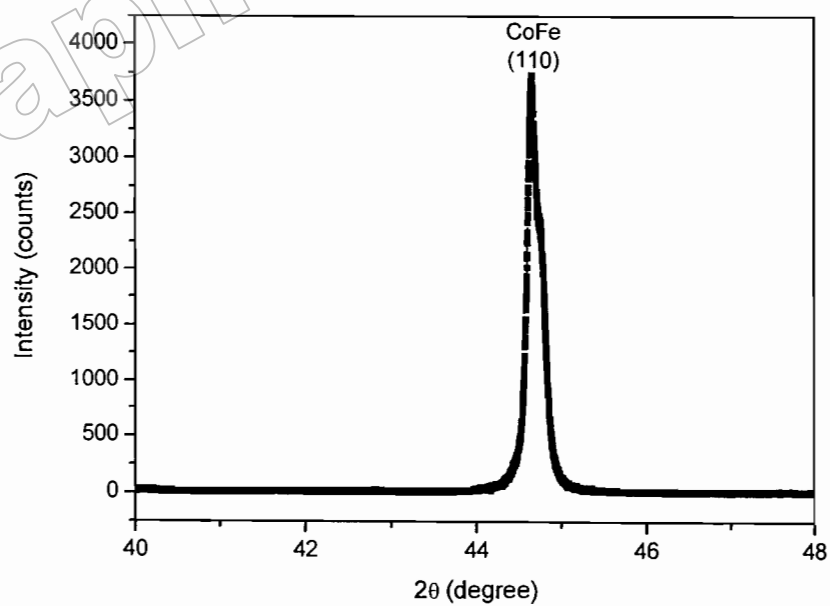
บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้

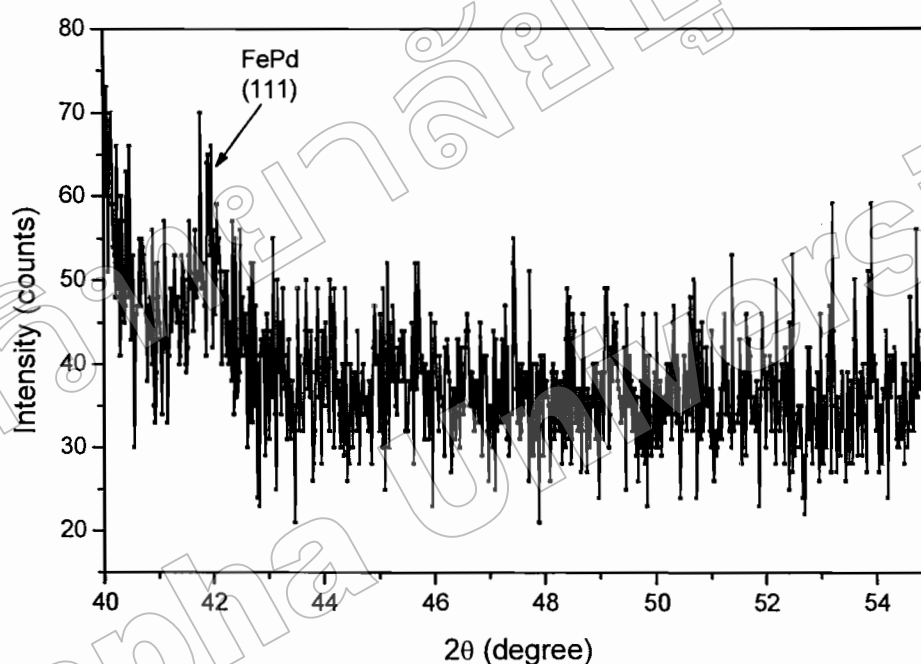


ภาพที่ 37 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm) ที่เตรียมได้



ภาพที่ 38 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มตัวอย่าง CoFe(16 nm) ที่เตรียมได้

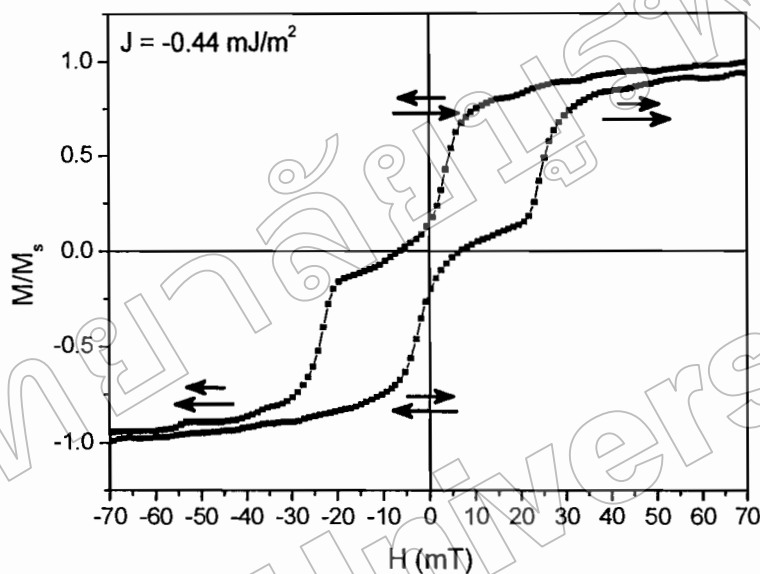
จากผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียว FePd(30 nm) พบว่า ณ สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิห้อง โลหะผสม FePd มีโครงสร้างแบบ A1 โดยสังเกตได้จากพิกของระนาบ 111 ที่เกิดขึ้นอย่างชัดเจนที่ 2θ มีค่าประมาณ 41.6° แสดงดังภาพที่ 37 ในส่วนของฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียว CoFe(16 nm) ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิห้องนั้น พบว่า ผลการวิเคราะห์ XRD ในภาพที่ 38 แสดงให้เห็นถึงพิกของระนาบ 110 เกิดขึ้นอย่างชัดเจนที่ 2θ มีค่าประมาณ 44.6° ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดโครงสร้างแบบ B2 ในฟิล์มตัวอย่างดังกล่าว



