

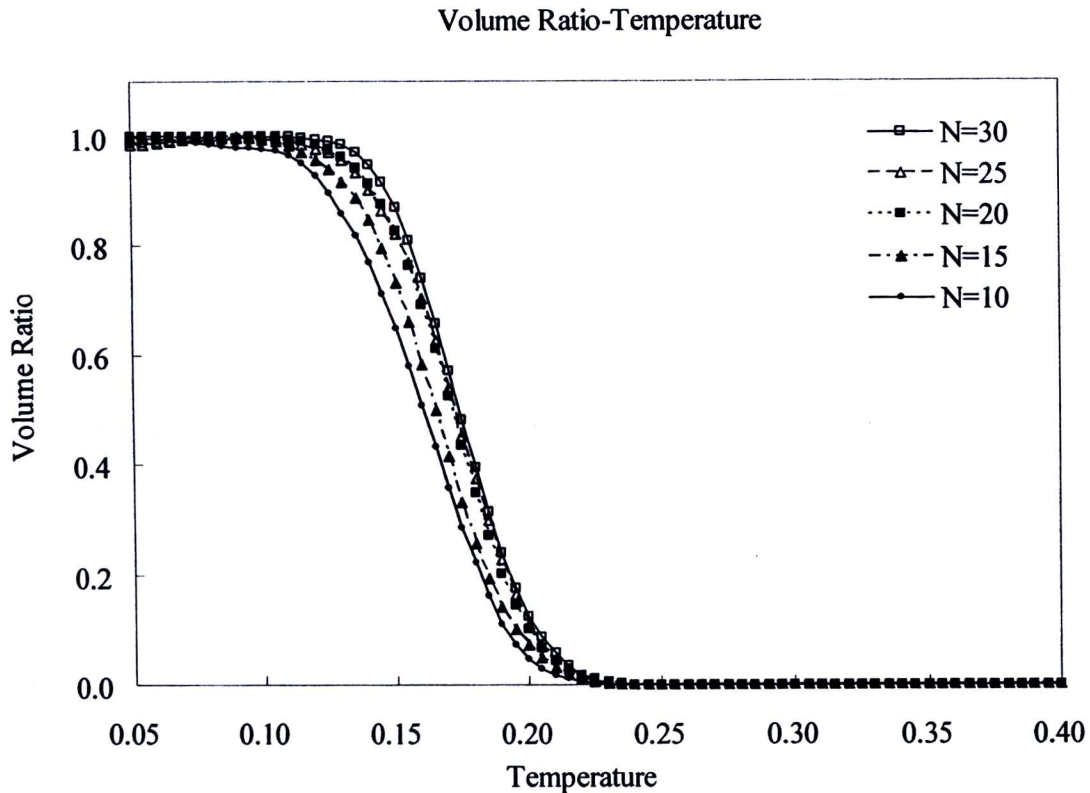
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

ในบทนี้เป็นการนำเสนอถึงผลของการจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โลของสปริงไอซิงที่มีการแพร่ในปริภูมิ 3 มิติซึ่งอันตรกิริยาของอนุภาคทั้งทางแม่เหล็กและแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคในระบบขึ้นอยู่กับศักย์ยูคาวา ระบบที่ศึกษามี 2 รูปแบบได้แก่รูปแบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำต่อระบบ เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางแม่เหล็กและสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคแม่เหล็กที่มีการแพร่ซึ่งขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ และจำนวนอนุภาคในระบบ ส่วนอีกรูปแบบเป็นรูปแบบที่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอกมากระทำต่อระบบเป็นการศึกษาวงรอบฮิสเทอรีซิสของสภาพแม่เหล็กของระบบเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอก

#### 4.1 ระบบการแพร่อนุภาคแม่เหล็กที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำ

ผลการจำลองสถานการณ์ของระบบอนุภาคแม่เหล็กที่มีการแพร่ในช่วงอุณหภูมิ  $0.05 \text{ } K/k_B$  ถึง  $0.40 \text{ } K/k_B$  เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัดส่วนปริมาตรของอนุภาคแม่เหล็กที่มีการแพร่ดังแสดงในรูป 4.1 พบว่า ที่อุณหภูมิต่ำ อนุภาคจะมีเกาะกลุ่มกันเนื่องจากสัดส่วนปริมาตรมีค่าใกล้เคียง 1 แสดงว่าปริมาตรของระบบ ณ อุณหภูมินั้นมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรที่อุณหภูมิ  $0.001 \text{ } K/k_B$  แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจนระดับหนึ่ง สัดส่วนปริมาตรเริ่มลดลง แสดงว่าอนุภาคเริ่มมีการแตกออกจากกันทำให้ปริมาตรรวมของระบบมีค่าเพิ่มขึ้น และที่อุณหภูมิประมาณ  $0.23 \text{ } K/k_B$  สัดส่วนปริมาตรเข้าใกล้ศูนย์ แสดงให้เห็นว่าอนุภาคแตกกระจายไม่เกาะกลุ่มกัน เมื่อพิจารณาระบบที่มีจำนวนอนุภาคมากกว่าจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าจึงจะทำให้อนุภาคแตกกระจายได้เมื่อเทียบกับระบบที่มีจำนวนอนุภาคน้อยกว่าอันเนื่องมาจากแรงยึดเหนี่ยวที่เกิดจากศักย์ของยูคาวาจะเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนอนุภาคมีมากขึ้น

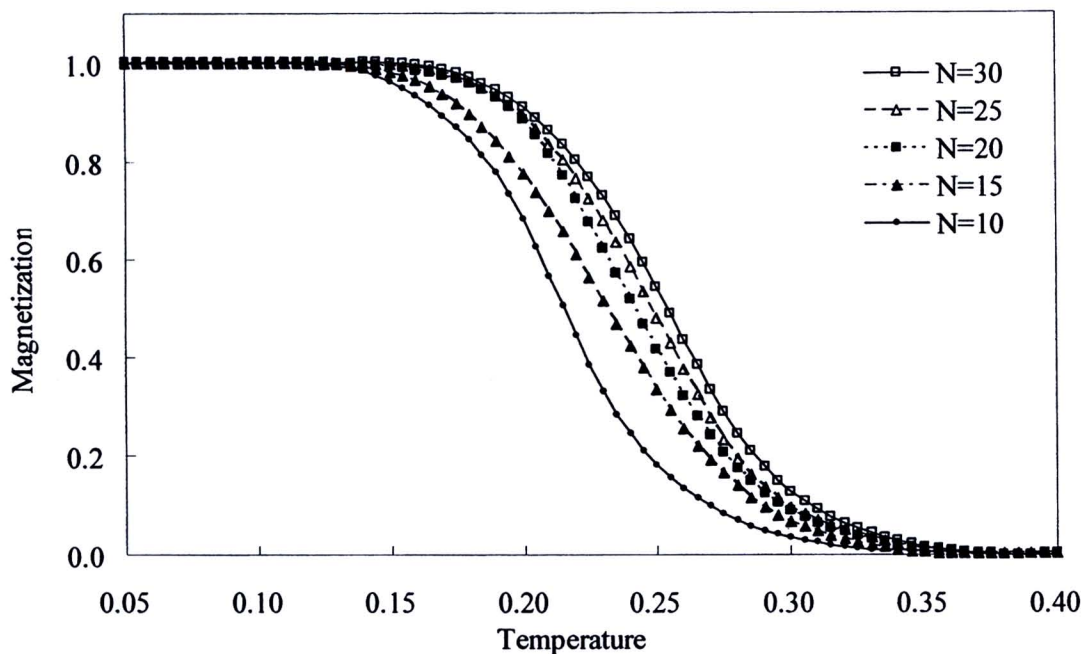


รูป 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนปริมาตร (Volume Ratio) กับ อุณหภูมิ ในช่วง  $0.05 K/k_B$  ถึง  $0.40 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน

