

การศึกษาหาวิธีการออกแบบการทดลองและสร้าง Experimental Kit
เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเรื่องพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี

ปริญญานิพนธ์

ของ

ทวิระ ขาวหา

THE LIBRARY
COLLEGE OF EDUCATION
BANGKOK, THAILAND

เสนอต่อวิทยาลัยวิชาการศึกษา
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต

9 มีนาคม 2514

การศึกษาวิธีการออกแบบการทดลองและสร้าง Experimental Kit
เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเรื่องพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี

บทคัดย่อ

ของ

วชิระ ขาวหา

เสนอต่อวิทยาลัยวิชาการศึกษา
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต
9 มีนาคม 2514

ความหมายอันสำคัญในการศึกษากันครั้งนี้คือ ทนกว่าหาวิธีการทดลองอย่างง่าย ๆ และ จักหาวิธีที่หาได้ง่าย ราคาถูก มาใช้เป็นเครื่องมือทดลองและสร้าง Experimental Kit เพื่อนำ ไปใช้ทดลองศึกษาหาพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี แล้วนำค่า พลังงานที่ได้จากการทดลองนี้ไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานของปฏิกิริยาเคมีเดียวกัน ซึ่งรายงานไว้ใน literature ว่าแตกต่างกันหรือไม่ มากน้อยกว่ากันเท่าใด

จากการทบทวนพบว่า เพื่อนำเอา calorimeter ที่ทำจากขวดแก้ว Latex และแผ่น styrofoam ไปใช้ในการทดลองหาค่า heat of neutralization, heat of solution, heat of hydration, heat of precipitation, heat of displacement และการศึกษา stoichiometry ของปฏิกิริยา โดยไม่การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น criteria แล้ว ทั้งค่าพลังงาน ความร้อนที่ได้จากการทดลองและค่าพลังงานความร้อนที่รายงานไว้ใน literature ของปฏิกิริยาเคมี ส่วนมากใกล้เคียงกัน ภายในขอบเขตของความคลาดเคลื่อนของการทดลอง แต่มีบาง system เท่านั้น ที่มีความคลาดเคลื่อนมากไปบ้างพอสมควร

จากการนำเอา ammeter, 1.0 m. ที่จำลองมาจาก voltmeter, 10.0 v. และ voltmeter, 3.0 v. ไปทดลองหาค่า voltage และค่าพลังงานไฟฟ้า หรือค่า free energy change (ΔG) ของ electrochemical cell และของ concentration cell นั้นพบว่า ทั้งค่า voltage และค่า free energy change (ΔG) ที่ได้จากทดลองและค่าที่รายงานไว้ใน literature ใกล้เคียงกัน ภายในขอบเขตของความคลาดเคลื่อนของการทดลอง แต่มีบาง system เท่านั้นที่มีความคลาดเคลื่อนมากไปบ้างพอสมควร

Experimental Kit ที่สร้างขึ้นนี้ราคา 583 บาท 90 สตางค์ และใช้ในการทดลอง ทั้งหมด 47 การทดลอง

คณะกรรมการที่ปรึกษาประจำตัวนิสิตได้พิจารณาปัญญานิพนธ์ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต ของวิทยาลัยวิชาการศึกษาได้.

ผศ. ส. เก่งวงศ์ ประธาน

สุเมธ ทรัพย์สมบัติ กรรมการ

อ. งามวิจิตร กรรมการ

9 มีนาคม 2514

ประกาศกฤษฎีกา

การศึกษาก่อนหน้านี้สำเร็จได้ก็เพราะเนื่องจากผู้เขียนได้รับคำแนะนำและความช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากอาจารย์ ดร.นิภา สะเพียรชัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุนทร พิริยกิจ และอาจารย์โช ศาส์ฉัน ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้ด้วย

คุณวาสนา จำเนียรกำรงการ คุณสังวาลย์ เหงียงพัก ไทให้กำลังใจ ความช่วยเหลือ และคำแนะนำแก่ผู้เขียนด้วยดีตลอดมา ผู้เขียนขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มได้เนื่องจากได้รับความร่วมมือจาก คุณมาลี บะวงษ์ โรงเรียนเบ็ญจมสารัตถวิทยาลัทธิวิชาการศึกษา ประสานมิตร ผู้เขียนขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้ด้วย.

วชิระ ขาวหา

9 มีนาคม 2514

สารบัญ

บทที่	หน้า
1. บทนำ	1
กานำ	1
ความมุ่งหมายในการศึกษากันกว่า	6
ขอบเขตของการศึกษากันกว่า	6
คำนิยามศัพท์เฉพาะ	7
ความสำคัญของการศึกษากันกว่า	7
ประโยชน์ของการศึกษากันกว่า	7
2. เอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษากันกว่า	9
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง Experimental kit	9
เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพลังงาน (Energy)	14
พลังงานความร้อน (Thermal or Heat energy)	15
Heat of Neutralization	15
Heat of Hydration	17
Heat of Precipitation	18
Heat of Displacement	20
Heat of Solution	21
พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy)	22
3. การสร้าง Experimental kit และวิธีดำเนินการทดลอง	26
การสร้าง Calorimeter สำหรับศึกษาพลังงานความร้อน	26
การสร้างเครื่องมือสำหรับใช้ศึกษาพลังงานไฟฟ้า	27
การทดลองหาพลังงานความร้อนอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี	36

พลังงานความร้อน (Thermal or Heat energy)	36
การทดลองหาค่า Calorimeter Constant	36
การทดลองหาค่า Heat of Neutralization	37
การทดลองหาค่า Heat of Solution	39
การทดลองหาค่า Heat of Hydration	42
การทดลองหาค่า Heat of Precipitation	42
การทดลองหาค่า Heat of Displacement	44
การทดลองหาค่า Stoichiometry โดยใช้จุดหมุ่เป็น Criteria	46
พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy)	49
Concentration cell	54
4. ทฤษฎี ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง	59
การสร้างเครื่องมือทดลอง (Experimental kit)	59
การสร้าง Calorimeter	59
การสร้างเครื่องมือสำหรับใช้ศึกษาพลังงานไฟฟ้า	60
การทดลองหาค่าพลังงานอื่นเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี	66
Heat of Neutralization	69
Heat of Solution and Hydration	75
Heat of Precipitation	84
Heat of Displacement	88
การทดลองหา Stoichiometry ของปฏิกิริยาเคมี	92
พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy)	103
Concentration cell	109

บท	หน้า
5. บทย่อ สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ	118
บรรณานุกรม	124
ภาคผนวก	129
ภาคผนวก ก. แหล่งและรายการของเครื่องมือและสาร เภสัชภัณฑ์มาสร้าง Experimental kit	130
ภาคผนวก ข. วิธีการคำนวณ	132
ภาคผนวก ค. ข้อมูลของการทดลอง	138
ภาคผนวก ง. ตัวอย่างการ plot graph ในการศึกษา system ต่าง ๆ	186

บัญชีตาราง

ตารางที่	หน้า
1 แสดงค่า Heat of Neutralization (ΔH)	39
2 แสดงค่า Heat of Solution (ΔH)	41
3 แสดงค่า Heat of Hydration (ΔH)	42
4 แสดงค่า Heat of Precipitation (ΔH)	44
5 แสดงค่า Heat of Displacement (ΔH)	46
6 ปริมาณของกรดและเบสในการทดลอง Stoichiometry ของปฏิกิริยาเคมี โดยวิธี continuous variation method	47
7 แสดง Mole Ratio ที่สารทำปฏิกิริยากัน	48
8 แสดงค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ที่ได้จากการทดลอง	54
9 แสดงความเข้มข้นของสารละลายและ Concentration Ratio ที่ใช้ในการทำ Concentration cell	55
10 แสดงค่า Cell Potential and Concentration Ratio for a Cu-CuSO ₄ Concentration Cell at 28.4 °C	56
11 แสดงค่า Cell Potential and Concentration Ratio for a Zn-ZnSO ₄ Concentration Cell at 28.0 °C	57
12 แสดงค่า Cell Potential and Concentration Ratio for a Pb-Pb(NO ₃) ₂ Concentration Cell at 28.4 °C	58
13 แสดงค่า Heat of Neutralization (ΔH) ที่ได้จากทดลอง โดยใช้ปริมาตรของ Reactant 50.0 ml. เท่ากัน และค่าที่รายงาน ไว้ใน Literature	72
14 แสดงค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Hydrated Salts และ Anhydrous Salts ที่ได้จากทดลอง และที่ได้จากการคำนวณ จาก Literature	80

15	แสดงค่า Heat of Hydration (ΔH) ที่ได้จากทดลอง และจากการคำนวณ	81
16	แสดงค่า Heat of Precipitation (ΔH) ที่ได้จากทดลองและค่า จากการคำนวณ	86
17	แสดงค่า Heat of Displacement (ΔH) ที่ได้จากทดลอง และการคำนวณ	90
18	แสดงค่า Mole Ratio ที่สารทำปฏิกิริยากันพอดี	94
19	แสดงค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ที่ได้อะจากการทดลองและจาก Literature	106
20	แสดงค่า Cell Potential and Concentration Ratio for a Cu-CuSO ₄ Concentration cell at 28 °C	111
21	แสดงค่า Cell Potential and Concentration Ratio for a Zn-ZnSO ₄ Concentration cell at 28.0 °C	111
22	แสดงค่า Cell Potential and Concentration Ratio for a Pb-Pb(NO ₃) ₂ Concentration cell at 28.4 °C	112
23	แสดงข้อมูลในการหาค่า Calorimeter Constant ของ Calorimeter A โดยใช้น้ำร้อน (Hot Water) 50.0 ml. ผสมกับน้ำเย็น (Cold Water) 50.0 ml.	139
24	แสดงข้อมูลในการหาค่า Calorimeter Constant ของ Calorimeter B โดยใช้น้ำร้อน (Hot Water) 50.0 ml. ผสมกับน้ำเย็น (Cold Water) 50.0 ml.	140
25	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Neutralization (ΔH) ของ System NaOH(aq.), 1.0 M-H ₂ SO ₄ (aq.), 0.5 M (50:50 ml.)	141
26	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Neutralization (ΔH) ของ System NaOH(aq.), 0.5 M-HCl(aq.), 0.5 M (50:50 ml.)	142

39	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Sodium acetate (CH_3COONa)	155
40	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Sodium acetate decahydrate ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	156
41	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Sodium sulfate (Na_2SO_4)	157
42	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Sodium sulfate decahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	158
43	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Sodium carbonate (Na_2CO_3)	159
44	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Sodium carbonate decahydrate ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)	160
45	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Anhydrous salts (ΔH_f), Heat of Solution ของ Hydrated salts (ΔH_2) และ Heat of Hydration (ΔH_3)	161
46	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Precipitation (ΔH) ของ System $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.})$, 0.25 M-KI(aq.), 0.5 M (50:50 ml.)	162
47	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Precipitation (ΔH) ของ System $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.})$, 0.25 M- $\text{K}_2\text{CrO}_4(\text{aq.})$, 0.25 M (50:50 ml.)	163
48	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Displacement (ΔH) ของ System Zn(dust), 1.0 g.- CuSO_4 , 0.5 M, 100.0 ml.	164
49	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Displacement (ΔH) ของ Zn(dust) 0.5 g.- $\text{AgNO}_3(\text{aq.})$, 0.2 M, 100.0 ml.	165
50	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Displacement (ΔH) ของ System Cu(powder), 1.0 g.- AgNO_3 , 0.5 M, 100.0 ml.	166

51	แสดงการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา Stoichiometry ของ System $\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}-\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$	167
52	แสดงการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา Stoichiometry ของ System $\text{NaOH(aq.)}, 0.5 \text{ M}-\text{HCl(aq.)}, 0.5 \text{ M}$	168
53	แสดงการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา Stoichiometry ของ System $\text{NaOH(aq.)}, 0.5 \text{ M}-\text{HNO}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$	169
54	แสดงการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา Stoichiometry ของ System $\text{KOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}-\text{HCl(aq.)}, 1.0 \text{ M}$	170
55	แสดงการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา Stoichiometry ของ System $\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}-\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}$	171
56	แสดงการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา Stoichiometry ของ System $\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}-\text{KHCO}_3(\text{aq.}), 1.0 \text{ M}$	172
57	แสดงการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา Stoichiometry ของ System $\text{NH}_3(\text{aq.}), 1.0 \text{ M}-\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}$	173
58	แสดงการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา Stoichiometry ของ System $\text{NH}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}-\text{HCl(aq.)}, 0.5 \text{ M}$	174
59	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ของ System $\text{Zn/ZnSO}_4(\text{aq.}), 0.5 \text{ M//CuSO}_4(\text{aq.}), 0.5 \text{ M/Cu}$	175
60	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ของ System $\text{Cu/Cu(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3 \text{ M//AgNO}_3(\text{aq.}) 0.6 \text{ M/Ag}$	176
61	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ของ System $\text{Pb/Pb(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5 \text{ M//Cu(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5 \text{ M/Cu}$	177
62	แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ของ System $\text{Zn/Zn(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3 \text{ M//AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6 \text{ M/Ag}$	178

การวางท	หน้า
63 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ของ System $\text{Pb/Pb(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.25 \text{ M} // \text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M/Ag}$	179
64 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG) ของ Cu-CuSO_4 Concentration cell ที่ 28.4°C	180
64(ทอ) แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG) ของ Cu-CuSO_4 Concentration cell ที่ 28.4°C	181
65 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG) ของ Zn-ZnSO_4 Concentration cell ที่ 28.0°C	182
65(ทอ) แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG) ของ Zn-ZnSO_4 Concentration cell ที่ 28.0°C	183
66 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG) ของ $\text{Pb-Pb(NO}_3)_2$ Concentration cell ที่ 28.4°C	184
66(ทอ) แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG) ของ $\text{Pb-Pb(NO}_3)_2$ Concentration cell ที่ 28.4°C	185

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบที่	หน้า
1 แสดงการถ่วงจรรยาในการเทียบ scale ของ ammeter	27
2 แสดงการถ่วงจรรยาในการเทียบ scale ของ voltmeter	28
3 แสดงการถ่วงจรรยาในเครื่องมือสำหรับศึกษาพลังงานไฟฟ้า	29
4 รูปเครื่องมือที่ใช้วัดค่า Voltage ของ Electrochemical cell	30
5 Apparatus	
6 รูปแสดง Experimental kit	35
7 รูปแสดงการ Plot graph หาค่า Voltage ตามทฤษฎี	61
8 รูปแสดงหลักการทำงานของ Potentiometer	61
9 รูปแสดงการใช้ Potentiometer วัดกับ Unknown cell	62
10 รูปแสดงการใช้ Reversing key ภายในวงจร	63
11 รูปแสดงการถ่วง Dry cell แบบผสม	64
12 รูปแสดงการปรับแก้ voltmeter ให้สามารถอ่าน scale ได้ละเอียดยิ่งขึ้น	65
13 แสดงการ Plot graph ระหว่างค่า Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) กับจำนวน mole ของ Reactants ของ System $\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M} - \text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$, Total volume 100.0 ml. ในการศึกษา Stoichiometry โดย Continuous Variation Method และใช้จุดหมุนเป็น Criteria	95
14 แสดงการ Plot graph ระหว่างค่า Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) กับจำนวน mole ของ Reactants ของ System $\text{NaOH(aq.)}, 0.5 \text{ M} - \text{HCl(aq.)}, 0.5 \text{ M}$, Total volume 100.0 ml. ในการศึกษา Stoichiometry โดย Continuous Variation Method และใช้จุดหมุนเป็น Criteria	96

- 15 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Temperature change
 ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) กับจำนวน mole ของ Reactants ของ System
 $\text{NaOH(aq.)}, 0.5 \text{ M} - \text{HNO}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$, Total volume 100.0 ml.
 ในการศึกษา Stoichiometry โดย Continuous Variation
 Method และใช้จุดหมุนเป็น Criteria 97
- 16 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Temperature change
 ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) กับจำนวน mole ของ Reactants ของ System
 $\text{KOH(aq.)}, 0.5 \text{ M} - \text{HNO}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$, Total volume 100.0 ml.
 ในการศึกษา Stoichiometry โดย Continuous Variation
 Method และใช้จุดหมุนเป็น Criteria 98
- 17 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Temperature change
 ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) กับจำนวน mole ของ Reactants ของ System
 $\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M} - \text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}$, Total volume 100.0 ml.
 ในการศึกษา Stoichiometry โดย Continuous Variation
 Method และใช้จุดหมุนเป็น Criteria 99
- 18 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Temperature change
 ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) กับจำนวน mole ของ Reactants ของ System
 $\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M} - \text{KHCO}_3(\text{aq.}), 1.0 \text{ M}$, Total volume 100.0 ml.
 ในการศึกษา Stoichiometry โดย Continuous Variation
 Method และใช้จุดหมุนเป็น Criteria 100
- 19 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Temperature change
 ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) กับจำนวน mole ของ Reactants ของ System
 $\text{NH}_3(\text{aq.}), 1.0 \text{ M} - \text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}$, Total volume 100.0 ml.
 ในการศึกษา Stoichiometry โดย Continuous Variation
 Method และใช้จุดหมุนเป็น Criteria 101

- 20 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) กับจำนวน mole ของ Reactants ของ System $\text{NH}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M-HCl}(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$, Total volume 100.0 ml. ในการศึกษา Stoichiometry โดย Continuous Variation Method และใช้จุดยุติเป็น Criteria 102
- 21 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ E_{max} (volts) กับค่า Log concentration ratio ของ Cu-CuSO₄ concentration cell ที่ $28.4 ^\circ\text{C}$ 115
- 22 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ E_{max} (volts) กับค่า Log concentration ratio ของ Zn-ZnSO₄ concentration cell ที่ $28.0 ^\circ\text{C}$ 116
- 23 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ E_{max} (volts) กับค่า Log concentration ratio ของ Pb-Pb(NO₃)₂ concentration cell ที่ $28.4 ^\circ\text{C}$ 117
- 24 แสดงตัวอย่างในการ Plot graph ระหว่างค่า Temperature, $^\circ\text{C}$ กับค่า Time, seconds ในการทดลองหาค่า Calorimeter constant ของ Calorimeter 187
- 25 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Calorimeter constant, cal.deg^{-1} ของ Calorimeter B กับค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น (Temperature change, ΔT), $^\circ\text{C}$ 188
- 26 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Calorimeter constant, cal.deg^{-1} ของ Calorimeter B กับค่าอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ลดลง (Temperature change, ΔT), $^\circ\text{C}$ 189

- 27 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่าง Temperature, °C กับ Time, seconds ในการทดลองหา Heat of Neutralization ทาง ๆ และ System อื่น ๆ ที่มีการ Plot graph ระหว่าง Temperature, °C กับ Time, seconds 190
- 28 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่าง Current (mA) กับ Applied potential (v) ในการหา voltage ของ Zn/ZnSO₄(aq.), 0.5 M//CuSO₄(aq.), 0.5 M/Cu cell 191
- 29 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่าง Current (mA) กับ Applied potential (v) ในการหา voltage ของ Cu/Cu(NO₃)₂(aq.), 0.30 M//AgNO₃(aq.), 0.60 M/Ag cell 192
- 30 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่าง Current (mA) กับ Applied potential (v) ในการหา voltage ของ Pb/Pb(NO₃)₂(aq.), 0.25 M//AgNO₃(aq.), 0.50 M cell 193
- 31 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่าง Current (mA) กับ Applied potential (v) ในการหา voltage ของ Zn/Zn(NO₃)₂(aq.), 0.3 M//AgNO₃(aq.), 0.60 M/Ag cell 194
- 32 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่าง Current (mA) กับ Applied potential (v) ในการหา voltage ของ Pb/Pb(NO₃)₂(aq.), 0.50 M//Cu(NO₃)₂(aq.), 0.50 M/Cu cell 195

คำนำ

ในขณะที่โลกกำลังเจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว และจากกรที่มนุษย์นำเอาวิธีการและผลงานทางเกษตรกรรมมาใช้ในทางการแพทย์ การเกษตรกรรม การคมนาคม การอุตสาหกรรม การสงคราม ตลอดจนความสำเร็จในการเดินทางไปยังโลกใหม่ในจักรวาลนั้น เป็นสาเหตุที่ทำให้คนส่วนมากเกิดความไม่มั่นใจในอนาคตของมนุษยชาติ อันเนื่องมาจากความเข้าใจในการทำลายของสิ่งประณีตบางประการทางวิทยาศาสตร์ แต่ในขณะที่คนส่วนมากมีความหวังที่จะได้วิทยาศาสตร์เป็นเครื่องช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ เพื่อให้เขาสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้อย่างสะดวกสบาย ซึ่งแสดงให้เห็นว่านอกจากความเจริญก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากภายในชีวิตและความเป็นอยู่ของมนุษยชาติส่วนใหญ่แล้ว ยังเป็นเครื่องชี้ให้เห็นว่า คนส่วนมากยังไม่เข้าใจว่าวิทยาศาสตร์คืออะไร และนักวิทยาศาสตร์จะสามารถช่วยอะไรเขาได้บ้าง

ดังนั้นความจำเป็นในการที่จะทำให้คนส่วนมากเข้าใจในงานของนักวิทยาศาสตร์ รวมทั้งวิธีการที่นักวิทยาศาสตร์ใช้ในการค้นคว้าหาความจริงทั้งหลายทางวิทยาศาสตร์นั้น นับว่าสำคัญอย่างยิ่ง เพราะจะทำให้คนส่วนมากเกิดทัศนคติทางวิทยาศาสตร์ และเป็นวิธีการที่จะช่วยทำให้ความเข้าใจในวิทยาศาสตร์กลายเป็นส่วนหนึ่งของความนึกประจักษ์ของมนุษย์ และสามารถนำไปช่วยแก้ปัญหาต่าง ๆ ในการดำรงชีวิตได้

ความเข้าใจในวิทยาศาสตร์ดังกล่าวนี้ จะเกิดขึ้นได้ก็โดยอาศัยการศึกษาเป็นสำคัญ และจะต้องถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาที่เกี่ยว สถาบันการศึกษาที่จัดสอนวิทยาศาสตร์เป็นหลายแขนงแยกกันเห็น ก็จะต้องสอนรายวิชาเหล่านี้ให้ใหญ่เรียนไปมอง เห็นเจตนารมณ์ของวิทยาศาสตร์เป็นอันหนึ่งอันเดียวกันทั้งหมด ดังนั้นการเรียนการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ในสถาบันการศึกษาระดับต่าง ๆ อันนับว่าเป็นก้าวแรกและเป็นทางหนึ่งที่จะทำให้คนส่วนใหญ่เข้าใจในวิทยาศาสตร์ได้เป็นอย่างดีและถูกต้องนั้น การจัดให้มีการเรียนการสอนทั้งทางทฤษฎี และวิธีการค้นคว้าหาความจริงทางวิทยาศาสตร์ แทนที่จะสอนแต่เฉพาะผลงานหรือทฤษฎีต่าง ๆ ที่นักวิทยาศาสตร์ทั้งหลายยกย่องเอาไว้นั้นแต่เพียงอย่างเดียว

พิทักษ์ รัชพลเดช¹ ได้กล่าวถึงวิธีการสอนวิทยาศาสตร์ทั่วไปว่า "จะต้องสอนเกี่ยวกับความเข้าใจในหลักการ ทักษะ มโนภาพ และทักษะในการแก้ปัญหา..." ซึ่งหมายความว่า จะต้องสอนให้ทราบถึงวิธีการ และหลักการทางวิทยาศาสตร์ที่นักวิทยาศาสตร์ใช้สำหรับค้นคว้าวิจัย และศึกษาหาความจริงหรือใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ ทางวิทยาศาสตร์ วิธีการหรือหลักการทางวิทยาศาสตร์ที่กล่าวถึงนี้คือ การศึกษาค้นคว้าหาความจริงโดยวิธีทดลองนั่นเอง และถือว่าการทดลองเป็นหัวใจของงานทางวิทยาศาสตร์

Leonardo Da Vinci² กล่าวว่า "...วิทยาศาสตร์ทุกสาขาที่ไม่ได้มีผลสืบเนื่องมาจากการทดลอง ย่อมไร้สาระ และเต็มไปด้วยข้อผิดพลาด การทดลองจึงนับว่าเป็นผู้ให้กำเนิดแก่ความเที่ยงแท้แน่นอนทั้งหลาย..." จะเห็นได้ว่าการที่จะให้ผู้เรียนมีความเข้าใจในวิทยาศาสตร์ถึงความาแล้วข้างต้น จึงจำเป็นจะต้องมีการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์โดยวิธีทดลองให้เห็นจริง เพราะการที่พยายามเรียนวิทยาศาสตร์โดยไม่มีการทดลองให้เห็นอย่างนั้น จะทำให้ผู้เรียนเข้าใจงานที่เป็นพื้นฐานของการสรุปหลักการทางวิทยาศาสตร์ผิดพลาดไปได้

นิกา สะเพียรชัย³ ได้กล่าวถึงความมุ่งหมายอันสำคัญของการเรียนการสอนวิทยาศาสตร์โดยวิธีทดลองเอาไว้ว่า "...เพื่อให้เด็กเรียนเข้าใจ ชำนาญถึงวิธีการที่นักวิทยาศาสตร์เสาะแสวงหาความรู้ หลักการ ทฤษฎีหรือความคิดใหม่ ๆ ยิ่งไปกว่านั้น นักเรียนจะค้นพบทฤษฎีต่าง ๆ ด้วยตนเอง โดยวิธีนี้ นักเรียนจะรู้สึกตื่นเต้น สนใจ กระหายที่จะค้นคว้า และศึกษาต่อไป..."

¹Bitak Raksaboldej, A Survey of Science Programs in Selected State Teacher College, pp. 114-123.

²George C. Pimentel, Chemistry An Experimental Science, (4th. ed.), p. 1.

³นิกา สะเพียรชัย "การเคลื่อนไหวเกี่ยวกับการปรับปรุงการสอนวิชาเคมี", วิสามัญศึกษา 3:59 กรกฎาคม 2509.

ในการเรียนการสอนวิชาเคมี ซึ่งเป็นวิทยาศาสตร์ที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์
อย่างมากสาขาหนึ่ง และถือว่าเป็นวิทยาศาสตร์แห่งการทดลองนั้น¹ (Experimental Science)
ก็จำเป็นที่จะต้องมีการเรียนการสอนโดยวิธีทดลอง เช่นเดียวกับวิทยาศาสตร์สาขาอื่น ๆ เพื่อให้บรรลุ
ถึงจุดมุ่งหมายที่จะทำให้ผู้เรียนมีทัศนคติทางวิทยาศาสตร์ และเข้าใจวิธีการทางวิทยาศาสตร์²

จากการที่บรรจุเนื้อหาวิชาเคมีเข้าไปในหลักสูตรของโรงเรียนสามัญ โรงเรียนอาชีวศึกษา
และมหาวิทยาลัยนั้น ย่อมเป็นการแสดงให้เห็นว่า นักการศึกษาทั้งหลายได้มองเห็นความสำคัญของ
วิชานี้ ทั้งในด้านการศึกษาค้นเป็นพื้นฐานของการดำรงชีวิตของมนุษย์ และเป็นแขนงหนึ่งของ
วิทยาศาสตร์ แต่เนื่องจากความรู้ทางวิชาเคมีได้มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ประเทศต่าง ๆ
จึงมีการปรับปรุงการเรียนการสอนวิชาเคมีอยู่เสมอ โดยเริ่มโครงการต่าง ๆ ตั้งแต่ ปี ค.ศ.1959
อาทิเช่น Chemical Bond Approach Project. (C.B.A.) และ Chem Study ของ
อเมริกา Nuffield Foundation Project ของอังกฤษ โครงการ A.B.C. ของญี่ปุ่น
รวมทั้ง UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia ซึ่งมีสำนักงาน
ตั้งอยู่ในประเทศไทยด้วย แต่ละโครงการที่กล่าวมาแล้วนี้มุ่งที่จะหาทางปรับปรุง เปลี่ยนแปลงวิธี
การสอนวิชาเคมีไปในแนวทางที่เน้นหนัก วิธีการที่เรียกว่า Experimental Approach³ เป็น
สำคัญ

นิกา สะเพียรชัย⁴ ได้เสนอความคิดเห็นเกี่ยวกับเคมีใหม่ เพื่อให้ทันกับความเจริญ
ก้าวหน้าของวิชาเคมีว่า "...ไมควรให้นักเรียนท่องจำ ควรใช้วิธี Experimental Approach
เป็นหัวใจของวิชาเคมี นักเรียนควรจะได้ทำการทดลองให้มากที่สุดเท่าที่เวลาจะอำนวย และครู

¹H.A. Nieldig, Teachers' Guide to Investigating Chemical System,
p.3.

²หน่วยศึกษานิเทศก์ กรมการฝึกหัดครู แผนแนวการสอนวิชาวิทยาศาสตร์ตามหลักสูตร
ประกาศนียบัตรวิชาการศึกษาระดับสูง 2510, หน้า 75.

^{3,4}หน่วยศึกษานิเทศก์ กรมการฝึกหัดครู การสัมมนาวิชาเคมีตามหลักสูตร
ประกาศนียบัตรวิชาการศึกษาระดับสูง พุทธศักราช 2510, หน้า 1-4.

ไม่ไปประกอบการเรียนการสอนวิชาเกมแบบใหม่ในหัวข้ออื่น ๆ ต่อไปอีกด้วย อันจะทำให้ความมุ่งหมายของโครงการปรับปรุงการสอนเกมแบบใหม่ของประเทศที่กำลังพัฒนา ให้สัมฤทธิ์ผลอย่างขาดพลใจ

ความมุ่งหมายในการศึกษาค้นคว้า

1. เพื่อศึกษาหาวิธีการออกแบบการทดลองอย่างง่าย ๆ และสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) สำหรับนำไปใช้ในการเรียนการสอนเรื่องพลังงาน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี หรือ ทัศนียภาพที่คาดหมาย และดูการศึกษา
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าของพลังงานที่ได้จากแบบการทดลอง และเครื่องมือทดลองในข้อ 1. กับค่าของพลังงานในปฏิกิริยาเคมีอันเดียวกัน ที่รายงานไว้ใน literature ว่าแตกต่างกันหรือไม่ มากน้อยเท่าใด
3. เพื่อเป็นการเสนอแนะให้ครูที่สอนวิชาเคมี ได้จัดสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ขึ้น เพื่อทดลองประกอบการเรียนการสอนเรื่องพลังงาน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี โดยใช้วัสดุที่ไม่เป็นอันตราย หาง่าย และราคาถูก
4. เพื่อเป็นการเสนอแนะให้ครูนำเอาวิธีการทดลอง แบบของการทดลอง และหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ไปใช้สอนเรื่องพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี
5. เพื่อเป็นการช่วยเหลือเกี่ยวกับงบประมาณทางวิทยาศาสตร์ของสถาบันการศึกษาต่าง ๆ

ขอบเขตของการศึกษาค้นคว้า

1. ค้นคว้าหาวิธีการออกแบบการทดลอง และสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ขึ้น เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเรื่องพลังงาน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี
2. แบบการทดลอง วิธีการทดลอง และหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) จะใช้ในการศึกษา และการสอนเรื่องพลังงานต่อไปของปฏิกิริยาเคมี
 - 2.1 พลังงานความร้อน (Thermal or Heat energy)
 - 2.2 พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy)
3. มุ่งหาผลการศึกษาค้นคว้าไปใช้ในการเรียนการสอน เรื่องพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีในทางปริมาณวิเคราะห์

คำนิยามศัพท์เฉพาะ

Experimental Kit หมายถึง หีบ หรือ กล่อง ซึ่งภายในบรรจุไว้วางชิ้นส่วนต่าง ๆ ของเครื่องมือขนาดเล็ก และสารเคมีที่จะใช้ในการทดลองประกอบการเรียนการสอน เรื่องพลังงานความร้อน (Thermal or Heat energy) และ พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี โดยมีหนังสือคู่มือในการใช้หีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) รวมอยู่ด้วย

ความสำคัญของการศึกษาค้นคว้า

1. ผลของการศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้ จะทำให้ผู้สอนวิชาเคมีในสถานศึกษาทุกระดับได้ทราบถึงวิธีการทดลอง แบบของการทดลองอย่างง่าย ๆ และสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ขึ้น เพื่อใช้ศึกษา และใช้ทดลองประกอบการเรียนการสอนเรื่องพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี
2. แบบของการทดลอง วิธีการทดลอง และเครื่องมือทดลอง ที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้ สามารถนำไปใช้ทดลองประกอบการเรียนการสอนเรื่องพลังงาน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย และอุดมศึกษาได้
3. ผลของการศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้ จะเป็นเครื่องช่วยกระตุ้นให้ผู้สอน ผู้เรียนวิชาวิทยาศาสตร์ เกิดแนวความคิดที่จะออกแบบการทดลองอย่างง่าย และจัดทำหรือสร้างเครื่องมืออย่างง่าย ๆ เพื่อทดสอบความรู้ที่ได้เรียนจากทฤษฎีได้
4. ผลของการศึกษาค้นคว้าเรื่องนี้ จะอำนวยความสะดวกเกี่ยวกับเครื่องมือทดลองทางวิทยาศาสตร์ และจะสามารถช่วยเหลือสถาบันการศึกษาทุกระดับวิชาอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ได้

ประโยชน์ของการศึกษาค้นคว้า

1. ทำให้ทราบวิธีการทดลอง แบบของการทดลองอย่างง่าย ๆ ที่จะใช้ทดลองประกอบการเรียนการสอน เรื่องพลังงานความร้อน แล พลังงานไฟฟ้าที่ได้มาจากปฏิกิริยาเคมี
2. ทำให้ทราบว่า การนำเอาเครื่องมือขนาดเล็กที่ทำขึ้นจากวัสดุที่หาได้ง่ายจากแหล่งต่าง ๆ และราคาถูกมาใช้ในการศึกษา และทดลองนั้น ทำให้ผลของการทดลองแตกต่างจากค่ารายงานไว้ใน literature มากน้อยเพียงใด

3. หีบห่อทดลอง เครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ที่ได้จากการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ จะช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ และอำนวยความสะดวกในการที่จะเอา Kit นี้ ไปใช้ทดลองประกอบการเรียนการสอนเรื่อง พลังงานความร้อน และพลังงานไฟฟ้าอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี ในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย และอุดมศึกษา.

บทที่ 2

เอกสารและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาค้นคว้า

ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ ได้แบ่งการศึกษาค้นคว้าออกเป็น 2 ตอน คือ การสร้างเครื่องมือที่จะใช้ในการทดลองซึ่งจะจัดขึ้นในรูปของหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) และการออกแบบการทดลอง (Experimental design) อย่างง่าย ๆ ที่จะใช้ในการศึกษาทฤษฎีพลังงานความร้อน (Heat energy) และพลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น ผู้เขียนจะขอกล่าวถึง เอกสารที่จะใช้ประกอบการศึกษาค้นคว้าในแต่ละตอนดังต่อไปนี้

1. เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการสร้าง Experimental Kit

เนื่องจากการที่จะใช้หีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ประกอบการสอนวิชาเคมี เพื่อให้ผู้เรียนได้ทราบถึงแนวความคิดพื้นฐานของวิชาเคมีเป็นอย่างดี และเป็นการช่วยเหลือเกี่ยวกับงบประมาณทางด้านวิทยาศาสตร์สำหรับสถาบันที่ขาดแคลนอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ในประเทศที่กำลังพัฒนา ดังได้กล่าวมาแล้วนั้น นั้นมีความจำเป็นและสำคัญอย่างยิ่ง และในการที่จะสร้างหีบเครื่องมือทดลองขึ้นมา เพื่อที่จะนำไปใช้ในการศึกษาหัวข้อเรื่อง (Topic) ต่าง ๆ ของวิชาเคมีหรือวิชาวิทยาศาสตร์นั้น ก่อนนั้นจะต้องเลือกหัวข้อเรื่อง (Topic) ที่จะใช้ในการศึกษาทดลองเสียก่อน โดยคำนึงว่าการทดลองนั้นจะต้อง

1. เป็นเรื่องที่น่าสนใจ และอยู่ในขอบเขตที่จะทำการทดลองได้
2. การทดลองนั้นจะต้องปลอดภัย ประหยัดทั้งเวลาและสารเคมี
3. สามารถที่จะใช้วิธีการทดลองหรือแบบการทดลองง่าย ๆ ได้

เมื่อเลือกหัวข้อเรื่อง (Topic) ที่จะใช้ในการทดลองได้แล้ว จะต้องออกแบบการทดลองเกี่ยวกับหัวข้อเรื่องนั้น ๆ เสียก่อน แล้วจึงออกแบบและจัดสร้างหีบเครื่องมือทดลองขึ้น โดยให้สอดคล้องกับหัวข้อเรื่องนั้น

ในการออกแบบการทดลองและสร้างหีบเครื่องมือทดลองขึ้นมานั้น มีหลักการที่ควรยึดดังต่อไปนี้

1. จะต้องประหยัดเวลาในการสอน กล่าวคือสามารถช่วยเหลือในการเรียนการสอน โดย

ไม่ต้องเสียเวลาอธิบายมากเกินไป ซึ่งครูหรือนักเรียนสามารถทำการทดลองควบคู่ไปกับการเรียนการ
คิดในภาคบรรยายได้

2. จาการถนัดทั้งเครื่องมีตาเล็ง และการทดลองได้มาอย่างรวดเร็ว ง่ายและสะดวก
3. เครื่องนี้ถ้าไปทำการทดลองทั้งหกหรือสัปดาห์ จะต้องไม่แพงหรือ รั่วหรือว่าสึกเสียหาย

ไ้ง่าย

4. เครื่องมือทดลอง จะต้องมีลักษณะพอที่จะใช้ได้ แต่มีราคาถูก ทั้งนี้เพื่อให้ผลการ
ทดลองถูกต้อง เที่ยงตรง และอาจวาดสร้างเครื่องมือขึ้นมาเองได้ โดยไม่จำเป็นต้องลงทุนมากจนเกิน
ไป

5. เครื่องมือทดลองที่อยู่ในหีบเครื่องมือทดลองนั้น สามารถที่จะใช้ในการทดลองได้หลาย

การทดลอง

6. เครื่องมือประเภทที่พำกยแล้ว ที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือทดลองนี้จะคงหาได้ง่าย
หรือมีราคาถูก

7. ถ้าไม่อยู่ในระหว่างการทดลองแล้ว ชิ้นส่วนของเครื่องมือทดลองจะแยกกันอยู่ แต่เมื่อ
จะทำการทดลอง ก็สามารถนำ ชิ้นส่วนของเครื่องมือทดลองภายในหีบเครื่องมือทดลองดังกล่าว มา
ประกอบกันขึ้นเป็นเครื่องมือที่สมบูรณ์ ซึ่งสะดวกในการทดลองได้

8. เครื่องมือทดลองควรมีขนาดเล็ก กระทัดรัด เพื่อเป็นการประหยัดสสารเคมี สามารถ
จ่นำไปใช้ในการทดลองในสถานที่ต่าง ๆ ได้สะดวก ปลอดภัย และชิ้นส่วนของเครื่องมือทดลองที่จะ
ใช้ในการทดลองทดลองทั้งสารเคมี จะต้องเก็บไว้ในหีบเครื่องมือทดลองได้อย่างเหมาะสม และพอดี

9. สภาพของเครื่องมือทดลอง และหีบเครื่องมือทดลองจะต้องมีความแข็งแรง มั่นคง และ
ทนต่อสภาพความเป็นกรดและด่างของ solvent และ solute

10. จะต้องมีสิ่งจำเป็นสำหรับการใช้หีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) รวมอยู่ใน Kit
ด้วย

จากหลักการโดยทั่วไป ไปในการสร้างหีบเครื่องมือทดลองดังกล่าวมาแล้ว ทำให้บริษัทผลิต
อุปกรณ์วิทยาศาสตร์สร้างหีบเครื่องมือทดลองขึ้นมาเป็นรายเป็นสินค้า และครูสอนวิชาวิทยาศาสตร์ก็ได้
พยายามสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ขึ้นมาเพื่อำเอาไปใช้ประกอบการเรียน
การสอนวิชาวิทยาศาสตร์สาขาต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสาขาวิชาเคมี

John Godfrey¹ แห่งมหาวิทยาลัย Rutgers ได้ออกแบบและสร้าง Molecular Model Kit ขึ้นในปี ค.ศ. 1962 เพื่อนำเอาไปสอนเรื่องโครงสร้างของโมเลกุลของสาร Kit ที่สร้างขึ้นนี้ใช้สำหรับอธิบายโครงสร้างของโมเลกุลของสารทั้งทางอินทรีย์เคมี (Organic chemistry) และทางอนินทรีย์เคมี (Inorganic chemistry) ขนาดและรูปร่างของอะตอมของธาตุต่าง ๆ นั้น กำหนดให้สอดคล้องกับ data ที่รวมเกี่ยวกับ atoms และ ions ทั้งนี้เพื่อที่จะทำให้มองเห็นการสามัคคีในการแสดงโมเลกุลของการสอดคล้องกับ evidence ที่ได้อากการทดลอง อะตอมของธาตุต่าง ๆ ทำด้วย plastic ที่เปราะแตกง่ายจนออกไป โดยการใช้อะตอมของธาตุต่าง ๆ นี้ ประกอบกันเป็นโมเลกุลของสาร ที่ใช้คือ หรือ polycethylene หรือ magnetic แทน bond ของอะตอมของธาตุต่าง ๆ นอกจากนั้น ยังให้สร้าง Molecular Model Kit ขึ้นโดยวิธีเดียวกัน แต่ใช้ไม้ทำเป็น Model ของ atoms และ ions แทนการใช้ plastic

Van Waters และ Rogers² ได้ออกแบบและจัดสร้าง Kymograph, Physiology Kit ขึ้น เพื่อนำเอาไปใช้ทดลองและศึกษาเกี่ยวกับสรีระของสัตว์ ประกอบการเรียนการสอนวิชาชีววิทยา ภายใน Kit ประกอบด้วยเครื่องมือทดลองทั้งหมด 23 ชิ้น และมีหนังสือคู่มือการใช้ Kit รวมอยู่ด้วย

Smith³ ได้ออกแบบและจัดสร้าง Blowpipe and Chemical Kit ขึ้น เพื่อนำเอาไปใช้ประกอบการเรียนการสอนเกี่ยวกับการ identify และการ analyse ธาตุต่าง ๆ โดยวิธี blowpipe test และใช้ในการทดลองสมบัติของโลหะต่าง ๆ โดยวิธี qualitative tests ภายใน Kit นี้ มี reagents อยู่ 29 ชนิด เครื่องมือที่จะใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 38 ชิ้น นอกจากนั้น ยังมีโลหะพวก rare metals, rare earth metals, common metals และหนังสือคู่มือในการใช้ Kit อีก 1 เล่ม รวมอยู่ใน Kit ด้วย

¹John Godfrey, Welch Laboratory Apparatus "Scientific Apparatus", p.67.

²Van Waters and Rogers, 1969 Educator's Catalog of Laboratory Apparatus and Chemical, p.114.

³Van Waters and Rogers, Catalog 69 Laboratory Apparatus, p.749.

Van Waters และ Rogers¹ ได้ออกแบบและจัดสร้าง Evaluation Kit for Thin-Layer Chromatography ขึ้น เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนเกี่ยวกับเทคนิคของ Thin-Layer Chromatography ภายใน Kit ประกอบด้วย chromato-sprayer ขวด silica gel.G., glass plate ขนาด 2" x 8" ขวดที่บรรจุ standard dye mixture, กระป๋องที่บรรจุ propellant absorbent, และเครื่องมืออื่น ๆ ที่จะใช้ในการทดลอง รวมทั้งคู่มือในการใช้ Kit ด้วย

Wentland² ได้ออกแบบและจัดสร้าง Atom Model Kit ขึ้น เพื่อใช้ในการนำไปสอนเรื่อง atom, molecule, isotope และ ions รวมทั้งในการสอนเรื่องโครงสร้างของ atom การจัดเรียง electron ใน orbit ต่าง ๆ ของ atom ของ 18 ธาตุแรกที่อยู่ในตารางธาตุ ภายใน Kit ประกอบด้วยวัสดุที่ใช้แทน electron 50 ชิ้น, proton 50 ชิ้น, neutron 70 ชิ้น, first-orbit ring 10 ชิ้น, second-orbit ring 6 ชิ้น, third-orbit ring 4 ชิ้น, connector 20 ชิ้น และมีหนังสือคู่มือการใช้ Kit อยู่ 1 เล่ม

Mallinckrodt³ ได้ออกแบบและจัดสร้าง Student TLC Kit, Chroma-Kit ขึ้น เพื่อใช้ในการทดลองและศึกษาเกี่ยวกับ Thin-Layer Chromatography ภายใน Kit บรรจุไว้ด้วย tape, aluminum plate holder, polypropylene solvent boat, micro-pipet ขนาด 5 ml. 5 อัน พร้อมด้วย rubber bulb, mixture ของ dye 3 ชนิด ที่ละลายอยู่ใน benzene 30 ml., glass stirring rod, glass plate ขนาด 8" x 8" ทั้งหมด 6 plates, Silic A.R., และหนังสือคู่มือที่แสดงถึงวิธีการใช้ Kit นี้ด้วย

Coring⁴ ได้ออกแบบสร้าง Organic Chemistry Kit ขึ้น เพื่อใช้ในการทดลองเกี่ยวกับ organic laboratory เครื่องมือทั้งหมดที่นำมาใช้นั้นจัดอยู่ในรูป semi-micro apparatus

¹-ibid. p.268.

²Wentland, Welch Laboratory Apparatus, p.319,

³Mallinckrodt, Catalog 9 Laboratory Apparatus and Chemicals, p.207.

⁴Coring, Curtin Scientific Apparatus and Chemicals, p.526.

สะดวกจะย้ายต่อการที่จะประกอบกันขึ้นเป็นเครื่องนี้ สำหรับทดลอง นอกจากนั้นก็ยังมีส่วน เกม และ คู่มือเกี่ยวกับการใช้เครื่องมือ การเก็บรักษาเครื่องมือที่ทำด้วยแก้ว รวมอยู่ใน Kit ควบ 1 เล่ม สำหรับตัว Kit นี้ ทำด้วยสารที่เรียกว่า polystyrene foam

Johnson และ Johnson¹ ได้สร้าง First air kit ขึ้น เพื่อนำเอาไปช่วยนักเรียน ประมาณ 50 คน ในห้องปฏิบัติการเคมี ในกรณีที่นักเรียนประสบอุบัติเหตุระหว่างทำการทดลอง ภายใน Kit มีสารเคมีต่าง ๆ วัสดุ และเครื่องมือที่จะใช้ในการปฐมพยาบาล นอกจากนั้นก็มีหนังสือคู่มือการใช้ Kit รวมอยู่ด้วย 1 เล่ม สำหรับตัว Kit ทำด้วยโลหะ

Alyea² แห่งมหาวิทยาลัย Princeton ได้ออกแบบการทดลอง และสร้างแบบเครื่องมือทดลองขึ้น เพื่อนำเอาไปใช้ในการทดลองประกอบการเรียนการสอนวิชาเคมี เกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี ต่าง ๆ ภายใน Kit บรรจุไว้ด้วย UNICELL ที่ทำด้วย plexiglass plastic นอกจากนั้นก็มีเครื่องมือ แก้ว ไม้ สารเคมีที่เป็นของแข็ง 32 ชนิด ของเหลว 28 ชนิด ส่วนที่ใช้ประกอบกับ Kit นี้ ก็มี หนังสือคู่มือครู หนังสือที่แสดงรูปภาพการทดลอง หนังสือแบบฝึกหัดสำหรับนักเรียน และยังมี overhead projector ที่สร้างขึ้นง่าย ๆ เพื่อฉายผลการใช้เครื่องมือใน Kit ขณะที่ทำการทดลองประกอบการเรียนการสอน แบบเครื่องมือทดลอง (Experimental Kit) ที่สร้างขึ้นนี้ใช้ในการทดลองได้หลายรอบการทดลอง

วาระงาน UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia³ เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง และจัดสร้างแบบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ขึ้นเมื่อ ปี ค.ศ. 1968 นั้น ภายใน Kit มีสารเคมีอยู่ 55 ชนิด และมีเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลอง 25 ชิ้น พร้อมด้วยคู่มือในการทดลองโดยใช้เครื่องมือใน Kit นี้รวมอยู่ด้วย สำหรับ Kit นี้ นำไปใช้ในการทดลองเกี่ยวกับเรื่องสมดุลเคมี (Chemical equilibria) ได้ทั้งหมด 20 การทดลอง

¹ Johnson & Johnson, Scientific Apparatus and Reagents, p.936.

² Hubert H. Alyea, J. Chem. Educ., 44, 335-342 (1967).

³ J. Zyka, Experiments on Chemical Equilibria, UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia, Bangkok, Thailand, 1968.

จากรายงานของ UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia¹ เกี่ยวกับการออกแบบการทดลอง และจัดสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental kit) ขึ้นเมื่อ ปี ค.ศ.1969 นั้น ภายใน Kit มีสารเคมีอยู่ 36 ชนิด และมีเครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลองอยู่ 25 ชิ้น เครื่องมือใช้ในการทดลองโดยใช้เครื่องมือใน Kit นี้รวมอยู่ด้วย สำหรับ Kit นำไปใช้ในการทดลองเกี่ยวกับเรื่องการเกิดสารประกอบ (Compound formation) ทั้งหมด 11 การทดลอง

Burns และ Rattenbury² ได้เสนอแนะการทำ calorimeter อย่างง่าย ๆ โดยวิธีการเอาจุกกอร์กว้างไว้ติดก้นในของ beaker ขนาด 1000 ml. แล้วเอา beaker ขนาด 600 ml. วางซ้อนข้างในอีกครึ่งหนึ่ง โดยให้ก้นของ beaker ขนาด 600 ml. ติดอยู่ที่จุกกอร์กว้าง และใช้แท่งแก้วที่งอปลายข้างหนึ่ง เป็นวงกลมเป็นเครื่องกวน (stirrer) วางไว้ใน beaker ขนาด 600 ml. ด้วย

Garin³ ได้เสนอแนะในการทำ calorimeter อย่างง่ายว่า ควรจะใช้ขวดที่ทำด้วยสารเคมีที่เรียกว่า polyethylene วางซ้อนกัน 2 ชั้น ระหว่างชั้นทั้ง 2 นั้น ให้บรรจุไว้ด้วยสารที่เป็นฉนวนความร้อน (Insulating material) แล้วทำฝาปิดให้สนิท และที่ฝานี้ให้เจาะรูไว้สำหรับเสียบเทอร์มอมิเตอร์ด้วย

2. เอกสารที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาพลังงาน (Energy)

เมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้นนั้น จะมีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้องกับเสมอ ซึ่งอาจจะเป็นพลังงานความร้อน พลังงานไฟฟ้า พลังงานแสง หรือพลังงานกล ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานนั้นสามารถเปลี่ยนจากอีกรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ ดังนั้นจึงมีผู้สนใจศึกษาเรื่องพลังงานที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างมากมายและกว้างขวาง แต่ในการศึกษากันทั่วๆไปนี้ ผู้เขียนจะทำการศึกษาค้นคว้าเฉพาะพลังงานความร้อน (Thermal or Heat energy) และพลังงานไฟฟ้า (Electrical energy)

¹J. Zyka, Experiments on Compound Formation, UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia, Bangkok, Thailand, 1969.

²D. Thorburn Burns and Evelyn Rattenbury, Introductory Practical Physical Chemistry, p.58.

³D.L. Garin, J.Chem. Educ., 45, 37 (1968).

อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีบางปฏิกิริยา เมื่อจะทำให้ใหญ่เรียนวิชาเคมีเกิดมโนภาพ (concept) โดยทั่ว ๆ ไปว่า พลังงานเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอย่างใดเท่านั้น ซึ่งมีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกันทั่วไป

ก. พลังงานความร้อน (Thermal or Heat Energy)

การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นอย่างหนึ่งเกี่ยวกับปฏิกิริยาเคมี ก็คือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (temperature) หรือจะพูดให้แน่ชัดลงไปอีกก็คือ การเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อน (Heat energy) นั้นเอง ซึ่งมีผู้ทำการศึกษากันมาไว้นานแล้ว

1. Heat of Neutralization

Kokes, Dorfman และ Mathia¹ ได้ทำการทดลองหาค่า heat of neutralization ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง sulfuric acid 1.0 M กับ sodium hydroxide 1.0 M และ potassium bicarbonate 1.0 M กับ sodium hydroxide 1.0 M โดยใช้ Dewar flask เป็น calorimeter จากการศึกษากันครั้งนี้ heat of neutralization ระหว่าง sulfuric acid 1.0 M กับ sodium hydroxide 1.0 M เท่ากับ $-14 \pm 0.7 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และระหว่าง potassium bicarbonate 1.0 M กับ sodium hydroxide 1.0 M เท่ากับ $-9.18 \pm 1.2 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Miller, Lowell และ Lucasso² ได้ทำการทดลองหาค่า heat of neutralization ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง acetic acid กับ sodium hydroxide ที่ 26°C และ 29.1°C โดยใช้ calorimeter จากการทดลองครั้งนี้พบว่า ค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้ ซึ่งทดลองที่ 26°C เท่ากับ $-12.65 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และที่ 29.1°C ที่ มีค่าเท่ากับ $-12.67 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

¹R.J. Kokes, M.K. Dorfman and T. Mathia, J. Chem. Educ., 39, 90 (1962).

²J.G. Miller, A.I. Lowell and W.W. Lucasso, J. Chem. Educ., 24, 121 (1947).