ภาพที่ 39 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(16 nm) ที่เตรียมได้

ในการศึกษาโครงสร้างของฟิล์มแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(16 nm) ที่เตรียมได้ พบว่า ลักษณะพิกของผลการวิเคราะห์ XRD ในภาพที่ 39 มีสัญญาณรบกวนเป็นจำนวนมากทำให้ยากต่อระบุตำแหน่งของพิก สัญญาณรบกวนดังกล่าวเกิดจากความบกพร่องในโครงสร้างของฟิล์มแม่เหล็ก FePd/Ru/CoFe เนื่องจากฟิล์มแต่ละชั้นที่นำมาเคลือบมีโครงสร้างแตกต่างกัน คือ FePd มีโครงสร้างแบบ A1, Ru มีโครงสร้างแบบ A3 (hexagonal close-packed; hcp) และ CoFe มีโครงสร้างแบบ B2 ส่งผลให้เมื่อทำการเคลือบฟิล์ม อะตอมของฟิล์มในแต่ละชั้นจะมีจัดการจัดเรียงตัวของโครงสร้างผลึกที่ค่อนข้างไม่สมบูรณ์ โดยเกิดความไม่ต่อเนื่องของเนื้อฟิล์มบริเวณรอยต่อ

(Interface roughness) ระหว่างฟิล์มแต่ละชั้นขึ้น จากผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มตัวอย่าง ดังกล่าว พบว่า พีคของ FePd ที่มีโครงสร้างแบบ A1 ปรากฏขึ้นที่ 2θ มีค่าประมาณ 42° องศา แต่ พีคของ CoFe ซึ่งมีโครงสร้างแบบ B2 และพีคของ Ru ที่มีโครงสร้างแบบ A3 นั้น ไม่สามารถระบุ ตำแหน่งได้อย่างชัดเจน



ภาพที่ 40 แสดงวงฮิสเทอรีซิสที่มีการจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศทางกับระนาบของ ฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียม ณ อุณหภูมิห้องก่อนผ่านการอบความร้อน

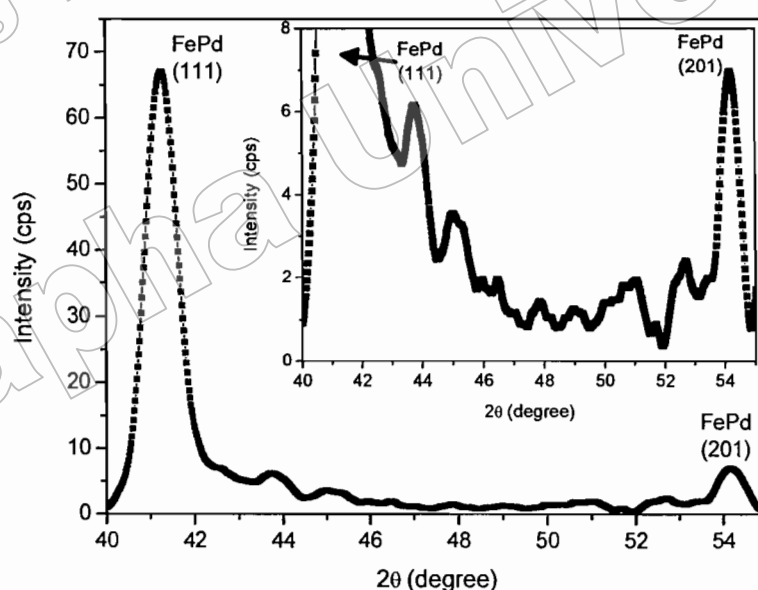
จากการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กด้วย VSM ของ ฟิล์มแบบ 3 ชั้น FePd/Ru/CoFe ที่เตรียม ณ อุณหภูมิห้อง พบว่า ฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) แสดงการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC ได้เด่นชัดที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้นอื่น ๆ โดยสังเกตได้จากวงฮิสเทอรีซิสที่ปรากฏรอยหยักเสมือนขึ้นบันได ดังแสดงในภาพที่ 40 จากผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า ที่สภาวะการเตรียมที่อุณหภูมิห้องโลหะผสม FePd มีค่า H_c ที่ต่ำกว่า CoFe (Chen et al., 2006; Chen & Nikles, 2002; Issro et al., 2005) ทำให้ชั้นฟิล์ม FePd แสดงสมบัติเป็นชั้นแม่เหล็กชนิดอ่อน และชั้นฟิล์ม CoFe แสดงสมบัติเป็นชั้นแม่เหล็กชนิดแข็งของการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC การอธิบายพฤติกรรมการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC จากวงฮิสเทอรีซิสในภาพที่ 40 นั้น ทางผู้วิจัยได้กำหนดสัญลักษณ์ลูกศรขึ้นและลูกศรยาวแทนการจัดวางตัวของแมกนีโตเซชันของชั้น FePd (M_1) และชั้น CoFe (M_2) ตามลำดับ ขณะที่สนามแม่เหล็กจากภายนอกจ่ายให้กับฟิล์ม

