ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242207

การจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลของสปินไอซิงใน 3 มิติ ด้วยเทคนิคการเดินแบบสุ่มในศักย์ยูคาวาเสมือน

จุฑารพ เรืองยศ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กันยายน 2553

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
242207

การจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลของสปินไอซิงใน 3 มิติ ด้วยเทคนิคการเดินแบบสุ่มในศักย์ยูคาวาเสมือน

จุฑารพ เรืองยศ

วิทยานิพนธ์นี้เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัยเพื่อเป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
กันยายน 2553

การจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลของสปินไอซิงใน 3 มิติ ด้วยเทคนิคการเดินแบบสุ่มในศักย์ยูคาวาเสมือน

จุฑารพ เรืองยศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
รองศาสตราจารย์ ดร. สุพล อนันตา

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยงยุทธ เหล่าศิริถาวร

.....กรรมการ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตติกร ยิ้มนิรัญ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

.....
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยงยุทธ เหล่าศิริถาวร

10 กันยายน 2553

© ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้ เนื่องมาจากความกรุณาและการสนับสนุนอย่างสูง จาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยงยุทธ เหล่าศิริถาวร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือ ให้ความรู้ คำแนะนำ ตลอดจนตรวจแก้ข้อบกพร่องต่างๆ จนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์ ทางผู้เขียนจึงขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. สุพล อนันตา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยงยุทธ เหล่าศิริถาวร และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัตติกร ยิ้มนิรัญ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่ได้กรุณาให้ความรู้ คำปรึกษา แนะแนวทางการวิจัย และการแก้ไขปัญหาต่างๆ รวมทั้งกรุณาตรวจแก้ไขข้อผิดพลาดต่างๆ ในวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำต่างๆ เพื่อใช้ในการศึกษาและการทำวิจัยของผู้เขียน จนสำเร็จลุล่วง

ขอขอบพระคุณ ดร. ภูษณ ปรีย์มาโนช และศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP) ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนการศึกษาและวิจัย ทำให้ผู้เขียนมีโอกาสได้รับการศึกษา และความร่วมมือทางวิชาการ รวมทั้งขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่สำหรับทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิชาการระดับบัณฑิตศึกษาทำให้ผู้เขียนได้รับองค์ความรู้ใหม่ๆ

ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ตลอดจนขอขอบคุณญาติพี่น้องทุกคนที่ให้การสนับสนุนส่งเสริมในการศึกษาของผู้เขียนอย่างเต็มที่เสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ขอขอบคุณ นาย ธีรวัฒน์ ม่อนหน่อ นางสาว อาจารีย์ ทองอ่อน และนางสาวกนกวรรณ กรรเชียง ที่คอยช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

สุดท้ายนี้ หากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีข้อผิดพลาดประการใด ผู้เขียนขอน้อมรับและขออภัยอย่างยิ่งไว้ ณ โอกาสนี้ และผู้เขียนหวังว่าวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะเป็นประโยชน์แก่ผู้ที่สนใจศึกษาในเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จุฑารพ เรืองยศ

ชื่อเรื่องวิทยานิพนธ์ การจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลของสปินไอซิงใน 3 มิติด้วยเทคนิคการเดินแบบสุ่มในศักย์ยูคาวาเสมือน

ผู้เขียน นายจุฑารพ เรืองยศ

ปริญญา วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยงยุทธ เหล่าศิริถาวร