และได้ทำการศึกษาหาค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาระหว่าง acetic acid กับ ammonium solution ที่ 26.2°C และ 29.0°C จากการศึกษากครั้งนี้พบว่าค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยานี้ที่ 26.2°C และที่ 29.0°C เท่ากับ $-10.94 \text{ Kcal.mole}^{-1}$, $-11.40 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ

จากรายงานของ UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia¹ เกี่ยวกับค่า heat of neutralization ที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่าง pyridine 1.0 M กับ hydrochloric acid 1.0 M และปฏิกิริยาระหว่าง sodium hydroxide 0.5 M กับ oxalic acid โดยใช้ Thermokup เป็น calorimeter ได้มีค่าเท่ากับ $-4.9 \text{ Kcal.mole}^{-1}$, $-11.7 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ

Mahan² ได้ใช้ Ice calorimeter อย่างง่ายทดลองหาค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาระหว่าง magnesium oxide (s) กับ hydrochloric acid จากการศึกษากครั้งนี้ ได้ค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยานี้เท่ากับ $-17.0 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Schitzza, Eucken และ Namsch³ ได้ใช้ calorimeter ทดลองหาค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาระหว่าง ammonia solution กับ hydrofluoric acid จากการทดลองครั้งนี้ พบว่ามีค่าเท่ากับ $-15.23 \pm 0.07 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Ackermann⁴ ได้ทดลองเพื่อหาค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาระหว่าง sodium hydroxide กับ hydrochloric acid ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน โดยใช้ calorimeter จากการศึกษากครั้งนี้พบว่ามีค่าเท่ากับ $-13.68 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

¹G.H. Aylward, Compound Formation, UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching, In Asia, Bangkok, Thailand, Vol 2, 1-11 (1968).

²B.H. Mahan., J. Chem. Educ., 37, 635 (1960).

³H. Schitzza, M. Eucken and W. Namsch, Z. Anorg. U. Allgem. Chem., 292, 293-7 (1957).

⁴Th. Ackermann., Z. Elektrochem, 62, 411-19 (1958).

Papee, Canady และ Laidler¹ ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาระหว่าง sulfuric acid กับ sodium hydroxide และระหว่าง hydrochloric acid กับ sodium hydroxide ที่ 25°C โดยใช้ calorimeter ที่เขาออกแบบสร้างขึ้นเอง จากการศึกษากลับไปพบว่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาทั้งสองเท่ากัน $-13.52 \pm 0.06 \text{ Kcal.mole}^{-1}$, $-13.40 \pm 0.05 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ

Robert Juzo และ Wilhem Uphoff² ได้ทำการทดลองหาค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาระหว่าง lithium hydroxide กับ hydrosulfuric acid โดยใช้ calorimeter จากการศึกษากลับไปพบว่า heat of neutralization ของปฏิกิริยานี้เท่ากับ $-6.7 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

2. Heat of Hydration

Zen-ichi Shibata และ Yoshio Teresaki³ ได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า heat of hydration ของ barium chloride, BaCl_2 โดยใช้ calorimeter และ thermometer จากการศึกษากลับไปพบว่า heat of hydration ของ barium chloride เท่ากับ $-7,212 \pm 11 \text{ cal.mole}^{-1}$

Stone⁴ ได้ทำการทดลองหาค่า heat of hydration ของ copper sulfate, CuSO_4 , barium chloride, BaCl_2 และ calcium oxide, CaO จากการศึกษากลับไปว่า มีค่าเท่ากับ $-18,500 \text{ cal.mole}^{-1}$, $-7,000 \text{ cal.mole}^{-1}$ และ $-160,540 \text{ cal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ

¹H.M. Papee, W.J. Canady and K.J. Laidler, Can. J. Chem., 34, 1677-80 (1956).

²Robert Juzo, and Wilhem Uphoff, Z. anorg. u. allgem. Chem., 287, 113-19 (1956).

³Zen-ichi Shibata and Yoshio Terisaki, J. Chem. soc. Japan, 57, 1208-11 (1936).

⁴C.H. Stone, J. Chem. Educ., 4, 630 (1927).

Southard¹ ได้ทำการทดลองหาค่า heat of hydration ของ calcium sulfate, CaSO_4 , ใน form ต่าง ๆ กัน จากการศึกษารังนี้พบว่าในกรณี stable crystalline form ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) มีค่าเท่ากับ $-4,100 \pm 20 \text{ cal.mole}^{-1}$, ในกรณี metastable form ($\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$) มีค่าเท่ากับ $-4,600 \pm 20 \text{ cal.mole}^{-1}$ ในกรณี natural anhydrite form (CaSO_4) มีค่าเท่ากับ $-4,040 \pm 20 \text{ cal.mole}^{-1}$

Pattison, Miller และ Lucasse² ได้ทำการทดลองหาค่า heat of hydration ของ sodium acetate trihydrate ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) จากการศึกษารังนี้ พบว่า มีค่าเท่ากับ $-8.71 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

จากรายงานของ UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia³ เกี่ยวกับค่า heat of hydration ของ magnesium sulfate heptahydrate ซึ่งได้จากการทดลองโดยใช้ Dewar flask เล็ก ๆ ที่เรียกว่า thermokup เป็น calorimeter มีค่าเท่ากับ $-22.5 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

จากรายงานของ Teachers' Guide to Investigating Chemical System⁴ เกี่ยวกับค่า heat of hydration ของ magnesium sulfate heptahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งได้จากการทดลองโดยใช้ test tube เป็น calorimeter มีค่าเท่ากับ $-22.30 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

3. Heat of Precipitation

Clever⁵ ได้ทำการทดลองหาค่า heat of precipitation ของ silver chloride,

¹J.C.Southard, Ind. Eng. Chem., 32, 442-5 (1940).

²D.B.Pattison, J.G. Miller and W.W. Lucasse, J. Chem. Educ., 20, 319 (1943).

³G.H. Mylward, Compound Formation, UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia, Bangkok, Thailand, Vol.2, 2-24 (1968).

⁴H.A. Noidig, Teachers' Guide to Investigating Chemical System, p.27-5.

⁵H.L. Clever, J. Chem. Educ., 36, 45 (1961).

AgCl และ silver bromide, AgBr โดยให้ calorimeter อย่างง่าย ๆ ที่ทำจาก erlenmeyer flask, beaker และ thermometer ผลจากการทดลองพบว่า heat of precipitation ของ AgCl และ AgBr เท่ากับ $-15,300 \pm 700 \text{ cal. mole}^{-1}$, $-20,030 \pm 750 \text{ cal. mole}^{-1}$ ตามลำดับ

Muldrow และ Hepter¹ ได้ทำการทดลองหาค่า heat of precipitation ของ silver molybdate (Ag_2MoO_4) โดยให้ calorimeter จากการที่กรดรีนิกได้คายออกมาเท่ากับ $-15.6 \text{ Kcal. mole}^{-1}$

Yoshio Terasaki² ได้ทดลองหาค่า heat of precipitation ของ barium chromate (BaCrO_4) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย potassium chromate (K_2CrO_4) กับสารละลาย barium chloride (BaCl_2) พบว่าค่าเท่ากับ $-6.398 \pm 0.018 \text{ Kcal. mole}^{-1}$

และได้ทดลองหาค่า heat of precipitation ของ silver thiocyanate (AgCNS) พบว่าค่าเท่ากับ $-2.832 \pm 0.006 \text{ Kcal. mole}^{-1}$

Porreu³ ได้ทำการทดลองหาค่า heat of precipitation ของ barium sulfate (BaSO_4) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย potassium sulfate (K_2SO_4) กับสารละลาย barium chloride (BaCl_2) จากการทดลองพบว่าค่าเท่ากับ $-5.806 \pm 0.012 \text{ Kcal. mole}^{-1}$

จากรายงานของ UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia⁴ เกี่ยวกับค่า heat of precipitation ของ lead iodide (PbI_2) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย potassium iodide, KI กับสารละลาย lead nitrate, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ มีค่าเท่ากับ $-13.2 \text{ kcal. mole}^{-1}$

¹Jr. C. N. Muldrow and L.G. Hepter, J. m. Chem. Soc., 78, 5989-90 (1956).

²Yoshio Terasaki, Nippon Kagaku Zasshi, 78, 1774-7 (1957).

³Zen-ichi Shibata and Yoshio Terasaki, J. Chem. Soc. Japan, 57, 1208-11 (1936).

⁴J. Zyka, Compound Formation, UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia, Bangkok, Thailand, Vol.2, 2-52 (1968).

4. Heat of Displacement

Hilbourne¹ ได้ใช้ thermo bottle เป็น calorimeter ทดลองหาค่า heat of displacement ของปฏิกิริยาระหว่าง hydrochloric acid กับ magnesium, zinc, iron ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า heat of displacement ของปฏิกิริยา magnesium กับ hydrochloric acid, zinc กับ hydrochloric acid และ iron กับ hydrochloric acid นั้นมีค่าเท่ากับ $-108.30 \text{ Kcal.mole}^{-1}$, $-34.20 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และ $-3.20 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ

และจากการเอา magnesium ทำปฏิกิริยากับสารละลาย zinc chloride นั้นได้ค่า heat of displacement เท่ากับ $-74.00 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Mahan² ได้ใช้ Ice calorimeter อย่างง่ายทดลองหาค่า heat of displacement ของปฏิกิริยาระหว่าง magnesium กับ hydrochloric acid พบว่ามีค่าเท่ากับ $-107.00 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Charlesworth และ patch³ ได้ใช้ thermos flask ทดลองหาค่า heat of displacement ของปฏิกิริยาระหว่าง zinc กับเกลือของ copper พบว่ามีค่า heat of displacement เท่ากับ $-49.05 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of zinc

Clinton⁴ ได้ทำการทดลองหาค่า heat of displacement ของปฏิกิริยาระหว่าง zinc กับสารละลายเกลือเงิน และ copper กับสารละลายเกลือเงิน โดยใช้ thermos bottle เป็น calorimeter จากผลการทดลองพบว่ามีค่าเท่ากับ $-86.7 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of zinc, $-23.2 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of copper ตามลำดับ

¹E.W. Hilbourne, J. Chem. Educ., 5, 733 (1928).

²B.H. Mahan, J. Chem. Educ., 37, 634 (1960).

³M.E. Charlesworth and E.M. Patch, Sch. Sc. Rev., 13, 256 (1932).

⁴G. Clinton, J. Chem. Educ., 8, 683 (1931).

จากรายงานของ Teachers' Guide Investigating Chemical System¹ เกี่ยวกับ heat of displacement ที่ได้จากทดลองปฏิกิริยาระหว่าง zinc กับสารละลาย silver nitrate (AgNO_3) และ zinc กับสารละลาย copper sulfate (CuSO_4) เท่ากับ $-89.2 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of zinc, $-50.9 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of zinc ตามลำดับ

Charleworth และ Patch² ได้ใช้ Thermos flask เป็น calorimeter ในการศึกษา heat of displacement เมื่อเอา zinc ทำปฏิกิริยากับสารละลายของ copper sulfate (CuSO_4) ได้พบว่า heat of displacement ของปฏิกิริยานี้เท่ากับ $-50.110 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of zinc

5. Heat of Solution

Calvet³ ได้ใช้ calorimeter ทดลองหาค่า heat of solution เมื่อเอา sodium acetate trihydrate ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ที่เป่าแห้งละลายในน้ำ 200 ml. จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าเท่ากับ $+4.72 \pm 0.02 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Brodale และ GIAUQUE⁴ ได้ทดลองหาค่า heat of solution เมื่อเอา sodium sulfate decahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ละลายในน้ำ โดยใช้ calorimeter ที่ 25°C จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าเท่ากับ $+18.989 \pm 0.02 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Pattison, Miller และ Lucasse⁵ ได้ทำการศึกษาค่า heat of solution เมื่อเอา anhydrous sodium acetate (CH_3COONa) และ sodium acetate trihydrate ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) ละลายในน้ำ จากการศึกษาพบว่า heat of solution ในกรณี

¹H.A. Neidig, *op. cit.*, pp.29-4, 29-5.

²M.E. Charlesworth, and E.H. Patch, *J. Chem. Educ.*, 9, 1490 (1932).

³E. Calvet, *J. Chem. Phys.*, 30, 140-66 (1933).

⁴G. Brodale, W.F. GIAUQUE, *J. Am. Chem. Soc.*, 80, 2042-4 (1958).

⁵D.B. Pattison, J.G. Miller and W.W. Lucasse, *J. Chem. Educ.*, 20, 319 (1943).

anhydrous sodium acetate เท่ากับ $-3.86 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และไฮเดรต sodium acetate trihydrate มีค่าเท่ากับ $+4.85 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Zen-ichi Shibata และ Yoshio Terasaki¹ ได้ใช้ calorimeter ทดลองหาค่า heat of solution ของ potassium chloride ที่ละลายในน้ำ จากการทดลองครั้งนี้ พบว่ามีค่าเท่ากับ $+4.224 \pm 0.005 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Wendell และคณะ² ได้ทดลองหาค่า heat of solution ของ silver nitrate (AgNO_3) ที่ละลายในน้ำ จากการทดลองครั้งนี้พบว่า มีค่าเท่ากับ $+5.36 \pm 0.05 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Masamichi Kimura³ ได้ทำการศึกษาหาค่า heat of solution เมื่อเอา sodium sulfate decahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ละลายในน้ำ จากการศึกษานี้พบว่า มีค่าเท่ากับ $+17.15 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

Zimmernann และ Latimer⁴ ได้ทดลองหาค่า heat of solution เมื่อเอา sodium thiosulfate pentahydrate ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ละลายในน้ำ จากการศึกษานี้พบว่า มีค่าเท่ากับ $+11.17 \pm 0.1 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

ข. พลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy)

พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเคมีนั้น สามารถที่จะทดลองและศึกษาได้จากการวัด voltage ของ cell ไฟฟ้าที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งตามปกติแล้วจะศึกษาเรื่อง พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีในรูปของ Free energy change (ΔG) ของ system นั้น ๆ เพื่อที่จะนำเอาค่านี้ไปหาสมรรถนะทางปฏิกิริยาเคมี ซึ่งมีผู้ทำการศึกษากันทั่วไวกว่านี้

¹Zen-ichi Shibata, and Yoshio Terasaki, J. Chem. Soc. Japan, 57, 1208-11 (1936).

²Smith V. Wendell, Brown L.I. Oliver and Keneths, J. Am. Chem. Soc., 59, 1213-15 (1937).

³Masamichi Kimura, Sci. Paper Inst. Phys. Chem. Research (Tokyo), 18, 289-300 (1932).

⁴H.W. Zimmernann, and W.M. Latimer, J. Am. Chem. Soc., 61, 1554-5 (1939).

Gachic¹ ได้ทำการทดลองหาค่า cell potential โดยวัด voltage ของ cell ด้วย vacuum tube voltmeter และใช้สารละลาย sodium nitrate, NaNO_3 เป็น salt - bridge จากการทดลองวัดค่า voltage ของ cell ต่าง ๆ และได้อ่าน voltage ดังนี้

$\text{Zn}/\text{ZnSO}_4 1.0 \text{ M} // \text{SnSO}_4 1.0 \text{ M} / \text{Sn}$ ค่า voltage เท่ากับ 0.56 volt

$\text{Sn}/\text{SnSO}_4 1.0 \text{ M} // \text{CuSO}_4 1.0 \text{ M} / \text{Cu}$ ค่า voltage เท่ากับ 0.56 volt.

$\text{Zn}/\text{ZnSO}_4 1.0 \text{ M} // \text{CuSO}_4 1.0 \text{ M} / \text{Cu}$ ค่า voltage เท่ากับ 1.10 volt

$\text{Pb}/\text{PbSO}_4 1.0 \text{ M} // \text{CuSO}_4 1.0 \text{ M} / \text{Cu}$ ค่า voltage เท่ากับ 0.53 volt

Scarpa² ได้ทดลองหาค่า cell potential โดยการวัดค่า voltage ของ cell $\text{Zn}/\text{ZnSO}_4 // \text{CuSO}_4 / \text{Cu}$ ซึ่งพบว่าค่า voltage ของ cell นี้เท่ากับ 1.08 volts

Curse³ ได้ทดลองวัดค่า voltage ของ cell $\text{Ag}/\text{AgBr} // \text{H}_2 / \text{Pt}$ จากการทดลองพบว่าค่า voltage เท่ากับ 0.461 volt

Wickert⁴ ได้ทดลองวัดค่า voltage ของ cell $\text{Pt}/\text{H}_2 // \text{Hg}_2\text{Cl}_2 / \text{Hg}$ ซึ่งพบว่าค่าเท่ากับ 0.30 volts

Grube และ Rau⁵ ได้ทดลองวัดค่า electrode potential (voltage) ของ cell $\text{Pb}/\text{PbCl}_2(\text{fused}) // \text{AgCl}(\text{fused}) / \text{Ag}$ ซึ่งจากการทดลองปรากฏว่าในกรณีที่ไม่ใช่ glass layer ได้อ่าน voltage เท่ากับ 0.158 volt แต่เมื่อมี glass layer ได้อ่าน voltage เท่ากับ 0.311 volt

Baur และ Lattmann⁶ ได้ทำการทดลองวัดค่า electrode potential (voltage) ของ cell $\text{Bi}/\text{Bi}_2\text{O}_3 // \text{Bi}_2\text{O}_4 / \text{Ni}$ ซึ่งพบว่าค่าเท่ากับ 1.035 volts

¹L. Gachic, J. Chem. Educ., 38, 636 (1961).

²Oscar Scarpa, Atti III Congresso Naz Chim Pura Applicata 1930, pp.83-94.

³K. Curse, Z. Elektrochem, 46, 571 (1940).

⁴K. Wickert, Z. Elektrochem, 44, 410 (1938).

⁵G. Grube, E. Rau., Z. Elektrochem, 40, 325 (1934).

⁶Emil Baur and W. Lattmann, Z. Elektrochem, 40, 582-5 (1934).

Elliot และ Yost¹ ได้ทำการทดลองหาค่า voltage ของ cell $\text{Zn}/\text{ZnCl}_2//\text{TlCl}/\text{Tl}$ ซึ่งพบว่ามีความเท่ากับ 0.90 volt

Paco² ได้ทำการทดลองหาค่า voltage ของ cell $\text{Sn}/\text{SnSO}_4//\text{CuSO}_4/\text{Cu}$ และ cell $\text{Ag}/\text{AgNO}_3//\text{ZnSO}_4/\text{Zn}$ ซึ่งพบว่าค่า voltage ของ cell ทั้งสองนี้มีความเท่ากับ 0.214 volt . และ 0.35 volt ตามลำดับ

Gucker และ Van Atta³ ได้ทดลองหาค่า voltage ของ cell ต่าง ๆ โดยใช้ potentiometer และใช้สารละลาย 1% ของ agar กับ 1.0 N KNO_3 ที่บรรจุไว้ใน siphon tube เป็น salt bridge ซึ่งได้ค่า voltage ของ cell ต่าง ๆ ดังนี้

$\text{Cu}/\text{Cu}^{2+} 0.1 \text{ M} // \text{Ag}^+ 1.0 \text{ M} / \text{Ag}$ ค่า voltage เท่ากับ 0.46 volt

$\text{Ag}/\text{Ag}^+ 0.1 \text{ M} // \text{Ag}^+ 1.0 \text{ M} / \text{Ag}$ ค่า voltage เท่ากับ 0.06 volt

$\text{Ag}/\text{Ag}^+ 0.001 \text{ M} // \text{Ag}^+ 1.0 \text{ M} / \text{Ag}$ ค่า voltage เท่ากับ 0.17 volt

$\text{Ag}/\text{Ag}^+ 1.0 \text{ M} // \text{Ag}^+ 1.0 \text{ M} / \text{Ag}$ ค่า voltage เท่ากับ 0.00 volt

Neidig⁴ ได้เสนอค่า voltage ที่ได้จากการทดลอง cell $\text{Zn}/\text{Zn}(\text{NO}_3)_2//\text{AgNO}_3/\text{Ag}$ และ $\text{Zn}/\text{ZnSO}_4//\text{CuSO}_4/\text{Cu}$ โดยใช้ porous cup และ vacuum tube voltmeter ว่าเป็นค่า voltage เท่ากับ 1.57 volts และ 1.09 volts ตามลำดับ

Strong และ Stratton⁵ ได้เสนอแนะวิธีการและผลการทดลองในการหาค่า cell potential พร้อมทั้งวิธีการคำนวณหาค่า Free energy change (ΔG) ของ cell $\text{Zn}/\text{ZnSO}_4 1.0 \text{ M} // \text{CuSO}_4 1.0 \text{ M} / \text{Cu}$ โดยวิธีการ apply external potential

¹Norman Elliot and Don M. Yost, J. Am. Chem. Soc., 56, 1057-60 (1934).

²E. Paco, Gazz. Chim. ital., 60, 881-8 (1930).

³F.T. Gucker, and Floyd A., Van Atta, J. Chem. Educ., 8, 1157-65 (1931).

⁴H.A. Neidig, op. cit., pp.29-4, 29-5.

⁵Laurence E. Strong and Wilmer J. Stratton, Chemical Energy pp.72-73.

ส่วนทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่เกิดจาก cell ที่กำลังทดลอง แล้วนำค่า apply potential (volts) มา plot graph กับค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จาก ammeter ซึ่งพบว่า cell นี้มี voltage เท่ากับ 1.10 volts และคำนวณค่า free energy change (ΔG) ออกมาเท่ากับ $-50.7 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of zinc

Strong และ Strutton¹ ยังได้เสนอผลการทดลองของนักศึกษาแห่งวิทยาลัย Earlham ในการทดลองหาค่า voltage และค่า free energy change (ΔG) ของ $\text{Cu} - \text{CuSO}_4$ concentration ที่ 25°C ซึ่งผลการทดลองพบว่าค่า voltage ของ cell นี้จะเพิ่มขึ้น เมื่อผลทางของภาวะเข้มข้นของสารละลายทั้งสองเพิ่มขึ้น แต่ไม่ตรงกับค่าความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองเท่ากันแล้ว ถ้า voltage จะมีค่าเท่ากับศูนย์ (zero)

¹Ibid. pp. 78-79

บทที่ 3

การสร้าง Experimental Kit และวิธีดำเนินการทดลอง

ในการดำเนินการศึกษากันทั่วทั้งนี้ ผู้เขียนได้แบ่งออกเป็น 2 ตอนด้วยกัน คือ

1. การสร้าง Experimental Kit
2. การทดลองค่าค่า ดังข้างต้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี

1. การสร้าง Experimental Kit แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือ

1.1 การสร้าง Calorimeter สำหรับศึกษาพลังงานความร้อน

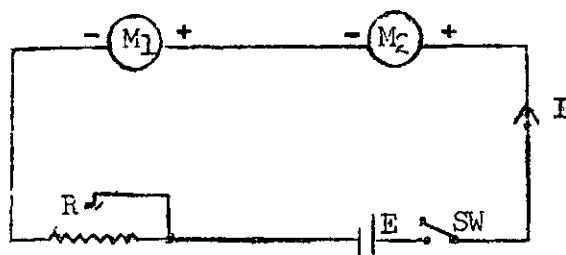
นำเอาชวกราว Latex ที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 5.7 cm. 2 ชวกร มาตัดส่วนบนของชวกรออก ให้เหลือส่วนสูงของชวกรแต่ละใบเท่ากับ 7.2 cm, เพื่อนำเอาไปทำเป็น calorimeter A และ calorimeter B แล้วกัดแผ่น styrofoam ที่มีขนาดเท่ากับ 2.4 cm. ให้เป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 9.5 x 9.5 cm. ทั้งหมด 4 แผ่น แล้วเจาะรูตรงกลางของแผ่น styrofoam 2 แผ่น ให้ทะลุเป็นรูวงกลม ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของชวกร Latex ที่นำมาใช้เป็น calorimeter โดยใช้ beaker ขนาด 100,0 ml. ที่เผาไฟให้ร้อน แล้วค่อย ๆ วางลงตรงกลางของแผ่น styrofoam ที่ละแผ่นทั้ง 2 แผ่น ซึ่งจะทำให้ได้แผ่น styrofoam ที่มีรูเป็นรูวงกลมตรงกลางขนาดเท่ากับชวกร Latex หักดี แล้วนำแผ่น styrofoam อีกแผ่นหนึ่งมาเจาะเป็นหลุมตรงกลางให้ลึกประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาของแผ่น styrofoam นั้น โดยใช้ beaker อันเดิม ซึ่งเผาไฟให้ร้อนแล้ว แล้วใช้แผ่น styrofoam ทั้ง 3 แผ่นนี้ วางซ้อนกันโดยใช้ชวกร Latex ทิ่มให้แผ่น styrofoam เหล่านี้ยึดกันแน่นสนิท โดยให้รูและหลุมที่เจาะไว้ ตรงกันทั้ง 3 แผ่น หลังจากทำแล้วก็นำเอาชวกร Latex ที่ใช้ทำเป็น calorimeter ใส่ลงไป ซึ่งจะทำให้ส่วนปากของชวกรโผล่ขึ้นมาเหนือพื้นผิวหน้าของแผ่น styrofoam ที่อยู่ชั้นบนสุด เท่ากับ 1.5 cm. หลังจากนั้นนำเอาแผ่น styrofoam ที่เหลือมาเจาะเป็นรูวงกลมตามแนวขอบปากของ calorimeter โดยใช้กรวยเจาะนี้เล็กเท่ากับส่วนปากของ calorimeter ที่โผล่ขึ้นมาพอดี แล้วใช้แผ่นปิด calorimeter สำหรับ calorimeter A ที่ฝาปิดนี้เจาะรูไว้ตรงกลางหนึ่งรู เพื่อเอาไว้เสียบเทอร์โมมิเตอร์ ส่วน calorimeter B เจาะรูอีกรูหนึ่ง ข้างรูที่ใช้สำหรับเสียบเทอร์โมมิเตอร์ เพื่อเอาไว้เสียบแท่งแก้วที่ใช้เป็น stirrer ทั้งรูที่ใช้สำหรับเสียบเทอร์โมมิเตอร์

และเสียง stirrer จะต้องมีขนาดเท่ากับเทอร์โมมิเตอร์ และ stirrer ที่ใช้พอดี (รูปของ calorimeter A และ B แสดงไว้หน้า 34)

1.2 การสร้างเครื่องมือสำหรับใช้ศึกษาพลังงานไฟฟ้า

ใช้ D.C. voltmeter 2 เครื่อง ของบริษัท Hiaki ซึ่งแต่ละเครื่องมีขนาด 5×5 cm. เครื่องหนึ่งมี scale ระหว่าง 0-3 volts และอีกเครื่องหนึ่งมี scale ระหว่าง 0-10 volts สำหรับ voltmeter เครื่องที่มี scale ระหว่าง 0-10 volts ใช้ทำเป็น ammeter โดยเอา series resistor ซึ่งต่อยูกับใน voltmeter นั้นออก แล้วนำ voltmeter นี้ไปเทียบ scale กับ multimeter ของ Simpson โดยนำเอาไปต่อแบบอนุกรมกับ multimeter ในวงจรไฟฟ้าซึ่งปรับค่ากระแสได้ (ถึงวงจรรูปที่ 1 หน้า 27) แล้วนำเอา meter ทั้งสองที่ต่อดูกรมกันแล้วนี้ไปต่อดูกรมกับ ถ่านไฟฉาย 1.5 v. 1 ก้อน และ variable resistor (volume control) 50,000 ohms (5K) ซึ่งใช้แทน rheostat เพื่อควบคุมกระแสจเรียบร้อยแล้ว หมุนปุ่มของ multimeter ไว้ที่ค่า 2.5 mA และปรับ variable resistor ไว้ที่ค่าสูงสุด หลังจากนั้นก็ปิด switch ปล่อยให้กระแสไหลในวงจร และคอย ๆ ปรับ variable resistor เพื่อเทียบ scale ของ meter ทั้งสอง ซึ่งในทุกขณะ meter ทั้งสองนี้จะอ่านค่ากระแสตรงกัน จากการที่ปรับค่ากระแสได้ใน meter ทั้งสองนี้โดยตรงกันหลาย ๆ ครั้งก็ ก็สามารถจะแบ่ง scale ของ ammeter ที่คัดแปลงมาจาก voltmeter นี้ได้ ซึ่งจากการเทียบและแบ่ง scale โดยวิธีนี้จะได้อmmeter อันใหม่ที่มี scale ระหว่าง 0-1.0 mA.

รูปที่ 1 แสดงการควบคุมกระแสในการเทียบ scale ของ ammeter



M_1 = unknown ammeter

M_2 = multimeter

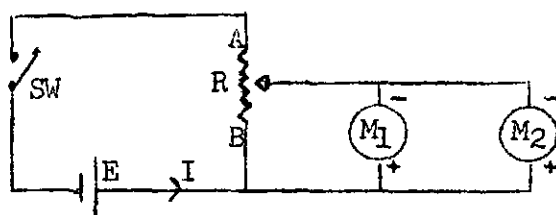
R = variable resistor, 5 K

E = dry cell, 1.5 V.

SW = switch, ON - OFF

สำหรับ voltmeter ที่มี scale ระหว่าง 0-3.0 volt นั้น ใช้ทำเป็น voltmeter โดยตรงอย่างถ่องแท้ และอีกอย่างหนึ่งใช้เป็น voltmeter ที่มี scale ระหว่าง 0.0-0.1 volt. ซึ่งในการแบ่ง scale ให้ละเอียดขึ้นนี้ โดยเอาตัวความต้านทานที่ต่ออนุกรมไว้ก่อนเสียก่อน แล้วนำไปเทียบ scale กับ multimeter ของ Simpson โดยนำเอา voltmeter ที่ต้องการแบ่ง scale ไปต่อขนานกับ multimeter ที่ต่อक्रमอนุน variable resistor, 25 ohms ซึ่งใช้แทน potentiometer แล้วนำไปต่ออนุกรมกับถ่านไฟฉาย 1.5 v. 1 ก้อน และ switch (ดังรูปที่ 2) หลังจากนั้นก็หมุนปุ่ม multimeter มาไว้ที่ตำแหน่ง 0.05 volt และหมุน variable resistor มาไว้ที่ค่าต่ำสุด (ที่จุด B) แล้วปิด switch ปล่อยให้กระแสไฟไหลในวงจร ซึ่งขณะนั้นเข็มของ meter ทั้งสองจะอยู่ที่ศูนย์ (zero) แล้วจึงกดยหมุน variable resistor ไปทางค่ามาก (ไปทาง A) โดยวิธีนี้ก็สามารถแบ่ง scale ของ voltmeter ใหม่ ตามค่า voltage ที่อ่านได้จาก multimeter แต่ละครั้ง ซึ่งจากการเทียบและแบ่ง scale ครั้งนี้ จะได้ voltmeter 2 scale คือ scale ระหว่าง 0-3.0 v. และ scale ระหว่าง 0.0-0.10 v. ซึ่งเขียนค่า scale นี้ไว้ข้างใต้ scale แรก เพื่อใช้วัดค่า voltage ของ cell ที่มีค่า voltage ค่า ๆ ในการทดลอง

รูปที่ 2 แสดงการต่อวงจรในการเทียบ scale ของ voltmeter



M_1 = unknown voltmeter

M_2 = multimeter

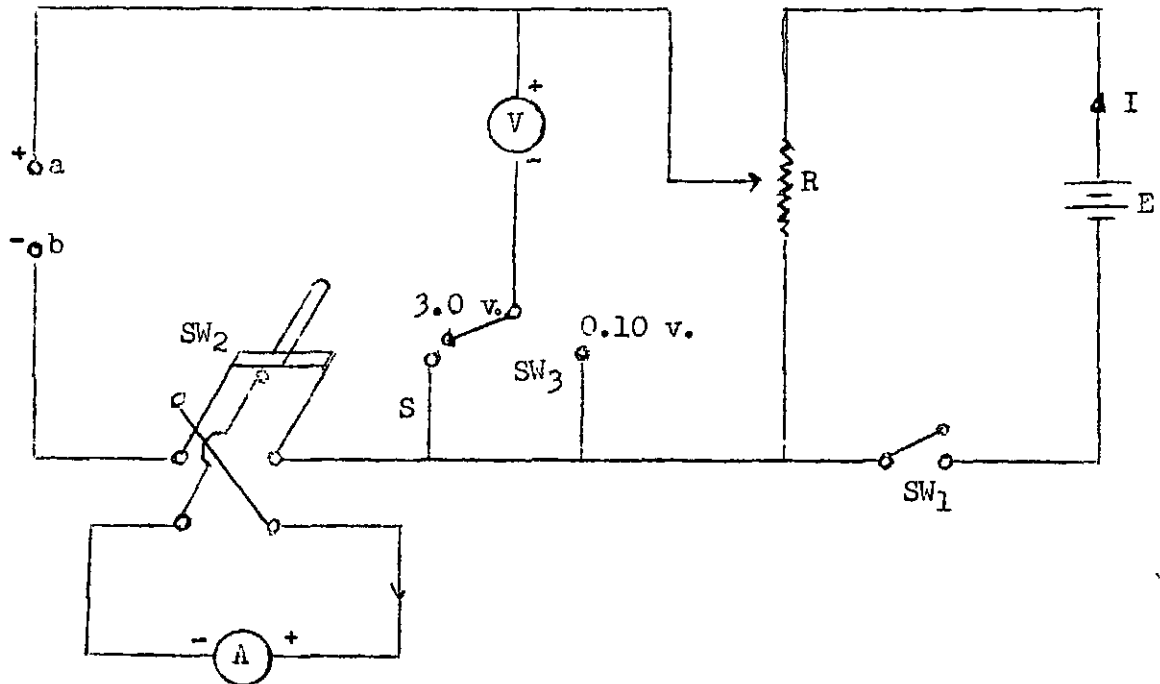
R = variable resistor, 25 ohms

E = dry cell, 1.5 v.

SW = switch, ON-OFF

แล้วนำเอาทั้ง voltmeter และ ammeter ที่ได้เทียบและแบ่ง scale ไว้เรียบร้อยแล้วนี้ ไปต่อเป็นเครื่องมืออย่างสมบูรณ์ตามวงจรที่แสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยใช้สายไฟขนาดเล็ก และอ่อนเป็น ตัวเชื่อมในวงจร ดังนี้

รูปที่ 3 แสดงการต่อวงจรในเครื่องวัดสำหรับศึกษาพลังงานไฟฟ้า



A = ammeter, 0-1.0 mA.

V = voltmeter, 0-3 v., 0-0.1 v.

S = series resistor (ความต้านทาน
ก่อดำเนิน)

R = variable resistor, 25 ohms

E = dry cell, 3.0 v.

I = current

SW_1 = switch แบบ ON-OFF

SW_2 = switch เลื่อน ใช้เป็น reversing
key

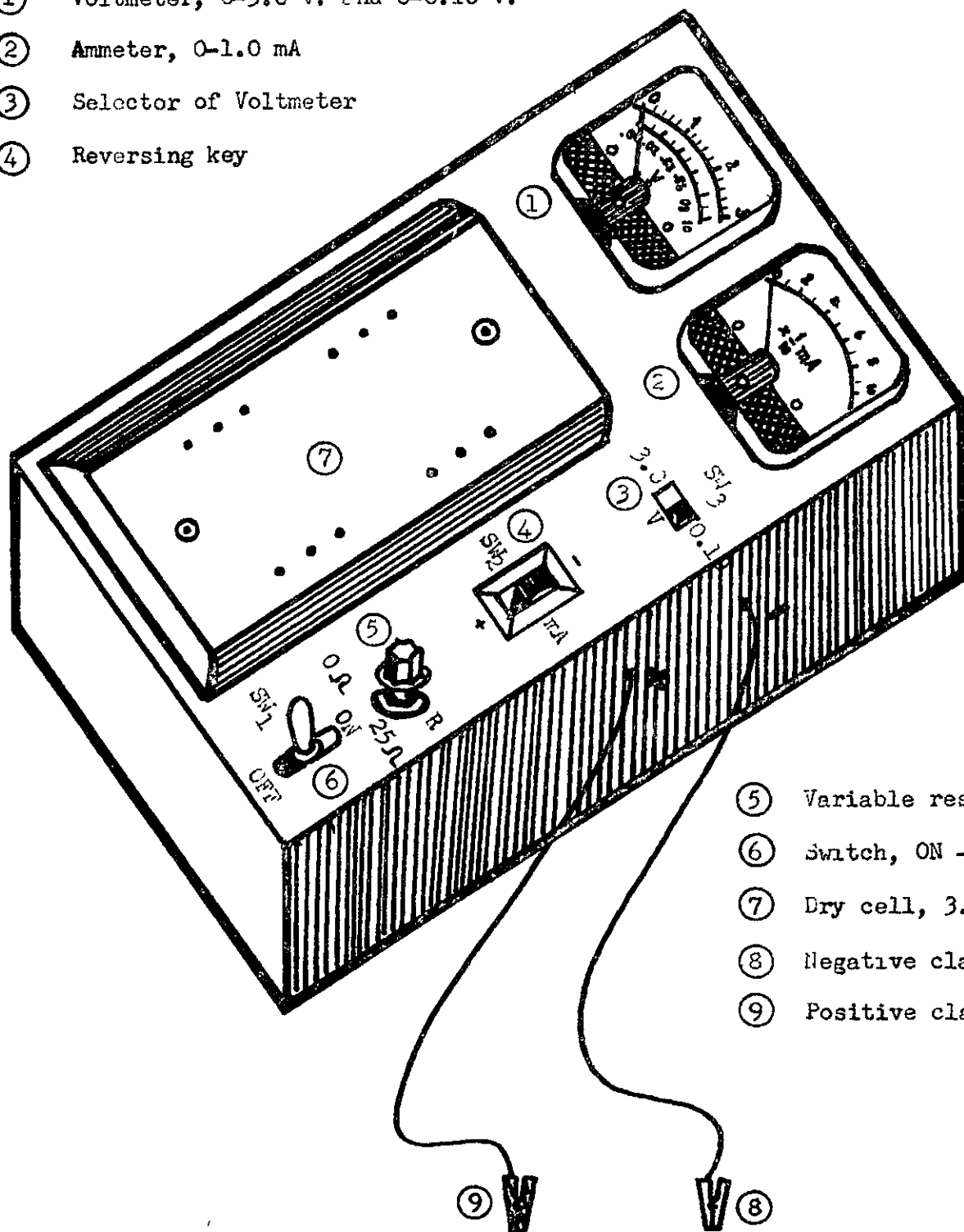
SW_3 = switch เลื่อน ใช้เป็น selector
ของ voltmeter

a = ปากกิม ขั้วบวก

b = ปากคิม ขั้วลบ

รูปที่ 4 รูปเครื่องมือที่ใช้วัดค่า Voltage
 724 Electrochemical cell

- ① Voltmeter, 0-3.0 v. and 0-0.10 v.
- ② Ammeter, 0-1.0 mA
- ③ Selector of Voltmeter
- ④ Reversing key



- ⑤ Variable resistor, 0-25 ohms
- ⑥ Switch, ON - OFF
- ⑦ Dry cell, 3.0 v.
- ⑧ Negative clamp
- ⑨ Positive clamp

Dry cell ที่ใช้คือถ่านไฟฉาย 1.5 v. ทั้งหมด 4 ก้อน โดยนำเอาถ่านไฟฉาย 2 ก้อน มาต่อแบบอนุกรมชุดหนึ่ง และอีกชุดหนึ่งก็ต่อแบบอนุกรมอีก 2 ก้อน แล้วเอาทั้งสองชุดมาต่อกันแบบ ขนานอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งบรรจุอยู่ในรังถ่านขนาด 4 ก้อน ซึ่งได้จากการนำเอารังถ่านที่จุ ได้ 6 ก้อน มาตัดออกให้เหลือขนาดตามที่ต้องการดังกล่าว

เมื่อตรวจสอบวงจรของเครื่องมือเรียบร้อยแล้ว ก็นำเอาไปบรรจุในกล่องที่ทำด้วยไม้ ซึ่งมีขนาด 13 x 21 x 4 cm. อีกครั้งหนึ่ง เพื่อสะดวกแก่การนำเอาไปใช้ แล้วนำเอาเครื่องมือนี้ไปใช้วัด หาค่า voltage ของ cell ที่ใช้ในการทดลองต่อไป ดังรูปในหน้า 30

นอกจาก calorimeter และเครื่องมือสำหรับวัดค่า voltage ของ cell ดังกล่าวมาแล้ว ยังมีสารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองอีกหลายอย่างที่รวมอยู่ใน Experimental kit ซึ่งแบ่ง ออกได้ดังนี้

1. สารเคมี (Chemical reagents) ซึ่งแบ่งออกเป็นประเภทต่าง ๆ ดังต่อไปนี้
 1. ประเภทกรด (Acids)
 1. Sulfuric acid
 2. Hydrochloric acid
 3. Nitric acid
 4. Acetic acid
 2. ประเภทเบส (Bases)
 1. Sodium hydroxide
 2. Potassium hydroxide
 3. ammonia solution
 5. ประเภทเกลือ (Salts)
 1. Barium chloride dihydrate, $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
 2. Magnesium sulfate heptahydrate, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
 3. Copper sulfate pentahydrate, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
 4. Sodium acetate decahydrate, $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
3. ประเภทแผ่นโลหะ (Metal strips)
 1. Copper, 1 x 8 cm.
 2. Zinc, 1 x 8 cm.
 3. Silver, 1 x 8 cm.
 4. Lead, 1 x 8 cm.
4. ประเภท Indicator solutions
 1. Phenolphthalein
 2. Bromothymol blue
 3. Methyl red

5. Sodium sulfate decahydrate, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
 6. Sodium carbonate decahydrate, $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
 7. Potassium bicarbonate, KHCO_3
 8. Sodium acetate, CH_3COONa
 9. Sodium carbonate, Na_2CO_3
 10. Sodium sulfate, Na_2SO_4
 11. Potassium iodide, KI
 12. Lead nitrate, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
 13. Potassium chromate, K_2CrO_4
 14. Silver nitrate, AgNO_3
 15. Zinc sulfate heptahydrate, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
 16. Potassium nitrate, KNO_3
 17. Mercury (II) chloride, HgCl_2
 18. Zinc nitrate hexahydrate, $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
 19. Copper nitrate trihydrate, $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
6. ประเภทเบ็ดเตล็ด (Miscellaneous)
1. Methyl alcohol
 2. Steel-wool
 3. Zinc dust
 4. Copper powder
 5. Agar powder

2. เครื่องมือทดลอง (Apparatus)
1. Measuring cylinder, 10 ml., 100 ml.
 2. Funnel
 3. Filter paper, Whatman No.1, 11 cm. diam.
 4. Droppers (Semi micro)

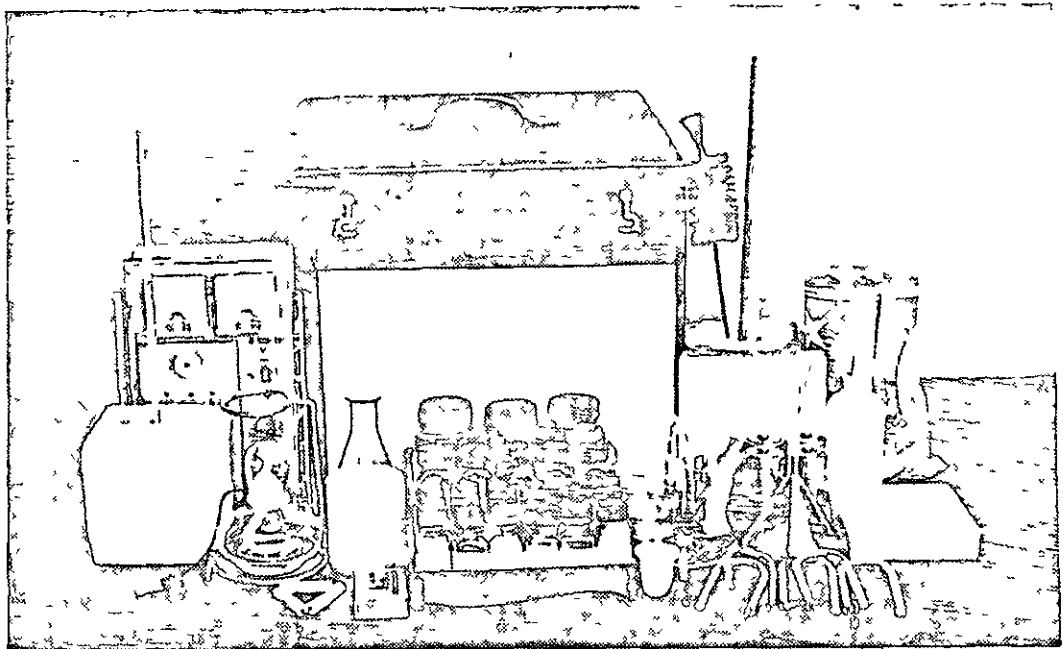
5. Clay triangle
6. Brushes
7. Conical flask, 150 ml.
8. Watch glass, 6 cm. diam.
9. Crucible and lid
10. Beakers, 50 ml., 100 ml.
11. Reagent bottles for solid chemicals.
12. U - tube, 0.5 cm. diam.
13. Match box
14. Stand
15. Reagent bottles for solution, 50 ml. capacity.
16. Wash bottle (plastic) 100 ml.
17. Voltmeter
18. Spirit lamp
19. Lid of calorimeter A and Thermometer, 0-50°C
20. Lid of calorimeter B, Thermometer, 0-50°C and Stirrer
21. Calorimeter
22. Spatula
23. Stirrer (glass) 10 cm. long.

FIG 5

APPARATUS



รูปที่ 6 แสดง Experimental Kit ขนาดของ Kit
เท่ากับ 29.0 x 29.0 ซม.



2. การทดลองหาค่าพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี

ผู้เขียนได้ทำการทดลองหาค่าพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมีอยู่ 2 อย่างคือ

1. พลังงานความร้อน (Thermal or Heat energy)

2. พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy)

1. พลังงานความร้อน (Thermal or Heat Energy)

ในการทดลองหาค่าพลังงานความร้อนอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี ผู้เขียนแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือ

1.1 การหาค่า Calorimeter Constant

1.2 การทดลองหาค่าพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาเคมี

1.1 การทดลองหาค่า Calorimeter Constant

หาค่า calorimeter constant ของ calorimeter Δ โดยการนำเอาชวดกาวที่ใช้ทำ calorimeter Δ ไปชั่งน้ำหนักที่แม่นยำด้วยตาชั่ง mettler ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.05 g. แล้วเอาไปใส่ลงในหลุมของแผ่น styrofoam ที่เตรียมไว้ หลังจากนั้นใช้กระบอกตวง (measuring cylinder) ขนาด 100.0 ml. ตวงเอาน้ำกลั่นที่อุณหภูมิของห้องมา 50.0 ml. และเทลงไปใน beaker ขนาด 100.0 ml. ที่สะอาดและทราบน้ำหนักแล้ว นำเอา beaker ที่ใส่น้ำเป็นไปชั่งน้ำหนัก เทน้ำเป็นที่อุณหภูมิห้องลงใน calorimeter Δ ที่เตรียมไว้แล้ว เอาผ้า calorimeter Δ ที่บีเทอร์โมมิเตอร์ขนาด 0-50°C และอ่านอุณหภูมิได้ละเอียดถึง 0.2°C มาปิด calorimeter Δ พร้อมกันวัดอุณหภูมิของน้ำเป็น กวดยเทอร์โมมิเตอร์นี้ โดยอ่านอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาน้ำร้อนที่มีอุณหภูมิประมาณ 50°C มา 50.0 ml. เทลงใน beaker ขนาด 100.0 ml. ที่สะอาดและทราบน้ำหนัก แล้วนำเอา beaker ที่ใส่น้ำร้อนนี้ ไปชั่งน้ำหนัก หลังจากนั้นก็วัดอุณหภูมิของน้ำใน beaker นี้ กวดยเทอร์โมมิเตอร์ อันเดิมที่เช็ดให้สะอาดและปล่อยให้แห้งแล้ว โดยอ่านอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที นำเอาเทอร์โมมิเตอร์มาเช็ดให้แห้งอย่างรวดเร็ว พร้อมกับเทน้ำร้อนใน beaker ลงไปใน

calorimeter Δ และวัดอุณหภูมิของน้ำที่ผสมกัน ทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 8 นาที หลังจากนั้น เอาเทอร์โมมิเตอร์ออกมาเช็ดให้แห้ง และนำเอาขวดที่ใช้เป็น calorimeter Δ ซึ่งมีของผสมไปชั่ง น้ำหนัก

นำเอาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปทุก ๆ 30 วินาที ของน้ำเย็น ค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ทุก ๆ 30 วินาทีของน้ำร้อน และอุณหภูมิผสม ไป plot graph เพื่อหาอุณหภูมิก่อนผสมของน้ำเย็น น้ำร้อน และอุณหภูมิผสม หลังจากนั้นนำเอาค่า อุณหภูมิก่อนผสมของน้ำเย็น อุณหภูมิผสมก่อนผสมของ น้ำร้อน อุณหภูมิผสม น้ำหนักของน้ำเย็น น้ำหนักของน้ำร้อน และน้ำหนักของของผสม ไปคำนวณ หาค่า calorimeter constant หรือความจุความร้อนของ calorimeter Δ ต่อไป ซึ่งจากการ ทดลองหาค่า calorimeter constant ของ calorimeter Δ โดยวิธีทั้งหมด 8 ครั้ง แล้วหา ค่าเฉลี่ยออกมา , ปรากฏว่า calorimeter Δ มีค่า calorimeter constant เท่ากับ $11.2 \pm 0.8 \text{ cal.deg}^{-1}$

สำหรับ calorimeter B นั้นก็หาค่า calorimeter constant เช่นเดียวกัน แต่หาค่า calorimeter constant ไว้หลาย ๆ ค่า แล้วนำเอาค่า calorimeter constant ไป plot graph กับค่าอุณหภูมิของน้ำเย็นที่เริ่มขึ้น ทุก ๆ ครั้งที่ทำการทดลองและเอาค่า calorimeter constant ไป plot graph กับค่าอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ลดลงทุกครั้งที่ได้ทดลอง ดังแสดงใน graph หน้า 187-189 (ภาคผนวก ง.)

