



# ความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิด เรื่อง เซลล์กัลวานิก ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ที่เรียนโดยการจัดการเรียนรู้ ด้วยการสร้างแบบจำลอง

## Eleventh Graders' Ability to Construct Representation of Galvanic Cell through Modelling-based Teaching

พนิดา กระจ่มนอก (Panida Kratumnok)<sup>1\*</sup> ดร.โรมเกล้า จันทราษี (Dr.Romkloa Jantrasee)<sup>\*\*</sup>

(Received: April 19, 2018; Revised: July 20, 2018; Accepted: July 25, 2018)

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดเรื่องเซลล์กัลวานิกของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ที่เรียนรู้โดยการจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลอง ซึ่งเป็นรูปแบบการสอนที่เน้นให้นักเรียนได้สร้าง ทดสอบและปรับแก้ไขแบบจำลอง การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองที่มีการเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพพร้อมด้วยเก็บรวบรวมข้อมูลโดยใช้แบบวัดความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดและการสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้างนำมาใช้เป็นแหล่งรวบรวมข้อมูลทั้งก่อนและหลังเรียน ผลการวิจัยพบว่าหลังเรียนความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียนส่วนใหญ่อยู่ในระดับปานกลางทั้ง 3 ระดับ คือ ระดับมหภาค จุลภาค และสัญลักษณ์ ซึ่งเป็นระดับที่สูงขึ้นจากก่อนเรียนซึ่งเป็นระดับต่ำ การจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลองเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่จะช่วยครูเคมีลดความยากลำบากในการเรียนรู้ของนักเรียน ครูจึงควรออกแบบกิจกรรมเพื่อให้นักเรียนได้แสดงและแปลความหมายของตัวแทนความคิดเข้าด้วยกันอย่างเชื่อมโยงและถูกต้อง

### ABSTRACT

This research aimed to study grade 11 students' ability to construct representation of galvanic cell learned using modelling-based teaching which places an emphasis on creating, testing, and revising models. This study is an experimental research that collects qualitative data. The representation test and semi-structured interview were employed as data sources before and after an implementation of modelling-based teaching. The results showed that, after implementation, most of students' ability to construct three levels of representations including macroscopic, submicroscopic, and symbolic levels were categorized at moderate. This level was higher than before implementation. Modelling-based teaching is an alternative way which helps chemistry teachers to reduce learning difficulty. Teachers should design activities to facilitate students to express and translate representation coherently and correctly.

**คำสำคัญ:** ความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิด การจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลอง เซลล์กัลวานิก

**Keywords:** Representation ability, Modelling-based Teaching, Galvanic cell

<sup>1</sup>Correspondent author: ninggiiz@gmail.com

\* นักศึกษา หลักสูตรศึกษาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

\*\* ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

## บทนำ

เคมีเป็นศาสตร์ที่มีความเฉพาะเจาะจงในเนื้อหาโดยมุ่งเน้นศึกษาเกี่ยวกับสาร สมบัติของสารกับโครงสร้างภายใน และการเปลี่ยนแปลงของสาร การศึกษาเนื้อหาวิชาเคมีจะช่วยให้ นักเรียนเข้าใจเหตุการณ์ ปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันของนักเรียนได้เป็นอย่างดี ในการทำความเข้าใจปรากฏการณ์ นักเรียนจำเป็นต้องเข้าใจเนื้อหาทั้งในระดับที่ตาเปล่ามองเห็น ระดับอะตอมหรือ โมเลกุลของสาร และระดับการแสดงออกเชิงสัญลักษณ์ของปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้อย่างสอดคล้องกันในทุกระดับ ดังนั้นในชั้นเรียนเคมีนักเรียนจึงควรได้รับโอกาสที่จะสร้างตัวแทนความคิดในระดับต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาเพื่อสื่อความเข้าใจของตนเองแต่ด้วยธรรมชาติของเนื้อหาของวิชาเคมีเป็นเนื้อหาที่มีความซับซ้อนและเป็นนามธรรมทำให้นักเรียนไม่สามารถสร้างตัวแทนความคิดทางเคมีที่ถูกต้องออกมาได้ [1]

