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

เอกสารอ้างอิง

1. *คณะแพทย์ศาสตร์ศิริราชพยาบาล. 2553. "สถิติโรคมะเร็ง." [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.si.mahidol.ac.th/Th/department/cancer/album_srca/stat.asp (8 สิงหาคม 2553).*

2. Ito A., Shinkai M., Honda H., Kobayashi T. 2005. Medical application of functionalized magnetic nanoparticle. *J. Biosci. Bioeng*; 100: 1-11.

3. Jordan A., Scholz R., Maier-Hauff K., Johannsen M., Wust P., Nadobny J., Schirra H., Schmidt H., Deger S., Loening S., Lanksch W., Felix R. 2001. Presentation of a new magnetic field therapy system for the treatment of human solid tumors with magnetic fluid hyperthermia. *J. Mater*; 225: 118-126.

4. Müller S. 2009. Magnetic fluid hyperthermia therapy for malignant brain tumors an ethical discussion. *Nanomedicine. NBM*; 5: 387-393.

5. Binder K., and Heermann D.W. 2002. *Monte Carlo simulation in statistical physics.* Germany: Springer – Verlag.

6. Laosiritaworn Y. 2008. Magnetic hysteresis properties in dilute Ising ultra-thin film: Monte Carlo investigation. *Adv. Mater. Res*; 55–57: 385–388.

7. Laosiritaworn Y., Poulter J., Staunton J. B. 2004. Magnetic properties of Ising thin films with cubic lattices. *Phys. Rev. B*; 70: 104413.

8. Metropolis N. W., Rosenbluth A., Rosenbluth M. N., Teller A. H., Teller E. 1953. Equation of state calculation by fast computing machines. *J. Chem. Phys.*; 21(6): 1087–1092.

9. Newman M. E. J., and Barkema G. T. 1999. *Monte Carlo methods in statistical physics.* New York: Oxford University Press.

10. Ferreira A. L., Korneta W. 1998. Monte Carlo study of the magnetic critical properties of a two-dimensional Ising fluid. *Phys. Rev. E.*; 57: 3107-3114.

11. Chakrabarti B. K., Acharyya M. 1999. Dynamic transitions and hysteresis. *Rev. Mod. Phys.*; 71: 847.

12. Uebing C., Gomer R. 1995. Surface diffusion in the presence of phase transitions Monte Carlo studies of a simple lattice gas model. *Surf. Sci.*; 331-333: 930-936.

13. Lomba E., Weis J. J., Almarza N. G., Bresme F., Stell G. 1994. Phase transitions in a continuum model of the classical Heisenberg magnet: The ferromagnetic system. *Phys. Rev. E.*; 49: 5169-5178.

14. Heringa J. R., Blöte H. W. J. 1998. Cluster dynamics and universality of Ising lattice gases. *Physica. A.*; 251: 224-234.

15. Sompet P. 2005. The effect of magnetic field on Hysteresis properties of magnetic Ising thin-flim vis Monte Carlo simulation. *Thesis for Bachelor of Science, Chiang Mai University.*

16. Kelton D.W., Sadowski R.P., Sturrock D.T. 2003. *Simulation with Arena-3rd ed.*, International Edition, McGraw-Hill, The McGraw-Hill Company, Inc.

17. Metropolis N., Ulam S. 1949. The Monte Carlo Method. *J. Am. Stat. Assoc.*; 44: 335.

18. Soshin C. 1997. *Physics of Ferromagnetism.* New York: Oxford University Press

19. *Wikipedia The Free Encyclopedia. 2010. "Hideki Yukawa." [Online]. Avilable http://en.wikipedia.org/wiki/Hideki_Yukawa (1 August 2010).*

20. *Willkommen. 2010. "General Information." [Online]. Avilable http://www.kph.tuwien.ac.at/element/start_e.html (1 August 2010).*

21. *Wikipedia The Free Encyclopedia. 2010. "Bethe-Slater Curve." [Online]. Avilable http://en.wikipedia.org/wiki/Bethe-Slater_curve (8 August 2010)*

22. *Physics Forums. 2010. "Gas considered as lots of molecules." [Online]. Avilable http://www.physicsforums.com/showthread.php?t=350045 (1 August 2010).*

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ – สกุล นายจุฑารพ เรืองยศ

วัน เดือน ปีเกิด 3 ตุลาคม 2528

ประวัติทางการศึกษา

- สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษา โรงเรียนปรินส์รอยแยลส์วิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2540
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น โรงเรียนปรินส์รอยแยลส์ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2543
- สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย โรงเรียนบุญวาทย์วิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดลำปาง ปีการศึกษา 2546
- สำเร็จศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ ปีการศึกษา 2550

ทุนการศึกษา

- ระดับปริญญาตรี ได้รับทุนโครงการพัฒนากำลังคนด้านวิทยาศาสตร์ (ทุนเรียนดีวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย) จากแหล่งทุนสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ปี พ.ศ. 2547-2550 ระยะเวลา 4 ปี
- ระดับปริญญาโท ได้รับทุนนักศึกษาช่วยวิจัยจาก ดร. ภูษณ ปรีย์มาโนช ปี พ.ศ. 2550-2552 ระยะเวลา 2 ปี และ จากแหล่งทุนศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) ปี พ.ศ. 2552-2553 ระยะเวลา 1 ปี 6 เดือน