1.2 การทดลองหาค่า Heat of Neutralization

ใช้ calorimeter Δ ที่มีค่า calorimeter constant เท่ากับ $11.2 \pm 0.8 \text{ cal.deg}^{-1}$ ทดลองหาค่า heat of neutralization ใน system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. Sodium hydroxide, 1.0 M (NaOH(aq.) , 1.0 M)
Sulfuric acid, 0.5 M ($\text{H}_2\text{SO}_4\text{(aq.)}$, 0.5 M)
2. Sodium hydroxide, 0.5 M (NaOH(aq.) , 0.5 M)
Hydrochloric acid, 0.5 M (HCl(aq.) , 0.5 M)
3. Sodium hydroxide, 0.5 M (NaOH(aq.) , 0.5 M)
Nitric acid, 0.5 M ($\text{HNO}_3\text{(aq.)}$, 0.5 M)

4. Potassium hydroxide, 0.5 M. (KOH(aq.) , 0.5 M) กับ
Hydrochloric acid, 0.5 M (HCl(aq.) , 0.5 M)
5. Sodium hydroxide, 1.0 M (NaOH(aq.) , 1.0 M) กับ
Acetic acid, 1.0 M ($\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}$, 1.0 M)
6. Sodium hydroxide, 1.0 M (NaOH(aq.) , 1.0 M) กับ
Potassium bicarbonate, 1.0 M. ($\text{KHCO}_3\text{(aq.)}$, 1.0 M)
7. Ammonia solution, 1.0 M ($\text{NH}_3\text{(aq.)}$, 1.0 M) กับ
Acetic acid, 1.0 M ($\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}$, 1.0 M)
8. Ammonia solution, 0.5 M ($\text{NH}_3\text{(aq.)}$, 0.5 M) กับ
Hydrochloric acid, 0.5 M (HCl(aq.) , 0.5 M)

การทดลองในแต่ละ system นี้ ใช้วิธีการทดลองเหมือนกันหมด คือใช้กระบอกตวง

(measuring cylinder) ขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลายของเบสมา 50.0 ml. เทใส่ลงไปใน calorimeter แล้ววัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนของสารละลายนี้ โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที เอาเทอร์โมมิเตอร์ออกมาล้าง และเช็ดให้แห้งแล้วปล่อยไว้ที่อุณหภูมิห้อง หลังจากนั้นก็ตวงเอาสารละลายของกรดมา 50.0 ml. เทใส่ใน beaker ขนาด 100.0 ml. แล้ววัดอุณหภูมิของสารละลายนี้ โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที เมื่อวัดอุณหภูมิของกรดเสร็จแล้วนำเอาเทอร์โมมิเตอร์ไปล้าง และเช็ดให้สะอาดแล้วเทสารละลายของกรดลงไปผสมกับสารละลายของเบสที่อยู่ใน calorimeter พร้อมกับวัดอุณหภูมิของของผสมทันที โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 8 นาที

เมื่อวัดอุณหภูมิของของผสมเสร็จแล้ว ก็นำเอาของผสมใน calorimeter นี้ไปชั่งน้ำหนัก และนำเอาการอุณหภูมิที่อ่านได้ทั้งหมดไป plot graph หาอุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายของเบส ของกรดและอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดของของผสม แล้วนำผลเหล่านี้ไปคำนวณหาค่า heat of neutralization ของแต่ละ system ต่อไป ซึ่งแต่ละ system ทำการทดลองซ้ำ 8 ครั้ง แล้วเฉลี่ยผลของการทดลองหาค่า heat of neutralization ออกมาได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 หน้า 39

ตารางที่ 1 แสดงค่า Heat of Neutralization (ΔH)

System	$-\Delta H$ (Kcal.mole ⁻¹)
NaOH(aq.), 1.0 M - H ₂ SO ₄ (aq.), 0.5 M	14.29±0.11
NaOH(aq.), 0.5 M. - HCl(aq.), 0.5 M	13.69±0.33
NaOH(aq.), 0.5 M - HNO ₃ (aq.), 0.5 M	13.59±0.36
KOH(aq.), 0.5 M - HCl(aq.), 0.5 M	13.34±0.25
NaOH(aq.), 1.0 M - CH ₃ COOH(aq.), 1.0 M	13.23±0.18
NaOH(aq.), 1.0 M - KHCO ₃ (aq.), 1.0 M	9.88±0.14
NH ₃ (aq.), 1.0 M - CH ₃ COOH(aq.), 1.0 M	12.68±0.11
NH ₃ (aq.), 0.5 M - HCl(aq.), 0.5 M	12.39±0.19

1.3 การทดลองหาค่า Heat of Solution and Hydration

1.3.1 Heat of Solution

ใช้ calorimeter B หาค่า calorimeter constant ไว้แล้ว โดยการ plot graph ที่แสดงไว้หน้า 188 ทดลองหาค่า heat of solutions ของ system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. Hydrated salts วัสดุต่าง ๆ ดังนี้

1. Barium chloride dihydrate (BaCl₂·2H₂O)
2. Magnesium sulfate heptahydrate (MgSO₄·7H₂O)
3. Copper sulfate pentahydrate (CuSO₄·5H₂O)
4. Sodium acetate decahydrate (CH₃COONa·10H₂O)
5. Sodium sulfate decahydrate (Na₂SO₄·10H₂O)
6. Sodium carbonate decahydrate (Na₂CO₃·10H₂O)

2. anhydrous salts ใช้สารต่าง ๆ ดังนี้

1. Barium chloride (BaCl_2)
2. Magnesium sulfate (MgSO_4)
3. Copper sulfate (CuSO_4)
4. Sodium acetate (CH_3COONa)
5. Sodium sulfate (Na_2SO_4)
6. Sodium carbonate (Na_2CO_3)

วิธีทดลองหาค่า heat of solution ของสารพวก hydrated salts นั้นใช้วิธีการเดียวกันหมด คือใช้กระบอกตวง (measuring cylinder) ขนาด 100.0 ml. ตวงเอาน้ำกลั่นมา 100.0 ml. แล้วเทใส่ใน calorimeter B พร้อมกับวัดอุณหภูมิของน้ำที่เปลี่ยนไป โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นก็เทสาร hydrated salt 5.0 g. ลงไปในน้ำที่อยู่ใน calorimeter อย่างรวดเร็ว พร้อมกับวัดอุณหภูมิของสารละลายนี้ที่เปลี่ยนไป โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 8 นาที ขณะที่วัดอุณหภูมิใช้ stirrer ที่ติดอยู่กับฝาปิด calorimeter B. นี้ คอย ๆ คนสารละลายอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา เมื่อวัดอุณหภูมิเสร็จแล้ว นำสารละลายพร้อมกับ calorimeter ไปตั้งหาน้ำหนักของสารละลาย (solution) หมดไป ในแต่ละ system ทำการทดลองซ้ำ 8 ครั้ง แล้วนำเอากาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด ของการทดลองแต่ละครั้งใน system หนึ่ง ๆ ไปคำนวณหาค่า heat of solution ของแต่ละครั้ง แล้วจึงหาค่าเฉลี่ยของการทดลองทั้ง 8 ครั้ง

วิธีการทดลองหาค่า heat of solution ของสารพวก anhydrous salts แบ่งออกเป็น 2 พวก คือ

1. ใช้ hydrated salt งามาเผาไฟ เพื่อให้ได้ anhydrous salts ตามต้องการ ซึ่งสืบมาเกี่ยวกับสารต่อไปนี้

Barium chloride dihydrate ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

Magnesium sulfate heptahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

Copper sulfate pentahydrate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

บดสารทั้ง 3 นี้ ให้ละเอียดและชั่งมาสารละ 5.0 g. แล้วนำสารเหล่านี้ใส่ใน crucible ใบละสาร หลังจากนั้นก็เผาสารทั้ง 3 นี้ที่สารด้วยตะเกียง alcohol จนน้ำหนักแต่ละสารมีน้ำหนักคงที่ แล้วนำแต่ละสารไปหาค่า heat of solution ตามวิธีการเกี่ยวกับการหาค่า heat of solutions ของพวก hydrated salts ที่กล่าวไว้ในหน้า 40

2. ใช้ anhydrous salts โดยตรงที่ได้จากขวดสารเคมีของสารนั้น ๆ ซึ่งเปิดฝาใหม่ ๆ พวก anhydrous salts ที่นำมาหาค่า heat of solutions โดยวิธีนี้ มีดังนี้

Sodium acetate (CH_3COONa) 3.0 g.

Sodium sulfate (Na_2SO_4) 2.2 g.

Sodium carbonate (Na_2CO_3) 1.8 g.

นำเอาสาร anhydrous salts เหล่านี้มาบดให้ละเอียดที่ละสาร แล้วจึงแต่ละสารมาให้น้ำหนักเท่าที่กล่าวมาแล้วข้างต้น หลังจากนั้นก็นำเอาแต่ละสารไปหาค่า heat of solution ตามวิธีการเกี่ยวกับการหาค่า heat of solution ของพวก hydrated salts ที่กล่าวไว้ในหน้า 40

การหาค่า heat of solutions ของสารพวก anhydrous salts ทั้งหมดนี้ แต่ละ system ทำการทดลองซ้ำ 8 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยแต่ละ system ออกมาอีกครึ่งหนึ่ง ซึ่งจากการทดลองได้ค่า heat of solution ของ system ต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงค่า Heat of Solution (ΔH)

Hydrated Salts	ΔH_2 (Kcal.mole ⁻¹)	Anhydrous Salts	ΔH_1 (Kcal.mole ⁻¹)
$\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$+3.99 \pm 0.43$	BaCl_2	-3.07 ± 0.29
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$+2.25 \pm 0.64$	MgSO_4	-21.90 ± 0.26
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$+1.65 \pm 0.37$	CuSO_4	-16.85 ± 0.39
$\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$+4.63 \pm 0.13$	CH_3COONa	-3.78 ± 0.13
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$+18.75 \pm 0.31$	Na_2SO_4	-0.76 ± 0.07
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$+16.23 \pm 0.49$	Na_2CO_3	-5.83 ± 0.47

1.3.2 การหาค่า Heat of Hydration

ค่า heat of hydration ได้มาจากการคำนวณ ซึ่งใช้ค่า heat of solution ของ hydrated salts และค่า heat of solution ของ anhydrous salts ที่กล่าวมาแล้ว ในหน้า 40 โดยใช้วิธีการคำนวณดังต่อไปนี้

กำหนดให้

$$\Delta H_1 = \text{heat of solution ของ anhydrous salt ของสาร A, Kcal.mole}^{-1}$$

$$\Delta H_2 = \text{heat of solution ของ hydrated salt ของสาร A, Kcal.mole}^{-1}$$

$$\Delta H_3 = \text{heat of hydration ของสาร A, Kcal.mole}^{-1}$$

$$\therefore \Delta H_3 = \Delta H_1 - \Delta H_2 \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

จากการหาค่า heat of hydration โดยวิธีนี้ ทำให้ได้ค่า heat of hydrations ของ systems ต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่า Heat of Hydration (ΔH)

System	ΔH (Kcal.mole ⁻¹)
$\text{BaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-7.06±0.72
$\text{MgSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-24.15±0.90
$\text{CuSO}_4 + 5\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-18.50±0.76
$\text{CH}_3\text{COONa} + 3\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	-8.41± 0.26
$\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-19.51±0.31
$\text{Na}_2\text{CO}_3 + 10\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-22.06±0.96

1.4 การทดลองหาค่า Heat of Precipitation

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 systems คือ

1.4.1 การหาค่า Heat of Precipitation ของ Lead Iodide

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย lead nitrate, 0.25 M ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ หนัก 41.4 g. ละลายในน้ำ 500.0 ml.) มา 50.0 ml. ใส่ลงใน calorimeter B ที่หาค่า calorimeter constant โดยการ plot graph ไว้แล้ว (หน้า 188) แล้ววัดอุณหภูมิของสารละลายใน calorimeter นี้ โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นใช้กระบอกตวงอื่นเติมตวงเอาสารละลาย potassium iodide, 0.5 M (KI หนัก 41.5 g. ละลายในน้ำ 500.0 ml.) มา 50.0 ml. ใส่ลงใน beaker ขนาด 100.0 ml. วัดอุณหภูมิของสารละลายนี้ โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที เมื่อวัดอุณหภูมิเสร็จแล้วก็เทสารละลายนี้ลงไปในผสมกับสารละลาย lead nitrate ที่อยู่ใน calorimeter พร้อมกับคนสารผสมนี้ อย่างสม่ำเสมอ และวัดอุณหภูมิของสารผสมนี้ทันที โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที แล้วนำเอา calorimeter B พร้อมถ้วยสารผสมไปตั้ง หลังจากนั้นนำเอาสารผสมนี้มารองเอาตะกอน lead iodide ออกด้วยกระดาษกรอง Whatman No 1 ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 11.0 cm. ซึ่งทราบน้ำหนักแล้ว ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น 6 ครั้ง ๆ ละ 25.0 ml. เอากระดาษกรองที่มีตะกอน lead iodide อยู่มาวางบนกระจกนาฬิกา (watch glass) และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 31.0°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วจึงนำเอาตะกอนนี้ไปชั่งหาน้ำหนัก

นำเอาอุณหภูมิที่วัดได้ทั้งหมดในขั้นตอนการนี้ไป plot graph เพื่อหาอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด (maximum temperature) และจากน้ำหนักของตะกอนก็สามารถนำไปคำนวณหาค่า heat of precipitation ของ system นี้ได้

1.4.2 การหาค่า Heat of Precipitation ของ Lead Chromate

ใช้สารละลายของ lead nitrate 0.25 M, ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ หนัก 41.4 g. ละลายในน้ำ 500.0 ml.) 50.0 ml. ทำปฏิกิริยากับสารละลาย potassium chromate 0.25 M (K_2CrO_4 หนัก 24.3 g. ละลายในน้ำ 500.0 ml.) 50.0 ml. โดยใช้ขั้นตอนการทดลองเช่นเดียวกับการหาค่า heat of precipitation ในกรณี lead iodide

ในการทดลองหาค่า heat of precipitation ทั้ง 2 systems นี้ ทดลอง system ละ 8 ครั้ง แล้วหาค่าเฉลี่ยอีกครั้งหนึ่ง ซึ่งจากการทดลองครั้งนี้ ได้ค่า heat of precipitation ของทั้งสอง system ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 หน้า 44

ตารางที่ 4 แสดงค่า Heat of Precipitation (ΔH)

System	ΔH (Kcal.mole ⁻¹)
Lead Iodide, PbI_2	-14.08 $\pm$ 1.14
Lead Chromate, $PbCrO_4$	-15.32 $\pm$ 0.67

1.5 การทดลองหาค่า Heat of Displacement

การทดลองหาค่า heat of displacement แบ่งการทดลองออกเป็น 3 systems คือ

1.5.1 Zinc dust ทำปฏิกิริยากับสารละลาย Copper Sulfate

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย copper sulfate, 0.50 M ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$ หนัก 124.8 g. ละลายในน้ำกลั่น 1000.0 ml.) มา 100.0 ml. แล้วเทลงไปใน calorimeter B ที่หาค่า calorimeter constant โดยการ plot graph ไว้แล้ว (หน้า 188) แล้ววัดอุณหภูมิของสารละลายนี้ โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นใช้ zinc dust หนัก 1.0 g. เทลงไปในสารละลาย copper sulfate แล้วคนสารผสมอย่างสม่ำเสมอ ตลอดเวลาพร้อมกับวัดอุณหภูมิของสารผสมนี้ทันที โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 8 นาที บันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด (maximum temperature) ของ system นี้ไว้

นำสารผสมนี้ไปชั่ง แล้วกรองเอาตะกอน copper ออกด้วยกระดาษกรอง Whatman No 1 ล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นทีละ 10.0 ml. จนกระทั่ง filtrate ไม่มีสีน้ำเงินเหลืออยู่ เอาตะกอน copper ที่ได้นี้ใส่ลงไปใน beaker ขนาด 100.0 ml. แล้วเติม sulfuric acid, 3.0 M ลงไป 20.0 ml. ใช้ stirrer คนสารผสมนี้เป็นเวลา 6 นาที ปล่อยให้ตกตะกอนอีกประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นค่อย ๆ รินสารละลายของกรดทิ้งไป แล้วใช้น้ำกลั่นล้างตะกอนที่อยู่ใน beaker 5 ครั้ง ๆ ละ 25.0 ml. กรองเอาตะกอน copper ออกด้วยกระดาษกรอง Whatman No 1 ที่ทราบน้ำหนักแล้ว ล้างตะกอนบนกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นอีก 5 ครั้ง ๆ ละ 25.0 ml. แล้วปล่อยให้ตะกอนแห้งบนกระดาษฟิลาที่อุณหภูมิห้อง 29.6°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตะกอนที่แห้งแล้วนี้ไปชั่งหาน้ำหนัก

ใน system นี้ทำการทดลอง 8 ครั้ง แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้งไปคำนวณหาค่า heat of displacement หลังจากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ย

1.5.2 Zinc dust ทำปฏิกิริยากับสารละลาย Silver Nitrate

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย silver nitrate, 0.20 M (AgNO_3 , B.P. Grade, หนัก 33.9 g. ละลายในน้ำกลั่น 1000.0 ml.) มา 100.0 ml. แล้วเทลงใน calorimeter B. ซึ่งหาค่า calorimeter constant ไว้แล้ว (หน้า 188) แล้ววัดอุณหภูมิของสารละลายนี้ โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นใช้ zinc dust หนัก 0.5 g. เทลงไปในสารละลาย silver nitrate แล้วคนสารผสมอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา พร้อมกับวัดอุณหภูมิของสารผสมนี้ทันที โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 8 นาที บันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด (maximum temperature) ของ system นี้ไว้

นำสารผสมนี้ไปทิ้ง แล้วกรองเอาตะกอน silver ออกมาด้วยกระดาษกรอง Whatman No 1 เทตะกอนที่กรองได้ลงใน beaker ขนาด 100.0 ml. แล้วเติม sulfuric acid, 3.0 M ลงไป 10.0 ml. ใช้ stirrer คนสารผสมนี้ 5 นาที ปล่อยให้ตกตะกอนประมาณ 5 นาที หลังจากนั้นค่อย ๆ รินสารละลายของกรดทิ้งไป แล้วใช้น้ำกลั่นล้างตะกอนที่อยู่ใน beaker ทั้งหมด 5 ครั้ง ๆ ละ 25.0 ml. กรองเอาตะกอน silver ออกมาด้วยกระดาษกรอง Whatman No 1 ที่ทราบน้ำหนักแล้วล้างตะกอนบนกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นอีก 5 ครั้ง ๆ ละ 25.0 ml. แล้วปล่อยให้ตะกอนแห้งบนกระดาษสีฟ้าที่อุณหภูมิห้อง 29.8°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตะกอนที่แห้งแล้วนี้ไปชั่งน้ำหนัก

ใน system นี้ทดลองทั้งหมด 8 ครั้ง แล้วนำเอาผลทั้งหมดไปคำนวณหาค่า Heat of displacement แล้วหาค่าเฉลี่ยรวมการทดลองทั้งหมด

1.5.3 Copper powder ทำปฏิกิริยากับสารละลาย Silver Nitrate

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย silver nitrate, 0.50 M (AgNO_3 , B.P. Grade, หนัก 84.9 g. ละลายในน้ำกลั่น 1000.0 ml.) มา 100.0 ml. แล้วเทลงใน calorimeter B ซึ่งหาค่า calorimeter constant ไว้แล้ว (หน้า 188) แล้ววัดอุณหภูมิของสารละลายนี้ โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที หลังจากนั้นใช้ copper powder หนัก 1.0 g. เทลงไปในสารละลาย silver nitrate แล้วคนสารผสมนี้อย่างสม่ำเสมอตลอดเวลา พร้อมกับวัดอุณหภูมิของสารผสมนี้ทันที โดยอ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 12 นาที

บันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด (maximum temperature) ของ system นี้ไว้

นำสารผสมนี้ไปล้าง แล้วกรองเอาตะกอน silver ออกมาด้วยกระดาษกรอง Whatman No 1 เทตะกอนที่โดนล้างไปใน beaker ขนาด 100.0 ml. ล้างตะกอนใน beaker นี้ด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้ง ๆ ละ 25.0 ml. หลังจากนั้นก็กรองเอาตะกอนที่ออกมาด้วยกระดาษกรอง Whatman No 1 ที่ทราบน้ำหนักแล้ว ล้างตะกอนบนกระดาษกรองด้วยน้ำกลั่นอีก 5 ครั้ง ๆ ละ 25.0 ml. แล้วปล่อยให้ตะกอนแห้งบนกระดาษที่อุณหภูมิห้อง 30.2°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำตะกอนที่แห้งแล้วไปชั่งน้ำหนักเก็บออกไป ใน system นี้ทำการทดลองทั้งหมด 8 ครั้ง แล้วนำผลที่ได้จากการทดลองแต่ละครั้งไปคำนวณหาค่า heat of displacement หลังจากนั้นจึงหาค่าเฉลี่ยออกมาอีกครั้งหนึ่ง

ผลของการทดลองหา heat of displacement ของทั้ง 3 systems นี้ แสดงไว้ในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 แสดงค่า Heat of Displacement (ΔH)

System	ΔH (Kcal.mole ⁻¹)
$\text{Zn(s)} + \text{CuSO}_4(\text{aq.}) \longrightarrow \text{ZnSO}_4(\text{aq.}) + \text{Cu(s)}$	-50.96 ± 0.37
$\text{Zn(s)} + 2\text{AgNO}_3(\text{aq.}) \longrightarrow \text{Zn(NO}_3)_2(\text{aq.}) + 2\text{Ag(s)}$	-86.97 ± 0.76
$\text{Cu(s)} + 2\text{AgNO}_3(\text{aq.}) \longrightarrow \text{Cu(NO}_3)_2(\text{aq.}) + 2\text{Ag(s)}$	-34.49 ± 0.47

1.6 การทดลองหา Stoichiometry โดยใช้อุณหภูมิเป็น Criteria

ใช้ calorimeter B. ทดลองศึกษา stoichiometry ของ system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. Sodium hydroxide, 1.0 M (NaOH(aq.)), 1.0 M) กับ
Sulfuric acid, 0.5 M ($\text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq.})$), 0.5 M)
2. Sodium hydroxide, 0.5 M (NaOH(aq.)), 0.5 M) กับ
Hydrochloric acid, 0.5 M (HCl(aq.)), 0.5 M)

3. Sodium hydroxide, 0.5 M (NaOH(aq.)), 0.5 M) กับ
Nitric acid, 0.5 M ($\text{HNO}_3\text{(aq.)}$), 0.5 M)
4. Potassium hydroxide, 1.0 M (KOH(aq.)), 1.0 M) กับ
Hydrochloric acid, 1.0 M (HCl(aq.)), 1.0 M)
5. Sodium hydroxide, 1.0 M (NaOH(aq.)), 1.0 M) กับ
acetic acid, 1.0 M ($\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}$), 1.0 M)
6. Sodium hydroxide, 1.0 M (NaOH(aq.)), 1.0 M) กับ
Potassium bicarbonate, 1.0 M ($\text{KHCO}_3\text{(aq.)}$), 1.0 M)
7. Ammonia solution, 1.0 M ($\text{NH}_3\text{(aq.)}$), 1.0 M) กับ
acetic acid, 1.0 M ($\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}$), 1.0 M)
8. Ammonia solution, 0.5 M ($\text{NH}_3\text{(aq.)}$), 0.5 M) กับ
Hydrochloric acid, 0.5 M (HCl(aq.)), 0.5 M)

ในการทดลองแต่ละ system นี้ใช้ continuous variation method เหมือนกันทั้งหมด
ซึ่งแปรผันปริมาตรของกรด และด่างทั้งหมด 9 ratios ดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 6 ปริมาตรของกรดและเบสในการทดลองหา Stoichiometry ของปฏิกิริยาเคมี
โดยวิธี continuous variation method

Ratios	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ปริมาตรของกรด (ml.)	90.0	80.0	70.0	60.0	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0
ปริมาตรของเบส (ml.)	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0

ในการทดลองแต่ละ ratio นี้ใช้กระบอกวงขนาด 100.0 ml. ทวงเอาสารละลาย
ของกรดที่มีปริมาตรดังตารางที่ 6 เทลงใน calorimeter B แล้ววัดอุณหภูมิของสารละลายนี้ โดย
อ่านอุณหภูมิทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที ในกรณี ratio ที่ 6, 7, 8, 9 นั้นเอียง
calorimeter เล็กน้อย เพื่อให้สารละลายท่วมกะเปาะปรอท หลังจากนั้นก็ทวงเอาสารละลายของ

เบสที่มีปริมาตรคงที่ตารางที่ 6 ของแต่ละ ratio เทลงใน beaker ขนาด 100.0 ml. แล้ววัดอุณหภูมิของเบสทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 6 นาที ในกรณี ratio ที่ 1, 2, 3, 4 นั้นเอียง beaker เล็กน้อย เพื่อให้สารละลายท่วมกะเปาะปรอท ผสมสารละลายทั้งสองที่วัดอุณหภูมิแล้วของแต่ละ ratio คงที่ตารางที่ 6 ใน calorimeter B แล้วผสมสารผสมอย่างสม่ำเสมอตลอดเวลาพร้อมกับวัดอุณหภูมิของของผสมทุก ๆ 30 วินาที เป็นเวลา 8 นาที แล้วบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด (maximum temperature) ของแต่ละ ratio สำหรับในแต่ละ ratio ทดลองทั้งหมด 5 ครั้ง

นำเอาค่าอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดในแต่ละ ratio ไป plot graph กับ mole ratio ของ reactants ในตรงผสมแต่ละครั้งทั้ง 9 ratio แล้วหา stoichiometric point จากจุดที่เส้น graph ตัดกันพอดี

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าใน ratio ที่ 5 ของแต่ละ system จะมีค่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด (maximum temperature) และจำนวน mole ratio ที่ reactant ทำปฏิกิริยากันพอดีของแต่ละ system นี้ แสดงไว้ในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 7 แสดง Mole Ratio ที่สารทำปฏิกิริยากันพอดี

System	Volume Ratio (ml. : ml.)	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ (Average)	Mole Ratio
NaOH(aq.), 1.0M-H ₂ SO ₄ (aq.), 0.5 M	50 : 50	7.60±0.07	2 : 1
NaOH(aq.), 0.5M-HCl(aq.), 0.5 M	50 : 50	3.20±0.07	1 : 1
NaOH(aq.), 0.5M-HNO ₃ (aq.), 0.5 M	50 : 50	3.28±0.04	1 : 1
KOH(aq.), 1.0M-HCl(aq.), 1.0 M	50 : 50	6.32±0.04	1 : 1
NaOH(aq.), 1.0M-CH ₃ COOH(aq.), 1.0 M	50 : 50	6.22±0.04	1 : 1
NaOH(aq.), 1.0M-KHCO ₃ (aq.), 1.0 M	50 : 50	4.32±0.04	1 : 1
NH ₃ (aq.), 1.0M-CH ₃ COOH(aq.), 1.0 M	50 : 50	5.12±0.04	1 : 1
NH ₃ (aq.), 0.5M-HCl(aq.), 0.5 M	50 : 50	3.00±0.07	1 : 1

2. พลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy)

ใช้เครื่องป้อนที่สร้างขึ้นเอง ดังแสดงรูปไว้ในหน้า 30 มาทดลองหาค่า voltage ของ electrochemical cell ต่าง ๆ ตามวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

2.1 การเตรียม Salt bridge.

ใช้หลอดแก้วที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 cm. มางัดเป็นหลอดแก้วรูปตัว U (U) โดยให้หลอดแก้วนี้สูง 8.0 cm. และปลายหลอดแก้วรูปตัว U อยู่ห่างกัน 3.0 cm. หลังจากนั้นใช้ potassium nitrate, KNO_3 หนัก 16.0 g. และ Agar หนัก 1.6 g. ไปผสมกับน้ำกลั่น 40.0 ml. ใน beaker ขนาด 100.0 ml. ยก beaker นี้ขึ้นตั้งไฟพร้อมกับ stirrer จนสารผสมนี้เดือดเวลา สารผสมนี้จะกลายเป็นเนื้อเดียวกัน แล้วยก beaker นี้ลงมาตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง $28.4^{\circ}C$ ประมาณ 10-15 นาที หลังจากนั้นก็ค่อย ๆ กรวดสารผสมนี้ลงไปในหลอดแก้วรูปตัว U จนเต็ม โดยพยายามไม่ให้ฟองอากาศอยู่ภายในหลอดแก้วนี้เลย ปล่อยให้สารในหลอดแก้วเย็นและแข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง $28.4^{\circ}C$ แล้วนำเอาไปใช้เป็น salt bridge ในการทดลองหาค่า voltage ของ electrochemical cell ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.2 $Zn/ZnSO_4(aq.), 0.5 M/CuSO_4(aq.), 0.5 M/Cu$ cell

2.2.1 การเตรียม Electrodes

ตัดแผ่น zinc และ copper ให้มีขนาด 1×8 cm. เท่ากัน ใช้ฝอยเหล็ก (steel wool) ขัดสารที่เกาะอยู่ที่ผิวของแผ่น zinc ออก แล้วนำไปล้างในน้ำกลั่นและเช็ดให้แห้ง นำแผ่น zinc นี้ไปจุ่มในสารละลาย mercury (II) chloride ที่เข้มข้น ประมาณ 30 วินาที เพื่อทำเป็น amalgam หลังจากนั้นจึงนำแผ่น zinc ไปล้างด้วยน้ำกลั่นแล้วค่อย ๆ เช็ดให้สะอาด วางแผ่น zinc นี้ไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง $28.4^{\circ}C$ ประมาณ 10 นาที นำแผ่นโลหะ copper ไปจุ่มในสารละลาย nitric acid, 6.0 M เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อทำความสะอาดแผ่น copper หลังจากนั้นก็นำน้ำกลั่นล้างแผ่นโลหะนี้อีกครั้งหนึ่ง แล้วเช็ดให้สะอาด และปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง $28.4^{\circ}C$ ประมาณ 10 นาที

2.2.2 วิธีการทดลอง

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย copper sulfate, 0.5 M ($CuSO_4 \cdot 5H_2O$ หนัก 31.2 g. ละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงไปใน

beaker ขนาด 50.0 ml. แล้วใช้กระบอกตวงอันเดิม ตวงเอาสารละลาย zinc sulfate, 0.5 M ($\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ หนัก 35.9 g. ละลายในน้ำ 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงใน beaker ขนาด 50.0 ml. อีกใบหนึ่ง หลังจากนั้นก็ใช้ zinc electrode จุ่มลงในสารละลาย zinc sulfate, 0.5 M และใช้ copper electrode จุ่มลงในสารละลาย copper sulfate, 0.5 M แล้วจุ่มปลายข้างหนึ่งของ salt bridge ลงในสารละลาย zinc sulfate และปลายอีกข้างหนึ่งจุ่มลงในสารละลาย copper sulfate ปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 2-3 นาที

นำเอาเครื่องมือที่แสดงไว้ในหน้า 30 มาปรับ variable resistor ให้ที่ 0 ohm เลื่อน switch, SW_3 ไปทาง 3.0 v. และ switch, SW_2 ไปทางบวก(+) แล้วใช้ปากคีบทั้งสองของเครื่องมือที่แสดงบวกและลบ (positive clamp and negative clamp) ไปแตะที่ electrode ทั้งสอง เมื่อตรวจขั้วบวกและลบของ cell ถ้าเข็มของ ammeter นี้ชี้เลขใดเลขหนึ่งบน scale แสดงว่า electrode ที่แตะอยู่กับปากคีบที่แสดงบวก(+) เป็นขั้วบวกของ cell และ electrode อีกแผ่นหนึ่งก็เป็นขั้วลบ(-) ของ cell แต่ถ้าเข็มของ ammeter ชี้กลับไปอีกข้างหนึ่งแล้วก็กลับปากคีบทั้งสองเสียใหม่ ก็จะทำให้ทราบขั้วของ cell นี้ได้เช่นเดียวกัน

จากการตรวจขั้วโดยวิธีนี้ทราบว่า copper electrode เป็นขั้วบวก(+) และ zinc electrode เป็นขั้วลบ(-) แล้วใช้ปากคีบที่แสดงบวก(+) คีบที่ copper electrode และใช้ปากคีบที่แสดงลบ(-) คีบที่ zinc electrode หลังจากนั้นก็ปิด switch SW_1 แล้วค่อย ๆ apply potential เข้าไปใน cell นี้ทีละ 0.1 volt โดยใช้ variable resistor ในขณะที่ apply potential นี้ก็อ่านค่า voltage ที่ voltmeter และอ่านการกระแจาก ammeter เมื่อสังเกตเห็นว่าค่าการกระแสดังกล่าวจะถึงศูนย์แล้ว ก็เลื่อน switch, SW_2 ที่ใช้เป็น reversing key ไปทางเครื่องหมายลบ(-) แล้ว apply potential ทีละ 0.1 volt ต่อไปอีก จนกระทั่งชี้เครื่องหมายที่ปุ่มปรับของ variable resistor ไปที่ 25 ohms แล้วนำเอาค่าการกระแสดังกล่าวไปเมื่อเลื่อน switch, SW_2 ไปทางเครื่องหมายบวก(+) เป็นค่าบวก(+) และค่าการกระแสดังกล่าวไปเมื่อเลื่อน switch, SW_2 ไปทางเครื่องหมายลบ(-) เป็นค่าลบ(-) ไป plot graph กับ applied potential (v) เพื่อหาค่า voltage ของ cell จากจุดที่เส้น graph นี้ ตัดเส้นแกนที่แสดงการกระแสเป็นศูนย์

ใน system นี้ทดลอง 5 ครั้ง แล้วนำค่า voltage ไปคำนวณหาค่า Free energy change (ΔG) ของการเปลี่ยนแปลงทางเคมีต่อไป (ค่า voltage และ Free energy change

แสดงไว้ในตารางที่ 8 หน้า 54)

2.3 $\text{Cu}/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.})$, $0.3 \text{ M}/\text{AgNO}_3(\text{aq.})$, $0.6 \text{ M}/\text{Ag}$ cell

2.3.1 การเตรียม Electrodes

ตัดแผ่น copper และ silver ให้มีขนาด $1 \times 8 \text{ cm.}$ เท่ากัน ใช้น้อยเหล็ก (steel wool) ขัดสารที่ฉาบอยู่ผิวหน้าของแผ่น silver ออก แล้วนำไปล้างในน้ำกลั่นและเช็ดให้สะอาด ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 29.0°C ประมาณ 10 นาที นำเอาแผ่น copper ไปจุ่มในสารละลาย nitric acid, 6.0 M เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อทำความสะอาดแผ่น copper หลังจากนั้นก็นำน้ำกลั่นล้างแผ่นโลหะนี้อีกครั้งหนึ่ง แล้วเช็ดให้สะอาดและปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 29.0°C ประมาณ 10 นาที

2.3.2 วิธีการทดลอง

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย copper nitrate, 0.3 M (ใช้ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ หนัก 18.1 g. ละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงไปใน beaker ขนาด 50.0 ml. แล้วใช้กระบอกตวงขึ้นเค็ม ตวงเอาสารละลาย silver nitrate, 0.6 M (ใช้ AgNO_3 , B.P. Grade หนัก 25.5 g. ละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงไปใน beaker ขนาด 50.0 ml. อีกใบหนึ่ง หลังจากนั้นใช้ copper electrode จุ่มในสารละลาย copper nitrate, 0.3 M และใช้ silver electrode จุ่มลงในสารละลาย silver nitrate, 0.6 M แล้วจุ่มปลายข้างหนึ่งของ salt bridge ลงในสารละลาย copper nitrate และปลายอีกข้างหนึ่งจุ่มลงในสารละลาย silver nitrate ปล่อยให้ทิ้งไว้ 2-3 นาที

จากการตรวจสอบขั้วของ cell ตามวิธีที่กล่าวไว้ในหน้า 50 และใช้เครื่องมือตามรูปที่แสดงไว้ในหน้า 30 พบว่า silver electrode เป็นขั้วบวก (+) และ copper electrode เป็นขั้วลบ (-) หลังจากนั้นทดลองวัดค่า voltage ของ cell นี้ตามวิธีที่กล่าวไว้ในหน้า 50

2.4 $\text{Pb}/\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.})$, $0.5 \text{ M}/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.})$, $0.5 \text{ M}/\text{Cu}$ cell

2.4.1 การเตรียม Electrodes

ตัดแผ่น lead และ copper ให้มีขนาด $1 \times 8 \text{ cm.}$ เท่ากัน ใช้น้อยเหล็ก (steel wool) ขัดสารที่ฉาบอยู่ผิวหน้าของแผ่น lead ออก แล้วนำไปล้างในน้ำกลั่นและเช็ดให้สะอาด ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 28.8°C ประมาณ 10 นาที นำเอาแผ่น copper ไปจุ่มในสารละลาย

nitric acid, 6.0 M เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อทำความสะอาดแผ่น copper หลังจากนั้นใช้ น้ำกลั่นล้างแผ่นโลหะนี้อีกครั้งหนึ่ง แล้วเช็ดให้สะอาดและปล่อยให้แห้งในที่อุณหภูมิห้อง 28.8°C ประมาณ 10 นาที

2.4.2 วิธีการทดลอง

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย lead nitrate, 0.5 M (ใช้ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ น้หนัก 41.4 g. ละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงไปใน beaker ขนาด 50.0 ml. แล้วใช้กระบอกตวงวันเดียม ตวงเอาสารละลาย copper nitrate, 0.5 M (ใช้ $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ น้หนัก 30.2 g. ละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงไปใน beaker ขนาด 50.0 ml. อีกใบหนึ่ง หลังจากนั้นใช้ copper electrode จุ่มลงในสารละลาย copper nitrate, 0.5 M และใช้ lead electrode จุ่มลงในสารละลาย lead nitrate, 0.5 M แล้วจุ่มปลายอีกข้างหนึ่งของ salt bridge ลงในสารละลาย copper nitrate และปลายอีกข้างหนึ่ง จุ่มลงในสารละลาย lead nitrate ปล่อยให้ทิ้งไว้ 2-3 นาที

จากการตรวจสอบขั้วของ cell ตามวิธีที่กล่าวไว้ในหน้า 50 และใช้เครื่องมือตามรูป ที่แสดงไว้ในหน้า 30 พบว่า copper electrode เป็นขั้วบวก(+) และ lead electrode เป็นขั้วลบ (-) หลังจากนั้นทดลองหาค่า voltage ของ cell นี้ตามวิธีการที่กล่าวไว้ในหน้า 50

2.5 $\text{Zn}/\text{Zn}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3 \text{ M} // \text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6 \text{ M}/\text{Ag}$ cell

2.5.1 การเตรียม Electrodes

ตัดแผ่น zinc และ silver ให้มีขนาด $1 \times 8 \text{ cm.}$ เท่ากัน ใช้ฝอยเหล็ก (steel wool) ขัดสารที่ฉาบอยู่ที่ผิวของแผ่น zinc ออก แล้วนำไปล้างในน้ำกลั่นและเช็ดให้แห้ง นำแผ่น zinc ที่ไปจุ่มในสารละลาย mercury (II) chloride ที่อิ่มตัวประมาณ 30 วินาที เพื่อทำเป็น amalgam หลังจากนั้นจึงนำแผ่น zinc ไปล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วค่อย ๆ เช็ดให้สะอาด วางแผ่น zinc นี้ไว้ในแห้งในที่อุณหภูมิห้อง 29.0°C ประมาณ 10 นาที นำแผ่น silver มาขัดด้วยฝอยเหล็ก (steel wool) เพื่อให้สารที่ฉาบอยู่ที่ผิวของแผ่น silver หลุดออกแล้วนำไปล้างในน้ำกลั่น และเช็ดให้สะอาด ปล่อยให้แห้งในที่อุณหภูมิห้อง 29.0°C ประมาณ 10 นาที

2.5.2 วิธีการทดลอง

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย zinc nitrate, 0.3 M

(ใช้ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หนัก 22.3 g. มาละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงใน beaker ขนาด 50.0 ml. แล้วใช้กระบอกตวงอันเดิม ตวงเอาสารละลาย silver nitrate, 0.6 M (ใช้ AgNO_3 , B.P. Grade, หนัก 25.5 g. มาละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงใน beaker ขนาด 50.0 ml. อีกใบหนึ่ง หลังจากนั้นใช้ zinc electrode จุ่มลงในสารละลาย zinc nitrate, 0.3 M และใช้ silver electrode จุ่มลงในสารละลาย silver nitrate, 0.6 M แล้วจุ่มปลายข้างหนึ่งของ salt bridge ลงในสารละลาย silver nitrate และปลายอีกข้างหนึ่งจุ่มลงในสารละลาย zinc nitrate ปล่อยให้ทิ้งไว้ 2-3 นาที

จากการตรวจสอบขั้วของ cell ตามวิธีที่กล่าวไว้ในหน้า 50 และใช้เครื่องมือตามรูปที่แสดงไว้ในหน้า 30 พบว่า zinc electrode เป็นขั้วลบ(-) และ silver electrode เป็นขั้วบวก(+) หลังจากนั้นทดลองหาค่า voltage ของ cell นี้ตามวิธีการที่กล่าวไว้ในหน้า 50

2.6 $\text{Pb}/\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.25 \text{ M} // \text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.50 \text{ M} / \text{Ag}$ cell

2.6.1 การเตรียม Electrodes

ตัดแผ่น lead และแผ่น silver ให้มีขนาด $1 \times 8 \text{ cm.}$ เท่ากัน ใช้ผอยเหล็ก (steel wool) ขัดสารที่ฉาบอยู่ที่ผิวของแผ่น lead ออก แล้วนำเอาไปล้างในน้ำกลั่น และเช็ดให้สะอาด ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 28.8°C ประมาณ 10 นาที นำเอาแผ่น silver ไปขัดเอาสารที่ฉาบอยู่ที่ผิวด้วยเหล็ก (steel wool) แล้วนำเอาไปล้างในน้ำกลั่นและเช็ดให้สะอาด ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 28.8°C ประมาณ 10 นาที

2.6.2 วิธีการทดลอง

ใช้กระบอกตวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย lead nitrate, 0.25 M (ใช้ $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ หนัก 20.7 g. ละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงใน beaker ขนาด 50.0 ml. แล้วใช้กระบอกตวงอันเดิม ตวงเอาสารละลาย silver nitrate, 0.50 M (ใช้ AgNO_3 , B.P. grade หนัก 21.2 g. ละลายในน้ำกลั่น 250.0 ml.) มา 50.0 ml. เทลงใน beaker ขนาด 50.0 ml. อีกใบหนึ่ง หลังจากนั้นใช้ lead electrode จุ่มลงในสารละลาย lead nitrate, 0.25 M และใช้ silver electrode จุ่มลงในสารละลาย silver nitrate, 0.50 M แล้วจุ่มปลายข้างหนึ่งของ salt bridge ลงไปในสารละลาย silver nitrate และปลายอีกข้างหนึ่งจุ่มลงในสารละลาย lead nitrate ปล่อยให้ทิ้งไว้ประมาณ 2-3 นาที

จากการตรวจสอบขั้วของ cell ตามวิธีที่กล่าวไว้ในหน้า 50 และใช้เครื่องตามรูปที่
แสดงไว้ในหน้า 30 พบว่า lead electrode เป็นขั้วลบ (-) และ silver electrode เป็น
ขั้วบวก (+) หลังจากบันทึกค่า voltage ของ cell นี้ ตามวิธีการที่กล่าวไว้ในหน้า 50
ตารางที่ 8 แสดงค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG)
ที่ได้จากการทดลอง

Electrochemical cell.	Voltage (volts)	ΔG^* (Kcal.mole ⁻¹)
Zn/ZnSO ₄ (aq.), 0.5 M//CuSO ₄ (aq.), 0.5 M/Cu	1.10	-50.74
Cu/Cu(NO ₃) ₂ (aq.), 0.3 M//AgNO ₃ (aq.), 0.6 M/Ag	0.45	-20.76
Pb/Pb(NO ₃) ₂ (aq.), 0.5 M//Cu(NO ₃) ₂ (aq.), 0.5 M/Cu	0.48	-22.14
Zn/Zn(NO ₃) ₂ (aq.), 0.3 M//AgNO ₃ (aq.), 0.6 M/Ag	1.55	-71.49
Pb/Pb(NO ₃) ₂ (aq.), 0.25 M//AgNO ₃ (aq.), 0.50 M/Ag	0.92	-42.44

2.7 Concentration Cell

ทำการทดลองหาค่า voltage ของ concentration cell ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.7.1 Cu-CuSO₄ Concentration cell

แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอนคือ

1. การเตรียม Electrodes

ตัดแผ่น copper มาทั้งหมด 12 แผ่น ให้แต่ละแผ่นมีขนาดเท่ากับ 1 x 8 cm.
แล้วนำแต่ละแผ่นไปจุ่มลงในสารละลายของ nitric acid, 6.0 M เป็นเวลา 30 วินาที

$$* \quad \Delta G = -nFE$$

$$n = 2$$

$$F = 96,500 \text{ coulomb mole}^{-1} \text{ of electron}$$

$$E = \text{voltage}$$

หลังจากนั้นนำเอาแผ่น copper ทั้งหมดไปล้างด้วยน้ำกลั่น และเช็ดให้สะอาด ปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง 28.4°C ประมาณ 5-10 นาที

2. วิธีการทดลอง

เตรียมสารละลาย copper sulfate ให้มีความเข้มข้นต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตารางต่อไป

ตารางที่ 9 แสดงความเข้มข้นของสารละลาย และ Concentration Ratio ที่นำมาทำ Concentration cell

No	Conc. A (moles.liter ⁻¹)	Conc. B (moles.liter ⁻¹)	Conc. Ratio (C _A /C _B)
1	0.98	0.02	49.0
2	0.95	0.05	19.0
3	0.90	0.10	9.0
4	0.80	0.20	4.0
5	0.70	0.30	2.3
6	0.50	0.50	1.0

ใช้กระบอกวงขนาด 100.0 ml. ตวงเอาสารละลาย copper sulfate มาที่ความเข้มข้น ความเข้มข้นละ 50.0 ml. เทลงใน beaker ขนาด 50.0 ml. ทั้งหมด 12 ใบ ๆ ละ ความเข้มข้น แล้วแบ่ง beaker ที่ใส่สารละลายเหล่านี้ออกเป็น 6 ชุด ๆ ละ 2 ใบ โดยให้ความเข้มข้นของสารละลายในแต่ละชุดนี้รวมกันแล้วเท่ากับ 1.0 M ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9

นำเครื่องมือที่แสดงไว้ในหน้า 30 มาปรับ variable resistor ให้อยู่ที่ศูนย์ ohms และเลื่อน switch, SW₃ ไปทาง 0.1 volts หลังจากนั้นนำสารละลายแต่ละชุดมาทดลองหาค่า voltage โดยใช้แผ่น copper electrode มาจุ่มลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นมากหนึ่งแผ่น อีกแผ่นหนึ่งจุ่มลงในสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อย แล้วใช้ salt bridge (วิธีเตรียม salt bridge กล่าวไว้ในหน้า 49) มาจุ่มลงในสารละลายทั้งสอง ปล่อยให้ทิ้งไว้ 2-3 นาที

จากการตรวจสอบซ้ำของ cell ตามวิธีที่กล่าวไว้หน้า 50 พบว่า electrode ที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นมาก เป็นขั้วบวก (+) และแผ่น electrode ที่จุ่มอยู่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยเป็นขั้วลบ (-) หลังจากนั้นหาค่า voltage ของ cell ตามวิธีการที่กล่าวมาแล้วในหน้า 50 แต่ apply potential เข้าไปที่ละ 0.01 volt แต่ละชุดทดลอง 5 ครั้ง แล้วนำผลที่ได้ไป plot graph หาค่า voltage และคำนวณหาค่า Free energy change (ΔG) ของ cell ต่อไป จากค่า voltage ที่ได้ และค่า log concentration ratio ของแต่ละชุดนี้ นำเอาไป plot graph เพื่อหาค่า proportionality constant (K) ของ Cu-CuSO₄ concentration cell อีกครั้งหนึ่ง ถึงผลการทดลองในการวางต่อไปนี้

ตารางที่ 10 แสดง Cell Potential and Concentration Ratio for a Cu-CuSO₄ Concentration Cell at 28.4°C

Conc. A (moles.liter ⁻¹)	Conc. B (moles.liter ⁻¹)	Conc. Ratio (C _A / C _B)	E max (volts)	- ΔG (Kcal.mole ⁻¹)
0.98	0.02	49.0	0.041±0.0007	1.891±0.033
0.95	0.05	19.0	0.030±0.0007	1.384±0.032
0.90	0.10	9.0	0.024±0.0007	1.107±0.033
0.80	0.20	4.0	0.014±0.0007	0.646±0.033
0.70	0.30	2.3	0.007±0.0007	0.323±0.033
0.50	0.50	1.0	0.000	0.000

2.7.2 Zn-ZnSO₄ Concentration cell แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน คือ

1. การเตรียม Electrodes

ตัดแผ่น zinc มาทั้งหมด 12 แผ่น ให้แต่ละแผ่นมีขนาดเท่ากับ 1 x 8 cm. แล้วใช้ผอยเหล็ก (steel wool) ขัดเอาสารที่ฉาบอยู่ผิวหน้าของแผ่นออก นำแผ่น zinc ทั้งหมด

ไปล้างควมเล็กน้อย แล้วเช็ดให้สะอาด และปล่อยให้แห้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 28.0°C ประมาณ 5-10 นาที

2. วิธีการทดลอง

ใช้ขบวนการทดลองเช่นเดียวกับในกรณีของ Cu-CuSO_4 concentration cell ดังกล่าวมาแล้วในหน้า 55 - 56 เพียงแต่เปลี่ยนจากสารละลาย copper sulfate เป็นสารละลาย zinc sulfate และใช้ zinc electrode แทน copper electrode เท่านั้น ซึ่งจากการทดลองใน system นี้ ได้ผลออกมาดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 11 แสดง Cell Potential and Concentration Ratio for a Zn-ZnSO_4 Concentration Cell at 28.0°C

Conc. A (moles.liter ⁻¹)	Conc. B (moles.liter ⁻¹)	Conc. Ratio (C_A / C_B)	E max (volts)	$-\Delta G$ (Kcal.mole ⁻¹)
0.98	0.02	49.0	0.03 ± 0.0007	1.384 ± 0.032
0.95	0.05	19.0	0.022 ± 0.0007	1.015 ± 0.033
0.90	0.10	9.0	0.017 ± 0.0007	0.784 ± 0.033
0.80	0.20	4.0	0.012 ± 0.0007	0.554 ± 0.033
0.70	0.30	2.3	0.006 ± 0.0007	0.277 ± 0.033
0.50	0.50	1.0	0.000	0.000

2.7.3 $\text{Pb-Pb(NO}_3)_2$ Concentration cell แบ่งการทดลองออกเป็น

2 ตอน คือ

1. การเตรียม Electrodes

ตัดแผ่น lead มาทั้งหนก 12 แผ่น ให้แต่ละแผ่นมีขนาดเท่ากับ $1 \times 8 \text{ cm.}$ แล้วใช้ฝอยเหล็ก (steel wool) ขัดเอาสารที่ฉาบอยู่ผิวหน้าของแผ่นออก นำแผ่น lead ทั้งหมดไปล้างควมเล็กน้อย แล้วเช็ดให้สะอาดและปล่อยให้แห้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 28.4°C ประมาณ 5-10 นาที

2. วิธีการทดลอง

ใช้ขบวนการทดลองเช่นเดียวกับในกรณีของ Cu-CuSO₄ concentration cell เพียงแต่เปลี่ยนจากสารละลาย copper sulfate เป็นสารละลาย lead nitrate และใช้ lead electrode แทน copper electrode เท่านั้น ซึ่งจากผลการทดลองใน system นี้ ได้ผลออกมาดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 12 แสดง Cell Potential and Concentration Ratio for a
Pb-Pb(NO₃)₂ Concentration Cell at 28.4°C

Conc. A (moles.liter ⁻¹)	Conc. B (moles-liter ⁻¹)	Conc. Ratio (C _A / C _B)	E max (volts)	- Δ G (Kcal.mole ⁻¹)
0.98	0.02	49.0	0.031±0.0007	1.429±0.032
0.95	0.05	19.0	0.022±0.0007	1.015±0.033
0.90	0.10	9.0	0.017±0.0007	0.784±0.033
0.80	0.20	4.0	0.011±0.0007	0.507±0.033
0.70	0.30	2.3	0.006±0.0007	0.277±0.033
0.50	0.50	1.0	0.000	-0.000

บทที่ 4

ทฤษฎี ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

เนื่องจากการศึกษาครั้งนี้ได้แบ่งออกเป็น 2 ตอน คือการสร้างหีบเครื่องมือทดลองกับการทดลองเฝ้าสังเกตงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี ดังนั้นผู้เขียนจะขอกล่าวถึงผลของการศึกษาก่อนในแต่ละตอน ดังนี้

1. การสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental Kit)

ในการสร้างหีบเครื่องมือทดลองนั้น ผู้เขียนได้พยายามจัดทำเครื่องมือง่าย ๆ และมีราคาถูกมาใช้ในการทดลอง เครื่องมือทดลองบางอย่างก็ได้ดัดแปลงแก้ไขจากวัสดุหรือเครื่องมือที่มีอยู่แล้ว เพื่อให้เหมาะสมและสะดวกแก่การนำไปใช้ในการทดลอง ซึ่งแบ่งออกดังนี้

1.1 การสร้าง Calorimeter

ผู้เขียนได้ดัดแปลงมาจากขวดแก้ว Latex ซึ่งทำด้วยสาร polyethylene และมีความทนทานต่อสภาพความเป็นกรดและด่างได้อย่างดี เพราะบางการทดลองนั้นจะต้องใช้สารที่เป็นกรดและด่างมาทำปฏิกิริยากันใน calorimeter นี้ และการที่เอาขวดแก้วไปฝังอยู่ในแผ่น styrofoam อีกครั้งหนึ่งนั้นก็เพื่อให้แผ่น styrofoam เป็น insulator ในการป้องกันไม่ให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี ภายนอกสู่ภายนอกเลย หรือให้ภายนอกสู่ภายนอก (environment) น้อยที่สุด ทั้งนี้ในการที่จะนำเอา calorimeter ที่ทำด้วยโลหะมาใช้ในการทดลองนั้น จึงไม่สามารถจะทำได้ เพราะ calorimeter แบบนี้ไม่ทนต่อสภาพความเป็นกรดและด่าง

ในการหาค่า calorimeter constant หรือค่า heat capacity of calorimeter นั้น ก็เพื่อต้องการที่จะทราบว่า calorimeter ที่นำมาใช้ในการทดลองนั้นมีความจุความร้อนเท่าใด โดยลักษณะที่อุณหภูมิของน้ำเย็นเพิ่มขึ้น หรือขณะที่อุณหภูมิของน้ำร้อนลดลง แล้วแต่กรณี การหาค่า calorimeter constant โดยใช้น้ำร้อนและน้ำเย็นมาผสมกันนั้น ก็เพื่อให้สะดวกและเป็นการประหยัดสารเคมีด้วย จากการหาค่า calorimeter constant ของ calorimeter A นั้นปรากฏว่าใกล้เคียงกับ $11.2 \pm 0.8 \text{ cal.deg}^{-1}$ ซึ่งได้จากผลเฉลี่ยของการทดลอง 8 ครั้ง (ดังกล่าวไว้หน้า 36-37) แต่ค่า calorimeter constant นี้ ก็คือขณะที่อุณหภูมิของน้ำเย็นเพิ่มขึ้นเท่านั้น ดังนั้นค่า calorimeter constant นี้ จึงนำเอาไปใช้ได้ไม่ว่าในกรณีใด ๆ system นั้นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียงอย่างเดียว

สำหรับ calorimeter B นั้น ให้นำค่า calorimeter constant ไว้หลายค่า และ plot graph แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง calorimeter constant กับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและลดลง ไว้ในรูป graph หน้า 188-189 ทั้งนี้เพราะว่าต้องการที่จะนำเอา calorimeter B นี้ไปทดลอง ทั้งใน system ที่ให้ความร้อนออกมา และดูดความร้อนเข้าไป โดยนำค่า calorimeter constant ที่หาค้นหาอุณหภูมิของน้ำเย็นเพิ่มขึ้น ไปใช้ใน system ที่ให้ความร้อนออกมา และนำเอาค่า calorimeter constant ที่หาค้นหาอุณหภูมิของน้ำร้อนลดลง ไปใช้ใน system ที่ดูดความร้อนเข้าไป นอกจากนี้จากกราฟหน้า 188-189 ก็ยังสามารถที่จะหาค่า calorimeter constant มาใช้เพื่อชดเชยค่ากับการอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดของแต่ละ system ได้ จากการหาค่า calorimeter constant โดยวิธีนี้จะเห็นว่าค่า calorimeter constant ที่ได้จะแปรผันอย่างผกผันกับการอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ทั้งนี้เพราะว่าการหาค่า calorimeter constant นั้นคิดต่ออุณหภูมิ 1°C ที่เปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นถ้า ΔT มากแล้ว ก็จะทำให้ค่า calorimeter constant มีค่าน้อย และเมื่อค่า ΔT มีค่าน้อย ก็จะทำให้ค่า calorimeter constant มีค่ามาก (ดูกราฟ หน้า 188-189)

