

แบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4

The Secondary Students' Mental Models of Chemical Bonding

ณัฏฐฤดี เกื้อทาน (Nattharit Kuathan)* ดร. ชาตรี ฝ้ายคำดา (Dr. Chatree Faikhamta)**

ดร. สุธจิตต์ สงวนเรือง (Dr. Sudjit Sanguanruang)***

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 211 คน จากโรงเรียนรัฐบาล 5 แห่ง โดยการเลือกแบบจำเพาะเจาะจง เก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบวัดแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีซึ่งเป็นข้อคำถามปลายเปิดที่ให้วาดภาพและเขียนบรรยายพร้อมอธิบายเหตุผลจำนวน 10 ข้อ โดยครอบคลุม 3 หัวข้อหลักในเรื่องพันธะเคมีได้แก่ พันธะไอออนิก พันธะโคเวเลนต์และพันธะโลหะ วิเคราะห์ข้อมูลโดยการอ่านคำตอบอย่างละเอียดแล้วตีความเพื่อหารูปแบบและประเด็นของคำตอบจากนั้นนำรูปแบบของคำตอบที่ได้มาจัดกลุ่มตามแนวคิดของ Chi และ Roscoe (2002) ผลการวิจัยพบว่านักเรียนส่วนใหญ่มีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้องตามแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ในทั้ง 3 หัวข้อหลักโดยเฉพาะอย่างยิ่งในหัวข้อย่อยต่อไปนี้คือ โครงสร้างของสารประกอบไอออนิก การนำไฟฟ้าของสารประกอบไอออนิก แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล และการเกิดพันธะโลหะ รวมทั้งยังพบว่านักเรียนนำเอาประสบการณ์หรือคำอธิบายในชีวิตประจำวันมาใช้อธิบายพันธะเคมีและสมบัติของสาร จากผลการวิจัยได้ข้อเสนอแนะว่าครูเคมีควรจัดกิจกรรมการเรียนการสอนที่ช่วยให้นักเรียนได้สร้าง ทดสอบและประเมินแบบจำลองความคิดของตนเองซึ่งจะทำให้ให้นักเรียนเข้าใจแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์มากขึ้น

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate secondary students' mental models of chemical bonding. The subjects were 211 secondary students, selected by purposive sampling from five public secondary schools. Students' mental models of chemical bonding were elicited by using a chemical bonding mental models questionnaire (CBMMQ). The CBMMQ consisted of 10 items covering three main topics of chemical bonding: the ionic bonding, the covalent bonding and the metallic bonding, in which items included open-ended questions with drawing and explanations. Data were analyzed inductively to identify patterns and categories based on the work of Chi and Roscoe (2002). The research findings indicate that the majority of students hold flawed mental models of the three main topics, particularly in the sub-topics of chemical bonding: structure of ionic compounds, conductivity of ionic compounds, intermolecular forces and metallic bond formation. The students used their everyday-life experiences to explain chemical bonding and their properties. The research findings suggest that chemistry teachers should provide learning activities which help students to construct, test and evaluate their mental models so that students would understand scientific models.

คำสำคัญ : พันธะเคมี แบบจำลองความคิด นักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษา

Key Words : Chemical bonding, Mental model, Secondary student

*นักศึกษา หลักสูตรศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

**อาจารย์ ภาควิชาการศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

***รองศาสตราจารย์ ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

บทนำ

เคมีเป็นวิชาที่เนื้อหาส่วนใหญ่มีความเป็นนามธรรมทำให้ยากต่อการทำความเข้าใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออธิบายปรากฏการณ์ทางเคมี นักเคมีมักจะอธิบายการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสารใน 3 ระดับ (Johnstone, 1993) ด้วยกัน กล่าวคือ ระดับมหภาค (Macroscopic level) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงและสังเกตเห็นได้ ระดับจุลภาค (Sub-microscopic level) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจริงแต่ไม่สามารถมองเห็นได้ เพราะจะกล่าวถึงอิเล็กตรอน โมเลกุล และอะตอม และระดับสัญลักษณ์ (Symbolic level) เป็นสิ่งที่ใช้แทนปรากฏการณ์ทางเคมีเพื่อเชื่อมโยงระหว่างระดับมหภาคกับระดับจุลภาคซึ่งมีอยู่หลายชนิด ยกตัวอย่าง เช่น แบบจำลอง สูตรเคมี หรือสมการเคมี ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าเคมีเป็นสาขาวิชาที่ต้องอธิบายและทำความเข้าใจในหลายระดับ ดังนั้นเพื่อสื่อความหมายของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนักเคมีจึงมักใช้และสร้างแบบจำลองขึ้นเพื่ออธิบายข้อมูล ทำนายเหตุการณ์ และช่วยสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Justi and Gilbert, 2002) โดยนักเคมีจะใช้แบบจำลองเป็นตัวแทนของความคิดหรือโครงสร้างทางความคิดที่อยู่ภายในสมองของตนซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะตัว หรือที่เรียกว่าแบบจำลองความคิด (Mental models) นั่นเอง (Norman, 1983; Greca and Moreira, 2000) แบบจำลองความคิดที่นักวิทยาศาสตร์สร้างขึ้นจะแสดงออกมาได้ในหลายรูปแบบ เช่น สิ่งของที่เป็นรูปธรรม ภาษา คำพูด สัญลักษณ์ หรือภาพ ซึ่งเราเรียกสิ่งเหล่านี้ว่าแบบจำลองที่แสดงออก (Expressed models) ถ้าหากแบบจำลองความคิดที่นักวิทยาศาสตร์แสดงออกมานี้ผ่านการทดลองหรือตรวจสอบจนเป็นที่ยอมรับของกลุ่มนักวิทยาศาสตร์ในปัจจุบันจะทำให้แบบจำลองความคิดนี้พัฒนาไปเป็นแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ (Scientific models) ซึ่งเป็นตัวแทนของปรากฏการณ์ เหตุการณ์ หรือระบบที่มีความถูกต้อง แม่นยำ และสมบูรณ์ (Gilbert, 2005)

การจัดการเรียนรู้ในรายวิชาเคมีมีเป้าหมายหนึ่งที่สำคัญก็คือมุ่งให้นักเรียนสามารถคิดได้อย่าง

นักวิทยาศาสตร์หรือนักเคมีรวมทั้งให้นักเรียนเข้าใจแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์อย่างถ่องแท้ กล่าวคือ มีแบบจำลองความคิดสอดคล้องกับแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ สร้างและใช้แบบจำลองเพื่ออธิบายหรือทำนายปรากฏการณ์ทางธรรมชาติ และเข้าใจธรรมชาติของแบบจำลอง (สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี [สสวท.], 2546) อันเป็นแนวทางที่นักวิทยาศาสตร์ใช้ในการพัฒนาองค์ความรู้ทางวิทยาศาสตร์ ดังนั้นการเข้าใจแบบจำลองความคิดของนักเรียนจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยนักเรียนจะต้องสร้างแบบจำลองความคิดของตนเองขึ้นมาและพยายามที่จะใช้แบบจำลองความคิดที่ตนสร้างขึ้นมานี้เพื่อที่จะเรียนรู้และทำความเข้าใจปรากฏการณ์ทางวิทยาศาสตร์ซึ่งนักเรียนพบในระหว่างที่เรียนหรือในชีวิตประจำวัน (Duit, 1991) แต่อย่างไรก็ตามมีรายงานการวิจัยจำนวนมากที่บ่งชี้ว่านักเรียนมีความเข้าใจแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ไม่ถูกต้อง และใช้แบบจำลองความคิดไม่สอดคล้องกับแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ เช่น นักเรียนพยายามใช้กฎออกเคตอธิบายการเกิดพันธะในอะลูมิเนียม (Coll and Treagust, 2003b)