ตัวอย่างมีค่าประมาณ 55 mT นั้น อันตรกิริยาแบบ AFC จะถูกทำให้หมดกำลังลง แมกนีไทเซชันของชั้น FePd และ CoFe จะขนานกันและมีทิศทางเดียวกับทิศของ H ทำให้แมกนีไทเซชันรวมของฟิล์มตัวอย่างมีค่าอิมิตัว และเรียกสนามแม่เหล็กที่ให้จากภายนอกแล้วทำให้ฟิล์มตัวอย่างมีแมกนีไทเซชันอิมิตัวว่าค่าสนามแม่เหล็กอิมิตัว (Saturation field; H_S) ต่อมาเมื่อลดค่า H ลงไปจนถึงค่า Exchange field ของชั้น FePd (H_{ex1}) พบว่า ค่าแมกนีไทเซชันรวมของชั้นงานตัวอย่างลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเกิดจากการสลับทิศทางของ M_1 ไปในทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศของ M_2 และ H อย่างฉับพลัน การสลับทิศของ M_1 ดังกล่าวเกิดจากการเหนี่ยวนำของอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น FePd และ CoFe โดยที่ค่า H_{ex1} สามารถหาได้จาก $J/M_{s1}t_1$ (Fullerton et al., 2000, p. 3807) เมื่อ M_{s1} และ t_1 คือค่าแมกนีไทเซชันอิมิตัว (Saturation magnetization) และความหนาของชั้น FePd ตามลำดับ ต่อมาเมื่อทำการลดสนาม H ที่ให้กับชั้นงานตัวอย่างไปที่ 0 mT พบว่า M_1 และ M_2 ยังคงมีทิศทางสวนทางกันเนื่องจากอันตรกิริยาแบบ AFC และเมื่อทำการจ่ายสนาม H ให้มีทิศที่ตรงกันข้ามกับทิศทางเดิมไปจนถึงค่า Exchange field ของชั้น CoFe ($H_{ex2} \approx J/M_{s2}t_2$) พบว่า M_2 จะมีการสลับทิศทางไปจากเดิมทำให้มีทิศทางเดียวกันกับ M_1 ซึ่งสังเกตได้จากการที่ค่าแมกนีไทเซชันรวมของชั้นงานมีค่าเพิ่มขึ้นในทางลบอย่างรวดเร็ว และจะเริ่มมีค่าคงที่ที่ H มีค่าประมาณ -55 mT หลังจากนั้น เมื่อทำการลดสนาม H กลับไปที่ 0 mT และจ่าย H ไปในทิศทางเดิมจนมีค่าถึง 55 mT อีกครั้ง พบว่าวงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวิเคราะห์มีลักษณะคล้ายกับชั้นบันได ซึ่งบ่งบอกถึงการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC ขึ้นในชั้นงานดังกล่าว โดยสามารถคำนวณหาค่า J ของอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้น จากสมการที่ (1) ได้เท่ากับ -0.44 mJ/m^2

การเกิดอันตรกิริยาขึ้นในฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) สามารถอธิบายได้ในเชิงทฤษฎีโดยอาศัยปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนถูกกักอยู่ในบ่อศักย์แบบควอนตัมในชั้น NM ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.2 ซึ่งอธิบายได้ว่า สภาวะที่แมกนีไทเซชันของชั้น FePd และ CoFe มีทิศทางเดียวกัน (เกิดอันตรกิริยาแบบ FC) นั้น ไม่เหมาะต่อการปรากฏขึ้นในฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ เนื่องจากความหนา 0.8 nm ของชั้น Ru เป็นค่าความหนาที่จะทำให้เกิดการแบ่งระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนที่ถูกกักอยู่ในชั้น Ru และมีการสั่นพ้องของคลื่นอิเล็กตรอนขึ้นบริเวณระดับชั้น E_F ส่งผลให้พลังงานรวมของระบบ QW ในชั้น Ru มีค่าสูงกว่าระดับ E_F ของอิเล็กตรอน และทำให้โครงสร้างของอิเล็กตรอนในชั้นวัสดุ Ru เกิดความไม่เสถียร ระบบ QW จึงทำการปรับเปลี่ยนให้แมกนีไทเซชันของชั้น FePd ซึ่งเป็นชั้นแม่เหล็กชนิดอ่อนมีทิศที่สวนทางกับชั้นของ CoFe ซึ่งเป็นสภาวะที่ระบบมีพลังงานที่ต่ำและมีความเสถียร ส่งผลให้อันตรกิริยาแบบ AFC ปรากฏขึ้นในฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้