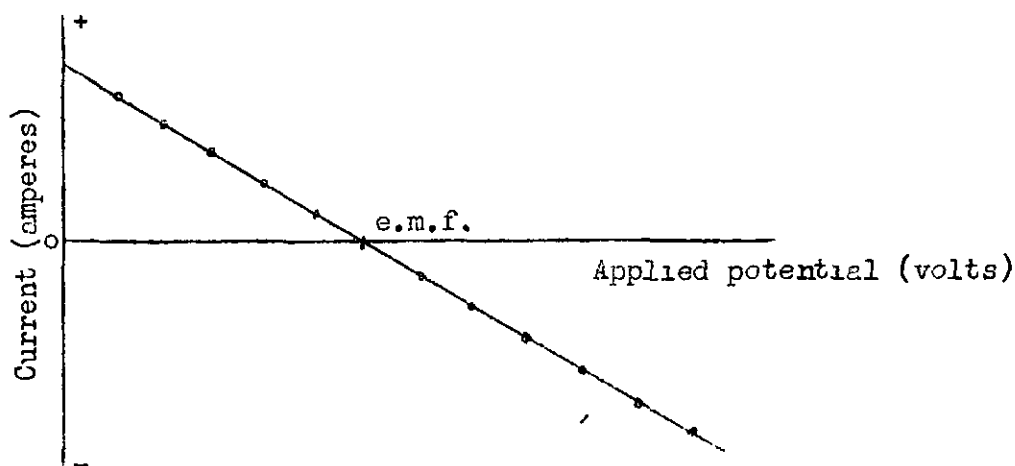
ดังนั้นการหาค่า calorimeter constant ตามวิธีการที่ได้กับ calorimeter B จึงควรที่จะนำมาใช้มากกว่าในกรณีของ calorimeter A

1.2 การสร้างเครื่องมือสำหรับใช้ศึกษาพลังงานไฟฟ้า

เครื่องมือที่ใช้ในการทดลองหาพลังงานไฟฟ้า ที่นำมาใช้ครั้งนี้ ได้พยายามดัดแปลงเครื่องมือบางอย่างที่มีขายในท้องตลาดที่เห็นว่าไม่เหมาะสมเกินไป ในการสร้างเครื่องมือขึ้นมานี้ ก็อาศัยหลักว่า เมื่อ apply voltage ส่วนทางกับทิศทางของแรงเคลื่อนไฟฟ้า (electromotive force) ของ unknown cell ถ้า applied voltage มีค่าน้อยกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ unknown cell แล้วจะมีกระแสไหลออกจาก unknown cell แต่ถ้า applied voltage มีค่ามากกว่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ unknown cell แล้ว จะทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลเข้าสู่ unknown cell และเมื่อ apply voltage ให้มีค่าเท่ากับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ unknown cell พอดี จะทำให้ไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรเลย

ถ้าเปลี่ยนค่า applied voltage ไปอีกหลาย ๆ ค่า ในแต่ละค่านี้นี้ก็จะทำให้สามารถอ่านค่ากระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรได้ และเมื่อนำเอาค่า applied voltage กับค่ากระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ใน

แต่ละครั้งมาเขียนกราฟ ก็จะทำให้ได้กราฟเป็นเส้นตรง จุดที่เส้นกราฟตัดเส้นแกนที่แสดง applied voltage (กระแสมาเป็นศูนย์) ก็คือค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ unknown cell นั้นเอง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7

การเปลี่ยนแปลงของ applied voltage นี้ใช้หลักการของ potentiometer ซึ่งจากกฎของโอห์ม (ohm) จะได้ว่า

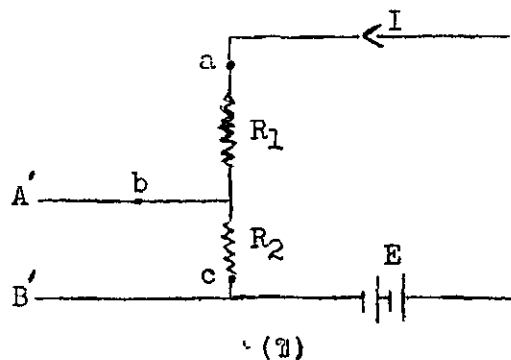
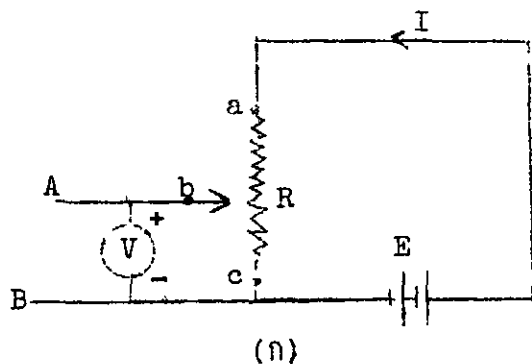
$$V = IR$$

เมื่อ $V =$ Voltage หรือความต่างศักย์ในวงจร

$I =$ กระแสในวงจร

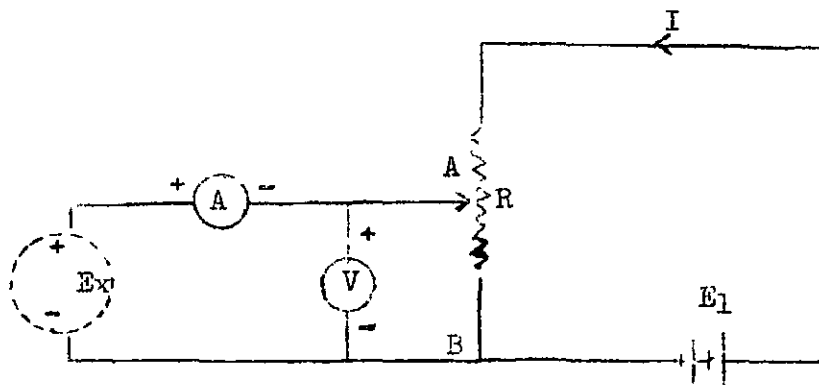
$R =$ ความต้านทาน

ถ้าค่า I ในวงจรมีค่าคงที่ค่า V จะแปรผันโดยตรงกับค่า R หรือ $V \propto R$



รูปที่ 8

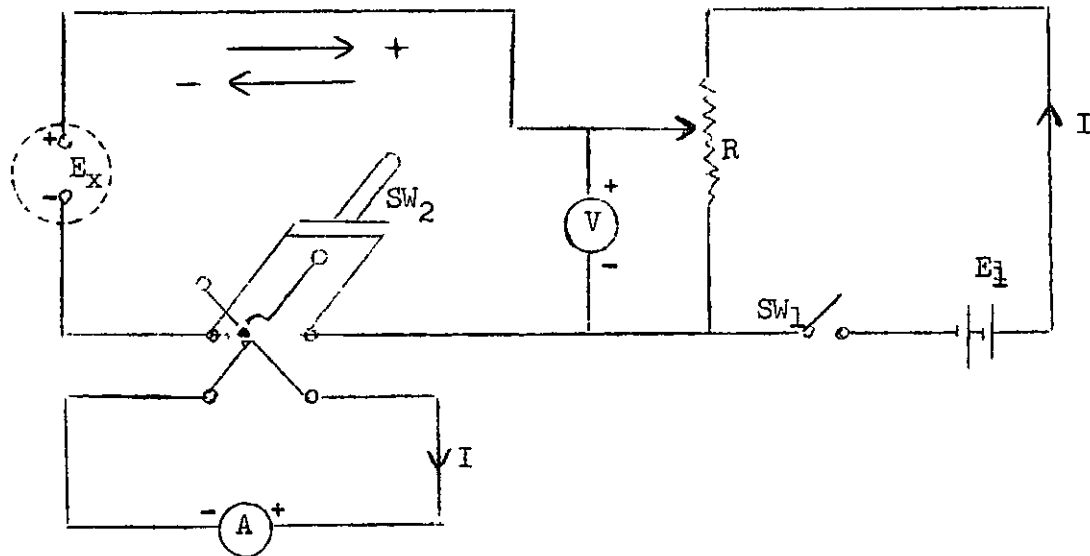
พิจารณาวงจร ก. ในรูปที่ 8 แล้วจะเห็นว่า R เป็นความต้านทานที่เปลี่ยนค่าได้ (variable resistor) ซึ่งทำหน้าที่เป็น potentiometer วงจร ก. เติบมกับวงจร ข. ในรูปที่ 8 ได้ โดย $R_1 + R_2 = R$ และค่า R นี้คงที่ ถึงแม้จะจากกฎของโอห์ม (ohm) จะทำให้กระแสในวงจรมีค่าคงที่ด้วย แต่อัตราส่วน $R_1 : R_2$ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ R_2 เปลี่ยนค่าได้จาก 0 ถึง R เพราะฉะนั้น voltage drop บน R_2 ก็คือ $IR_2(V)$ หรือก็คือ ความต่างศักย์ระหว่าง A กับ B ซึ่งก็คือความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับ B ในวงจร ก. นั่นเอง ซึ่ง voltage อันนี้จะเปลี่ยนแปลงไปกับค่าของ R_2 จากวงจร ก. ถ้าเลื่อนจุด b ของ potentiometer, R ไปทางจุด a ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับ B ก็จะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเลื่อน b มาทางจุด c ค่าความต่างศักย์ระหว่างจุด A กับ B ก็จะลดลง ถ้าถ้าวoltmeter ระหว่างจุด A กับ B ก็จะสามารถอ่านค่าความต่างศักย์ระหว่าง A กับ B ได้ และถ้าทิศทางของกระแสเป็นไปดังรูปที่ 8 แล้วจุด A ก็จะมีศักย์สูงกว่าจุด B ก็จุด A จะเป็นบวก (+) เมื่อเทียบกับ B หรือจุด B จะเป็นลบ (-) เมื่อเทียบกับจุด A



รูปที่ 9

ถ้าต่อวงจรดังรูปที่ 9 โดยต่อจุด A เข้ากับขั้วบวกของ unknown cell และให้ขั้วลบของ ammeter ต่อจุด B เข้ากับขั้วลบ ก็จะเป็นการ apply voltage ให้แก่ cell โดย voltage ระหว่างจุด A กับ B จะสวนทิศทางกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าของ unknown cell ซึ่งถ้า voltage ที่ apply เข้าไปใน cell จะอ่านได้จาก voltmeter และกระแสที่ไหลออกหรือไหลเข้า unknown cell จะอ่านได้จาก ammeter ดังนั้น ammeter จะต้องเป็นชนิดที่อ่านได้ทั้งค่าบวกและค่าลบ ทั้งค่าที่อ่านได้จาก ammeter และ voltmeter จะสามารถนำไปเขียนกราฟได้ตามรูปที่ 7 หน้า 61

แต่ถ้าเป็น ammeter ชนิดที่อ่านได้เฉพาะค่าบวกเพียงอย่างเดียว ก็สามารถดัดแปลงให้อ่านกระแสที่ไหลกลับได้ โดยใช้ reversing key ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10

จากรูปที่ 10 ถ้าเลื่อน SW_2 ไปอยู่ในตำแหน่งบวก (+) ก็อ่านค่ากระแสเป็นบวก (+) ก็กระแสไหลออกจาก unknown cell แต่ถ้าเลื่อน SW_2 ไปอยู่ในตำแหน่งลบ (-) ก็อ่านค่ากระแสเป็นลบ (-) ซึ่งแสดงว่ากระแสไหลเข้า unknown cell

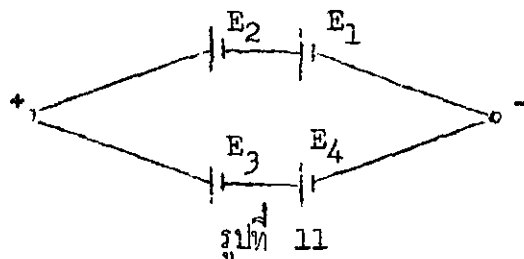
อุปกรณ์นำมาใช้ประกอบวงจร

อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่นำมาใช้ครั้งนี้ ยึดหลักว่าต้องมีราคาถูก และขนาดกระทัดรัด ดังนั้นอุปกรณ์บางอย่าง เมื่อซื้อมาแล้วจึงมีความจำเป็นต้องดัดแปลงบ้าง เพื่อที่จะทำให้มีความไวต่อที่จะใช้ในการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม ทั้งนี้เพราะว่า electrochemical cell ที่จะนำมาศึกษานั้น เมื่อวัดด้วย multimeter อยู่แล้ว ปรากฏว่ามีกระแสไหลในวงจรน้อยมาก ซึ่งเมื่อวัดด้วย ammeter, 0-300 m.A. ที่หาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาดและราคาถูกแล้ว แทนจะอ่านค่ากระแสในวงจรนี้ไม่ได้เลย ผู้เขียนจึงได้ใช้ voltmeter, 0-10.0 v. ของบริษัท Hiaki ราคา 90 บาท มาดัดแปลงใช้เป็น ammeter แทน เพราะโดยทฤษฎีแล้ว voltmeter นั้นมักจะสร้างให้มีความไวต่อกระแสมากกว่า ammeter และไม่ควรมีกระแสไหลผ่านเลย แต่โดยทางปฏิบัติแล้วเราทำไม่ได้ จะแก้ไข

ได้ก็เพียงแต่ เขายามให้กระแสไหลผ่านโดยที่สุกเท่านั้น อย่างไรก็ตามผู้เขียนก็ใช้ voltmeter, 0-10.0v. มาเกาะเอา series resistor ออก แล้วนำไปทดลองวัดกระแสจาก electrochemical cell ๓ ซึ่งก็ปรากฏว่ามีความไวพอที่จะใช้ในการทดลองได้ และจากการเทียบ scale ของ voltmeter ที่แก้ไขเป็น ammeter แล้ว ตามวิธีที่กล่าวไว้หน้า 27-28 ปรากฏว่าเต็ม scale ของ voltmeter นี้จะเท่ากับ 1.0 m. แอมป์ ผู้เขียนจึงใช้ voltmeter แบบนี้เป็น ammeter ที่มี scale 0-1.0 m. สำหรับวัดใช้แบ่ง scale ก็ใช้ขีดเดิมของ voltmeter, 0-10.0 v. ส่วน voltmeter ที่ใช้เป็น voltmeter โดยตรงนั้น ก็ใช้ voltmeter ที่มี scale 0-3.0 v. ของบริษัท Hiaki ราคา 90 บาท ที่หาซื้อได้ง่ายตามท้องตลาด เหตุที่ใช้ voltmeter ที่มี scale 0-3.0 v. นี้ เพราะว่าโดยปกติแล้วค่า voltage ของ electrochemical cell ที่จะนำมาทำการทดลองศึกษานั้นมีค่าไม่เกิน 3.0 volts

สำหรับการ apply voltage ก็ใช้หลักของ potentiometer (ดังรายละเอียดในหน้า 61-62) เพื่อแบ่ง voltage ตามที่ต้องการ โดยใช้ variable resistor ต่ออนุกรมกับ battery 3.0 volts (ใช้ถ่านไฟฉายขนาด 1.5 volts มาต่อแบบอนุกรม) และ voltage ที่ apply ให้แก่ cell นั้นต่อออกจาก tap กลางของ variable resistor กับขั้วปลายอีกข้างหนึ่ง ซึ่ง tap กลางนี้สามารถเลื่อนไปมาได้ เพื่อใช้ปรับ voltage ตามที่ต้องการ และการใช้ variable resistor ชนิด wire wound ที่มีค่า 25 ohms นั้นก็เพื่อให้การปรับค่า voltage เป็นไปอย่าง ค่อยเนื่องและละเอียด เพราะถ้าใช้ค่า ohm น้อย จะทำให้การปรับ voltage เป็นไปด้วยความ ล้มเหลวหรือไม่ได้เลยสำหรับค่า voltage เพียง 3.0 volts

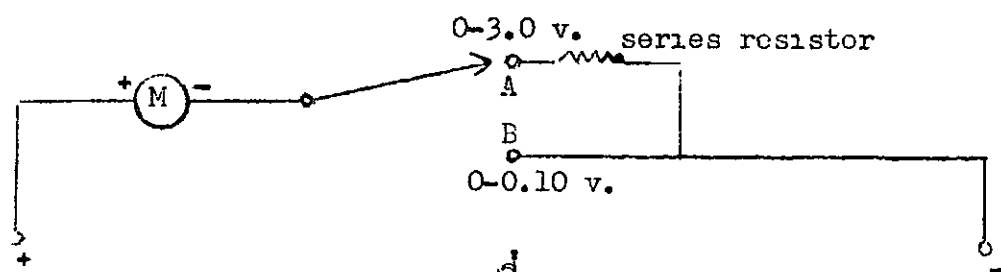
ในการใช้ battery เพียง 3.0 volts นั้น ก็เพราะว่าตามปกติ electrochemical cell ที่นำมาทำการศึกษานั้นมีค่า voltage ไม่เกิน 3.0 volts อย่างไรก็ตาม ถ้าเราทราบว่า electrochemical cell นี้มีค่า voltage ไม่เกิน 1.5 volts เราก็อาจใช้ถ่านไฟฉายก้อนเดียว ที่มี voltage 1.5 volts ก็ได้ แต่ในการสร้างเครื่องมือนี้ใช้ถ่านไฟฉายขนาด 1.5 volts ทั้งหมด 4 ก้อน มาต่อกันแบบผสม ดังรูปที่ 11



ทั้งนี้ เพื่อให้ถ่านไฟฉายใช้ได้นาน และเพื่อให้เหมาะสมกับกลองถ่านไฟฉายที่มีขายอยู่ตามท้องตลาดโดยทั่ว ๆ ไปอีกด้วย

ในการใช้ reversing key นี้ เนื่องจากมีการทดลองบางตอนที่ต้องการวัดกระแสซึ่งไหลออกจาก electrochemical cell และมีบางตอนที่ต้องการวัดกระแสที่ไหลเข้าไปใน electrochemical cell ที่นำมาทดลองศึกษา ดังนั้น ammeter ที่ใช้วัด จึงควรเป็นชนิดที่มีขีด scale ศูนย์อยู่ตรงกลางของ scale ทั้งหมด ซึ่งจะทำให้เข็มของ ammeter เบนไปได้ทั้งทางซ้ายและขวา แต่ ammeter ที่ได้ดัดแปลงมาจาก voltmeter นั้น ขีด scale ศูนย์ไม่ได้อยู่ตรงกลาง เข็มของ ammeter นี้จึงเบนไปได้ทางเดียวเท่านั้น เพื่อไม่ให้เสียเวลาในการสลับขั้วของ ammeter ไปมา จึงใช้ reversing key เข้าช่วย เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการทดลอง นอกจากนี้ยังเป็นการประหยัดอีกด้วยทางหนึ่ง เพราะ ammeter ที่สามารถเบนไปได้ทั้งทางซ้ายและทางขวานั้น มีราคาแพง

ในบางกรังค่า voltage ของ electrochemical cell ที่นำมาศึกษานั้นมีค่าต่ำมาก เมื่อใช้ voltmeter ขนาด 0-3.0 v. วัดแล้วไม่สามารถจะอ่านค่าได้ละเอียดอย่างเพียงพอ ผู้เขียนจึงนำเอา voltmeter อันนี้มาดัดแปลงแก้ไขเล็กน้อย โดยตัด series resistor ตรงขั้วต่อระหว่างขั้วของ meter กับ series resistor แล้วต่อ switch แบบ 2 ทาง เข้าแทนตรงรอยตัด โดยการต่อปุ่มกลางเข้ากับขั้วหนึ่งของ meter ส่วนอีก 2 ปุ่มต่อเข้ากับปลายทั้งสองข้างของ series resistor ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12

จากรูป ถ้าเลื่อน switch ไปที่ตำแหน่ง A ก็หมายความว่าเราใช้ scale 0-3.0 volts และถ้าเลื่อน switch ไปที่ตำแหน่ง B ก็หมายความว่าเราใช้ scale 0-0.10volts ซึ่งจะเห็นว่าสามารถอ่าน scale ได้ละเอียดยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามในการเทียบ scale ของ voltmeter ใหม่จาก 0-0.10volts (ดังกล่าวไว้ในหน้า 28) และการแบ่งขีดบนอก scale ต่าง ๆ นั้น จะมี

ความคลาดเคลื่อน (error) มากกว่า scale อันเดิม คือ 0-3.0 v. เพราะความต้านทานของ voltmeter น้อยกว่าเดิมมาก เนื่องจากได้ตัดเอา series resistor ออกไป

2. การทดลองหาพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี

เมื่อเราพูดถึงปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction) คือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (Chemical change) เรามักจะกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงาน (Energy change) เข้ามาเกี่ยวข้องกับควมเสมอ เพราะการเปลี่ยนแปลงของทั้งของอย่างนี้มักจะเกิดควบคู่กันไปตลอดเวลา พลังงานที่เข้ามาเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาเคมีนี้อาจจะอยู่ในรูปพลังงานความร้อน (Thermal energy or Heat energy) พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) พลังงานกล (Mechanical energy) หรือพลังงานแสง (Light or Radiant energy) ทั้งนี้เนื่องจากพลังงานสามารถจะเปลี่ยนจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่งได้

ในที่นี้ ผู้เขียนจะขอกล่าวถึงการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนและพลังงานไฟฟ้าอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี ว่ากล่าวถึงเฉพาะในแง่ของ Thermochemistry และ Electrochemistry ซึ่งเกี่ยวกับการศึกษากันมากในครั้งนี้นี้เท่านั้น โดยจะกล่าวในแต่ละตอนดังนี้

2.1 Thermochemistry

Barrow¹ ได้ให้ความหมายของวิชา Thermochemistry ไว้ว่า เป็นวิชาที่เกี่ยวข้องกับการวัดหรือการคำนวณหาปริมาณความร้อนที่ถูกดูดเข้าไป หรือให้ออกมาในปฏิกิริยาเคมี ซึ่งวิชานี้มีแนวโน้มไปเกี่ยวกับข้อหนึ่งของวิชา Thermodynamics ในการศึกษาปฏิกิริยาเคมีนั่นเอง

ในปี ค.ศ. 1780 Lavoisier และ Laplace² นักเคมีชาวฝรั่งเศส ได้ศึกษากันว่าเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงความร้อนอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงทางเคมี และได้สรุปผลจากข้อมูลการทดลองว่า ปริมาณความร้อนที่นำไปใช้ทำปฏิกิริยาเคมีชนิดหนึ่งสลายตัวนั้นจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ให้ออกมาเมื่อเกิดสารประกอบชนิดนั้นขึ้นเสมอ ซึ่งถือว่าเป็นกฎข้อแรกของวิชา Thermochemistry (The first law of Thermochemistry) จะเห็นว่ากฎข้อนี้เหมือนกับกฎอนุรักษ์พลังงาน (The law of

¹Gordon M. Barrow, Physical Chemistry, (2nd, ed.), p.151.

²Frederick H. Getman, Outlines of Theoretical Chemistry, (6th, ed.), p.235.

the Conservation of Energy) ที่กล่าวว่า เลังงานในจักรวาลไม่สูญหายไปไหน เพียงแต่จะเปลี่ยนจากพลังงานรูปหนึ่งไปเป็นพลังงานอีกรูปหนึ่งเท่านั้น ซึ่ง R.J. Mayer¹ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ได้ตั้งกฎขึ้นในปี ค.ศ.1842

ในปี ค.ศ.1840 Hess² ได้พบว่าในปฏิกิริยาเคมีหนึ่ง ๆ ที่ความดันคงที่ ปริมาณความร้อนที่ให้ออกมาหรือถูกเข้าไปทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับสถานะ และเกี่ยวข้องกับ initial state และ final state ของปฏิกิริยาเคมีนั้น ๆ เท่านั้น แต่ในกรณีที่ปฏิกิริยาเคมีใด ๆ เกิดขึ้นจากผลรวมของปฏิกิริยาอื่นต่าง ๆ หลายขั้นแล้ว ผลรวมทางพีชคณิตของค่าปริมาณความร้อนของขั้นต่าง ๆ นั้นทั้งหมดจะมีค่าเท่ากับปริมาณความร้อนทั้งหมดของปฏิกิริยาเคมีนั้น ๆ การสรุปกฎเกณฑ์นี้เรียกว่า Hess's Law of Constant Heat Summation จากกฎนี้สามารถนำไปใช้คำนวณหาปริมาณความร้อนที่ให้ออกมาหรือถูกเข้าไปของปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ที่ไม่สามารถจะหาค่าปริมาณความร้อนโดยตรงจากปฏิกิริยาเคมีได้

ในการวัดหรือหาค่าการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนนั้นเราสามารถจะวัดได้โดยตรง จากการที่ให้อำนาจปฏิกิริยาใน calorimeter หรือใน bomb calorimeter ในกรณีสารที่อยู่ในสภาพแก๊ส แล้ววัดอุณหภูมิของปฏิกิริยาและวัดปริมาตรที่เปลี่ยนไป หากหา heat capacity ของ calorimeter แล้วนำค่าเหล่านี้ไปคำนวณหาปริมาณความร้อนของปฏิกิริยาต่อไป โดยทั่ว ๆ ไปแล้วการวัดปริมาณความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีนั้น จะทำการศึกษาอยู่ 2 conditions ก็คือ³

1. ที่ปริมาตรคงที่ (Constant volume)
2. ที่ความดันคงที่ (Constant pressure)

ในกรณีที่ปริมาตรคงที่นั้น การเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมี จะเป็นผลมาจากความแตกต่างระหว่างผลรวมของพลังงานที่อยู่ในของ products (internal energy of products) กับพลังงานที่อยู่ในของ reactants (internal energy of reactants)

¹Frances S.K. Sterrett, A Laboratory Investigation of Concepts in Chemistry, p.102.

²Carl F. Prutton, Fundamental Principles of Physical Chemistry, (6th, ed.), p.267.

³Ibid. p.268.

แต่ในกรณีความดันคงที่ นอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานที่อยู่ใน products และ reactants แล้ว ยังมีการเปลี่ยนแปลงของ surrounding เช่น การเปลี่ยนแปลงปริมาตรของ system ด้วย อย่างไรก็ตามในการที่วัดปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีให้ได้ผลออกมาอย่างถูกต้องที่สุดนั้น จะต้องอาศัยทั้งการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่เกิดขึ้นภายใน calorimeter และกฎข้อแรกของ Thermodynamics ที่กล่าวว่า พลังงานไม่สามารถจะสร้างขึ้นหรือทำลายให้สูญหายไปได้ ซึ่ง Herman Ludmig Ferdinand Von Helmholtz¹ ได้ตั้งกฎขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1847 จากกฎข้อแรกของ Thermodynamics นี้ ถ้าเราใส่ปริมาณความร้อน q แก่ system แล้วก็จะทำให้ internal energy ของ system เพิ่มขึ้น และอาจจะมีการทำงานของ system เกิดขึ้นด้วย แล้วแต่ condition ที่กำหนดให้ ซึ่งอาจจะพิจารณาในแต่ละ condition ดังต่อไปนี้

1. กำหนดให้ปริมาตรคงที่ (Constant volume)

ถ้าให้ q = ปริมาณความร้อนที่ให้แก่ system

$(q)_V$ = ปริมาณความร้อนที่ปริมาตรคงที่

ΔE = พลังงานภายในของ system ที่เปลี่ยนแปลงไป

ดังนั้น $(q)_V = \Delta E$

จากสมการนี้ แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นใน calorimeter อันเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน (ΔE) ของปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (physical transformation) ที่ศึกษาที่ condition ปริมาตรคงที่ (constant volume)

2. กำหนดให้ความดันคงที่ (Constant pressure)

เมื่อเรากำหนดให้ความดันคงที่แล้ว การเปลี่ยนแปลงความร้อนใน calorimeter ที่เกิดขึ้นนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในของ system และการทำงานของ system ซึ่งอาจจะเป็นการหดตัว (contraction) หรือการขยายตัว (expansion) ภายใน system เข้ามาเกี่ยวข้องกับ

เมื่อได้ ΔH = total energy change (enthalpy change)

ΔV = ปริมาตรที่เปลี่ยนแปลง

P = ความดัน

จะได้ $\Delta H = \Delta E + P\Delta V$

¹Alexander Findlay, Introduction to Physical Chemistry, p.256.

จะเห็นว่า ΔH กับ ΔE จะแตกต่างกันเล็กน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่า $P\Delta V$ สำหรับในกรณีของของแข็งและของเหลวนั้น ไม่จำเป็นที่จะต้องนำเอา ΔV มาพิจารณาหรือเข้ามาเกี่ยวข้องกับการทดลองและคำนวณหาค่า enthalpy change (ΔH) ของปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ เพราะในกรณีนี้มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตร (ΔV) น้อยมาก ดังนั้นในการศึกษาหาค่าพลังงานความร้อนเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี ที่กำหนดให้ปริมาตรคงที่ และที่กำหนดให้ความดันคงที่แต่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรของ system น้อยมากนั้น ค่า enthalpy change (ΔH) ก็คือค่า internal energy change (ΔE) นั่นเอง หรือ ΔH เท่ากับ ΔE

การทดลองหาค่า enthalpy change (ΔH) ของปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี โดยปกติแล้วใช้ calorimeter ธรรมดา แต่ในกรณีที่สารที่ทำปฏิกิริยากันนั้นอยู่ในสถานะแก๊สแล้ว ก็ใช้ bomb calorimeter แทน สำหรับการใช้ calorimeter มาทดลองหาค่าพลังงานความร้อนเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีนั้น จะต้องหาค่า calorimeter constant หรือ heat capacity of calorimeter เสียก่อน แล้วจึงนำเอาสารที่ทราบปริมาณหรือปริมาตร อุณหภูมิเริ่มต้นของสารก่อนทำปฏิกิริยา และความเข้มข้นที่แน่นอนมาทำปฏิกิริยากันภายใน calorimeter แล้ววัดอุณหภูมิของปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไป หลังจากนั้นก็นำเอาค่าต่าง ๆ เหล่านี้มาคำนวณหาค่า enthalpy change (ΔH) ของปฏิกิริยาต่อไป

สำหรับในการทดลองครั้งนี้ ผู้เขียนได้ใช้ calorimeter ที่สร้างขึ้นเอง (ดังรายละเอียดการสร้าง calorimeter หน้า 26-27) เพื่อทดลองหาค่า enthalpy change (ΔH) ของปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. Enthalpy Change or Heat of Neutralization

ในปี ค.ศ. 1840 Hess¹ ได้ค้นพบว่า เมื่อเอาสารละลายเจือจางของกรดแก่ (strong acid) มาผสมกับสารละลายเจือจางของเบสแก่ (strong base) แล้ว จะให้ค่าปริมาณความร้อนออกมาจำนวนหนึ่ง ซึ่งมีค่าเกือบคงที่ คือประมาณ $-13.8 \text{ kcal.mole}^{-1}$

Goddard² ได้ให้ความหมายของคำว่า heat of neutralization เอาไว้ว่า

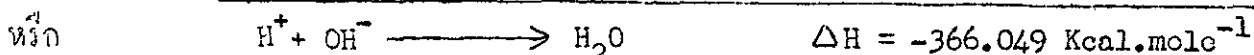
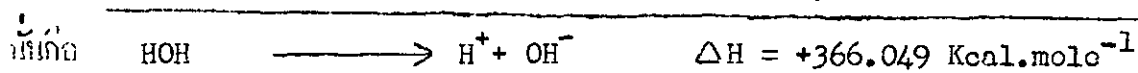
¹Frederick H. Getman, op. cit., p.242.

²F.W. Goddard, Higher Chemical arithmetic, (2nd, ed.), p.190.

หมายถึงปริมาณความร้อนที่ไหลออกมา (evolved) เมื่อ 1 กรัม - สมมูลของเบสแก่ (strong base) ชนิดหนึ่งถูกทำให้เป็นกลางโดย 1 กรัม - สมมูลของกรดแก่ (strong acid) ชนิดหนึ่ง ถ้า heat of neutralization ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดแก่และเบสแก่ที่อยู่ในสารละลายที่เจือจางนี้ จะเท่ากับประมาณ $-13.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ทั้งนี้เพราะว่าทั้งกรดแก่และเบสแก่สามารถที่จะแตกตัวเป็น hydroxyl ion (OH^-) และ hydrogen ion (H^+) ได้อย่างสมบูรณ์ก่อนที่จะรวมกันกลายเป็นโมเลกุลของน้ำ ซึ่งเราอาจจะเขียนสมการเคมีแสดงปฏิกิริยา neutralization ในกรณีที่เป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดแก่กับเบสแก่ได้ง่าย ๆ ดังนี้



ค่า ΔH ของปฏิกิริยา neutralization ข้างบนนี้ เป็นค่าที่ของรับกันอยู่ในขณะนี้ แต่ค่านี้จะแตกต่างกับค่า ΔH ของปฏิกิริยา neutralization ที่เกิดขึ้นในสถานะแก๊ส ดังแสดงให้เห็นดังต่อไปนี้



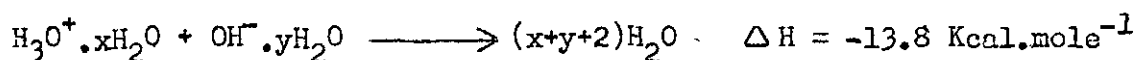
นี่คือค่า heat of neutralization ที่เกิดขึ้นในสถานะแก๊สเท่ากับ $-366.049 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และค่านี้จะแตกต่างกับค่า heat of neutralization ที่ยอมรับกันอยู่ขณะนี้ คือ $-13.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ อยู่เท่ากับ $-342.249 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ซึ่งจากค่าที่แตกต่างกันนี้ Getman³ ได้กล่าวว่า เป็นค่าที่ได้จากผลรวมของค่า heat of hydration ของ hydroxyl ion และ hydrogen ion ในการที่มันเกิดเป็น hydrated hydroxyl ion และ hydrated hydrogen ion ตามลำดับนั่นเอง

¹Frederick H. Getman, op. cit., p.241.

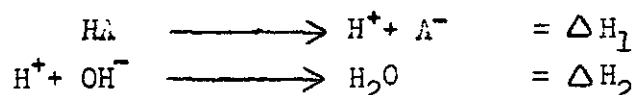
²Russell F. Bichowsky and Frederick Rossini, The Thermochemistry of the Chemical Substance, p.20.

³Frederick H. Getman, op. cit., p.616.

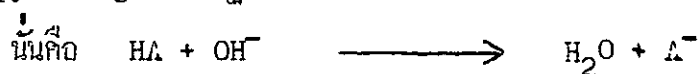
ถึงแม้ปฏิกิริยา neutralization ที่เกิดขึ้นใน calorimeter ในสถานะของสารละลาย ที่เจือจางนั้น จะต้องเกี่ยวข้องกับ hydrated ions ทั้งสองนี้เสมอ จากเหตุผลอันนี้ สมการเก็บ แรกของการเกิดปฏิกิริยา neutralization จึงเขียนได้ใหม่ดังต่อไปนี้¹



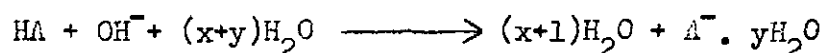
ในกรณีปฏิกิริยา neutralization ที่เกิดจากการก่อกวนกับเบสแก่ หรือกรดแก่กับเบสอ่อน นั้น ถ้า heat of neutralization ในกรณีเหล่านี้จะมีค่าแตกต่างไปจากค่า $-13.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ทั้งนี้เนื่องจากปฏิกิริยาต่าง ๆ เหล่านี้ จะคงมีการนำเอาพลังงานความร้อนจำนวนหนึ่งไปทำให้เบส อ่อน (weak base) แตกตัวไปเป็น hydroxyl ion (OH^-) หรือไปทำให้กรดอ่อน (weak acid) แตกตัวไปเป็น hydrogen ion (H^+) หรือทั้งสองอย่างแล้วแต่กรณี ซึ่งเราเรียกพลังงานจำนวนนี้ว่า heat of ionization ถึงเช่นปฏิกิริยา neutralization ระหว่างกรดอ่อนกับเบสแก่เช่นนี้ อาจ จะเขียนสมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาได้ดังนี้²



สำหรับค่า ΔH_1 นั้นจะเกี่ยวข้องกับ การสลายของ bond ของกรดอ่อน (weak acid) ซึ่ง จะป็นเครื่องหมายตรงข้ามกับค่า ΔH_2 ดังนั้นผลรวมของ ΔH_1 กับ ΔH_2 ตามทางที่เขาคิดก็คือค่า enthalpy change ของปฏิกิริยา neutralization นั้นเอง



หรืออาจจะเขียนในรูป hydrated ion ได้ดังนี้



ผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองศึกษาหาค่า heat of neutralization นั้น จะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาระหว่าง สารละลายของกรดกับสารละลายของเบสโดยตรง ดังนั้นผู้เขียนจึงได้ทำการทดลองเพื่อหาค่า

¹Frederick H. Getman, op. cit., p.616.

²J.G. Miller, A.I. Lowell and W.W. Lucasse, J. Chem. Educ., 24, 121 (1947).

heat of neutralization จากปฏิกิริยาระหว่างกรดแก่กับเบสแก่ กรดอ่อนกับเบสอ่อน กรดอ่อนกับเบสแก่ และกรดแก่กับเบสอ่อน แล้วคำนวณหาค่า heat of neutralization โดยคิดต่อหนึ่ง mole ของน้ำที่เกิดขึ้น ซึ่งจากการทดลองใน system ต่าง ๆ (หน้า 37-39) ได้ผลการทดลองดังตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 13 แสดงค่า Heat of Neutralization (ΔH) ที่ได้จากการทดลองโดยใช้ปริมาตรของ Reactant 50 ml. เท่ากัน และค่าที่รายงานไว้ใน Literature

System	$-\Delta H$, จากการทดลอง (Kcal.mole ⁻¹)	$-\Delta H$, จาก Literature (Kcal.mole ⁻¹)
NaOH(aq.), 1.0M-H ₂ SO ₄ (aq.), 0.5 M	14.29±0.11	14.3±0.7*
NaOH(aq.), 0.5M-HCl(aq.), 0.5 M	13.69±0.33	13.84**
NaOH(aq.), 0.5M-HNO ₃ (aq.), 0.5 M	13.59±0.36	13.76**
KOH(aq.), 0.5M-HCl(aq.), 0.5 M	13.34±0.25	13.42***
NaOH(aq.), 1.0M-CH ₃ COOH(aq.), 1.0M	13.23±0.18	13.42**
NaOH(aq.), 1.0M-KHCO ₃ (aq.), 1.0 M	9.88±0.14	9.18±1.2*
NH ₃ (aq.), 1.0M-CH ₃ COOH(aq.), 1.0M	12.68±0.11	12.04**
NH ₃ (aq.), 0.5M-HCl(aq.), 0.5 M	12.39±0.19	12.76**

ในการทดลองศึกษาหาค่า heat of neutralization ครั้งนี้ กำหนดให้ความเข้มข้นที่ประมาณ 1 บรรยากาศ แต่เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นทั้งหมด มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรน้อยมาก เพราะสารที่ทำปฏิกิริยากันทั้งหมดอยู่ในสถานะของเหลว ดังนั้นในการคำนวณหา

*R.J. Kobes, M.K. Dorfman and T. Mathia, J. Chem. Educ., **39**, 90 (1962).

**G.H. Aylward and T.J.V. Finckley, Chemical Data Book, (2nd, ed.), p.68.

***H.A. Neidig, Teachers' Guide to Investigating Chemical System, p.22-10.

heat of neutralization ของปฏิกิริยาต่าง ๆ ครั้งนี้ จึงไม่ได้นำเอาค่า $P\Delta V$ หรือค่า w (work done) เขามาเกี่ยวข้องกับ คำนวณมาแล้วในภาคทฤษฎี นั่นคือ $\Delta H = \Delta E$

จากข้อมูลที่ส่งไว้ในตารางที่ 13 หน้า 72 จะเห็นว่าค่า heat of neutralization ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดแก่กับเบสแก่ ในการทดลองครั้งนี้ มีค่าประมาณ $-13.6 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ส่วนค่า ΔH ที่รายงานไว้ใน literature มีค่าประมาณ $-13.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าทั้งสองนี้ใกล้เคียงกัน และทั้งค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่รายงานไว้ใน literature ในกรณีนี้จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงที่ คือ $-13.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น จากค่า ΔH เท่ากับ $-13.6 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ ก็จะนำไปสนับสนุนความคิดของ Getman ที่เขาเสนอว่าปฏิกิริยา neutralization นั้นจะเกี่ยวข้องกับการเกิด hydrated hydrogen ion และ hydrated hydroxyl ion ได้ ถึงแม้ว่าค่า ΔH นี้จะมีค่าน้อยกว่าค่า ΔH ที่ยอมรับกันอยู่ในขณะนี้บ้างเล็กน้อยก็ตาม

สำหรับค่า heat of neutralization ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดอ่อนกับเบสแก่ หรือกรดแก่กับเบสอ่อน หรือกรดอ่อนกับเบสอ่อนนั้น จะมีค่าน้อยกว่าค่า heat of neutralization ที่ยอมรับกันคือ $-13.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ เพราะในปฏิกิริยาเหล่านี้ พลังงานจำนวนหนึ่งที่เราเรียกว่า heat of ionization นั้นจะถูกนำไปใช้สลาย bond ของกรดอ่อน หรือเบสอ่อน หรือทั้ง 2 อย่างแล้วแต่กรณีดังกล่ามาแล้วหน้า 71 ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา neutralization ที่เกิดขึ้นระหว่าง hydrochloric acid ซึ่งเป็นกรดแก่ (strong acid) และถือว่าสามารถแตกตัวเป็น ions ได้ อย่างสมบูรณ์ในสารละลายที่เจือจาง กับ ammonia solution ซึ่งเป็นเบสอ่อน (weak base) จะให้ค่า heat of neutralization (ΔH) เท่ากับ $-12.76 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ถ้าหากว่า ammonia solution นั้นแตกตัวให้ hydroxyl ion (OH^-) ได้อย่างสมบูรณ์ในสารละลายที่เจือจางแล้ว ค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยานี้ก็ควรจะเท่ากับ $-13.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ แต่มีค่าเพียง $-12.76 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ เท่านั้นก็เนื่องจากในสารละลายที่เจือจางนั้น ammonia solution แตกตัวให้ hydroxyl ion (OH^-) ได้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งจะเห็นได้จากค่า dissociation constant (K_b) ของ ammonia solution ที่ 25°C เท่ากับ 1.8×10^{-5} (1) เท่านั้น ดังนั้นในการเกิด

¹Charles D. Hodgman, Handbook of Chemistry and Physics, (36th, ed.), p.1636.

ปฏิกิริยา neutralization นี้ จึงต้องมีการนำเอาพลังงานส่วนหนึ่งที่เรียกว่า heat of ionization ไปช่วยทำให้ ammonia solution แตกตัวเป็น hydroxyl ion (OH^-) ให้มากขึ้น
ถ้าให้ ΔH_i = heat of ionization เราก็สามารถจะหาค่า ΔH_1 ของ system นี้ จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Delta H_1 + (-13.8) = -12.76 \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

$$\Delta H_1 = -12.76 + 13.8 \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

$$\Delta H_1 = +1.04 \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

ถ้า $+1.04 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ นี้ก็คือ heat of ionization หรือ พลังงานความร้อน ที่นำเอาไปใช้ในการทำให้ ammonia solution แตกตัวให้ hydroxyl ion เพิ่มขึ้นนั่นเอง
ในกรณีที่ปฏิกิริยา neutralization ที่เกิดขึ้นจากกรดอ่อนกับเบสแก่ หรือกรดอ่อนกับเบสอ่อน นั้นก็สามารถอธิบายค่า heat of neutralization ที่ได้จากการทดลองและมีความน้อยกว่า heat of neutralization ที่ยอมรับอยู่ในขณะนี้นั้นได้เหตุผลเกี่ยวกับนี้ และจากเหตุผลนี้ เราอาจจะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่า heat of ionization กับค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาระหว่างกรดอ่อนกับเบสแก่ หรือกรดแก่กับเบสอ่อน ได้ดังนี้

$$\Delta H_{\text{neutralization}} = \Delta H_{\text{ionization}} + (-13.8) \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

ส่วนในกรณีปฏิกิริยาระหว่างกรดอ่อนกับเบสอ่อนนั้น ก็จะเกิดไปลักษณะเดียวกัน และค่า heat of neutralization ที่ได้จากการทดลองก็คือ ผลต่างของผลรวมค่า heat of ionization ของทั้งกรดอ่อนและเบสอ่อนกับค่า $-13.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ นั้นเอง

ถ้าพิจารณาจากค่า heat of neutralization ในตารางที่ 13 หน้า 72 จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองและค่าที่รายงานไว้ใน literature นั้นแตกต่างกันบ้างเล็กน้อย เช่น ค่า Heat of neutralization ของ system $\text{NaOH(aq.) } 1.0 \text{ M}$ กับ $\text{HCl(aq.) } 1.0 \text{ M}$ ที่ได้จากการทดลองครั้งนี้เท่ากับ $-13.69 \pm 0.33 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ แต่ที่รายงานไว้ใน literature เท่ากับ $-13.84 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ จะเห็นว่าค่าทั้งสองนี้ แตกต่างกับเพียง $-0.15 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ซึ่งถือว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก

อย่างไรก็ตามความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองหาค่า heat of neutralization ของ system ต่าง ๆ ดังแสดงไว้ในตาราง 13 หน้า 72 นั้น เกิดขึ้นเนื่องจากวิธีการทดลอง และ เครื่องมือที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นส่วนใหญ่ กล่าวคือ การทดลองโดยวิธีการละลายของกรด ลงไปผสมกับสารละลายของเบสที่อยู่ใน calorimeter นั้น ความร้อนบางส่วนของกรดก็จะหายไป หรือน้อยกว่าอุณหภูมิเริ่มต้นที่วัดเอาไว้ ซึ่งจะเป็นผลทำให้การวัดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดลด น้อยลงไปด้วย และ calorimeter ที่สร้างขึ้นมานี้เอง อาจจะเก็บความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาไว้ ได้ไม่หมด ความร้อนจึงจะเกิดการสูญเสียไปบ้าง อันจะเป็นผลทำให้การวัดอุณหภูมิจึงผิดพลาดไป

แต่ถ้ายึดถือตามความมุ่งหมายของการศึกษากันทั่วกันแล้ว ค่าความคลาดเคลื่อน (error) เหล่านี้จะมีผลต่อผลของการทดลองไม่มากนัก ผู้เขียนจึงไม่จำเป็นต้องนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือ ดังกล่าว เข้ามารวมเข้าของการศึกษากันทั่ว สำหรับอุณหภูมิห้องก็มีผลต่อผลของการทดลองน้อยมาก จะเห็นได้จากผลการทดลองของ Muller และคณะ¹ ที่ได้ทดลองหาค่า heat of neutralization ของปฏิกิริยาระหว่าง acetic acid กับ sodium hydroxide ที่อุณหภูมิ 26°C และ 29.1°C ซึ่งพบว่ามีค่าเท่ากับ $-12.65 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และ $-12.67 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ ดังนั้น ในการทดลองครั้งนี้ ผู้เขียนก็ถือว่าอุณหภูมิห้องไม่มีผลต่อผลของการทดลองอีกเช่นเดียวกัน

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองหาค่า heat of neutralization ที่เกิดจากปฏิกิริยา ระหว่างสารละลายของกรดกับสารละลายของเบสครั้งนี้ ก็จะทำให้ผู้สนใจในวิชาเคมี ได้เข้าใจถึง พื้นฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับการเกิดปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ได้เป็นอย่างดี อีกทางหนึ่ง

2. Heat of Solution and Hydration

มีสารประกอบหลายชนิดที่ประกอบไปด้วยธาตุ hydrogen และ oxygen แต่เนื่องจาก bond ที่เกิดขึ้นระหว่าง oxygen กับ Hydrogen ทั้ง 2 bond นั้นแข็งแรงมาก ดังนั้นสารประกอบ ส่วนมากที่มี oxygen และ hydrogen เป็นองค์ประกอบอยู่นั้นจะไม่อยู่ตัว เพราะ hydrogen กับ oxygen จะไปรวมตัวกลายเป็นโมเลกุลของน้ำขึ้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น อย่างไรก็ตาม

¹J.G. Muller, A.I. Lowell and W.W. Lucasso, J. Chem. Educ., 24, 121 (1947).

ก็ตามนี้อาจจะอยู่ตัวได้เหมือนกันภายใต้สภาวะที่เหมาะสมของมัน และในกรณีที่สารประกอบเหล่านี้รวมกันอยู่เป็นหมู่ๆ เราเรียกว่า hydrates¹

ในการเกิดสารประกอบ hydrates นั้นมันสามารถเกิดขึ้นได้ เนื่องจากการที่โมเลกุลของน้ำมี electron pair เหลืออยู่ทีละอะตอมของ oxygen ดังนั้นโมเลกุลของน้ำจึงสามารถจะรวมกับสารประกอบหรือ ions อื่นใดง่าย ๆ แล้วกลายเป็น hydrated salts เช่น $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ หรือกลายเป็น hydrated ion เช่น $\text{H}_3\text{O}^+ \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (hydrated hydrogen ion) เป็นต้น สารประกอบทั้งหลายที่เป็น hydrate จะดูดความชื้นเข้าไป (absorbed) เมื่อเราเอาไปละลายน้ำ แต่ถ้าเป็นสารประกอบพวก anhydrous salts จะให้ความร้อนออกมา (heat evolved) เมื่อนำเอาไปละลายน้ำ ความแตกต่างทางพีชคณิตของค่า heat of solution ของ hydrated salt กับ anhydrous salt นี้เรียกว่า heat of hydration²

ตามปกติแล้ว ความร้อนจะถูกดูดเข้าไป (absorbed) เมื่อเอาผลึกของเกลือ (crystalline salt) ไปทำให้แตกตัว (dissolve) ในตัวทำละลาย (solvent) หนึ่ง ๆ เพราะเป็นการทำให้ atom หรือ ion ที่อยู่ใน crystal lattice แยกออกจากกัน ซึ่งมันจะต้องการพลังงานจำนวนหนึ่งไปใช้ในขบวนการนี้ และถ้าในขบวนการนี้มันยังประกอบอันเข้ามาเกี่ยวข้องแล้ว ปริมาณความร้อนที่ถูกดูดเข้าไปนี้จะเท่ากับปริมาณความร้อนที่จะไปทำให้ผลึกของเกลือเกิดการหลอมตัว (fusion) และเกิดการระเหยไปอยู่ในสภาวะแก๊ส แต่ในกรณีที่มองที่ประกอบอันเข้ามาเกี่ยวข้อง และมีอิทธิพลมากกว่า ขบวนการนี้จะให้ความร้อนออกมา (heat evolved) ได้เหมือนกัน เช่นการแตกตัวเป็น ion ของสารที่เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างมาก (strong electrical attraction) ระหว่างโมเลกุลของตัวถูกละลาย (solute) กับโมเลกุลของตัวทำละลาย (solvent) ที่มี dipole moment จากแรงดึงดูดนี้จะทำให้เกิด solvated ion และโมเลกุลอื่น ๆ รวมกับให้ความร้อนออกมามากกว่า เช่นในการนำเอาผลึก sodium chloride ซึ่งมี sodium ion (Na^+) และ chloride ion (Cl^-) ยึดกัน

¹M.K. Snyder, Chemistry Structure and Reaction, p.336.

²Frederick H. Gotman, op. cit., p.242.

