ข้อมูลข่าวสาร วศ.

ข้อมูลข่าวสารของกรมวิทยาศาสตร์บริการ
ตาม พ.ร.บ. ข้อมูลข่าวสารของราชการ พ.ศ. 2540

วศ
กฟ
อว 26

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงในตำแหน่ง นักวิทยาศาสตร์ 7 ว

เรื่องที่ 1
การพัฒนาเทคนิคและอุปกรณ์หาค่า ความหนาแน่นของของแข็ง

โดย
ว่าที่ ร.ต.สรรค์ จิตรใคร่ครวญ
นักวิทยาศาสตร์ 6 ว

กลุ่มฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 1
กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

เอกสารผลงานที่เสนอให้ประเมินเพื่อแต่งตั้งให้ดำรงตำแหน่ง

นักวิทยาศาสตร์ 7 ว.

เรื่องที่ 1

การพัฒนาเทคนิคและอุปกรณ์หาค่าความหนาแน่นของของแข็ง

วศ
เลขหมู่ วฟ
อว 16
เลขทะเบียน 9921
วันที่ 11 พค 44

โดย

ว่าที่ ร.ต. สรรค์ จิตรใคร่ครวญ

นักวิทยาศาสตร์ 6 ว.

ด้วยอภินันทนาการ
จาก
วศ.

กลุ่มฟิสิกส์และวิศวกรรมทั่วไป 1

กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

บทคัดย่อ

ในการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงพัฒนา เทคนิคและเครื่องมือ-อุปกรณ์ ที่ใช้ในการหาปริมาตรของของแข็งด้วยวิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่อยู่นิ่ง(Hydrostatic Weighting method) ของวิธีวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของของแข็งให้สามารถใช้กับตัวอย่างของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือเป็นของมีค่าที่ไม่สามารถจะตัดหรือทำลายให้มีขนาดเล็กลง ให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างของแข็งตามที่ต้องการและคงค่าอุณหภูมินั้นตลอดเวลาขณะที่ทำการทดสอบ

ทำการศึกษาวิเคราะห์ข้อดีและข้อเสียของเทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการแล้วนำข้อดีของเทคนิคเดิมมาประยุกต์และศึกษาทดลอง พบว่าการใช้เครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้มากแต่มีความละเอียดสูงและใช้ชั่งจากด้านล่างของเครื่องชั่ง มาชั่งตัวอย่างของแข็ง(ซึ่งมีรูปร่างและขนาดเดิมที่ไม่ต้องการตัดหรือทำลายให้เล็กลง)ที่จะหาปริมาตร โดยการชั่งในของเหลวที่บรรจุอยู่ในตู้กระจกที่มีขนาดใหญ่ ด้วยเทคนิคใหม่นี้ทำให้สามารถหาค่าปริมาตรของแข็งที่มีขนาดใหญ่ๆและรูปร่างต่างๆได้ตามที่ต้องการ

ทำการปรับและควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างของแข็งและน้ำที่ทำการทดสอบ โดยวิธีต่างๆ 4 วิธีคือ**ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำปรับทำอุณหภูมิน้ำกลั่นโดยตรง ใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันโดยตรง ใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน** และ**ใช้ตู้กระจกสองใบซ้อนกัน**

ผลจากการศึกษาทดลองพบว่า วิธีที่ใช้เวลาน้อยที่สุดในการปรับอุณหภูมิตัวอย่างของแข็งและน้ำที่ใช้ในการทดสอบคือ**การใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันโดยตรง** ส่วนวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้นานตลอดเวลาของปฏิบัติงานคือ **การใช้ตู้กระจกสองชั้นซ้อนกันที่ปล่อยให้น้ำกลั่นที่ถูกควบคุมอุณหภูมิไหลเวียนเข้า-ออกในตู้ชั้นนอกโดยผ่านรูของท่อแก้วรูปซ่อมที่วางอยู่ก้นตู้กระจก** เพื่อใช้ปรับและควบคุมอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ใช้เป็นของเหลวชั่งตัวอย่างของแข็งในตู้กระจกชั้นใน

ปัจจุบันกองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ได้นำเทคนิคใหม่ที่ได้จากศึกษาทดลองนี้มาใช้ในปฏิบัติการทดสอบหาค่าความหนาแน่นของของแข็ง ที่วิธีการทดสอบกำหนดให้ใช้ตัวอย่างขนาดใหญ่หรือปริมาณมากๆ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	ก
สารบัญตาราง	จ
สารบัญภาพ	ฉ
คำนำ	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความหนาแน่นของสสาร	1
1.2 วิธีที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบ	2
1.3 ความสำคัญและรายละเอียดของปัญหา	3
1.4 จุดประสงค์ของการศึกษาวิจัย	4
1.5 ขั้นตอนของการศึกษาทดลองและพัฒนา	5
บทที่ 2 เทคนิคเดิมที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการ	6
2.1 เทคนิคแบบที่ 1	6
2.2 เทคนิคแบบที่ 2	6
2.3 ข้อแตกต่างและที่เหมือนกันระหว่างเทคนิคแบบที่ 1 กับเทคนิคแบบที่ 2	7
บทที่ 3 การพัฒนาเทคนิคและอุปกรณ์ให้สามารถใช้กับตัวอย่างของแข็งขนาดใหญ่	8
3.1 การศึกษาวิเคราะห์เทคนิคเดิม	8
3.2 การศึกษาทดลองเทคนิคใหม่โดยใช้เทคนิคเก่าทั้งสองแบบร่วมกัน	9
3.3 เทคนิคในการปรับระดับน้ำกลั่น	10
บทที่ 4 การปรับและควบคุมอุณหภูมิน้ำกลั่น	12
4.1 การปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจก	12
4.1.1 ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำทำความเย็นน้ำกลั่นโดยตรง	13
4.1.2 ใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันโดยตรง	16
4.1.3 ใช้ท่อทองแดง	18
4.1.4 ใช้ตู้กระจกสองใบซ้อนกัน	22

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างของแข็งที่หาค่าโดยเทคนิคเดิมกับเทคนิคใหม่	38
ตารางที่ 2-1, 2-2, 2-3, 3-1, 3-2, 3-3, 4-1, 4-2 และ4-3 แสดงข้อมูลการทดลองของการปรับและควบคุมอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจก(โดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำปรับอุณหภูมิโดยตรง)	39-49
ตารางที่ 5 แสดงผลการคำนวณค่าอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิของการทดลองด้วยสัดส่วนของมวลและอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ต่างกัน(โดยใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกัน	51
ตารางที่ 6 แสดงค่าอุณหภูมิสุดท้ายและเวลาที่คงค่า ที่ได้จากการทดลองจริงเมื่อนำน้ำกลั่นมาผสมกันด้วยสัดส่วนของมวลและอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามที่ได้คำนวณไว้(โดยใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกัน)	53
ตารางที่ 7-1, 7-2, 7-3, 8-1, 8-2, 8-3, 9-1, 9-2และ9-3 แสดงข้อมูลผลการการทดลองของการปรับและควบคุมอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจก(โดยใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกัน)	54-62
ตารางที่ 10-1, 10-2, 10-3, 10-4และ10-5 แสดงข้อมูลผลการทดลองของการปรับและควบคุมอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจก(โดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน)	63-73
ตารางที่ 11-1, 11-2 และ12 แสดงข้อมูลผลการทดลองของการปรับและควบคุมควบคุมอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจก(โดยใช้ตู้กระจกสองใบซ้อนกัน)	77-83

หน้า

4.2 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำกลั่นให้คงที่ 26
4.2.1 เมื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศในห้องทดลองได้ 26
4.2.2 เมื่อไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศในห้องทดลองได้ 26
บทที่ 5 บทวิจารณ์ 27
บทที่ 6 บทสรุป 28
กิตติกรรมประกาศ 30
เอกสารอ้างอิง 31
ภาคผนวก 32
ภาคผนวก ก. เครื่องมือ-อุปกรณ์และขั้นตอนการหาค่าความหนาแน่นของของแข็ง ด้วยวิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่งของเทคนิคเดิม 33
ภาคผนวก ข. ทฤษฎีความร้อน 37
ภาคผนวก ค. ตารางแสดงรายละเอียดข้อมูลผลการศึกษาทดลอง 38
ภาคผนวก ง. ภาพเครื่องมือ-อุปกรณ์และการทดสอบเทคนิคใหม่ 63

สารบัญภาพ

ภาพที่ 1	แสดงลักษณะและขนาดขวดปิกนอร์มิเตอร์แบบต่างๆ	63
ภาพที่ 2	แสดงการจัดวางเครื่องมือ-อุปกรณ์และลักษณะของการชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่งโดยเทคนิคแบบที่ 1 และแบบที่ 2	63
ภาพที่ 3	ลักษณะของการชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่งโดยเทคนิคแบบใหม่	86
ภาพที่ 4	การทดลองหาค่าปริมาตรของตัวอย่างอลูมิเนียมรูปพรรณด้วยการชั่งในของเหลวที่อยู่นิ่ง ด้วยเทคนิคแบบใหม่	86
ภาพที่ 5	แท่งแก้วขนาดต่างๆที่ใช้ในการปรับระดับน้ำกลั่นในตู้กระจกและหลอดแก้วรูปซ่อมที่มีรูเล็กๆอยู่ห่างกันเป็นระยะสม่ำเสมอ	87
ภาพที่ 6	แสดงตำแหน่งบริเวณต่างๆที่กำหนดไว้วัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจก	87
ภาพที่ 7	การทดลองปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจกโดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน	88
ภาพที่ 8	แสดงลักษณะการจัดวางตู้กระจก 2 ใบซ้อนกันและตำแหน่งของบริเวณที่วัดอุณหภูมิของน้ำกลั่น	88
ภาพที่ 9	การทดลองปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจกโดยใช้ตู้กระจกสองใบซ้อนกัน	89
ภาพที่ 10	การทดสอบการชั่งของแข็งขนาดใหญ่ในของเหลวที่นิ่งโดยใช้การปรับและควบคุมอุณหภูมิด้วยเทคนิคและอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่	89