วิชาเคมีเป็นวิชาซับซ้อนและต้องอาศัยการทำความเข้าใจและการวิเคราะห์ในระดับมหภาค จุลภาค และสัญลักษณ์ ซึ่งยากสำหรับนักเรียน โดยเฉพาะนักเรียนในระดับมัธยมศึกษาตอนปลายเนื่องจากนักเรียนจำนวนมากไม่เข้าใจเนื้อหาในหลายหัวข้อ [2] เช่น เซลล์กัลวานิก เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีที่เปลี่ยนพลังงานเคมีให้เป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งเกิดจากสารเคมีภายในเซลล์ทำปฏิกิริยากันแล้วเกิดกระแสไฟฟ้า (การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน) สำหรับการอธิบายการเปลี่ยนแปลงนี้ นักเรียนไม่สามารถมองเห็นภาพหรือจินตนาการการเคลื่อนที่นั้นได้ จึงทำให้นักเรียนเกิดความยากลำบากในการเรียนรู้ ด้วยเหตุนี้จึงพบงานวิจัยจำนวนมากที่พัฒนาการจัดการเรียนการสอนเคมี เช่น การศึกษามโนคติและตัวแทนความคิดของนักเรียนโดยใช้ชุดทดลองขนาดเล็ก [3] การพัฒนารูปแบบมัลติมีเดีย (IMMPA) เพื่อใช้ในการสอนไฟฟ้าเคมี [2] หรือแม้กระทั่งการศึกษาความยากของการเรียนวิชาไฟฟ้าเคมีของนักเรียนและนักศึกษาระดับปริญญาตรี เป็นต้น [4] เพื่อที่จะช่วยให้นักเรียนเกิดความเข้าใจในเนื้อหาจนเกิดการเรียนรู้อย่างมีประสิทธิภาพนั่นคือ นักเรียนควรมีความสามารถแสดงตัวแทนความคิดออกมาเพื่อสื่อถึงความเข้าใจในเนื้อหาและครูสามารถประเมินตัวแทนความคิดของนักเรียนได้เป็นระยะๆ ในระหว่างการจัดการเรียนรู้ สำหรับแนวทางการส่งเสริมการเรียนรู้ในเนื้อหาที่มีลักษณะเป็นนามธรรม เช่น เซลล์กัลวานิก ต้องอาศัยการเชื่อมโยงการเปลี่ยนแปลงของสาร ทั้ง 3 ระดับของการแสดงตัวแทนความคิด (Level of Representation) [5] กล่าวคือ 1) ระดับมหภาค (Macroscopic Level) เป็นการนำเสนอด้วยปรากฏการณ์ที่สามารถสังเกตได้ ได้แก่ การเปลี่ยนสีของสารละลายในเซลล์กัลวานิก หรือการกรองของโลหะตัวนำในเซลล์กัลวานิก 2) ระดับจุลภาค (Microscopic level) เป็นการนำเสนอสิ่งที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่าในรูปแบบจำลอง (Models) หรือการนำเสนอ ในรูปแบบอื่นๆ ที่สามารถมองเห็นได้ (Visual Displays) เช่น แบบจำลองอนุภาคการจัดเรียงตัวของโลหะตัวนำ การเคลื่อนที่ของอนุภาคของสารละลายในบีกเกอร์ รวมทั้งการจินตนาการถึงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนในเซลล์กัลวานิก เป็นต้น และ 3) ระดับสัญลักษณ์ (Symbolic Level) เป็นการใช้สัญลักษณ์ (Symbols) ตัวเลข ตัวอักษร หรือเครื่องหมาย (Signs) เพื่อ แสดงแทนอะตอม โมเลกุล สารประกอบ และปฏิกิริยาเคมี เช่น การเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์โดยเขียนหรือแสดงตัวแทนความคิดด้วยสัญลักษณ์ของธาตุ สูตรเคมีต่างๆ เป็นต้น อาจกล่าวได้ว่า การสร้างตัวแทนความคิดนั้นสามารถแสดงออกด้วยวิธีการที่หลากหลายตามระดับตัวแทนความคิด เช่น การสร้างแบบจำลอง การสังเกตปรากฏการณ์ หรือการใช้สัญลักษณ์ เป็นต้น

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องแสดงให้เห็นว่าการนำแบบจำลองไปใช้ในวิชาเคมีก่อให้เกิดผลดีต่อ นักเรียนเนื่องจากนักเรียนต้องพยายามเชื่อมโยงตัวแทนความคิดของตนเองในรูปแบบของแบบจำลองดังผลการศึกษ การเรียนแบบมีส่วนร่วมของนักเรียน โดยใช้แบบจำลองเรื่องเซลล์ไฟฟ้าเคมี พบว่าหลังเรียนนักเรียนทุกกลุ่มมีผลการเรียนที่ดีขึ้น [3, 4, 6] สอดคล้องกับผลการพัฒนาความสามารถแสดงตัวแทนความคิดของนักเรียนในวิชาเคมี โดยใช้ตัวแทนความคิดที่หลากหลาย โดยเฉพาะการแสดงตัวแทนความคิดของตนเองออกมาในรูปแบบของสิ่งที่มองเห็นได้



เช่น การสร้างแบบจำลองช่วยให้นักเรียนเข้าใจเนื้อหามากขึ้น[7] นอกจากนี้กลุ่มนักวิจัยยังพบว่าการพัฒนาความสามารถในการนำเสนอตัวแทนความคิดในเนื้อหาเคมีด้วยการวาดแบบจำลองโมเลกุลร่วมกับการอภิปรายทำให้นักเรียนมีความสามารถในการนำเสนอตัวแทนความคิดอยู่ในระดับที่สูงขึ้น [8] โดยนักเรียนสามารถทำความเข้าใจเนื้อหาที่มีความเป็นนามธรรมและเชื่อมโยง ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของสารทั้ง 3 ระดับได้เป็นอย่างดี

จะเห็นว่าการจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลอง (Model based teaching: MBT) เป็นรูปแบบการเรียนรู้ที่เน้นให้นักเรียน ได้แสดงแบบจำลองเพื่อเป็นตัวแทนทางความคิดภายนอก (External representation) ชนิดหนึ่งที่ครูสามารถประเมิน ได้ถึงแบบจำลองความคิด (Mental model) ซึ่งเป็นตัวแทนความคิดภายใน (Internal representation) ซึ่งอยู่ในโครงสร้างทางปัญญาของนักเรียน โดยนักเรียนจะได้สร้างแบบจำลองทางความคิด แสดงแบบจำลอง ทดสอบแบบจำลอง และปรับแก้ไขแบบจำลอง กิจกรรมต่างๆเหล่านี้จึงจำเป็นอย่างยิ่งที่นักเรียนจะต้องมีความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดทางเคมีให้เชื่อมโยงกันจากระดับหนึ่ง (เช่น ระดับมหภาค) ไปเป็นอีกระดับหนึ่ง (เช่น ระดับจุลภาคหรือสัญลักษณ์) ได้อย่างถูกต้องและสอดคล้องกัน [9] เพราะจะช่วยส่งเสริมให้นักเรียนเกิดความเข้าใจในเนื้อหา และช่วยพัฒนาการเรียนรู้เคมีของนักเรียน ได้ [10]