ค่ายแรงดึงดูดทางไฟฟ้าภายใน crystal lattice และให้ความร้อนออกมา $-184.0 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ (1)
 ดังนั้นในการที่จะแยกสารประกอบนี้ออกไปเป็น ions นั้น จะต้องใช้พลังงาน $+184.0 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
 เช่นเดียวกัน ซึ่งค่าพลังงานนี้มีค่ามากจนกระทั่งทำให้ตัวทำละลายที่เป็นพวก non-polar เช่น benzene
 หรือ carbon tetrachloride ไม่สามารถที่จะทำให้ sodium chloride แยกตัวเป็น ions ได้
 แต่สำหรับตัวทำละลายที่เป็นน้ำ ซึ่งมีค่า dipole moment เท่ากับ 1.84 Debye^2 และมีค่า
 dielectric constant ประมาณ 81 ที่อุณหภูมิของห้องนั้น³ ซึ่งจะเห็นว่าทั้งสองนี้สูงมาก
 และเมื่อพิจารณาว่า dipole moment ของน้ำนั้น แสดงว่าโมเลกุลของน้ำมีแนวโน้มที่จะรวมตัวกับ
 ion อื่น กลายเป็น hydrated ion ใ้ง่ายมาก และจากค่า dielectric constant นั้น แสดง
 ให้เห็นว่าประจุไฟฟ้าที่ต่างชนิดกัน ที่อยู่ใกล้สิ่งแวดล้อมของน้ำ จะมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันด้วยแรงเพียง
 $\frac{1}{81}$ ของแรงที่ดึงดูดกันในบรรยากาศเท่านั้น ดังนั้นเมื่อผลึกของ sodium chloride ที่มีโมเลกุลของ
 น้ำล้อมรอบอยู่ จึงสามารถที่จะแยกตัวออกเป็น ion ได้ด้วยการใช้ lattice energy หรือ crystal
 energy ของมันเองไปทำลายแรงดึงดูดที่มีอยู่ระหว่าง sodium ion (Na^+) กับ chloride ion (Cl^-)
 เท่านั้น และ ion ที่แยกตัวออกมานี้จะรวมกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็น hydrated ion คือ ion ละ
 แต่ละ ion จะติดอยู่กับจำนวนที่เป็นบวกของโมเลกุลของน้ำที่อยู่ถัดไป และนี่แนวโน้มที่จะทำให้เกิดน้ำ
 หลาย ๆ โมเลกุลติดกันเองได้ ส่วน ion บวก ซึ่งเล็กกว่า ion ละบ จะติดอยู่กับจำนวนที่เป็นลบของ
 โมเลกุลของน้ำ ดังนั้นน้ำหลาย ๆ โมเลกุลจึงรวมตัวกันแน่นกัวยตัวของมันเอง เกิดเป็น hydrate
 และอยู่ได้อย่างคงตัว (stable) โดยเฉพาะเมื่อ ion บวกมีค่า +2 และ +3 เพราะมีแรงยึดกันมาก
 ในการที่ ion บวก และ ion ละบ เกิดเป็น hydrated ion นี้ จะให้ความร้อนออกมา
 มากมาย ซึ่งเรียกว่า heat of hydration และค่า heat of hydration นี้ จะมากกว่าค่าของ
 พลังงานความร้อนที่จะไปทำให้ sodium ion (Na^+) กับ chloride ion (Cl^-) แยกออกจากกันใน
 crystal lattice ดังนั้นเมื่อเอาผลึกของ sodium chloride (NaCl) ไปทำให้แยกตัวเป็น ions

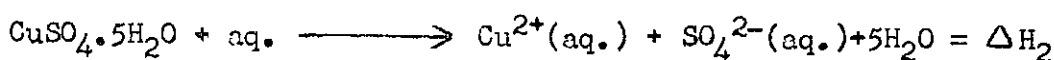
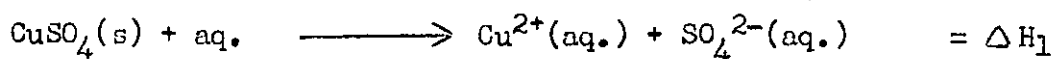
¹G.H. Nylword and T.J.V. Findlay, op. cit., p.66.

²Ibid. p.43.

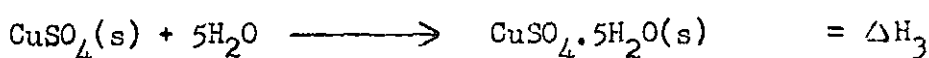
³A.F. Wells, Structural Inorganic Chemistry, (3rd, ed.), p.572.

ในน้ำจึงให้ความร้อนออกมา (heat evolved) จะเห็นได้ว่าการหาค่า heat of solution ของสารประกอบ ionic ที่เป็นของแข็งในน้ำจะละลาย ที่เป็้นน้ำนั้น ขบวนการจะเกิดขึ้น 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ขบวนการที่ละลาย และ ขบวนการแยก ion ทั้งสองที่อยู่ใน crystal lattice ออกจากกันซึ่งเรียกว่า crystal energy หรือ lattice energy และขบวนการที่เกิด hydrated ion แล้วให้ความร้อนออกมา ซึ่งเรียกว่า hydration energy หรือ heat of hydration ดังนั้นค่า heat of solution นี้ จะมีการบวกหรือลบกัน จึงขึ้นอยู่กับขบวนการทั้งสองนี้ กล่าวคือ ถ้า lattice energy มีค่ามากกว่า hydration energy แล้วค่า heat of solution จะมีค่าบวก ซึ่งเรียกว่าขบวนการดูดความร้อน (endothermic process) แต่ถ้า hydration energy มีค่ามากกว่า lattice energy แล้วค่า heat of solution ก็จะมีค่าลบ ซึ่งเรียกว่าขบวนการคายความร้อน (exothermic process) สำหรับค่า heat of solution นี้จะมีค่าคงที่สำหรับสารโคสสารหนึ่งที่จะละลายในน้ำที่มีปริมาณมากเกินไป (excess) หรือทำให้เกิดสารละลายของสารนั้นเจือจางมาก ๆ เท่านั้น

ในการหาค่า heat of hydration ของสารประกอบพวก hydrated salt เช่น $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ นั้น เป็นการยากที่จะให้น้ำ 5 mole รวมตัวกับ anhydrous copper sulfate 1 mole แล้ววัดปริมาณความร้อนที่ได้ออกมาโดยตรง อย่างไรก็ตามเราก็สามารถที่จะหาค่า heat of hydration ของสารพวก hydrated salts ได้ โดยวิธีการทางอ้อมคือ นำเอา Hess's law มาใช้ในการคำนวณหาค่า heat of hydration ของ hydrated salt ต่าง ๆ ได้ เพราะว่าเมื่อเอา anhydrous salt ชนิดหนึ่งไปละลายในน้ำแล้ว มันจะให้ความร้อนออกมาเนื่องจากการเกิด hydrated ions และได้พลังงานความร้อนออกมามากกว่าพลังงานความร้อนที่จะนำเอาไปแยก ions ทั้งสองออกจาก crystal lattice ของมัน แต่เมื่อเอา hydrated salt ไปละลายในน้ำที่มีปริมาณเท่ากันแล้ว ความร้อนจะถูกดูดเข้าไป (heat absorbed) เพราะมันจะใช้พลังงานจำนวนหนึ่งไปใช้แยกเอาโมเลกุลของน้ำออกจาก hydrated salt ด้วย ดังนั้นเมื่อเอาปริมาณความร้อนที่เกิดในขบวนการทั้งสองมารวมกันตามหลักพีชคณิตแล้ว ก็จะได้ค่า heat of hydration ของ hydrated salt ตามต้องการ เช่น ในกรณี $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$



จาก Hess's law จะได้ผลออกมาดังนี้



นั่นคือ $\Delta H_3 = \Delta H_1 - \Delta H_2$

ถ้า ΔH_3 ก็คือ heat of hydration ของ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ นั่นเอง จากหลักการนี้เราก็สามารถนำเอาไปใช้คำนวณในการทดลองหาค่าพลังงานความร้อนที่เกี่ยวข้องกับการเกิด hydrated salt ของสารประกอบต่าง ๆ ได้

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หน้า 39-42 ในการหาค่า heat of solution ของ hydrated salts และของ anhydrous salts รวมทั้งการหาค่า heat of hydration ของ system ต่าง ๆ นั้น จะเห็นว่าผู้เขียนได้ทำการทดลองหาค่า heat of hydration โดยวิธีการทางอ้อม เพราะเป็นวิธีการที่จะหาได้โดยวิธีที่ง่าย ๆ และเนื่องจากค่า heat of solution และ heat of hydration ที่นำมาทดลองครั้งนี้มีความสัมพันธ์กัน เพราะค่า heat of hydration ของสารประกอบต่าง ๆ ที่นำมาทดลองจะเท่ากับผลต่างทางพีชคณิตของค่า heat of solution ของ anhydrous salts และ hydrated salts ของสารประกอบนั้น ๆ ซึ่งจากการทดลองตามวิธีการทดลองที่กล่าวไว้หน้า 39-42 เกี่ยวกับการหาค่า heat of solution และค่า heat of hydration ของ system ต่าง ๆ ได้ผลการทดลองออกมาถึงแสดงไว้ในตารางที่ 14 และ 15 หน้า 80 และ 81 ตามลำดับ

ในการศึกษาหาค่า heat of solution และ heat of hydration ครั้งนี้ กำหนดให้ความดันที่ประมาณ 1 บรรยากาศ และถือว่า system ที่นำมาศึกษานั้น จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของสารละลายน้อยมาก จึงไม่ได้นำค่า $P\Delta V$ หรือ W (work done) เข้ามามีผลของการคำนวณด้วย

ตารางที่ 14 แสดงค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Hydrated Salts และ
 anhydrous Salts ที่ได้จากการทดลอง และที่ได้จากการคำนวณจาก
 Literature.

System	ΔH จากการทดลอง (Kcal.mole ⁻¹)	ΔH จากการคำนวณ (Kcal.mole ⁻¹)
FeCl ₂	-3.07±0.29	-3.10*
BaCl ₂ .2H ₂ O	+3.99±0.48	+4.00*
MgSO ₄	-21.90±0.26	-22.35*
MgSO ₄ .7H ₂ O	+2.25±0.64	+2.40*
CuSO ₄	-16.85±0.39	-17.50*
CuSO ₄ .5H ₂ O	+1.65±0.37	+1.50*
CH ₃ COONa	-3.78±0.13	-3.98**
CH ₃ COONa.10H ₂ O	+4.63±0.13	+4.98**
Na ₂ SO ₄	-0.76±0.00	-0.60*
Na ₂ SO ₄ .10H ₂ O	+18.75±0.31	+19.00*
Na ₂ CO ₃	-5.83±0.47	-5.90*
Na ₂ CO ₃ .10H ₂ O	+16.23±0.49	+16.40*

*G.H. Nylward and T.J.V. Findlay, op. cit., p.68.

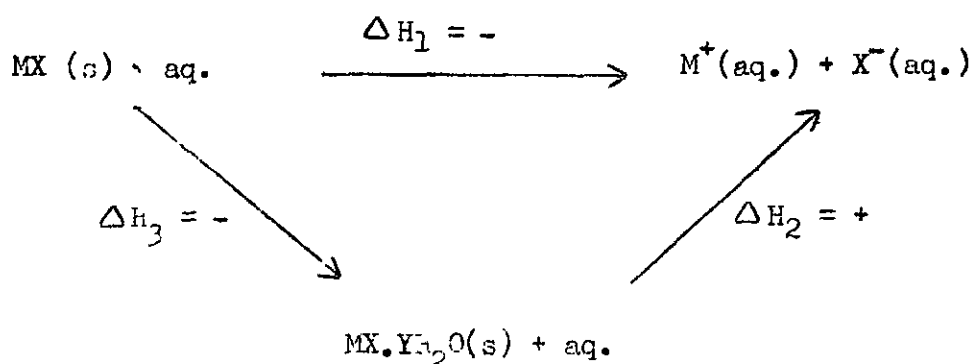
**Russell F. Bichowsky and Frederick, Rossini, op. cit., p.145.

ตารางที่ 15 แสดงค่า Heat of Hydration (ΔH) ที่ได้จากการทดลอง และ
จากการคำนวณ

System	ΔH จากการทดลอง (Kcal.mole ⁻¹)	ΔH จากการคำนวณ* (Kcal.mole ⁻¹)
$\text{BaCl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	-7.06 ± 0.72	-7.10
$\text{MgSO}_4 + 7\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	-24.15 ± 0.90	-24.75
$\text{CuSO}_4 + 5\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	-18.49 ± 0.76	-19.00
$\text{CH}_3\text{COONa} + 10\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{CH}_3\text{COONa} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-8.41 ± 0.26	-8.96
$\text{Na}_2\text{SO}_4 + 10\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-19.51 ± 0.31	-19.60
$\text{Na}_2\text{CO}_3 + 10\text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	-22.06 ± 0.96	-22.30

จากข้อมูลที่แสดงไว้ในตารางหน้า 80 นั้น จะเห็นได้ว่าการ heat of solution (ΔH)
ที่ได้จากการเอา anhydrous salts ไปละลายในน้ำนั้น จะมีค่าลบ (negative) แต่ค่า heat
of solution (ΔH) ที่ได้จากการเอา hydrated salts ไปละลายในน้ำนั้น จะมีค่าบวก
(positive) ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับทฤษฎีที่กล่าวมาแล้ว สำหรับค่า heat of hydration
ของ system ต่าง ๆ ที่นำมาทดลองนั้นเป็นค่าลบ (negative) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการที่สารพวก
anhydrous salts จะเปลี่ยนไปเป็น hydrated salts นั้นจะให้ความร้อนออกมา (heat
evolved) ขบวนการที่เกิดขึ้นนี้ จึงเป็นขบวนการคายความร้อน (exothermic process) ซึ่ง
อาจจะเขียนแสดงให้เห็นได้ ดังนี้

*คำนวณจาก ผลต่างระหว่างค่า heat of solution ของ anhydrous salts
กับค่า heat of solution ของ hydrated salts.



↑
เป็น MX(s) เป็น anhydrous salt.

MX.YH₂O(s) เป็น hydrated salt.

จากการที่ค่า heat of solution ของ hydrated salt ต่าง ๆ มีค่าบวก(positive) หรือเป็นกระบวนการดูดความร้อน (endothermic process) ทั้งหมดนั้น แสดงว่ากระบวนการเหล่านี้ ใช้พลังงานไปแยก ions ออกจาก crystal lattice ของมันมากกว่าพลังงานที่ได้จากการเกิด hydrated ion ด้วยเหตุนี้ hydrated salt จึงละลายน้ำได้ดี อย่างไรก็ตามผลการทดลองครั้งนี้ จะแตกต่างไปจากผลที่รายงานไว้ใน literature ดังนี้

ค่า heat of hydration ของ BaCl₂·2H₂O จากผลการทดลองครั้งนี้เท่ากับ -7.06±0.72 Kcal.mole⁻¹ ค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ -7.10 Kcal.mole⁻¹ ค่าที่ได้จากการศึกษาของ Zen-ichi Shibata และ Yoshio Terasaki¹ เท่ากับ -7.212±0.011 Kcal.mole⁻¹ และจากการศึกษาของ Stone² เท่ากับ -7.0 Kcal.mole⁻¹ จะเห็นว่าผลที่แตกต่างกันนี้มีค่าน้อยมาก ซึ่งอาจจะเกิดจากความผิดพลาดของเครื่องมือเป็นส่วนใหญ่ จึงกล่าวมาแล้วในเรื่อง heat of neutralization หน้า 75

ค่า heat of hydration ของ MgSO₄·7H₂O จากผลการทดลองครั้งนี้เท่ากับ

¹Zen-ichi Shibata and Yoshio Terasaki, op. cit., pp.1208-11.

²C.H. Stone, op. cit., p.630.

$-24.15 \pm 0.90 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ จากรายงานของ UNESCO Pilot Project for Teaching In Asia¹ เท่ากับ $-22.5 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และจากการคำนวณเท่ากับ $-24.75 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ความแตกต่างของค่าเหล่านี้ อาจเกิดขึ้นด้วยเหตุผลเดียวกันกับกรณี $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

ค่า heat of hydration ของ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จากผลการทดลองครั้งนี้มีค่าเท่ากับ $-18.49 \pm 0.76 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ถ้าที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ $-19.00 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และรายงานการศึกษาของ Stone² มีค่าเท่ากับ $-18.50 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ค่าที่แตกต่างกันนี้ นอกจากจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองแล้ว ยังเกิดจากการที่สารเคมีไม่บริสุทธิ์พอ จะเห็นได้จากการที่เอา anhydrous copper sulfate ไปละลายน้ำ สารละลายที่ได้นั้นจะมีตะกอนที่เป็นของแข็งเกิดขึ้นหนัก 0.0101 กรัม ซึ่งจากการที่มีตะกอนเกิดขึ้นมานี้จะทำให้การวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปผิดพลาดได้ เพราะว่าตะกอนนี้ จะดูดเอาความร้อนที่เกิดขึ้นไปจำนวนหนึ่ง แต่ผู้เขียนไม่ได้นำเอาปริมาณความร้อนที่ถูกดูดไปด้วยตะกอนนี้มาคำนวณหาค่า heat of hydration ด้วย เพราะถือว่าน้อยมาก

ค่า heat of hydration ของ $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ จากการทดลองครั้งนี้พบว่า มีค่าเท่ากับ $-8.41 \pm 0.26 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และค่าที่ได้จากการศึกษาของ Pattison³ เท่ากับ $-8.71 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ จากความแตกต่างของค่าทั้งสองนี้ นอกจากจะเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนของเครื่องมือดังกล่าวแล้ว ก็อาจจะเนื่องมาจากการใช้ anhydrous sodium acetate ที่ไม่บริสุทธิ์แล้ว ซึ่งอาจจะไม่บริสุทธิ์พอ จึงทำให้ค่า heat of solution ของ CH_3COONa ผิดพลาดไปได้

ค่า heat of hydration ของ $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ จากการทดลองครั้งนี้พบว่า มีค่าเท่ากับ $-19.68 \pm 0.31 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ $-19.60 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ความแตกต่างของค่าทั้งสองนี้ ก็อาจจะเนื่องมาจากสาเหตุเดียวกันกับกรณีของ $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

ค่า heat of hydration ของ $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ จากการทดลองครั้งนี้เท่ากับ

¹G.H. Aylward, op. cit., p.2-24.

²C.H. Stone, op. cit., p.630.

³D.B. Pattison, J.G. Miller and W.W. Lucasso, op. cit., p.319.

$-22.06 \pm 0.96 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และถ้าได้จากการคำนวณนั้น จะมีค่าเท่ากับ $-22.30 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ความแตกต่างระหว่างค่าทั้งสองนี้ ก็อาจจะเกิดขึ้นเช่นเดียวกับกรณี $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

ในการใช้ anhydrous salt (CH_3COONa , Na_2SO_4 และ Na_2CO_3) ที่มีอยู่แล้วในขวดสารเคมีนั้น ก็เพื่อหลีกเลี่ยงความยุ่งยากและลำบากในการที่จะเผา hydrated salt ให้กลายเป็น anhydrous salt โดยใช้ตะเกียง alcohol ซึ่งจากการทดลองพบว่า ขณะที่เผา hydrated salt เติมน้ำจะเกิดการหลอมเหลวและเดือดอย่างรวดเร็ว ถึงแม้จะใช้ crucible ที่มีฝาปิดแล้วก็สามารถเผา hydrated salt เหล่านี้ก็ยังสามารถระเหิดออกมาได้ ซึ่งจะทำให้น้ำหนักของสารสูญหายไป และอีกอย่างหนึ่งการที่จะควบคุมอุณหภูมิที่ใช้เผาสารเหล่านี้ โดยการกดยกตะเกียงออกไปเมื่อสารเริ่มเดือด หรือขณะเดือดนั้น ก็นับว่าเป็นการลำบาก และไม่เหมาะสมในการปฏิบัติการทางเคมี ด้วยเหตุนี้ผู้เขียนจึงใช้ anhydrous salt ที่มีอยู่แล้วมาใช้ในการหาค่า heat of solution ถึงแมวลของการทดลองจะแตกต่างไปจากค่าที่คำนวณเล็กน้อยก็ตาม

แต่สำหรับ anhydrous salt ของสาร $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ นั้น สามารถจะหามาได้จากการนำเอา hydrated salts เหล่านี้ไปเผาด้วยตะเกียง alcohol ได้ เพราะว่าในขณะที่เผา hydrated salts เหล่านี้ไม่หลอมเหลว และเดือด เพียงแต่น้ำเล็กน้อย ๆ ระเหยไป ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ เช่น ในกรณี $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ จะสังเกตเห็นว่า สีของผลึกจะค่อย ๆ เปลี่ยนจากสีน้ำเงินไปเป็นสีเทา หรือสีขาว แต่ต้องระวังไม่ให้ hydrated salt เหล่านี้ decompose หรือไหม้ในขณะที่เผา โดยพยายามตั้งห่าน้ำหนักของ anhydrous salt ที่ได้ตลอดเวลา และจะหยดเมื่อก่อนเมื่อน้ำหนักของ anhydrous salt คงที่เท่านั้น จะเห็นได้ว่าการใช้ anhydrous salt ที่มีอยู่แล้ว และที่ได้จากเผา hydrated salt ก็สามารถนำมาทดลองหาค่า heat of hydration ได้เช่นเดียวกัน

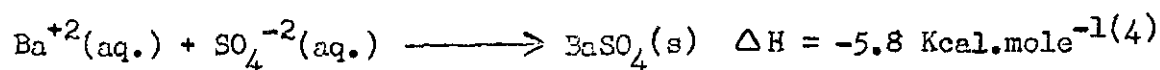
3. Heat of Precipitation

ปฏิกิริยาประกอบกัน electrolyte ที่เป็นของแข็งหลายสาร ที่จะนำมาศึกษาหาค่า heat of solution โดยใช้เป็นตัว solvant โดยยาก เพราะละลายในน้ำได้น้อยมาก เช่น AgCl ซึ่งมีค่า solubility product ที่ 25°C เท่ากับ $2 \times 10^{-10}(1)$ หรือ BaSO_4 ซึ่งมีค่า

¹G.H. Aylward and T.J.V. Findlay, op. cit., pp.73-74.

solubility product ที่ 25°C เท่ากับ $1 \times 10^{-10(1)}$ ซึ่งแสดงว่ามีแรงดึงดูดระหว่าง ion ที่อยู่ใน crystal lattice สูงมาก หรือมี lattice energy มาก โครงสร้างของสารประกอบพวกนี้จึงกระชับ (compact) จนไม่สามารถจะแตกตัวเป็น ion และเกิดเป็น hydrated ion ได้ เมื่อนำสารประกอบพวกนี้ไปละลายในน้ำที่อุณหภูมิ 25°C ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเกิดขึ้นเสมอ กับสารประกอบที่มี cation เป็น bivalent (+2) และมี anion เป็น bivalent (-2) หรือ trivalent (+3) เช่น $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ซึ่งมีค่า solubility product เท่ากับ $4 \times 10^{-40(2)}$

แต่อย่างไรก็ตาม เราก็สามารถจะหาค่า heat of solution ของสารประกอบดังกล่าวได้ โดยการหาค่า heat of precipitation ของสารเหล่านี้แทน เนื่องจาก "ค่า heat of solution จะปีกร่องหมายตรงกันข้ามกับค่า heat of precipitation ใน system เดียวกัน" ³ นั่นคือ ถ้าค่า heat of precipitation มีค่าลบ (negative) แล้วค่า heat of solution จะมีค่าบวก (positive) ตัวอย่างเช่น



ถ้า ΔH ในกรณีนี้เรียกว่า heat of precipitation ซึ่งจะมีเครื่องหมายตรงข้ามกับค่า heat of solution เมื่อเราจะถ่วงน้ำหนักไปละลายในน้ำนั่นเอง

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

จากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้เขียนจึงได้ทดลองหาค่า heat of precipitation ตามวิธีที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 หน้า 42-44¹ ซึ่งเป็นการหาค่า heat of precipitation ของ lead iodide (PbI_2) กับ lead chromate (PbCrO_4) โดยใช้ calorimeter B ซึ่งหาค่า calorimeter constant ไว้แล้วตามวิธีที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หน้า 36-37 ซึ่งได้ผลที่เป็นที่น่าพอใจจากการทดลอง 8 ครั้ง ในแต่ละ system ดังตารางต่อไปนี้

^{1,2}G.H.Aylward and T.J.V.Findlay, op. cit., pp.73-74.

³H.L. Clever, J. Chem. Educ., 36, 45 (1961).

⁴Carl F. Prutton, op. cit., p.279.

ตารางที่ 16 แสดงค่า Heat of Precipitation (ΔH) ที่ได้จากการทดลองและ
จากการคำนวณ

System	ΔH , Kcal.mole ⁻¹	
	ผลจากการทดลอง	ผลจากการคำนวณ
Lead iodide, PbI_2	-14.08 $\pm$ 1.14	-14.60
Lead chromate, $PbCrO_4$	-15.32 $\pm$ 0.67	-13.70

จากการทดลองหาค่า heat of precipitation (ΔH) ของ system ทั้งสองนี้ พบว่า
มีค่าลบ (negative) ซึ่งแสดงว่าเป็นกระบวนการคายความร้อน (exothermic process) ทั้งนี้
เนื่องจากค่า lattice energy ของผลึก PbI_2 และผลึก $PbCrO_4$ มีค่าสูงมาก ซึ่งสามารถ
พิจารณาได้ดังนี้

จากค่า solubility product ของ PbI_2 ที่ 25 °C เท่ากับ 1.39×10^{-8} (1)
และค่า solubility product ของ $PbCrO_4$ ที่ 18 °C เท่ากับ 1.77×10^{-14} แสดงว่า
ละลายใน solvent ที่เป็นน้ำได้น้อยมาก ที่อุณหภูมิห้อง หรืออุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิห้องเล็กน้อย ใน
กรณีของ $PbCrO_4$

และจากการพิจารณาประกอบ Lead iodide (PbI_2) และสารประกอบ lead
chromate ($PbCrO_4$) จะเห็นว่าสารประกอบทั้งสองนี้ เกิดจากการรวมตัวของ Pb^{2+} ซึ่งเป็น
cation ที่มี bivalent กับ I^- ซึ่งเป็น anion ที่มี monovalent ในกรณีของ PbI_2 สำหรับ
 $PbCrO_4$ เกิดจากการรวมตัวของ Pb^{2+} ซึ่งเป็น cation ที่มี bivalent และ CrO_4^{2-} ซึ่งเป็น
anion ที่มี bivalent เหมือนกัน ดังนั้นในการเกิดสารประกอบทั้งสองนี้จึงมีค่า lattice
energy มาก เนื่องจากมีค่า electrostatic force ระหว่าง cation และ anion มาก

¹Charles D. Hodgman, op. cit., p.1634.

จากเหตุผลนี้ จะทำให้ crystal lattice ของสารประกอบทั้งสองนี้กระชับ (compact)

ดังนั้นเมื่อเอาสารประกอบทั้งสองนี้ไปละลายในน้ำที่อุณหภูมิของห้องแล้ว โมเลกุลของน้ำ จึงไม่สามารถที่จะไปทำให้ ions ใน crystal lattice แยกออกมา เพื่อไปเกิดเป็น hydrated ion ได้ ซึ่งจะเห็นว่าอุณหภูมิของสารประกอบทั้งสองนี้จะแตกตัวเป็น ion ได้น้อยมาก

จากผลการทดลองที่แสดงไว้ในตารางที่ 16 หน้า 86 นั้น จะเห็นว่าค่า heat of precipitation ของ lead iodide (PbI_2) เท่ากับ $-14.08 \pm 1.14 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ และค่า heat of precipitation ของ lead chromate เท่ากับ $-15.32 \pm 0.67 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ แสดงว่า electrostatic force ที่เกิดขึ้นระหว่าง cation ที่เป็น bivalent กับ anion ที่เป็น monovalent มีค่ามากกว่า electrostatic force ระหว่าง cation ที่เป็น bivalent กับ anion ที่เป็น bivalent เพราะว่าการเกิด crystal lattice ของ lead iodide นั้นให้พลังงานออกมาน้อยกว่าการเกิด crystal lattice ของ lead chromate (PbCrO_4)

นอกจากนี้ผลการทดลองครั้งนี้ ยังทำให้ทราบว่าค่าเราตองการให้ Pb^{+2} และ I^- ใน crystal lattice ของ $\text{PbI}_2(\text{s})$ แยกออกจากกันใน solvent ที่เป็นน้ำแล้ว จะต้องใช้พลังงานความร้อนเท่ากับ $+14.08 \pm 1.14 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ หรือค่า heat of solution ของ lead iodide (PbI_2) เท่ากับ $+14.08 \pm 1.14 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ นั้นเอง ในทำนองเดียวกันค่า heat of solution ของ lead chromate (PbCrO_4) จะมีค่าเท่ากับ $+15.32 \pm 0.67 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

เมื่อพิจารณาว่า heat of precipitation ที่ได้จาก system ทั้งสองที่นำมาศึกษาครั้งนี้แล้ว จะเห็นว่าแตกต่างไปจากค่า heat of precipitation ที่ได้จากการคำนวณโดยข้อมูลจาก Handbook ที่ 25°C ซึ่งจากการคำนวณค่า heat of precipitation ของ lead iodide เท่ากับ $-14.60 \text{ Kcal.mole}^{-1(1)}$ และค่า heat of precipitation ของ lead chromate (PbCrO_4) เท่ากับ $-13.70 \text{ Kcal.mole}^{-1(2)}$

การแตกต่างระหว่างค่า heat of precipitation ที่ได้จากการทดลองครั้งนี้ กับค่าที่

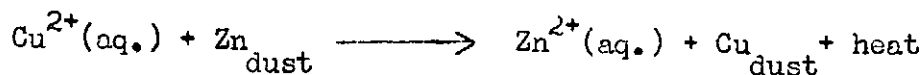
¹G.H. Aylward and T.J.V. Findlay, op. cit., p.50,68.

²Russell F. Bichowsky and Frederick Rossini, op. cit., pp.36-40.

ได้จากการทดลองครั้งนี้ นอกจากจะเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อน (error) ของเครื่องมือที่นำมาใช้ในการทดลอง ดังกล่าวมาแล้วในการหา ΔH ของ system ต่าง ๆ แล้ว ความคลาดเคลื่อนของผลการทดลองครั้งนี้ก็จะเนื่องมาจากค่าที่เป็นผลของการทดลองที่มาจาก system ทั้งสองที่อุณหภูมิต่างกันด้วย กล่าวคือ ข้อมูลที่ได้จาก Handbook นั้น ได้จากการทดลองที่อุณหภูมิ 25°C แต่การทดลองครั้งนี้เป็นการทดลองที่อุณหภูมิห้องประมาณ 30°C เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ตะกอนของ system ที่นำมาศึกษาย่อมละลายได้มากขึ้น เพราะค่า heat of solution ของ system ทั้งสองมีค่าเป็นบวก (positive) หรือเป็นขบวนการดูดความร้อน ด้วยเหตุนี้จะเป็นผลที่ทำให้ค่า ΔH ของตะกอนที่กรองมาได้น้อยกว่าที่ควรจะได้ เพราะตะกอนบางส่วนจะละลายไป สำหรับการที่อุณหภูมิมีผลต่อการละลายของตะกอนครั้งนี้ อาจจะพิจารณาได้จาก solubility product ของมัน ตัวอย่างเช่นในกรณี lead iodide (PbI_2) นั้น ค่า solubility product ที่ 15°C เท่ากับ 7.47×10^{-9} แต่ที่อุณหภูมิ 25°C จะมีค่าเท่ากับ 1.39×10^{-8} (1)

4. Heat of Displacement

ปฏิกิริยาเคมีใด ๆ ที่มีการเปลี่ยนแปลง ion หรือมีการแลกเปลี่ยน ion เกิดขึ้นแล้ว ปฏิกิริยานั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นด้วย² เนื่องจาก heat of formation ของ ion ต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกัน เช่น เมื่อเอาสังกะสี (zinc dust) ใส่ลงไปในสารละลายของ copper sulfate แล้ว จะให้ความร้อนออกมา ซึ่งเขียนผลการแสดงได้ดังนี้



จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลง ion ในปฏิกิริยาคือ Zn จะให้ electron แก่ Cu^{2+} ไป 2 electrons ทำให้ Cu^{2+} กลายเป็น copper dust แล้ว Zn ก็จะถูกเปลี่ยนไปเป็น Zn^{2+} ดังนั้น ปฏิกิริยานี้จึงเป็น redox reaction เอง โดย Zn ทำหน้าที่เป็น reductant และ Cu ทำหน้าที่เป็น oxidant

หรืออาจจะพูดได้ว่าปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาการแทนที่ (displacement reaction) โดย Zn ไปแทนที่ Cu ในสารละลายเกิดตัวเอง Cu และมีความร้อนออกมาด้วย

¹Charles D. Hodgman, op. cit., p.1640.

²Frederick A. Getman, op. cit., p.243.

ซึ่งค่าความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปในปฏิกิริยา displacement reaction นี้เรียกว่า
heat of displacement¹

ปฏิกิริยาการแทนที่ (displacement reaction) นี้ จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน
(exothermic reaction) หรือเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน (endothermic reaction) นั้น ขึ้นอยู่
กับผลต่างทางศักย์ไฟฟ้า ค่า heat of formation ของ ions ของ product กับค่า heat
of formation ของ ions ของ reactant ซึ่งถ้าผลต่างนี้มีค่าลบ (negative) แล้ว ปฏิกิริยานี้
ก็จะเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน แต่ถ้าผลต่างนี้มีค่าเป็นบวก ปฏิกิริยานี้ก็จะเป็นปฏิกิริยาดูดความร้อน
เข้าไป

ในการที่จะทราบว่าสารใดจะไปแทนที่ หรือสามารถไปแทนที่สารใดได้นั้น หรือสารใดจะทำ
หน้าที่เป็น reductant และสารใดจะทำหน้าที่เป็น oxidant นั้น Martin² ได้เสนอไว้ว่า สารที่
อยู่ข้างบนในตารางที่แสดงค่า standard reduction potential (E°) จะสามารถแทนที่
(displace) สารที่อยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าลงไปได้เสมอ เช่น zinc อยู่ในตำแหน่งที่สูงกว่า copper
ในตารางดังกล่าว ดังนั้น zinc จึงสามารถแทนที่ copper ได้ จากการเสนอของ Martin นี้ จึง
สามารถที่จะนำมาทดลองหาค่า heat of displacement ของปฏิกิริยาต่าง ๆ ได้

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

จากทฤษฎีที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ผู้เขียนจึงได้ทดลองหาค่า heat of displacement ของ
system ต่าง ๆ ทั้งหมด 3 system ดังรายละเอียดที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หน้า 44-46 จากการ
ทดลองได้ค่า heat of displacement ดังแสดงไว้ในตารางที่ 17 หน้า 90

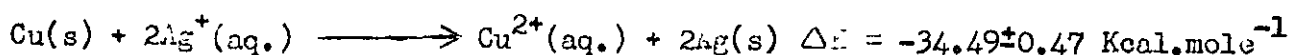
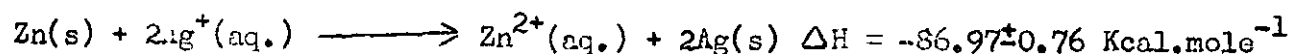
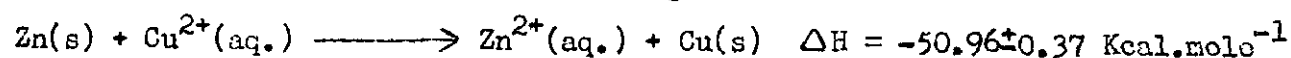
¹D. Thorburn Burns and Evelyn Rattenbury, Introductory Practical Physical Chemistry, p.70.

²D.R. Martin, J. Chem. Educ., 25, 495 (1948).

ตารางที่ 17 แสดงค่า Heat of Displacement (ΔH) ที่ได้จากการทดลอง และการคำนวณ

System	ΔH , Kcal.mole ⁻¹	
	จากการทดลอง	จากการคำนวณ*
$\text{Zn(s)} + \text{CuSO}_4 \longrightarrow \text{ZnSO}_4(\text{aq.}) + \text{Cu(s)}$	-50.96 ± 0.37	-51.8
$\text{Zn(s)} + 2\text{AgNO}_3(\text{aq.}) \longrightarrow \text{Zn(NO}_3)_2(\text{aq.}) + 2\text{Ag(s)}$	-86.97 ± 0.76	-87.0
$\text{Cu(s)} + 2\text{AgNO}_3(\text{aq.}) \longrightarrow \text{Cu(NO}_3)_2(\text{aq.}) + 2\text{Ag(s)}$	-34.49 ± 0.47	-35.2

จากข้อมูลในตารางที่ 17 นี้ แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาใด ๆ ก็ตามที่มีการเปลี่ยนแปลง ion หรือเป็นปฏิกิริยา redox แล้ว จะมีการเปลี่ยนแปลงความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องกับเสมอ (heat effect) ปฏิกิริยาต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นนี้ จะสามารถเขียนในรูป ionic equation ได้ดังนี้



ถ้าพิจารณาข้อมูลจาก Chemical data book¹ เกี่ยวกับการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ จะเห็นว่าการรวมของพลังงานที่จะไปทำให้ Zn(s) กลายเป็น $\text{Zn}^{2+}(\text{aq.})$ นั้นมีค่าเท่ากับ $-36.4 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ แต่ในการที่จะไปทำให้ Cu(s) กลายเป็น $\text{Cu}^{2+}(\text{aq.})$ มีค่าเท่ากับ $+15.4 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ซึ่งแสดงว่า Zn(s) มีแนวโน้มที่จะให้ electron แก่ $\text{Cu}^{2+}(\text{aq.})$ มากกว่า Cu(s) จะให้ electron แก่ $\text{Zn}^{2+}(\text{aq.})$ ดังนั้นปฏิกิริยาระหว่าง Zn(s) กับ $\text{Cu}^{2+}(\text{aq.})$ จึงสามารถเกิดขึ้นได้ และให้ความร้อนออกมา (heat evolved)

*G.H. Nylward and T.J.V. Findlay, op. cit., p.68.

¹ibid.

ในกรณีของ $\Delta G(s)$ จะเห็นว่าผลรวมของพลังงานความร้อนที่จะไปทำให้ $\Delta G(s)$ กลายเป็น $Ag^+(aq.)$ นั้นมีค่าเท่ากับ $+25.3 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ หรือ $+50.6 \text{ Kcal.2mole}^{-1}$ ภายเหตุผลเดียวกันกับปฏิกิริยาระหว่าง $Zn(s)$ กับ $Cu^{2+}(aq.)$ จึงทำปฏิกิริยาระหว่าง $Zn(s)$ กับ $2Ag^+(aq.)$ และปฏิกิริยาระหว่าง $Cu(s)$ กับ $2Ag^+(aq.)$ สามารถเกิดขึ้นได้ และให้ความร้อนออกมา (heat evolved) เหมือนกัน จากการพิจารณาโดยวิธีนี้จะตรงกับข้อเสนองานของ Martin¹ เพราะเมื่อดูจากการวัดศักย์ standard reduction potential นั้น zinc จะอยู่สูงกว่า copper และทั้ง zinc และ copper จะอยู่สูงกว่า silver

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองหาค่า heat of displacement ที่ได้จากทดลองครั้งนี้ กับค่าที่ได้จากการคำนวณ และผลการทดลองที่รายงานไว้ใน literature แล้ว จะเห็นว่าสำหรับค่า heat of displacement ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง $Zn(s)$ กับ $Cu^{2+}(aq.)$ ในการทดลองครั้งนี้ นั้น มีค่าเท่ากับ $-50.96 \pm 0.37 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Zn ค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ $-51.8 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Zn ค่าที่ได้จากการทดลองของ Charlesworth กับ patch² เท่ากับ $-49.05 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Zn และค่าที่ได้จากรายงานของ Neidig³ เท่ากับ $-50.90 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Zn

ค่า heat of displacement ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง $Zn(s)$ กับ $2Ag^+(aq.)$ ในการทดลองครั้งนี้เท่ากับ $-86.97 \pm 0.76 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Zn ค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ $-87.0 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Zn และค่าที่ได้จากการทดลองของ Clinton⁴ เท่ากับ $-86.75 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Zn ส่วนค่า heat of displacement ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่าง $Cu(s)$ กับ $2Ag^+(aq.)$ ในการทดลองครั้งนี้เท่ากับ $-34.49 \pm 0.47 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Cu และค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ $-35.2 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ of Cu

¹D.R. Martin, J. Chem. Educ., 25, 495 (1948).

²M.E. Charlesworth and E.M. Patch, Sch. Sc. Rev., 13, 256 (1932).

³H.A. Neidig, op. cit., p.29-5.

⁴G. Clinton, J. Chem. Educ., 8, 683 (1931).

ถ้าพิจารณา $\text{heat of displacement}$ ของทั้ง 3 systems ที่นำมาทดลองครั้งนี้ ในตารางที่ 17 หน้า 90 แล้ว จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการทดลองน้อยกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณ และแตกต่างไปจากผลการทดลองที่รายงานไว้ใน literature ถึงกลาาแล้ว ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากการใช้ sulfuric acid ไปทำปฏิกิริยากับ zinc ที่เหลือจากการที่เข้าไปแทนที่ copper หรือ silver ไปหมด ดังนั้นตะกอน copper หรือ silver ที่ได้อาจจะหนักกว่าความเป็นจริง เพราะมี zinc ผสมอยู่ และอีกอย่างหนึ่งอาจจะเนื่องจากตะกอน copper ที่ปล่อยทิ้งไว้ในอ่างเกิดเป็น oxide อันจะเป็นผลทำให้น้ำหนักตะกอนของ copper หนักกว่าความเป็นจริง จากสาเหตุดังกล่าวนี้จะเป็นผลทำให้ค่า $\text{heat of displacement}$ กลาดเคลื่อนไปบ้าง สำหรับ system ที่ใช้ copper เข้าไปแทนที่ silver ในสารละลาย silver nitrate นั้น ไม่ได้ใช้สารหนึ่งสารใดไปทำปฏิกิริยากับ copper ที่อาจจะเหลือจากการเข้าไปแทนที่ silver เลย ดังนั้นน้ำหนักของตะกอน silver ที่ได้ จึงอาจจะมากกว่าความเป็นจริง อันจะเป็นผลทำให้ค่า $\text{heat of displacement}$ ผิดพลาดไปได้ หรือกลาดเคลื่อนไปจากค่าที่คำนวณไว้เช่นเดียวกัน

5. การทดลองหา Stoichiometry ของปฏิกิริยาเคมี

เนื่องจาก stoichiometry เป็นการศึกษาถึงความสัมพันธ์ระหว่างมวลสารที่ทำปฏิกิริยาเคมีกัน แล้วทำให้เกิดสารประกอบที่มีสมบัติไม่ต่อเนื่อง (discontinuous) หรือสารประกอบชนิดใหม่ที่มีสมบัติคงที่และไม่มี interaction กับสารเริ่มต้นทั้งสอง ในกรณีเช่นนี้ จึงถือว่าเป็นปฏิกิริยาเคมีของการเกิดสารประกอบ (compound formation) ในการศึกษาหา stoichiometry นี้ อาจจะใช้สมบัติอย่างใดอย่างหนึ่งที่เกี่ยวของกับปฏิกิริยาเคมีที่สังเกตเห็นได้ชัดเป็น criteria ก็ได้ เช่น ปริมาณของตะกอน ความหนาแน่นของของเหลว สีที่เปลี่ยนไป ค่า pH หรืออุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป แล้วจึงทำเอาผลของค่าที่ใช้เป็น criteria ไป plot graph กับ mole relation ของ reactants เพื่อหาจุดที่แสดงอัตราส่วนเฉพาะ (stoichiometric point) อันจะทำให้ทราบถึงปริมาณของสารที่ทำปฏิกิริยากัน และจากผลอันนี้ก็จะนำไปสู่การเขียนสมการเคมีของการเกิดปฏิกิริยาเคมีนั้น ๆ ได้อย่างถูกต้อง ดังนั้นคำว่า stoichiometry นี้ ถ้าจะพูดให้แน่ชัดลงไปก็คือ การศึกษาถึงปริมาณการรวมตัวของสาร หรือการศึกษาถึงมวลสารสัมพันธ์ (mass relation) ในสูตรเคมี และสมการเคมีนั่นเอง

การศึกษา stoichiometry นั้น เราสามารถทดลองหาได้หลายวิธี แต่ในการทดลองครั้งนี้ ใช้ continuous variation method ซึ่งเป็นวิธีแปรผันปริมาณของ reactants ทั้งสอง โดยให้ปริมาณที่เป็นผลรวมในแต่ละครั้งคงที่เสมอ เช่น ปฏิกริยาระหว่างสารละลาย A กับสารละลาย B ที่ทราบความเข้มข้นของสารละลายนั้นแน่นอนแล้ว ซึ่งอาจจะกำหนดให้ผลรวมของปริมาตรของสารทั้งสองในแต่ละครั้งเท่ากับ 10 ml. เสมอ แล้วแปรผันอัตราส่วนของปริมาตรระหว่าง A : B เป็น 1 : 9, 2 : 8, 3 : 7 9 : 1 ml. หลังจากทดลองแล้ว ก็นำผลของคุณสมบัติที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งใช้เป็น criteria มา plot graph กับค่า mole ratio ของ reactant ทั้งสอง หรือกับอัตราส่วนของปริมาตรของ reactants แล้วแต่กรณี จุดที่เส้น graph ตัดกันก็คือ stoichiometric point นั้นเอง และจากจุดนี้ก็ลากเส้นไปขนานกับแกน Y ไปตัดแกน X โดยวิธีนี้ จะทำให้ทราบปริมาณของสารที่ทำปฏิกิริยากันพอดีได้

ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้เขียนได้ทดลองหา stoichiometry ของปฏิกิริยาระหว่างกรดกับเบส และใช้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น criteria ทั้งรายละเอียดของการทดลองที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หน้า 46-48

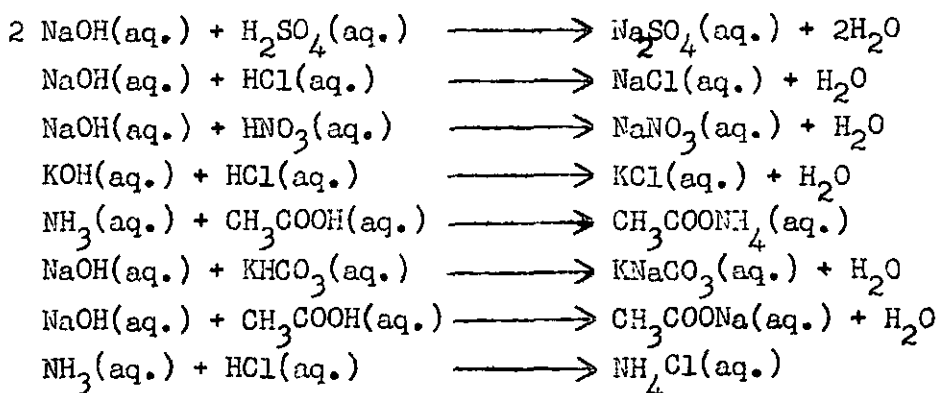
ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

จากข้อมูลในการทดลองหา stoichiometry ของปฏิกิริยาระหว่างกรดกับเบสครั้งนี้ เมื่อนำมา plot graph เพื่อหา stoichiometric point โดยให้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปอยู่แกน Y และจำนวน moles ของ reactant ทั้งสองอยู่บนแกน X ดังรูป graph ที่แนบไว้ในหน้า 95-102 ซึ่งได้ผลออกมาดังตารางที่ 18 หน้า 94

ตารางที่ 18 แสดง Mole Ratio ที่สารทำปฏิกิริยากันพอดี

System	Volume Ratio	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ (Average)	Mole Ratio
$\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M} - \text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$	50 : 50	7.60 ± 0.07	$0.050 : 0.025 = 2 : 1$
$\text{NaOH(aq.)}, 0.5 \text{ M} - \text{HCl(aq.)}, 0.5 \text{ M}$	50 : 50	3.20 ± 0.07	$0.025 : 0.025 = 1 : 1$
$\text{NaOH(aq.)}, 0.5 \text{ M} - \text{HNO}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$	50 : 50	3.28 ± 0.04	$0.025 : 0.025 = 1 : 1$
$\text{KOH(aq.)}, 1.0 \text{ M} - \text{HCl(aq.)}, 1.0 \text{ M}$	50 : 50	6.32 ± 0.04	$0.050 : 0.050 = 1 : 1$
$\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M} - \text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}$	50 : 50	6.22 ± 0.04	$0.050 : 0.050 = 1 : 1$
$\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M} - \text{KHCO}_3(\text{aq.}), 1.0 \text{ M}$	50 : 50	4.32 ± 0.04	$0.050 : 0.050 = 1 : 1$
$\text{NH}_3(\text{aq.}), 1.0 \text{ M} - \text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}$	50 : 50	5.12 ± 0.04	$0.050 : 0.050 = 1 : 1$
$\text{NH}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M} - \text{HCl(aq.)}, 0.5 \text{ M}$	50 : 50	3.00 ± 0.07	$0.025 : 0.025 = 1 : 1$

จากกราฟของผลการทดลองหน้า 95-102 นี้ จะเห็นว่ากราฟของแต่ละ system เป็นกราฟรูปปิก ก็คือ จะมีจุดคักของเส้นกราฟทั้งสองอยู่จุดหนึ่ง และจุดนี้เรียกว่า stoichiometric point หรือ stoichiometric relation ของปฏิกิริยาขึ้น ๆ ซึ่งจากผลการทดลองและจากรูปกราฟทั้งหมดนี้ จะทำให้ทราบอัตราส่วนของจำนวน mole ของ reactants ทั้งสองที่ทำปฏิกิริยาเคมีกันพอดีของแต่ละ system และจากผลการทดลองนี้ สามารถนำไปเขียนสมการเคมีของการเกิดปฏิกิริยาของ system ต่าง ๆ ได้ดังนี้



รูปที่ 13 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Temperature change (ΔT , °C) กับจำนวน mole ของ Reactants
 ของ System NaOH(aq.) , 1.0 M - $\text{H}_2\text{SO}_4\text{(aq.)}$, 0.5 M, Total volume 100.0 ml. ในการศึกษา

Stoichiometry โดยใช้ Continuous Variation Method และใช้จุดสูงสุดเป็น Criteria

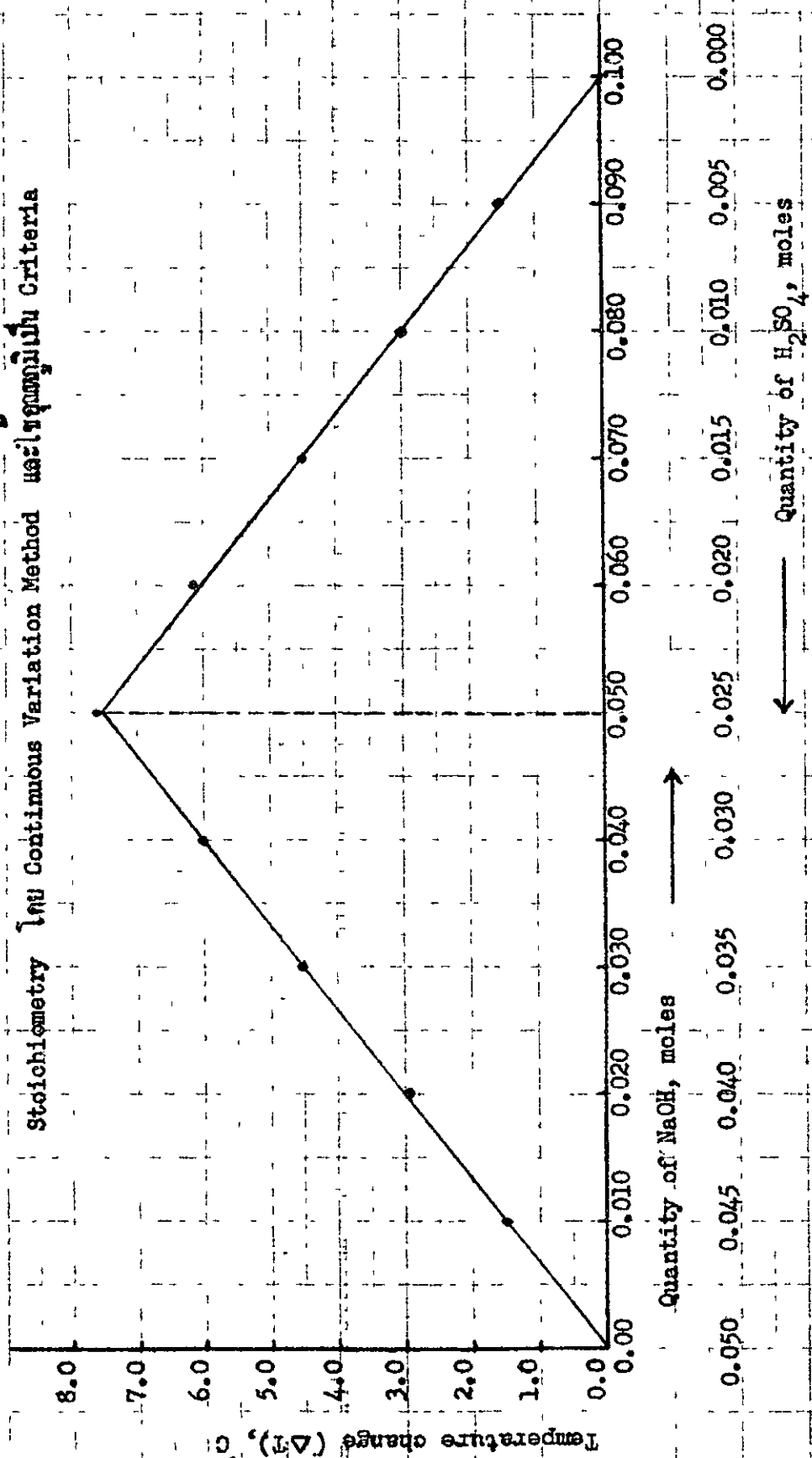


Figure 14. Plot of temperature change (ΔT , °C) versus moles of reactants in the system NaOH(aq.) + HCl(aq.). Total volume 100.0 ml.

Reactants in the System NaOH(aq.) + HCl(aq.). 0.5 M, Total volume 100.0 ml.