บทคัดย่อ

242207

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของแก๊สสปินไอซิง โดยการสร้างโปรแกรมการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลใน 3 มิติด้วยเทคนิคการเดินแบบสุ่มในศักย์ยูคาวาเสมือน สปินไอซิงมีอันตรกิริยาต่อกันขึ้นกับศักย์ยูคาวาเสมือนและระเบียบขั้นตอนเมโทรโปลิสในการปรับเปลี่ยนระบบสปินบนปริภูมิต่อเนื่อง โดยปริมาตรของแก๊สไอซิง และสมบัติทางแม่เหล็กได้แก่ สภาพแม่เหล็ก และ สภาพความไวต่อสนามแม่เหล็ก จะถูกศึกษาเป็นฟังก์ชันของอุณหภูมิและสนามภายนอก ผลการทดลองพบว่าที่อุณหภูมิต่ำ เมื่อเวลาผ่านไปอนุภาคสปินไอซิงจะอยู่กันชิดกันและมีค่าสภาพแม่เหล็ก เนื่องจากระบบประพฤติตัวแบบแม่เหล็กเฟร์โร อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนถึงระดับหนึ่ง ระบบจะมีสมบัติเหมือนแม่เหล็กพาราเนื่องจากสภาพแม่เหล็กลู่เข้าสู่ศูนย์เมื่อเวลาผ่านไป อันเป็นผลมาจากการแตกออกจากกันของสปินซึ่งจะไปลดอันตรกิริยาทางแม่เหล็กเฟร์โรของสปิน สำหรับระบบการจำลองสถานการณ์ที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกนั้น เมื่ออุณหภูมิและความถี่ของสนามแม่เหล็กมีค่าน้อย รูปแบบวงรอบฮิสเทอรีซิสจะเป็นแบบแม่เหล็กเฟร์โรซึ่งมีความกว้างและแผ่ออก และที่อุณหภูมิที่สูงวงรอบฮิสเทอรีซิสจะเป็นแบบแม่เหล็กพาราและเล็กลง จึงพิสูจน์ได้ว่าคุณสมบัติของวงรอบฮิสเทอรีซิสสามารถควบคุมได้โดยการปรับเปลี่ยนอุณหภูมิและความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอก

Thesis Title Monte Carlo Simulation of 3-Dimensional Ising Spin via Random Walk Technique in Yukawa-Like Potential

Author Mr. Jutarop Reungyos

Degree Master of Science (Applied Physics)

Thesis Advisor Asst. Prof. Dr. Yongyut Laosiritaworn

ABSTRACT

242207

This research investigated the magnetic properties of Ising spin gas using Monte Carlo Simulation and Random Walk techniques in 3-dimensional space. The Ising spins interact among themselves depend on Yukawa-like potential and Metropolis algorithm which is used to update spin system on the continuous space. The volume of Ising gas and magnetic properties such as magnetization and magnetic susceptibility were investigated as functions of temperature and external field. At low temperatures, the Ising spins stayed close when time passed where finite magnetization was found, resulting in ferromagnetic behavior. However, at high enough temperatures, magnetic properties were found to be paramagnetic type because the magnetization tended to cease when the time passed. This is due to role of diffusion that causes the spins to disperse and reduces the ferromagnetic interaction among spins. For the simulation system with external magnetic field, at the low temperature and frequency ranges the hysteresis loops were ferromagnetic, broad shaped and expanded, and at the high temperature range, the hysteresis loop was paramagnetic and reduced. This is the proof that the properties of hysteresis loop can be controlled by varying temperature and external magnetic frequency.

สารบาญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ค
บทคัดย่อ(ภาษาไทย)	ง
บทคัดย่อ(ภาษาอังกฤษ)	จ
สารบาญตาราง	ฌ
สารบาญภาพ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
บทที่ 2 แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สมบัติทั่วไปทางแม่เหล็ก	5
2.2 แบบจำลองไอซิง	12
2.3 การจำลองสถานการณ์	15
2.3.1 การจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล	15
2.3.2 การสุ่มตัวอย่างสำคัญ	16
2.3.3 วิธีเมโทรโปลิส	17
2.4 เลขสุ่ม	18
2.5 การเดินแบบสุ่ม	19
2.6 ศักย์ยูคาวา	22
2.7 สมการฮามิลโทเนียน	24
2.7.1 พลังงานการย้ายตำแหน่งของอนุภาค	24
2.7.2 พลังงานในการเปลี่ยนแปลงสมบัติของสปินแม่เหล็ก	25

หน้า

2.8 การจำลองสถานการณ์ 26
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 27