พันธะเคมีเป็นเนื้อหาหนึ่งที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในวิชาเคมีเนื่องจากเป็นพื้นฐานสำคัญของการเรียนเคมีในเนื้อหาเรื่องอื่นๆ ยกตัวอย่างเช่น สมดุลเคมี กรดเบส และเคมีอินทรีย์ ดังนั้นในหลายประเทศจึงได้มีการบรรจุเนื้อหาพันธะเคมีไว้ในหลักสูตรวิทยาศาสตร์ทั้งในระดับมัธยมศึกษาและอุดมศึกษา (Taber and Coll, 2002) ในหลักสูตรวิทยาศาสตร์ของประเทศไทยก็เช่นเดียวกัน สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้บรรจุเนื้อหาพันธะเคมีไว้เป็นเรื่องหนึ่งในสาระที่ 3 สารและสมบัติของสาร (สสวท., 2546) เนื้อหาเรื่องพันธะเคมีมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากเนื้อหาอื่น ๆ ในวิชาเคมี กล่าวคือ มีการใช้แบบจำลองในหลายประเภทด้วยกัน เช่น แบบจำลองที่เป็นรูปธรรม (Concrete models) หรือแบบจำลองการอุปมาอุปไมย (Analogies models) เพื่อแทนปรากฏการณ์ที่ไม่สามารถสังเกตเห็นได้ (Taber and Coll, 2002) เช่น การเคลื่อนที่ของไอออนในสารละลาย

ไอออนิกในขณะที่นำไฟฟ้า โดยนักเรียนควรพัฒนาความเข้าใจเกี่ยวกับแบบจำลองเหล่านี้รวมทั้งความหมายสิ่งที่ใช้เป็นตัวแทนของพันธะเคมีในหลาย ๆ ชนิดด้วยกัน เช่น สูตรเคมี แผนภาพ หรือแบบจำลองลูกพลาสติก (Ball-and-stick models) อย่างไรก็ตามมีงานวิจัยที่ผ่านมาเป็นจำนวนมากที่แสดงให้เห็นว่านักเรียนมีแนวคิดคลาดเคลื่อน และมีแบบจำลองความคิดไม่สอดคล้องกับแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ เช่น พันธะไอออนิก (Coll and Treagust, 2003a) พันธะโคเวเลนต์ (Coll and Treagust, 2001) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล (Schmidt, Kaufmann and Treagust, 2009) พันธะโลหะ (Taber, 2003; Coll and Treagust, 2003b) และยังพบว่านักเรียนมักจะนำแบบจำลองความคิดในระดับพื้นฐานมาใช้อธิบายพันธะเคมี (Coll and Treagust, 2003b) นักเรียนไม่เข้าใจขอบเขตและข้อจำกัดของแบบจำลอง (Taber and Coll, 2002)

จากข้อค้นพบของงานวิจัยข้างต้นเป็นหลักฐานอย่างหนึ่งที่บ่งชี้ว่าการจัดกิจกรรมการเรียนการสอนในเรื่องพันธะเคมีที่ผ่านมายังไม่ประสบผลสำเร็จเท่าที่ควรจึงทำให้นักเรียนส่วนใหญ่ยังประสบปัญหาในการเรียนเรื่องนี้อยู่มาก ดังนั้นในฐานะที่ผู้วิจัยเป็นครูผู้สอนวิชาเคมีจึงสนใจที่จะออกแบบกิจกรรมการเรียนการสอนเพื่อพัฒนาแบบจำลองความคิดของนักเรียนในเรื่องนี้ ในการพัฒนากิจกรรมการเรียนการสอนดังกล่าวจำเป็นต้องพิจารณาข้อมูลเกี่ยวกับแบบจำลองความคิดของนักเรียนในวิชาเคมีในบริบทของประเทศไทย งานวิจัยนี้จึงมุ่งที่จะสำรวจแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 เพื่อนำข้อมูลที่ได้มาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบและพัฒนากิจกรรมการเรียนการสอนให้นักเรียนมีแบบจำลองความคิดที่สอดคล้องกับแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4

วิธีการวิจัย

รูปแบบการวิจัย

รูปแบบการวิจัยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเชิงสำรวจ (Survey research) ซึ่งผู้วิจัยสำรวจแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ที่ผ่านการเรียนเรื่องพันธะเคมีมาแล้วโดยใช้แบบวัดแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมี

กลุ่มที่ศึกษา

กลุ่มที่ศึกษาได้แก่ นักเรียนระดับชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 แผนการเรียนวิทยาศาสตร์ที่ผ่านการเรียนเรื่องพันธะเคมีมาแล้วในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2551 จากโรงเรียนมัธยมศึกษาของรัฐบาล 5 แห่ง ในจังหวัดอำนาจเจริญ และอุบลราชธานี รวม 211 คน ซึ่งได้มาจากการวิธีการเลือกแบบจำเพาะเจาะจง (Purposive sampling)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแบบวัดแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีซึ่งเป็นข้อคำถามแบบปลายเปิดที่ให้วาดภาพและเขียนบรรยายพร้อมอธิบายเหตุผลประกอบกัน รวมทั้งสิ้น 10 ข้อ โดยครอบคลุมเนื้อหาเรื่องพันธะเคมีใน 3 หัวข้อหลักคือ พันธะไอออนิก พันธะโคเวเลนต์ และพันธะโลหะ ซึ่งประกอบด้วย 10 หัวข้อย่อย ได้แก่ การเกิดพันธะไอออนิก โครงสร้างของสารประกอบไอออนิก การนำไฟฟ้าของสารประกอบไอออนิก การเกิดพันธะโคเวเลนต์ รูปร่างโมเลกุล สภาพขั้วของโมเลกุล แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล การนำไฟฟ้าสารโครงสร้างตาข่าย การเกิดพันธะโลหะ และการนำไฟฟ้าของโลหะ

แบบวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นมานี้ได้นำไปเสนอต่อผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่านเพื่อตรวจสอบความเที่ยงตรงด้านเนื้อหาและความเที่ยงตรงด้านโครงสร้างจากนั้นผู้วิจัยได้นำแบบวัดนี้ไปทดลองใช้กับกลุ่มนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 จำนวน 20 คน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกลุ่มที่ศึกษาเพื่อตรวจสอบความเข้าใจในด้านการใช้ภาษา การสื่อความหมายของข้อคำถามแต่ละข้อ ตลอดจนศึกษาเวลาที่เหมาะสมที่ใช้ในการทำแบบวัด

วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยขออนุญาตโรงเรียนทั้ง 5 แห่งในการเก็บข้อมูลในช่วงต้นเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2552 ซึ่งผู้วิจัยทำหน้าที่เป็นผู้เก็บข้อมูลด้วยตนเองโดยได้ให้นักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 แผนการเรียนวิทยาศาสตร์ที่ผ่านการเรียนเรื่องพันธะเคมีมาแล้ว จำนวน 211 คน โดยความสามารถในรายวิชาเคมีทำแบบวัดแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีซึ่งใช้เวลา 90 นาที ซึ่งผู้วิจัยได้รับแบบวัดคืนมาทั้งหมด จำนวน 211 ฉบับ คิดเป็นร้อยละ 100

การวิเคราะห์ข้อมูล

คำตอบที่ได้จากแบบวัดแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีผู้วิจัยได้นำมาวิเคราะห์ข้อมูลทั้งเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณ ในส่วนของการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพผู้วิจัยวิเคราะห์คำตอบเป็นรายข้อโดยอ่านคำตอบของนักเรียนอย่างละเอียดซึ่งพิจารณาทั้งภาพที่วาดและข้อความหรือเหตุผลที่เขียนบรรยายแล้วตีความเพื่อเปรียบเทียบหารูปแบบของคำตอบและประเด็นจากนั้นนำรูปแบบของคำตอบมาจัดกลุ่มแบบจำลองความคิดของนักเรียนโดยแบ่งออกเป็น 6 กลุ่มซึ่งประยุกต์จากการจัดกลุ่มแบบจำลองความคิดของ Chi and Roscoe (2002) ดังนี้ (1) แบบจำลองความคิดที่ถูกต้อง (Correct mental models) (2) แบบจำลองความคิดที่ถูกต้องแต่ไม่สมบูรณ์ (Incomplete correct mental models) (3) แบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง (Complete flawed mental models) (4) แบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้อง (Flawed mental models) (5) แบบจำลองความคิดที่ไม่เชื่อมโยง (Incoherent mental model) และ (6) ไม่แสดงแบบจำลองความคิด (No response)

ส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณนั้นผู้วิจัยหาความถี่ของคำตอบ และรายงานโดยใช้ค่าร้อยละเพื่อแสดงจำนวนของนักเรียนที่มีแบบจำลองความคิดในกลุ่มต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์คำตอบได้รับการตรวจสอบความเที่ยงตรงด้านเนื้อหาอีกครั้งหนึ่งจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน

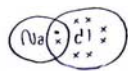
ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์คำตอบของนักเรียนผู้วิจัยขอเสนอแบบจำลองความคิดของนักเรียนในเรื่องการเกิดพันธะไอออนิก โครงสร้างของสารประกอบไอออนิก การนำไฟฟ้าของสารประกอบไอออนิก สภาพขั้วของโมเลกุล แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล การนำไฟฟ้าของสาร โครงสร้างตาข่าย การเกิดพันธะโลหะ และการนำไฟฟ้าของโลหะ ตามลำดับดังนี้