เมื่อพิจารณากราฟความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กเทียบกับอุณหภูมิดังแสดงในรูป 4.2 พบว่าเมื่อระบบมีอุณหภูมิสูงขึ้นถึงระดับหนึ่งสภาพแม่เหล็กของระบบจะเริ่มลดต่ำลง เมื่อเทียบกับกราฟความสัมพันธ์ของสัดส่วนปริมาตรกับอุณหภูมิในรูป 4.1 พบว่า ณ อุณหภูมิที่กราฟของสัดส่วนปริมาตรมีค่าสูงสุด จะเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิที่สภาพแม่เหล็กเริ่มลดลง และ ณ อุณหภูมิที่สัดส่วนปริมาตรเข้าใกล้ศูนย์ ก็จะเป็นอุณหภูมิที่กราฟของสภาพแม่เหล็กมีความชันสูงสุด ดังนั้น การแตกกระจายของกลุ่มอนุภาคจึงมีผลต่อสภาพแม่เหล็กของระบบด้วยเนื่องจาก เมื่ออนุภาคอยู่ชิดกันที่อุณหภูมิต่ำ อนุภาคมีอันตรกิริยาทางแม่เหล็กดีกว่าตอนที่อนุภาคอยู่ห่างกัน ซึ่งผลการทดลองที่ได้นั้นเป็นไปในทิศทางเดียวกับการจำลองสถานการณ์โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones ด้วยเช่นกัน

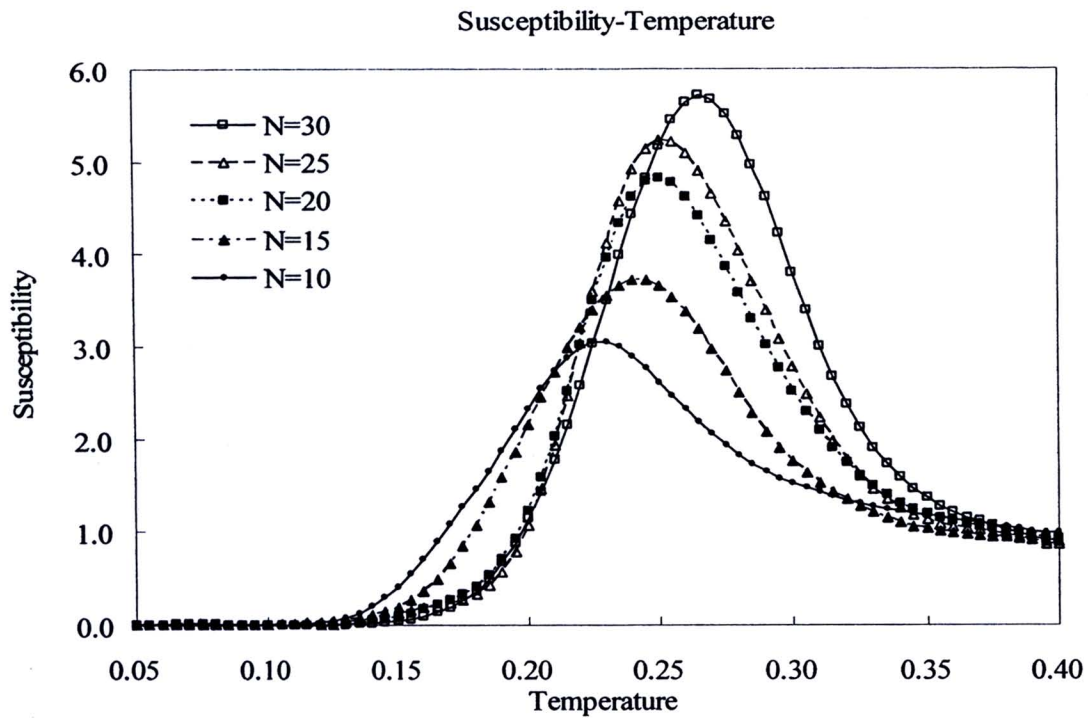


Magnetization-Temperature



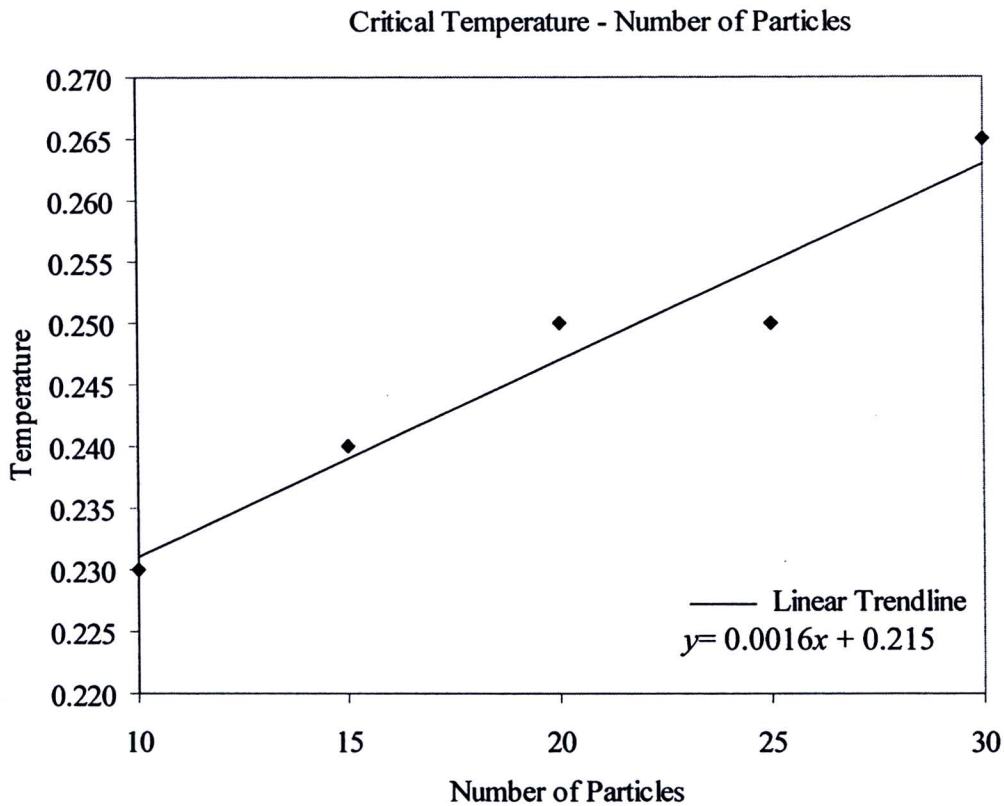
รูป 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กของระบบ (Magnetization) กับ อุณหภูมิในช่วง  $0.05 K/k_B$  ถึง  $0.40 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ยูคาวาเสมือน