บทที่ 3 ระเบียบวิจัย 29
3.1 การจำลองสถานการณ์การแพร่ของอนุภาคแม่เหล็ก 29
3.1.1 การจำลองสถานการณ์ของการเดินแบบสุ่มของอนุภาค 29
3.1.2 การจำลองสถานการณ์ของการกลับสปินของอนุภาค 32
3.2 การหาพื้นที่ใต้กราฟของวงรอบฮิสเทอรีซิสที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลง 35
3.3 การออกแบบผังงานของโปรแกรมการจำลองสถานการณ์ในงานวิจัย 36
3.3.1 การจำลองสถานการณ์ที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับระบบ 36
3.3.2 การจำลองสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็ก
ภายนอกระบบ 38
3.4 การเขียนโปรแกรมการจำลองสถานการณ์ 40
3.4.1 โมดูลการสร้างประเภทของข้อมูลที่ใช้ในการเก็บคุณสมบัติของอนุภาค 40
3.4.2 โมดูลการสร้างอนุภาค 41
3.4.3 โมดูลการคำนวณศักย์ยูคาวา 42
3.4.4 โมดูลการจำลองสถานการณ์การเดินแบบสุ่ม 43
3.4.5 โมดูลการหาผลต่างพลังงาน 44
3.4.6 โมดูลการจำลองสถานการณ์การกลับทิศของสปิน 45
3.4.7 โมดูลการคำนวณคุณสมบัติทางแม่เหล็ก และสัดส่วนปริมาตร 46
3.4.8 โมดูลการจำลองสถานการณ์โดยรวม 47
3.4.9 โมดูลการทดลองโดยกำหนดเงื่อนไขทั้งหมด 48
3.4.10 โมดูลการสร้างกราฟฮิสเทอรีซิส 50
3.5 การทดลองโดยการจำลองสถานการณ์ภายใต้เงื่อนไขต่างๆ 51
3.5.1 การทดลองจำลองสถานการณ์ที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก
มากระทำกับระบบ 51
3.5.2 การทดลองจำลองสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็ก
ภายนอกระบบ 52

หน้า

บทที่ 4 ผลการทดลอง 53

4.1 ระบบการแพร่อนุภาคแม่เหล็กที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ 53

4.2 ระบบการแพร่ของอนุภาคแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอก 60

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 70

5.1 สรุปผลของการจำลองสถานการณ์การแพร่ของอนุภาคแม่เหล็ก
ที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่อระบบ 70

5.2 สรุปผลของการจำลองสถานการณ์การแพร่ของอนุภาคแม่เหล็ก
ที่มีการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอกระบบ 71

5.2.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อระบบและวงรอบฮิสเทอรีซิส 71

5.2.2 ผลของความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกที่มีต่อระบบ
และวงรอบฮิสเทอรีซิส 72

5.3 ข้อเสนอแนะ 72

เอกสารอ้างอิง 73

ประวัติผู้เขียน 77

สารบาญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การจำแนกชนิดวัตถุตามสภาวะแม่เหล็ก	8
4.1 พื้นที่ใต้กราฟวงรอบฮิสเทอรีซิสที่ความถี่ละอุณหภูมิต่างๆ	65