การเกิดพันธะไอออนิก

เมื่อให้นักเรียนวาดภาพแล้วบอกชนิดของพันธะ พร้อมทั้งอธิบายการเกิดพันธะในสารประกอบโซเดียมคลอไรด์พบว่านักเรียนส่วนใหญ่ (ร้อยละ 31) มีแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง โดยมีนักเรียนจำนวนหนึ่งของกลุ่มนี้คิดว่าในสารประกอบไอออนิกมีการเกิดพันธะคล้ายกับการเกิดพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งนักเรียนได้วาดภาพที่ 1 (ก) พร้อมทั้งอธิบายว่า “พันธะภายในสารประกอบโซเดียมคลอไรด์เป็นพันธะไอออนิกชนิดพันธะเดี่ยวเกิดจากธาตุโลหะเป็นตัวให้อิเล็กตรอนและธาตุโลหะเป็นตัวรับอิเล็กตรอนเพื่อให้มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนครบแปดตามกฎออกเตต” ความคิดนี้คล้ายกับนักเรียนอีกกลุ่มหนึ่งที่มองว่าในสารประกอบไอออนิกมีการเกิดพันธะโคเวเลนต์ซึ่งจัดว่าเป็นแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้อง หากพิจารณาลักษณะของแบบจำลองความคิดทั้ง 2 กลุ่มนี้จะเห็นว่านักเรียนมีความสับสนระหว่างแบบจำลองที่นำมาใช้อธิบายในการเกิดพันธะไอออนิกกับพันธะโคเวเลนต์นั้นคือนักเรียนพยายามนำเอากฎออกเตตมาใช้อธิบายการเกิดพันธะของโซเดียมกับคลอรีนแสดงว่านักเรียนไม่เข้าใจขอบเขตและข้อจำกัดของแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ ซึ่งสอดคล้องกับ Taber and Coll (2002) ที่รายงานว่านักเรียนส่วนใหญ่มักจะอธิบายการเกิดพันธะเคมีโดยใช้กรอบแนวคิดของกฎออกเตต ในขณะที่มีนักเรียนเพียง

ร้อยละ 10 เท่านั้นที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้อง โดยนักเรียนวาดภาพที่ 1 (ข) และอธิบายว่า “พันธะภายในสารประกอบโซเดียมคลอไรด์เป็นพันธะไอออนิกซึ่งเกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างไอออนบวกกับไอออนลบ”



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 นักเรียนวาดภาพแสดงการเกิดพันธะภายในสารประกอบโซเดียมคลอไรด์

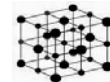
โครงสร้างของสารประกอบไอออนิก

นักเรียนส่วนน้อย (ร้อยละ 11) มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้องซึ่งนักเรียนกลุ่มนี้เชื่อว่าถ้านำผลึกของโซเดียมคลอไรด์ไปสับด้วยเครื่องมือที่มีคุณภาพสูงจนมองเห็นอนุภาคภายในที่เป็นองค์ประกอบภาพที่เห็นจะมีลักษณะดังภาพที่ 2 (ก) และ (ข) โดยนักเรียนอธิบายว่า “อนุภาคของไอออนบวกและไอออนลบในสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไอออนิกและจะเรียงสลับกันไปต่อเนื่องทั้งสามมิติเป็นโครงผลึก” อย่างไรก็ตามมีนักเรียนมากกว่าครึ่งหนึ่ง (ร้อยละ 60) ที่มีแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง ยกตัวอย่างเช่น นักเรียนบางส่วนของกลุ่มนี้บอกว่าสิ่งที่มองเห็นจะเหมือนกับภาพที่ 2 (ข) โดยนักเรียนเข้าใจว่าสารประกอบไอออนิกจะมีโครงสร้างคล้ายตาข่ายและไม่แข็งแรงซึ่งนักเรียนให้เหตุผลสนับสนุนว่า “เนื่องจากสารประกอบโซเดียมคลอไรด์เป็นของแข็งที่ละลายน้ำได้เร็วอนุภาคของสารจะรวมกันไม่หนาแน่นหรืออยู่ไม่ชิดกันจนเกินไปดังนั้นน่าจะมีรูปร่างคล้ายตาข่าย” จากลักษณะของแบบจำลองความคิดนี้แสดงให้เห็นว่านักเรียนไม่สามารถเชื่อมโยงใน 3 ระดับของการอธิบายในทางเคมี

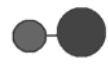
ได้ นักเรียนเข้าใจการเปลี่ยนแปลงของสารเพียงแต่ในระดับมหภาคเท่านั้น ดังนั้นจึงเลือกที่จะสร้างคำอธิบายจากประสบการณ์ในชีวิตประจำวันที่พบซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hinton and Nakhleh (1999) ที่พบว่านักเรียนสามารถเชื่อมโยงระหว่างระดับมหภาคกับระดับสัญลักษณ์ได้แต่ไม่สามารถเชื่อมโยงในระดับจุลภาคได้ ผู้วิจัยยังพบอีกว่ามีนักเรียนอีกส่วนหนึ่งในกลุ่มเดียวกันนี้คิดว่าสิ่งที่เห็นคือภาพที่ 2 (ค) โดยนักเรียนเชื่อว่าสารประกอบไอออนิกจะอยู่เป็นโมเลกุลเดี่ยว ที่นักเรียนเข้าใจเช่นนี้อาจมีผลมาจากนักเรียนกลุ่มนี้ไม่เข้าใจในเรื่องการเกิดพันธะไอออนิกอย่างชัดเจนจึงส่งผลมีแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 2 แบบจำลองโครงสร้างผลึกของสารประกอบโซเดียมคลอไรด์ที่นักเรียนเลือก

การนำไฟฟ้าของสารประกอบไอออนิก

เมื่อให้นักเรียนวาดภาพและอธิบายการนำไฟฟ้าของสารประกอบแคลเซียมคลอไรด์เมื่ออยู่ในสถานะที่เป็นของแข็งและสารละลาย ผลที่ได้ในตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่านักเรียนส่วนใหญ่ (ร้อยละ 57) มีแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง ซึ่งมีอยู่หลายประเด็นด้วยกัน เช่น มีนักเรียนจำนวนมากในกลุ่มนี้เชื่อว่าน้ำทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าในสารละลายไอออนิกโดยวาดภาพที่ 3 (ก) แทนสารในสถานะของแข็งและ (ข) แทนแคลเซียมคลอไรด์เมื่อเป็นสารละลายแล้วอธิบายว่า “สารประกอบแคลเซียมคลอไรด์เมื่อเป็นของแข็งจะไม่นำไฟฟ้าเนื่องจากไม่มีตัวนำไฟฟ้าแต่เมื่อทำให้เป็นสารละลายจะนำไฟฟ้าได้เพราะมีน้ำเป็นตัวนำไฟฟ้า เช่น เวลาที่มือเราเปียกถ้าไปจับ

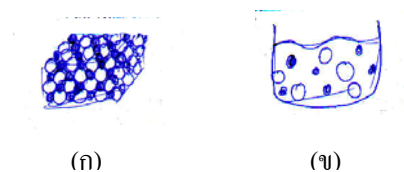
ตารางที่ 1 ลักษณะของแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 (N = 211)

หัวข้อหลัก/หัวข้อย่อย	จำนวนนักเรียน (ร้อยละ)					
	CMM [*]	ICMM [*]	CFMM [*]	FMM [*]	IMM [*]	NR [*]
พันธะไอออนิก						
- การเกิดพันธะไอออนิก	22 (10)	36 (17)	66 (31)	33 (16)	36 (17)	18 (9)
- โครงสร้างของสารประกอบไอออนิก	24 (11)	30 (14)	127 (60)	34 (16)	0 (0)	11 (5)
- การนำไฟฟ้าของสารประกอบไอออนิก	8 (4)	52 (25)	120 (57)	8 (4)	0 (0)	23 (11)
พันธะโคเวเลนต์						
- การเกิดพันธะโคเวเลนต์	31 (15)	44 (21)	36 (17)	16 (8)	61 (29)	23 (11)
- รูปร่างโมเลกุล	0 (0)	40 (19)	75 (36)	15 (7)	48 (23)	33 (16)
- สภาพขั้วของโมเลกุล	0 (0)	7 (3)	77 (36)	38 (18)	61 (29)	28 (13)
- แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล	3 (1)	6 (3)	9 (4)	113 (54)	52 (25)	28 (13)
- การนำไฟฟ้าสาร โครงผลึกร่างตาข่าย	10 (5)	16 (8)	64 (30)	114 (54)	0 (0)	7 (3)
พันธะโลหะ						
- การเกิดพันธะโลหะ	3 (1)	6 (3)	57 (27)	109 (52)	9 (4)	26 (12)
- การนำไฟฟ้าของโลหะ	5 (2)	6 (3)	14 (7)	95 (45)	83 (39)	8 (4)