จากประสบการณ์การสอนเคมีเรื่องเซลล์กัลวานิกของผู้วิจัย ผู้วิจัยพบว่าเมื่อนักเรียนที่เคยเรียนหัวข้อดังกล่าวมาแล้ว เมื่อผู้วิจัยทบทวนความรู้ในเนื้อหา นักเรียนหลายคนยังแสดงตัวแทนความคิดเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ในบีกเกอร์ของเซลล์กัลวานิกได้แต่ไม่ถูกต้อง และยังมีนักเรียนบางส่วนไม่สามารถสร้างตัวแทนความคิดได้อย่างสมบูรณ์ เช่น สามารถอธิบายได้ว่าเกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นในเซลล์กัลวานิก เพราะมีการเคลื่อนที่หรือเกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอน แต่ไม่สามารถสามารถอธิบายได้ว่าเกิดอย่างไร จากสภาพปัญหาข้างต้น ผู้วิจัยซึ่งเป็นผู้สอนมีหน้าที่โดยตรงในการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ จึงได้หาแนวทางที่ทำให้ผู้เรียนเกิดความเข้าใจในเนื้อหาเรื่องเซลล์กัลวานิกได้ดียิ่งขึ้น หากนำการจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลองมาใช้จะทำให้ผู้วิจัยสามารถติดตามการประเมินความเข้าใจของนักเรียนตั้งแต่การสร้างแบบจำลองจนกระทั่งปรับแก้ไขแบบจำลองได้

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดเมื่อดำเนินการจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้าง แบบจำลอง เรื่อง เซลล์กัลวานิก ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ทั้งนี้เพื่อช่วยให้นักเรียนสามารถสร้างตัวแทนความคิดทางเคมี และแสดงออกมาได้อย่างเชื่อมโยงกันทั้ง 3 ระดับ (มหภาค จุลภาค สัญลักษณ์) ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมการทำ ความเข้าใจเนื้อหาเรื่องเซลล์กัลวานิกของนักเรียนให้ดีมากยิ่งขึ้น

## วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อศึกษาความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดเรื่องเซลล์กัลวานิกของนักเรียนที่เรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลอง

## วิธีการวิจัย

1. รูปแบบการวิจัย เป็นการวิจัยเชิงทดลองที่ใช้เทคนิคการเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยที่มุ่งศึกษาความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียนก่อนและหลังการจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลอง โดยจะประเมินว่านักเรียนสามารถสร้างและแสดงตัวแทนความคิดทั้ง 3 ระดับเรื่องเซลล์กัลวานิกเป็นอย่างไร

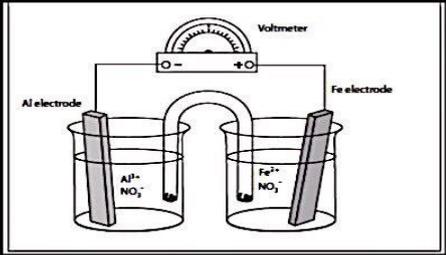
2. กลุ่มที่ศึกษา เป็นนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ที่ศึกษาในโรงเรียนมัธยมศึกษาขนาดใหญ่แห่งหนึ่ง ในสำนักงานเขตพื้นที่การศึกษามัธยมศึกษาเขต 30 จำนวน 38 คน ซึ่งเป็นนักเรียนในชั้นเรียนที่ผู้วิจัยรับผิดชอบสอน โดยเรียนแผนวิทยาศาสตร์ - คณิตศาสตร์

3. ขอบเขตการวิจัย ในบทความวิจัยฉบับนี้ผู้วิจัยนำเสนอผลการศึกษาความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดเรื่อง เซลล์กัลวานิก ซึ่งเป็นหัวข้อหนึ่งของ ไฟฟ้าเคมี สำหรับเนื้อหาไฟฟ้าเคมีบรรจุอยู่ในหลักสูตรของแผนการเรียนวิทยาศาสตร์ - คณิตศาสตร์ ในรายวิชาเคมีภาคเรียนที่ 2 ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 5

4. เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยมีดังนี้

1) แบบวัดความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียนเป็นแบบวัดแบบปลายเปิดซึ่งนำมาใช้ประเมินความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดเรื่องเซลล์กัลวานิก จำนวน 1 ข้อ โครงสร้างของแบบวัดประกอบด้วย (1) ภาพวาดและคำบรรยายสถานการณ์ที่เกี่ยวข้องกับเรื่องเซลล์กัลวานิก (2) คำถามแบ่งออกเป็นคำถามย่อย 3 ข้อ (2.1-2.3) ซึ่งผู้วิจัยได้ตรวจสอบเครื่องมือโดยใช้ผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่าน ซึ่งในแต่ละหัวข้อย่อยสร้างคำถามเพื่อให้นักเรียนแสดงตัวแทนความคิดให้สอดคล้องกันทั้ง 3 คือ ระดับมหภาค ระดับจุลภาค และระดับสัญลักษณ์ แสดงดังภาพที่ 1

2. อากการทดลองการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในบีกเกอร์ 2 ใบที่บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ (เซลล์กัลวานิก) ดังรูป



เมื่อต่อ อะลูมิเนียมในสารละลายอะลูมิเนียมไนเตรท ( $Al(NO_3)_3$ )เข้มข้น 0.1 M กับเหล็กในสารละลายไอร์ออน (II)ไนเตรท ( $Fe(NO_3)_2$ )เข้มข้น 0.1 M แล้วเข็มของโวลต์มิเตอร์เบนไปทางขั้วของเหล็ก และใช้ โทแทสเซียมคลอไรด์เป็นสะพานเกลือ (KCl) ให้นักเรียนพิจารณาข้อมูลที่กำหนดให้แล้วตอบคำถามข้อ 2.1-2.3