Continuous Variation Method

Stoichiometry

Criteria

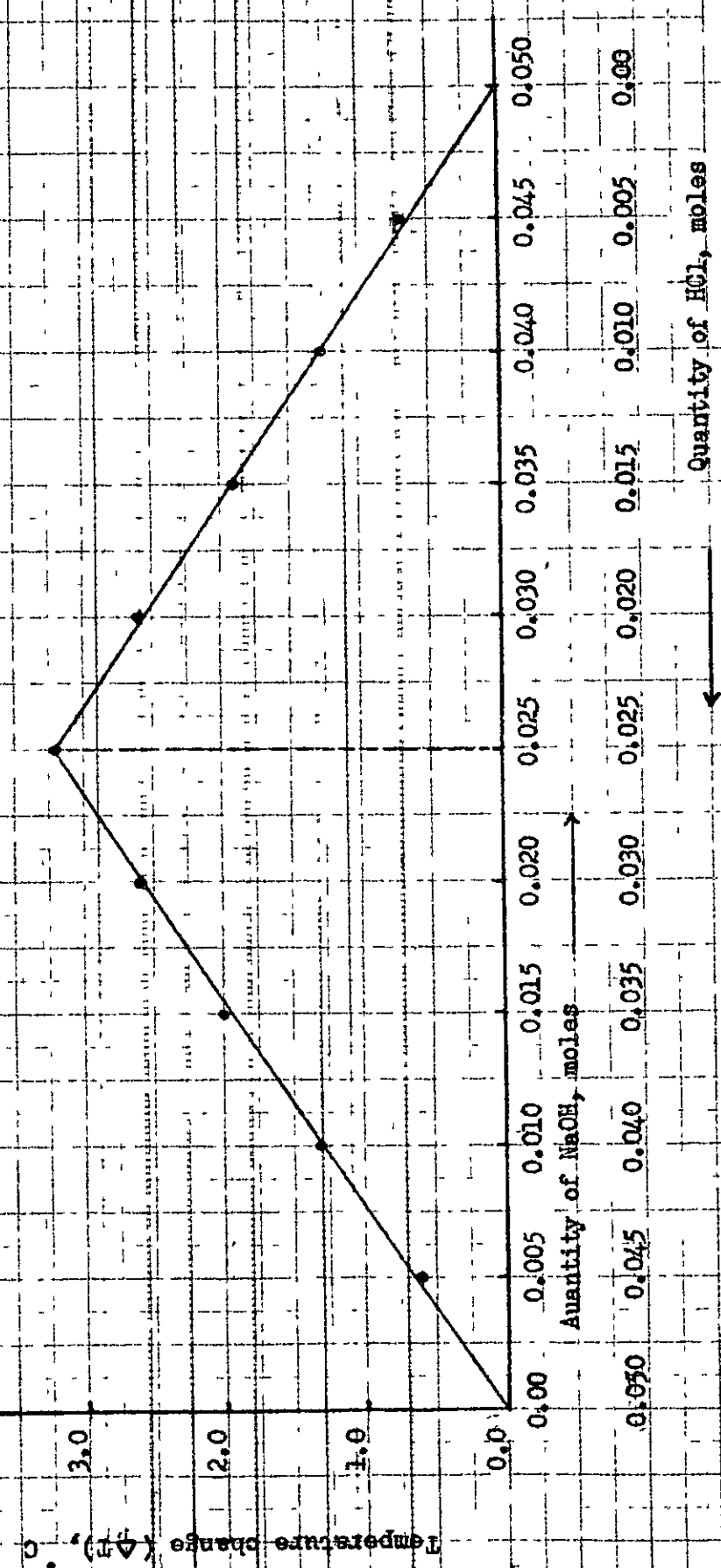
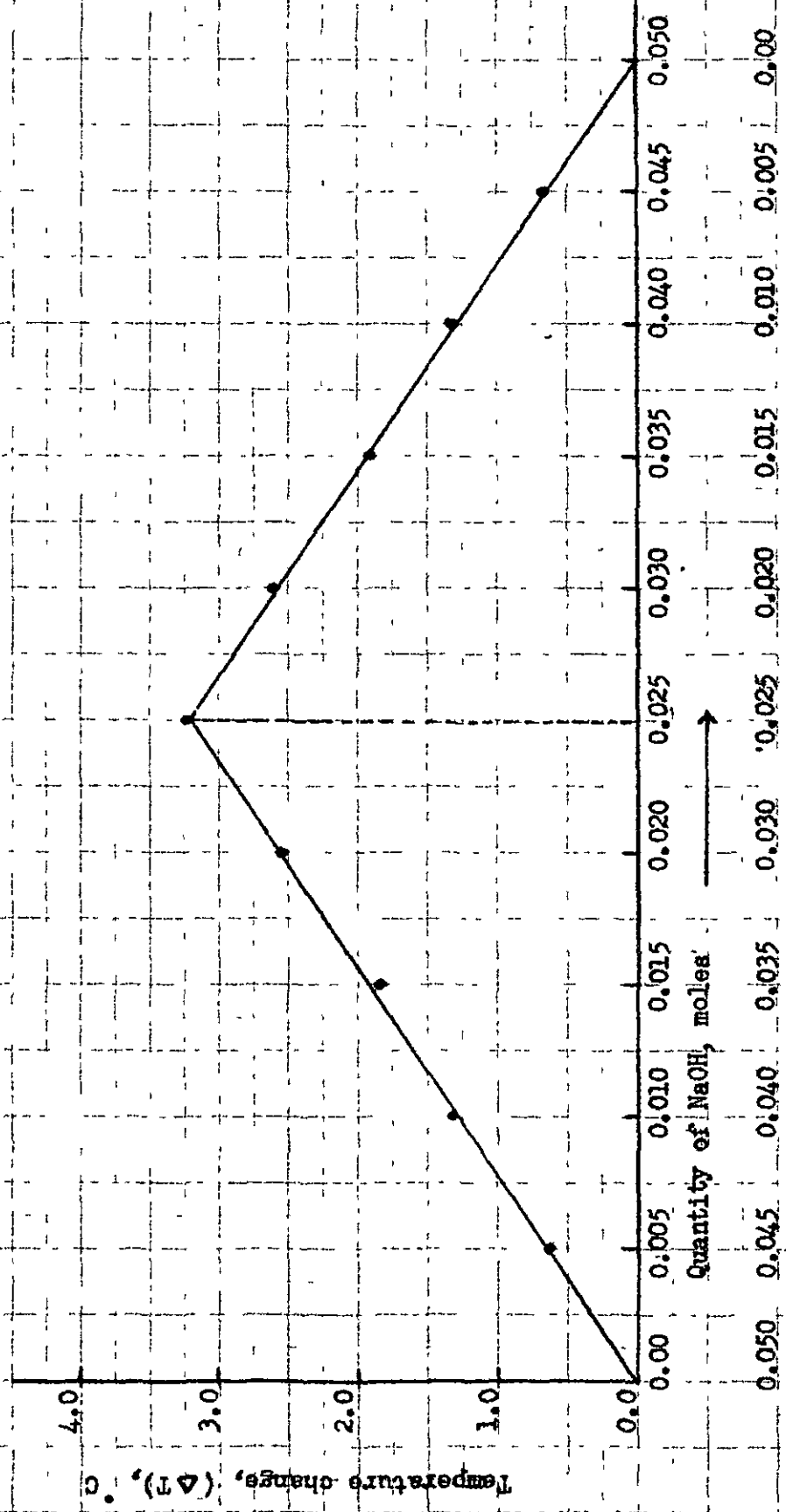


Figure 15 is a plot graph showing the temperature change (ΔT , °C) versus the quantity of NaOH, moles.

Reactants: NaOH(aq.), 0.5 M - HNO₃(aq.), 0.5 M, Total volume 100.0 ml.

Method: Continuous Variation Method

Criteria: Stoichiometry



รูปที่ 16 แสดงการ Plot graph. ระหว่างค่า

Temperature change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$)

กับจำนวน mole ของ Reactants ของ

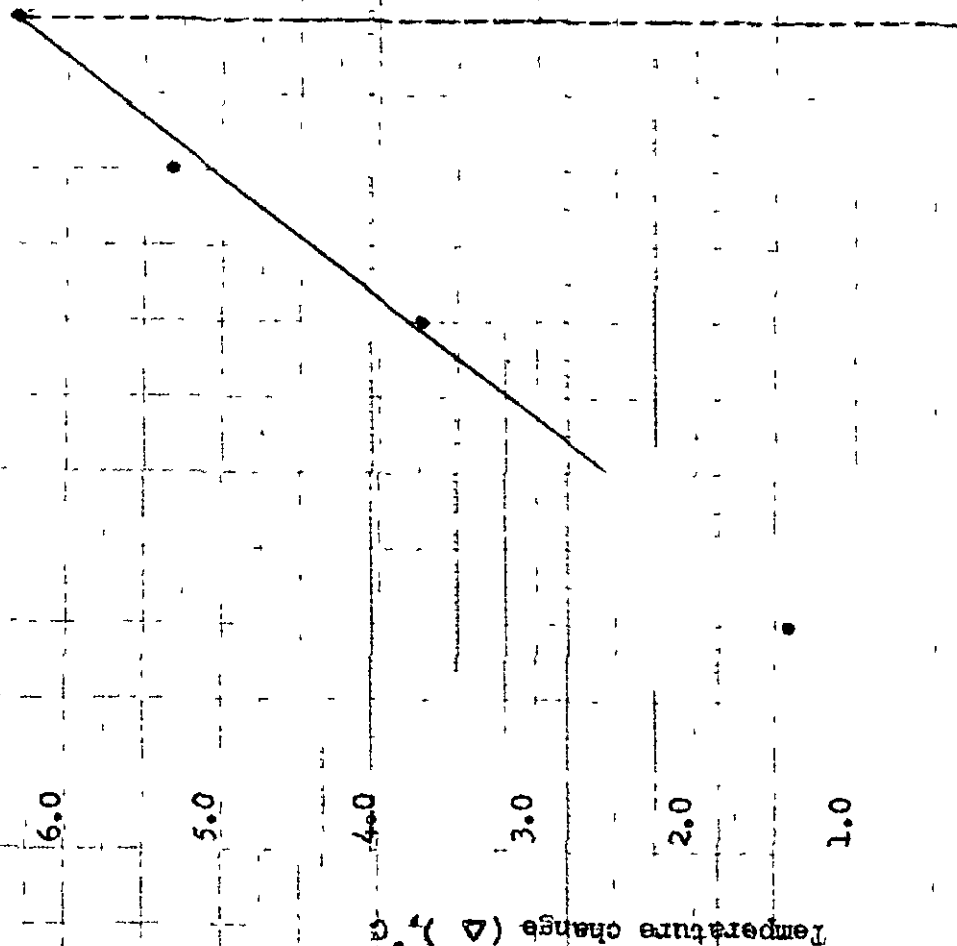
System $\text{KOH}(\text{aq.}), 0.5 \text{ M-HNO}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M,}$

Total volume 100.0 ml. ในการศึกษา

Stoichiometry โดย Continuous

Variation Method และใช้จุดตัดเป็นเกณฑ์

Criteria



0.0

0.00

0.01

0.02

0.03

0.04

0.05

0.06

0.07

0.08

0.09

0.10

Quantity of KOH, moles

0.10

0.09

0.08

0.07

0.06

0.05

0.04

0.03

0.02

0.01

0.00

←

Quantity of HCl, moles

๑๘

7.0

Temperature change (ΔT), °C

6.0

5.0

4.0

3.0

2.0

1.0

0.0

รูปที่ 17

แสดงการ Plot graph ระหว่างค่า

Temperature change (ΔT , °C)

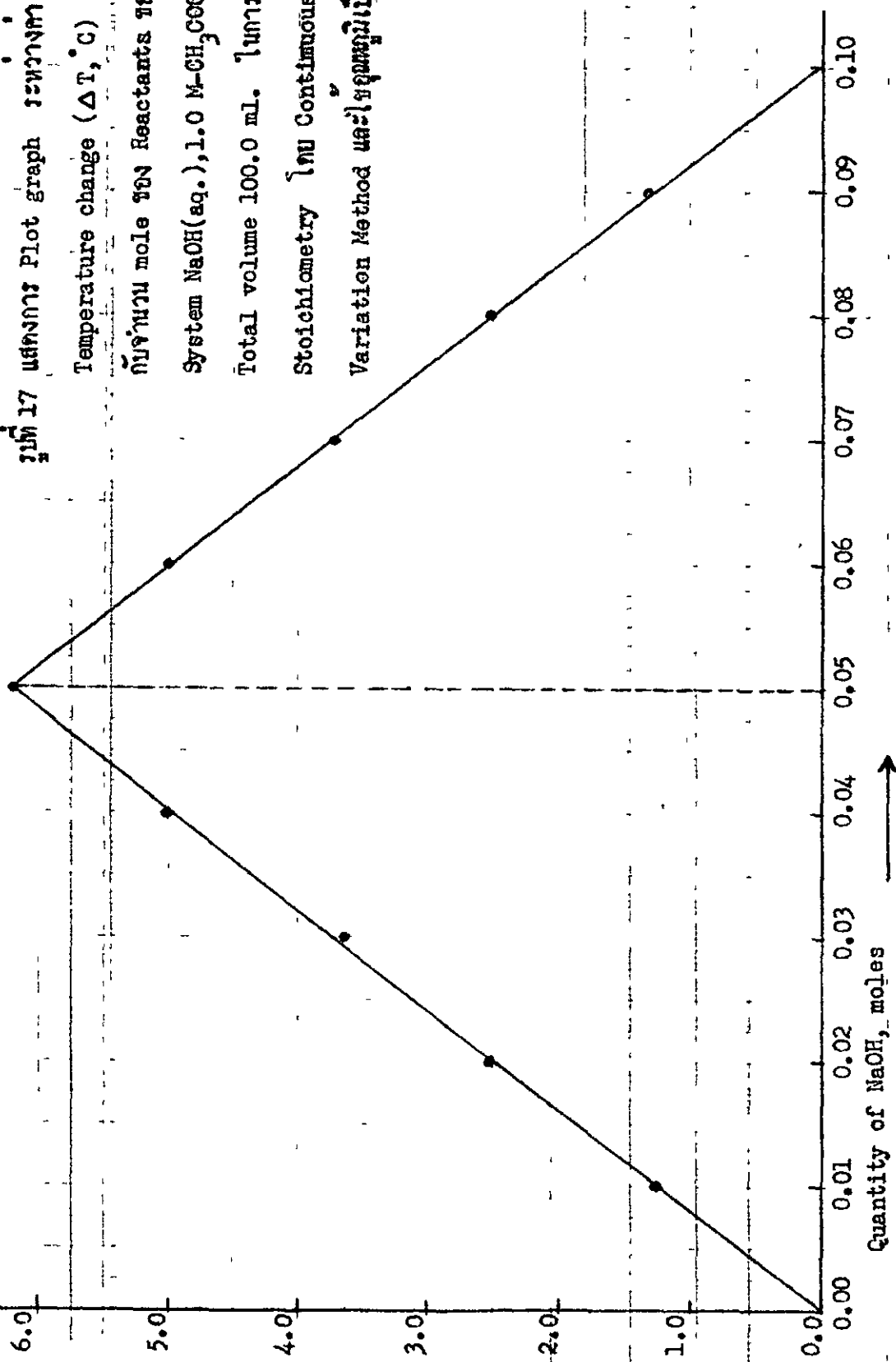
กับจำนวน mole ของ Reactants ของ

System NaOH(aq.), 1.0 M-CH₃COOH(aq.), 1.0 M,

Total volume 100.0 ml. ในการศึกษา

Stoichiometry โดย Continuous

Variation Method และใช้สมมติฐานเป็น Criteria



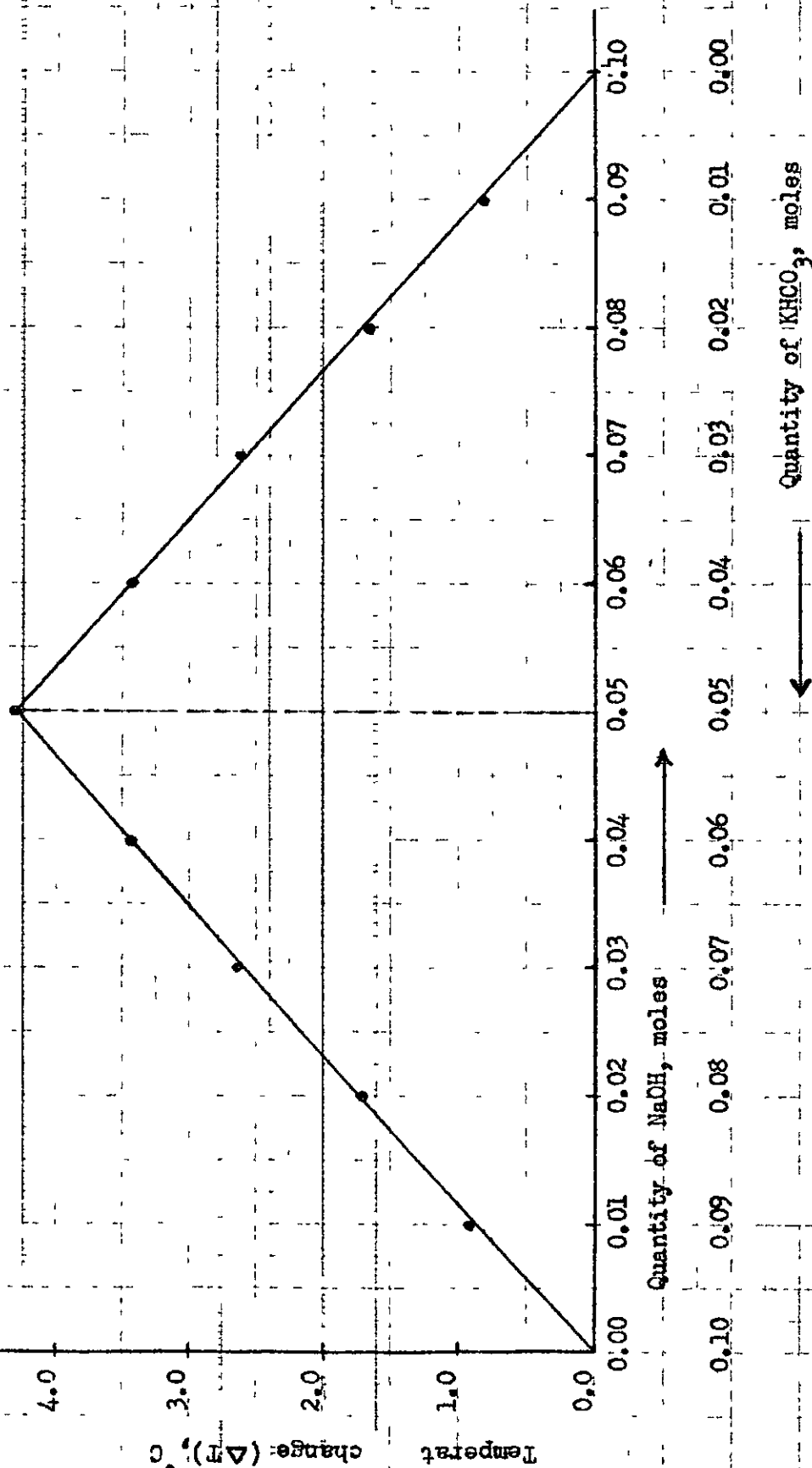
Quantity of NaOH, moles

Quantity of HAc, moles

รูปที่ 18 แสดงการ Plot graph ระหว่างการ Temperature change (ΔT , °C) กับจำนวน mole ของ Reactants

ระบบ System NaOH(aq.) , 1.0 M - $\text{KHCO}_3\text{(aq.)}$, 1.0 M, Total volume 100.0 ml. ในหน่วยลิตร

Stoichiometry - โดย Continuous Variation Method และใช้สมมติฐานเป็น Criteria

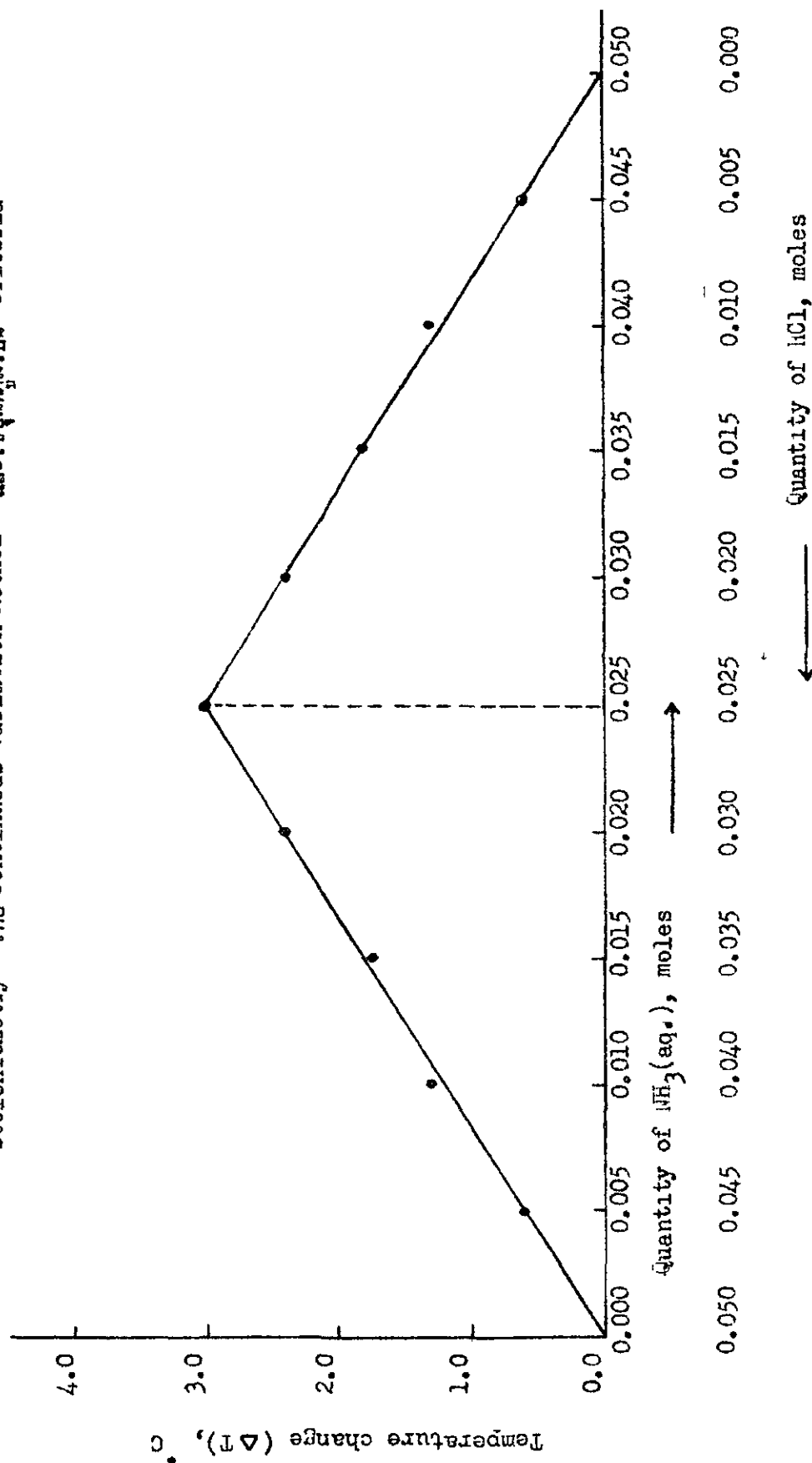


Plot graph showing temperature change (ΔT , °C) minimum mole of reactants

6.0 g 0.0 M System $\text{NH}_3(\text{aq})$, 1.0 M, Total volume 100.0 ml. 1 unit

of this amount of reactants

รูปที่ 20 แสดงการ Plot graph ระหว่างค่า Temperature change ($\Delta T, ^\circ C$) กับจำนวน mole ของ Reactants
 ของ System $NH_3(aq.)$, $0.5\ M - HCl(aq.)$, $0.5\ M$, Total volume $100.0\ ml.$ ในการศึกษา
 Stoichiometry โดยใช้ Continuous Variation method และใช้จุดหมุนเป็น Criteria



การทดลองหา stoichiometry ที่นำมาทดลองทั้ง 8 system นี้ เป็นการทดลองจากปฏิกิริยาระหว่างกรดกับเบส จะเห็นว่าอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไปอย่างเห็นได้ชัด หรือง่ายต่อการวัดค่า ดังนั้นจึงใช้อุณหภูมิเป็น criteria แทนอย่างอื่น อย่างไรก็ตาม การที่จะเลือกเอาอะไรเป็น criteria นั้น ก็ขึ้นอยู่กับ nature ของปฏิกิริยาที่ ๆ เราไปกรณีที่เป็นปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย lead nitrate กับสารละลาย potassium iodide แล้วให้ตะกอน lead iodide หรือในกรณีปฏิกิริยาระหว่างสารละลาย silver nitrate กับสารละลาย sodium chloride แล้วให้ตะกอน silver chloride ออกมานั้น เราก็สามารถที่จะทดลองหา stoichiometry ของปฏิกิริยาเหล่านี้ได้โดยใช้ตะกอน (precipitate) เป็น criteria ได้ นอกจากนี้เราก็คงอาจจะใช้ค่า pH, ความหนาแน่นหรือการเปลี่ยนแปลงสีเป็น criteria ได้ ซึ่งแล้วแต่ว่าการเปลี่ยนแปลงอะไรที่ทำให้สังเกตหรือวัดได้ง่ายที่สุด เมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีของ system ที่นำมาทดลองศึกษา

เมื่อพิจารณาจากกราฟทั้งหมด หน้า 95-102 ที่ได้จากการทดลองหา stoichiometry ของปฏิกิริยาระหว่างกรดกับเบสนั้น จะเห็นว่าใน system หนึ่ง ๆ การเปลี่ยนแปลงของค่าอุณหภูมิ ($\Delta T, ^\circ C$) จะมากน้อยแตกต่างกันออกไปในแต่ละ ratio ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับปริมาณ (mole) ของกรดและเบสที่ทำปฏิกิริยากัน อย่างไรก็ตามจะมีอยู่จุดหนึ่งที่ว่าอุณหภูมิ ($\Delta T, ^\circ C$) เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด (maximum) และจุดนี้เองที่เรียกว่า stoichiometric point ซึ่งเป็นจุดที่ reactant ทั้งสองทำปฏิกิริยากันพอดี และจำนวน mole ของ reactant ทั้งสองใน ratio นี้เอง จะเป็น mole ratio ของ reactant ทั้งสองที่ทำปฏิกิริยากันพอดี ดังนั้นจึงสามารถนำเอาค่า mole ratio นี้ไปเขียนสมการเคมีในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของ system นั้น ๆ ได้ ซึ่งนับว่าเป็นวิธีการศึกษา stoichiometry ที่วิธีหนึ่ง โดยอาศัย mole concept

เนื่องจากในทางการศึกษาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละ ratio หรือในแต่ละ system แสดงการศึกษาเฉพาะอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุด และแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในแต่ละ ratio หรือในแต่ละ system ที่นำมาศึกษาเท่านั้น จึงไม่จำเป็นที่จะต้อง plot graph หากอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไปมากที่สุดในแต่ละ ratio หรือในแต่ละ system เลย

2. Electrochemistry

การเปลี่ยนแปลงทางเคมีหรือการเกิดปฏิกิริยาเคมีนั้น นอกจากจะมีการเปลี่ยนแปลงพลังงานความร้อนเข้ามาเกี่ยวข้องดังกล่าวนั้น ยังมีพลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง

อีกด้วย พลังงานไฟฟ้าที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีนั้น สามารถจะหาค่าของหรือศึกษาได้จากค่าการวัดค่า voltage ของ electrochemical cell ที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งตามปกติแล้วจะศึกษาพลังงานไฟฟ้า ที่ได้มาจากปฏิกิริยาเคมีในรูปของค่า Free energy change (ΔG) ของ system นั้น ๆ เพื่อที่จะนำเอาค่านี้ไปใช้ ในการวัดค่าของปฏิกิริยาเคมี

ค่าสำหรับปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้เองนั้น ถ้า Free energy change (ΔG) จะเป็นลบ (negative) ถ้า Free energy change (ΔG) มีความสัมพันธ์กับค่า heat of reaction (ΔH), absolute temperature (T) และปริมาณที่เรียกว่า entropy change (ΔS) ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ดังนี้

$$\Delta G_{\text{sys.}} = \Delta H_{\text{sys.}} - T\Delta S_{\text{sys.}} \quad \text{ที่อุณหภูมิและความดันคงที่}$$

ถ้า Free energy change (ΔG) นี้นักคิด maximum work อันเนื่องจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี หรือปฏิกิริยาเคมี

$$\text{นั่นคือ } \Delta G = w_{\text{max.}}$$

จากความสัมพันธ์ดังกล่าวข้างต้นนี้ ทำให้เราทราบว่า¹

ถ้า ΔG มีค่าน้อยกว่าศูนย์แล้ว การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นได้เอง

ΔG มีค่ามากกว่าศูนย์แล้ว การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นเองไม่ได้

ΔG มีค่าเท่ากับศูนย์แล้ว แสดงว่า system อยู่ในสมดุล

เนื่องจากค่า Free energy change (ΔG) นี้ สามารถที่จะหาได้จากการทดลอง ทั้งนี้ เพราะว่าที่อุณหภูมิและความดันคงที่ ถ้า ΔG ก็คือ maximum work (capacity) ที่ system จะเปลี่ยนพลังงานได้ไปอยู่ในรูปของงานได้ วิธีการหาค่า ΔG ที่ดีที่สุดคือวิธีเปลี่ยนพลังงานของ system ไปอยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้า เพราะเป็นวิธีที่วัดได้ละเอียดที่สุด และเนื่องจาก "พลังงานไฟฟ้าที่ได้จาก cell reaction ใด จะมีค่าเท่ากับ ΔG ของ cell reaction นั้นที่อุณหภูมิและความดันคงที่"³

¹Laurence E. Strong and Wilmer J. Strutton, op. cit., p.68.

²Laurence E. Strong and Wilmer J. Strutton, op. cit., p.69.

³F.W. Goddard, op. cit., p.207.

จาก Nernst equation ทำให้ทราบว่า

$$\Delta G = -nFE$$

แต่ $\Delta G = W_{\max.}$

ดังนั้น $\Delta G = W_{\max.} = -nFE$

เมื่อ n = จำนวน mole ของ electron ต่อ mole ของ reagent

F = Faraday constant

= 96,500 coulomb.mole⁻¹ ของ electron

E = potential difference in volts.

จะเห็นว่าในการหา Free energy change (ΔG) นั้น สามารถหาได้โดยการวัดค่า potential difference หรือค่า voltage ของ electrochemical cell ที่นำมาทดลองศึกษา แล้วนำค่า voltage นี้ไปคำนวณหาค่า Free energy change (ΔG) อีกครั้งหนึ่งนั่นเอง

เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่เกิดจาก electrochemical cell เกี่ยวข้องกับการไหลของ electron ซึ่ง electron จะไหลจากขั้วลบ (negative) ไปยังขั้วบวก (anode) ของ cell และการไหลของ electron นี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ electrode ทั้งสองของ cell มีค่า oxidation potential แตกต่างกัน โดย electron จะไหลจาก electrode ที่มี oxidation potential สูงไปสู่ electrode ที่มี oxidation potential ต่ำเสมอ ดังนั้นจะเห็นว่าเมื่อเกิดการไหลของ electron ขึ้นจะทำให้มีความเกี่ยวข้องกับ redox reaction โดยตรง กล่าวคือ

oxidation เกิดขึ้นเมื่อธาตุที่เป็น electrode เสีย electron

reduction เกิดขึ้นเมื่อธาตุที่เป็น electrode รับ electron

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

จากการทดลองหาค่า voltage และ Free energy change (ΔG) ของ electrochemical cell ดังกล่าวไว้ที่ 3 หน้า 49-54 ได้ผลออกมาดังแสดงไว้ในตารางที่ 19 หน้า 54 และเมื่อพิจารณาผลการทดลองแต่ละ system แล้ว จะเห็นการเปลี่ยนแปลงของ system ต่าง ๆ ที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันเกิดขึ้นดังนี้

¹Laurence E. Strong and Wilmer J. Stratton, op. cit., p.84.

แผนโลหะที่ทำ electrode ทั้งสองของ cell นั้น แผนที่เป็นขั้วลบ จะให้ electron แก่แผนที่เป็นขั้วบวก โดยไหลผ่านทาง external circuit หรือจะพูดอีกอย่างหนึ่ง ก็คือแผนที่เป็นขั้วลบ นั้นจะทำหน้าที่เป็น reducing agent และแผนที่เป็นขั้วบวก จะทำหน้าที่เป็น oxidising agent และความเข้มข้นของสารละลายนั้น เวลาเตรียมมาใช้ใน electrochemical cell แล้ว สารละลายทั้งสองนั้นจะต้องเป็นไปตาม stoichiometry ของปฏิกิริยาของมัน อย่างเช่น mole ratio ระหว่าง $\text{AgNO}_3 : \text{Zn(NO}_3)_2 = 0.6 : 0.3 = 2 : 1$ หรือ mole ratio เท่ากับ 1 : 1 ในกรณีของ $\text{ZnSO}_4 : \text{CuSO}_4$

ตารางที่ 19 แสดงค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ที่ได้จากการทดลองและจาก Literature

Electrochemical cells	จากการทดลอง		จาก Literature*	
	Voltage (volts)	ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	Voltage (volts)	ΔG^{**} (Kcal.mole ⁻¹)
$\text{Zn/ZnSO}_4(\text{aq.}), 0.5\text{M//CuSO}_4(\text{aq.}), 0.5\text{M/Cu}$	1.10	-50.74	1.10	-50.74
$\text{Cu/Cu(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3\text{M//AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6\text{M/Ag}$	0.45	-20.76	0.46	-21.22
$\text{Pb/Pb(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5\text{M//Cu(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5\text{M/Cu}$	0.48	-22.14	0.47	-21.68
$\text{Zn/Zn(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3\text{M//AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6\text{M/Ag}$	1.55	-71.49	1.56	-71.96
$\text{Pb/Pb(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.25\text{M//AgNO}_3(\text{aq.}), 0.5\text{M/Ag}$	0.92	-42.44	0.93	-42.90

* G.H. Nylward and T.J.V. Findlay, op. cit., pp.77-79.

** $\Delta G = -nFE$

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน electrochemical cell ที่นำมาศึกษา ดังแสดงไว้ในตารางที่ 19 มีดังต่อไปนี้



ค่า voltage ที่ได้จากทดลองครั้งนี้ ได้จากการ plot graph

จากค่า voltage และค่า Free energy change (ΔG) ที่แสดงไว้ในตารางที่ 19 หน้า 106 จะเห็นวาทะที่แตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทดลองกับค่าที่รายงานไว้ใน literature ดังนี้

1. $\text{Zn}/\text{ZnSO}_4(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}/\text{CuSO}_4(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}/\text{Cu}$ cell

จากผลการทดลองพบว่า zinc electrode เป็นขั้วลบ (negative) และ copper electrode เป็นขั้วบวก (positive) แสดงว่า electron ไหลจาก zinc electrode ผ่าน external circuit ไปยัง copper electrode สำหรับค่า voltage และค่า ΔG ของ system นี้ เท่ากับ 1.10 volts และ $-50.74 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ ซึ่งผลการทดลองครั้งนี้ จะเท่ากับผลที่รายงานไว้ของ Strong¹ และ Gachic² คือค่า voltage และค่า ΔG ที่รายงานไว้เท่ากับ 1.10 volts และ $-50.7 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

2. $\text{Cu}/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3 \text{ M}/\text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6 \text{ M}/\text{Ag}$ cell

จากผลการทดลองพบว่า copper electrode เป็นขั้วลบ (negative) และ silver electrode เป็นขั้วบวก (positive) แสดงว่า electron ไหลจาก copper electrode ไปยัง silver electrode สำหรับค่า voltage และค่า ΔG ของ system นี้ เท่ากับ 0.45 volt และ $-20.76 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ แตกต่างไปจากการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจาก

¹Laurence E. Strong and Wilmer J. Stratton, op. cit., pp.72-73.

²L. Gachic, J. Chem. Educ., 38, 4 636 (1961).

Chemical data book¹ พบว่า voltage และค่า ΔG ของ system นี้เท่ากับ 0.46 volt และ $-21.22 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

3. $\text{Pb/Pb(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5 \text{ M/Cu(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5 \text{ M/Cu cell}$

จากการทดลองพบว่า lead electrode เป็นขั้วลบ(negative) และ copper electrode เป็นขั้วบวก(positive) แสดงว่า electron ไหลจาก lead electrode ผ่าน external circuit ไปยัง copper electrode สำหรับค่า voltage และค่า ΔG ของ system นี้ เท่ากับ 0.48 volt และเท่ากับ $-22.14 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ แต่ค่าที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจาก Chemical data book² พบว่าค่า voltage และค่า ΔG เท่ากับ 0.47 volt และ $-21.68 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ

4. $\text{Zn/Zn(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3 \text{ M/AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6 \text{ M/Ag cell}$

จากการทดลองพบว่า zinc electrode เป็นขั้วลบ(negative) และ silver electrode เป็นขั้วบวก(positive) แสดงว่า electron ไหลออกจาก zinc electrode ผ่าน external circuit ไปยัง silver electrode สำหรับค่า voltage และค่า ΔG ของ system นี้ เท่ากับ 1.55 volts และเท่ากับ $-71.40 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ แต่ค่า voltage และค่า ΔG ที่ Neidig³ รายงานไว้เท่ากับ 1.57 volts และ $-72.12 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ ส่วนค่า voltage และค่า ΔG ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจาก Chemical data book⁴ เท่ากับ 1.56 volts และ $-71.96 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ

5. $\text{Pb/Pb(NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.25 \text{ M/AgNO}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M/Ag cell}$

จากการทดลองพบว่า lead electrode เป็นขั้วลบ(negative) และ silver electrode เป็นขั้วบวก(positive) แสดงว่า electron ไหลจาก lead electrode ผ่าน external circuit ไปยัง silver electrode สำหรับค่า voltage และค่า ΔG ของ

¹G.H. Aylward, and T.J.V. Findlay, op. cit., pp.77-79.

²Ibid.

³H.A. Neidig, op. cit., p.29-4.

⁴Laurence E. Strong and Wilmer J. Stratton, loc. cit.

system นี้ เท่ากับ 0.92 volt และเท่ากับ $-42.44 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ แต่ค่า voltage และค่า ΔG ที่ได้จากการคำนวณโดยอาศัยข้อมูลจาก Chemical data book เท่ากับ 0.93 volt และเท่ากับ $-42.90 \text{ Kcal.mole}^{-1}$ ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจาก ΔG ของทั้ง 5 systems ที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่ามีค่าเป็นลบ (negative) ทั้งหมด แสดงว่าการเปลี่ยนแปลงของ electrochemical cell นี้ สามารถเกิดขึ้นเองได้ (spontaneous) แต่การที่ค่า voltage และ ΔG แตกต่างไปจากค่าที่รายงานไว้ใน literature นั้น เนื่องมาจากเครื่องมือเป็นส่วนใหญ่ ทั้งนี้เพราะว่าในการแบ่งขีดเครื่องมือที่สร้างขึ้นมา (ดังกล่าวไว้ในบทที่ 3 หน้า 27) นี้จะไม่ละเอียดพอ หรืออาจจะไม่ถูกต้องเท่าที่ควร จึงทำให้ค่า voltage ที่วัดได้แตกต่างไปจากค่าที่ได้จากการคำนวณบ้างเล็กน้อย อีกอย่างหนึ่งอาจจะเนื่องมาจากการเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้อาจมาจากการทดลองที่ condition ต่างกัน ซึ่งการทดลองครั้งนี้ ทดลองที่อุณหภูมิประมาณ 30°C แต่ผลที่นำมาจาก literature นั้น ทำการทดลองที่ 25°C

อย่างไรก็ตาม จากผลการทดลองหาค่า voltage และค่า ΔG ของ electrochemical cell นี้ ก็ทำให้ทราบว่า แผ่น electrode ใดมีค่า oxidation potential สูงกว่าจะเป็น reducing agent และอีกแผ่นหนึ่งจะทำหน้าที่เป็น oxidising agent และค่า Free energy change (ΔG) สามารถนำเอามาพิจารณาดูทิศทางของปฏิกิริยาเคมีได้ ถึงแม้ว่า ผลการทดลองครั้งนี้จะแตกต่างไปจากผลที่รายงานไว้ใน literature บ้างเล็กน้อยก็ตาม

Concentration Cell

Concentration Cell หมายถึง electrochemical cell ที่ใช้สารละลายชนิดเดียวกัน แต่มีความเข้มข้นต่างกัน และใช้ electrodes ชนิดเดียวกันกับโลหะที่เป็นองค์ประกอบของเกลือของสารละลายนั้น ค่า Free energy change (ΔG) ที่ได้จากการวัด voltage หรือ electromotive force (e.m.f.) ของ concentration cell ที่อุณหภูมิและความดันคงที่ สามารถคำนวณมาได้โดยวิธีการต่อไปนี้

$$\Delta G = -nFE$$

แต่ค่า Free energy change (ΔG) ของ concentration cell สามารถที่จะคำนวณตามทฤษฎีได้ดังนี้¹

¹Laurence E. Strong and Wilmer J. Stratton, op. cit., pp.73-79.

$$\Delta G = -2.303 RT \log C_A/C_B$$

และ $E = \frac{0.0591}{n} \log C_A/C_B$ ที่ 298° K

เมื่อ ΔG = Free energy change, kcal.mole⁻¹

n = จำนวน mole ของ electron ต่อ mole ของ reagent

F = Faraday constant

= 96,500 coulomb. mole⁻¹ of electron

E = potential difference in volts.

R = gas constant

= 1.9871 cal.deg⁻¹.mole⁻¹

T = absolute temperature, °K

C_A = concentrated solution, mole.liter⁻¹

C_B = dilute solution, mole.liter⁻¹

ถ้าเราหา voltage กับค่า log concentration ratio ในแต่ละครั้งไป plot graph แล้ว เราจะได้ graph เป็นเส้นตรง และเราสามารถหา proportionality constant (K) จาก slope ของ graph เส้นตรงนี้ได้ และค่า proportionality constant (K) นี้สามารถที่จะคำนวณได้ความเข้มข้นได้

$$K = \frac{2.303 RT}{nF} \quad \text{volts}$$

ผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองหา voltage, proportionality constant (K) และค่า Free energy change (ΔG) ของ concentration cell ที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 หน้า 54-58 ทั้ง 3 systems ปรากฏผลออกมาซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 20, 21, 22 ต่อไปนี้

¹Laurence E. Strong and Wilmer J. Stratton, op. cit., p.79.

ตารางที่ 20 แสดงค่า Cell Potential and Concentration ratio for
a Cu-CuSO₄ Concentration cell at 28.4°C

Ratio	Conc.A (moles. liters ⁻¹)	Conc.B (moles. liters ⁻¹)	Conc. Ratio (C _A /C _B)	E _{max} (volts)		-ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	
				Exp.	Calc. ⁿ	Exp.	Calc. ⁿ
1	0.98	0.02	49.0	0.041±0.0007	0.051	1.891±0.033	-2.331
2	0.95	0.05	19.0	0.030±0.0007	0.038	1.384±0.032	1.763
3	0.90	0.10	9.0	0.024±0.0007	0.029	1.107±0.033	1.316
4	0.80	0.20	4.0	0.014±0.0007	0.018	0.646±0.033	0.830
5	0.70	0.30	2.3	0.007±0.0007	0.011	0.323±0.033	0.499
6	0.50	0.50	1.0	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 21 แสดงค่า Cell Potential and Concentration ratio for
a Zn-ZnSO₄ Concentration cell at 28.0°C

Ratio	Conc.A (moles. liters ⁻¹)	Conc.B (moles. liters ⁻¹)	Conc. Ratio (C _A /C _B)	E _{max} (volts)		-ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	
				Exp.	Calc. ⁿ	Exp.	Calc. ⁿ
1	0.98	0.02	49.0	0.030±0.0007	0.051	1.384±0.032	2.323
2	0.95	0.05	19.0	0.022±0.0007	0.038	1.015±0.033	1.761
3	0.90	0.10	9.0	0.017±0.0007	0.029	0.784±0.033	1.314
4	0.80	0.20	4.0	0.012±0.0007	0.018	0.554±0.033	0.829
5	0.70	0.30	2.3	0.006±0.0007	0.011	0.277±0.033	-0.498
6	0.50	0.50	1.0	0.000	0.000	0.000	0.000

ตารางที่ 22 แสดงค่า Cell Potential and Concentration ratio for
a Pb-Pb(NO₃)₂ Concentration cell at 28.4°C

Ratio	Conc.A (moles. liters ⁻¹)	Conc.B (moles. liters ⁻¹)	Conc. Ratio (C _A /C _B)	E _{max} (volts)		-ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	
				Exp.	Calc. ⁿ	Exp.	Calc. ⁿ
1	0.98	0.02	49.0	0.031±0.0007	0.051	1.429±0.032	2.331
2	0.95	0.05	19.0	0.022±0.0007	0.038	1.015±0.033	1.763
3	0.90	0.10	9.0	0.017±0.0007	0.029	0.784±0.033	1.316
4	0.80	0.20	4.0	0.011±0.0007	0.018	0.507±0.033	0.830
5	0.70	0.30	2.3	0.006±0.0007	0.011	0.277±0.033	0.499
6	0.50	0.50	1.0	0.000	0.000	0.000	0.000

เมื่อพิจารณา voltage และค่า Free energy change ที่แสดงไว้ในตาราง 20, 21, 22 หน้า 111-112 ของทั้ง 3 systems แล้ว จะเห็นว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้นในลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือ แผ่น electrode ที่จมอยู่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่าจะเป็นขั้วบวก (positive) และแผ่น electrode ที่จมอยู่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าเป็นขั้วลบ (negative) แปลงว่า electron จะไหลจากขั้วลบผ่าน external circuit ไปยังขั้วบวก และ electron ที่ไหลไปนี้จะไป reduce cation ที่อยู่ใน solution ที่มีความเข้มข้นมากกว่า ทำให้ความเข้มข้นของ solution นั้นลดลง ในขณะที่แผ่น electrode ที่จมอยู่ใน solution ที่มีความเข้มข้นน้อยกว่าจะถูก oxidise อันเป็นผลทำให้ cation ใน solution นั้นเพิ่มขึ้น จากเหตุผลดังนี้ ทำให้รู้สึกคล้ายกับว่าเกิดการเคลื่อนที่ของ ions จาก solution ที่มีความเข้มข้นมากไปสู่ solution ที่มีความเข้มข้นน้อยนั่นเอง

นอกจากนี้ค่า voltage ของ concentration cell จะมีค่ามากที่สุดเมื่อ concentration ratio มีค่ามากที่สุด และค่า voltage จะลดลงเมื่อค่า concentration ratio ลดลง จนกระทั่งเมื่อค่า concentration ratio เท่ากับ 1 หรือเมื่อความเข้มข้นของ solution ที่นำมาทำเป็น concentration cell มีค่าเท่ากัน ค่า voltage จะเท่ากับศูนย์ ดังนั้นถ้าจะพูดได้ว่าค่า voltage (E_{max}.) จะแปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของสารละลายทั้งสอง

ที่นำมาทำเป็น concentration cell ทั้งนี้เพราะความแตกต่างของความเข้มข้นของสารละลายทั้งสอง จะทำให้เกิด potential difference ของ cell แตกต่างกันไปขึ้น

สำหรับค่า Free energy change (ΔG) ที่ได้จาก การทดลองทั้งหมดนั้น จะเห็นว่ามีค่าเป็นลบ (negative) แปรผันเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า concentration ratio เหมือนกับค่า voltage จากค่า Free energy change (ΔG) นี้ สามารถนำเอาไปพยากรณ์ทิศทางของปฏิกิริยาเคมีได้ กล่าวคือ เมื่อ concentration ratio อยู่มากแล้ว จะทำให้ค่า ΔG เป็นลบมากขึ้น ในกรณีเช่นนี้ การเปลี่ยนแปลงก็มีแนวโน้มที่จะเกิดขึ้นได้เอง (spontaneous change) มากกว่าในกรณีที่การมีค่า concentration ratio น้อย โดยเฉพาะเมื่อค่า concentration ratio เท่ากับ 1 แล้ว ค่า ΔG จะเท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายถึงปฏิกิริยาเข้าสู่สมดุล (equilibrium) ที่ถือว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมีเกิดขึ้น

เมื่อพิจารณา graph ที่แสดงไว้หน้า 115-117 ซึ่งเป็นการ plot graph ระหว่างค่า voltage กับค่า log concentration ratio แล้ว จะเห็นว่าได้ graph เส้นตรง แต่ค่า proportionality constant (K) ที่ได้จาก การทดลองโดยวัดจากค่า slope (ค่า $\tan \theta$) ของเส้น graph แล้ว จะแตกต่างจากค่าที่คำนวณได้จากการคำนวณตามทฤษฎี* ดังนี้

Cu-CuSO₄ concentration cell ค่า K จากการทดลอง เท่ากับ 0.0232 volt. แต่ค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 0.0299 volt

Zn-ZnSO₄ concentration cell ค่า K จากการทดลอง เท่ากับ 0.0176 volt. แต่ค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 0.0299 volt

Pb-Pb(NO₃)₂ concentration cell ค่า K จากการทดลอง เท่ากับ 0.0185 volt. แต่ค่าที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 0.0299 volt

การหาค่า voltage ค่า Free energy change (ΔG) และค่า proportionality constant (K) ที่ได้จาก การทดลองครั้งนี้แตกต่างไปจากค่าที่คำนวณได้ทางทฤษฎีนั้น นอกจากจะเนื่องมาจากความผิดพลาดเกิดขึ้นของเครื่องมือที่ใช้วัดค่า voltage ($E_{\text{max.}}$) ดังกล่าวไว้หน้า 65 แล้ว

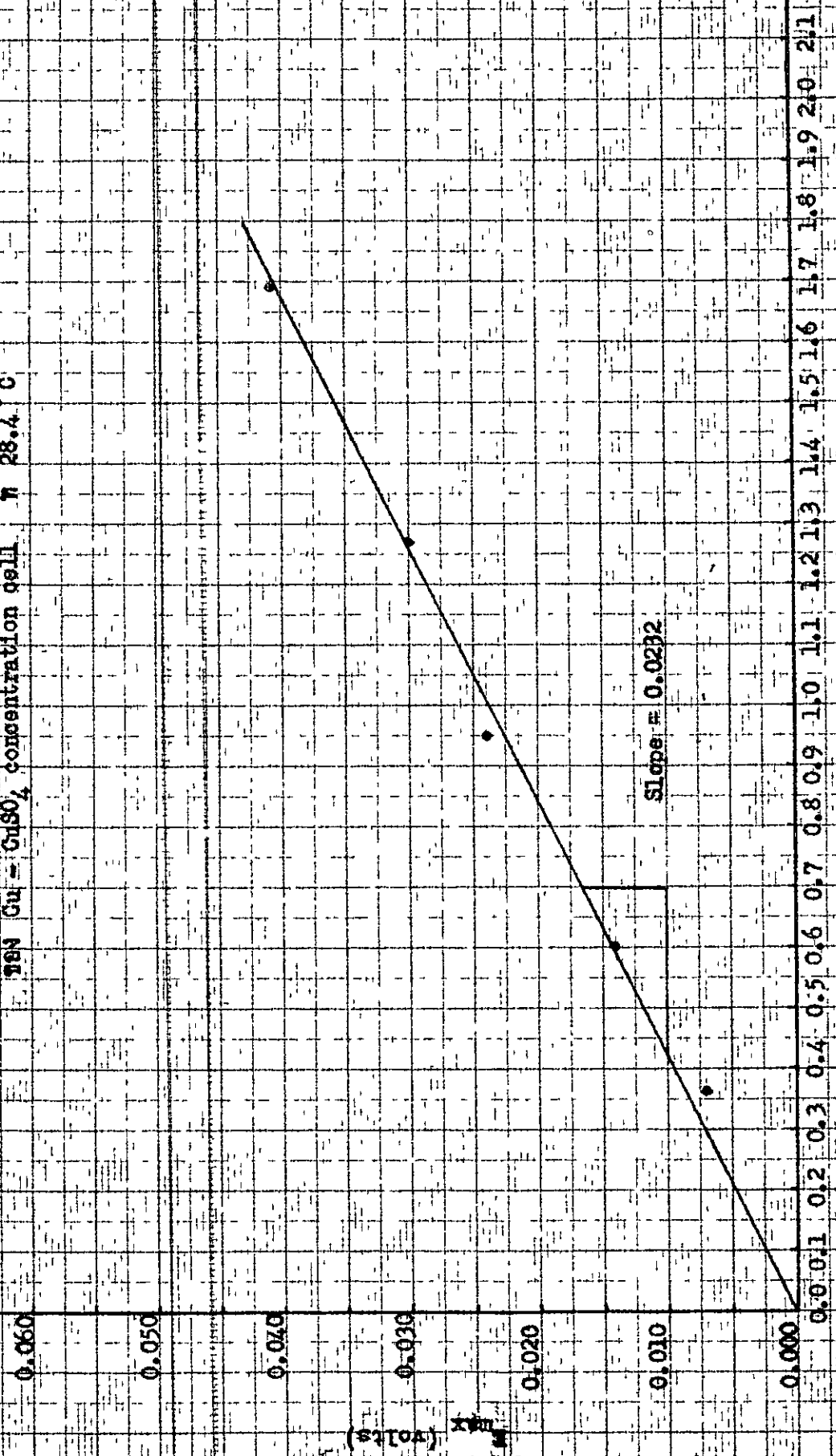
$$*K = \frac{2.303 RT}{nF}$$

ยังอาจจะขึ้นจากการใช้ค่า concentration แทนค่า activity เพราะค่า "voltage" จะเป็น
 สัดส่วนโดยตรงกับ $\log$ ของ ratio of activities มากกว่าที่จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $\log$
 ของ concentration ratio"¹ และค่า concentration ของ solution ใด ๆ จะมีค่าเท่ากับ
 ค่า activity ก็ต่อเมื่อ solution นั้น ๆ เจือจางมาก เพราะการที่ solution เจือจางมาก ๆ
 นั้น จะทำให้ ions ต่าง ๆ อยู่ห่างไกลกัน และไม่มีแรงดึงดูดระหว่าง ions (interionic
 attraction) หรือมีน้อยมาก ซึ่งในกรณีเช่นนี้ค่า activity จะมีค่าเท่ากับค่า concentration
 แต่ในการทดลองครั้งนี้ ผู้เขียนได้ใช้ concentration ตั้งแต่ 0.02 M ไปจนถึง 0.98 M ซึ่งเมื่อ
 พิจารณาแล้ว ค่า concentration จะไม่เท่ากับ activity เลย ดังนั้นผลที่ได้จากการทดลองจึง
 ถูกลากเลือนไปจากผลที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎี

¹Laurence E. Strong and Wilmer J. Stratton, op. cit., p.78.