^{*} หมายเหตุ : CMM หมายถึง แบบจำลองความคิดที่ถูกต้อง, ICMM หมายถึง แบบจำลองความคิดที่ถูกต้องแต่ไม่สมบูรณ์, CFMM หมายถึง แบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง, FMM หมายถึง แบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้อง, IMM หมายถึง แบบจำลองความคิดที่ไม่เชื่อมโยง, NR หมายถึง ไม่แสดงแบบจำลองความคิด

ปลั๊กไฟจะทำให้ไฟฟ้าช็อตได้” ที่นักเรียนมีแบบจำลองความคิดในลักษณะนี้อาจเกิดจากเรียนรู้แบบท่องจำโดยไม่ได้เข้าใจอย่างถ่องแท้ และอีกสาเหตุหนึ่งน่าจะมาจากความหมายของคำเดียวกันที่ใช้ในชีวิตประจำวันและในทางวิทยาศาสตร์มีความหมายต่างกัน กล่าวคือ “น้ำ” ในทางเคมีหมายถึงน้ำบริสุทธิ์ซึ่งไม่สามารถนำไฟฟ้าได้ เนื่องจากมีการแตกตัวเป็นไอออนได้น้อยมาก แต่น้ำที่นักเรียนกล่าวถึงในที่นี้คือ น้ำที่มีไอออนชนิดอื่นเจือปนอยู่ซึ่งจะสามารถทำให้น้ำไฟฟ้าได้ ขณะที่นักเรียนอีกส่วนหนึ่งของกลุ่มเดียวกันนี้คิดว่าการนำไฟฟ้าของสารประกอบไอออนิกเกิดจากการการทำให้ประจุกับน้ำ

โดยได้วาดภาพเช่นเดียวกับภาพที่ 3 แต่ได้ให้ความเห็นที่แตกต่างไปว่า “แคลเซียมคลอไรด์เมื่อเป็นผลึกหรือของแข็งจะไม่นำไฟฟ้าเนื่องจากไม่มีตัวทำปฏิกิริยาแต่เมื่อนำแคลเซียมคลอไรด์ไปละลายน้ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยากับน้ำจึงทำให้น้ำไฟฟ้าได้”



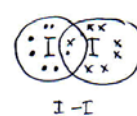
ภาพที่ 3 นักเรียนวาดภาพสารประกอบแคลเซียมคลอไรด์เมื่ออยู่ในสถานะของแข็งและสารละลาย

จากลักษณะที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่านักเรียนมีแนวคิดทางเลือกในเรื่องการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและการเปลี่ยนแปลงทางเคมีซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญ ดังนั้นจึงส่งผลให้นักเรียนมีการสร้างแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้องขึ้นมาซึ่งสอดคล้องกับที่ Greca and Moreira (2000) ได้กล่าวว่าแบบจำลองความคิดจะสร้างขึ้นบนพื้นฐานของความคิด หรือแนวคิดที่มีอยู่เดิม และประสบการณ์เดิมที่ผ่านมา ยิ่งไปกว่านั้นยังพบอีกว่านักเรียนในกลุ่มเดิมนี้นับว่าน้อยที่ยืนยันว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในสารละลายเป็นปัจจัยที่ทำให้สารประกอบไอออนิกนำไฟฟ้าได้ซึ่งประเด็นที่พบนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Coll and Treagust (2001) ที่พบว่านักศึกษานในระดับบัณฑิตศึกษาอธิบายการนำไฟฟ้าของโซเดียมคลอไรด์ที่หลอมเหลวว่ามาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้อย่างอิสระ อย่างไรก็ตามยังมีนักเรียนส่วนน้อย (ร้อยละ 4) ที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้อง ซึ่งนักเรียนมองว่าการเคลื่อนที่ของไอออนบวกและไอออนลบในสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญของการนำไฟฟ้าในสารละลายไอออนิก

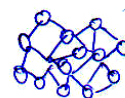
การเกิดพันธะโคเวเลนต์

เมื่อให้นักเรียนพิจารณาภาพผลึกของไอโอดีนแล้วให้วาดภาพและอธิบายถึงการสร้างพันธะของโมเลกุลไอโอดีน 1 โมเลกุล พบว่านักเรียนร้อยละ 15 มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้องโดยนักเรียนกลุ่มนี้คิดว่าพันธะโคเวเลนต์เกิดจากแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมที่นำเอาเวเลนซ์อิเล็กตรอนมาใช้ร่วมกันตามกฎออกเตต ซึ่งนักเรียนวาดภาพที่ 4 (ก) พร้อมทั้งอธิบายประกอบว่า “ภายในโมเลกุลของไอโอดีนยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโคเวเลนต์ซึ่งเกิดจากอะตอมของไอโอดีนนำเอาเวเลนซ์อิเล็กตรอนมาใช้ร่วมกัน 1 คู่ เพื่อให้มีจำนวนเวเลนซ์อิเล็กตรอนครบแปดตามกฎออกเตต” แต่เป็นที่น่า

แปลกใจว่านักเรียนจำนวนไม่น้อย (ร้อยละ 29) ที่แสดงออกถึงแบบจำลองความคิดที่ไม่เชื่อมโยงซึ่งมีอยู่หลายลักษณะด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น นักเรียนในกลุ่มนี้จำนวนมากที่เข้าใจเพียงแค่ว่าพันธะคือการเชื่อมโยงให้อยู่รวมกันเท่านั้นโดยนักเรียนได้วาดภาพที่ 4 (ข) แล้วระบุว่า “ไอโอดีนเป็นของแข็งเกิดจากการตกผลึกจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มซึ่งจะมีพันธะที่เชื่อมต่อกัน” ในกรณีนี้อาจมีสาเหตุมาจากนักเรียนไม่เข้าใจคำว่า “โมเลกุล” คืออะไร โดยนักเรียนอาจจะคิดว่าภาพผลึกของไอโอดีนที่มองเห็นทั้งหมดคือ 1 โมเลกุล โดยไม่ได้ตระหนักว่าโมเลกุลคือสิ่งที่ไม่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งความเข้าใจในลักษณะเช่นนี้อาจมาจากการอธิบายของครูในขณะที่ยสอนโดยครูลืมคิดไปว่า “อะตอม” หรือ “โมเลกุล” ที่ครูใช้ในการอธิบายนั้นคือแบบจำลองซึ่งไม่ใช่ของจริง



(ก)



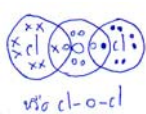
(ข)

ภาพที่ 4 นักเรียนวาดภาพแสดงการสร้างพันธะภายในโมเลกุลของไอโอดีน

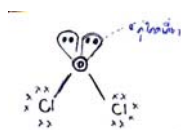
รูปร่างโมเลกุล

แบบจำลองความคิดที่ถูกต้องตามแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์เรื่องรูปร่างโมเลกุลที่คาดหวังควรมีลักษณะดังนี้คือรูปร่างโมเลกุลทำนายได้จากแบบจำลองการผลักระหว่างคู่อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงเวเลนซ์ (VSEPR) โดยพิจารณาจากจำนวนคู่อิเล็กตรอนรอบอะตอมกลางซึ่งจะมีการจัดตัวกันในทิศทางที่ให้อยู่ห่างกันมากที่สุดเพื่อลดแรงผลักระหว่างคู่อิเล็กตรอน เป็นที่น่าสังเกตว่าจากตารางที่ 1 ไม่มีนักเรียนคนใดเลยที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้อง หากแต่พบว่านักเรียนส่วนมาก (ร้อยละ 36) มีแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง ยกตัวอย่างเช่น มีนักเรียนส่วนหนึ่งใน