ลดลงของค่า ρ_0 นั้น เกิดจากการที่พลังงานความร้อนกระตุ้นให้อะตอมในฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(x nm) มีการเคลื่อนที่และจัดเรียงตัวใหม่ เพื่อลดความบกพร่องของ โครงสร้างผลึกในชั้นฟิล์มทั้ง 3 ชั้น และทำให้อะตอมของชั้น FePd เกิดความเป็นระเบียบช่วงยาว (Long range order; LRO) โดยที่ ρ_0 และค่าระดับของการเกิดระเบียบช่วงยาว (Degree of LRO; S) จะมีความสัมพันธ์อยู่ในรูปของ $\rho_0 \propto (1 - S^2)$ (Issro et al., 2005, p. 449) ซึ่งสามารถอธิบายได้ ดังนี้ จากการที่อิเล็กตรอนตัวนำที่ผ่านเข้าไปในชั้นงานตัวอย่างมีการกระเจิงที่ลดลง เนื่องจาก อะตอมในชั้นฟิล์ม FePd มีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น ทำให้สภาพต้านทานไฟฟ้าในฟิล์ม ตัวอย่างมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบความร้อนเพิ่มขึ้น การเคลื่อนย้ายของอะตอมดังกล่าว ส่งผลให้ชั้นของ FePd เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจากโครงสร้างแบบ A1 ไปเป็นแบบ L1₀

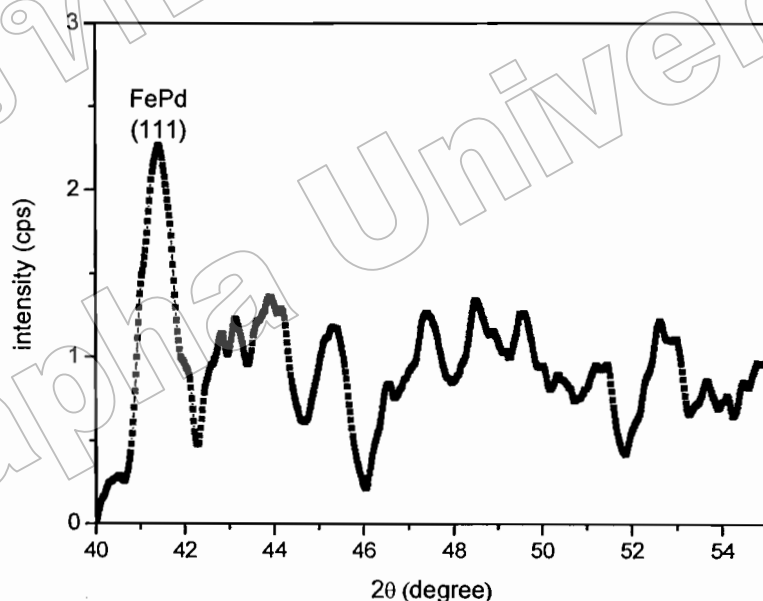
4.3 ลักษณะทางโครงสร้างและสมบัติทางแม่เหล็กของฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนแบบไอโซโครนัล



ภาพที่ 42 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียว FePd(30 nm) ที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K

การเคลื่อนที่และการจัดระเบียบของอะตอมในชั้นฟิล์ม FePd เนื่องจากพลังงานความร้อนส่งผลให้ชั้นฟิล์มดังกล่าวเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจากโครงสร้างแบบ A1 ไปเป็น

แบบ $L1_0$ โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะทางโครงสร้างด้วย XRD ของฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียว FePd ที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K แสดงดังภาพที่ 42 พบว่า พีคของระนาบ 111 ของโลหะผสม FePd ปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง 2θ มีค่าประมาณ 41.4° และในขณะเดียวกันที่ 2θ มีค่าประมาณ 54.2° นั้น ปรากฏพีคของระนาบ 201 ซึ่งเป็นพีคแบบ Superstructure ของโลหะผสม FePd ที่มีโครงสร้างแบบ $L1_0$ ขึ้น และเมื่อพิจารณาภาพขยายของผลการวิเคราะห์ดังกล่าวในภาพที่ 42 พบว่า มีพีคความเข้มต่ำปรากฏขึ้นเป็นจำนวนมากในตำแหน่งที่ 2θ มีค่าอยู่ในช่วง $43 - 53^\circ$ โดยบางส่วนของพีคเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงการเกิดออกไซด์ของ Fe เนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชัน ในส่วนของโลหะผสม CoFe นั้น เนื่องจากมีอุณหภูมิของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอยู่ที่ประมาณ 1000 K (Kogachi et al., 2005 p. 536; Kubaschewski, 1982, p. 28) ดังนั้นโลหะผสมดังกล่าวจึงมีโครงสร้างแบบ B2 เช่นเดิม และมีโอกาสที่จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างเนื่องจากกระบวนการให้ความร้อนในงานวิจัยนี้น้อยมาก