Fig. 21. Nernst Plot graph showing E_{max} (volts) vs. Log concentration ratio

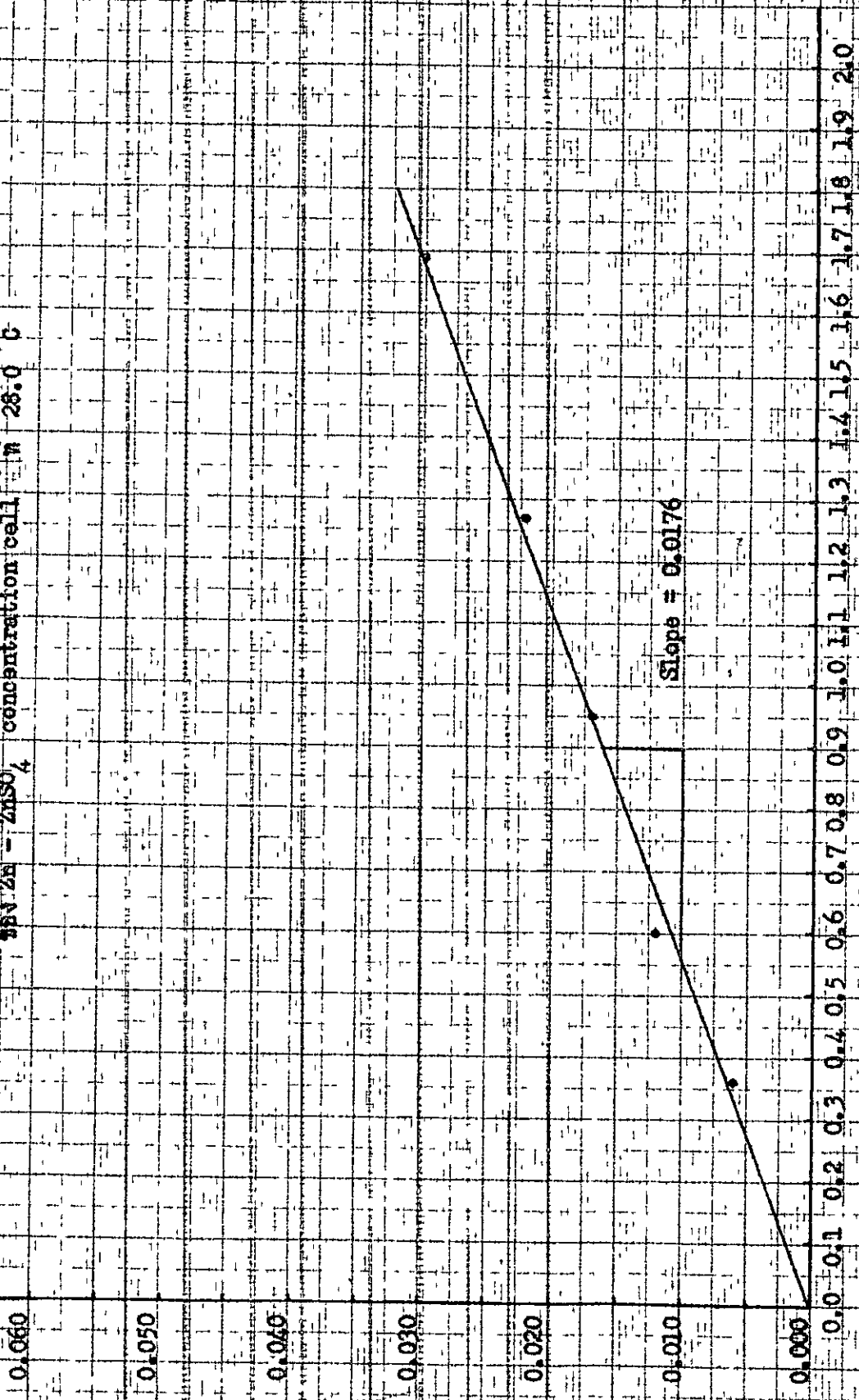
for Cu - CuSO_4 concentration cell at 28.4°C



Slope = 0.0232

Fig. 22. ZnSO_4 - ZnSO_4 concentration cell. E_{max} (volts) vs. $\log$ concentration ratio.

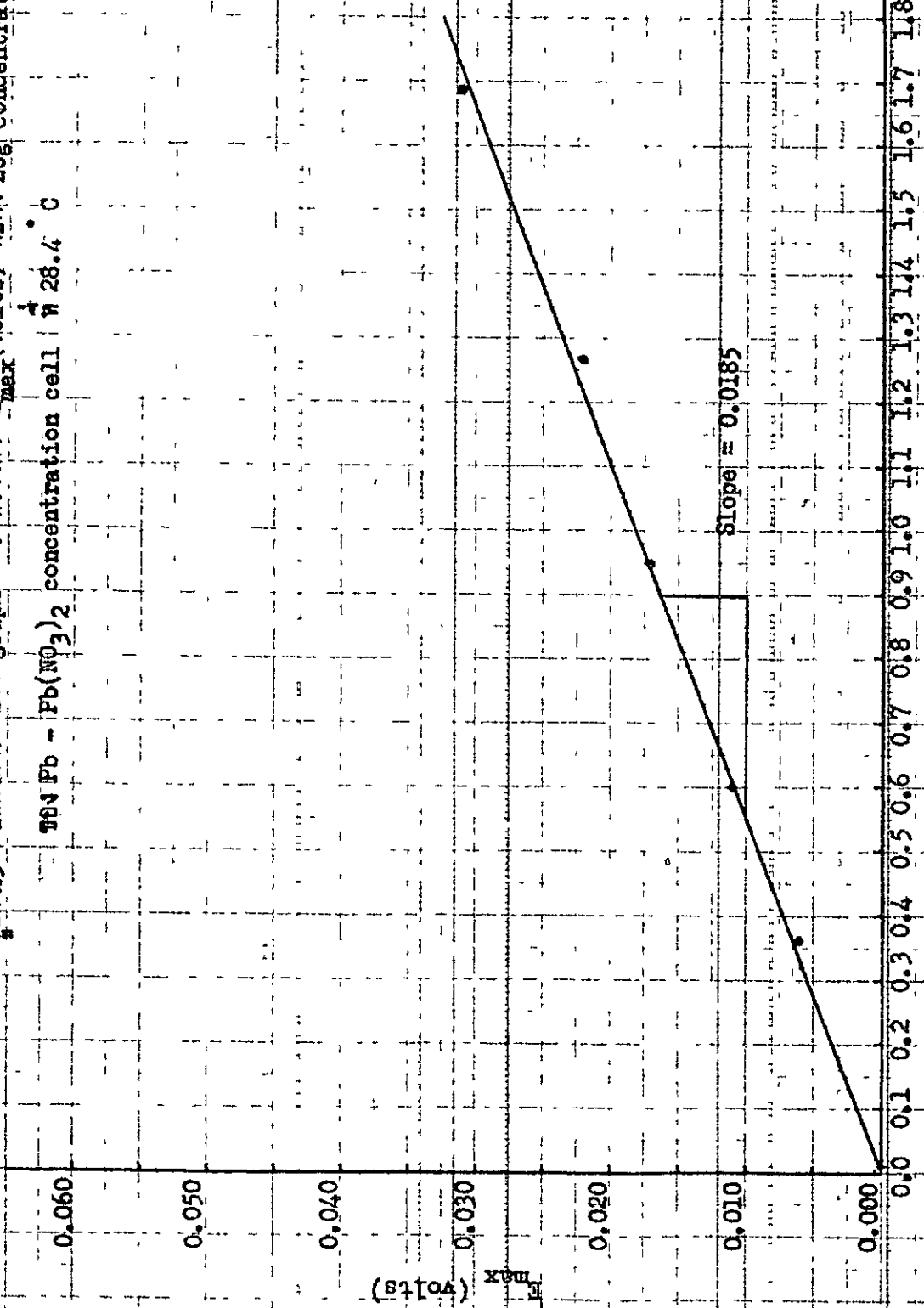
ZnSO_4 concentration cell at 28.0°C



$\log$ concentration ratio

Slope = 0.0176

23. Plot graph of E_{max} (volts) vs Log concentration ratio
 for $\text{Pb} - \text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ concentration cell at 28.4°C



Log concentration ratio

บทที่ 5

บทบอ สรูปผลการทดลอง และขอเสนอแนะ

ความมุ่งหมายในการศึกษาครั้งนี้

1. เพื่อศึกษาหาวิธีการออกแบบการทดลองอย่างง่าย ๆ และสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental Kit) สำหรับนำไปใช้ในการเรียนการสอนเรื่องพลังงาน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีในระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย และอุดมศึกษา
2. เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบค่าของพลังงาน ที่ได้จากแบบการทดลองและเครื่องมือทดลอง ในข้อ 1 กับค่าของพลังงานในปฏิกิริยาเคมีเดียวกันที่รายงานไว้ใน literature ว่าแตกต่างกันหรือไม่ มากกว่ากันเท่าใด
3. เพื่อเป็นการเสนอแนะให้ครูที่สอนวิชาเคมี จัดสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental Kit) ขึ้นเพื่อทดลองประกอบการเรียนการสอนเรื่องพลังงาน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี โดยใช้วัสดุที่ไม่เป็นอันตราย หาง่าย และมีราคาถูก
4. เพื่อเป็นการเสนอแนะให้ครูนำเอาวิธีการทดลอง แบบการทดลอง และหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental Kit) ไปใช้สอนเรื่องพลังงาน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี
5. เพื่อเป็นการช่วยเหลือเกี่ยวกับงบประมาณทางวิทยาศาสตร์ของสถานการศึกษาต่าง ๆ

ขอบเขตของการศึกษาครั้งนี้

1. คนกวดหาวิธีการออกแบบการทดลอง และสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental Kit) ขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเรื่องพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี
2. แบบการทดลอง วิธีการทดลอง และหีบเครื่องมือการทดลอง จะใช้ในการศึกษาและการเรียนการสอนเรื่องพลังงานต่อไปนี้ของปฏิกิริยาเคมี
 - 2.1 พลังงานความร้อน (Thermal or Heat energy)
 - 2.2 พลังงานไฟฟ้า (Electrical energy)
3. มุ่งเอาผลการศึกษาค้นคว้าไปใช้ในการเรียนการสอน เรื่องพลังงานอันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมีในคาบปริมาณวิเคราะห์

สรุปผลของการศึกษาค้นคว้า

1. การสร้างหีบเครื่องมือทดลอง (Experimental Kit) สามารถใช้ขวดแก้ว Latex และ styrofoam มาประกอบกันขึ้นเป็น calorimeter อย่างง่าย ๆ ได้ และสามารถดัดแปลง voltmeter, 10.0 v. ให้เป็น ammeter, 1.0 mA โดยแกะเอา series resistor ออก แล้วนำไปเทียบ scale ใหม่ กับ multimeter ซึ่ง voltmeter ที่นำมาดัดแปลงนี้ราคาเพียง 90 บาท และสามารถใช้ voltmeter, 3.0 v. อีกอันหนึ่งราคา 90 บาท มาใช้เป็น voltmeter โดยตรง นอกจากนั้นยังสามารถใช้ voltmeter อันนี้มาดัดแปลงให้เป็น voltmeter ที่มี scale 0-0.1 v. โดยแกะเอา series resistor ออก แล้วนำไปเทียบ scale กับ multimeter ภายใน Experimental Kit นี้ ประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ดังนี้

- 1.1 เครื่องมือทดลอง 23 ชิ้น
- 1.2 สารประกอบประเภทกรด 4 ชนิด
- 1.3 สารประกอบประเภทด่าง 3 ชนิด
- 1.4 สารประกอบประเภทเกลือ 19 ชนิด
- 1.5 ประเภทโลหะ 4 ชิ้น
- 1.6 สารประเภท indicator 3 ชนิด
- 1.7 ประเภทเบ็กเตล็ค 5 อย่าง

Experimental Kit ที่สร้างขึ้นนี้ ใช้ในการทดลองทั้งหมด 47 การทดลอง

2. ผลของการศึกษาค้นคว้าหาพลังงานความร้อน อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี หรือการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ได้ผลดังนี้

2.1 Heat of Neutralization

จากการทดลองหาค่า heat of neutralization ของ system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

System	1. NaOH(aq.), 1.0M-H ₂ SO ₄ (aq.), 0.5M	เท่ากับ -14.29±0.11 Kcal.mole ⁻¹
	2. NaOH(aq.), 0.5M-HCl(aq.), 0.5M	เท่ากับ -13.69±0.33 Kcal.mole ⁻¹
	3. NaOH(aq.), 0.5M-HNO ₃ (aq.), 0.5M	เท่ากับ -13.59±0.36 Kcal.mole ⁻¹
	4. KOH(aq.), 0.5M-HCl(aq.), 0.5M	เท่ากับ -13.34±0.25 Kcal.mole ⁻¹
	5. NaOH(aq.), 1.0M-CH ₃ COOH(aq.), 1.0M	เท่ากับ -13.23±0.18 Kcal.mole ⁻¹

6. $\text{NaOH(aq.)}, 1.0\text{M}-\text{KHCO}_3(\text{aq.}), 1.0\text{M}$ เท่ากัน $-9.88 \pm 0.14 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
 7. $\text{NH}_3(\text{aq.}), 1.0\text{M}-\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0\text{M}$ เท่ากัน $-12.68 \pm 0.11 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
 8. $\text{NH}_3(\text{aq.}), 0.5\text{M}-\text{HCl(aq.)}, 0.5\text{M}$ เท่ากัน $-12.39 \pm 0.19 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

2.2 Heat of Solution

จากการทดลองพบค่า heat of solution ของ system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

System	1. $\text{BaCl}_2(\text{aq.})$	$-3.07 \pm 0.29 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	2. $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O(aq.)}$	$+3.99 \pm 0.43 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	3. $\text{MgSO}_4(\text{aq.})$	$-21.90 \pm 0.26 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	4. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O(aq.)}$	$+2.25 \pm 0.64 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	5. $\text{CuSO}_4(\text{aq.})$	$-16.85 \pm 0.39 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	6. $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O(aq.)}$	$+1.65 \pm 0.37 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	7. $\text{CH}_3\text{COONa(aq.)}$	$-3.78 \pm 0.13 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	8. $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 10\text{H}_2\text{O(aq.)}$	$+4.63 \pm 0.13 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	9. $\text{Na}_2\text{SO}_4(\text{aq.})$	$-0.76 \pm 0.00 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	10. $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O(aq.)}$	$+18.75 \pm 0.31 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	11. $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{aq.})$	$-5.83 \pm 0.47 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	12. $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O(aq.)}$	$+16.23 \pm 0.49 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

2.3 Heat of Hydration

จากการทดลองพบค่า heat of hydration ของ system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

System	1. $\text{BaCl}_2 - 2\text{H}_2\text{O}$	เท่ากับ $-7.06 \pm 0.72 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	2. $\text{MgSO}_4 - 7\text{H}_2\text{O}$	เท่ากับ $-24.15 \pm 0.90 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	3. $\text{CuSO}_4 - 5\text{H}_2\text{O}$	เท่ากับ $-18.50 \pm 0.76 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	4. $\text{CH}_3\text{COONa} - 10\text{H}_2\text{O}$	เท่ากับ $-8.41 \pm 0.26 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	5. $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 10\text{H}_2\text{O}$	เท่ากับ $-19.51 \pm 0.31 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	6. $\text{Na}_2\text{CO}_3 - 10\text{H}_2\text{O}$	เท่ากับ $-22.06 \pm 0.96 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

2.4 Heat of Precipitation

จากการทดลองพบค่า heat of precipitation ของ system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

System	1. PbI_2	เท่ากับ	$-14.08 \pm 1.14 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	2. PbCrO_4	เท่ากับ	$-15.32 \pm 0.67 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

2.5 Heat of Displacement

จากการทดลองพบค่า heat of displacements ของ system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

System	1. $\text{Zn(s)} - \text{CuSO}_4(\text{aq.})$	เท่ากับ	$-50.97 \pm 0.37 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	2. $\text{Zn(s)} - 2\text{AgNO}_3(\text{aq.})$	เท่ากับ	$-86.97 \pm 0.76 \text{ Kcal.mole}^{-1}$
	3. $\text{Cu(s)} - 2\text{AgNO}_3(\text{aq.})$	เท่ากับ	$-34.48 \pm 0.47 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

2.6 การทดลองหา Stoichiometry ของ system ต่าง ๆ โดยใช้จุดทวนเป็น

criteria

จากการทดลองพบว่า stoichiometric point ของแต่ละ system จะมี mole ratio ดังต่อไปนี้

System	1. $\text{NaOH(aq.)}, 1.0\text{M} - \text{H}_2\text{SO}_4(\text{aq.}), 0.5\text{M}$	เท่ากับ	2 : 1
	2. $\text{NaOH(aq.)}, 0.5\text{M} - \text{HCl(aq.)}, 0.5\text{M}$	เท่ากับ	1 : 1
	3. $\text{NaOH(aq.)}, 0.5\text{M} - \text{HNO}_3(\text{aq.}), 0.5\text{M}$	เท่ากับ	1 : 1
	4. $\text{KOH(aq.)}, 1.0\text{M} - \text{HCl(aq.)}, 1.0\text{M}$	เท่ากับ	1 : 1
	5. $\text{NaOH(aq.)}, 1.0\text{M} - \text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0\text{M}$	เท่ากับ	1 : 1
	6. $\text{NaOH(aq.)}, 1.0\text{M} - \text{KHCO}_3(\text{aq.}), 1.0\text{M}$	เท่ากับ	1 : 1
	7. $\text{NH}_3(\text{aq.}), 1.0\text{M} - \text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0\text{M}$	เท่ากับ	1 : 1
	8. $\text{NH}_3(\text{aq.}), 0.5\text{M} - \text{HCl(aq.)}, 0.5\text{M}$	เท่ากับ	1 : 1

3. พลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy)

ในการทดลองหาพลังงานไฟฟ้า (Electrical energy) อันเนื่องมาจากปฏิกิริยาเคมี ครั้งนี้ ได้ทดลองศึกษาในรูป Free energy change (ΔG) โดยการวัดค่า voltage จาก electrochemical cell ต่าง ๆ ซึ่งจากการทดลองได้ค่า voltage และค่า Free energy change (ΔG) ของ system ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

System 1. $\text{Zn}/\text{ZnSO}_4(\text{aq.}), 0.5\text{M} // \text{CuSO}_4(\text{aq.}), 0.5\text{M} / \text{Cu}$ cell ค่า voltage เท่ากับ 1.10 volts และค่า Free energy change (ΔG) เท่ากับ $-50.74 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

System 2. $\text{Cu}/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3\text{M} // \text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6\text{M} / \text{Ag}$ cell ค่า voltage เท่ากับ 0.45 volt และค่า Free energy change (ΔG) เท่ากับ $-20.76 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

System 3. $\text{Pb}/\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5\text{M} // \text{Cu}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5\text{M} / \text{Cu}$ cell ค่า voltage เท่ากับ 0.48 volt และค่า Free energy change (ΔG) เท่ากับ $-22.14 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

System 4. $\text{Zn}/\text{Zn}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3\text{M} // \text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6\text{M} / \text{Ag}$ cell ค่า voltage เท่ากับ 1.55 volts และค่า Free energy change (ΔG) เท่ากับ $-71.49 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

System 5. $\text{Pb}/\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.25\text{M} // \text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.50 / \text{Ag}$ cell ค่า voltage เท่ากับ 0.92 volt และค่า Free energy change (ΔG) เท่ากับ $-42.44 \text{ Kcal.mole}^{-1}$

4. การศึกษาหาค่า voltage และ ΔG ของ Concentration cell

System ที่นำมาศึกษามีดังต่อไปนี้

4.1 $\text{Cu}-\text{CuSO}_4$ concentration cell

4.2 $\text{Zn}-\text{ZnSO}_4$ concentration cell

4.3 $\text{Pb}-\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ concentration cell

จากการศึกษาเกี่ยวกับ 3 system นี้ พบว่า เมื่อค่า concentration ratio มาก หรือเมื่อความเข้มข้นของสารละลายทั้งสองที่นำมาทำเป็น concentration cell แตกต่างกันมาก จะทำให้ค่า voltage มาก และค่า Free energy change (ΔG) ที่ได้นี้ค่าเป็นลบ (negative) มากขึ้น แต่ถ้าวัด concentration ratio มีค่าน้อย ค่า voltage ก็จะมีค่าน้อย และค่า Free energy change (ΔG) ก็จะมีค่าเป็นลบ (negative) น้อยลงด้วย จนกระทั่งเมื่อค่า concentration ratio เท่ากับ 1 หรือสารละลายทั้งสองที่นำมาทำเป็น concentration cell มีค่าเท่ากันแล้ว ก็จะทำให้ทั้งค่า voltage และค่า Free energy change (ΔG) มีค่า

เป็นศูนย์ (zero) และเมื่อนำเอาค่า voltage และค่า log concentration ratio system ไป plot graph แล้ว จะได้ graph ของความสัมพันธ์ของค่าทั้งสองนี้เป็นเส้นตรง

ข้อเสนอแนะในการศึกษากันต่อไป

1. เนื่องจากในการศึกษากันครั้งนี้ ใช้ตาชั่ง mettler ที่อ่านได้ละเอียดถึง 0.05 g. และมีราคาแพงเกินไป ดังนั้นในการศึกษากันต่อไป ควรจะหาวิธีการสร้างตาชั่งอย่างง่าย ๆ ขึ้นใช้แทน โดยอาจจะใช้ไม้บรรทัดเป็นกานตาชั่ง และใช้ถ้วย plastic เป็นจานของตาชั่ง ซึ่งจะทำให้ได้ตาชั่งแบบ two-pans balance อย่างง่าย ๆ สำหรับนำไปชั่งสารต่าง ๆ ได้
2. เนื่องจากในการศึกษากันครั้งนี้ ผู้เขียนได้ใช้แผ่น electrode ที่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเกิดปฏิกิริยาเคมีขึ้น มาใช้ในการศึกษาหา voltage ของ electrochemical cell ดังนั้นในการศึกษากันต่อไป ควรจะหาแผ่น electrode ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และสอดคล้องกับสารละลายที่นำมาทำเป็น electrochemical cell เช่น แผ่น carbon(C) หรือแผ่น Platinum (Pt) ซึ่งถือว่าเป็น inert electrode มาใช้แทน ซึ่งจะเป็นผลทำให้สามารถทดลองหาค่า voltage ของ system ต่าง ๆ ที่ไม่สามารถหาแผ่น electrode ของสารประกอบที่นำมาทำเป็น electrochemical cell นั้น ๆ ได้อีกด้วย.

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

นิกก สะเวียรัชย์ "การเคลื่อนไหวเกี่ยวกับการปรับปรุงการสอนวิชาเคมี" วิสามัญศึกษา

3 : 59-62 กรกฎาคม 2509.

ศึกษานิเทศก์, หน่วย กรมการฝึกหัดครู กระทรวงศึกษาธิการ เอกสารการสัมมนาผู้สอนวิชาเคมี
ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาการศึกษาชั้นสูง พุทธศักราช 2510, 137 หน้า.

ศึกษานิเทศก์, หน่วย กรมการฝึกหัดครู กระทรวงศึกษาธิการ แผนแนวการสอนวิชาวิทยาศาสตร์
ตามหลักสูตรประกาศนียบัตรวิชาการศึกษาชั้นสูง 2510, 75 หน้า.

Ackermann, Th., Z. Elektrochem., 62, 411-19 (1958).

Alyea, Hubert N., J. Chem. Educ., 44, 335-342 (1967).

Arthur H. Thomas Company, Scientific Apparatus and Reagents, The Company,
Philadelphia, 1968, 1273 pp.

Aylward, G.H., Ratnaik, J., and Watton, E.C., Compound Formation, Vol.2,
UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia, Bangkok,
Thailand, 1968, 104 pp.

Aylward, G.H., and Findlay, T.J.V., Chemical Data Book, (2nd, ed.),
John Wiley and Sons, Australasia Pty. Ltd., Sydney, 1966, 38 pp.

Barrow, Gordon M., Physical Chemistry, (2nd, ed.), New York, Mc Graw Hill,
1966, 843 pp.

Baur, Emil, and Lattmann, W., Z. Elektrochem., 40, 582-5 (1934).

Bichowsky, Russell F., and Rossini, Frederick, The Thermochemistry of
The Chemical Substance, Reinhold Publishing Cooperation, New York,
1936, 460 pp.

Brodalo, G., and Glauque, W.F., J. Am. Chem. Soc., 80, 2042-4 (1958).

Burns, Thorburn D., and Rattenbury, Evelyn, Introductory Practical
Physical Chemistry, Bell & Bain Ltd., Great Britain, 1966, 175 pp.

Calvet, E., J. Chim. Phys., 30, 140-66 (1933).

- Catalog 9 Laboratory Apparatus and Chemicals, Will Scientific Inc., and Subsidiaries, U.S.A., 1966, 1142 pp.
- Charlesworth, M.E., and Patch, E.M., J. Chem. Educ., 9, 1490 (1932).
- Charlesworth, M.E., and Patch, E.M., Sch. Sc. Rev., 13, 256 (1932).
- Clever, H.L., J. Chem. Educ., 36, 45 (1961).
- Clinton, G., J. Chem. Educ., 8, 683 (1931).
- Curse, K., Z. Elektrochem., 46, 571 (1940).
- Curtin Scientific Apparatus and Chemicals, W.H. Curtin & Co., U.S.A., 1922, 1077 pp.
- Elliot, Norman, and Yost, Don M., J. Am. Chem. Soc., 56, 1057-60 (1934).
- Findlay, Alexander, Introduction to Physical Chemistry, (3rd, ed.), London, H.W. Melville, 1953, 592 pp.
- Gachic, L., J. Chem. Educ., 38, 4 636 (1961).
- Garin, D.L., J. Chem. Educ., 45, 37 (1968).
- Getman, Frederick H., Outlines of Theoretical Chemistry, Stamford Conn., 1931, 635 pp.
- Goddard, P.W., Higher Chemical Arithmetic, (2nd, ed.), Longmans, Green & Co. Ltd., 1967, 276 pp.
- Grube, G., Rau, E.A., Z. Elektrochem., 40, 325 (1934).
- Gucker, F.T., and Floyd A., Van Atta, J. Chem. Educ., 8, 1157-65 (1931).
- Hilbourne, E.W., J. Chem. Educ., 5, 733 (1928).
- Hodgman, Charles D., Handbook of Chemistry and Physics, (36th. ed.), The Chemical Rubber Publishing Co., 1963, 3604 pp.
- Juza, Robert, and Uphoff, Wilhem, Z. Anorg. U. Allgem. Chem., 287, 113-19 (1956).
- Kimura, Masamichi, Sci. Paper. Inst. Physics. Chem. Research (Tokyo), 18, 289-300 (1932).
- Kokes, R.J., Dorfman, H.K., and Matina, T., J. Chem. Educ., 39, 90 (1962).
- Mahan, B.H., J. Chem. Educ., 37, 635 (1960).

- Martin, D.R., J. Chem. Educ., 25, 495 (1948).
- Miller, J.G., Lowell, A.I., and Lucasse, W.W., J. Chem. Educ., 24, 121 (1947).
- Muldrow Jr., C.N., and Hepter, L.G., J. Chem. Educ., 78, 5989-90 (1956).
- Neidig, H.A., Investigating Chemical Systems, Mc Graw-Hill Book Company, U.S.A., 1964, 581 pp.
- Ocar, Scarpa, Congresso. Naz. Chim. Pura Applicata, 3, 83-84 (1930).
- Pace, E., Gazz. Chim. Ital., 60, 881-8 (1930).
- Pepee, H.M., Candy, W.J., and Laidler, K.J., Can. J. Chem., 34, 1677-80 (1956).
- Pattison, D.B., Miller, J.G., and Lucasse, W.W., J. Chem. Educ., 20, 319 (1943).
- Pimentel, George C., Chemistry An Experimental Science, W.H. Freeman and Company, San Francisco and London, 1963, 466 pp.
- Pruett, Carl F., Fundamental Principles of Physical Chemistry, (6th, ed.), The Macmillan Company, New York, 1957, 804 pp.
- ← Raksaboldej, Bitak, "A Survey of Science Programs in Selected State Teachers College.", Doctor's Thesis, New York University, 1961, 134 pp.
- Schütze, H., Eucken, M., and Nörsch, W., Z. Anorg. U. Allgem. Chem., 292, 293-7 (1957).
- Shibata, Zen-ichi, and Terasaki, Yoshio, J. Chem. Soc. Japan., 57, 1208-11 (1936).
- Snyder, M.K., Chemistry Structure and Reactions, Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1966, 748 pp.
- Southard, J.C., Ind. Eng. Chem., 32, 442-5 (1940).
- Sterrett, Frances S.K., and others, A Laboratory Investigation of Concepts in Chemistry, Harper & Row, New York, 1968, 197 pp.
- Stone, C.H., J. Chem. Educ., 4, 630 (1927).
- Strong, Laurence E., and Stratton, Wilmer J., Chemical Energy, Reinhold Publishing Corporation, New York, 1966, 115 pp.

- Terasaki, Yoshio, Nippon Kagaku Zasshi, 78, 1774-7 (1957).
- Water, Van, and Roger, Catalog 69 Laboratory Apparatus, U.S.A., 1969, 1112 pp.
- Water, Van, and Roger, 1969 Educator's Catalog of Laboratory Apparatus and Chemicals, U.S.A., 1968, 280 pp.
- Welch Laboratory Apparatus "Scientific Apparatus", W.M. Welch Scientific Company, clinical, 1959, 840 pp.
- Wells, A.F., Structural Inorganic Chemistry, (3rd, ed.), The Clarendon Press, Oxford, 1945, 590 pp.
- Wendell, Smith V., Oliver, L.I., and Kenneths, J. Am. Chem. Soc., 59, 1213-1215 (1937).
- Wickert, K., Z. Elektrochem., 44, 410 (1938).
- Zimmermann, H.W., and Latimer, W.H., J. Am. Chem. Soc., 61, 1554-5 (1939).
- Zyka, J., Experiments on Chemical Formation, UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia, Bangkok, Thailand, 1969, 72 pp.
- Zyka, J., Experiments on Chemical Equilibria, UNESCO Pilot Project for Chemistry Teaching In Asia, Bangkok, Thailand, 1968, 69 pp.

ภาคผนวก

ภาพแนว ก.

แหล่งและราคาของเครื่องมือและสารเคมี
ที่นำมาสร้าง Experimental Kit

ภาคผนวก ก.

1. เครื่องมือทดลองเพื่อใช้ศึกษาพลังงานความร้อนและเครื่องมือทั่วไป
 เครื่องมือเหล่านี้มีค่ามาจากงานจากวัสดุไฟฟ้า และสั่งซื้อจากร้านหรือบริษัทขายอุปกรณ์
 วิทยาศาสตร์ทั่วไป รวมราคาคงเบ็ดเตล็ด 218.50 บาท

2. เครื่องมือทดลองเพื่อใช้ศึกษาพลังงานไฟฟ้า
 เครื่องมือทดลองเหล่านี้มีค่าจากร้านหรือบริษัทขายอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ และร้านหรือบริษัท
 ขายอุปกรณ์วิทยาศาสตร์ทั่วไป ในราคาก่าง ๆ ดังต่อไปนี้

2.1 Voltmeter	ราคา	90.00 บาท
2.2 Ammeter	ราคา	90.00 บาท
2.3 Variable resistor, 25 ohms	ราคา	10.00 บาท
2.4 Switch, ON - OFF	ราคา	6.50 บาท
2.5 Switch เลื่อน 2 อัน	ราคา	5.00 บาท
2.6 Clamp 2 อัน	ราคา	2.00 บาท
2.7 กล่องสำหรับใส่สายไฟ หลายราคา		5.00 บาท
2.8 สายไฟหลาย 4 กอน	ราคา	6.00 บาท
รวมราคาเครื่องมือในข้อ ข. เท่ากับ		214.50 บาท

3. สารเคมี

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองทั้งหมด เราซื้อจากร้าน หรือบริษัทขายเคมีภัณฑ์ทั่วไป ซึ่งรวม
 ราคาคงเบ็ดเตล็ดเท่ากับ 125.90 บาท

4. เบ็ดเตล็ด

แผ่นโลหะต่าง ๆ คือ เงิน ทองแดง สังกะสี, ตะกั่ว, กระดาษกรอง และอื่น ๆ หาซื้อได้
 จากร้านขายเครื่องเงิน และร้านขายเคมีภัณฑ์ทั่วไป รวมราคาคงเบ็ดเตล็ดเท่ากับ 25 บาท

รวมราคาเครื่องมือทดลอง และสารเคมีทั้งหมดที่อยู่ใน Experimental kit นี้ เท่ากับ
 583.90 บาท

ភាគដេក ខ.

វិធីការកំរោង

ภาคผนวก ข.

1. การกำหนดค่า Calorimeter Constant or Heat Capacity of Calorimeter

1.1 การกำหนดค่าปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำเย็นมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นต่อ 1 องศา
ใช้สูตรการคำนวณ ดังนี้

$$C = \frac{(m_2 s_2 t_2) - (m_1 s_1 t_1)}{t_1} \quad \text{cal.deg}^{-1}$$

1.2 การกำหนดค่าปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำร้อนมีอุณหภูมิลดลงต่อ 1 องศา
ใช้สูตรการคำนวณดังนี้

$$C = \frac{(m_2 s_2 t_2) - (m_1 s_1 t_1)}{t_2} \quad \text{cal.deg}^{-1}$$

กำหนดให้

* m_1 = น้ำหนักของน้ำเย็น, g.

m_2 = น้ำหนักของน้ำร้อน, g.

s_1 = ความร้อนจำเพาะของน้ำเย็น, $\text{cal.deg}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$.

s_2 = ความร้อนจำเพาะของน้ำร้อน, $\text{cal.deg}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$.

t_1 = อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นของน้ำเย็น, °C

t_2 = อุณหภูมิที่ลดลงของน้ำร้อน, °C

C = calorimeter constant, cal.deg^{-1}

ถือว่า t_1 กับ t_2 เป็นอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นและลดลงของ calorimeter ที่ใช้ด้วย

2. การกำหนดค่า Heat of Neutralization

ในการคำนวณใช้สูตรต่อไปนี้

$$\Delta H = (ms\Delta T + C\Delta T) \times \frac{10}{8} \times \frac{1}{1000} \text{ Kcal.mole}^{-1}$$

กำหนดให้

ΔH = heat of neutralization, Kcal.mole^{-1}

m = น้ำหนักของ

s = ความร้อนจำเพาะของ

C = calorimeter constant, cal.deg^{-1}

* ถือว่า น้ำหนัก (Weight) ที่ใช้ทั้งหมดหมายถึง มวล (mass)

C = calorimeter constant, cal.deg.⁻¹

a = กว้างเขมขนของสารละลายใน calorimeter, M

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป $(t_3 - \frac{t_1 + t_2}{2})$, °C

t_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายของเบส, °C

t_2 = อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลายของกรด, °C

t_3 = อุณหภูมิสูงสุดของ reaction mixture, °C

3. การคำนวณหาค่า Heat of Solution ของ Hydrated Salt

ในการคำนวณใช้สูตรต่อไปนี้

$$\Delta H_2 = + (ms\Delta T + C\Delta T) \frac{W}{1000M} \text{ Kcal.mole}^{-1}$$

เมื่อกำหนดให้

ΔH_2 = heat of solution of hydrated salt, Kcal.mole⁻¹

m = น้ำหนักของสารละลาย, g.

s = ความร้อนจำเพาะของสารละลาย, cal.deg.⁻¹g.⁻¹

M = น้ำหนักของ hydrated salt, g.

W = น้ำหนักโมเลกุลของ hydrated salt

C = calorimeter constant, cal.deg.⁻¹

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป $(t_1 - t_2)$, °C

t_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ, °C

t_2 = อุณหภูมิต่ำสุดของสารละลาย, °C

4. การคำนวณหาค่า Heat of Solution ของ Anhydrous Salt

ในการคำนวณใช้สูตรต่อไปนี้

$$\Delta H_1 = - (ms\Delta T + C\Delta T) \frac{W}{1000M} \text{ Kcal.mole}^{-1}$$

เมื่อกำหนดให้

ΔH_1 = heat of solution of anhydrous salt, Kcal.mole⁻¹

m = น้ำหนักของสารละลาย, g.

s = ความร้อนจำเพาะของสารละลาย $\text{cal.deg}^{-1}\text{g}^{-1}$

M = น้ำหนักของ anhydrous salt, g.

W = น้ำหนักของโมเลกุล anhydrous salt

C = calorimeter constant, cal.deg^{-1}

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป $(t_2 - t_1)$, $^{\circ}\text{C}$

t_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำ, $^{\circ}\text{C}$

t_2 = อุณหภูมิสูงสุดของสารละลาย, $^{\circ}\text{C}$

5. การคำนวณหาค่า Heat of Hydration

ในการคำนวณใช้สูตรต่อไปนี้

$$\Delta H_3 = \Delta H_1 - \Delta H_2 \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

เมื่อกำหนดให้

ΔH_3 = heat of hydration of compound A., Kcal.mole^{-1}

ΔH_1 = heat of solution of anhydrous salt of compound A., Kcal.mole^{-1}

ΔH_2 = heat of solution of hydrated salt of compound A., Kcal.mole^{-1}

6. การคำนวณหาค่า Heat of Precipitation

ในการคำนวณใช้สูตรต่อไปนี้

$$\Delta H = (ms\Delta T + C\Delta T) \frac{W}{1000M} \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

เมื่อกำหนดให้

ΔH = heat of precipitation, Kcal.mole^{-1}

m = น้ำหนักของ reaction mixture, g.

s = ความร้อนจำเพาะของ reaction mixture, $\text{cal.deg}^{-1}\text{g}^{-1}$

M = น้ำหนักของตะกอน, g.

W = น้ำหนักโมเลกุลของสารที่เป็นตะกอน

C = calorimeter constant, cal.deg^{-1}

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป $(t_3 - \frac{t_1 + t_2}{2})$

t_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลาย A., $^{\circ}\text{C}$

t_2 = อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลาย B., °C

t_3 = อุณหภูมิสูงสุดของ reaction mixture, °C

7. การคำนวณหา Heat of Displacement

ในการคำนวณใช้สูตรต่อไปนี้

$$\Delta H = \frac{(ms\Delta T + C\Delta T)}{1000M} \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

เมื่อค่าแทนให้

ΔH = heat of displacement Kcal.mole^{-1}

m = น้ำหนักของ reaction mixture, g.

s = ความร้อนจำเพาะของ reaction mixture, $\text{cal.deg.}^{-1}\text{g.}^{-1}$

M^* = จำนวน mole ของสารที่เข้าไปทำปฏิกิริยาแทนที่

ΔT = อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป ($t_2 - t_1$), °C

t_1 = อุณหภูมิเริ่มต้นของสารละลาย, °C

t_2 = อุณหภูมิสูงสุดของ reaction mixture, °C

8. การคำนวณหา Free energy change (ΔG)

ในการคำนวณใช้สูตรต่อไปนี้

$$\Delta G = \frac{(-nFE) \times 0.239}{1000} \quad \text{Kcal.mole}^{-1}$$

เมื่อค่าแทนให้

ΔG = Free energy change Kcal.mole^{-1}

n = จำนวน mole ของ electron ต่อ mole ของ reagent

F = Faraday constant

= 96,500 coulomb. mole^{-1} of electron

E = Potential difference in volts

(1 volt-coulomb = 0.239 cal.)

*คิดได้จากการนำเอาจำนวน mole ของสารที่ถูกแทนที่ ที่ได้จากการทดลอง ไปพิจารณาหาจำนวน mole ของสารที่เข้าไปแทนที่ จากสมการการแทนที่ของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน system นั้น ๆ ซึ่งทำให้สมการนี้สมดุลแล้ว

9. การกำหนดค่า Heat Capacity of Solution

ในการคำนวณไฮสตรกัวไนต์

$$H_s = \frac{H_c + H_w}{W_s}$$

กำหนดให้

H_s = specific heat of solution $\text{cal.deg.}^{-1} \text{g.}^{-1}$

H_c = heat capacity of solute

= (wt. of solute, g.) x (specific heat of solute) cal.deg.^{-1}

H_w = heat capacity of water

= (wt. of water, g.) x (specific heat of water) cal.deg.^{-1}

W_s = wt. of solution, g.

10. การกำหนดค่า Standard deviation (s)

ในการคำนวณไฮสตรกัวไนต์

$$s = \sqrt{\frac{(N_1 - \bar{N})^2 + (N_2 - \bar{N})^2 + (N_3 - \bar{N})^2 \dots + (N_n - \bar{N})^2}{(n - 1)}}$$

กำหนดให้

s = standard deviation

n = จำนวนครั้งที่ทำการทดลองทั้งหมดของแต่ละ system

$\bar{N}$ = ค่าเฉลี่ย

$$= \frac{N_1 + N_2 + N_3 \dots + N_n}{n}$$

ค่าเฉลี่ยที่ได้จากการทดลองบันทึกไว้ดังนี้ $\bar{N} \pm s$

๖

ภาคผนวก ก.

๗

ข้อมูลของการทดลอง

ตารางที่ 23 แสดงข้อมูลในการหาค่า Calorimeter Constant ของ Calorimeter A
 โดยใช้น้ำร้อน (Hot Water) 50.0 ml. และน้ำเย็น (Cold Water) 50.0 ml.

No	Weight of Water (g.)		Initial Temperature (°C)		Temp. of Mixture (°C)	Temp. Change (°C)		Calorimeter Constant (cal.deg ⁻¹)
	Cold Water	Hot Water	Cold Water	Hot Water		Cold Water	Hot Water	
1	49.7	49.4	31.6	39.6	35.2	3.6	4.4	10.7
2	49.7	49.4	30.3	40.9	35.0	4.7	5.9	12.4
3	49.7	49.4	31.6	39.6	35.2	3.6	4.4	10.7
4	49.7	49.4	31.7	38.4	34.7	3.0	3.7	11.3
5	49.7	49.4	31.6	39.6	35.2	3.6	4.4	10.7
6	49.7	49.4	30.3	40.9	35.0	4.7	5.9	12.4
7	49.7	49.4	31.6	39.6	35.2	3.6	4.4	10.7
8	49.7	49.4	31.6	39.6	35.2	3.6	4.4	10.7
Average								11.2±0.8

ตารางที่ 24 แสดงอุณหภูมิในการหาค่า Calorimeter Constant ของ Calorimeter B.
 โกลีไธน้ำร้อน (Hot Water) 50.0 ml. ผสมกับน้ำเย็น (Cold Water) 50.0 ml.

No	Weight of Water (g.)		Initial Temperature (°C)		Temp. of Mixture (°C)	Temp. Change (°C)		Calorimeter Constant (cal.deg ⁻¹)	
	Cold Water	Hot Water	Cold Water	Hot Water		Cold Water	Hot Water	1*	2**
1	49.7	49.6	33.6	46.0	39.3	5.7	6.7	8.6	7.3
2	49.7	49.6	30.5	44.9	37.2	6.7	7.7	7.3	6.4
3	49.7	49.6	30.1	46.1	37.6	7.5	8.5	6.5	5.7
4	49.7	49.6	30.8	45.6	37.7	6.9	7.9	7.1	6.2
5	49.7	49.6	32.4	41.4	36.4	4.0	5.0	10.5	9.2
6	49.7	49.6	32.0	42.8	36.9	4.9	5.9	9.5	8.3
7	49.7	49.6	31.9	41.3	36.1	4.2	5.2	10.3	9.0
8	49.7	49.6	32.8	39.8	35.8	3.1	4.0	11.8	10.3

* คำนวณที่ 1°C ของอุณหภูมิของน้ำเย็นที่เพิ่มขึ้น

** คำนวณที่ 1°C ของอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ลดลง

ตารางที่ 25 แสดงข้อมูลในการทดลองหา Heat of Neutralization (ΔH) ของ

System NaOH(aq.) , 1.0 M - $\text{H}_2\text{SO}_4\text{(aq.)}$, 0.5 M (50 : 50 mL.)

No	Initial Temperature, °C			Final Temp. of Reaction Mixture (°C)	Weight of Reaction Mixture (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
	NaOH(aq.)	$\text{H}_2\text{SO}_4\text{(aq.)}$	Average				
1	30.0	30.0	30.0	36.5	102.4	6.5	-14.37
2	30.0	30.2	30.1	36.6	102.4	6.5	-14.37
3	30.2	30.2	30.2	36.6	102.4	6.4	-14.15
4	30.2	30.2	30.2	36.6	102.3	6.4	-14.14
5	30.2	30.2	30.2	36.7	102.4	6.5	-14.37
6	30.2	30.2	30.2	36.7	102.4	6.5	-14.37
7	30.2	30.2	30.2	36.7	102.4	6.5	-14.37
8	30.2	30.2	30.2	36.6	102.5	6.4	-14.16
Average							-14.29±0.11

ตารางที่ 26 แสดงข้อมูลในการทดลองหา Heat of Neutralization (ΔH) ของ
System NaOH(aq.), 0.5 M - HCl(aq.), 0.5 M (50 : 50 mL.)

No	Initial Temperature, °C		Final Temp. of Reaction Mixture (°C)	Weight of Reaction Mixture (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
	NaOH(aq.)	HCl(aq.)				
1	31.1	31.1	34.2	100.2	3.1	-13.69
2	31.2	31.2	34.4	100.2	3.2	-14.13
3	31.2	31.2	34.4	100.2	3.2	-14.13
4	31.1	31.1	34.2	100.1	3.1	-13.68
5	31.2	31.2	34.2	100.2	3.0	-13.25
6	30.8	30.8	33.9	100.2	3.1	-13.69
7	30.7	30.7	33.8	100.1	3.1	-13.68
8	30.7	30.7	33.7	100.1	3.0	-13.24
Average						-13.69±0.33

ตารางที่ 27 แสดงข้อมูลในการทดลองหา Heat of Neutralization (ΔH) ของ

System NaOH(aq.) , 0.5 M - $\text{HNO}_3\text{(aq.)}$, 0.5 M (50 : 50 mL.)

No	Initial Temperature, °C			Final Temp. of Reaction Mixture (°C)	Weight of Reaction Mixture (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
	NaOH(aq.)	$\text{HNO}_3\text{(aq.)}$	Average				
1	27.2	27.2	27.2	30.4	100.8	3.2	-14.08
2	27.4	27.4	27.4	30.4	100.8	3.0	-13.20
3	27.8	28.0	27.9	31.0	100.9	3.1	-13.65
4	28.4	28.6	28.7	31.8	100.9	3.1	-13.65
5	28.8	28.8	28.8	31.8	100.9	3.0	-13.21
6	29.2	29.2	29.2	32.3	101.0	3.1	-13.66
7	29.1	29.3	29.2	32.2	101.0	3.0	-13.22
8	29.3	29.3	29.3	32.5	100.8	3.2	-14.08
Average							-13.59±0.36

ตารางที่ 28 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Neutralization (ΔH) ของ

System KOH(aq.) , 0.5 M - HCl(aq.) , 0.5 M (50 : 50 mL.)

No	Initial Temperature, °C		Final Temp. of Reaction Mixture (°C)	Weight of Reaction Mixture (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
	KOH(aq.)	HCl(aq.)				
1	30.5	30.4	33.5	100.4	3.05	-13.37
2	30.4	30.3	33.4	100.4	3.05	-13.35
3	30.3	30.1	33.2	100.4	3.0	-13.15
4	29.5	29.5	32.6	100.3	3.1	-13.59
5	29.7	29.5	32.7	100.3	3.1	-13.59
6	29.6	29.6	32.7	100.4	3.1	-13.59
7	29.4	29.5	32.4	100.4	2.95	-12.93
8	29.2	29.2	32.2	100.4	3.0	-13.15
Average						-13.34 $\pm$ 0.25

ตาราง 29 แสดงข้อมูลในการทดลองพหุความร้อน Heat of Neutralization (ΔH) ของ
 System NaOH(aq.) , 1.0 M - $\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}$, 1.0 M (50 : 50 mL.)

No	Initial Temperature, °C		Final Temp. of Reaction Mixture (°C)	Weight of Reaction Mixture (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , kcal.mole ⁻¹)
	NaOH(aq.)	$\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}$				
1	29.2	29.2	35.2	101.3	6.0	-13.14
2	29.2	29.4	35.4	101.3	6.1	-13.35
3	29.6	29.6	35.6	101.3	6.0	-13.14
4	30.0	30.0	36.0	101.2	6.0	-13.12
5	30.2	30.2	36.2	101.2	6.0	-13.12
6	30.2	30.3	36.2	101.3	5.95	-13.03
7	28.0	28.0	34.2	101.2	6.2	-13.57
8	28.0	28.0	34.1	101.3	6.1	-13.35
Average						-13.23±0.18

การวัด 30 แสดงผลในการทดลองการวัด Heat of Neutralization (ΔH) ของ
System NaOH(aq.) , 1.0 M - $\text{KHCO}_3\text{(aq.)}$, 1.0 M (50 : 50 mL.)

No	Initial Temperature, °C		Final Temp. of Reaction Mixture (°C)	Weight of Reaction Mixture (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
	NaOH(aq.)	$\text{KHCO}_3\text{(aq.)}$				
1	31.4	31.8	35.9	103.8	4.30	-9.89
2	31.6	31.2	35.7	103.8	4.30	-9.89
3	31.6	30.9	35.6	103.9	4.35	-10.01
4	31.4	31.5	35.8	103.9	4.35	-10.01
5	31.5	31.4	35.8	103.8	4.35	-10.01
6	31.4	31.4	35.7	103.9	4.3	-9.90
7	31.3	31.3	35.5	103.8	4.2	-9.66
8	31.3	31.3	35.5	103.8	4.2	-9.66
Average						-9.88±0.14

31 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Neutralization (ΔH) ของ

System $\text{NH}_3(\text{aq.}), 1.0 \text{ M} - \text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq.}), 1.0 \text{ M}$ (50 : 50 ml.)

No	Initial Temperature, ° C			Final Temp. of Reaction Mixture (° C)	Weight of Reaction Mixture (g.)	Temp. Change (ΔT , ° C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
	NH ₃ (aq.)	CH ₃ COOH(aq.)	Average				
1	28.6	29.2	28.9	34.7	98.8	5.8	-12.76
2	28.6	28.8	28.7	34.5	98.8	5.8	-12.76
3	28.8	28.8	28.8	34.6	98.9	5.8	-12.77
4	28.4	28.6	28.5	34.3	98.8	5.8	-12.76
5	28.2	28.6	28.4	34.2	98.7	5.8	-12.75
6	28.2	28.6	28.4	34.1	98.8	5.7	-12.54
7	28.3	28.5	28.4	34.1	98.8	5.7	-12.54
8	28.2	28.4	28.3	34.0	98.7	5.7	-12.53
Average							-12.68±0.11

System $\text{NH}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M} - \text{HCl}(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$ (50 : 50 mL.)