หลังจากนั้นพิจารณาความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กของระบบไว้ได้ทางแม่เหล็กซึ่งหาได้จากสภาพแม่เหล็ก ปกติแล้วระบบที่มีขนาดอนันต์เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กไว้ได้ทางแม่เหล็กกับอุณหภูมิที่สูงขึ้นของระบบไอซิง จะพบว่าที่อุณหภูมิที่ระบบเปลี่ยนเฟสจาก สภาพแม่เหล็กแบบเฟอร์โรเป็นสภาพแม่เหล็กแบบพารา ค่าของสภาพแม่เหล็กไว้ได้ทางแม่เหล็กจะเป็นอนันต์ แต่เนื่องจากระบบในการวิจัยนี้มีขนาดเล็กมาก สภาพแม่เหล็กไว้ได้ทางแม่เหล็กไม่สามารถมีค่าสูงถึงระดับอนันต์ได้ จึงหาอุณหภูมิวิกฤต ( $T_c$ ) ได้จากจุดสูงสุดของกราฟความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กไว้ได้ทางแม่เหล็กเทียบกับอุณหภูมิดังที่แสดงในรูป 4.3 ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ค่าของความชันของกราฟความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กมีค่าสูงสุด ยิ่งจำนวนอนุภาคมากขึ้นอุณหภูมิที่ทำให้สภาพแม่เหล็กไว้ได้ทางแม่เหล็กมีค่าสูงสุดจะยิ่งสูงขึ้น



รูป 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 โดยใช้ศักย์ยูควาเสมือน

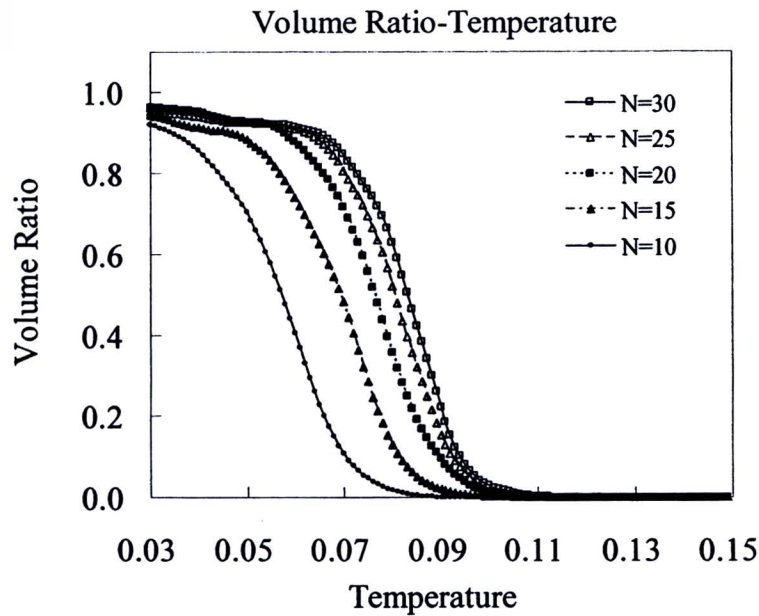
จากรูป 4.3 อุณหภูมิที่สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กมีค่าสูงสุดซึ่งอุณหภูมิวิกฤตเป็นของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว มีค่าเท่ากับ  $0.230 K/k_B$ ,  $0.240 K/k_B$ ,  $0.250 K/k_B$ ,  $0.250 K/k_B$  และ  $0.265 K/k_B$  ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำอุณหภูมิ ณ จุดที่สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กมีค่าสูงสุดของระบบที่มีจำนวนอนุภาคต่างกันมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูป 4.4 ทำให้สามารถสร้างเส้นแนวโน้มเชิงเส้น (Linear trend line) มีประโยชน์ในการคำนวณอุณหภูมิวิกฤตของระบบที่มีอุณหภูมิสูงขึ้นได้ โดยมีสมการเส้นแนวโน้มคือ  $T_c = 0.0016N + 0.215$  และมีค่า R-square เท่ากับ 0.9412



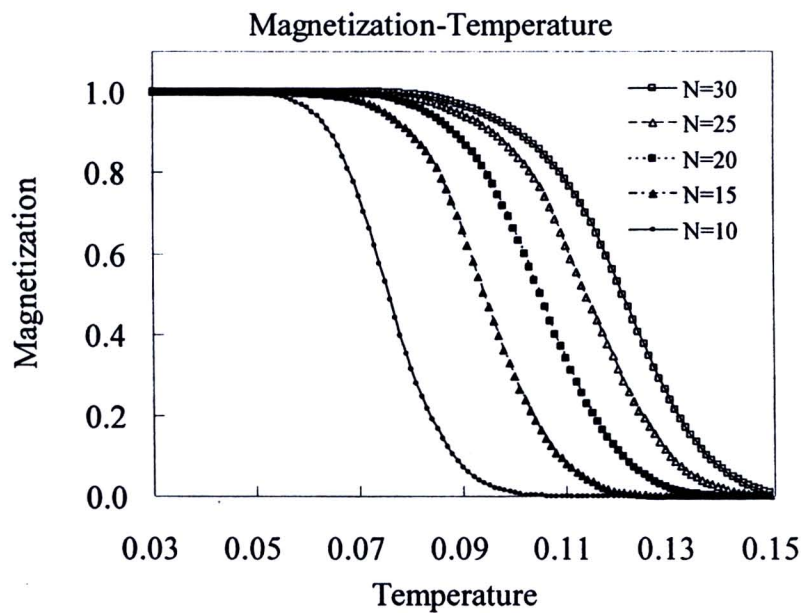
รูป 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวิกฤตกับจำนวนอนุภาคในระบบ ของระบบที่ใช้ศักย์คูวาเสมือน

ซึ่งผลการจำลองสถานการณ์ที่ได้นั้นมีลักษณะการเปลี่ยนแปลงสอดคล้องกับการใช้ศักย์ Lennard-Jones ที่เป็นการจำลองสถานการณ์ในช่วงอุณหภูมิเท่ากับ  $0.03 \ \varepsilon/k_B$  ถึง  $0.15 \ \varepsilon/k_B$  โดยมี  $\varepsilon=1$  เป็นตัวแปรพลังงานอุณหภูมิจึงมีหน่วยเป็น  $\varepsilon/k_B$  ผลที่ได้เป็นการเฉลี่ยจากข้อมูลของการจำลองสถานการณ์ 100 ครั้ง