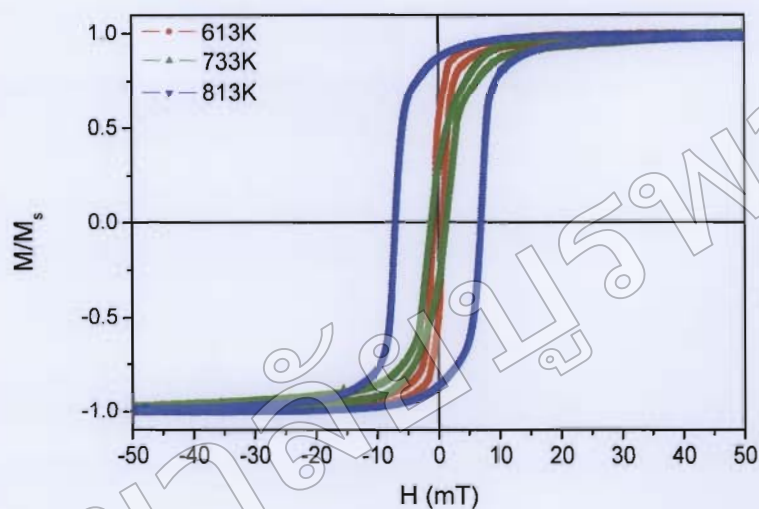


ภาพที่ 43 แสดงผลการวิเคราะห์ XRD ของฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(16 nm) ที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K

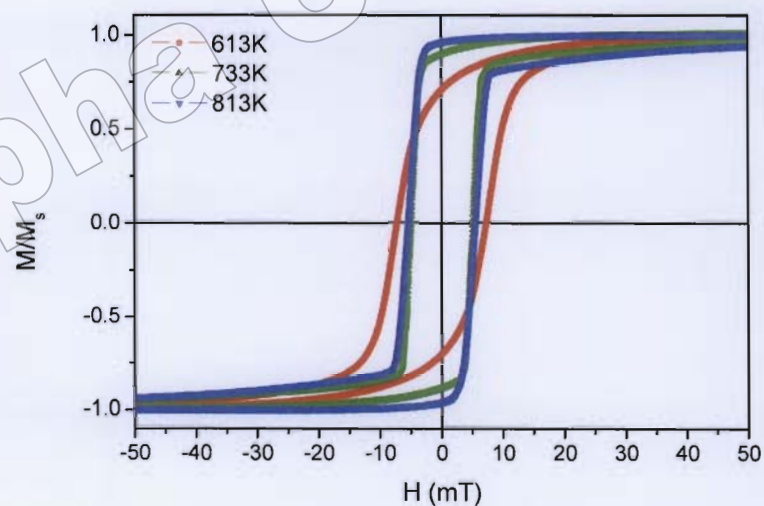
จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างของฟิล์มแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(16 nm) ที่ผ่านการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K ในภาพที่ 43 พบว่า ลักษณะพีคของ XRD ที่เกิดขึ้นมีสัญญาณรบกวนเป็นจำนวนมากทำให้ยากต่อระบุตำแหน่งของพีค เช่นเดียวกับฟิล์มตัวอย่าง FePd/Ru/CoFe ที่เตรียมได้ที่สภาวะอุณหภูมิห้อง ซึ่งมีสาเหตุมาจากความบกพร่องใน

โครงสร้างของฟิล์มตัวอย่างดังกล่าว เนื่องจากฟิล์มแต่ละชั้นมีโครงสร้างแตกต่างกัน โดยฟิสิกของ FePd ที่มีโครงสร้างแบบ A1 มีการปรากฏให้เห็นอย่างเด่นชัด ที่ 2θ มีค่าประมาณ 41.4° องศา แต่ฟิสิกของ FePd ที่มีโครงสร้างแบบ $L1_0$, ฟิสิกของ CoFe ซึ่งมีโครงสร้างแบบ B2 และฟิสิกของ Ru ที่มีโครงสร้างแบบ A3 นั้น ไม่สามารถระบุตำแหน่งได้อย่างชัดเจน