สารบาญภาพ

รูป		หน้า
1.1	กราฟแสดงจำนวนผู้ป่วยโรคมะเร็งที่พบบ่อย 5 อันดับของโรงพยาบาลศิริราช ระหว่าง ค.ศ.1998-2007	1
1.2	แสดงวิธีการรักษาเนื้องอกโดยการฉีดสารแม่เหล็ก	2
2.1	แสดงการโคจรรอบนิวเคลียสของอิเล็กตรอนเมื่อ q_e คือขนาดประจุของอิเล็กตรอน และ $\vec{m}$ คือ เวกเตอร์แสดงโมเมนต์แม่เหล็กของอิเล็กตรอน	5
2.2	แสดงการจัดเรียงตัวของโดเมนที่ปราศจาก อิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก(ก) และการจัดเรียงตัวของโดเมนที่ได้รับอิทธิพลของสนามแม่เหล็กภายนอก(ข),(ค)	6
2.3	แสดงการจัดเรียงตัวของโดเมนภายในสารแม่เหล็กขณะอยู่ภายใน สนามแม่เหล็กภายนอก	9
2.4	แสดงการจัดเรียงตัวของโดเมนภายในสารแม่เหล็กขณะอยู่ภายใน สนามแม่เหล็กภายนอก และ การเปลี่ยนแปลงของวงรอบฮิสเทอรีซิส	10
2.5	แสดงผลของอุณหภูมิต่อวงรอบฮิสเทอรีซิสของแม่เหล็กเฟร์โร	11
2.6	แสดงรูปแบบวงรอบฮิสเทอรีซิสที่เหมาะสมกับการใช้งานในอุปกรณ์ชนิดต่างๆ	12
2.7	แสดงการจัดเรียงตัวของสปินตามแบบจำลองไอซิง ในสองมิติ (ก) โดยลูกศรชี้ขึ้นแทนสปินที่มีทิศชี้ขึ้น ส่วนลูกศรที่ชี้ลงนั้นแทนสปิน ที่มีทิศชี้ลงและ(ข)การแทนค่าของสปินด้วยตัวเลข +1 และ -1 โดย พื้นที่ว่างเป็นบริเวณที่สปินสามารถเคลื่อนที่ได้	13
2.8	แสดงแบบจำลองไอซิงในปริภูมิต่อเนื่อง	14
2.9	(ซ้าย) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าตัวเลขสุ่มตัวถัดไป (X_{n+1}) กับ ค่าตัวเลขสุ่มตัวปัจจุบัน (X_n) และ (ขวา) กราฟแสดงจำนวนเลขสุ่ม ในแต่ละช่วงตัวเลข แสดงโอกาสเกิดเลขสุ่มที่มีค่าใกล้เคียงกัน	19
2.10	แสดงทิศทางที่เป็นไปได้ในการเดินแบบสุ่ม	19
2.11	แสดงการเดินแบบสุ่มใน 2 มิติ	20

รูป		หน้า
2.12	แสดงการกำหนดขนาดและทิศทางการเคลื่อนที่ใน 3 มิติตามพิกัดทรงกลม	21
2.13	ฮิเดกิ ยูคาวา นักฟิสิกส์ รางวัลโนเบลผู้เสนอแนวคิดศักย์ยูคาวา	22
2.14	แสดง Bethe-Slater curve	23
2.15	กราฟแสดง (ก) ศักย์ยูคาวาของศักย์ระหว่างนิวคลิออนสองตัวและ (ข) ศักย์คูลอมป์ของอะตอมที่เป็นกลางสองอะตอม	24
2.16	แสดงผังงานของลำดับการทำงานของการจำลองสถานการณ์	27
3.1	แสดงขั้นตอนที่ 1 การสุ่มเลือกอนุภาคเพื่อใช้ในการจำลองสถานการณ์การเดินแบบสุ่ม	30
3.2	แสดงขั้นตอนที่ 2 พิจารณาพลังงานของอนุภาคในตำแหน่งเดิม ในการจำลองสถานการณ์การเดินแบบสุ่ม	30
3.3	แสดงขั้นตอนที่ 3 การสุ่มตำแหน่งใหม่ของอนุภาคในการจำลอง สถานการณ์การเดินแบบสุ่ม	31
3.4	แสดงขั้นตอนที่ 4 พิจารณาพลังงานของอนุภาคในตำแหน่งใหม่ ในการจำลองสถานการณ์การเดินแบบสุ่ม	31
3.5	แสดงขั้นตอนที่ 5 พิจารณาความน่าจะเป็นของการเปลี่ยนตำแหน่ง ใหม่ของอนุภาค ในการจำลองสถานการณ์การเดินแบบสุ่ม	32
3.6	แสดงขั้นตอนที่ 1 การสุ่มเลือกสปินของอนุภาคเพื่อใช้ในการจำลอง สถานการณ์การกลับทิศสปิน	33
3.7	แสดงขั้นตอนที่ 2 พิจารณาพลังงานของสปินตัวอื่นที่มีผลต่อสปิน ที่ถูกเลือกในการจำลองสถานการณ์กลับทิศสปิน	33
3.8	แสดงขั้นตอนที่ 3 พิจารณาพลังงานเมื่อมีการกลับทิศของสปินใน การจำลองสถานการณ์การกลับทิศสปิน	34
3.9	แสดงขั้นตอนที่ 4 พิจารณาความน่าจะเป็นในการกลับทิศของสปิน	34
3.10	แสดงการสร้างพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูเพื่อหาพื้นที่ใต้กราฟของวงรอบฮิสเทอรีซิส	35
3.11	แสดงผังงานการจำลองสถานการณ์ที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมา	37
3.12	แสดงผังงานการจำลองสถานการณ์ที่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่อระบบ	39