2.1 เมื่อเวลาผ่านไป 3-5 นาที นักเรียนจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอะไรบ้าง	2.2 ให้นักเรียนลงใจความการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในข้อ 2.1 แล้ววาดภาพอนุภาคเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น พร้อมเขียนอธิบาย (โปรดระบุให้ชัดเจนว่าจะคอมและไอออนของเหล็กและอะลูมิเนียมแทนด้วยอะไร)	2.3 จงเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพื่อเชื่อมโยงคำตอบในข้อ 2.1 และ 2.2 ของนักเรียนและเขียนแผนภาพเซลล์กัลวานิกนี้

ภาพที่ 1 แบบวัดความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียน เรื่อง เซลล์กัลวานิก

2) การสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้าง โดยการนำคำถามจากแบบวัดความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียน เรื่อง เซลล์กัลวานิก มาสัมภาษณ์เพิ่มเติม

5. การเก็บรวบรวมข้อมูล ในขั้นตอนการเก็บรวบรวมข้อมูลผู้วิจัยดำเนินการเก็บข้อมูลในภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2560 ตามลำดับขั้นตอน ดังนี้

1) ทดสอบก่อนเรียนด้วยแบบวัดความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิด เรื่อง เซลล์กัลวานิกที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น



2) ดำเนินการจัดกิจกรรมการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลองโดยมีขั้นตอนดังนี้ [11] (1) ขั้นการสร้างตัวแทนความคิด ครูผู้สอนนำเข้าสู่บทเรียนโดยใช้คำถามเพื่อนำเข้าสู่หัวข้อในการเรียน และกระตุ้นให้นักเรียนสร้างแบบจำลอง และนักเรียนตอบคำถามโดยการสร้างแบบจำลองร่วมกัน (2) ขั้นแสดงแบบจำลอง นักเรียนนำเสนอแบบจำลองที่ร่วมกันสร้างหน้าชั้นเรียน (3) ขั้นการทดสอบแบบจำลอง โดยนักเรียนทำการทดลองการถ่ายโอนอิเล็กตรอนของเซลล์กัลวานิกที่ประกอบด้วยสารละลายสารละลายคอปเปอร์ (II) ซัลเฟต ( $\text{CuSO}_4$ ) เข้มข้น  $1.0 \text{ mol/dm}^3$  สารละลายซิงค์ซัลเฟต ( $\text{ZnSO}_4$ ) เข้มข้น  $1.0 \text{ mol/dm}^3$  และสารละลายแมกนีเซียมซัลเฟต ( $\text{MgSO}_4$ ) เข้มข้น  $1.0 \text{ mol/dm}^3$  โดยมีโลหะทองแดง ชั่งกะสี และแมกนีเซียมเป็นโลหะตัวนำ จากนั้นนักเรียนลงมือทำกิจกรรมสร้างแบบจำลองระดับจุลภาค (Hand-on activity) และการเขียนแสดงสัญลักษณ์ของปฏิกิริยา และ (4) ขั้นพิจารณาขอบเขตและข้อจำกัดของแบบจำลอง นักเรียนแต่ละกลุ่มร่วมกันพิจารณาแบบจำลองของตนเองที่สร้างขึ้นไว้ก่อนการทดลองเปรียบเทียบกับหลักฐานจากการทดลองทางวิทยาศาสตร์ และครูนำนักเรียนสู่การสรุปเพิ่มเติมจากการแบบจำลองที่นักเรียนได้ปรับแก้แล้ว

3) ทดสอบความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียนหลังเรียนโดยใช้แบบวัดชุดเดียวกันกับก่อนเรียน

4) เลือกตัวแทนนักเรียนมาสัมภาษณ์แบบกึ่งโครงสร้างเพิ่มเติม โดยพิจารณาคำตอบของนักเรียนที่มีประเด็นการสร้างตัวแทนความคิดที่น่าสนใจ แตกต่างไปจากนักเรียนคนอื่นๆ ซึ่งในการจัดกลุ่มคำตอบของนักเรียนนั้น ผู้วิจัยได้ให้ผู้ช่วยในการวิจัยที่มีความเชี่ยวชาญวิชาเคมีช่วยจำกลุ่มคำตอบนักเรียนร่วมกับผู้วิจัยรวมจำนวน 2 คน จากนั้นผู้วิจัยนำบทสัมภาษณ์มาวิเคราะห์เพื่อจัดกลุ่มความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดอีกครั้ง

6. การวิเคราะห์ข้อมูล ผู้วิจัยอ่านคำตอบในแบบวัดของนักเรียนเป็นรายบุคคลอย่างละเอียดทั้งก่อนเรียนและหลังเรียน แล้วนำมาจัดกลุ่มคำตอบในแต่ละข้อคำถามย่อย โดยผู้วิจัยได้แบ่งเกณฑ์การประเมินออกเป็น 3 ระดับตามระดับคุณภาพ ได้แก่ ระดับต่ำ ระดับกลาง และระดับสูง เพื่อใช้แปลความหมายและประเมินความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียน และหาค่าความถี่ ร้อยละแสดงความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียน รายละเอียดเกณฑ์การประเมินความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดดังตารางที่ 1 [12]

