บทที่ 5
สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้สร้างโปรแกรมเพื่อการการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลของสปินไอซิงที่มีการแพร่ในสามมิติ และศึกษาผลของการแพร่ที่มีต่อคุณสมบัติทางแม่เหล็กของระบบ โดยใช้การเดินแบบสุ่มเพื่อจำลองสถานการณ์การแพร่ของอนุภาคแม่เหล็กและใช้ศักย์ยูคาวาในการคำนวณอันตรกิริยาที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างของอนุภาคสปินไอซิง ซึ่งได้ผลการวิจัยเป็นดังนี้

5.1 สรุปผลของการจำลองสถานการณ์การแพร่ของอนุภาคแม่เหล็กที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่อระบบ

การจำลองสถานการณ์ของระบบการแพร่ของอนุภาคแม่เหล็กที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับระบบ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์อยู่ในช่วง 0.05 K/k_B ถึง 0.40 K/k_B เพื่อศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กและสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคแม่เหล็กที่แพร่ ซึ่งขึ้นกับอุณหภูมิและจำนวนอนุภาคในระบบได้ผลลัพธ์คือ

1) ที่อุณหภูมิต่ำ อนุภาคจะเกาะตัวกันแน่นมีสัดส่วนปริมาตรเข้าใกล้ 1 การเกาะกลุ่มของอนุภาคมีปริมาตรใกล้เคียงกับปริมาตรที่เล็กที่สุดที่เป็นไปได้ สภาพแม่เหล็กของระบบเข้าใกล้ 1 แสดงว่าสปินของอนุภาคส่วนใหญ่ชี้ไปทางทิศเดียวกัน
2) อุณหภูมิที่กราฟสัดส่วนปริมาตรกับอุณหภูมิมีความชันสูงสุด สภาพแม่เหล็กเริ่มลดลง แสดงว่า ณ อุณหภูมิที่อนุภาคเริ่มมีการกระจายออกจะส่งผลให้ระบบมีสภาพแม่เหล็กลดลงเนื่องจาก แรงแม่เหล็กระหว่างอนุภาคอ่อนลงและไม่สามารถเหนี่ยวนำสปินของอนุภาคที่หลุดออกไปได้
3) อุณหภูมิที่กราฟสัดส่วนปริมาตรกับอุณหภูมิ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ กราฟของสภาพแม่เหล็กกับอุณหภูมิมีความชันมากที่สุดเป็นอุณหภูมิที่สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กมีค่าสูงสุด ซึ่งเป็นอุณหภูมิวิกฤต (T_c)

4) ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต (T_c) อนุภาคจะกระจายออกและสภาพแม่เหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากอนุภาคไม่เกาะกันทำให้แรงเหนี่ยวนำลดลง อนุภาคแต่ละตัวมีการกลับทิศสปินอย่างอิสระ ส่งผลให้สภาพแม่เหล็กมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

จำนวนของอนุภาคในระบบที่เพิ่มขึ้นทำให้อุณหภูมิวิกฤตมีค่าเพิ่มขึ้น จากผลของการจำลองสถานการณ์ที่มีจำนวนอนุภาคในระบบเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ของ อุณหภูมิวิกฤตกับจำนวนอนุภาคในระบบ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวิกฤตคือ $T_c = 0.0016N + 0.215$ ซึ่งมีค่า R-square เท่ากับ 0.9412 ซึ่งมีประโยชน์ในการคาดคะเนอุณหภูมิวิกฤตและสมบัติทางแม่เหล็กของระบบที่มีจำนวนอนุภาคมากขึ้นได้

5.2 สรุปผลของการจำลองสถานการณ์การแพร่ของอนุภาคแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอกระบบ

สืบเนื่องมาจากการจำลองสถานการณ์ของระบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำอุณหภูมิที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์ที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมาเกี่ยวข้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าเท่ากับ และสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัวและมีอุณหภูมิวิกฤตเท่ากับ 0.25 K/k_B และความถี่ที่ใช้ในการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.002 MCS^{-1} 0.02 MCS^{-1} และ0.2 MCS^{-1} เพื่อศึกษาอุณหภูมิและความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีผลต่อวงรอบฮิสเทอรีซิสได้ผลลัพธ์ดังนี้