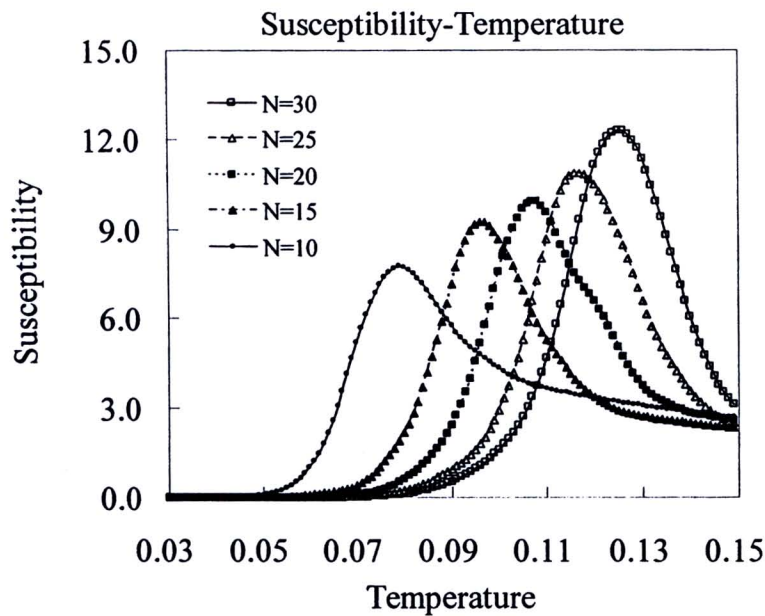
เนื่องจากเป็นศักย์ต่างชนิดกัน การตอบสนองของแรงระหว่างอนุภาคจึงเกิดในช่วงอุณหภูมิแตกต่างกัน ผลของการจำลองสถานการณ์โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones จะได้ความสัมพันธ์ของสัดส่วนปริมาตร, สภาพแม่เหล็ก และ สภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็ก ดังแสดงในรูป 4.5 ถึงรูป 4.7



รูป 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสัดส่วนปริมาตร (Volume ratio) กับ อุณหภูมิ ในช่วง  $0.05 K/k_B$  ถึง  $0.40 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones

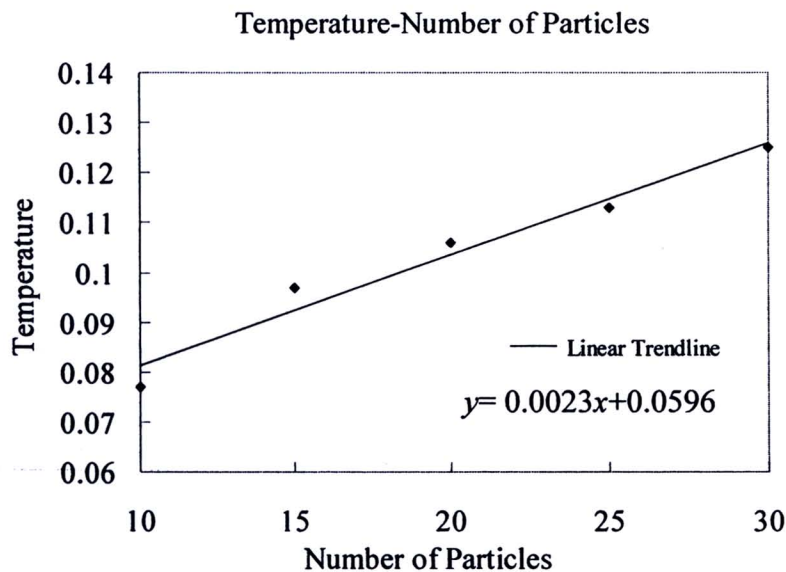


รูป 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพแม่เหล็กของระบบ (Magnetization) กับ อุณหภูมิในช่วง  $0.05 K/k_B$  ถึง  $0.40 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones



รูป 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของสภาพรับไว้ได้ทางแม่เหล็กของระบบ (Magnetic susceptibility) กับ อุณหภูมิในช่วง  $0.05 \text{ } K/k_B$  ถึง  $0.40 \text{ } K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาคเท่ากับ 10, 15, 20, 25 และ 30 ตัว โดยใช้ศักย์ของ Lennard-Jones

ผลที่ได้มีลักษณะเหมือนกันคือ ที่อุณหภูมิที่ความชันของกราฟสัดส่วนปริมาตรมีค่ามากที่สุดจะเป็นอุณหภูมิที่สภาพแม่เหล็กของระบบเริ่มลดลง และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนสัดส่วนปริมาตรเป็นศูนย์ อุณหภูมินั้นจะใกล้เคียงกับอุณหภูมิวิกฤตของระบบ ซึ่งเป็นไปในลักษณะที่เหมือนกันกับการใช้ศักย์คูวาเสมีอนและเมื่อนำความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวิกฤตกับจำนวนอนุภาคมาเขียนกราฟจะได้ดังรูป 4.8

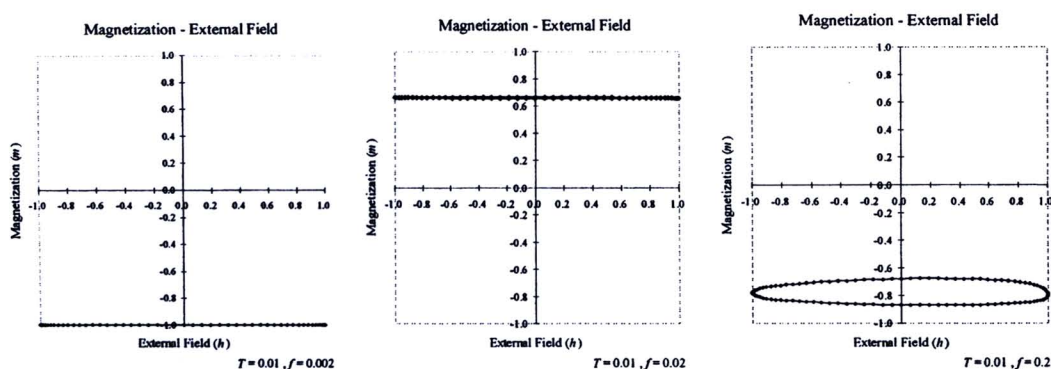


รูป 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวิกฤตกับจำนวนอนุภาคในระบบ ของระบบที่ใช้ศักย์ของ Lennard-Jones

จากรูป 4.8 เมื่อเขียนเส้นแนวโน้มเชิงเส้นของความสัมพันธ์ของอุณหภูมิวิกฤตกับจำนวนอนุภาคในระบบ ได้เส้นแนวโน้มคือ  $T_c = 0.0023N + 0.0596$  และมีค่า R-square เท่ากับ 0.9786