คำนำ

การวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของสารต่างๆ ตามทฤษฎีพื้นฐานทั่วไปนั้น ความหนาแน่นหาค่าโดยการเอาค่ามวลของสารหารด้วยปริมาตรสารนั้นๆ แต่ในทางปฏิบัติมีวิธีและเทคนิคมากมายหลายแบบ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ก็แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับว่าตัวอย่างที่จะทดสอบหาค่าความหนาแน่นมีรูปร่างลักษณะอย่างไร อยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลวหรือก๊าซ มาตรฐานวิธีการทดสอบได้กำหนดจำนวนหรือปริมาณของตัวอย่างเท่าไร สภาวะแวดล้อมขณะดำเนินการทดสอบเป็นอย่างใด

การทดสอบหาค่าความหนาแน่นของสารที่อยู่ในสถานะของแข็งที่มีรูปร่างลักษณะไม่สามารถวัดปริมาตรโดยตรงได้ ก็จะหาปริมาตรโดยวิธีทางอ้อมด้วยการแทนที่ของเหลว ซึ่งนิยมใช้อยู่ 2 วิธี คือ**วิธีพิกนอมิเตอร์**(Pycnometer method)และ**วิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่ง** (Hydrostatic weighing method) ที่ผ่านมาเครื่องมือและอุปกรณ์ตลอดจนเทคนิคของ**วิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่ง**ที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการของฝ่ายฟิสิกส์ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ยังไม่สามารถจะใช้ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือเป็นของมีค่าราคาแพงและไม่สามารถแบ่งหรือแยกออกเป็นชิ้นเล็กๆ หรือตัวอย่างที่มีขนาดเล็กแต่มาตรฐานวิธีทดสอบกำหนดให้ใช้ตัวอย่างปริมาณมากๆ นอกจากนี้เทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้อยู่เดิมในห้องปฏิบัติการนั้น ก็ยังไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของตัวอย่างของแข็งและของเหลวที่ใช้ในการทดสอบให้คงค่าอุณหภูมิที่ต้องการได้นานตลอดเวลาของการทดสอบหาค่าความหนาแน่น

ดังนั้นจึงได้ดำเนินการศึกษาวิจัยเพื่อพัฒนาเทคนิคและปรับปรุงเครื่องมือ-อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาปริมาตรของตัวอย่างของแข็งที่จะหาค่าความหนาแน่นโดยวิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่ง ให้สามารถใช้กับตัวอย่างของแข็งที่มีรูปร่างและขนาดใหญ่ได้โดยไม่ต้องแบ่ง หรือทำลายให้เล็กลงและกับตัวอย่างของแข็งที่ต้องใช้ปริมาณมากๆ ตามที่กำหนดในมาตรฐานวิธีการทดสอบ รวมทั้งสามารถควบคุมอุณหภูมิตัวอย่างของแข็งและของเหลวที่ใช้ในการทดสอบให้คงค่าอยู่ได้นานตลอดการปฏิบัติงาน

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความหนาแน่นของสสาร

"ความหนาแน่น(Density)"เป็นสมบัติทางฟิสิกส์เฉพาะตัวของสาร ความหนาแน่นของสารแต่ละชนิดมีค่าคงที่ ที่อุณหภูมิหนึ่งๆ มีความสำคัญในทางวิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม เช่นใช้ระบุชนิดของสาร ใช้แสดงสมบัติของความบริสุทธิ์ของสารเคมี เป็นต้น สมบัติอื่นๆของสารที่มีความสัมพันธ์กับความหนาแน่นได้แก่ สมบัติด้านความร้อนและเชิงกลของสาร เช่น สภาพนำความร้อน ความหนืด เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้ในการกำหนดพิกัดอัตราการขนส่งอีกด้วย

ในทางทฤษฎี ความหนาแน่นมีค่าเท่ากับมวลของสารหนึ่งหน่วยปริมาตร ณ.อุณหภูมิที่กำหนดนิยมใช้หน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร กรัมต่อมิลลิลิตร และกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งสามารถเขียนแทนด้วยสมการคำนวณหาค่าความหนาแน่น ดังนี้

$$D = \frac{m}{V} \qquad \text{.....(1)}$$

เมื่อ D = ความหนาแน่นของสาร (กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติเมตร)

m = มวลของสาร (กรัม)

V = ปริมาตรของสาร (ลูกบาศก์เซ็นติเมตร)

ในทางปฏิบัติจะหาค่าในรูปของความหนาแน่นปรากฏ(Apparent Density) ซึ่งจะแทนค่ามวลของสารด้วยน้ำหนักในอากาศของสาร มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซ็นติเมตร กรัมต่อมิลลิลิตร และกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

โดยเขียนสมการคำนวณหาค่าความหนาแน่นเป็น

$$D = \frac{W}{V} \qquad \text{.....(2)}$$

เมื่อ D = ความหนาแน่นของสาร (กรัม/ลูกบาศก์เซ็นติเมตร)

W = น้ำหนักในอากาศของสาร (กรัม)

V = ปริมาตรของสาร (ลูกบาศก์เซ็นติเมตร)

1.2 วิธีที่ใช้วิเคราะห์ทดสอบ

โดยทั่วไปแล้วการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของของสารที่เป็นของแข็งและของเหลวซึ่งไม่สามารถทดสอบด้วยวิธีวัดปริมาตร(Volumetric method)ของสารโดยทางตรงได้ ก็จะหาค่าปริมาตรโดยทางอ้อม ซึ่งมักจะนิยมใช้อยู่ 2 วิธี คือ

1)โดยวิธีพิกนอมิเตอร์(Pycnometer method):

พิกนอมิเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หาค่าความหนาแน่นของสารได้ทั้งของแข็งและของเหลว **เป็นขวดที่ทราบค่าปริมาตรแน่นอนที่อุณหภูมิคงที่ใดๆ**โดยการสอบเทียบความถูกต้องกับน้ำบริสุทธิ์มีขนาดและรูปร่างต่างๆกันหลายแบบดังแสดงใน**ภาพที่** 1 ของ **ภาคผนวก ง**.แต่จะมีสมบัติที่เหมือนกันคือคอขวดจะเล็ก มีจุกแก้วที่ใส่ลงในคอขวดได้สนิทตรงกลางของจุกแก้วจะมีรูเล็กๆที่ทะลุตลอดตัวจุกสำหรับให้ของเหลวล้นออกจากขวดทางรูนี้

ของเหลวที่ใช้**พิกนอมิเตอร์**ในการหาค่าความหนาแน่น มักจะเป็นของเหลวทั่วๆไปแต่ถ้าจะให้ได้ค่าที่ถูกต้องควรเป็นของเหลวที่ไม่ระเหยเร็วเกินไปนัก ส่วนของแข็งที่ใช้**พิกนอมิเตอร์**ก็จะเป็นของแข็งที่เป็น **ผง**(powders) **ผลึก**(crystals)หรือของแข็งที่มีขนาดเล็กๆที่สามารถตัด หรือแบ่งออกมาจากชิ้นตัวอย่างของแข็งที่มีขนาดใหญ่ได้

2)โดยวิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่ง(Hydrostatic weighing method):

"น้ำหนักของของแข็งที่หายไปเมื่อชั่งของแข็งในลักษณะที่แขวนอยู่ในของเหลวจะเป็นน้ำหนักของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับของแข็งนั้น"จากคำจำกัดความดังกล่าวก็จะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ใช้สำหรับหาปริมาตรของของแข็ง เพื่อนำไปหาค่าความหนาแน่นของของแข็งและของเหลวได้ ถ้าเป็นของแข็งก็โดยการเอาค่าน้ำหนักของของแข็งที่ชั่งในอากาศหารด้วยปริมาตรของของแข็งนั้น ซึ่งหาได้จากวิธีดังกล่าวข้างต้นและถ้าเป็นของเหลวก็โดยการใช้ของแข็งที่ทราบค่าความหนาแน่นมาชั่งในของเหลวนั้นโดยที่ระดับของของเหลวก่อนชั่งและหลังชั่งน้ำหนักของของแข็งในของเหลว จะต้องอยู่ที่ระดับเดิมเสมอ

แต่เนื่องจากในปัจจุบันมีเครื่องมือและเทคนิคที่ทันสมัย สามารถหาค่าความหนาแน่นของของเหลวที่ระเหยได้ง่ายหรือมีจุดเดือดต่ำได้สะดวกและแม่นยำ อีกทั้งวิธี

