

## ลูกปัดกระโดด - แบบจำลองสำหรับการเปลี่ยนเฟสและความไม่เสถียร (10 คะแนน)

จงอ่านข้อแนะนำทั่วไปในอีกช่องหนึ่งก่อนเริ่มทำการทดลอง

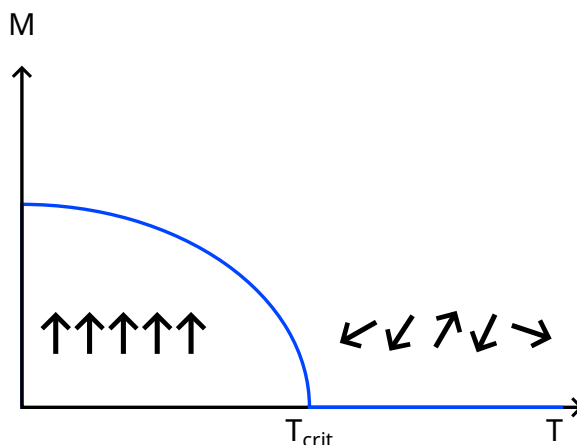
### บทนำ

การเปลี่ยนเฟส (phase transition) เป็นปรากฏการณ์ที่พบได้ในชีวิตประจำวัน เช่น น้ำมีได้หลายสถานะ ไม่ว่าจะเป็นของแข็ง ของเหลวและก๊าซ สถานะต่างๆ เหล่านี้ถูกแยกออกจากกันโดยการเปลี่ยนเฟส ที่ทำให้พฤติกรรมโดยรวมของโมเลกุลใน สสารเปลี่ยนไป การเปลี่ยนเฟสนี้จะสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส (transition temperature) ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ สสารเปลี่ยนเฟสเสมอ เช่น จุดเยือกแข็งและจุดเดือดของน้ำในตัวอย่างด้านบน

อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนเฟสสามารถพบได้ทั่วไปในระบบอื่นด้วยเช่นกัน เช่น ในสารแม่เหล็กหรือตัวนำยวดยิ่ง เมื่ออุณหภูมิของระบบต่ำกว่าอุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟส สถานะมหภาค (macroscopic) จะเปลี่ยนจากพาราแมกเนติก (paramagnet) เป็นเฟอร์โรแมกเนติก (ferromagnet) หรือจากตัวนำธรรมดา เป็นตัวนำยวดยิ่งตามลำดับ

การเปลี่ยนเฟสเหล่านี้สามารถอธิบายได้ในกรอบความคิดทั่วไป เมื่อนักเรียนนิยามปริมาณที่เรียกว่าออร์เดอร์พารามิเตอร์ (order parameter) ตัวอย่างเช่น ในสารแม่เหล็กออร์เดอร์พารามิเตอร์จะสัมพันธ์กับการเรียงตัวของโมเมนต์แม่เหล็กของอะตอมทำให้เกิดแมกเนไทเซชันมหภาค

ในการเปลี่ยนเฟสแบบต่อเนื่อง ออร์เดอร์พารามิเตอร์จะเท่ากับศูนย์เสมอถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต และจะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่ออุณหภูมิลดลงต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต ดังแสดงในรูปที่ 1 สำหรับสารแม่เหล็ก อุณหภูมิที่เกิดการเปลี่ยนเฟสของการเปลี่ยนเฟสแบบต่อเนื่องเรียกว่าอุณหภูมิวิกฤต (critical temperature) รูปที่ 1 ยังประกอบไปด้วยแผนภาพแสดงความไม่เป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบในระดับจุลภาคในกรณีของสารแม่เหล็ก ซึ่งแต่ละโมเมนต์แม่เหล็กเรียงตัวเป็นระเบียบในสถานะเฟอร์โรแมกเนติก ทำให้เกิดแมกเนไทเซชันมหภาค หรือเรียงตัวไม่เป็นระเบียบในสถานะพาราแมกเนติก ทำให้ไม่เกิดแมกเนไทเซชันมหภาค



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและออร์เดอร์พารามิเตอร์  $M$  ณ จุดที่เกิดการเปลี่ยนเฟส ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต  $T_{crit}$  ออร์เดอร์พารามิเตอร์ไม่เป็นศูนย์และจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิต่ำลง ในขณะที่มันจะเท่ากับศูนย์ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า  $T_{crit}$

สำหรับการเปลี่ยนเฟสแบบต่อเนื่อง นักเรียนจะพบว่าค่าของออร์เดอร์พารามิเตอร์ที่ใกล้จุดการเปลี่ยนเฟสจะเป็นไปตาม