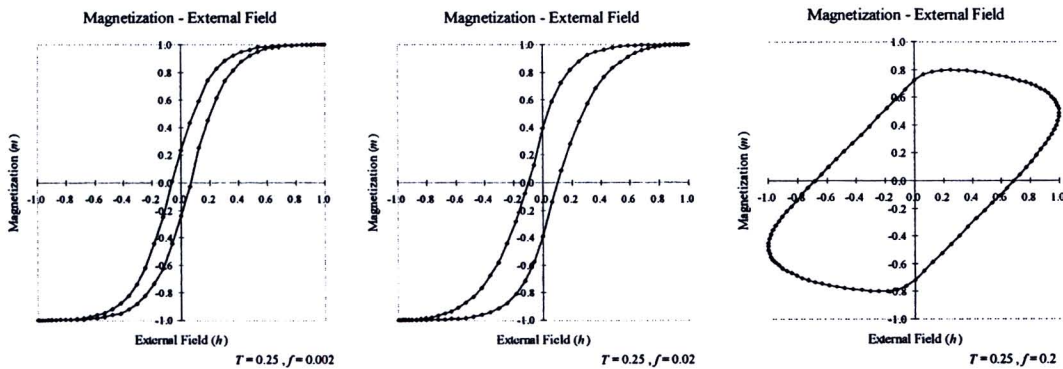
#### 4.2 ระบบการแพร่ของอนุภาคแม่เหล็กที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอก

จากการจำลองสถานการณ์ของระบบที่ไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอกมากระทำกับระบบพบว่า ระบบที่ประกอบด้วยอนุภาคแม่เหล็กจำนวน 20 อนุภาคจะมีอุณหภูมิวิกฤตอยู่ที่  $0.25 K/k_B$  ดังนั้น อุณหภูมิที่เลือกใช้ในการจำลองสถานการณ์ที่มีการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอกนี้คือ อุณหภูมิที่ต่ำกว่า, เท่ากัน, และสูงกว่า  $0.25 K/k_B$  และเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอก 3 ระดับดังแสดงในรูป 4.9 ถึงรูป 4.14



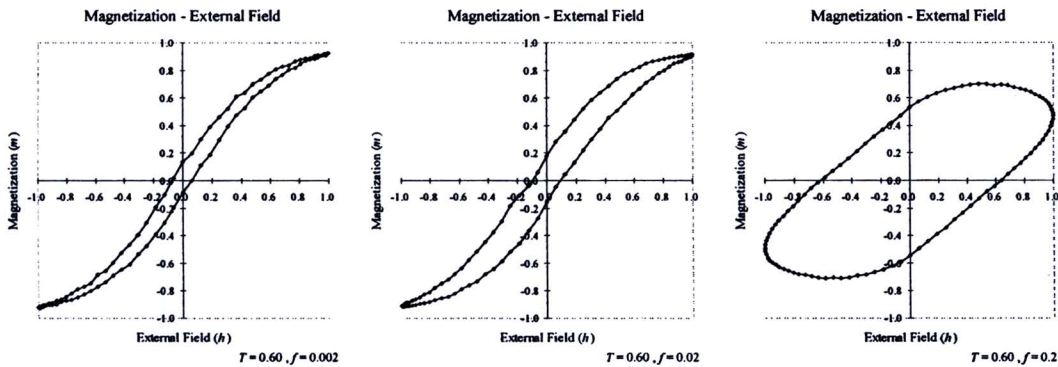
รูป 4.9 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$ ,  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  และ  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ  $0.01 K/k_B$  โดยใช้ศักย์ยูควาเสมือน

จากรูป 4.9 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกของระบบที่มีอุณหภูมิ  $0.01 K/k_B$  และความถี่เท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$  สภาพแม่เหล็กของระบบไม่เปลี่ยนแปลง เพราะอุณหภูมิของระบบต่ำมาก และการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอกเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้อนุภาคในระบบที่เกาะกันแน่นมีเวลาในการปรับทิศของสปินเนื่องจากการเหนี่ยวนำกันเองของกลุ่มอนุภาค การเหนี่ยวนำของการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอกจึงไม่สามารถเปลี่ยนแปลงสภาพแม่เหล็กของระบบได้ แต่เมื่อเพิ่มความถี่เพิ่มขึ้นเป็น  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  และ  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  ทำให้สปินบางส่วนของอนุภาคในระบบปรับตัวตามการเหนี่ยวนำของกลุ่มอนุภาคไม่ทันแต่ส่วนใหญ่ยังคงชี้ไปในทิศทางเดียวกันจึงทำให้เกิดลักษณะที่ค่าสภาพแม่เหล็กเป็นบวกลบหรือลบอย่างเดียว



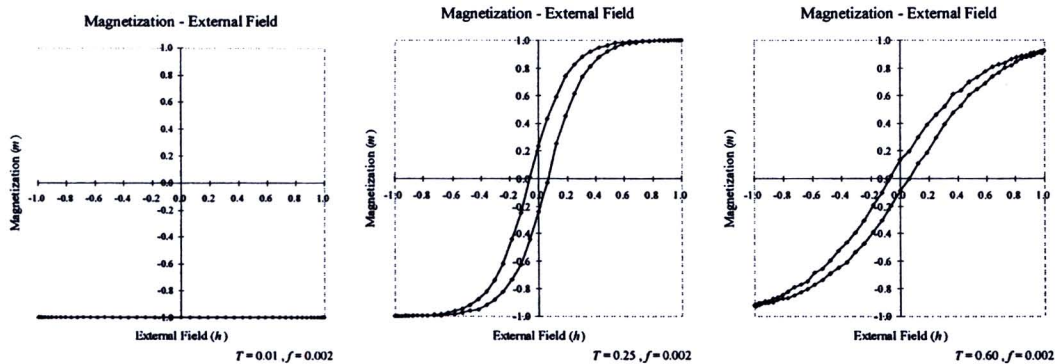
รูป 4.10 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$ ,  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  และ  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ  $0.25 \text{ K}/k_B$  โดยใช้ศักย์คู่ควาเสมือน

จากรูป 4.10 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกของระบบที่มีอุณหภูมิ  $0.25 \text{ K}/k_B$  ซึ่งมีค่าเท่ากับอุณหภูมิวิกฤตของระบบที่มีจำนวน 20 อนุภาค จะเกิดวงจรฮิสเทอรีซิสขึ้น โดยที่ความถี่  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$  จะพบว่าวงจรฮิสเทอรีซิสมีลักษณะแคบ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพแม่เหล็กของระบบตามทันการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอก ทำให้ความต่างเฟสของการเปลี่ยนแปลงของสภาพแม่เหล็กของระบบกับการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอก มีค่าน้อย และเมื่อเพิ่มความถี่เป็น  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  พื้นที่ใต้กราฟของวงจรฮิสเทอรีซิสเพิ่มขึ้นเนื่องจากความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกมากขึ้นทำให้สภาพแม่เหล็กตอบสนองได้ช้าลง จึงเกิดความต่างเฟสมากขึ้น และเมื่อเพิ่มความถี่เป็น  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  สภาพแม่เหล็กของระบบจึงตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอกไม่ทัน เป็นสาเหตุให้ค่าของสภาพแม่เหล็กไม่ขึ้นไปถึงจุดอิ่มตัวเกิดเป็นวงจรฮิสเทอรีซิสที่มีรูปร่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความต่างเฟสมาก