พิกนอมิเตอร์ที่ยังสามารถใช้ได้ดี ดังนั้นการหาค่าความหนาแน่นของของเหลวด้วยวิธีนี้ไม่นิยมนำมาใช้ นอกจากใช้ในการศึกษาวิจัยเฉพาะงานซึ่งต้องใช้อุปกรณ์ที่ปุ่งยากและซับซ้อนเท่านั้น

1.3 ความสำคัญและรายละเอียดของปัญหา

จากการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของของแข็ง โดยวิธีทั้ง 2 แบบข้างต้น พบว่าเทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการของแต่ละวิธียังมีข้อจำกัดอยู่ ดังนี้

1)วิธีพิกนอมิเตอร์(Pycnometer method):

เป็นวิธีหาค่าความหนาแน่นได้ทั้งของแข็งและของเหลว โดยการหาค่าปริมาตรที่แน่นอนของพิกนอมิเตอร์ที่อุณหภูมิใดๆด้วยการสอบเทียบกับน้ำกลั่นที่อุณหภูมินั้นๆ ถึงแม้ว่าการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของของแข็งด้วยวิธีนี้ จะมีความสมบูรณ์ทั้งอุปกรณ์และเทคนิคในการใช้งานอยู่ในตัวของมันเองแล้วก็ตาม แต่ก็ใช้ได้แต่เฉพาะตัวอย่างขนาดเล็กๆที่สามารถใส่ผ่านปากขวดเท่านั้นเอง ซึ่งเป็นข้อจำกัดในเรื่องปริมาณและน้ำหนักของตัวอย่างที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ

ในกรณีที่ต้องการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างของแข็ง เพื่อหาค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องหรือที่อุณหภูมิกำหนดค่าเฉพาะ(15 องศาเซลเซียส,20 องศาเซลเซียส,25 องศาเซลเซียส) ก็ทำโดยการแช่พิกนอมิเตอร์(ยูนิตมีเทอร์โมมิเตอร์) ซึ่งใส่ตัวอย่างไว้แล้วในอ่างน้ำที่สามารถปรับตั้งและควบคุมอุณหภูมิได้(Temperature controlled water baht)หรือในภาชนะที่ใส่น้ำกับน้ำแข็ง จนได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ แต่ก็ยังไม่สามารถทำให้ตัวอย่างมีอุณหภูมิที่ต้องการมีค่าคงที่นานเพียงพอในช่วงเวลาที่นำไปชั่งน้ำหนัก เนื่องจากอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการมักจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิที่ต้องการควบคุมเสมอทำให้อุณหภูมิของตัวอย่างของแข็งและของเหลวในพิกนอมิเตอร์ที่นำขึ้นมาจากการแช่ในอ่างน้ำฯเพิ่มขึ้นไปจากอุณหภูมิที่ต้องการวิเคราะห์ทดสอบได้ง่าย ทำให้ค่าน้ำหนักของของเหลวในพิกนอมิเตอร์ที่ถูกตัวอย่างของแข็งแทนที่นั้นมีค่าไม่คงที่ เนื่องจากปริมาตรของตัวอย่างของแข็งและความหนาแน่นของของเหลวในขวดพิกนอมิเตอร์จะแปรผันตามอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย เพื่อให้เกิดความถูกต้องและแม่นยำ ทำให้ต้องทดสอบน้ำหนักซ้ำๆครั้งเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิที่ต้องการมากที่สุด ทำให้สูญ

เสียเวลาและค่าใช้จ่าย

2)วิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่ง(Hydrostatic weighting method):

การวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของของแข็งโดยวิธีนี้ ห้องปฏิบัติการทดสอบใช้เทคนิคอยู่สองแบบ พบว่าทั้งสองแบบมีข้อจำกัดอยู่สองประการ คือ

- ถึงแม้ว่าเทคนิคและอุปกรณ์ที่ใช้อยู่นั้นจะสามารถใช้กับตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่กว่าตัวอย่างที่ใช้กับวิธีพิกนอมิเตอร์ก็ตาม แต่ก็ต้องเป็นตัวอย่างที่มีขนาดเหมาะกับภาชนะที่บรรจุของเหลวและน้ำหนักจะต้องไม่เกินความสามารถของเครื่องชั่ง ดังนั้นจึงไม่สามารถใช้วิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ หรือมีน้ำหนักมากที่ไม่อาจแบ่งหรือทำลายตัวอย่างให้มีขนาดเล็กลงหรือน้ำหนักน้อยลง เพื่อที่จะนำชิ้นส่วนมาวิเคราะห์ทดสอบ เช่น ทองรูปพรรณ วัตถุโบราณ หรือตุ้มน้ำหนักมาตรฐานขนาดใหญ่เป็นต้น ตลอดจนถึงตัวอย่างที่มาตรฐานวิธีการทดสอบที่กำหนดให้ใช้ปริมาณหรือน้ำหนักมากๆ เช่น ถ่านหินแอนทราไซด์ สินแร่ต่างๆ เป็นต้น
- ไม่สามารถวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง หรืออุณหภูมิเฉพาะที่กำหนด เช่น ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรือที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ตามที่ผู้ใช้บริการต้องการได้เลย อุณหภูมิขณะทดสอบมักเป็นไปตามอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการในขณะนั้นๆ ซึ่งไม่คงที่จะแปรผันตามอุณหภูมิของอากาศภายนอก

1.4 วัตถุประสงค์ของการศึกษาวิจัย

การพัฒนาเทคนิคและปรับปรุงอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของของแข็งด้วยวิธี**"ชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่ง" (Hydrostatic weighting method)**เพื่อ

1.4.1 ให้สามารถใช้กับตัวอย่างของแข็งได้ทุกขนาดและทุกรูปร่างต่างๆ โดยไม่ต้องตัดแบ่งหรือทำลายตัวอย่าง

1.4.2 ให้สามารถควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างของแข็งขณะดำเนินการวิเคราะห์ทดสอบให้ได้ค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการและคงค่าอุณหภูมินั้นได้นานเพียงพอสำหรับการปฏิบัติงาน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษาทดลองและพัฒนา

1.5.1 พิจารณาว่า อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้กับเทคนิคเดิมว่าก่อให้เกิดข้อจำกัดอย่างใด

1.5.2 ทำการศึกษาทดลอง พัฒนาและดัดแปลงอุปกรณ์โดยใช้เทคนิคเดิม ให้สามารถใช้กับตัวอย่างของแข็งที่มีขนาดใหญ่และ/หรือมีน้ำหนักมากๆได้

1.5.3 ถ้าหากดำเนินการตามข้อ(1.5.2)แล้ว ยังไม่สามารถแก้ไขข้อจำกัดในเรื่องขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างได้ ก็ให้ดำเนินการเปลี่ยนหรือปรับปรุงอุปกรณ์-เครื่องมือและเทคนิคที่ใช้ใหม่จนสามารถใช้กับตัวอย่างของแข็งที่มีขนาดใหญ่และ/หรือมีน้ำหนักมากๆได้ แล้วพิจารณาและแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้น

1.5.4 ตรวจสอบความสามารถ ความถูกต้องและแม่นยำของเทคนิคและอุปกรณ์ที่ได้ปรับปรุงและพัฒนาขึ้นใหม่

1.5.5 ศึกษาทดลองพัฒนาระบบการควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างของแข็งให้สามารถทำอุณหภูมิตามที่ต้องการ และคงที่นานเพียงพอที่จะปฏิบัติการทดสอบหาค่าปริมาตรของตัวอย่างของแข็งด้วยการแทนที่ของเหลวโดยการชั่งในของเหลวที่นิ่ง เพื่อใช้หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างของแข็งนั้น

1.5.6 สรุปผลการศึกษาวิจัยจากผลการทดลอง

บทที่ 2

เทคนิคเดิมที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการ

การหาค่าปริมาตรของของแข็งที่ต้องการวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่อยู่นิ่ง (Hydrostatic weighing method) นั้น เทคนิคที่ใช้อยู่ในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบมีอยู่ 2 เทคนิค ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดหรือมวลของของแข็งและเครื่องชั่งที่ใช้ มีรายละเอียด ดังนี้

2.1 เทคนิคแบบที่ 1

เป็นเทคนิคที่การชั่งน้ำหนักมวลของของแข็งในของเหลวที่อยู่นิ่ง โดยเครื่องชั่งจะอ่านเฉพาะค่าของมวลของตัวอย่างที่แขวนอยู่ในของเหลวที่นิ่งเท่านั้น โดยมีลักษณะของการชั่งของแข็งในของเหลวที่อยู่นิ่งดังแสดงใน**ภาพที่ 2-1** ใน**ภาคผนวก ง.**

รายละเอียดของเครื่องมือ - อุปกรณ์ และขั้นตอนในการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเทคนิคนี้ อยู่ในข้อ 1 ของ**ภาคผนวก ก.**

พบว่าเทคนิคแบบที่ 1 นี้ จะต้องใช้กับตัวอย่างที่มีมวลไม่เกิน 200 กรัม ขนาดและรูปร่างต้องสะดวกที่จะแขวนให้อยู่บริเวณตอนกลางของบีกเกอร์ โดยไม่สัมผัสกับตัวบีกเกอร์ ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างของแข็งที่หาได้เป็นค่าความหนาแน่นที่อุณหภูมิห้องขณะที่ทดสอบ

การปรับระดับของน้ำกลั่นในบีกเกอร์ให้อยู่ที่ระดับเดิมหลังจากใส่ตัวอย่างของแข็ง ทำโดยการดูดน้ำกลั่นออกจากบีกเกอร์ด้วยหลอดคาปิลารี่หรือปิเปต

2.2 เทคนิคแบบที่ 2

เทคนิคแบบนี้เครื่องชั่งจะชั่งทั้งน้ำหนักของมวลของเหลว ของภาชนะที่ใส่ของเหลวและตัวอย่างของแข็งที่แขวนอยู่ในของเหลวที่นิ่งในภาชนะ โดยขนาดและน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งสามารถใช้ในปริมาณได้มากกว่า**เทคนิคแบบที่1** เนื่องจากเครื่องชั่งที่ใช้สามารถชั่งน้ำหนักได้มากถึง 1000 กรัม แต่จะต้องเลือกขนาดของบีกเกอร์และตะแกรงให้เหมาะสมกับรูปร่างลักษณะและขนาดของตัวอย่างที่จะตรวจสอบ ความ

ละเอียดและความถูกต้องของการทดสอบจะขึ้นอยู่กับเครื่องชั่งที่ใช้และความชำนาญของผู้ทดสอบ โดยมีลักษณะของการชั่งของแข็งในของเหลวที่อยู่นิ่งด้วยเทคนิคแบบที่ 2 นี้ดังแสดงในภาพที่ 2-2 ในภาคผนวก ง.