กลุ่มนี้ที่คิดว่ารูปร่างโมเลกุลสามารถทำนายได้จากจำนวนอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวเพียงอย่างเดียวเท่านั้นโดยได้วาดที่ 5 (ก) และอธิบายเหตุผลสนับสนุนว่า “รูปร่างโมเลกุลของไดคลอรีนมอนอกไซด์เป็นแบบเส้นตรงเนื่องจากมีการสร้างพันธะโคเวเลนต์ที่ไม่เหลืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่เลยจึงทำให้โครงสร้างโมเลกุลไม่เกิดมุมงอ” ขณะที่นักเรียนอีกกลุ่มหนึ่งร้อยละ 19 ซึ่งเป็นกลุ่มที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้องแต่ไม่สมบูรณ์มีความเชื่อเช่นเดียวกันว่ารูปร่างโมเลกุลสามารถทำนายได้จากจำนวนอิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวรอบอะตอมกลางเพียงอย่างเดียวเท่านั้นแต่ได้วาดภาพที่ 5 (ข) พร้อมให้เหตุผลที่ต่างออกไปว่า “ไดคลอรีนมอนอกไซด์มีรูปร่างโมเลกุลเป็นแบบมุมงอเพราะโมเลกุลเหลืออิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยวอยู่ 2 คู่ ซึ่งทำให้เกิดมีแรงผลักรบกวนกันคลอรีนลงมาเป็นมุมงอ”



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 นักเรียนวาดภาพรูปร่างโมเลกุลของไดคลอรีนมอนอกไซด์

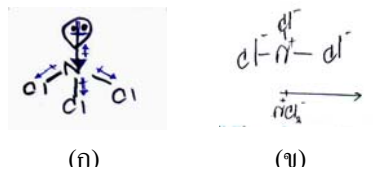
จากลักษณะแบบจำลองความคิดของนักเรียนในทั้ง 2 กลุ่มนี้ถูกต้องเพียงบางส่วนเท่านั้นทั้งนี้อาจเนื่องมาจากนักเรียนไม่ได้พยายามที่จะทำความเข้าใจอย่างถ่องแท้ว่ารูปร่างโมเลกุลสามารถทำนายได้อย่างไร ประกอบกับในการที่จะเข้าใจเรื่องนี้นั้นนักเรียนจะต้องมีความเข้าใจแนวคิดของการเขียนสูตรลิวอิสมาก่อน รวมทั้งต้องใช้จินตนาการในการจำลองภาพ ดังนั้นนักเรียนเหล่านี้จึงเลือกเรียนรู้โดยการท่องจำแทนการทำความเข้าใจ โดยเฉพาะอย่างยิ่งนักเรียนในกลุ่มแรกแสดงให้เห็นว่ามีแนวคิดทางเลือกเกี่ยวกับ “อิเล็กตรอนคู่โดดเดี่ยว” ซึ่งประเด็นนี้ชี้ว่านักเรียนไม่ได้เข้าใจอย่าง

ถ่องแท้ในเรื่องการเขียนสูตรลิวอิสซึ่งเป็นพื้นฐานสำคัญในการเรียนเรื่องพันธะโคเวเลนต์

สภาพัฒของโมเลกุล

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยวัดแบบจำลองความคิดโดยให้นักเรียนทำนายสภาพัฒของโมเลกุลในไตรเจนไทรคัลไรด์เป็นที่น่าสนใจว่าในเรื่องนี้ไม่นักเรียนแม้แต่คนเดียวที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้องหากแต่พบว่านักเรียนเพียงส่วนน้อย (ร้อยละ 3) เท่านั้นที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้องแต่ไม่สมบูรณ์ซึ่งนักเรียนเหล่านี้เข้าใจว่าสภาพัฒของโมเลกุลขึ้นอยู่กับรูปร่างของโมเลกุลเท่านั้นโดยนักเรียนได้วาดภาพที่ 6 (ก) และบรรยายว่า “ในไตรเจนไทรคัลไรด์เป็นโมเลกุลมีขั้วเนื่องจากโมเลกุลมีรูปร่างเป็นพีระมิดฐานสามเหลี่ยมทำให้แรงผลักรบกวนในโมเลกุลหักล้างไม่หมดโมเลกุลจึงมีขั้ว” ขณะที่พบนักเรียนส่วนมาก (ร้อยละ 36) มีแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง ยกตัวอย่างเช่น มีนักเรียนในกลุ่มนี้จำนวนมากที่คิดว่าสภาพัฒของโมเลกุลหาได้จากผลบวกแบบคณิตศาสตร์ของค่าประจุไฟฟ้าทุกชนิดที่เป็นองค์ประกอบในโมเลกุล โดยนักเรียนได้วาดภาพที่ 6 (ข) และอธิบายไว้ดังนี้ “ในไตรเจนไทรคัลไรด์เป็นโมเลกุลมีขั้วเนื่องจากธาตุไนโตรเจนมีประจุเป็นบวกหนึ่ง (+1) ส่วนคลอรีนมีประจุเป็นลบหนึ่ง (-1) แต่มีอยู่ 3 อะตอม ดังนั้นผลรวมประจุของธาตุองค์ประกอบในโมเลกุลจึงทำให้มีสภาพัฒเป็นลบเนื่องจากหักล้างกันไม่หมดทำให้โมเลกุลมีขั้ว” อีกตัวอย่างหนึ่งที่พบคือนักเรียนส่วนหนึ่งของกลุ่มเดียวกันนี้เชื่อว่าสภาพัฒของพันธะคือสภาพัฒของโมเลกุลเนื่องจากนักเรียนระบุว่า “ในไตรเจนไทรคัลไรด์เป็นโมเลกุลมีขั้วเนื่องจากธาตุที่เป็นองค์ประกอบมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีแตกต่างกันคือไนโตรเจนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีต่ำส่วนคลอรีนมีค่า

อิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงจึงทำให้แรงดึงดูดเกิดขึ้นทำให้โมเลกุลมีขั้ว”



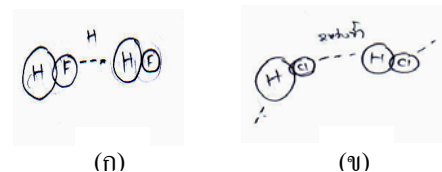
ภาพที่ 6 นักเรียนวาดภาพรูปร่างโมเลกุลของไนโตรเจนไดรอกไซด์

เมื่อพิจารณาลักษณะแบบจำลองความคิดในแต่ละกลุ่มของนักเรียนในเรื่องนี้อาจจะมีสาเหตุมาจากนักเรียนมีแบบจำลองความคิดที่ใช้เป็นพื้นฐานในการทำนายสภาพขั้วของโมเลกุลไม่ถูกต้อง กล่าวคือ การที่นักเรียนจะทำนายสภาพขั้วของโมเลกุลได้นั้นนักเรียนต้องมีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้องในเรื่องการเขียนสูตรลิวอิส รูปร่างโมเลกุล ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี สภาพขั้วของพันธะ และเวกเตอร์ ล้วนแต่มีลักษณะเป็นนามธรรม ซึ่งต้องใช้จินตนาการ ดังนั้นจึงทำให้นักเรียนเหล่านี้เลือกวิธีการการท่องจำองค์ประกอบที่ใช้ทำนายสภาพขั้วของโมเลกุลแทนการทำความเข้าใจอย่างถ่องแท้จะเห็นได้จากนักเรียนมักจะใช้คำว่า “หักล้างกันไม่หมด” โดยไม่ได้เข้าใจอย่างถ่องแท้ว่าจริง ๆ แล้วอะไรที่หักล้างกัน จึงทำให้นักเรียนบางกลุ่มเลือกใช้วิธีการบวกลบแบบพีชคณิตแทนแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ จึงส่งผลให้นักเรียนมีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้อง

แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล

เมื่อให้นักเรียนอธิบายเหตุผลที่ทำให้จุดเดือดของไฮโดรเจนฟลูออไรด์กับไฮโดรเจนคลอไรด์มีความแตกต่างกันอย่างมาก ผลจากตารางที่ 1 แสดงให้เห็นว่ามีนักเรียนเพียงร้อยละ 1 เท่านั้นที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้อง โดยนักเรียนจำนวนนี้เชื่อว่าสิ่งที่ทำให้จุดเดือดของสารทั้งสองชนิดแตกต่างกันมากคือแรงยึดเหนี่ยว

ระหว่างโมเลกุล นักเรียนได้วาดภาพที่ 7 (ก) แทนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์และภาพที่ 7 (ข) แทนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนคลอไรด์ พร้อมกับอธิบายว่า “สารประกอบไฮโดรเจนฟลูออไรด์มีแรงยึดเหนี่ยวภายนอก (ระหว่าง) โมเลกุลคือพันธะไฮโดรเจนซึ่งแข็งแรงดึงดูดที่มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างขั้วของไฮโดรเจนคลอไรด์ทำให้เมื่อจะทำให้แรงยึดเหนี่ยวภายนอกหลุดจะต้องใช้พลังงานสูงกว่า”