**ตารางที่ 1** เกณฑ์การประเมินความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียน

ระดับของ ความสามารถใน การสร้าง ตัวแทนความคิด	เกณฑ์การประเมินความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดจำแนกตามระดับคุณภาพ		
	ต่ำ (Low)	ปานกลาง (Moderate)	สูง (High)
<b>ระดับมหภาค</b>	ไม่สามารถอธิบายสิ่งที่เห็นจากการเปลี่ยนแปลงในเซลล์กัลวานิกได้ได้อย่างถูกต้อง	สามารถอธิบายสิ่งที่เห็นจากการเปลี่ยนแปลงในเซลล์กัลวานิกได้ได้อย่างถูกต้องแต่ไม่สมบูรณ์	สามารถอธิบายสิ่งที่เห็นจากการเปลี่ยนแปลงในเซลล์กัลวานิกได้ได้อย่างถูกต้องครบถ้วนและสมบูรณ์
<b>ระดับจุลภาค</b>	ไม่สามารถจินตนาการสิ่งที่เห็นจากการเปลี่ยนแปลงในเซลล์กัลวานิกได้ ไม่สามารถแสดงตัวแทนความคิดโดยการแสดงตัวแทนความคิดแทนอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาคของสารในการเกิดปฏิกิริยาได้	สามารถจินตนาการสิ่งที่เห็นจากการเปลี่ยนแปลงในเซลล์กัลวานิกได้ สามารถแสดงตัวแทนความคิด โดยการแสดงตัวแทนความคิดแทนอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาคของสารในการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างถูกต้อง	สามารถจินตนาการสิ่งที่เห็นจากการเปลี่ยนแปลงในเซลล์กัลวานิกได้ สามารถแสดงตัวแทนความคิด โดยการแสดงตัวแทนความคิดแทนอะตอม โมเลกุล หรืออนุภาคของสารในการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างถูกต้องครบถ้วน
<b>ระดับสัญลักษณ์</b>	ไม่สามารถเขียนสัญลักษณ์ทางเคมีจากการเปลี่ยนแปลงในการทดลองที่สอดคล้องกับระดับมหภาคและจุลภาคได้อย่างถูกต้อง	สามารถเขียนสัญลักษณ์ทางเคมีจากการเปลี่ยนแปลงในการทดลองที่สอดคล้องกับระดับมหภาคและจุลภาค (สมการการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ออกซิเดชัน และรีดอกซ์) ได้ได้อย่างถูกต้อง แต่ไม่สมบูรณ์	สามารถเขียนสัญลักษณ์ทางเคมีจากการเปลี่ยนแปลงในการทดลองที่สอดคล้องกับระดับมหภาคและจุลภาค (สมการการเกิดปฏิกิริยารีดักชัน ออกซิเดชัน และรีดอกซ์) ได้ถูกต้องครบถ้วนและสมบูรณ์

**ผลการวิจัย**

ผลการศึกษาความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิด เรื่องเซลล์กัลวานิก ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ที่ได้รับการจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลอง สามารถสรุปผลการวิเคราะห์ได้ดังตารางที่ 2



ตารางที่ 2 ค่าความถี่ และร้อยละของการจัดกลุ่มความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดของนักเรียน เรื่องเซลล์กัลวานิก

ระดับความสามารถในการ สร้างตัวแทนความคิด	ระดับคุณภาพ คน/(ร้อยละ)					
	ต่ำ		กลาง		สูง	
	ก่อนเรียน	หลังเรียน	ก่อนเรียน	หลังเรียน	ก่อนเรียน	หลังเรียน
1. ระดับมหภาค (N=38)	29 (76.32)	13 (34.21)	9 (23.68)	21 (55.26)	0 (0.00)	4 (10.53)
2. ระดับจุลภาค (N=38)	38 (100.00)	15 (39.47)	0 (0.00)	17 (44.74)	0 (0.00)	6 (15.79)
3. ระดับสัญลักษณ์ (N=38)	37 (97.82)	14 (36.84)	1 (2.63)	14 (36.84)	0 (0.00)	10 (26.32)

จากตารางที่ 2 พบว่าก่อนเรียนนักเรียนส่วนใหญ่มีความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดระดับมหภาค ร้อยละ 76.32 ระดับจุลภาคร้อยละ 100.00 และระดับสัญลักษณ์ร้อยละ 97.82 อยู่ในระดับต่ำทั้งหมด เมื่อพิจารณาคำถามในแบบวัดต้องการให้นักเรียนแสดงตัวแทนความคิดในระดับมหภาค โดยนักเรียนควรเขียนอธิบายสิ่งที่สังเกตเห็นได้ว่า “ในเซลล์กัลวานิกนั้นมีการเปลี่ยนแปลงสีของสารละลายอะลูมิเนียมไนเตรท และสารละลายไอรออน (II) ไนเตรท หรือไม่อย่างไร โลหะอะลูมิเนียมหรือเหล็กมีการสึกกร่อนหรือไม่ หรือมีการตกตะกอนของสารในบีกเกอร์หรือไม่ เข็มของโวลต์มิเตอร์จะเบนไปจากเดิมอย่างไร” ส่วนระดับจุลภาค นักเรียนควรจะสามารถจินตนาการเกี่ยวกับ “การจัดเรียงตัวของอนุภาคโลหะตัวนำคือเหล็กกับอะลูมิเนียมทั้งก่อนและหลังการเกิดปฏิกิริยา หรือการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในเซลล์” สิ่งสำคัญคือนักเรียนต้องเขียนและวาดภาพแสดงการเปลี่ยนแปลง ในระดับจุลภาคที่สัมพันธ์กันกับระดับมหภาค และในระดับสัญลักษณ์ นักเรียนต้องเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นหรือแสดงสัญลักษณ์อื่นๆที่สอดคล้องกับระดับมหภาคและจุลภาคอีกด้วย เช่น แผนภาพของเซลล์กัลวานิกได้ เป็นต้น