รายละเอียดของเครื่องมือ-อุปกรณ์ และขั้นตอนในการวิเคราะห์ทดสอบด้วยเทคนิคนี้ อยู่ในข้อ 2 ของภาคผนวก ก.

2.3 ข้อแตกต่างและที่เหมือนกันระหว่างเทคนิคแบบที่ 1 กับเทคนิคแบบที่ 2

เทคนิคที่ใช้ทั้งสองแบบมีข้อแตกต่างและเหมือนกัน ดังนี้

1) เทคนิคที่ 1 นั้นสามารถใช้ตัวอย่างที่มีมวลใกล้กับค่าสูงสุดของพิสัยของเครื่องชั่ง ซึ่งเครื่องชั่งที่ใช้ในเทคนิคนี้จะมีความละเอียดมาก(0.0001กรัมหรือ 0.00001 กรัม) แต่จะชั่งน้ำหนักได้ไม่มาก(ประมาณ 200 กรัม)

2) เทคนิคที่ 2 ขนาดและมวลของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบหาค่าความหนาแน่น จะต้องคำนึงถึงขนาดของปิกเกอร์และมวลของของเหลวที่ใส่อยู่ในปิกเกอร์ขณะที่ชั่งของแข็งในของเหลวที่อยู่นิ่งนั้น มวลรวมของปิกเกอร์กับของเหลวที่ใส่และของแข็งที่แขวนที่แขวนอยู่ในของเหลว จะต้องไม่เกินความจุ(capacity)ของเครื่องชั่ง

3) เทคนิคทั้งสองแบบใช้ไม่สะดวกกับตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผงหรือเม็ดเล็กๆ และไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของตัวอย่างของแข็งและของเหลวที่ใช้ในการทดสอบตามที่ต้องการได้ ดังนั้นจึงต้องทดสอบตามอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการทดสอบในขณะที่กำลังดำเนินการวิเคราะห์ทดสอบตัวอย่างนั้น

บทที่ 3

การพัฒนาเทคนิคและอุปกรณ์ให้สามารถใช้กับตัวอย่างของแข็งขนาดใหญ่

3.1 การศึกษาวิเคราะห์เทคนิคเดิม

เพื่อที่จะให้สามารถวิเคราะห์ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างของแข็งที่มีขนาดใหญ่และน้ำหนักมาก จึงได้ทำการศึกษาทดลองโดยพิจารณาเทคนิคที่ใช้อยู่เดิมทั้งสองแบบก่อนว่าจะสามารถปรับปรุงพัฒนาได้หรือไม่ ดังนี้

3.1.1 เทคนิคแบบที่ 1

จากรายละเอียดในหัวข้อ 2.1 พบว่าเทคนิคแบบที่ 1 นี้สามารถใช้ภาชนะใส่ของน้ำกลั่นให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของภาชนะใหญ่ขึ้นได้อีกบ้าง โดยที่ความสูงของภาชนะต้องใกล้เคียงกับของเดิม ซึ่งจะทำให้สามารถใช้ใส่ตัวอย่างที่มีขนาดใหญ่ขึ้นกว่าเดิมได้ แต่ก็ยังถูกจำกัดจากระยะของลวดที่ยึดกับจานวางตัวอย่างของเครื่องชั่ง และถึงแม้จะสามารถใช้ตัวอย่างของแข็งขนาดใหญ่ขึ้นแต่ก็จะต้องมีมวลไม่เกิน 200 กรัมตามความจุของเครื่องชั่ง

3.1.2 เทคนิคแบบที่ 2

จากรายละเอียดในหัวข้อ 2.2 พบว่าเทคนิคแบบที่ 2 นี้ ถ้าต้องการใช้กับตัวอย่างของแข็งที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ก็สามารถทำได้โดยเปลี่ยนขนาดของภาชนะที่จะใส่ของเหลวให้ใหญ่ตามที่ต้องการแต่ต้องเปลี่ยนเครื่องชั่งที่มีความจุมากขึ้นและต้องเป็นไปตามเงื่อนไขในข้อ 2.3-3 ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเครื่องชั่งที่สามารถชั่งน้ำหนักได้ยิ่งมาก ความละเอียดของเครื่องชั่งก็จะน้อยลง เช่น

- เครื่องชั่งไฟฟ้าจานเดียวแบบมีตู้ความจุขนาด 200 กรัมจะสามารถอ่านค่าละเอียดถึง 0.0001กรัม
- เครื่องชั่งไฟฟ้าจานเดียวแบบ Top load ความจุขนาด 1,200 กรัม จะสามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.001 กรัม
- เครื่องชั่งไฟฟ้าจานเดียวแบบ Top load ความจุขนาด 4,000 กรัม จะสามารถอ่านค่าได้ละเอียดถึง 0.01 กรัม
- เครื่องชั่งไฟฟ้าจานเดียวแบบ Top load ความจุขนาด 16,000 กรัมจะสามารถ

อ่านค่าละเอียดได้ 0.1 กรัม

-เครื่องชั่งไฟฟ้าจานเดียวแบบ Top load ความจุขนาด 30,000 กรัมจะสามารถอ่านค่าละเอียดได้เพียง 1 กรัม

ซึ่งจะเห็นว่าเทคนิคแบบที่ 2 นี้ความละเอียดและความถูกต้องจะเปลี่ยนแปลงตามเครื่องชั่งที่ใช้ในการทดสอบ

3.2 การศึกษาทดลองเทคนิคใหม่โดยใช้เทคนิคเก่าทั้งสองแบบร่วมกัน

เมื่อนำข้อดีของเทคนิคแบบที่ 1 และแบบที่ 2 มาพิจารณาร่วมกันพบว่า ถ้าในการวิเคราะห์ทดสอบสามารถเปลี่ยนขนาดของภาชนะที่ใช้สำหรับใส่ของเหลวให้มีความเหมาะสมตามขนาดของของแข็ง โดยที่เครื่องชั่งยังคงอ่านเฉพาะน้ำหนักมวลของแข็งที่แขวนอยู่ในของเหลวเท่านั้น ก็จะสามารถชั่งน้ำหนักของตัวอย่างของแข็งที่แขวนอยู่ในของเหลวโดยของแข็งจะมีขนาดใหญ่เท่าใดก็ได้ และไม่ต้องคำนึงถึงน้ำหนักมวลของเหลวกับภาชนะที่ใส่ของเหลว ซึ่งเครื่องชั่งก็จะอ่านค่าน้ำหนักมวลของแข็งในของเหลวที่อยู่นิ่งได้เต็มขีดความสามารถของเครื่องชั่ง

เครื่องมือและอุปกรณ์ จัดหาเครื่องมือและสร้างอุปกรณ์เพื่อใช้ในศึกษาทดลองตามแนวทางดังกล่าวข้างต้น ดังนี้

1. เครื่องชั่งไฟฟ้าที่ชั่งได้ถึง 1,200 กรัม อ่านได้ละเอียด 0.001 กรัม มีที่แขวนสำหรับชั่งน้ำหนักใต้เครื่องชั่งได้
2. ตู้กระจกขนาด 24 ซม.x 25.5 ซม.x 24 ซม.
3. โครงเหล็กมีพื้นไม้ที่มีช่องกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม.สำหรับวางเครื่องชั่งให้ที่แขวนข้างใต้เครื่องชั่งตรงกับช่องกลม
4. ลวดตะขอและตะแกรงลวดสำหรับใส่ตัวอย่างของแข็งกับเชือก

การดำเนินการทดลอง จัดตั้งอุปกรณ์ต่างๆและเครื่องชั่ง แล้วดำเนินการทดลองโดยใช้เทคนิคแบบใหม่ ตามขั้นตอน ดังนี้

1. ใส่น้ำกลั่นลงในตู้กระจก(ความจุ 13.5 ลิตร) โดยให้น้ำมีความสูง 20 ซม.แล้ววัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid in glass