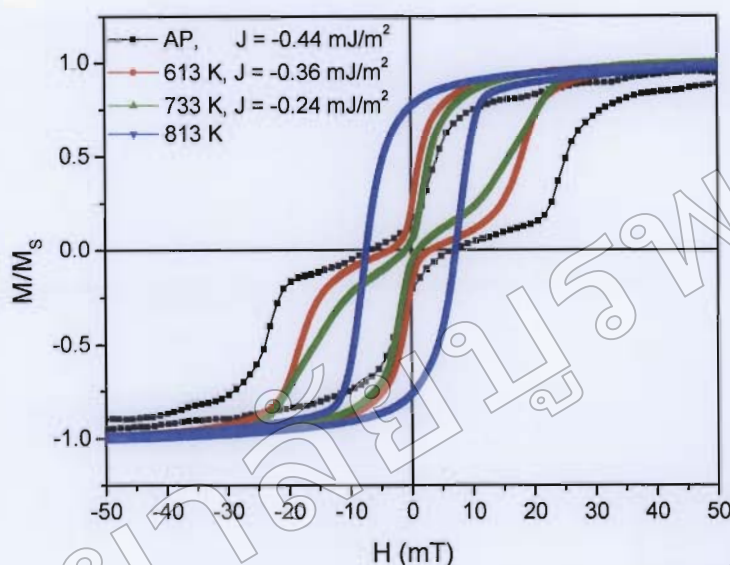
การเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของโลหะผสม FePd จากโครงสร้างแบบ A1 ไปเป็นแบบ $L1_0$ ทำให้แกน c ในโครงร่างผลึกมีการหดสั้นลงจากเดิม และเป็นทิศทางที่สามารถแมกนีไทซ์ได้ง่าย (Easy axis) ส่งผลให้โลหะผสมดังกล่าวมีค่า K_u เพิ่มขึ้นและมีสมบัติทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรชนิดแข็งที่สูงขึ้น โดยสังเกตได้จากค่า H_C ที่เพิ่มขึ้น ($H_C \sim 2K_u/M_s$) ในวงฮิสเทอรีซิสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AGFM ซึ่งจ่ายสนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทางขนานกับระนาบของฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียว FePd(30 nm) ที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613, 733 และ 813 K ดังแสดงในภาพที่ 44 จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวพบว่า ค่า H_C ของฟิล์มตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย จากการอบความร้อนที่สถานะอุณหภูมิ 613 K ไปเป็น 733 K เนื่องจากการเกิดระเบียบของอะตอมในโครงร่างผลึกเริ่มเกิดขึ้น แต่เมื่อให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K นั้น ค่า H_C จะเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากพลังงานความร้อนมีค่าสูงพอ ทำให้การเกิดระเบียบของอะตอมของโครงสร้างแบบ $L1_0$ มีมากขึ้น จากวงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียว CoFe ซึ่งแสดงดังภาพที่ 45 พบว่า ฟิล์มตัวอย่างดังกล่าวมีสมบัติทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรที่อ่อนลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการอบความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 613 K เป็น 733 K มีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนตำแหน่งของการเรียงตัวของอะตอมบางอะตอมในโครงผลึกเนื่องจากถูกกระตุ้นด้วยความร้อน แต่โลหะผสมดังกล่าวยังคงมีโครงสร้างแบบ B2 เช่นเดิมแม้ว่าจะให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K ก็ตาม ส่งผลให้ค่า H_C ของโลหะผสม CoFe ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนไปที่อุณหภูมิต่าง ๆ ในงานวิจัยนี้มีค่าใกล้เคียงกัน



ภาพที่ 44 แสดงวงฮิสเทอรีซิสที่มีการย้ายสนามแม่เหล็กในทิศทางกับระนาบของฟิล์ม ตัวอย่าง $\text{FePd}(30 \text{ nm})$ ที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 613, 733 และ 813 K



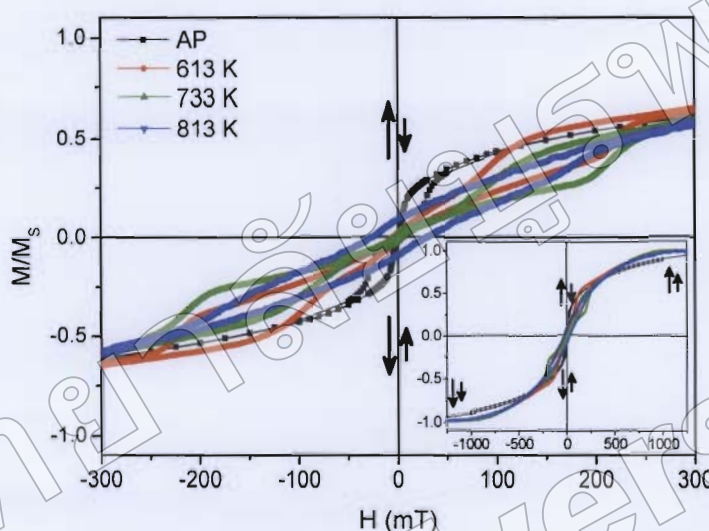
ภาพที่ 45 แสดงวงฮิสเทอรีซิสที่มีการย้ายสนามแม่เหล็กในทิศทางกับระนาบของฟิล์ม ตัวอย่าง $\text{CoFe}(16 \text{ nm})$ ที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 613, 733 และ 813 K



ภาพที่ 46 แสดงวงฮิสเทอรีซิสที่มีการจ่ายสนามแม่เหล็กในทิศทางกับระนาบของฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้ (AP) และที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613, 733 และ 813 K

จากอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้นอย่างเด่นชัดในกรณีของฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้นั้น ผู้ทำวิจัยจึงได้เลือกชิ้นงานดังกล่าวมา ทำการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่อสมบัติทางแม่เหล็ก ด้วยการวัดวงฮิสเทอรีซิสที่มีการให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทางและตั้งฉากกับระนาบของแผ่นฟิล์มตัวอย่างโดย AGFM หลังจากที่ทำฟิล์มตัวอย่างผ่านกระบวนการให้ความร้อนแบบไอโซโครนัลไปจนถึงอุณหภูมิ 613, 733 และ 813 K ตามลำดับ เมื่อพิจารณาวงฮิสเทอรีซิสที่มีการให้สนามแม่เหล็กเข้าไปในทิศทางกับระนาบของแผ่นฟิล์มตัวอย่างในภาพที่ 46 พบว่า อันตรกิริยาแบบ AFC ยังคงมีการปรากฏขึ้นในฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613 และ 733 K โดยสังเกตได้จากลักษณะของวงฮิสเทอรีซิสที่มีรอยหยักเสมือนขั้นบันได และมีค่า H_s อยู่ที่ประมาณ 45 mT (สำหรับฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 613 K) และ 30 mT (สำหรับฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนจนถึงอุณหภูมิ 733 K) เมื่อนำ H_s ไปคำนวณหาค่า J ของอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้น โดยใช้สมการที่ (1) พบว่า J มีค่าเท่ากับ -0.36 mJ/m^2 (613 K) และ -0.24 mJ/m^2 (733 K) ตามลำดับ ซึ่งมีขนาดที่ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับค่า J ของฟิล์มตัวอย่างก่อนการอบความร้อน (-0.44 mJ/m^2) สำหรับฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K นั้น พบว่า ไม่