2.1 เมื่อเวลาผ่านไป 3-5 นาที นักเรียนจะสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงอะไรบ้าง จงอธิบาย	2.2 ให้นักเรียนลองจินตนาการการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในข้อ 2.1 แล้ววาดภาพอนุภาคเพื่อแสดงการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น พร้อมเขียนอธิบาย (โปรดระบุให้ชัดเจนว่าอะตอมและไอออนของเหล็กและอะลูมิเนียมแทนด้วยอะไร)	2.3 จงเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเพื่อเชื่อมโยงคำตอบในข้อ 2.1 และ 2.2 ของนักเรียน และเขียนแผนภาพเซลล์กัลวานิกนี้
เริ่มวัดโวลต์มิเตอร์จะ เบนไปทางกลาง		

ภาพที่ 2 คำตอบก่อนเรียนของนักเรียน (เลขที่ 12)

จากภาพที่ 2 แสดงตัวอย่างคำตอบก่อนเรียนของนักเรียน จะเห็นว่านักเรียนไม่สามารถอธิบายในระดับที่สังเกตได้ว่าจะเกิดการเปลี่ยนแปลงในเซลล์กล้ามเนื้ออย่างไร และแสดงตัวแทนความคิดไม่ถูกต้องเกี่ยวกับเข็มของโวลต์มิเตอร์ซึ่งในคำถามในแบบวัดระบุชัดเจนว่าเข็มโวลต์มิเตอร์เบนไปทางโลหะเหล็ก นักเรียนจึงประสบปัญหาในการแสดงตัวแทนความคิดเพื่ออธิบายสิ่งที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งนักเรียนไม่สามารถอธิบายได้อย่างถูกต้องสมบูรณ์ และอาจเกิดจากการที่นักเรียนไม่ได้อ่านคำถามในแบบวัดอย่างละเอียดและรอบคอบ นอกจากนี้ นักเรียนไม่สามารถจินตนาการได้ว่ามีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนเกิดขึ้นและยังไม่สามารถระบุได้ชัดเจนว่าอิเล็กตรอนถ่ายโอนอย่างไร หรือมีอนุภาค อะตอม หรือไอออนของสารใดบ้างในเซลล์กล้ามเนื้อ ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่านักเรียนไม่เข้าใจเรื่องการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จึงไม่สามารถจินตนาการได้ว่าโลหะใดจะรับหรือให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่ากัน รวมทั้งนักเรียนมีความรู้พื้นฐานเรื่องการเกิดปฏิกิริยาของสารในระดับอนุภาคไม่เพียงพอจึงไม่สามารถสร้างตัวแทนความคิดในระดับจุลภาคได้ สังเกตจากคำตอบของนักเรียนในข้อ 2.2 พบว่า นักเรียนวาดภาพได้แต่ภาพที่ปรากฏมาจากคำถามในแบบวัด โดยที่ไม่สามารถระบุอะตอมหรือไอออนในเซลล์กล้ามเนื้อ นอกจากนี้ นักเรียนบางคนสร้างตัวแทนความคิดระดับจุลภาคที่ไม่ถูกต้อง เช่น อธิบายว่าอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในสะพานเกลือ หรือมีการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในสะพานเกลือของเซลล์กล้ามเนื้อ [13] เป็นต้น และในระดับสัญลักษณ์ดังคำตอบในข้อ 2.3 นักเรียนไม่สามารถเขียนสมการเคมีได้เลย อาจเนื่องมาจากนักเรียนมีความรู้พื้นฐานเดิมเรื่องการเขียนสัญลักษณ์ของธาตุและสูตรทางเคมีที่ไม่เพียงพอ แม้ว่านักเรียนจะเคยเรียนหัวข้อของการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือปริมาณสารสัมพันธ์มาแล้วในภาคเรียนที่ 1 ของการเรียนเคมีระดับมัธยมศึกษาปีที่ 5 ผลการวิจัยเหล่านี้แสดงให้เห็นว่า ความรู้ในเนื้อหาซึ่งเป็นความรู้พื้นฐานมีผลต่อการเรียนรู้เนื้อหาที่มีความเกี่ยวข้องกัน [13] นอกจากนี้ อาจเป็นไปได้ว่าหากนักเรียนบางคนไม่สามารถระบุการเปลี่ยนแปลงในระดับมหภาค อาจส่งผลให้นักเรียนไม่สามารถสร้างตัวแทนความคิดในระดับจุลภาคได้ เนื่องจากนักเรียนไม่ทราบว่า จะใช้สิ่งใดมาแทนอนุภาคของสาร จึงส่งผลให้นักเรียนไม่สามารถสร้างตัวแทนความคิดในสัญลักษณ์ได้ หรือเขียนได้ แต่ไม่มีความสัมพันธ์หรือเชื่อมโยงกันใน 3 ระดับ

จากนั้นผู้วิจัยได้จัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลองให้กับนักเรียนแล้วประเมินความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดอีกครั้ง พบว่าหลังเรียนนักเรียนส่วนใหญ่มีความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดระดับมหภาค จุลภาค และสัญลักษณ์อยู่ในระดับปานกลางทุกระดับ (ร้อยละ 55.26 44.74 และ 36.84 ตามลำดับ, พิจารณาตารางที่ 2)