2.นำลวดที่ยึดตะแกรงไปแขวนไว้ที่ตะขอใต้เครื่องชั่ง เปิดเครื่องชั่งแล้วTareค่าน้ำหนักของลวดกับตะแกรงให้เป็นศูนย์(หรือบันทึกค่าไว้เพื่อหักค่าออกในภายหลัง)

3.นำตัวอย่างของแข็งต่างๆที่มีขนาดใหญ่และมีค่าน้ำหนักที่ชั่งในอากาศไม่เกิน1,200 กรัมซึ่งได้แก่

- อะลูมิเนียมรูปพรรณ
- หยก(Jade)
- กระจก

โดยใส่ลงในตะแกรงที่แขวนอยู่ในน้ำกลั่นที่นิ่งแล้วอ่านค่าน้ำหนักที่ชั่งได้ของตัวอย่างต่าง ๆข้างต้น ลักษณะการจัดเครื่องมือและอุปกรณ์ดังแสดงใน **ภาพที่** 3 ของ**ภาคผนวก ง**.และการทดลองหาปริมาตรตัวอย่างอะลูมิเนียมรูปพรรณโดยการชั่งในน้ำกลั่นที่อยู่นิ่งด้วยเทคนิคแบบใหม่นี้ดังแสดงใน**ภาพที่ 4 ของภาคผนวก ง.**

ผลการทดลองปรากฏว่า เทคนิคและอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นใหม่นี้สามารถใช้หาค่าปริมาตรของตัวอย่างต่างๆข้างต้นได้ดี เมื่อเทียบกับเทคนิคเดิมแล้วค่าความหนาแน่นที่หาได้จะใกล้เคียงกัน รายละเอียดดังแสดงใน **ตารางที่ 1** ใน**ภาคผนวก ค.** แต่พบว่ามีสิ่งที่ควรปรับปรุง คือวิธีการปรับระดับน้ำกลั่นที่สูงขึ้นให้เท่ากับระดับเดิมก่อนที่จะใส่ชิ้นตัวอย่างของแข็งลงไปแทนที่น้ำกลั่นในตู้กระจก โดยใช้วิธีตักน้ำกลั่นออกจากตู้กระจกให้น้ำกลั่นมีระดับความสูงเท่าเดิมซึ่งไม่สะดวกและเสียเวลา ทั้งยังขาดความแม่นยำด้วย

3.3 เทคนิคในการปรับระดับน้ำกลั่น

เพื่อให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในการปรับระดับความสูงของน้ำกลั่น จึงได้ใช้หลักการแทนที่ของเหลวด้วยของแข็งมาใช้ และดำเนินการศึกษาทดลองหาเทคนิคที่ทำให้เกิดความสะดวกและรวดเร็ว

อุปกรณ์ โดยการทำแท่งแก้วขนาดต่างๆ ถ้าเป็นขนาดใหญ่ก็ใช้หลอดแก้วบรรจุน้ำกลั่นที่ปลายด้านหนึ่งมีห่วงผูกเชือก ดังนี้

1.แท่งแก้วตัน เส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม.ยาว 20 ซม.จำนวน 2 แท่ง

2.แท่งแก้วกลวงภายในบรรจุน้ำกลั่น เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม.ยาว 20 ซม.

จำนวน 2 แท่ง

3.แท่งแก้วกลวงภายในบรรจุน้ำกลั่น เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 ซม.ยาว 15 ซม. จำนวน 2 แท่ง

ลักษณะของแท่งแก้วดังแสดงใน **ภาพที่ ผ.3** ใน **ภาคผนวก ง.**

การดำเนินการทดลอง

ด้วยการใช้แท่งแก้วขนาดต่างๆเพื่อปรับระดับน้ำกลั่นในตู้กระจก ใช้เชือกผูกกับห่วงของแท่งแก้ว พาดผ่านรอกหรือห่วงโลหะที่ติดอยู่โครงโลหะใต้พื้นที่วางเครื่องชั่ง โดยให้แท่งแก้วทั้งอันจมอยู่ในน้ำใกล้ผนังของตู้กระจก ส่วนปลายเชือกที่เหลือผูกไว้ที่ขาโครงโลหะ เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นเนื่องจากการแทนที่น้ำของปริมาตรของตัวอย่างของแข็งที่นำใส่ลงในตู้กระจก ให้ทำการดึงแท่งแก้วให้สูงขึ้น ก็จะทำให้ระดับน้ำกลั่นในตู้กระจกลดลงถึงระดับเดิมที่ได้ขีดทำเครื่องหมายไว้ได้อย่างสะดวกและง่ายดายกว่าการตักหรือดูดน้ำเข้า-ออก

แท่งแก้วขนาดใหญ่ใช้สำหรับปรับระดับน้ำปริมาณมากๆให้เข้าใกล้ระดับเดิมของน้ำกลั่นได้อย่างรวดเร็ว ส่วนแท่งแก้วอันเล็กจะใช้ในการปรับระดับน้ำให้มีความถูกต้องและแม่นยำ

บทที่ 4

การปรับและควบคุมอุณหภูมิน้ำกลั่น

เพื่อให้เทคนิคแบบใหม่ตามที่ได้ดำเนินการศึกษาทดลองไปใน **บทที่ 3** แล้วนั้น มีความสมบูรณ์ตามจุดประสงค์ คือสามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิของของเหลวให้มีค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการและคงค่านานเพียงพอที่จะดำเนินการชั่งน้ำหนักตัวอย่างของแข็งที่แขวนอยู่ในของเหลว(น้ำกลั่น)ที่นิ่งได้ตามความประสงค์ เพื่อนำค่าปริมาตรที่ได้ไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นของของแข็งนั้นต่อไป จึงได้ดำเนินการศึกษาทดลองหาวิธีที่สามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิของของเหลว(น้ำกลั่น)ให้มีตามความต้องการดังกล่าว

โดยทั่วไปแล้วการปรับและควบคุมอุณหภูมิของน้ำกลั่นสามารถทำได้โดยการนำตู้กระจกใส่น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิตามปกติไปแช่ไว้ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำ (Temperature controled circulation bath)ซึ่งได้ปรับตั้งให้น้ำกลั่นที่บรรจุและไหลเวียนอยู่ในเครื่องให้มีค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการ เพื่อทำอุณหภูมิของน้ำในตู้กระจกให้ได้ค่าอุณหภูมิที่ต้องการ แต่ในทางปฏิบัตินั้นวิธีการนี้มีอุปสรรค คือ ถ้าอ่างที่ใช้ใส่น้ำของเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯมีความสูงน้อยกว่าความสูงของตู้กระจก ก็จะแช่ตู้กระจกได้ไม่หมดทำให้การควบคุมอุณหภูมิของน้ำไม่ทั่วถึงและถึงจะใช้เครื่องที่มีความสูงเพียงพอก็ยังมีปัญหาในขณะทำการทดลอง เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นด้านข้างของตู้กระจกที่แช่อยู่ได้ ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ การมองดูสภาพตัวอย่างของแข็งที่กำลังทดสอบ การสังเกตระดับของน้ำกลั่นในตู้กระจกนั้นไม่สะดวกและถูกต้องได้ ดังนั้นจึงต้องใช้วิธีทางอ้อมด้วยเทคนิคต่างๆเพื่อแก้ข้อขัดข้องดังกล่าว โดยได้ดำเนินการศึกษาทดลองด้วยเทคนิคต่างๆ ดังนี้

4.1 การปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจก

ในการปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกให้ได้อุณหภูมิตามที่ต้องการ ซึ่งในการศึกษาทดลองนี้ได้กำหนดให้เป็นที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสนั้น ใช้วิธีดังนี้

4.1.1 ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำทำความเย็นน้ำกลั่นโดยตรง

ถ้าใช้ตู้กระจกมีปริมาตรน้อยกว่าปริมาตรของภาชนะเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯให้ใช้น้ำกลั่นจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่ได้ปรับให้มีอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสมาใส่ลงในตู้กระจกโดยตรง แต่ถ้าตู้กระจกมีขนาดใหญ่จนมีปริมาตรมากเกินกว่าที่จะนำน้ำจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯมาใช้โดยตรงได้เพียงพอ ก็ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่ได้ปรับตั้งให้น้ำกลั่นให้มีอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส แล้วให้น้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯไหลเวียนเข้าผสมกับน้ำในตู้กระจกจนกระทั่งน้ำกลั่นในตู้ได้อุณหภูมิ20 องศาเซลเซียส จับเวลาที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯต้องใช้ในการทำให้น้ำกลั่นที่อยู่ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ และจับเวลาที่ต้องใช้ในการไหลเวียนเข้า-ออกของน้ำกลั่นในตู้กระจก จนกระทั่งน้ำกลั่นในตู้กระจกได้ค่าอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสแล้วตรวจสอบดูว่าน้ำกลั่นจะยังสามารถคงอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสได้นานเท่าไรโดยการพิจารณาอุณหภูมิเดิมและปริมาณของน้ำกลั่นที่ใช้กับเวลาที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯใช้ในการปรับให้น้ำกลั่นจนมีค่าอุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียส