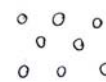
ภาพที่ 7 นักเรียนวาดภาพแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์และไฮโดรเจนคลอไรด์

นักเรียนมากกว่าครึ่งหนึ่ง (ร้อยละ 54) มีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้อง โดยลักษณะของแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้องที่พบนี้มีอยู่หลายประเด็นด้วยกัน ยกตัวอย่างเช่น นักเรียนส่วนหนึ่งของกลุ่มนี้เชื่อว่าแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมภายในโมเลกุลกับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลเป็นสิ่งเดียวกันซึ่งนักเรียนอธิบายว่า “ฟลูออรีนมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีมากกว่าคลอรีนทำให้ไฮโดรเจนฟลูออไรด์มีผลต่างค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูงจึงทำให้พันธะแข็งแรงมากเมื่อพันธะแข็งแรงมากจุดเดือดก็มากด้วยเพราะต้องใช้พลังงานความร้อนมากในการทำลายพันธะให้สารเดือด” การที่นักเรียนมีแบบจำลองความคิดเช่นนี้อาจจะมาจาก 2 สาเหตุด้วยกันคือ สาเหตุแรกนักเรียนเหล่านี้มีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้องในเรื่องสภาพขั้วของโมเลกุลซึ่งเป็นพื้นฐานในการอธิบายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล อีกสาเหตุหนึ่งคือนักเรียนเหล่านี้ไม่สามารถเชื่อมโยงการอธิบายในระดับมหภาคกับระดับ

จุลภาคได้โดยไม่สามารถนึกภาพได้ว่าในขณะที่สารเคื่อนั้นโมเลกุลหรืออะตอมมีการเปลี่ยนแปลงหรือไม่อย่างไร สังเกตได้จากคำตอบของนักเรียนเหล่านี้ที่แสดงแนวคิดทางเลือกกว่าการเคื่อนของสารโคเวเลนต์เกิดจากการสลายพันธะหรือพันธะถูกทำลายซึ่งเป็นการเข้าใจที่ไม่ถูกต้อง ประเด็นนี้สอดคล้องกับ Schmidt, Kaufmaun and Treagust (2009) ที่พบว่านักเรียนเข้าใจว่าการเคื่อนของสารประกอบอินทรีย์มีสาเหตุมาจากพันธะโคเวเลนต์ถูกทำลาย ขณะที่นักเรียนบางส่วนในกลุ่มเดียวกันนี้คิดว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลขึ้นอยู่กับระยะห่างของอนุภาคและขนาดโมเลกุล โดยนักเรียนได้วาดภาพที่ 8 (ก) แทนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์และวาดภาพที่ 8 (ข) แทนแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนคลอไรด์ จากลักษณะของแบบจำลองความคิดนี้บอกเป็นนัยว่านักเรียนเหล่านี้ได้พยายามนำเอาแบบจำลองอนุภาคที่อยู่ใกล้ชิดกันหรือห่างกันของสารมาใช้อธิบายจุดเคื่อนของสารโคเวเลนต์แทนแบบจำลองแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลที่นักเรียนเข้าใจเช่นนี้อาจจะมาจากนักเรียนเหล่านี้ไม่เข้าใจว่าสารทั้ง 2 ชนิดนี้มีสถานะเป็นแก๊สเหมือนกัน ดังนั้นนักเรียนเหล่านี้จึงนำเอาแบบจำลองที่คุ้นเคยมาใช้ในการสร้างคำอธิบายให้กับตนเองโดยไม่ได้ตระหนักถึงความเหมาะสมของบริบทที่นำแบบจำลองมาใช้เช่นเดียวกับที่ Coll and Treagust (2001) รายงานว่าเมื่อให้นักเรียนอธิบายจุดเคื่อนของสารประกอบไฮโดรของธาตุในหมู่ 5 -7 พบว่าไม่มีนักเรียนคนใดอธิบายได้ชัดเจนในประเด็นความแข็งแรงของแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแต่จะอธิบายโดยใช้ขนาดของอะตอมแทน



(ก)



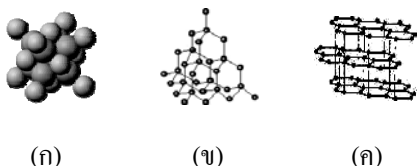
(ข)

ภาพที่ 8 นักเรียนวาดภาพแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของไฮโดรเจนฟลูออไรด์และไฮโดรเจนคลอไรด์

การนำไฟฟ้าของสารโคเวเลนต์

เมื่อให้นักเรียนเลือกภาพแบบจำลองจากที่กำหนดมาให้เพื่อใช้อธิบายสมบัติการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์พบว่านักเรียนส่วนใหญ่ (ร้อยละ 54) มีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้อง กล่าวคือ มีนักเรียนบางส่วนในกลุ่มนี้ที่เชื่อว่าการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดจากโครงสร้างที่มีอนุภาคอยู่ติดกันซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ โดยนักเรียนตัดสินใจเลือกภาพที่ 9 (ก) และให้เหตุผลสนับสนุนว่า “เนื่องจากโครงสร้างของโมเลกุลมีอนุภาคยึดติดกันอย่างเหนียวแน่นแข็งแรงและเป็นระเบียบอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระทำให้แกรไฟต์นำไฟฟ้าได้” การที่นักเรียนมีแบบจำลองความคิดในลักษณะนี้น่าจะมีสาเหตุมาจาก 2 ประการด้วยกันคือ ประการแรกนักเรียนไม่สามารถเชื่อมโยงสิ่งที่สังเกตเห็นในระดับมหภาคไปยังระดับจุลภาคได้ ดังนั้นนักเรียนจึงเลือกใช้แบบจำลองที่คุ้นเคยหรือที่เคยเรียนมาก่อนในเรื่องสารประกอบไอออนิกมาใช้ในการอธิบายการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taber (2003) ที่ระบุว่านักเรียนมักจะนำประสบการณ์เดิม หรือความรู้เดิมที่เคยเรียนมาก่อนมาใช้ในการสร้างความหมายในเรื่องที่เรียนภายหลัง ประการที่สองนักเรียนใช้แบบจำลองอนุภาคของแข็งมาใช้ในการอธิบาย สังเกตได้จากนักเรียนมักจะใช้คำว่า “ติดกัน” “เหนียวแน่น” “เป็นระเบียบ” ซึ่งแสดงให้เห็นว่านักเรียนเรียนรู้แบบท่องจำว่าของแข็งมีลักษณะอย่างไรโดยไม่ได้เข้าใจอย่างถ่องแท้ว่าอนุภาคของ

ของแข็งแต่ละชนิดนั้นแตกต่างกัน เช่น เกลือแกง เพชร หรืออะลูมิเนียม ขณะที่ยังมีนักเรียนอีกส่วนหนึ่งของกลุ่มนี้ที่เชื่อว่าการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดจากอนุภาคที่อยู่ห่างกันแต่มีการเชื่อมโยงระหว่างอนุภาค นักเรียนจึงเลือกภาพที่ 9 (ข) พร้อมกับอธิบายเหตุผลว่า “เนื่องจากเป็นสารประกอบคาร์บอนที่จับกันด้วยพันธะโคเวเลนต์โครงสร้างร่างตาข่ายอนุภาคจึงอยู่ห่างกันและมีการเชื่อมโยงของอนุภาคทำให้ไฟฟ้าไหลผ่านได้ดีจึงทำให้นำไฟฟ้าได้” นอกจากนี้ยังพบว่านักเรียนส่วนน้อย (ร้อยละ 5) มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้อง กล่าวคือ นักเรียนกลุ่มนี้เชื่อว่าการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์เกิดจากมีอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถเคลื่อนที่ได้้อยู่ภายในชั้นเดียวกัน โดยนักเรียนได้เลือกภาพที่ 9 (ค) ประกอบคำอธิบายว่า “โครงสร้างของแกรไฟต์เป็นสารโครงสร้างร่างตาข่ายที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบซึ่งมีอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระที่ทำให้สามารถนำไฟฟ้าได้แต่ไม่ค่อยดีเพราะนำไฟฟ้าได้เป็นชั้น”