- นักเรียน : มีครับ ตั้งเกิดจากเข็มของโวลต์มิเตอร์ มีการเบนเข็มชี้ไปทางบิกเกอร์ของเหล็ก
- ผู้วิจัย : แล้วอิเล็กตรอนเคลื่อนที่อย่างไร แล้วจะสรุปได้ว่าอย่างไร
- นักเรียน : อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปตามสายไฟครับจากบิกเกอร์อะลูมิเนียมไปยังเหล็กครับ สรุปได้ว่าเกิดการถ่ายโอนของอิเล็กตรอนจากด้านอะลูมิเนียม ไปด้านของเหล็กครับ
- ผู้วิจัย : แล้วจากการที่นักเรียนจินตนาการการเคลื่อนที่ของอนุภาคต่างๆในบิกเกอร์ที่เกิดปฏิกิริยาทำไมนักเรียนจึงอธิบายถึงไฮโดรเจน ไอออน ( $H^+$ )
- นักเรียน : ผมเข้าใจว่าในสารละลายมีน้ำเป็นองค์ประกอบหรือเปล่าครับครู น่าจะมีไอออนของไฮโดรเจนครับ แต่ผมก็ไม่ค่อยมั่นใจครับครู

ผลการสัมภาษณ์พบว่านักเรียนสามารถอธิบายได้อย่างถูกต้องว่า เกิดการถ่ายโอนอิเล็กตรอนในเซลล์กัลวานิก ดังจะเห็นได้จากการเบนของเข็มโวลต์มิเตอร์ แผ่นอะลูมิเนียมบางลงเพราะเกิดจากการให้อิเล็กตรอน และแผ่นเหล็กหนาขึ้นเนื่องจากรับอิเล็กตรอน ผลสัมภาษณ์นี้แสดงว่า นักเรียนอธิบายเป็นคำพูดได้ดีกว่าเขียนตอบในแบบวัด ซึ่งสามารถสรุปได้ว่านักเรียนมีความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดเกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ในเซลล์กัลวานิกได้ สำหรับการที่นักเรียนจินตนาการเกินกว่าการเกิดปฏิกิริยานั้น อาจเป็นเพราะนักเรียนเข้าใจว่าในสารละลายอิเล็กโทรไลต์นั้นมีน้ำเป็นองค์ประกอบจึงควรมีไฮโดรเจนไอออน แต่คำตอบของนักเรียนก็แสดงถึงความไม่มั่นใจในการสร้างตัวแทนความคิดในระดับจุลภาค และการจินตนาการนั้นไม่ได้มาจากการทดลองหรือไม่ได้เกิดจากการเรียนรู้โดยการสร้างแบบจำลอง ส่วนในระดับสัญลักษณ์ นักเรียนสามารถเขียนสมการแสดงปฏิกิริยาในเซลล์กัลวานิกได้ เช่น คำตอบหลังเรียนของนักเรียน (ภาพที่ 3) “นักเรียนเขียนสมการเคมีได้สอดคล้องกับการแสดงตัวแทนความคิดในระดับมหภาคและจุลภาค แต่นักเรียนยังเขียนไอออนของโลหะได้ไม่ถูกต้อง เช่น จาก  $Al^{3+}$  นักเรียนเขียนผิดเป็น  $Al^{2+}$  เป็นต้น”

## อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยพบว่า การจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลองทำให้ความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิด เรื่อง เซลล์กัลวานิกของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 ดีขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากในการจัดการเรียนรู้นักเรียนได้หาคำตอบเพื่อตรวจสอบแบบจำลองตนเองได้สร้างขึ้น (ขั้นที่ 1 การสร้างตัวแทนทางความคิด/รูปแบบทางความคิดภายใน และขั้นที่ 2 การแสดงแบบจำลอง) โดยลงมือปฏิบัติทำการทดลอง ซึ่งเมื่อนักเรียนทำการทดลองแล้วจะทำให้ให้นักเรียนเข้าใจและสร้างตัวแทนความคิดในการอธิบายผลการทดลองในระดับมหภาค รวมทั้งนักเรียนได้ลงมือทำกิจกรรมการสร้างแบบจำลองระดับจุลภาคจากวัสดุที่ครูจัดเตรียมไว้ให้ เช่น กระดาษสิริรูปวงกลมติดแผ่นแม่เหล็กสีต่างๆใช้แทนอะตอมหรืออนุภาคในเซลล์กัลวานิกดังรูปที่ 4 ซึ่งวัสดุดังกล่าวสามารถช่วยอธิบายการเปลี่ยนแปลงตัวแทนความคิดในระดับจุลภาคและระดับสัญลักษณ์ได้ นอกจากนี้นักเรียนยังได้ศึกษาวิทัศน์เพิ่มเติมเกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของอนุภาคในเซลล์กัลวานิก จนสามารถเขียนสัญลักษณ์ทางเคมีและเขียนสมการการเกิดปฏิกิริยาได้อย่างถูกต้อง (ขั้นที่ 3 การทดสอบแบบจำลอง) และช่วยให้นักเรียนสามารถเชื่อมโยงตัวแทนความคิดทั้ง 3 ระดับ (ขั้นที่ 4 การพิจารณาขอบเขตและข้อจำกัดของแบบจำลอง) แล้วนักเรียนค่อยร่วมกันพิจารณาแบบจำลองที่สร้างขึ้นไว้ก่อนการทดลองเปรียบเทียบกับหลักฐานจากการทดลอง เพื่อปรับปรุงแบบจำลองให้สามารถอธิบายการเกิดปฏิกิริยาในเซลล์กัลวานิกให้ดียิ่งขึ้น



จากนั้นครูและนักเรียนร่วมกันเปรียบเทียบและอภิปรายความแตกต่างของแบบจำลองก่อนและหลังจัดกิจกรรมว่าแตกต่างกันอย่างไร