กฎเลขยกกำลัง (power-law) เช่น ในสารแม่เหล็ก แมกเนไทเซชัน  $M$  ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิวิกฤต  $T_{\text{crit}}$  เป็นไปตามสมการ

$$M \begin{cases} \sim (T_{\text{crit}} - T)^b, & T < T_{\text{crit}} \\ = 0, & T > T_{\text{crit}} \end{cases} \quad (1)$$

โดยที่  $T$  คืออุณหภูมิ สิ่งที่น่าสนใจคือปรากฏการณ์นี้เป็นแบบสากล หรือเลขยกกำลังนี้จะเท่ากันสำหรับการเปลี่ยนเฟสหลายๆ ประเภท

### การทดลอง

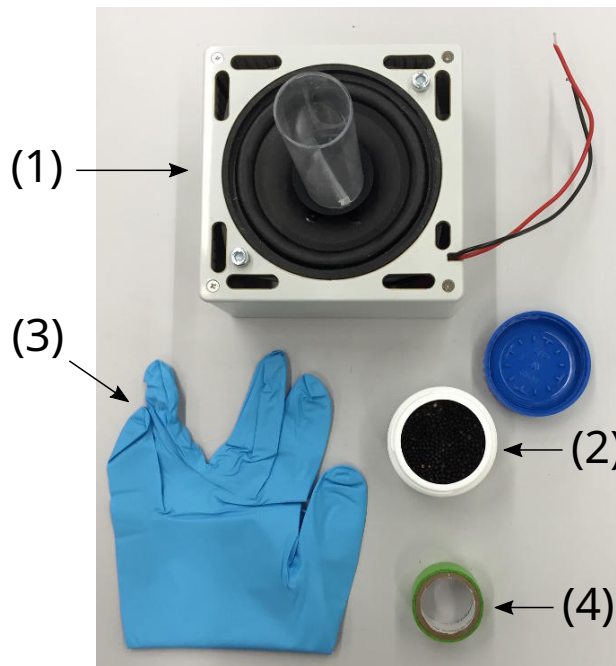
นักเรียนจะศึกษาตัวอย่างง่ายๆ ที่สมบัติของการเปลี่ยนเฟสแบบต่อเนื่อง เช่น ความไม่เสถียรจะนำไปสู่พฤติกรรมโดยรวมแล้วนำไปสู่การเปลี่ยนเฟสได้อย่างไร และการเปลี่ยนสมบัติเชิงมหภาคขึ้นกับการกระตุ้นของอนุภาคอย่างไร

ในการเปลี่ยนเฟสทั่วไป การกระตุ้นจะเกิดจากอุณหภูมิ ในระบบตัวอย่างของเรา การกระตุ้นประกอบไปด้วยพลังงานจลน์ของอนุภาคที่ถูกเร่งจากการสั่นของลำโพง การเปลี่ยนแปลงเชิงมหภาคซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนเฟสที่นักเรียนจะต้องศึกษาในกรณีนี้ ประกอบไปด้วยการแยกกันของลูกบิดลงไปในช่องของท่อทรงกระบอกที่ถูกแยกออกจากกันโดยกำแพงเตี้ยๆ

การเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ของแอมพลิจูดจากจุดที่อนุภาคอยู่ด้านใดด้านหนึ่งของท่อทรงกระบอก จะทำให้สุดท้ายแล้วอนุภาคมีการกระจายตัวที่เท่ากันระหว่างทั้งสองด้านของท่อทรงกระบอก ซึ่งสอดคล้องกับการให้ความร้อนกับระบบจนอุณหภูมิเพิ่มขึ้นสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤต

จุดประสงค์ของนักเรียน คือต้องหาค่าเลขยกกำลังวิกฤต (critical exponent) สำหรับแบบจำลองการเปลี่ยนเฟสที่ศึกษา

## รายการอุปกรณ์การทดลอง



รูปที่ 2 อุปกรณ์เพิ่มเติมสำหรับการทดลองนี้

1. ชุดลำโพงที่มีท่อทรงกระบอกพลาสติกวางตั้ง ติดอยู่ด้านบน
2. เมล็ดฝืนซึ่งต่อไปจะเรียกว่าลูกปัด จำนวนประมาณ 100 เม็ด (อยู่ในภาชนะพลาสติก)
3. ถุงมือ
4. เทปกาว