5.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อระบบและวงรอบฮิสเทอรีซิส

1) อุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ทำให้สปินของอนุภาคกลับทิศได้ยาก และอนุภาคจะอยู่ชิดกันโดยพยายามเหนี่ยวนำให้สปินไปในทิศเดียวกัน ส่งผลให้สภาพแม่เหล็กของระบบมีการเปลี่ยนแปลงน้อย อาจทำให้เกิดลักษณะของวงรอบฮิสเทอรีซิสที่ไม่สมมาตร
2) อุณหภูมิที่มีค่าเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต จะเกิดเป็นวงรอบฮิสเทอรีซิสที่มีความสมมาตรและสภาพแม่เหล็กของระบบสามารถไปถึงจุดอิ่มตัวได้ถ้าความถี่ไม่สูงเกินไป แต่เนื่องจากเป็นอุณหภูมิที่อนุภาคแตกออกจากกัน แรงเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กของแต่ละอนุภาคจะน้อย ทำให้การเปลี่ยนแปลงไปตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้ง่าย
3) อุณหภูมิที่มีค่าสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต อนุภาคจะแตกออกจากกัน แรงเหนี่ยวนำทางแม่เหล็กของแต่ละอนุภาคอ่อนลง และอุณหภูมิที่สูงทำให้พลังงานในการกลับทิศของสปินสูงขึ้นทำให้อนุภาคบางตัวมีทิศของสปินในด้านตรงกันข้ามกับทิศของสนามแม่เหล็กในขณะที่สนามแม่เหล็กมีค่าสูงสุด ทำให้สภาพแม่เหล็กไปไม่ถึงจุดอิ่มตัว

5.2.2 ผลของความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อระบบและวงรอบฮิสเทอรีซิส

ความถี่มีผลต่อการตามทันกันของสภาพแม่เหล็กของระบบที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก ยิ่งความถี่ของสนามแม่เหล็กมาก การตามของสภาพแม่เหล็กจะลดลงทำให้ความต่างเฟสมากขึ้น และเมื่อความถี่เพิ่มถึงค่าหนึ่ง ความต่างเฟสจะมากจนทำให้รูปร่างของวงรอบฮิสเทอรีซิสไม่สมบูรณ์และการเปลี่ยนแปลงของสภาพแม่เหล็กจะไปไม่ถึงจุดอิ่มตัว

5.3 ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาที่ผ่านมาจะพบว่ามีสิ่งน่าสนใจที่ควรนำเสนอเป็นข้อเสนอแนะดังต่อไปนี้

1) การจำลองสถานการณ์ยิ่งมีการจำลองซ้ำมากๆและนำผลลัพธ์ที่ได้มาเฉลี่ย จะยิ่งทำให้ความผิดพลาดที่เกิดจากการจำลองสถานการณ์ลดลง
2) กระบวนการแพร่ของอนุภาคแม่เหล็กที่ใช้การเดินแบบสุ่มสามารถพัฒนาให้เหมือนจริงได้มากขึ้นโดยการเพิ่มปัจจัยทางด้านมวลและสมบัติทางกายภาพของตัวกลางที่วัตถุมีการแพร่ ซึ่งจะทำให้การจำลองสถานการณ์สมจริงมากขึ้น
3) ใช้แบบจำลองของไฮเซนเบิร์กแทนแบบจำลองของไอซิงเพื่อให้ลักษณะการเรียงทิศทางสปินของอนุภาคและอัตรกิริยาต่อกันเป็นไปตามความเป็นจริงมากขึ้น
4) เมื่อศักย์ยูดาวาเสมือนมีแนวโน้มของผลลัพธ์การจำลองสถานการณ์เหมือนกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones ดังนั้นถ้าสามารถใช้ศักย์ที่เหมาะสมเพื่อให้การจำลองเป็นไปความเป็นจริงมากขึ้น ซึ่งอาจเป็นศักย์ที่คำนวณได้จากการทดลองจริง
5) ในกระบวนการจำลองสถานการณ์อาจเพิ่มเวลาในการจำลองสถานการณ์เพื่อสังเกตพฤติกรรมและสมบัติทางแม่เหล็กของสารตามเวลา มีการปรับสัดส่วนการจำลองสถานการณ์ของการเคลื่อนที่และการกลับทิศสปินให้เป็นไปตามความเป็นจริง โดยใช้อัตราการเคลื่อนที่และอัตราการกลับสปินในการหาสัดส่วนการเคลื่อนที่ต่อการกลับทิศ
6) ปรับปรุงระบบให้สามารถจำลองสถานการณ์ของระบบที่มีจำนวนมากได้เนื่องจากการใช้งานจริงนั้นจะต้องมีอนุภาคแม่เหล็กอย่างน้อย 300 ตัว
7) ศึกษาตัวแปรพลังงานที่อยู่ในศักย์ที่ใช้ในการแพร่และการกลับทิศของสปิน