ภาพที่ 4 วัสดุที่ใช้ในกิจกรรมสร้างแบบจำลองในระดับจุลภาค

### สรุปผลการศึกษา

ผลการศึกษาความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดโดยการจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลอง เรื่อง เซลล์กัลวานิก ของนักเรียนชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 5 พบว่าความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดก่อนเรียนนักเรียนส่วนใหญ่มีความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดในระดับต่ำ คือ ไม่สามารถแสดงตัวแทนความคิดถูกต้อง แต่เมื่อจัดการเรียนรู้โดยการสร้างแบบจำลองแล้วพบว่า นักเรียนส่วนใหญ่มีความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดสูงขึ้น คือ อยู่ในระดับปานกลาง โดยนักเรียนสามารถสร้างตัวแทนความคิดได้ถูกต้องแต่ยังไม่สมบูรณ์ และจากการที่นักเรียนส่วนใหญ่ที่เรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลองแล้วแต่ยังไม่สามารถสร้างตัวแทนความคิดให้อยู่ในระดับสูงได้นั้น อาจเนื่องมาจากระยะเวลาในการเรียนรู้ของนักเรียนไม่เพียงพอต่อการทดลองและร่วมกันอภิปรายผลการทดลอง อีกทั้งนักเรียนบางคนไม่ได้เรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลองในทุกๆ ขั้นตอนอย่างสมบูรณ์จึงเป็นผลให้นักเรียนส่วนใหญ่ยังมีผลการสร้างตัวแทนความคิดอยู่ในระดับปานกลาง แต่อย่างไรก็ตามก็มีนักเรียนบางคนที่สามารถสร้างตัวแทนความคิดได้ในระดับสูง อาจกล่าวได้ว่า การจัดการเรียนรู้ด้วยการสร้างแบบจำลองเป็นอีกทางเลือกที่จะช่วยครูเคมีสามารถสร้างความเข้าใจในการเรียนรู้เนื้อหาที่มีความเป็นนามธรรม โดยออกแบบเพื่อให้นักเรียนได้เชื่อมโยงตัวแทนความคิดทั้ง 3 ระดับเข้าด้วยกัน

### ข้อเสนอแนะในการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้มีจุดเด่นคือ สามารถพัฒนาความสามารถในการสร้างตัวแทนความคิดในการเรียนรู้วิชาเคมีของนักเรียนได้เป็นอย่างดี และทำให้นักเรียนมีทักษะการแก้ปัญหา การทดลอง และการร่วมกันแก้ปัญหาในการเรียนรู้ที่ครูเป็นผู้กำหนดปัญหาให้ได้ การวิจัยครั้งต่อไปผู้วิจัยควรจัดการเรียนรู้ในขั้นตอนแบบจำลองโดยให้นักเรียนได้ทำการทดสอบแบบจำลองทุกคน เพื่อการศึกษาเชิงคุณภาพที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น และจะสามารถศึกษานักเรียนได้เป็นรายบุคคล และครูหรือผู้วิจัยเองควรทดสอบการทดลองก่อนทุกครั้งที่จะทำการจัดการเรียนรู้เพื่อให้ผลการทดลองที่ได้ถูกต้อง



## เอกสารอ้างอิง

1. Natnaphan K, Suwat N. A study of grade 11 students' scientific concept and ability in making scientific model in electrochemistry by using model-centered instruction sequence. *KKU Research Journal (Graduate Studies) Graduate School, Khon Kaen University*. 2015; 3(1), 82-92. Thai.
2. Tien T L, Osman K. Development of interactive multimedia module with pedagogical agent (IMMPA) in the learning of electrochemistry: Needs assessment. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2013; 7(18): 3725-3732.
3. Supasorn S. Grade 12 students' conceptual understanding and mental models of galvanic cells before and after learning by using small-scale experiments in conjunction with a model kit. *Chemistry Education Research and Practice*. 2015; 16(2): 393-407.
4. Lin H, Yang T, Chiu H, Chou C. Students' Difficulties in Learning Electrochemistry. *Proceedings of the National Science Council*, 2002; 12(3): 100 – 105.
5. Johnstone A. The development of chemistry teaching: A changing response to changing demand. *Journal of Chemical Education*. 1993; 70(9), 701–705.
6. Karaçöp A. Effects of student teams-achievement divisions cooperative learning with models on students' understanding of electrochemical cells. *International Education Studies*. 2016; 9(11): 1913-9039.
7. Jankran R, Pimtong P, Kaewwattana W. The development of grade 12 students' representational competence about polymer using multiple representations. Paper presented at the 34<sup>th</sup> National Academic Conference. 2015; 1659-1664. Thai.
8. Michalchik V, Rosenquist A, Kozma R, Kreikemeier P, Schank P. Representational resources for constructing shared understandings in the high school chemistry classroom. In: Gilbert J, Reiner M, Nakhleh M (Eds) *Visualization: Theory and practice in science education*, Springer, Dordrecht, 2008; 3: 233-282.
9. Kozma R, Russell J. Multimedia and understanding: Expert and novice responses to different representations of chemical phenomena. *Journal of Research in Science Teaching*, 1997; 43(9), 949-968.
10. Devetak I, Glazar S. Teachers' influence on students' motivation for learning science with understanding. In: Roberta V. Nata (Ed) *Progress in education*. Nova Science Publishers. 2011; 19: 77-103.
11. Justi R. Learning how to model in science classroom: Key teacher's roles in supporting the development of students' modelling skills. *Educacion Quimica*. 2009; 20(1): 32-40.
12. Jaber L, Boujaoude S. A Macro–Micro–Symbolic Teaching to Promote Relational Understanding of Chemical Reactions. *International Journal of Science Education*, 2012; 34(7): 973 – 998.
13. Gamett P, Treagust D. Difficulties experienced by senior high school students of electrochemistry: Electric circuits and oxidation-reduction equations. *Journal of Research in Science Teaching*, 1992; 29(2): 121-142.