## ข้อต้องระวังที่สำคัญ

- ห้ามผลักหรือดึงท่อทรงกระบอกพลาสติกที่ติดอยู่บนลำโพงจากด้านข้างด้วยแรงที่มากเกินไป จะไม่มีลำโพงสำรองให้หากลำโพงนี้เสียหายหรือท่อทรงกระบอกพลาสติกหลุดออกมา
- ปิดลำโพงทุกครั้งที่นักเรียนไม่ใช้งาน เพื่อประหยัดพลังงานแบตเตอรี่
- ในการทดลองนี้ สัญญาณพื้นเสียงความถี่ 4 Hz ถูกจ่ายให้กับลำโพงจากขั้วด้านข้างของกล่องกำเนิดสัญญาณ
- แอมพลิจูดของสัญญาณพื้นเสียงสามารถปรับได้โดยใช้ที่หมุนปรับความต่างศักย์ (potentiometer) ที่อยู่ด้านขวา และมีค่าว่า *speaker amplitude* (4) กำกับไว้ ศักย์ DC ซึ่งแปรผันตรงกับแอมพลิจูดของสัญญาณ สามารถวัดได้จากขั้ว *speaker amplitude* (6) (เทียบกับขั้ว *GND* (7)) ตัวเลขในวงเล็บสอดคล้องกับภาพถ่าย (รูปที่ 2) ที่แสดงในข้อแนะนำทั่วไป
- แผ่นลำโพงเปราะบางมาก นักเรียนต้องระวังไม่ออกแรงกดหรือดันแผ่นลำโพงทั้งในแนวตั้งหรือแนวราบ

## ข้อ A. ค่าแอมพลิจูดวิกฤตของการกระตุ้น (3.3 คะแนน)

ก่อนที่นักเรียนจะเริ่มทำการทดลอง จงต่อลำโพงกับขั้วด้านข้างของกล่องกำเนิดสัญญาณ (ให้นักเรียนแน่ใจว่านักเรียนต่อขั้วไฟฟ้าถูกต้อง) ใส่ลูกบิดประมาณ 50 เม็ด ลงในท่อทรงกระบอกที่ติดอยู่บนลำโพง และใช้ชิ้นส่วนที่ตัดออกมาจากถุงมือมาปิดด้านบนท่อทรงกระบอกเพื่อกันไม่ให้ลูกบิดหลุดออกจากท่อ เปิดสวิตช์เพื่อให้ลำโพงสั่นและปรับแอมพลิจูดของการสั่นโดยใช้ไขควงที่ให้มาหมุนที่หมุนปรับความต่างศักย์ด้านขวา ที่มีคำว่า *speaker amplitude* (4) กำกับไว้ จงสังเกตการแยกกันของลูกบิดที่ค่าแอมพลิจูดต่างๆ

การทดลองแรกคือการหาค่าแอมพลิจูดวิกฤตของการกระตุ้นที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง เพื่อหาค่านี้ นักเรียนจะต้องนับจำนวนของลูกบิด  $N_1$  และ  $N_2$  ในทั้ง 2 ช่อง เป็นฟังก์ชันของ  $A_D$  โดยศักย์ไฟฟ้านี้แปรผันตรงกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่ปล่อยที่ถูกส่งไปยังลำโพง ให้นำลูกบิดในช่องที่มีจำนวนน้อยกว่าเป็น  $N_1$  (หรือ  $N_1 \leq N_2$ ) ให้ทำการวัดอย่างน้อย 5 ครั้ง ต่อหนึ่งศักย์ไฟฟ้า

คำใบ้:

- เพื่อให้อนุภาคเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลาขณะที่เปิดลำโพง ให้นักเรียนศึกษาแอมพลิจูดที่ศักย์จากขั้ว *speaker amplitude* มีค่ามากกว่า 0.7 V จงเริ่มทำการทดลองโดยสังเกตพฤติกรรมของระบบเมื่อเปลี่ยนศักย์ไฟฟ้าอย่างช้าๆ ขึ้นลง โดยยังไม่ต้องนับจำนวนลูกบิด มันอาจจะเป็นไปได้ที่ลูกบิดบางลูกจะติดกับพื้นของท่อทรงกระบอกเนื่องจากแรงไฟฟ้าสถิต นักเรียนไม่ต้องนับลูกบิดเหล่านั้น

<b>A.1</b>	จงบันทึกผลของการวัดในรูปของจำนวนของอนุภาค $N_1$ และ $N_2$ ในแต่ละครั้งของท่อทรงกระบอกสำหรับค่าแอมพลิจูด $A_D$ ต่างๆ ลงในตาราง <b>A.1</b> โดยให้นำลูกบิดในช่องที่มีจำนวนน้อยกว่าเป็น $N_1$	1.2pt
<b>A.2</b>	จงคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard derivation) ของการวัดค่า $N_1$ และ $N_2$ และบันทึกผลในตาราง <b>A.1</b> จงวาดกราฟของ $N_1$ และ $N_2$ เป็นฟังก์ชันของ $A_D$ ในกราฟ <b>A.2</b> โดยรวมค่าความคลาดเคลื่อนในกราฟด้วย	1.1pt
<b>A.3</b>	จากกราฟของนักเรียน จงหาค่าแอมพลิจูดวิกฤต $A_{D,crit}$ ซึ่งเป็นค่าแอมพลิจูด ณ จุดที่ $N_1 = N_2$ หลังจากการจูนกระทั่งระบบอยู่ในสถานะหยุดนิ่ง (stationary state)	1pt