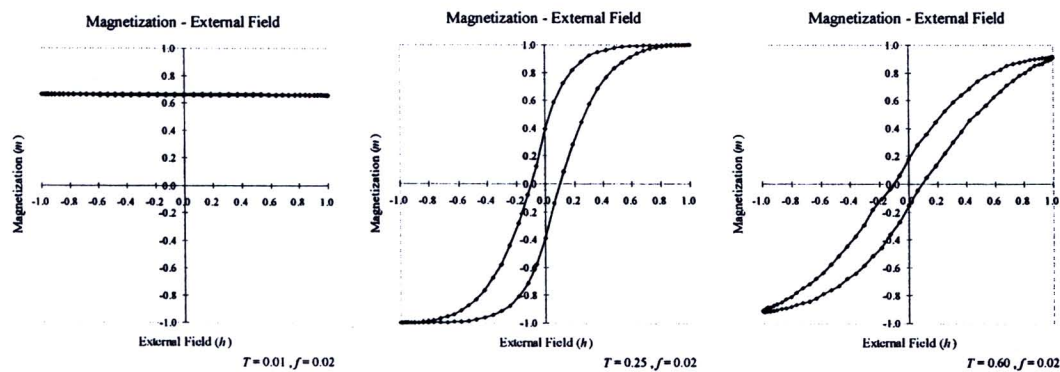
รูป 4.11 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$ ,  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  และ  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ  $0.6 K/k_B$  โดยใช้ศักย์คูวาเสมือน

จากรูป 4.11 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกของระบบที่มีอุณหภูมิ  $0.6 K/k_B$  ผลลัพธ์ของวงรอบฮิสเทอรีซิสที่ได้คล้ายกับ ที่อุณหภูมิ  $0.25 K/k_B$  สิ่งที่แตกต่างกันคือ ค่าของสภาพแม่เหล็กของระบบขึ้นไปไม่ถึงจุดอิ่มตัว และความชันของวงรอบฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ  $0.6 K/k_B$  น้อยกว่าของวงรอบฮิสเทอรีซิสที่อุณหภูมิ  $0.25 K/k_B$  สาเหตุของการที่ค่าของสภาพแม่เหล็กขึ้นไปไม่ถึงจุดอิ่มตัวแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกของระบบจะมีค่าสูงสุดแล้วและความถี่ของสนามแม่เหล็กมีค่าต่ำเพียงพอที่สภาพแม่เหล็กจะเปลี่ยนแปลงทันคืออุณหภูมิที่สูง ทำให้อนุภาคในระบบแตกตัวไม่จับกลุ่มกัน ส่งผลให้อนุภาคบางตัวที่มีพลังงานสูงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูง มีการกลับทิศสปินโดยไม่ถูกเหนี่ยวนำโดยสนามแม่เหล็กภายนอกทำให้สภาพแม่เหล็กมีค่าไม่ถึง 1 หรือ -1 และสาเหตุที่ความชันของวงรอบฮิสเทอรีซิสมีค่าน้อยกว่า เพราะสภาพของอนุภาคที่แตกตัวเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงทำให้แรงเหนี่ยวนำกันเองของอนุภาคมีค่าน้อย การต้านทานการเปลี่ยนแปลงของสภาพแม่เหล็กจึงลดลง สภาพแม่เหล็กจึงค่อยๆ เปลี่ยนแปลงไปตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอก ความชันของวงรอบฮิสเทอรีซิสจึงลดลง



รูป 4.12 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.1 K/k_B$ ,  $0.25 K/k_B$  และ  $0.6 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$  โดยใช้ศักย์คูวาเสมือน

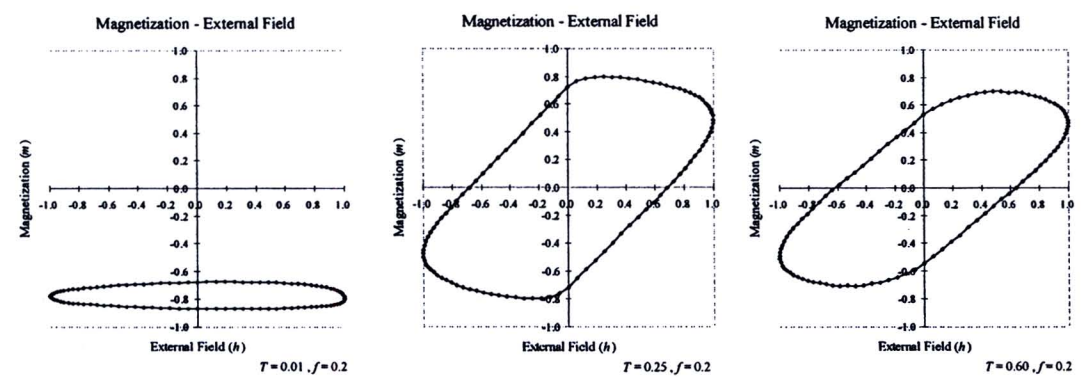
จากรูป 4.12 จะทราบว่าที่ความถี่น้อยๆ การเพิ่มอุณหภูมิเพื่อจะกระตุ้นให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสภาพแม่เหล็กได้เนื่องจากพลังงานของอนุภาคมีค่ามากขึ้น แต่เมื่อดูจากผลของการเพิ่มอุณหภูมิที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ใต้กราฟนั้น พบว่าพื้นที่ใต้กราฟไม่แตกต่างกันมากเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจาก  $0.25 K/k_B$  เป็น  $0.60 K/k_B$



รูป 4.13 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.1 K/k_B$ ,  $0.25 K/k_B$  และ  $0.6 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  โดยใช้ศักย์คูวาเสมือน

จากรูป 4.13 ระบบซึ่งมีความถี่เป็น  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  ซึ่งมีค่ามากขึ้นกว่าความถี่ที่ใช้ในรูป 4.12 พบว่าที่อุณหภูมิต่ำ ยังคงไม่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแม่เหล็กของระบบแม้ว่าสนามแม่เหล็กภายนอกจะมีการเปลี่ยนแปลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสภาพแม่เหล็กจึงจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ไปตาม

สนามแม่เหล็กภายนอกได้ แต่ความแตกต่างของพื้นที่ใต้กราฟวงรอบฮิสเทอรีกยังไมต่างกันมากจนเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิสูงๆ



รูป 4.14 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.1\text{ K}/k_B$ ,  $0.25\text{ K}/k_B$  และ  $0.6\text{ K}/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ  $0.2\text{ MCS}^{-1}$  โดยใช้ศักย์คูวาเสมือน

จากรูป 4.14 ที่ความถี่สูงคือ  $0.2\text{ MCS}^{-1}$  สภาพแม่เหล็กของระบบยังคงไม่วิวัฒน์ตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอกมากนักที่อุณหภูมิต่ำๆ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิขึ้นพื้นที่ใต้กราฟก็ยังคงเปลี่ยนแปลงไม่มากเหมือนที่ความถี่น้อยๆ