No	Initial Temperature, °C		Final Temp. of Reaction Mixture (°C)	Weight of Reaction Mixture (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
	$\text{NH}_3(\text{aq.})$	$\text{HCl}(\text{aq.})$				
1	31.4	31.6	34.4	98.8	2.9	-12.53
2	31.3	31.2	34.1	98.8	2.85	-12.31
3	31.5	31.1	34.2	98.8	2.9	-12.53
4	31.4	31.2	34.2	98.8	2.9	-12.53
5	31.3	31.5	34.2	98.8	2.8	-12.10
6	31.5	31.3	34.2	98.8	2.8	-12.10
7	31.6	31.4	34.4	98.8	2.9	-12.53
8	31.6	31.6	34.4	98.7	2.9	-12.52
Average						-12.39 ± 0.19

ตารางที่ 33 แสดงข้อมูลในการทดลองหา Heat of Solution (ΔH)

ของ Barium chloride (BaCl_2)

No	Weight of BaCl_2 (g.)	Initial Temp. of Cold Water ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change ($\Delta T, ^{\circ}\text{C}$)	Enthalpy Change ($\Delta H, \text{Kcal.mole}^{-1}$)
1	4.2	29.2	29.7	103.8	0.5	-2.86
2	4.2	29.2	29.8	103.8	0.6	-3.42
3	4.2	29.0	29.5	103.8	0.5	-2.86
4	4.2	29.0	29.5	103.8	0.5	-2.86
5	4.2	29.0	29.5	103.8	0.5	-2.86
6	4.2	29.0	29.6	103.8	0.6	-3.42
7	4.2	29.0	29.5	103.8	0.5	-2.86
8	4.2	28.9	29.5	103.8	0.6	-3.42
Average						-3.07 $\pm$ 0.29

การทดลอง 34 แสดงข้อผิดพลาดในการทดลองหา Heat of Solution (ΔH) ของ

Barium chloride dihydrate ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

No	Weight of $\text{BaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (g.)	Initial Temp. of Cold Water ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole $^{-1}$)
1	5.0	29.1	28.4	104.6	0.7	3.99
2	5.0	29.2	28.4	104.6	0.8	4.57
3	5.0	29.0	28.3	104.6	0.7	3.99
4	5.0	31.1	30.4	104.6	0.7	3.99
5	5.0	31.1	30.5	104.7	0.6	3.43
6	5.0	31.3	30.6	104.6	0.7	3.99
7	5.0	31.3	30.5	104.6	0.8	4.57
8	5.0	31.2	30.6	104.6	0.6	3.43
Average						3.99 $\pm$ 0.43

ตารางที่ 35 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH)

ของ Magnesium sulfate (MgSO_4)

No	Weight of MgSO_4 (g.)	Initial Temp. of Cold Water ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole^{-1})
1	2.4	28.6	32.6	102.0	4.0	-22.09
2	2.4	29.1	33.1	102.0	4.0	-22.09
3	2.4	29.8	33.7	102.0	3.9	-21.59
4	2.4	30.0	33.9	102.0	3.9	-21.59
5	2.4	30.0	33.9	102.0	3.9	-21.59
6	2.4	29.9	33.9	102.0	4.0	-22.09
7	2.4	29.8	33.8	102.0	4.0	-22.09
8	2.4	30.0	34.0	102.0	4.0	-22.09
Average						-21.90 $\pm$ 0.26

ตารางที่ 36 แสดงผลในการทดลองหา Heat of Solution (ΔH) ของ
 Magnesium sulfate heptahydrate ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)

No	Weight of $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (g.)	Initial Temp. of Cold Water ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change ($\Delta T, ^{\circ}\text{C}$)	Enthalpy Change ($\Delta H, \text{Kcal.mole}^{-1}$)
1	5.0	30.8	30.3	104.5	0.5	2.88
2	5.0	30.8	30.4	104.5	0.4	2.31
3	5.0	30.8	30.5	104.5	0.3	1.78
4	5.0	30.6	30.1	104.5	0.5	2.88
5	5.0	30.8	30.5	104.5	0.3	1.78
6	5.0	30.6	30.1	104.5	0.5	2.88
7	5.0	30.7	30.3	104.5	0.4	2.31
8	5.0	30.6	30.4	104.5	0.2	1.15
Average						2.25 $\pm$ 0.64

ตารางที่ 37 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH)

ของ Copper sulfate (CuSO_4)

No	Weight of CuSO_4 (g.)	Initial Temp. of Cold Water (°C)	Final Temp. of Solution (°C)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
1	3.2	31.0	34.0	102.7	3.0	-16.71
2	3.2	31.0	34.0	102.7	3.0	-16.71
3	3.2	29.2	32.3	102.7	3.1	-17.27
4	3.2	28.8	31.8	102.7	3.0	-16.71
5	3.2	28.8	31.8	102.7	3.0	-16.71
6	3.2	29.1	32.2	102.7	3.1	-17.27
7	3.2	29.2	32.1	102.7	2.9	-16.16
8	3.2	29.2	32.3	102.7	3.1	-17.27
Average						-16.85 $\pm$ 0.39

การทดลอง 38 แสดงอุณหภูมิในการผสมของสารละลาย Heat of Solution (ΔH) ของ

Copper sulfate pentahydrate ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

No	Weight of $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (g.)	Initial Temp. of Cold Water ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change ($\Delta T, ^{\circ}\text{C}$)	Enthalpy Change ($\Delta H, \text{Kcal.mole}^{-1}$)
1	5.0	28.8	28.5	104.5	0.3	1.72
2	5.0	28.8	28.5	104.5	0.3	1.72
3	5.0	28.8	28.5	104.5	0.3	1.72
4	5.0	28.5	28.3	104.5	0.2	1.14
5	5.0	28.5	28.1	104.4	0.4	2.29
6	5.0	28.5	28.3	104.5	0.2	1.14
7	5.0	28.6	28.3	104.5	0.3	1.72
8	5.0	28.6	28.3	104.5	0.3	1.72
Average						1.65 $\pm$ 0.37

ตารางที่ 39 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH)

ของ Sodium acetate (CH_3COONa)

No	Weight of CH_3COONa (g.)	Initial Temp. of Cold Water ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole^{-1})
1	3.0	29.7	31.0	102.6	1.3	-3.71
2	3.0	26.6	27.9	102.6	1.3	-3.71
3	3.0	26.7	28.0	102.6	1.3	-3.71
4	3.0	27.0	28.3	102.6	1.3	-3.71
5	3.0	27.0	28.3	102.6	1.3	-3.71
6	3.0	27.1	28.5	102.6	1.4	-3.99
7	3.0	27.2	28.6	102.6	1.4	-3.99
8	3.0	27.0	28.3	102.6	1.3	-3.71
Average						-3.78 $\pm$ 0.13

ตารางที่ 40 แสดงข้อมูลในการทดลองหา Heat of Solution (ΔH) ของ

Sodium acetate decahydrate ($\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

No	Weight of $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (g.)	Initial Temp. of Cold Water (°C)	Final Temp. of Solution (°C)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
1	5.0	31.1	29.5	104.2	1.6	4.56
2	5.0	31.2	29.5	104.2	1.7	4.84
3	5.0	31.2	29.5	104.2	1.6	4.56
4	5.0	31.2	29.5	104.2	1.6	4.56
5	5.0	31.3	29.6	104.2	1.7	4.84
6	5.0	31.3	29.7	104.2	1.6	4.56
7	5.0	31.4	29.8	104.2	1.6	4.56
8	5.0	31.5	29.9	104.2	1.6	4.56
Average						4.63 $\pm$ 0.13

ตารางที่ 41 แล่งต่อลิตรน้ำที่อุณหภูมิ Heat of Solution (ΔH)

10N Sodium sulfate (Na_2SO_4)

No	Weight of Na_2SO_4 (g.)	Initial Temp. of Cold water (°C)	Final Temp. of Solution (°C)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
1	2.2	29.8	29.9	101.6	0.1	-0.76
2	2.2	30.0	30.1	101.6	0.1	-0.76
3	2.2	29.6	29.7	101.6	0.1	-0.76
4	2.2	29.8	29.9	101.7	0.1	-0.77
5	2.2	29.7	29.8	101.6	0.1	-0.76
6	2.2	29.7	29.8	101.6	0.1	-0.76
7	2.2	30.4	30.5	101.6	0.1	-0.76
8	2.2	30.5	30.6	101.6	0.1	-0.76
Average						-0.76±0.00

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองการวัดความร้อนของสารละลาย (ΔH)
 ของ Sodium sulfate decahydrate ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

no	Weight of $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (g.)	Initial Temp. of Cold Water (°C)	Final Temp. of Solution (°C)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , kcal.mole ⁻¹)
1	5.0	27.2	24.6	104.6	2.6	18.24
2	5.0	26.9	24.3	104.6	2.6	18.24
3	5.0	27.0	24.3	104.6	2.7	18.92
4	5.0	26.8	24.3	104.6	2.7	18.92
5	5.0	27.0	24.3	104.6	2.7	18.92
6	5.0	27.0	24.3	104.6	2.7	18.92
7	5.0	27.1	24.4	104.6	2.7	18.92
8	5.0	27.1	24.4	104.6	2.7	18.92
Average						18.75±0.31

ตารางที่ 43 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH)
Sodium carbonate (Na_2CO_3)

No	Weight of Na_2CO_3 (g.)	Initial Temp. of Cold Water (°C)	Final Temp. of Solution (°C)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change (ΔT , °C)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
1	1.9	30.2	31.2	101.0	1.0	-6.65
2	1.9	30.5	31.4	101.1	0.9	-5.99
3	1.9	30.5	31.4	101.0	0.9	-5.99
4	1.9	28.8	29.7	101.0	0.9	-5.99
5	1.9	29.0	29.8	101.0	0.8	-5.33
6	1.9	28.9	29.8	101.1	0.9	-5.99
7	1.9	28.3	29.1	101.0	0.8	-5.33
8	1.9	28.3	29.1	101.0	0.8	-5.33
Average						-5.83±0.47

ตารางที่ 44 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Heat of Solution (ΔH) ของ

Sodium carbonate decahydrate ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

No	Weight of $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ (g.)	Initial Temp. of Cold Water ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Temp. Change ($\Delta T, ^{\circ}\text{C}$)	Enthalpy Change ($\Delta H, \text{Kcal. mole}^{-1}$)
1	5.0	27.8	25.3	104.3	2.5	16.47
2	5.0	28.2	25.7	104.3	2.5	16.47
3	5.0	25.0	25.6	104.3	2.4	15.82
4	5.0	27.8	25.4	104.3	2.4	15.82
5	5.0	28.1	25.7	104.3	2.4	15.82
6	5.0	30.5	28.0	104.3	2.5	16.47
7	5.0	30.6	28.2	104.3	2.4	15.82
8	5.0	30.6	28.0	104.3	2.6	17.13
Average						16.23 ± 0.49

ตารางที่ 45 แสดงค่าของค่า Heat of Solution (ΔH) ของ Anhydrous salts (ΔH_1), Heat of Solution ของ Hydrated salts (ΔH_2) และ Heat of Hydration (ΔH_3)

No	System (in water 100.0 ml.)	ΔH (Kcal.mole ⁻¹)		ΔH_3^* (Kcal.mole ⁻¹)
		ΔH_1	ΔH_2	
1	BaCl ₂	-3.07±0.29		
2	BaCl ₂ ·2H ₂ O		+3.99±0.43	-7.06±0.72
3	MgSO ₄	-21.90±0.26		
4	MgSO ₄ ·7H ₂ O		+2.25±0.64	-24.15±0.90
5	CuSO ₄	-16.85±0.39		
6	CuSO ₄ ·5H ₂ O		+1.65±0.37	-18.50±0.76
7	CH ₃ COONa	-3.78±0.13		
8	CH ₃ COONa·10H ₂ O		+4.63±0.13	-8.41±0.26
9	Na ₂ SO ₄	-0.76		
10	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O		+18.75±0.31	-19.51±0.31
11	Na ₂ CO ₃	-5.83±0.47		
12	Na ₂ CO ₃ ·10H ₂ O		+15.23±0.49	-22.06±0.96

$$* \Delta H_3 = \Delta H_1 - \Delta H_2$$

ตารางที่ 46 แสดงผลในการทดลองหา Heat of Precipitation (ΔH) ของ
System $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.25 \text{ M} - \text{KI}(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$ (50:50 ml)

No	Initial Temp. °C		Final Temp. of Solution (°C)	Temp. Change (ΔT , °C)	Weight of Solution (g.)	Weight of $\text{PbI}_2(\text{s})$ (g.)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole ⁻¹)
	$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.})$	$\text{KI}(\text{aq.})$					
1	26.8	26.8	28.3	1.5	105.5	5.1	-15.22
2	27.2	27.2	28.5	1.3	105.5	5.0	-13.19
3	27.0	26.8	28.3	1.4	105.4	5.1	-14.19
4	26.6	26.6	27.9	1.3	105.5	5.0	-13.19
5	26.4	26.4	27.7	1.3	105.5	5.1	-13.19
6	26.5	26.5	27.9	1.4	105.6	5.1	-14.22
7	26.6	26.6	27.9	1.3	105.5	5.0	-13.19
8	26.5	26.5	28.1	1.6	105.4	5.1	-16.22
Average							-14.08 $\pm$ 1.14

การทดลอง 48 แสดงข้อผิดพลาดในการทดลองหาค่า Heat of Displacement (ΔH) ของ

System Zn(dust), 1.0 g. - CuSO_4 , 0.5 M, 100 ml.

No	Weight of Zn dust. (gm)	Initial Temp. of CuSO_4 (aq.) ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Weight of Cu(s) (g.)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole $^{-1}$)
1	1.0	31.0	37.8	6.8	107.7	0.9	-51.41
2	1.0	30.5	37.2	6.7	107.7	0.9	-50.70
3	1.0	30.2	37.0	6.8	107.7	0.9	-51.41
4	1.0	31.1	37.8	6.7	107.7	0.9	-50.70
5	1.0	30.9	37.7	6.8	107.7	0.9	-51.41
6	1.0	31.4	38.1	6.7	107.7	0.9	-50.70
7	1.0	30.0	36.7	6.7	107.7	0.9	-50.70
8	1.0	29.7	36.4	6.7	107.7	0.9	-50.70
Average							-50.97 $\pm$ 0.37

ตารางที่ 49 แสดงอุณหภูมิการทดลองหา Heat of Displacement (ΔH) ของ

System Zn_{dust} , 0.5 g. - $AgNO_3(aq.)$, 0.2 M, 100 mL.

No	Weight of Zn_{dust} (g.)	Initial Temp. of $AgNO_3(aq.)$ ($^{\circ}C$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}C$)	Temp. Change (ΔT , $^{\circ}C$)	Weight of Solution (g.)	Weight of $Ag(s)$ (g.)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole $^{-1}$)
1	0.5	30.4	36.0	5.6	102.4	1.6	-86.42
2	0.5	27.9	33.5	5.6	102.4	1.5	-86.42
3	0.5	28.0	33.6	5.6	102.4	1.6	-86.42
4	0.5	30.7	36.4	5.7	102.4	1.5	-87.88
5	0.5	30.8	36.5	5.7	102.4	1.6	-87.88
6	0.5	30.8	36.4	5.6	102.4	1.6	-86.42
7	0.5	30.5	36.2	5.7	102.4	1.6	-87.88
8	0.5	29.8	35.4	5.6	102.4	1.5	-86.42
Average							-86.97 $\pm$ 0.76

การวัด 50 แสดงข้อผิดพลาดในการทดลองหา Heat of Displacement (ΔH) ของ

System Cu powder, 1.0 g. - AgNO_3 , 0.5 M, 100 ml.

No	Weight of Cu powder (g.)	Initial Temp. of AgNO_3 (aq.) ($^{\circ}\text{C}$)	Final Temp. of Solution ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)	Weight of Solution (g.)	Weight of Ag (s) (g.)	Enthalpy Change (ΔH , Kcal.mole $^{-1}$)
1	1.0	29.6	34.6	5.0	107.2	3.7	-34.40
2	1.0	29.6	34.6	5.0	107.2	3.7	-34.40
3	1.0	29.7	34.6	4.9	107.2	3.7	-33.75
4	1.0	30.5	35.5	5.0	107.2	3.7	-34.40
5	1.0	30.9	36.0	5.1	107.2	3.7	-35.06
6	1.0	31.4	36.4	5.0	107.2	3.7	-34.40
7	1.0	29.3	34.4	5.1	107.2	3.7	-35.06
8	1.0	29.3	34.3	5.0	107.2	3.7	-34.40
Average							-34.48 $\pm$ 0.47

ตารางที่ 51 แสดง Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) ในการทดลองศึกษา

Stoichiometry ของ System NaOH(aq.) , 1.0 M - $\text{H}_2\text{SO}_4\text{(aq.)}$, 0.5 M

No	Volume of Reactants (ml.)		Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)					ΔT , $^{\circ}\text{C}$ (Average)
	NaOH(aq.)	$\text{H}_2\text{SO}_4\text{(aq.)}$	1	2	3	4	5	
1	10	90	1.4	1.5	1.5	1.6	1.5	1.50 ± 0.07
2	20	80	2.9	3.0	2.9	3.0	3.0	2.96 ± 0.05
3	30	70	4.4	4.5	4.5	4.6	4.5	4.50 ± 0.07
4	40	60	5.9	6.0	6.0	6.0	6.1	6.00 ± 0.07
5	50	50	7.6	7.6	7.5	7.6	7.7	7.60 ± 0.07
6	60	40	6.1	6.2	6.1	6.1	6.2	6.14 ± 0.07
7	70	30	4.4	4.6	4.5	4.5	4.5	4.50 ± 0.07
8	80	20	3.0	3.0	3.1	3.1	3.0	3.04 ± 0.05
9	90	10	1.6	1.5	1.5	1.6	1.6	1.56 ± 0.05

ตารางที่ 52 แสดง Temperature Change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา

Stoichiometry System $\text{NaOH(aq.)}, 0.5 \text{ M} - \text{HCl(aq.)}, 0.5 \text{ M}$

No	Volume of Reactants (ml.)		Temperature Change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$)					$\Delta T, ^\circ\text{C}$ (Average)
	NaOH(aq.)	HCl(aq.)	1	2	3	4	5	
1	10	90	0.7	0.6	0.7	0.6	0.6	0.62 ± 0.06
2	20	80	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.32 ± 0.04
3	30	70	2.0	2.0	2.1	2.1	1.9	2.02 ± 0.08
4	40	60	2.6	2.6	2.5	2.7	2.6	2.60 ± 0.07
5	50	50	3.2	3.2	3.2	3.3	3.1	3.20 ± 0.07
6	60	40	2.6	2.6	2.5	2.7	2.6	2.60 ± 0.07
7	70	30	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.90 ± 0.00
8	80	20	1.3	1.3	1.2	1.3	1.3	1.28 ± 0.04
9	90	10	0.7	0.7	0.8	0.7	0.6	0.70 ± 0.07

ตารางที่ 53 แสดง Temperature Change (ΔT , °C) ในการทดลองศึกษา

Stoichiometry TON System NaOH(aq.) , 0.5 M- $\text{HNO}_3\text{(aq.)}$, 0.5 M

No	Volume of Reactants (ml.)		Temperature Change (ΔT , °C)					ΔT , °C (Average)
	NaOH(aq.)	$\text{HNO}_3\text{(aq.)}$	1	2	3	4	5	
1	10	90	0.6	0.7	0.6	0.6	0.7	0.64 ± 0.05
2	20	80	1.4	1.4	1.3	1.3	1.3	1.34 ± 0.05
3	30	70	1.9	1.8	1.9	1.9	1.9	1.88 ± 0.04
4	40	60	2.6	2.5	2.6	2.6	2.6	2.58 ± 0.04
5	50	50	3.3	3.2	3.3	3.3	3.3	3.28 ± 0.04
6	60	40	2.7	2.6	2.5	2.6	2.6	2.60 ± 0.07
7	70	30	2.0	1.9	1.8	1.9	2.0	1.92 ± 0.08
8	80	20	1.4	1.5	1.3	1.3	1.4	1.38 ± 0.08
9	90	10	0.7	0.8	0.6	0.7	0.7	0.70 ± 0.07

ตารางที่ 54 แสดงค่า Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) ในการทดลองศึกษา

Stoichiometry ของ System KOH(aq.) , 1.0 M - HCl(aq.) , 1.0 M

No	Volume of Reactants (ml.)		Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)					ΔT , $^{\circ}\text{C}$ (Average)
	KOH(aq.)	HCl(aq.)	1	2	3	4	5	
1	10	90	1.5	1.5	1.4	1.4	1.4	1.44 ± 0.05
2	20	80	2.6	2.5	2.6	2.5	2.5	2.54 ± 0.05
3	30	70	3.8	3.8	3.7	3.6	3.6	3.70 ± 0.10
4	40	60	5.3	5.4	5.3	5.3	5.3	5.32 ± 0.04
5	50	50	6.3	6.4	6.3	6.3	6.3	6.32 ± 0.04
6	60	40	4.9	5.0	4.9	4.9	4.9	4.92 ± 0.04
7	70	30	3.8	3.7	3.7	3.8	3.8	3.76 ± 0.05
8	80	20	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.50 ± 0.00
9	90	10	1.3	1.3	1.4	1.4	1.3	1.34 ± 0.05

ตารางที่ 55 แสดง Temperature Change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$) ในการทดลองศึกษา

Stoichiometry ของ System $\text{NaOH(aq.)}, 1.0 \text{ M} - \text{CH}_3\text{COOH(aq.)}, 1.0 \text{ M}$

No	Volume of Reactants (ml.)		Temperature Change ($\Delta T, ^\circ\text{C}$)					$\Delta T, ^\circ\text{C}$ (Average)
	NaOH(aq.)	$\text{CH}_3\text{COOH(aq.)}$	1	2	3	4	5	
1	10	90	1.3	1.3	1.2	1.4	1.2	1.28 ± 0.08
2	20	80	2.5	2.6	2.5	2.5	2.6	2.54 ± 0.05
3	30	70	3.8	3.7	3.6	3.6	3.7	3.68 ± 0.08
4	40	60	5.1	5.0	5.0	5.1	5.0	5.04 ± 0.05
5	50	50	6.2	6.2	6.2	6.3	6.2	6.22 ± 0.04
6	60	40	5.1	5.0	5.1	5.0	5.0	5.04 ± 0.05
7	70	30	3.8	3.7	3.7	3.6	3.7	3.70 ± 0.07
8	80	20	2.5	2.6	2.5	2.6	2.5	2.52 ± 0.06
9	90	10	1.2	1.3	1.4	1.4	1.3	1.32 ± 0.08

ตารางที่ 56 แสดงค่า Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) ในการทดลองศึกษา

Stoichiometry ของ System NaOH(aq.) , 1.0 M - $\text{KHCO}_3\text{(aq.)}$, 1.0 M

No	Volume of Reactants (ml.)		Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)					ΔT , $^{\circ}\text{C}$ (Average)
	NaOH(aq.)	$\text{KHCO}_3\text{(aq.)}$	1	2	3	4	5	
1	10	90	1.0	1.0	0.9	0.9	0.8	0.92 ± 0.08
2	20	80	1.8	1.7	1.7	1.7	1.6	1.70 ± 0.07
3	30	70	2.7	2.7	2.6	2.7	2.7	2.68 ± 0.04
4	40	60	3.5	3.4	3.5	3.5	3.4	3.46 ± 0.05
5	50	50	4.3	4.3	4.4	4.3	4.3	4.32 ± 0.04
6	60	40	3.5	3.4	3.4	3.5	3.5	3.46 ± 0.05
7	70	30	2.6	2.7	2.6	2.6	2.6	2.62 ± 0.04
8	80	20	1.7	1.6	1.7	1.7	1.7	1.68 ± 0.04
9	90	10	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	0.80 ± 0.07

ตารางที่ 57 แสดงค่า Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) ในการทดลองศึกษา

Stoichiometry Lab System $\text{NH}_3(\text{aq.}), 1.0 \text{ M}$ - $\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq.}), 1.0 \text{ M}$

No	Volume of Reactants (ml.)		Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)					ΔT , $^{\circ}\text{C}$ (Average)
	$\text{NH}_3(\text{aq.})$	$\text{CH}_3\text{COOH}(\text{aq.})$	1	2	3	4	5	
1	10	90	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	0.96 ± 0.05
2	20	80	2.2	2.0	2.1	2.0	2.0	2.06 ± 0.09
3	30	70	3.2	3.1	3.1	3.1	3.0	3.10 ± 0.07
4	40	60	4.2	4.1	4.1	4.0	4.1	4.10 ± 0.07
5	50	50	5.1	5.1	5.1	5.2	5.1	5.12 ± 0.04
6	60	40	4.1	4.1	4.0	4.2	4.0	4.08 ± 0.08
7	70	30	3.2	3.1	3.1	3.2	3.1	3.12 ± 0.06
8	80	20	2.0	2.0	2.0	2.1	1.9	2.00 ± 0.07
9	90	10	1.2	0.9	1.2	1.0	1.1	1.08 ± 0.13

ตารางที่ 58 แสดงการ Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$) ในการทดลองศึกษา

Stoichiometry ของ System $\text{NH}_3(\text{aq.}), 0.5 \text{ M} - \text{HCl}(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}$

No	Volume of Reactants (ml.)		Temperature Change (ΔT , $^{\circ}\text{C}$)					ΔT , $^{\circ}\text{C}$ (Average)
	$\text{NH}_3(\text{aq.})$	$\text{HCl}(\text{aq.})$	1	2	3	4	5	
1	10	90	0.6	0.6	0.5	0.6	0.7	0.60 ± 0.07
2	20	80	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.32 ± 0.04
3	30	70	1.7	1.8	1.9	1.8	1.7	1.78 ± 0.08
4	40	60	2.3	2.4	2.5	2.4	2.5	2.42 ± 0.06
5	50	50	2.9	3.0	3.0	3.0	3.1	3.00 ± 0.07
6	60	40	2.5	2.4	2.3	2.4	2.4	2.40 ± 0.07
7	70	30	1.9	1.9	1.8	1.8	1.7	1.82 ± 0.08
8	80	20	1.4	1.3	1.5	1.4	1.2	1.36 ± 0.11
9	90	10	0.6	0.7	0.6	0.6	0.5	0.60 ± 0.07

ตารางที่ 59 แสดงข้อมูลในการทดลองเกี่ยวกับ Voltage และ Free energy change (ΔG)

System Zn/ZnSO₄(aq.), 0.5 M / CaSO₄(aq.), 0.5 M / Cu

Applied Potential (volts)	Current (mA)				
	1	2	3	4	5
0.30	0.83	0.82	0.83	0.84	0.83
0.40	0.72	0.72	0.71	0.72	0.72
0.50	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
0.60	0.52	0.52	0.52	0.52	0.51
0.70	0.42	0.42	0.42	0.41	0.42
0.80	0.31	0.31	0.31	0.30	0.31
0.90	0.21	0.21	0.20	0.21	0.21
1.00	0.11	0.11	0.11	0.10	0.10
1.20	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09	-0.09
1.30	-0.20	-0.20	-0.21	-0.20	-0.20
1.40	-0.29	-0.29	-0.29	-0.29	-0.29
1.50	-0.40	-0.40	-0.40	-0.41	-0.40
1.60	-0.51	-0.51	-0.51	-0.50	-0.50
1.70	-0.61	-0.61	-0.61	-0.60	-0.61
1.80	-0.72	-0.72	-0.72	-0.73	-0.72
Voltage (volts)	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10
ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	-50.74	-50.74	-50.74	-50.74	-50.74

ตารางที่ 60 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG)
ของ System $\text{Cu}/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3\text{M} // \text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6\text{M}/\text{Ag}$

Applied Potential (volts)	Current (mA)				
	1	2	3	4	5
0.00	0.52	0.53	0.52	0.52	0.52
0.10	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
0.20	0.29	0.29	0.29	0.28	0.28
0.30	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17
0.40	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05
0.50	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05
0.60	-0.17	-0.17	-0.17	-0.17	-0.16
0.70	-0.30	-0.29	-0.30	-0.29	-0.30
0.80	-0.41	-0.41	-0.41	-0.41	-0.40
0.90	-0.53	-0.53	-0.53	-0.53	-0.53
1.00	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65
1.10	-0.76	-0.76	-0.76	-0.76	-0.76
1.20	-0.88	-0.88	-0.88	-0.88	-0.88
1.30	-0.98	-0.98	-0.98	-0.98	-0.98
Voltage (volts)	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	-20.76	-20.76	-20.76	-20.76	-20.76

ตารางที่ 61 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG)
ของ System $\text{Pb}/\text{Pb}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}/\text{Cu}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.5 \text{ M}/\text{Cu}$

Applied Potential (volts)	Current (mA)				
	1	2	3	4	5
0.00	0.61	0.62	0.61	0.61	0.61
0.10	0.48	0.48	0.48	0.48	0.47
0.20	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
0.30	0.22	0.22	0.22	0.23	0.23
0.40	0.10	0.10	0.10	0.10	0.11
0.60	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
0.70	-0.27	-0.27	-0.27	-0.27	-0.26
0.80	-0.37	-0.39	-0.39	-0.40	-0.39
0.90	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52	-0.52
1.00	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65
1.10	-0.77	-0.77	-0.77	-0.77	-0.77
1.20	-0.90	-0.90	-0.90	-0.90	-0.90
Voltage (volts)	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	-22.14	-22.14	-22.14	-22.14	-22.14

ตารางที่ 62 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า Voltage และค่า Free energy change (ΔG) ของ System $\text{Zn}/\text{Zn}(\text{NO}_3)_2(\text{aq.}), 0.3 \text{ M} // \text{AgNO}_3(\text{aq.}), 0.6 \text{ M}/\text{Ag}$

Applied Potential (volts)	Current (mA)				
	1	2	3	4	5
0.80	0.91	0.91	0.91	0.90	0.91
0.90	0.78	0.78	0.78	0.79	0.78
1.00	0.66	0.66	0.65	0.66	0.66
1.10	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
1.20	0.41	0.41	0.42	0.41	0.41
1.30	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
1.40	0.16	0.16	0.16	0.17	0.16
1.50	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
1.60	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06	-0.06
1.70	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19	-0.19
1.80	-0.30	-0.30	-0.31	-0.30	-0.30
1.90	-0.43	-0.43	-0.42	-0.43	-0.43
2.00	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55	-0.55
2.10	-0.67	-0.67	-0.67	-0.66	-0.67
Voltage (volts)	1.55	1.55	1.55	1.55	1.55
ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	-71.49	-71.49	-71.49	-71.49	-71.49

ตารางที่ 63 แสดงข้อมูลในการทดลองหา Voltage และค่า Free energy change (ΔG)
 ของ System Pb/Pb(NO₃)(aq.), 0.25M//AgNO₃(aq.), 0.5M/Ag

Applied Potential (volts)	Current (mA)				
	1	2	3	4	5
0.00	0.67	0.67	0.68	0.67	0.66
0.10	0.59	0.60	0.59	0.59	0.58
0.20	0.52	0.52	0.52	0.51	0.52
0.30	0.45	0.45	0.46	0.45	0.45
0.40	0.38	0.37	0.38	0.37	0.38
0.50	0.31	0.31	0.32	0.32	0.31
0.60	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
0.70	0.16	0.16	0.16	0.15	0.15
0.80	0.09	0.09	0.09	0.08	0.09
1.00	-0.05	-0.05	-0.05	-0.05	-0.06
1.10	-0.12	-0.12	-0.11	-0.11	-0.12
1.20	-0.19	-0.19	-0.19	-0.18	-0.19
1.30	-0.27	-0.27	-0.26	-0.26	-0.27
1.40	-0.34	-0.34	-0.34	-0.34	-0.34
1.50	-0.42	-0.42	-0.41	-0.42	-0.42
1.60	-0.49	-0.49	-0.48	-0.49	-0.49
1.70	-0.57	-0.57	-0.56	-0.56	-0.57
1.80	-0.64	-0.63	-0.64	-0.64	-0.63
Voltage (volts)	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	-42.44	-42.44	-42.44	-42.44	-42.44

ตารางที่ 64 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG)

ของ $\text{Cu} - \text{CuSO}_4$ Concentration cell ที่ 28.4°C

Conc. A: Conc. B (mole. liter ⁻¹)	0.98 M : 0.02 M		0.95 M : 0.05 M		0.90 M : 0.10 M	
	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)
1	0.041	1.891	0.031	1.429	0.024	1.107
2	0.041	1.891	0.030	1.384	0.024	1.107
3	0.042	1.937	0.030	1.384	0.023	1.061
4	0.041	1.891	0.030	1.384	0.025	1.153
5	0.040	1.845	0.029	1.338	0.022	1.107
Average	0.041 ± 0.0007	1.891 ± 0.033	0.030 ± 0.0007	1.384 ± 0.032	0.024 ± 0.0007	1.107 ± 0.033

ตารางที่ 64 (ก) แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG) ของ Cu - CuSO_4 Concentration cell ที่ 28.4°C

Conc. A: Conc. B (mole.liter ⁻¹)	0.80 M : 0.20 M		0.70 M : 0.30 M		0.50 M : 0.50 M	
	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal.mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal.mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal.mole ⁻¹)
1	0.013	0.599	0.007	0.323	0.000	0.000
2	0.015	0.692	0.006	0.277	0.000	0.000
3	0.014	0.646	0.007	0.323	0.000	0.000
4	0.014	0.646	0.007	0.323	0.000	0.000
5	0.014	0.646	0.008	0.369	0.000	0.000
Average	0.014 ± 0.0007	0.646 ± 0.033	0.007 ± 0.0007	0.323 ± 0.033	0.000	0.000

ตารางที่ 65 แสดงข้อมูลในการทดลองหา E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG)
 ของ $\text{Li} - \text{ZnSO}_4$ Concentration cell ที่ 28.0°C

Conc. A:Conc. B (mole.liter ⁻¹)	0.98 M : 0.02 M		0.95 M : 0.05 M		0.90 M : 0.10 M	
	E _{max} (volts)	-ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	E _{max} (volts)	-ΔG (Kcal.mole ⁻¹)	E _{max} (volts)	-ΔG (Kcal.mole ⁻¹)
1	0.030	1.384	0.022	1.015	0.016	0.738
2	0.031	1.429	0.022	1.015	0.017	0.784
3	0.030	1.384	0.021	0.969	0.017	0.784
4	0.030	1.384	0.023	1.061	0.013	0.830
5	0.029	1.338	0.022	1.015	0.017	0.784
Average	0.030±0.0007	1.384±0.032	0.022±0.0007	1.015±0.033	0.017±0.0007	0.784±0.033

ตารางที่ 65 (ต่อ) แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG)

ของ $\text{Zn} - \text{ZnSO}_4$ Concentration cell ที่ 28.0°C

Conc. A : Conc. B (mole.liter ⁻¹)	0.80 M : 0.20 M		0.70 M : 0.30 M		0.50 M : 0.50 M	
	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal.mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal.mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal.mole ⁻¹)
1	0.012	0.554	0.005	0.231	0.000	0.000
2	0.011	0.507	0.006	0.277	0.000	0.000
3	0.012	0.554	0.006	0.277	0.000	0.000
4	0.013	0.599	0.006	0.277	0.000	0.000
5	0.012	0.554	0.007	0.323	0.000	0.000
Average	0.012 ± 0.0007	1.554 ± 0.033	0.006 ± 0.0007	0.277 ± 0.033	0.000	0.000

ตารางที่ 66 แสดงข้อมูลในการทดลองหาค่า E_{max} (volts) และค่า Free energy change (ΔG) ของ $\text{Pb} - \text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ Concentration cell ที่ 28.4°C

Conc. A: Conc. B (mole. liter ⁻¹)	0.98 M : 0.02 M		0.95 M : 0.05 M		0.90 M : 0.10 M	
	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)
1	0.031	1.429	0.022	1.015	0.017	0.784
2	0.031	1.429	0.021	0.969	0.016	0.738
3	0.032	1.476	0.023	1.061	0.017	0.784
4	0.031	1.429	0.022	1.015	0.017	0.784
5	0.030	1.384	0.022	1.015	0.018	0.830
Average	0.031 $\pm$ 0.0007	1.429 $\pm$ 0.032	0.022 $\pm$ 0.0007	1.015 $\pm$ 0.033	0.017 $\pm$ 0.0007	0.784 $\pm$ 0.033

การางท 66 (ทอ) แสดงขอมูลในการทดลองหาคา E_{max} (volts) และกา Free energy change (ΔG) ของ $Pb - Pb(NO_3)_2$ Concentration Cell ที่ $28.4^\circ C$

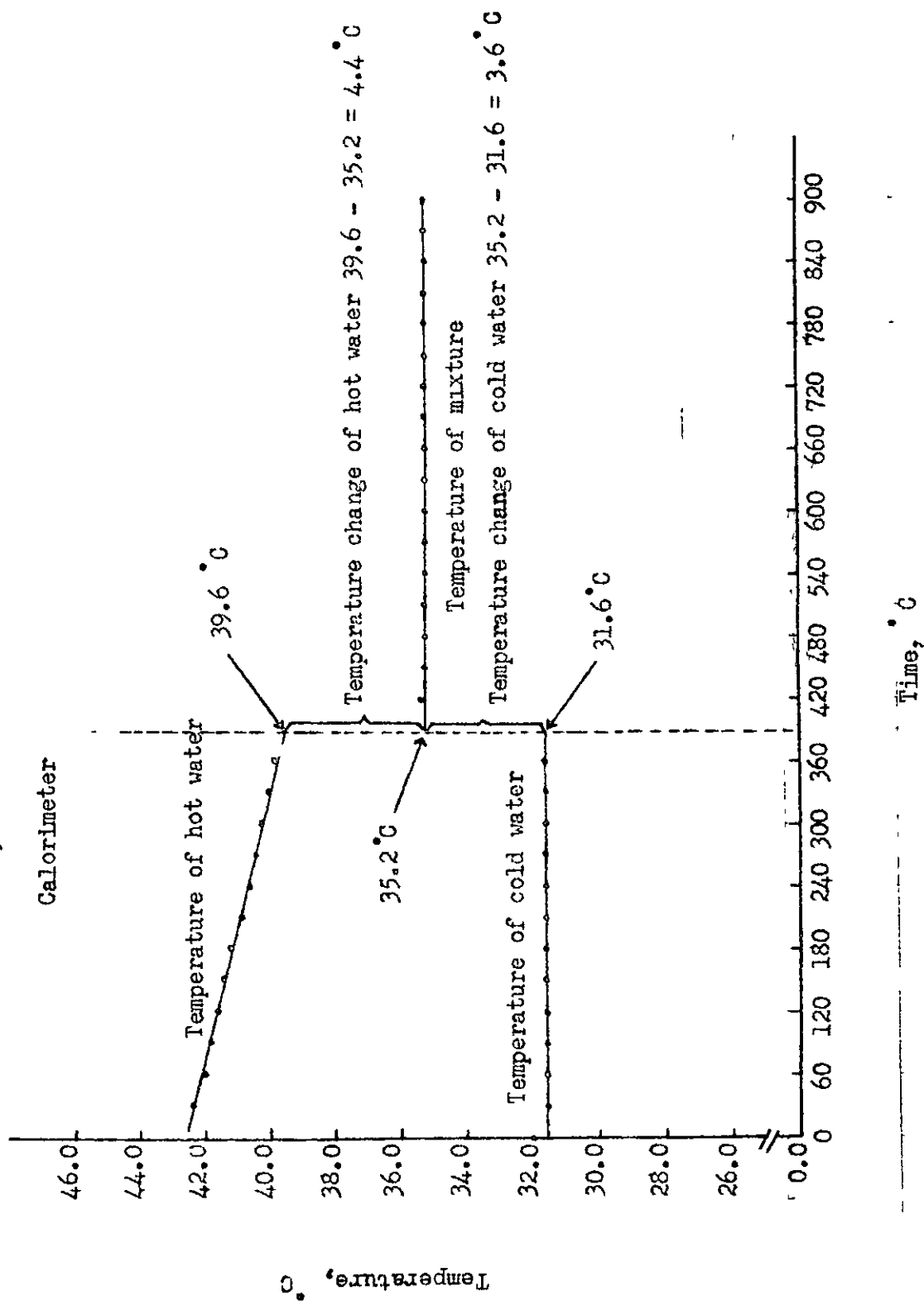
Conc. A: Conc. B (mole. liter ⁻¹)	0.80 M :	0.20 M	0.70 M : 0.30 M		0.50 M : 0.50 M	
No	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)	E_{max} (volts)	$-\Delta G$ (Kcal. mole ⁻¹)
1	0.011	0.507	0.006	0.277	0.000	0.000
2	0.011	0.507	0.006	0.277	0.000	0.000
3	0.012	0.554	0.007	0.323	0.000	0.000
4	0.010	0.461	0.006	0.277	0.000	0.000
5	0.011	0.507	0.005	0.231	0.000	0.000
Average	0.011 ± 0.0007	0.507 ± 0.033	0.006 ± 0.0007	0.277 ± 0.033	0.000	0.000

ภาคผนวก ง.

ตัวอย่างการ plot graph
ในการศึกษา system ต่าง ๆ

รูปที่ 24 แสดงตัวอย่างในการ Plot graph ระหว่างค่า Temperature, °C กับค่า

Time, seconds ในการทดลองหาค่า Calorimeter constant ของ



15.0

14.0

13.0

12.0

11.0

10.0

9.0

8.0

7.0

6.0

5.0

4.0

3.0

2.0

1.0

0.0

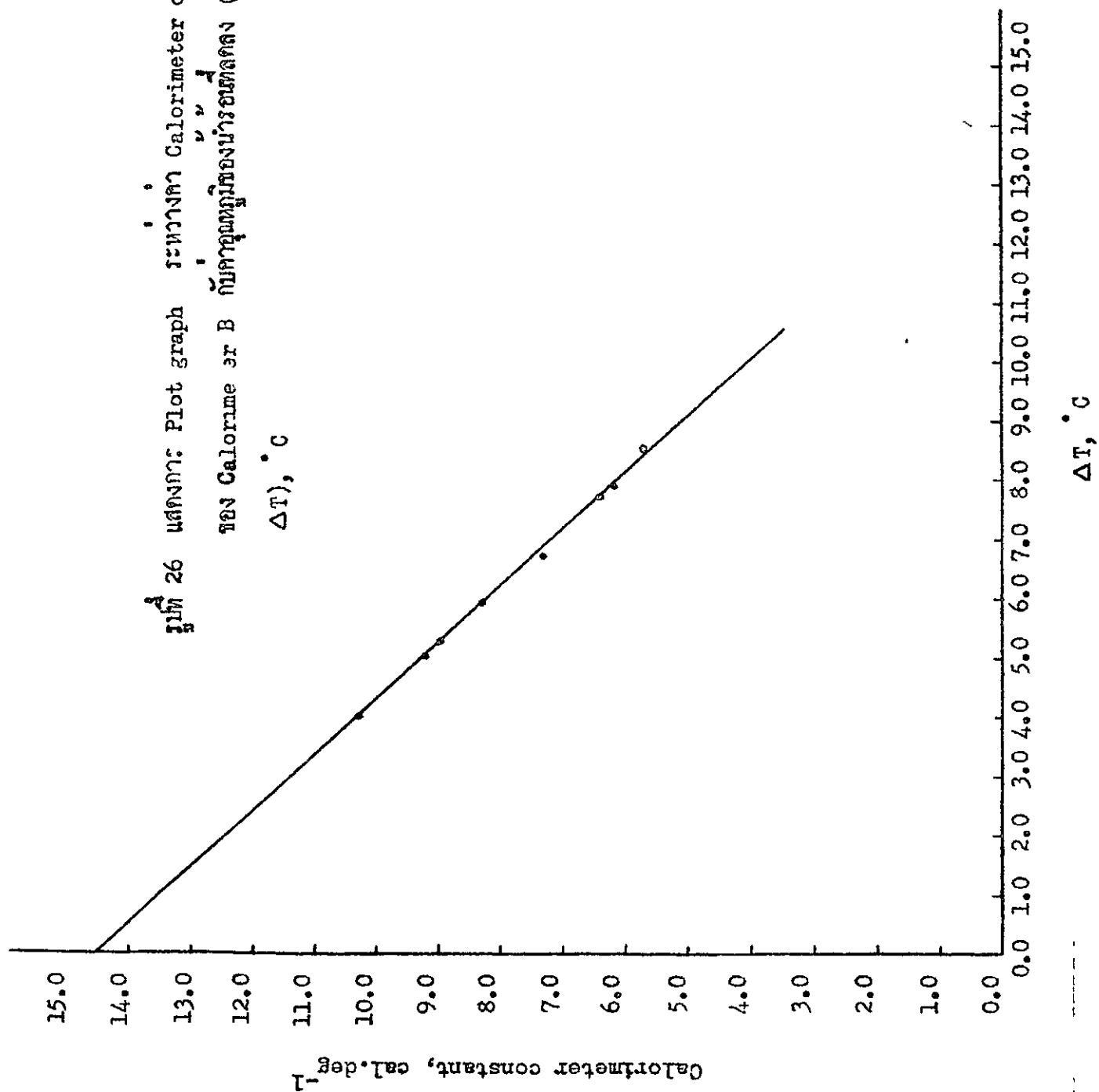
0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 5.0 6.0 7.0 8.0 9.0 10.0 11.0 12.0 13.0 14.0 15.0 16.0

 $\Delta T, ^\circ C$

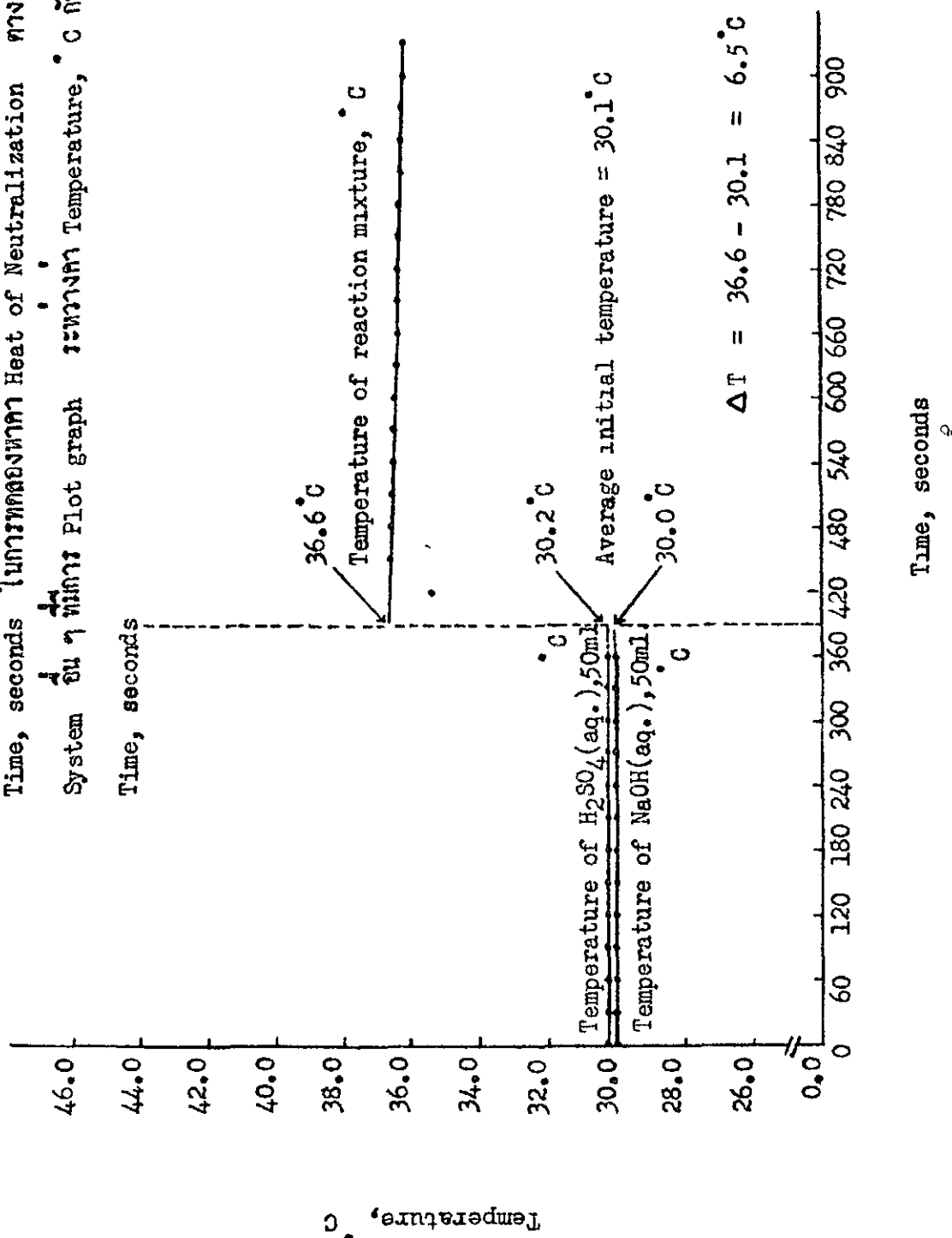
รูปที่ 25 แสดงการ Plot graph ระหว่างค่า Calorimeter constant, cal.deg⁻¹
ของ Calorimeter B กับค่าอุณหภูมิของน้ำเบสเพิ่มขึ้น (Temperature change, ΔT), $^\circ C$

Calorimeter constant, cal.deg⁻¹

รูปที่ 26 แสดงการ Plot graph ระหว่างค่า Calorimeter constant, cal.deg⁻¹
ของ Calorime ar B กับค่าอุณหภูมิของน้ำว่าเปลี่ยนแปลง (Temperature change,
 ΔT), °C



รูปที่ 27 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระยะเวลา Temperature, °C กับค่า
Time, seconds ในการทดลองหาค่า Heat of Neutralization ต่าง ๆ และ
System ขึ้น ๆ ที่มีการ Plot graph ระยะเวลา Temperature, °C กับค่า



0.70

+0

+0

+0.40

+0.30

+0.20

+0

Current (mA)

0.00

-0.10

-0

-0.0

-0.40

-0

-0.60

-0

-0.80

0.0

0.1

0.2

0.3

0.4

0.5

0.6

0.7

0.8

0.9

1.0

1.1

1.2

1.3

1.4

1.5

1.6

1.7

1.8

1.9

2.0

2.1

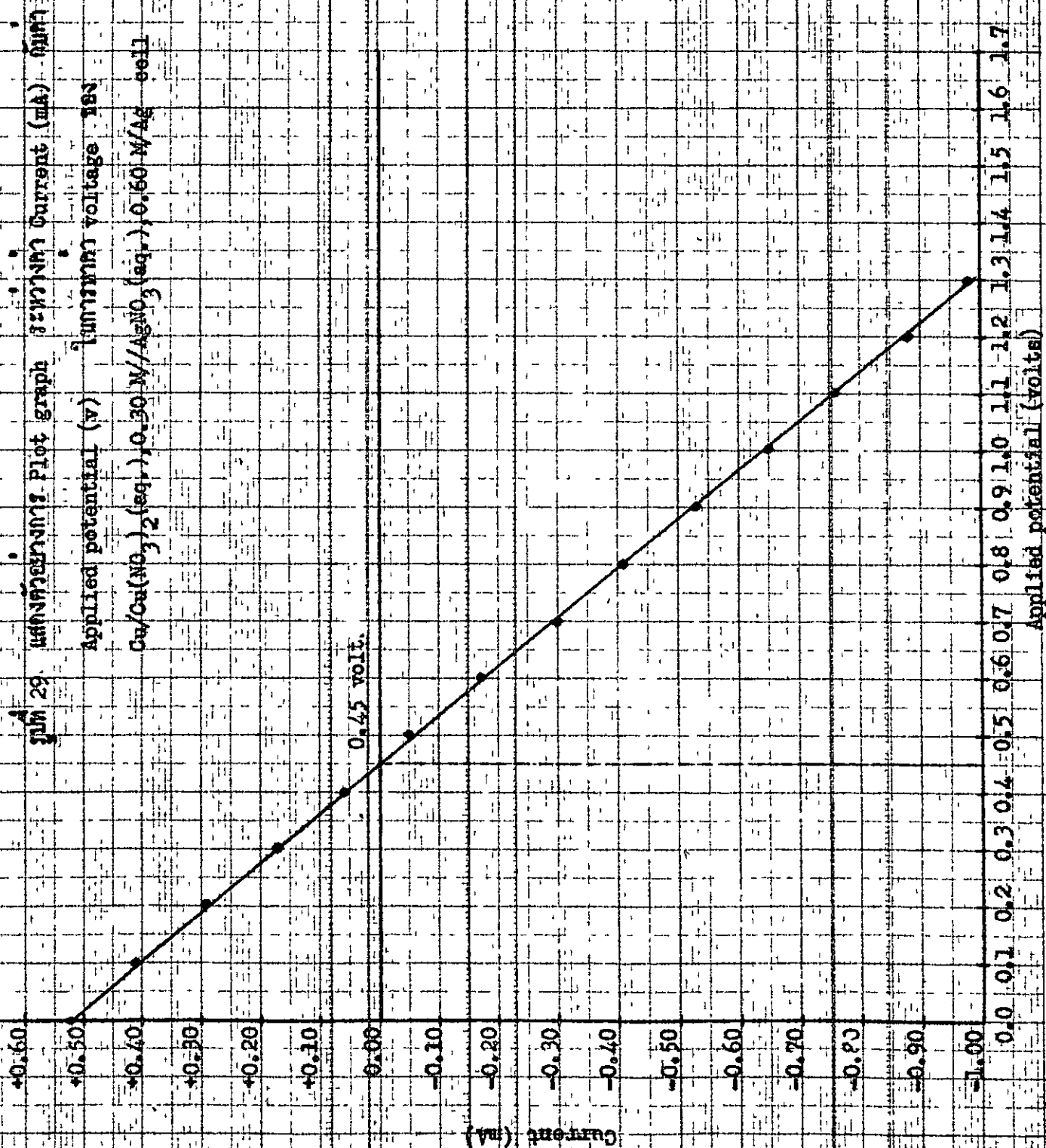
2.2

รูปที่ 28 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่าง Current (mA) กับ Applied potential (V) ในสารละลาย voltage ของ Zn/ZnSO₄ (aq.), 0.5 M/CuSO₄ (aq.), 0.5 M/Cu cell

1.10 volts

191

Applied potential (volts)



รูปที่ 30 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่างค่า Current (mA) กับค่า

Applied potential (v) ในการหาค่า voltage ของ

Pb/Pb(NO₃)₂ (aq.), 0.25 M//AgNO₃ (aq.); 0.50 M cell

0.92 volt

Current (mA)

Applied potential (volts)

0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0

+0.60
+0.50
+0.40
+0.30
+0.20
+0.10
0.00
-0.10
-0.20
-0.30
-0.40
-0.50
-0.60
-0.70
-0.80
-0.90
-1.00

+0.80

+0.70

+0.60

+0.50

+0.40

+0.30

+0.20

+0.10

0.00

Current (mA)

-0.10

-0.20

-0.30

-0.40

-0.50

-0.60

-0.70

-0.80

รูปที่ 31 แสดงตัวอย่างการ Plot graph ระหว่าง Current (mA)
กับ Applied potential (V) ในการวัด voltage
ของ Zn/Zn(NO₃)₂(aq.), 0.3 M//AgNO₃(aq.), 0.60 M/
cell

• 1.55 volts

0.0 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0 1.1 1.2 1.3 1.4 1.5 1.6 1.7 1.8 1.9 2.0 2.1 2.2 2.3

Applied potential (volts)

Fig. 32. Polarographic Plot graph showing Current (mA) versus Applied potential (v) for $Pb/Pb(NO_3)_2(aq.)$, 0.50 M/Cu(NO_3)₂(aq.), 0.50 M/0.50 M/0.50 M