## ข้อ B. การปรับเทียบ (calibration) (3.2 คะแนน)

ค่าแอมพลิจูด  $A_D$  เป็นศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับลำโพง อย่างไรก็ตามปริมาณทางฟิสิกส์ที่น่าสนใจ คือการกระจัดสูงสุด  $A$  ของการสั่นของลำโพง เนื่องจากค่านี้สัมพันธ์กับการที่ลูกบิดจะถูกกระตุ้นแรงแค่ไหน ดังนั้นนักเรียนต้องทำการปรับเทียบค่าแอมพลิจูด  $A_D$  เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์นี้ นักเรียนสามารถใช้วัตถุและอุปกรณ์ใดๆ ที่เตรียมไว้ให้ได้

<b>B.1</b>	วาดรูปอย่างคร่าวๆ ของชุดการทดลองที่นักเรียนใช้เพื่อทำการวัดแอมพลิจูดของการกระตุ้น หรือการกระจัดสูงสุด $A$ (ในหน่วย mm) ของลำโพง ในหนึ่งคาบการสั่น	0.5pt
<b>B.2</b>	จงวัดแอมพลิจูด $A$ ในหน่วย mm โดยใช้จำนวนจุดที่เหมาะสม นั่นคือ บันทึกค่าแอมพลิจูด $A$ เป็นฟังก์ชันของ $A_D$ ในตาราง <b>B.2</b> และบอกค่าความคลาดเคลื่อนของการวัด	0.8pt
<b>B.3</b>	จงวาดกราฟของข้อมูลในกราฟ <b>B.3</b> ให้รวมค่าความคลาดเคลื่อนด้วย	1.0pt

<b>B.4</b>	จงหาพารามิเตอร์ของเส้นกราฟ เพื่อนำไปใช้หาฟังก์ชันสำหรับการเปรียบเทียบ $A(A_D)$	0.8pt
<b>B.5</b>	จงหาค่าแอมพลิจูดวิกฤตของการกระตุ้น $A_{crit}$ ของลูกบิด	0.1pt

### ข้อ C. เลขยกกำลังวิกฤต (critical exponent) (3.5 คะแนน)

ในระบบของเรา อุณหภูมิสอดคล้องกับพลังงานจลน์ของการกระตุ้นที่ใส่เข้าไป พลังงานนี้แปรผันตรงกับอัตราเร็วของลำโพง นั่นคือ  $v^2 = A^2 f^2$  โดยที่  $f$  คือความถี่ของการสั่น นักเรียนจะทดสอบความสัมพันธ์นี้ และหาเลขยกกำลัง  $b$  ของกฎเลขยกกำลัง ที่ใช้อธิบายความสัมพันธ์ของออร์เดอร์พารามิเตอร์ (ดูสมการ 1)

<b>C.1</b>	ค่า $\left  \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right $ สามารถใช้เป็นค่าออร์เดอร์พารามิเตอร์ที่ดีสำหรับระบบของเรา ค่านี้จะเท่ากับศูนย์ถ้าแอมพลิจูดมีค่ามากกว่าค่าแอมพลิจูดวิกฤต และมีค่าเท่ากับ 1 เมื่อแอมพลิจูดมีค่าต่ำๆ จงหาค่าออร์เดอร์พารามิเตอร์โดยใช้นิยามนี้เป็นฟังก์ชันของแอมพลิจูด $A$ จงบันทึกผลของนักเรียนในตาราง <b>C.1</b>	1.1pt
<b>C.2</b>	จงวาดกราฟของค่า $\left  \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2} \right $ ในรูปฟังก์ชันของ $ A_{crit}^2 - A^2 $ ในกราฟ <b>C.2</b> โดยให้แกนทั้งสองเป็น log-log (กราฟ log-log) นักเรียนสามารถใช้ตาราง <b>C.1</b> สำหรับทำการคำนวณได้ จุดบนกราฟอาจจะดูเหมือนว่าไม่เป็นไปตามความสัมพันธ์เส้นตรง แต่อย่างไรก็ตาม นักเรียนยังคงใช้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง (linear regression) เพื่อให้ตรงกับสมการของเลขยกกำลังวิกฤต	1pt
<b>C.3</b>	จงหาค่าเลขยกกำลัง $b$ และประมาณค่าความคลาดเคลื่อน	1.4pt