ภาพที่ 9 ภาพแบบจำลองที่นักเรียนเลือกใช้ในการอธิบายการนำไฟฟ้าของแกรไฟต์

การเกิดพันธะโลหะ

หลังจากให้นักเรียนดูภาพเหล็กแล้วถามถึงการสร้างพันธะภายในเหล็ก ผลจากการวิจัยแสดงให้เห็นว่า มีนักเรียนเพียงแค่ร้อยละ 1 เท่านั้นที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้อง โดยนักเรียนเข้าใจว่าพันธะโลหะเป็นแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมโลหะเสมือนเป็นไอออนบวกกับเวเลนซ์อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ หรือที่เรียกว่าแบบจำลองทะเลอิเล็กตรอนดังภาพที่ 10 (ก)

ขณะที่พบว่านักเรียนส่วนใหญ่ (ร้อยละ 52) มีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้องซึ่งจะเห็นได้จากมีนักเรียนบางส่วนที่อยู่ในกลุ่มนี้เข้าใจว่าพันธะภายในโลหะมีลักษณะเหมือนกับของแข็งชนิดอื่น ๆ โดยทั่วไปซึ่งนักเรียนเหล่านี้ได้วาดภาพที่ 10 (ข) รวมทั้งอธิบายว่า “เหล็กเป็นของแข็งอนุภาคจะเรียงชิดติดกันอย่างเป็นระเบียบทำให้นำไฟฟ้าได้ดีมีจุดหลอมเหลวและจุดเดือดสูงดีเป็นเส้นได้” การที่นักเรียนเข้าใจเช่นนี้อาจจะเนื่องมาจากนักเรียนไม่สามารถเชื่อมโยงในระดับมหภาคกับจุลภาคได้จึงเรียนรู้ด้วยวิธีการท่องจำลักษณะของของแข็งที่พบโดยทั่วไปและเลือกที่จะอธิบายจากลักษณะภายนอกที่มองเห็นซึ่งเป็นสมบัติกายภาพโดยใช้แบบจำลองอนุภาคของของแข็งที่เคยเรียนในระดับเบื้องต้นมาใช้ในการอธิบาย แสดงให้เห็นว่านักเรียนไม่เข้าใจขอบเขต และข้อจำกัดของแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์สอดคล้องกับ Coll and Treagust (2003b) ที่พบว่านักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาใช้แบบจำลองทะเลอิเล็กตรอนซึ่งเป็นแบบจำลองในระดับพื้นฐานมาอธิบายพันธะในอะลูมิเนียมฟอยด์แทนการใช้แบบจำลองของทฤษฎีแถบ (Band theory) ขณะที่นักเรียนอีกจำนวนหนึ่งของกลุ่มเดียวกันนี้มีความเชื่อที่ต่างออกไปว่าในโลหะมีพันธะโคเวเลนต์ ซึ่งนักเรียนแสดงหลักฐานให้เห็นจากภาพที่ 10 (ค) และข้อความที่ระบุว่า “พันธะภายในเหล็กเป็นพันธะโคเวเลนต์ซึ่งเป็นแรงยึดเหนี่ยวที่แข็งแรงจึงทำให้เหล็กมีความแข็งแรงและมีจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง” การที่นักเรียนคิดเช่นนี้อาจเกิดจากความสับสนระหว่างแบบจำลองที่ใช้ในการอธิบายพันธะโคเวเลนต์กับพันธะโลหะซึ่งน่าจะเกิดขึ้นในระหว่างเรียนเนื่องจากคำอธิบายแบบจำลองทั้ง 2 ชนิดมีความคล้ายคลึงกัน อาจทำให้ครูบางคนอธิบายไม่ชัดเจนว่าแบบจำลองทั้งสองนี้เหมือนหรือต่างกันอย่างไร เช่นครูบางคนอาจอธิบายเพียงว่า “ใช้

อิเล็กทรอนิกส์เหมือนกัน” “ใช้เวเลนซ์อิเล็กทรอนิกส์เหมือนกันทั้งก้อน” ดังนั้นจึงทำให้นักเรียนเข้าใจว่าแบบจำลองทั้งสองคือสิ่งเดียวกัน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Taber (2003) ที่รายงานนักเรียนในระดับอุดมศึกษาเข้าใจว่ามีพันธะโคเวเลนต์ในเหล็ก นอกจากนี้ผู้วิจัยพบว่านักเรียนร้อยละ 27 มีแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง กล่าวคือนักเรียนส่วนหนึ่งของกลุ่มนี้คิดว่าโลหะมีพันธะคล้ายกับพันธะโคเวเลนต์ ขณะที่นักเรียนอีกส่วนหนึ่งคิดว่าโลหะมีพันธะคล้ายกับพันธะไอออนิกโดยนักเรียนได้วาดภาพของ “ไอออนบวก” และ “ไอออนลบ” เรียงสลับกันไปซึ่งเป็นลักษณะของแบบจำลองของพันธะไอออนิกแต่นักเรียนกลับระบุว่า “พันธะภายในเหล็กเป็นพันธะโลหะ” ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากนักเรียนยังมีความสับสนของการเลือกแบบจำลองที่จะนำมาใช้อธิบายสารซึ่งมีสถานะเป็นของแข็งเหมือนกัน ดังนั้นนักเรียนจึงนำเอาแบบจำลองที่เคยเรียนมาก่อนมาใช้ในการอธิบาย



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 10 นักเรียนวาดภาพแบบจำลองการเกิดพันธะภายในเหล็ก

การนำไฟฟ้าของโลหะ

ในหัวข้อนี้ผู้วิจัยวัดแบบจำลองความคิดโดยสมมติสถานการณ์เกี่ยวกับความสว่างของหลอดไฟเมื่อนำลวดทองแดงและแท่งแก้วมาต่อเข้ากับวงจรไฟฟ้าซึ่งให้ผลที่แตกต่างกัน เป็นที่น่าสังเกตว่านักเรียนส่วนมาก (ร้อยละ 45) มีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้อง กล่าวคือนักเรียนส่วนหนึ่งของกลุ่มนี้มองว่าสิ่งที่ทำให้

โลหะนำไฟฟ้าได้คือไอออนบวกและไอออนลบที่จัดเรียงกันอยู่ภายในของโลหะโดยนักเรียนวาดภาพที่ 11 (ก) แล้วอธิบายเหตุผลว่า “หลอดไฟสว่างถ้าใช้ลวดทองแดงเนื่องจากลวดทองแดงมีสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีซึ่งอนุภาคภายในของลวดทองแดงประกอบด้วยไอออนบวกและไอออนลบที่อยู่ชิดกันทองแดงจึงนำไฟฟ้าได้” จากลักษณะของแบบจำลองความคิดนี้น่าจะมีสาเหตุมาจากนักเรียนในกลุ่มนี้มีแบบจำลองความคิดในเรื่องการเกิดพันธะโลหะซึ่งใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายสมบัติของโลหะยังไม่ถูกต้อง กล่าวคือนักเรียนยังไม่เข้าใจว่าอะตอมในผลึกของโลหะอยู่รวมกันได้อย่างไร ผลึกของโลหะและผลึกของของแข็งไอออนิกเหมือนหรือแตกต่างกันอย่างไร อีกทั้งยังแสดงให้เห็นว่านักเรียนกลุ่มนี้ไม่ได้พยายามทำความเข้าใจอย่างถ่องแท้แต่เลือกที่เรียนรู้ด้วยการท่องจำเพียงลักษณะใดลักษณะหนึ่งของการนำไฟฟ้าที่พบในชีวิตประจำวัน สังเกตได้จากนักเรียนมักจะใช้คำว่า “เป็นตัวนำไฟฟ้า” “ไอออนบวก” “ไอออนลบ” ดังนั้นจึงทำให้นักเรียนเลือกใช้แบบจำลองการเกิดพันธะไอออนิกที่คุ้นเคยมาใช้อธิบายการนำไฟฟ้าของโลหะซึ่งสอดคล้องกับ Coll and Treagust (2003b) ที่พบว่ามึนักเรียนบางคนเข้าใจว่ามีไอออนอยู่ภายในลวดทองแดงซึ่งทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านได้ดังนั้นลวดทองแดงจึงนำไฟฟ้าได้ ขณะที่นักเรียนอีกส่วนหนึ่งจากกลุ่มเดียวกันนี้เชื่อว่าการจัดเรียงอนุภาคให้อยู่ชิดกันเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โลหะนำไฟฟ้าได้ซึ่งนักเรียนได้วาดภาพที่ 11 (ข) พร้อมระบุว่า “หลอดไฟสว่างเพราะลวดทองแดงเป็นโลหะมีสถานะเป็นของแข็งอนุภาคจะอยู่เรียงชิดติดกันอย่างหนาแน่นทำให้มีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้” นอกจากนี้ยังพบว่านักเรียนร้อยละ 39 มีแบบจำลองความคิดที่ไม่เชื่อมโยง กล่าวคือนักเรียนเหล่านี้เข้าใจเพียงแค่ว่าโลหะเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดี

อย่างไรก็ตามยังมีนักเรียนส่วนน้อย (ร้อยละ 2) ที่มีแบบจำลองความคิดที่ถูกต้องโดยนำแบบจำลองทะเลอิเล็กทรอนิกส์มาใช้อธิบายการนำไฟฟ้าของโลหะ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 11 นักเรียนวาดภาพแบบจำลองการนำไฟฟ้าของ
หลอดทองแดง

สรุปผลการวิจัย

ผลการศึกษาแบบจำลองความคิดเรื่องพันธะเคมีของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 พบว่านักเรียนส่วนใหญ่มีแบบจำลองความคิดไม่ถูกต้องตามแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ในทั้ง 10 หัวข้อย่อย ได้แก่ การเกิดพันธะไอออนิก การนำไฟฟ้าของสารประกอบไอออนิก การเกิดพันธะโคเวเลนต์ รูปร่างโมเลกุล สภาพขั้วของโมเลกุล แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุล การนำไฟฟ้าสารโคจรผลึกว่างตาข่าย การเกิดพันธะโลหะ และการนำไฟฟ้าของโลหะ ซึ่งจะสังเกตได้จากลักษณะแบบจำลองความคิดของนักเรียนส่วนใหญ่จัดอยู่ในกลุ่มแบบจำลองความคิดที่สมบูรณ์แต่ไม่ถูกต้อง และแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้องโดยเฉพาะอย่างยิ่งในหัวข้อพันธะโลหะนั้นเป็นหัวข้อที่นักเรียนมีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้องตามแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์มากที่สุด ผลการวิจัยยังชี้ว่านักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 4 ยังประสบปัญหาในการเรียนเรื่องพันธะเคมีอยู่มากซึ่งควรได้รับการพัฒนา สาเหตุสำคัญที่ทำให้นักเรียนมีแบบจำลองความคิดที่ไม่ถูกต้องนั้น เนื่องจากว่าเนื้อหาเรื่องพันธะเคมีเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยาก เป็นนามธรรมและมีการใช้แบบจำลองในหลายชนิด ดังนั้นการที่นักเรียนเข้าใจเนื้อหาดังกล่าวอย่างถ่องแท้ นักเรียนต้องสามารถจินตนาการเพื่อสร้างคำทำนายและอธิบายถึงความเชื่อมโยงในทั้ง 3 ระดับ โดยเลือกใช้แบบจำลองทางวิทยาศาสตร์ให้เหมาะสมกับบริบท ดังนั้นจึงทำให้นักเรียนส่วนใหญ่เลือกที่จะเรียนรู้เนื้อหาด้วยวิธีการ

ท่องจำแทนการทำความเข้าใจอย่างถ่องแท้ นอกจากนี้ผลการวิจัยยังสะท้อนให้เห็นอีกว่าสิ่งที่ เป็นอุปสรรคอย่างหนึ่งในการเรียนรู้ในเรื่องนี้คือนักเรียนมีแบบจำลองความคิดที่เป็นพื้นฐานไม่ถูกต้องและไม่เข้าใจขอบเขตและข้อจำกัดของแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์จึงส่งผลให้เป็นอุปสรรคของการเรียนในเรื่องต่อไป

ข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยในครั้งนี้ผู้วิจัยจึงขอเสนอแนะดังนี้

1. ผลการวิจัยพบว่านักเรียนไม่สามารถอธิบาย

ปรากฏการณ์ทางเคมีในระดับมหภาค จุลภาคและสัญลักษณ์ได้ และไม่เข้าใจธรรมชาติของแบบจำลอง ดังนั้นครูควรจะใช้แบบจำลองที่ช่วยให้ นักเรียนมองเห็นภาพความสัมพันธ์ใน 3 ระดับมาเป็นสื่อในการจัดกิจกรรม เช่น แบบจำลองแอนิเมชัน การอุปมาอุปไมย แบบจำลองลูกโป่ง แบบจำลองกระดาษ บทบาทสมมติ หรือแบบจำลองลูกพลาสติก แล้วให้นักเรียนร่วมกันอภิปรายจุดเด่นและข้อจำกัดของแบบจำลองซึ่งจะทำให้ นักเรียนเข้าใจธรรมชาติของจำลองทางวิทยาศาสตร์

2. ผลการวิจัยพบว่านักเรียนเรียนรู้จากการท่องจำ ดังนั้นลักษณะกิจกรรมการเรียนรู้ควรให้นักเรียนได้สร้าง ทดสอบและประเมินแบบจำลองความคิดของตนเอง เช่นการจัดการเรียนรู้โดยแบบจำลองเป็นฐานซึ่งจะทำให้ นักเรียนเข้าใจแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์มากขึ้น

3. ในการวิจัยครั้งต่อไปผู้วิจัยขอเสนอแนะว่าควรจะมีการศึกษาความเข้าใจของนักเรียนเกี่ยวกับแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์และศึกษาความเข้าใจเชิงลึกของนักเรียนในการอธิบายปรากฏการณ์ทางเคมีในระดับมหภาค จุลภาคและสัญลักษณ์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณสถาบันส่งเสริมการสอน
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ได้อนุเคราะห์ทุนใน
การศึกษาต่อและการทำงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

2546. การจัดการเรียนรู้กลุ่มวิทยาศาสตร์

หลักสูตรการศึกษาขั้นพื้นฐาน.

กรุงเทพมหานคร: สถาบันส่งเสริมการสอน

วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี.

Chi, MTH., and Roscoe, RD. 2002. The process and
challenges of conceptual change. In M.
Limon and L. Mason (Eds), *Reconsidering
conceptual change: Issues in theory and
practice*. Dordrecht, The Netherlands:
Kluwer Academic Publishers: 3-27.

Coll, RK., and Treagust, DF. 2001. Learners' mental
models of chemical bonding. *Research in
Science Education*. 31: 357-382.

Coll, RK., and Treagust, DF. 2003a. Investigation of
secondary school, undergraduate, and
graduate learners' mental models of ionic
bonding. *Journal of Research in Science
Teaching*. 40 (5): 464-486.

Coll, RK., and Treagust, DF. 2003b. Learners' mental
models of metallic bonding: A cross-age
study. *Science Education*. 87 : 685-707.

Duit, R. 1991. On the of analogies and metaphors in
learning science. *Science Education*. 75(6):
649-672.

Gilbert, JK. 2005. Visualization: A metacognitive skill in
science and science education. In J. K.
Gilbert. (Ed.), *Visualization in Science
Education*. Netherlands: Springer, 9-27.

Greca, IM., and Moreira, MA. 2000. Mental models,
conceptual models, and modeling. *International
Journal of Science Education*. 22 (1): 1-11.

Hinton, ME., and Nakhleh, MB. 1999. Students'
microscopic, macroscopic and symbolic
representation of chemical reactions. *The
Chemical Educator*. 4(4): 1-29.

Johnstone, AH. 1993. The development of chemistry
teaching: A changing response to a changing
demand. *Journal of Chemical Education*. 70
(9): 701-705.

Justi, R., and Gilbert, J. 2002. Models and modeling in
chemical education. In J. K. Gilbert et al. (Eds.),
*Chemical education: Towards research-based
practice*. Boston: Kluwer Academic
Publishers, 47-68.

Norman, DA. 1983. Some observations on mental
models. In D. Gentner and A. L. Stevens
(eds.), *Mental models*. Hillsdale, NJ:
Erlbaum 7-14.

Schmidt, H-J., Kaufmaun, B., and Treagust, DF. 2009.
Students' understanding of boiling points
and intermolecular forces. *Chemistry
Education Research and Practice*. 10: 265-272.

Taber, KS., and Coll, RK. 2002. Bonding. In J. K.
Gilbert et al. (Eds.), *Chemical Education:
Towards Research-based Practice*. Netherlands:
Kluwer Academic Publishers, 213-234.

Taber, K.S. 2003. Mediating mental models of metals:

Acknowledging the priority of the learner's

prior learning. *Science Education* 87: 732-758.