ปรากฏอันตรกิริยาแบบ AFC ขึ้น แต่ฟิล์มตัวอย่างจะแสดงอันตรกิริยา FC แทน โดยที่แมกนีไตเซชันของชั้น FePd และ CoFe มีทิศทางเดียวกัน สังเกตได้จากวงฮิสเทอรีซิสที่มีความเรียบไม่ปรากฏรอยหักแบบขึ้นบันได ดังในภาพที่ 46



ภาพที่ 47 แสดงวงฮิสเทอรีซิสที่มีการย้ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับระนาบของฟิล์มตัวอย่างแบบ 3 ชั้น FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้ (AP) และที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613, 733 และ 813 K

สำหรับวงฮิสเทอรีซิสที่มีการย้ายสนามแม่เหล็กในทิศตั้งฉากกับระนาบของแผ่นฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่แสดงในภาพที่ 47 พบว่า ค่อนข้างสอดคล้องกับวงฮิสเทอรีซิสที่มีการย้ายสนามแม่เหล็กในทิศขนานกับระนาบของแผ่นฟิล์ม โดยแสดงให้เห็นถึงการปรากฏอันตรกิริยาแบบ AFC ขึ้นในฟิล์มตัวอย่างที่เตรียมได้ และที่ผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613 และ 733 K ซึ่งอันตรกิริยาแบบ AFC จะสลายไปเมื่อให้ความร้อนกับฟิล์มตัวอย่างไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K แต่เมื่อพิจารณาค่า H_s จากวงฮิสเทอรีซิสในภาพที่ 46 และ 47 พบว่า สนามแม่เหล็กที่จ่ายเพื่อทำให้แมกนีไตเซชันในฟิล์มตัวอย่าง FePd(12 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) มีการอึดตัวในทิศที่ขนานกับระนาบของแผ่นฟิล์มมีค่าที่ต่ำกว่ามาก เมื่อเปรียบเทียบกับสนามแม่เหล็กที่ทำให้แมกนีไตเซชันเกิดการอึดตัวในทิศที่ตั้งฉากกับระนาบของแผ่นฟิล์ม ทำให้สามารถเข้าใจได้ว่า ที่สภาวะปราศจากสนามแม่เหล็กจากภายนอกนั้น โมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมโดยส่วนใหญ่ในฟิล์มตัวอย่างดังกล่าวมีการวางตัวอยู่ในทิศที่ขนานกับระนาบของแผ่นฟิล์ม

เมื่อพิจารณาวงฮิสเทอรีซิสของฟิล์มตัวอย่างแบบชั้นเดียวในภาพที่ 44 และ 45 พบว่าที่อุณหภูมิ 613 K และ 733 K นั้น ชั้นฟิล์ม FePd จะทำหน้าที่เป็นชั้นแม่เหล็กชนิดอ่อน และชั้นฟิล์ม CoFe จะทำหน้าที่เป็นชั้นแม่เหล็กชนิดแข็งของการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC ในฟิล์มตัวอย่าง FePd/(30 nm)/Ru/(0.8 nm)/CoFe(12 nm) เนื่องจากค่า H_c ของชั้น FePd ต่ำกว่าชั้น CoFe แต่ค่า H_c ของชั้นฟิล์มทั้งสองจะแตกต่างกันน้อยลงตามการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ เนื่องจากชั้น FePd มีสมบัติทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรชนิดแข็งที่สูงขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้าง สำหรับที่อุณหภูมิ 813 K นั้น พบว่า ชั้นฟิล์ม FePd จะมีค่า H_c สูงกว่าชั้นของ CoFe เล็กน้อย เนื่องจากชั้น FePd มีการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างมาเป็นโครงสร้างแบบ L1₀ ทำให้ที่สภาวะดังกล่าว ชั้นฟิล์ม FePd จะทำหน้าที่เป็นชั้นแม่เหล็กชนิดแข็ง และชั้นฟิล์ม CoFe จะทำหน้าที่เป็นชั้นแม่เหล็กชนิดอ่อน