ดังนั้นการเพิ่มอุณหภูมิจึงเป็นเพียงการกระตุ้นให้สภาพแม่เหล็กสามารถเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้เท่านั้น โดยไม่ได้มีผลต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของพื้นที่ใต้กราฟมากนัก

ดังนั้นจะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความถี่จะมีผลต่อพื้นที่ใต้กราฟ และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะมีผลต่อการวิวัฒน์ของสภาพแม่เหล็กตามการเปลี่ยนแปลงของสนามแม่เหล็กภายนอก

เงื่อนไขของอุณหภูมิและความถี่จะให้ผลที่แตกต่างกันดังนี้(หน่วยของพื้นที่ใต้กราฟมีหน่วยเป็น  $K$  ซึ่งเป็นหน่วยของค่าคงที่พลังงานของศักย์คูวาไม่ใช่เคลวิน)

ตาราง 4.1 พื้นที่ใต้กราฟวงรอบฮิสเทอรีกที่ความถี่และอุณหภูมิต่างๆ

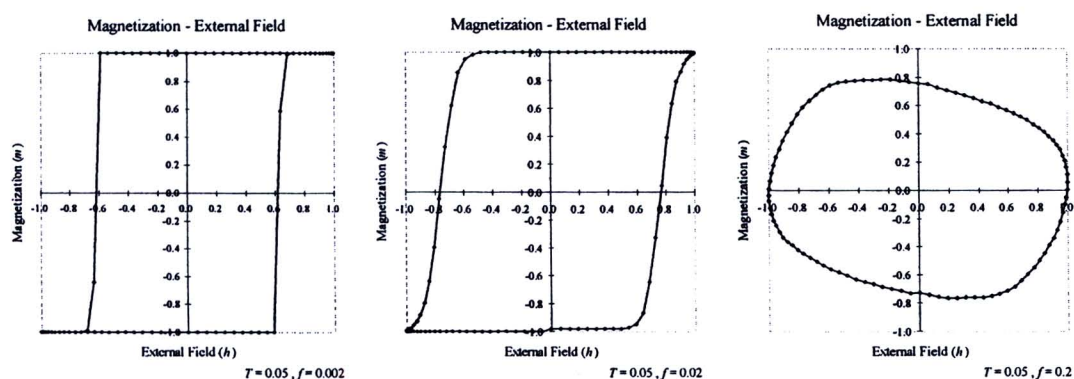
|                         | $f = 0.002\text{ MCS}^{-1}$ | $f = 0.02\text{ MCS}^{-1}$ | $f = 0.2\text{ MCS}^{-1}$ |
|-------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| $T = 0.01\text{ K}/k_B$ | $0\text{ K}$                | $-0.0214\text{ K}$         | $-0.3122\text{ K}$        |
| $T = 0.25\text{ K}/k_B$ | $-0.2426\text{ K}$          | $-0.4806\text{ K}$         | $-1.8508\text{ K}$        |
| $T = 0.60\text{ K}/k_B$ | $-0.2093\text{ K}$          | $-0.3979\text{ K}$         | $-1.5058\text{ K}$        |

จากตาราง 4.1 จะเห็นได้ชัดว่าเมื่อมองการเปลี่ยนแปลงความถี่แต่ไม่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ใต้กราฟจะเห็นได้ชัดเจน ในขณะที่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างเดียวไม่ได้ ทำให้พื้นที่ใต้กราฟเปลี่ยนแปลงมากนัก

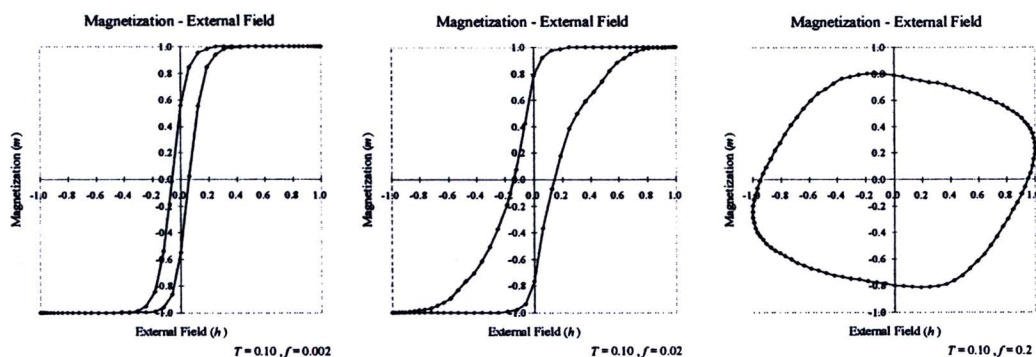
ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่และอุณหภูมิทำให้สามารถควบคุมพื้นที่ใต้ กรอบฮิสเทอรีซิสได้ แสดงว่าสามารถควบคุมความร้อนที่เกิดขึ้นได้ซึ่งจะมีประโยชน์ในทาง การแพทย์ด้านการรักษาเนื้องอกด้วยการใช้สารแม่เหล็กเป็นแหล่งความร้อนในการทำลาย เนื้องอก

ผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์โดยใช้ศักย์ยูควา ให้ผลไปในทิศทางเดียวกันกับการ จำลองสถานการณ์ที่ใช้ศักย์ของ Lennard-Jones ซึ่งเป็นการเฉลี่ยค่าสภาพแม่เหล็กจากวงรอบฮิส เทอรีซิส 200 วง แต่อุณหภูมิแตกต่างกันเนื่องจากเป็นศักย์คนละชนิดกัน ผลการจำลองสถานการณ์ ของวงรอบฮิสเทอรีซิสที่เกิดจากศักย์ของ Lennard-Jones ดังแสดงในรูป 4.15 ถึง รูป 4.20

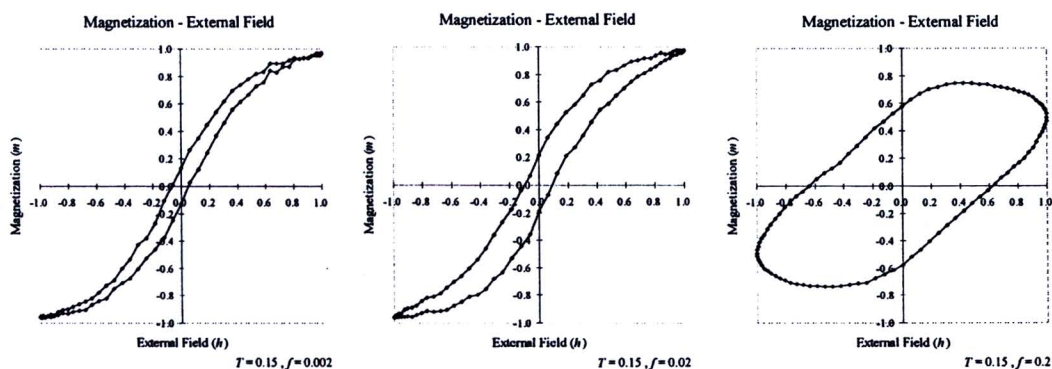
จากรูป 4.15 ถึง รูป 4.17 เป็นการเปรียบเทียบกราฟเมื่อความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกมีการ เปลี่ยนแปลงในขณะที่อุณหภูมิมีค่าคงที่ พบว่าขณะที่ความถี่สูงขึ้นการเหลื่อมล้ำของเฟสการ เปลี่ยนแปลงสภาพแม่เหล็กเทียบการเปลี่ยนแปลงสนามแม่เหล็กภายนอกจะมากขึ้นทำให้พื้นที่ใต้ กราฟวงรอบฮิสเทอรีซิสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งมีลักษณะเดียวกันกับเมื่อใช้ศักย์ยูควา ในการคำนวณ