รูป		หน้า
4.1	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนปริมาตร (Volume Ratio) กับ อุณหภูมิในช่วง 0.05 K/k_B ถึง 0.40 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	54
4.2	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กของระบบ (Magnetization) กับอุณหภูมิในช่วง 0.05 K/k_B ถึง 0.40 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	55
4.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของระบบ (Magnetic susceptibility) กับ อุณหภูมิในช่วง 0.05 K/k_B ถึง 0.40 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	56
4.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวิกฤตกับจำนวนอนุภาคในระบบของระบบที่ใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	57
4.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนปริมาตร (Volume ratio) กับ อุณหภูมิในช่วง 0.05 K/k_B ถึง 0.40 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones	58
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กของระบบ (Magnetization) กับอุณหภูมิในช่วง 0.05 K/k_B ถึง 0.40 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones	58
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของระบบ (Magnetic susceptibility) กับ อุณหภูมิในช่วง 0.05 K/k_B ถึง 0.40 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones	59
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวิกฤตกับจำนวนอนุภาคในระบบของระบบที่ใช้ศักย์ของ Lennard-Jones	60
4.9	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ0.002 MCS^{-1},0.02 MCS^{-1} และ0.2 MCS^{-1}ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ 0.01 K/k_B โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	61

รูป		หน้า
4.10	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ0.002 MCS^{-1},0.02 MCS^{-1} และ0.2 MCS^{-1}ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ 0.25 K/k_B โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	62
4.11	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ0.002 MCS^{-1},0.02 MCS^{-1} และ0.2 MCS^{-1}ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ 0.6 K/k_B โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	63
4.12	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ0.1 K/k_B, 0.25 K/k_B และ0.6 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ 0.002 MCS^{-1} โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	64
4.13	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ0.1 K/k_B, 0.25 K/k_B และ0.6 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ 0.02 MCS^{-1} โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	64
4.14	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ0.1 K/k_B, 0.25 K/k_B และ0.6 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ 0.2 MCS^{-1} โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน	65
4.15	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ0.002 MCS^{-1},0.02 MCS^{-1} และ0.2 MCS^{-1}ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ 0.05 K/k_B โดยใช้ศักย์ Lennard-Jones	66
4.16	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ0.002 MCS^{-1},0.02 MCS^{-1} และ0.2 MCS^{-1}ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ 0.10 K/k_B โดยใช้ศักย์ Lennard- Jones	67
4.17	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ0.002 MCS^{-1},0.02 MCS^{-1} และ0.2 MCS^{-1}ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ 0.15 K/k_B โดยใช้ศักย์ Lennard- Jones	67
4.18	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ0.05 K/k_B, 0.10 K/k_B และ0.15 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ 0.002 MCS^{-1} โดยใช้ศักย์ Lennard- Jones	68

รูป		หน้า
4.19	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ0.05 K/k_B, 0.10 K/k_B และ0.15 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ 0.02 MCS^{-1} โดยใช้ศักย์ Lennard-Jones	68
4.20	กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ0.05 K/k_B, 0.10 K/k_B และ0.15 K/k_B ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ 0.2 MCS^{-1} โดยใช้ศักย์ Lennard- Jones	69