สำหรับขนาดของค่า J ที่ลดลงในฟิล์มตัวอย่าง FePd/(30 nm)/Ru/(0.8 nm)/CoFe(12 nm) หลังจากที่ทำฟิล์มตัวอย่างดังกล่าวผ่านการอบความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613 K และ 733 K นั้น สาเหตุอาจเกิดจากการที่ชั้นฟิล์มของ FePd มีสมบัติทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรชนิดแข็งที่สูงขึ้น โดยสังเกตได้จากค่า H_c ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นโลหะผสมดังกล่าวสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงทิศทางของแมกนีโตเซชันจากการปลัดคันของระบบ QW ที่เกิดการสั่นพ้องที่ระดับ E_F ในชั้น Ru ได้มากขึ้น ส่งผลให้อันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น FePd และ CoFe มีความแรงที่อ่อนลง สำหรับที่อุณหภูมิ 813 K นั้น การที่ชั้นโลหะผสม FM ทั้งสองมีสมบัติทางแม่เหล็กแบบเฟอร์โรชนิดแข็งที่สูงและมีความใกล้เคียงกัน ทำให้ระบบ QW ที่ไม่เสถียรในชั้น Ru ไม่สามารถปลัดคันให้แมกนีโตเซชันของชั้น FePd และชั้น CoFe มีทิศทางที่สวนทางกันได้ อันตรกิริยาแบบ AFC จึงไม่เกิดขึ้นในฟิล์มตัวอย่างที่สภาวะดังกล่าว แต่ปรากฏอันตรกิริยาแบบ FC ขึ้นแทน

แต่เมื่อพิจารณาการให้ความร้อนกับฟิล์มตัวอย่าง FePd/Ru/CoFe ในงานวิจัยนี้ พบว่าเป็นการให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่พลังงานความร้อนดังกล่าวมีค่าสูงพอที่จะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม จากงานวิจัยของ Wang, Xu, Liang, and Zhangs (2011) พบว่า เกิดการแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม FePt และ Ru ขึ้นในฟิล์มบางแบบ 3 ชั้น FePt/Ru/Fe ที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนที่สภาวะอุณหภูมิ 823 K และเนื่องจาก FePt และ FePd มีลักษณะทางโครงสร้างที่เหมือนกัน แต่ FePd มีอุณหภูมิของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอะตอมในโครงร่างผลึกที่ต่ำกว่า FePt อาจมีผลทำให้ ฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่ผ่านการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613 K, 733 K และ 813 K นั้น เกิดการแพร่กระจายของอะตอมบริเวณรอยต่อระหว่างชั้นฟิล์ม FePd และ Ru ขึ้น และทำให้ความหนาของชั้น Ru ลดลง ในขณะเดียวกัน จากผลงานวิจัยที่

การศึกษาพฤติกรรมของการเกิดอันตรกิริยาแบบ AFC ในฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ด้วยการวัด GMR แบบ CIP นั้น แสดงผลอยู่ในรูปของค่า $MR\%$ ดังภาพที่ 48 จากการวิเคราะห์พบว่า ในสถานะที่ขนาดของ H มีค่าสูงนั้น M_1 และ M_2 ของชั้นงานตัวอย่างมีทิศทางเดียวกัน ทำให้อิเล็กตรอนตัวนำที่เคลื่อนที่เข้าสู่ชั้นงานตัวอย่างมีการกระเจิงที่ต่ำ ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นงานที่วัดได้มีค่าน้อย และเมื่อลดขนาดของสนาม H ลง พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้ายังคงมีค่าใกล้เคียงกับค่าเดิมและเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เนื่องจากการบิดตัวกลับของ M_1 เพียงเล็กน้อย แต่ในสถานะที่สนามแม่เหล็กที่จ่ายให้กับชั้นงานมีค่าต่ำ พบว่าค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วอันเนื่องมาจากการบิดตัวกลับอย่างฉับพลันของ M_1 ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาแบบ AFC ที่เกิดขึ้นระหว่างชั้น FePd และ CoFe โดยทำให้ M_1 มีทิศทางการวางตัวที่ตรงกันข้ามกับทิศของ M_2 การสวนทางกันของแมกนีโตเซชันทั้งสอง ทำให้อิเล็กตรอนตัวนำที่ผ่านเข้าไปในฟิล์มตัวอย่างมีการกระเจิงที่สูงขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานไฟฟ้าของชั้นงานมีค่าเพิ่มขึ้น และเมื่อลดการจ่ายสนามแม่เหล็กลงจนถึง 0 mT พบว่าฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง และที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613 K และ 733 K นั้น มีค่า $MR\%$ สูงที่สุดและมีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.24% (AP), 0.26% (613 K) และ 0.28% (733 K) ตามลำดับ สำหรับในส่วนของฟิล์มตัวอย่างที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนไปถึงอุณหภูมิ 813 K นั้น พบว่าค่า $MR\%$ สูงสุดอยู่ที่ 0.17% ซึ่งมีค่าต่ำกว่าแตกต่างจาก $MR\%$ ของชั้นงานตัวอย่างที่สถานะอุณหภูมิอื่น ๆ โดยสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์สมบัติทางแม่เหล็กที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งระบุว่าอันตรกิริยาแบบ AFC จะปรากฏขึ้นในฟิล์มตัวอย่าง FePd(30 nm)/Ru(0.8 nm)/CoFe(12 nm) ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิห้อง และที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 613 K และ 733 K แต่จะถูกทำให้สลายไป เมื่อให้ความร้อนไปจนถึงอุณหภูมิ 813 K