รูป 4.15 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$ ,  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  และ  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ อุณหภูมิเท่ากับ  $0.05 K/k_B$  โดยใช้ศักย์ Lennard-Jones



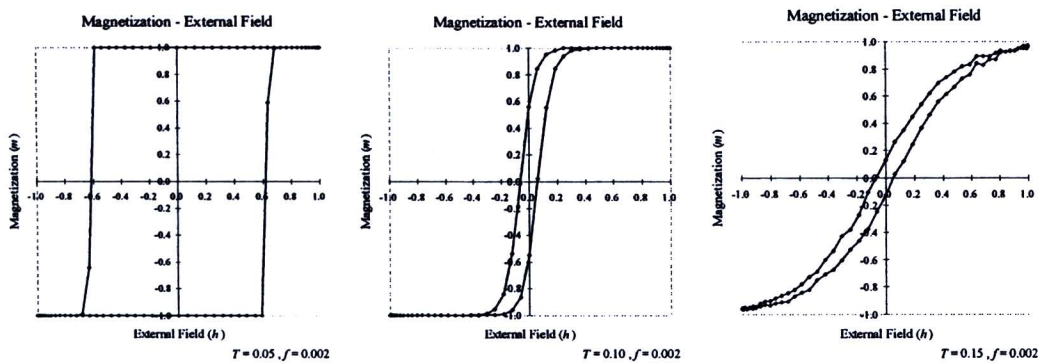
รูป 4.16 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$ ,  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  และ  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ  $0.10 K/k_B$  โดยใช้ศักย์ Lennard- Jones



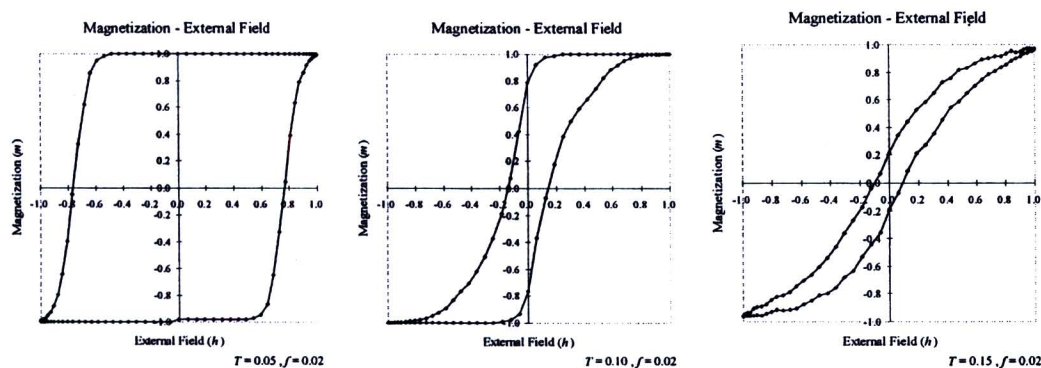
รูป 4.17 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$ ,  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  และ  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่อุณหภูมิเท่ากับ  $0.15 K/k_B$  โดยใช้ศักย์ Lennard- Jones



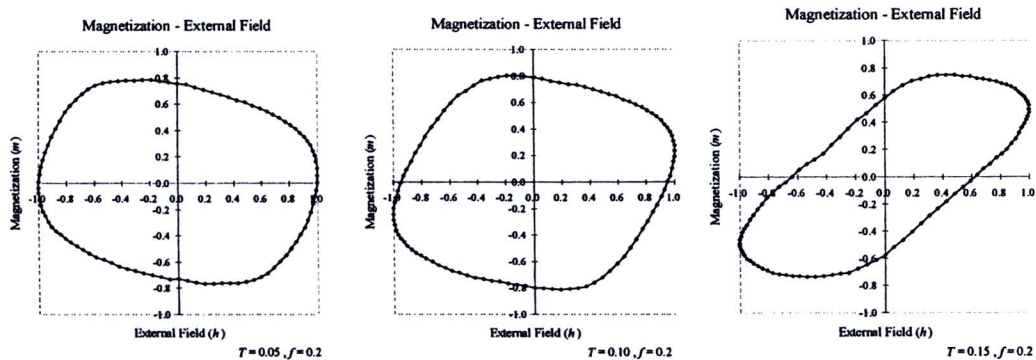
จากรูป 4.18 ถึง รูป 4.20 เป็นการเปรียบเทียบกราฟเมื่ออุณหภูมิมีการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกมีค่าคงที่ พบว่าขณะที่อุณหภูมิสูงขึ้นการเหลื่อมล้ำที่อุณหภูมิต่ำอาจจะมากแต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการเหลื่อมล้ำน้อยลง และเปลี่ยนแปลงไม่มากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอีก แต่ความชันของการเปลี่ยนแปลงสภาพแม่เหล็กจะน้อยลงซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเหนี่ยวนำระหว่างกันมีผลน้อยลงด้วย



รูป 4.18 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.05 K/k_B$ ,  $0.10 K/k_B$  และ  $0.15 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ  $0.002 \text{ MCS}^{-1}$  โดยใช้ศักย์ Lennard- Jones



รูป 4.19 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.05 K/k_B$ ,  $0.10 K/k_B$  และ  $0.15 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ  $0.02 \text{ MCS}^{-1}$  โดยใช้ศักย์ Lennard-Jones



รูป 4.20 กราฟเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิซึ่งมีค่าเท่ากับ  $0.05 K/k_B$ ,  $0.10 K/k_B$  และ  $0.15 K/k_B$  ของระบบที่มีจำนวนอนุภาค 20 ตัว ที่ความถี่ของสนามแม่เหล็กภายนอกเท่ากับ  $0.2 \text{ MCS}^{-1}$  โดยใช้ศักย์ Lennard- Jones

สรุปได้ว่าการเปลี่ยนแปลงความถี่จะมีผลทำให้การตอบสนองของสภาพแม่เหล็กโดยรวมเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการเหลื่อมล้ำของเฟสการเปลี่ยนแปลงมาก และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้การตอบสนองของอนุภาคแต่ละตัวในระบบต่อการเปลี่ยนแปลงของสนามมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงตามสนามแม่เหล็กภายนอกได้แม้ความถี่จะน้อย ซึ่งผลของการใช้ศักย์ของยูคาวา และศักย์ของ Lennard-Jones มีคล้ายคลึงกัน