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. ตู้กระจกขนาด 24ซม.x25.5ซม.x24ซม. และขนาด 24ซม.x25.5ซม.x35ซม. กำหนดตำแหน่งบริเวณที่จะวัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกดังแสดงใน**ภาพที่ 6-1**
2. ตู้กระจกขนาด 30ซม.x45ซม.x50ซม. มีทางให้น้ำหมุนเวียนเข้า-ออกสำหรับต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำและกำหนดตำแหน่งบริเวณที่จะวัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกหมายเลข1ถึง9 ดังแสดงใน**ภาพที่6-2ของภาคผนวก ง.**
3. เทอร์โมมิเตอร์แบบ Liquid in glass ขนาดพิสัย 0-100 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส จำนวน 4 อัน
4. เครื่องควบคุมอุณหภูมิน้ำและไหลเวียนน้ำยี่ห้อ"BOSSTECH" เป็นเครื่องที่มีระบบทำความเย็นอยู่ในตัว โดยมีขดลวดทำความเย็นติดอยู่ใต้อ่างที่มีขนาด 39x31x27 ซม.ในการใช้งานจะใส่น้ำได้มากที่สุดประมาณ 30 ลิตร(อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิวัดอุณหภูมิได้ละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียส)
5. เครื่องควบคุมอุณหภูมิน้ำและไหลเวียนน้ำยี่ห้อ"HETO" เป็นเครื่องที่ระบบทำความเย็นแยกอิสระจากตัวอ่างใส่น้ำ ทำความเย็นให้แก่น้ำโดยการจุ่มส่วนที่เป็นขดลวด

ทำความเย็นลงในน้ำที่อยู่ในภาชนะที่ใส่น้ำ ซึ่งปกติจะใช้กับอ่างขนาด 75x35x15 ซม.ในการใช้งานจะใส่น้ำได้มากที่สุดประมาณ 36 ลิตร(อุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิวัดอุณหภูมิได้ละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียส)

การดำเนินการทดลอง

1.ทดลองหาเวลาที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ ต้องใช้ในการปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นจากอุณหภูมิเดิมจนได้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังนี้

- ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำ "BOSSTECH" ใส่น้ำกลั่น 30 ลิตร (มวล 30 กก.)จากอุณหภูมิเดิม 25 องศาเซลเซียสปรากฏว่าจะต้องใช้เวลานานประมาณ 35-40 นาทีจึงจะทำให้น้ำกลั่นมีอุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียส
- ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ"HETO"ใส่น้ำกลั่น 36 ลิตร(มวล36กก.)จากอุณหภูมิเดิม 24 องศาเซลเซียส) ปรากฏว่าจะต้องใช้เวลานานประมาณ 65-70นาทีจึงจะทำให้น้ำกลั่นมีอุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียส)
- ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ"HETO"ใส่น้ำกลั่น 16 ลิตร(มวล 16 กก.)จากอุณหภูมิเดิม 25 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าจะต้องใช้เวลานานประมาณ 35 นาทีจึงจะทำให้น้ำกลั่นมีอุณหภูมิเป็น 20 องศาเซลเซียส

2.ใส่น้ำกลั่นที่ได้ปรับให้มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสแล้วจำนวน 11 ลิตร(มวล 11 กก.)ลงในตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกทุกๆ 5 นาทีเป็นเวลานาน 30 นาที โดยในการทดลองแต่ละครั้งอุณหภูมิของห้องทดลองมีค่าต่างกัน ข้อมูลของการทดลองดังแสดงไว้ในตาราง 2-1,2-2 และ2-3 ของ**ภาคผนวก ค.**

3.ใส่น้ำกลั่นที่ได้ปรับให้มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสแล้วจำนวน 17 ลิตร(มวล 17 กก.) ลงในตู้กระจกขนาด 24x25.5x35 ซม.แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกทุกๆ 5 นาทีเป็นเวลานาน 30 นาที โดยในการทดลองแต่ละครั้งอุณหภูมิของห้องทดลองมีค่าต่างกัน ข้อมูลของการทดลองดังแสดงในตารางที่ 3-1,3-2 และ3-3 ของ**ภาคผนวก ค.**

4.ใช้ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม.ใส่น้ำกลั่น 55 ลิตร(มวล 55 กก.)ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ"HETO"ที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 36 ลิตร(มวล 36 กก.)และตั้ง

อุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียส โดยปรับให้อัตราการไหลเวียนของน้ำเข้า-ออกสมดุลย์กันจนกระทั่งน้ำกลั่นในตู้กระจกมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ก็ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ แล้วบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกทุกๆ 5 นาทีเป็นเวลานาน 30 นาที โดยแต่ละครั้งห้องทดลองมีอุณหภูมิต่างกัน ปรากฏว่า

- เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกมีค่า 27.3 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้องทดลอง 26.7 องศาเซลเซียสต้องใช้เวลา 95 นาที และคงค่าอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสได้นาน 10 นาที
- เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกมีค่า 25.6 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้องทดลอง 23.8 องศาเซลเซียสต้องใช้เวลา 90 นาที และคงค่าอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสได้นาน 15 นาที
- เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกมีค่า 22.0 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้องทดลอง 21.8 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลา 75 นาทีและคงค่าอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสอยู่ได้นานถึง 30 นาที

ข้อมูลของการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4-1,4-2 และ4-3 ของ**ภาคผนวก ค.** พบว่าในระยะแรกอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ยริเวณต่างๆจะไม่เท่ากัน สาเหตุมาจากน้ำกลั่นที่ไหลจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯเข้าสู่ในตู้กระจกมีความเร็วมากทำให้น้ำกลั่นที่ไหลเข้าไปในตู้กระจกใกล้พื้นตอนล่างมีลักษณะแบบ Turbulentไปยังด้านตรงข้ามแล้วจึงวนขึ้นด้านบนทางน้ำไหลออกก่อน จึงทำให้อุณหภูมิของน้ำกลั่นด้านนั้นลดลงก่อน

จากรายละเอียดของข้อมูลผลการทดลอง ในตารางที่ 2-1,2-2,3-1 3-2,4-1และ4-2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อปล่อยน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่ำไว้ในห้องที่มีอุณหภูมิห้องสูงกว่าอุณหภูมิน้ำกลั่นมาก น้ำกลั่นจะมีอุณหภูมิคงที่อยู่ได้แค่ช่วงเวลาสั้นๆเท่านั้นโดยเฉพาะถ้าน้ำกลั่นมีปริมาณน้อย ส่วนในตารางที่ 2-3,3-3 และ 4-3 แสดงให้เห็นว่า ถ้าให้อุณหภูมิของห้องปฏิบัติการมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิของน้ำกลั่นแล้วจะสามารถรักษาอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกให้คงที่อยู่ได้เป็นเวลานานมากขึ้นแต่ก็ยังนานไม่เพียงพอที่จะปฏิบัติการทดสอบได้

กรมวิทยาศาสตร์บริการ

4.1.2 ใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันโดยตรง

โดยใช้หลักการสมดุลย์ทางความร้อนตามสมการที่ข.3ใน**ภาคผนวก ข.**จะได้ว่า ($mc\pm T$)ที่ลดลงของน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า = ($mc\pm T$)ที่เพิ่มขึ้นของน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิสูงกว่า

ระบบที่ใช้ในการทดลองจะมีอุปกรณ์อื่นๆมาเกี่ยวข้องด้วยนอกเหนือจากน้ำกลั่น ดังนั้นจึงต้องรวมเอาสิ่งต่างๆเหล่านั้นเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งของระบบ และต้องนำมาแทนค่าลงในสมการด้วย ได้แก่ตู้กระจกที่ใส่น้ำกลั่น

วิธีนี้จะสามารถเขียนสมการสำหรับใช้คำนวณหาค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่จะต้องนำมาผสมกับน้ำกลั่นที่เก็บไว้ในห้องทดลอง เพื่อให้อุณหภูมิผสมหรืออุณหภูมิสุดท้ายของน้ำกลั่นทั้งหมดที่นำมาเทใส่ผสมรวมกันมีค่าตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถสมการเขียนได้ดังนี้

$$m_{wL}c_w(T_f - T_L) = m_{wH}c_w(T_H - T_f) + m_g c_g(T_H - T_f)$$

$$m_{wL}c_w(T_f - T_L) = (m_{wH}c_w + m_g c_g)(T_H - T_f)$$

$$T_L = \frac{(m_{wL}c_w)T_f - (m_{wH}c_w + m_{gg})(T_H - T_f)}{m_{wL}c_w} \quad .....(3)$$

เมื่อ m_{wL} คือมวลของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่ถูกกำหนดปริมาณไว้เพื่อนำมาผสมกับน้ำในตู้กระจก

m_{wH} คือมวลของน้ำกลั่นในตู้กระจกที่ถูกกำหนดปริมาณไว้

m_g คือมวลของตู้กระจกที่ใส่น้ำกลั่น(มีค่าคงที่)

c_w คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำกลั่นซึ่งมีค่า 1 คาลอรี่/กรัม-องศาเซลเซียส

c_g คือค่าความร้อนจำเพาะของกระจกซึ่งมีค่า 0.1988 คาลอรี่/กรัม-องศาเซลเซียส

T_L คืออุณหภูมิของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่จะต้องคำนวณหาค่าเพื่อใช้ตั้งค่าอุณหภูมิให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯทำ

T_H คืออุณหภูมิเดิมของน้ำกลั่นในตู้กระจก

T_f คืออุณหภูมิสุดท้าย(อุณหภูมิผสม)ของน้ำในตู้กระจกที่ต้องการใช้ในการทดลอง ซึ่งในการศึกษาทดลองนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส

เครื่องมือและอุปกรณ์

1.ตู้กระจกขนาด 24ซม.x25.5ซม.x24ซม. ขนาด 24ซม.x25.5ซม.x35ซม.และ

ขนาด 30ซม.x50ซม.x40ซม

2.เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำ "BOSSTECH"

3.เทอร์โมมิเตอร์แบบ Liquid in glass ขนาดพิสัย 0-100 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียดถึง 0.1 องศาเซลเซียส จำนวน 4 อัน

การดำเนินการทดลอง

1.กำหนดปริมาณรวมของน้ำกลั่นที่จะใส่ไว้ในตู้กระจกแต่ละใบ($m_{wL} + m_{wH}$) แล้วแบ่งเป็นปริมาณของ m_{wL} และ m_{wH} ให้มีสัดส่วนต่างกันหลายๆค่า

2.วัดอุณหภูมิ(T_H)ของน้ำกลั่นในตู้กระจก(m_{wH}) คำนวณค่าอุณหภูมิ(T_L)จากสมการที่(3)ซึ่งจะเป็นค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(m_{wL})ที่จะต้องนำมาใส่ผสมกับน้ำในตู้กระจกเพื่อให้น้ำกลั่นทั้งหมดในตู้ฯมีอุณหภูมิสุดท้ายเป็น 20 องศาเซลเซียส

โดยได้ดำเนินการการคำนวณค่าอุณหภูมิ(T_L)ตามขนาดของตู้กระจกและสัดส่วนของน้ำกลั่นทดลองตามลำดับ ดังนี้

1) เมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 24ซม.x25.5ซม.x24ซม. ซึ่งมีมวลหนัก 3.0 กก. กำหนดให้มวลของน้ำกลั่นทั้งหมด($m_{wL} + m_{wH}$)ที่จะใส่ในตู้กระจกเป็น 10 กก. ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิ T_L แสดงใน **ตารางที่ 5-1**

2) เมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 24ซม.x25.5ซม.x35ซม. ซึ่งมีมวลหนัก 3.8 กก. กำหนดให้มวลของน้ำกลั่นทั้งหมด($m_{wL} + m_{wH}$)ที่จะใส่ในตู้กระจกเป็น 16 กก. ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิ T_L แสดงใน **ตารางที่ 5-2**

3) เมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 30ซม.x50ซม.x40 ซม. ซึ่งมีมวลหนัก 9.6 กก. กำหนดให้มวลของน้ำกลั่นทั้งหมด($m_{wL} + m_{wH}$)ที่จะใส่ในตู้กระจกเป็น 55 กก. ผลการคำนวณค่าอุณหภูมิ T_L แสดงใน **ตารางที่ 5-3**

จากผลการคำนวณค่าT_L**ในตารางที่** 5-1,5-2และ5-3 แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือให้มวลน้ำกลั่นในตู้ฯ(M_{wH})มีปริมาณน้อยแต่มีอุณหภูมิ(T_H)ใกล้ค่า 20 องศาเซลเซียสมากที่สุด และใช้มวลน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(M_{wL})ให้มีปริมาณมากที่สุดเท่าที่จะใส่ได้แล้วจะทำให้อุณหภูมิที่จะต้องปรับตั้งให้แก่น้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(T_L)มีค่าใกล้ 20 องศาเซลเซียสมากที่สุดซึ่งจะ

ทำให้การปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกให้มีค่า 20 องศาเซลเซียส ใช้เวลาน้อยที่สุด

3. นำข้อผลการคำนวณข้างต้นมาดำเนินการทดลอง โดยปรับอุณหภูมิห้องและน้ำกลั่น (M_{WH})ที่ใส่ไว้ในตู้กระจกให้มีอุณหภูมิเท่ากันที่ 30 องศาเซลเซียส 25 องศาเซลเซียสและ 22 องศาเซลเซียส แล้วนำน้ำกลั่น(M_{WL})ที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ ปรับทำจนได้อุณหภูมิ(T_L)ที่คำนวณไว้ไปผสมกับน้ำกลั่นในตู้กระจกขนาดต่างๆ ตามลำดับของการศึกษาทดลองที่กำหนดไว้

วัดอุณหภูมิสุดท้ายจริงของน้ำกลั่นที่ได้ผสมกันในตู้กระจกที่บริเวณต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ทุกๆ 5 นาทีเป็นเวลานาน 30 นาที เพื่อตรวจสอบดูว่าน้ำกลั่นจะยังสามารถคงค่าอุณหภูมิสุดท้ายนั้นได้นานเท่าไร ผลของการทดลองปรากฏว่าน้ำกลั่นที่ผสมกันในตู้กระจกขนาด 30ซม.x50ซม.x40ซม. เมื่ออุณหภูมิของน้ำกลั่นและห้องปฏิบัติการในขณะทดลองมีค่าสูงกว่า 20 องศาเซลเซียสมาก จะมีอุณหภูมิสุดท้ายไม่ตรงกับการคำนวณใน**ตารางที่ 5-3** ดังผลที่แสดงใน**ตารางที่ 6**

ส่วนรายละเอียดข้อมูลของผลการทดลองการคงค่าของอุณหภูมิสุดท้ายได้แสดงใน **ตารางที่ 7-1,7-2,7-3,8-1,8-2,8-3.9-1,9-2 และ9-3 ของภาคผนวก ค.** ซึ่งจะเห็นว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงการคงค่าของอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำกลั่นที่ถูกนำมาผสมกันดังกล่าวข้างต้น มีลักษณะสอดคล้องกับการคงค่าของอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ถูกปรับให้มีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส จากเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯโดยตรงในหัวข้อ **4.1.1**

4.1.3 ใช้ท่อทองแดง

โดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนระหว่างน้ำกลั่นในตู้กระจกกับน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ จนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกมีค่า 20 องศาเซลเซียส

อุปกรณ์และเครื่องมือ

1. ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตรยาว 1.5เมตรและ 3 เมตร
2. เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำ(Temperatur controled circulation bath)

3.เทอร์โมมิเตอร์ แบบ Liquid in glass ขนาดพิสัย 0-100 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส จำนวน 4 อัน

4.สายยางซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร

การดำเนินการทดลอง

นำท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4 มิลลิเมตร มาดัดเป็นแถวขนานยาว 20 เซนติเมตรห่างกันประมาณ 4 เซนติเมตรมีลักษณะเป็นรูปตัว U แล้วนำไปใส่ไว้ในตู้กระจกขนาด 24ซม.x25.5ซม.x24ซม.และขนาด30ซม.x50ซม.x40ซม. ที่ใส่น้ำกลั่นไว้ ให้ปลายท่อทองแดงทั้งสองต่อเข้ากับสายยางที่ต่ออยู่กับท่อที่เป็นทางสำหรับให้น้ำกลั่นไหลเข้า-ออกจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ แล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ ให้น้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่ได้ปรับอุณหภูมิไว้แล้วตามที่ต้องการวิ่งไหลเวียนเข้า-ออกผ่านท่อทองแดงเพื่อถ่ายเทความร้อนกับน้ำกลั่นในตู้กระจกจนปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกได้อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสตามที่กำหนด ดังแสดงใน**ภาพที่ 7** ของ **ภาคผนวก ง.** โดยได้ทำการศึกษาทดลองเป็น 2 แบบ ดังนี้

4.1.3-1)โดยใช้หลักการสมดุลย์ความร้อน(Thermal equilibrium)

ด้วยการใช้น้ำกลั่นที่ได้ทำให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิที่คำนวณจากสมการสมดุลย์ทางความร้อนให้วิ่งไหลผ่านท่อทองแดงซึ่งวางไว้อยู่ในตู้กระจกที่ใส่น้ำกลั่นเพื่อถ่ายเทความร้อนกับน้ำกลั่นในตู้กระจกจนมีอุณหภูมิที่ 20 องศาเซลเซียสตามที่ต้องการสำหรับใช้ในการชั่งหาน้ำหนักของของแข็งในน้ำกลั่น

เมื่อให้อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกมีค่าตามอุณหภูมิห้องทดลอง ส่วนอุณหภูมิของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯให้คำนวณจากสมการที่ข.3ใน**ภาคผนวก ข.** ซึ่งจะสามารถเขียนสมการสมดุลย์ทางความร้อนได้ดังนี้

$$m_{WL}c_W(T_f - T_L) = m_{WH}c_W(T_H - T_f) + m_Cc_C(T_H - T_f + m_gc_g)(T_H - T_f)$$

จะได้

$$T_L = \frac{m_{WL}c_WT_f - (m_{WH}c_W + m_Cc_C + m_gc_g)(T_H - T_f)}{m_{WL}c_W} \quad \ldots(4)$$

เมื่อ m_{WL} คือมวลของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่ถูกกำหนดปริมาณไว้เพื่อนำมาผสมกับน้ำในตู้กระจก

m_{WH} คือมวลของน้ำกลั่นในตู้กระจกที่ถูกกำหนดปริมาณไว้

m_g คือมวลของตู้กระจกที่ใส่น้ำกลั่น(มีค่าคงที่)

m_c คือ มวลของท่อทองแดง

c_w คือ ค่าความร้อนจำเพาะของน้ำกลั่นมีค่า 1 คาลอรี่/กรัม-องศาเซลเซียส

c_g คือค่าความร้อนจำเพาะของกระจกซึ่งมีค่า 0.1988 คาลอรี่/กรัม-องศาเซลเซียส

c_c คือ ความร้อนจำเพาะของทองแดงมีค่าเท่ากับ 0.0923 คาลอรี่/กรัม-องศาเซลเซียส

T_L คือ อุณหภูมิของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ ที่จะต้องคำนวณหาค่าเพื่อใช้ตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ

T_H คือ อุณหภูมิเดิมของน้ำกลั่นในตู้กระจก

T_f คือ อุณหภูมิของน้ำในตู้กระจกที่ต้องการจะใช้ในการทดลอง ซึ่งในการศึกษาทดลองนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส

เมื่อน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิมีค่าเป็น T_L แล้ว ก็ให้หยุดการปรับอุณหภูมิ แล้วเปิดวาล์วให้น้ำในเครื่องควบคุมอุณหภูมิไหลเวียนเข้า-ออกผ่านท่อทองแดงที่วางไว้ในน้ำกลั่นที่อยู่ในตู้กระจกแล้ววัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกที่บริเวณต่างๆที่กำหนดไว้ทุกๆ 5 นาที จนกระทั่งน้ำในตู้กระจกมีอุณหภูมิลดลงที่อุณหภูมิสุดท้าย

จากการศึกษาทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจกให้มีค่า 20.0 องศาเซลเซียสโดยใช้หลักการสมดุลย์ด้วยขนาดของตู้กระจก ปริมาณน้ำกลั่นและสภาพสภาวะที่แตกต่างกัน ให้ผลดังนี้

1.ใช้ตู้กระจกขนาด 24 ซม.x 25.5 ซม.x 24 ซม.

-เมื่อm_{WL} = 33 กก. m_{WH} = 14.6 กก. m_c = 0.147 กก.m_g = 3 กก. T_L = 16.4 องศาเซลเซียส T_H = 27.9 องศาเซลเซียสนั้นปรากฏว่าต้องใช้เวลานาน 3 ชั่วโมงครึ่งอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้ฯจึงจะมีอุณหภูมิเป็น 20.0 องศาเซลเซียสเกือบเท่ากันหมดทุกบริเวณในตู้กระจก แล้วน้ำกลั่นบริเวณด้านบนก็จะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น

-เมื่อm_{WL} = 33 กก. m_{WH} = 14.6 กก m_c = 0.147 กก. m_g = 3 กก.

T_L= 19.7 องศาเซลเซียส T_H=20.6 องศาเซลเซียส นั้น ปรากฏว่าต้องใช้เวลานาน **1** ชั่วโมง 10 นาที น้ำกลั่นบริเวณตอนกลางและตอนล่างของตู้กระจกจึงจะมีค่าอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ส่วนบริเวณอื่นๆจะมีอุณหภูมิสูงกว่า 0.05 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยมากจนถือว่าเท่ากันได้ และประมาณ 5 นาทีหลังจากนั้นน้ำกลั่นก็จะเริ่มมีอุณหภูมิสูงขึ้น

-เมื่อm_{WL} = 40 กก. m_{WH} = 15.0 กก. m_C = 0.147 กก. m_g = 3 กก. T_L = 19.5 องศาเซลเซียส T_H =21.0 องศาเซลเซียส นั้น ปรากฏว่าจะต้องใช้เวลานาน **1** ชั่วโมงน้ำ จึงจะมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเท่ากันทุกบริเวณในตู้กระจก นอกจากส่วนบนที่มีค่าอุณหภูมิสูงกว่าประมาณ 0.1 องศาเซลเซียส ซึ่งน้อยมากจนถือว่าเท่ากันได้ และคงอุณหภูมิอยู่ได้ประมาณ 10 นาที อุณหภูมิของน้ำกลั่นก็จะเริ่มเพิ่มขึ้นที่บริเวณตอนบนก่อน

รายละเอียดของข้อมูลผลการศึกษาทดลองนี้แสดงไว้ใน**ตารางที่ 10-1, 10-2 และ 10-3** ของ **ภาคผนวก ค.**

2.ใช้ตู้กระจกขนาด 30 ซม.x 50 ซม.x 40 ซม.

-เมื่อ m_{WL} = 40 กก. m_{WH} = 52.0 กก. m_C = 0.363 กก. m_g = 9.7 กก. T_L = 17.0 องศาเซลเซียสและT_H = 22.2 องศาเซลเซียสนั้นปรากฏว่าต้องใช้เวลานานถึง 4 ชั่วโมง น้ำกลั่นในตู้กระจกที่บริเวณตอนล่าง ด้านข้างและด้านหลังที่อยู่ใกล้กับขดท่อทองแดงจะมีอุณหภูมิสุดท้ายที่ 20.5 องศาเซลเซียส ส่วนบริเวณตอนกลางกับตอนบนมีอุณหภูมิ 21 องศาเซลเซียสจากนั้นอุณหภูมิของน้ำกลั่นก็จะเพิ่มขึ้น

รายละเอียดของข้อมูลผลการศึกษาทดลองนี้แสดงไว้ใน**ตารางที่ 10-4**

4.1.3-2)โดยไม่ใช้หลักการสมดุลย์ความร้อน

ด้วยการตั้งค่าอุณหภูมิให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯคงค่าการปรับอุณหภูมิไว้ที่ 20 องศาเซลเซียสตลอดเวลาขณะที่ปล่อยให้น้ำกลั่นไหลเวียนเข้า-ออก ในขดท่อทองแดงที่วางแช่ไว้ในน้ำกลั่นที่ใส่อยู่ในตู้กระจกขนาด24ซม.x25.5ซม.x24 ซม. ใส่น้ำกลั่น 14.5 กก.อุณหภูมิ 23 องศาเซลเซียสโดยห้องมีอุณหภูมิ 22.5 องศาเซลเซียส ปรากฏว่าต้องใช้เวลานานถึง 4 ชั่วโมง 45 นาที น้ำกลั่นในตู้กระจก

จึงจะปรับอุณหภูมิได้ 20 องศาเซลเซียสตามที่ต้องการ ข้อมูลผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 10-5 ของภาคผนวก ค.

จากผลการศึกษาทดลองนี้จะเห็นได้ว่า ถ้าน้ำกลั่นในตู้กระจกมีอุณหภูมิสูงกว่า 22.5 องศาเซลเซียสและ/หรือใช้ตู้กระจกขนาด30ซม.x50ซม.x40ซม.ซึ่งใส่น้ำกลั่นได้ปริมาณมากถึง 52 กก.ย่อมจะต้องใช้เวลาในการปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นให้เป็น 20 องศาเซลเซียสนานมากกว่านี้อย่างแน่นอน

เมื่อพิจารณาผลการศึกษาทดลองข้างต้นทั้ง 2 แบบจะเห็นได้ว่าการปรับอุณหภูมิโดยวิธีใช้ท่อทองแดงนี้ใช้ได้ดีเฉพาะกรณีที่ตู้กระจกมีขนาดบรรจุน้ำกลั่นไม่ใหญ่นัก น้ำกลั่นและห้องปฏิบัติการควรมีอุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการไม่มากนัก ถ้าต้องการคงค่าอุณหภูมิสุดท้ายไว้ให้นานๆนั้นก็สามารถทำได้ โดยการให้น้ำกลั่นที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสไหลเวียนในท่อทองแดงตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม เมื่อทดลองเปิดให้น้ำกลั่นที่ไหลเวียนในท่อทองแดงด้วยอัตราการไหลเวียนเร็วสูงแล้ว พบว่าขดท่อทองแดงจะมีการสั่นสะเทือนเล็กน้อยเป็นผลให้น้ำกลั่นในตู้กระจกกระเพื่อม ซึ่งเมื่อทำการชั่งตัวอย่างของแข็งด้วยเทคนิคใหม่ที่ได้ดำเนินการปรับปรุงพัฒนาแล้วในบทที่3 ปรากฏว่าถ้าเป็นตัวอย่างของแข็งมีลักษณะเป็นแผ่นหรือมีพื้นที่หน้าตัดใหญ่ๆเช่นแผ่นกระจกแล้ว การกระเพื่อมของน้ำกลั่นมีผลทำให้ตัวเลขแสดงผลการชั่งจะไม่คงที่ทำให้ไม่สามารถอ่านค่าน้ำหนักมวลของของแข็งได้ถูกต้องแม่นยำนัก

4.1.4 ใช้ตู้กระจกสองใบซ้อนกัน

เพื่อให้การปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกใช้เวลาน้อยลง และน้ำกลั่นส่วนที่จะใช้ในการทดลองอยู่นิ่ง จึงได้ออกแบบการศึกษาทดลองขึ้นมาใหม่ โดยการใช้ตู้กระจกสองใบมาซ้อนกัน ให้ตู้ใบใหญ่ซึ่งเป็นตู้กระจกชั้นนอกสามารถให้น้ำไหลเวียนเข้า-ออกได้ ส่วนตู้กระจกชั้นในที่มีขนาดเล็กกว่าจะใช้บรรจุน้ำกลั่นที่นิ่งสำหรับชั่งมวลตัวอย่างของแข็งที่ต้องการจะหาค่าปริมาตรโดยการแทนที่น้ำกลั่น โดยน้ำกลั่นจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯจะไหลเวียนเข้ามาถ่ายเทความร้อนกับน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในเพื่อคงค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ 20 องศาเซลเซียสของน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นใน ตู้กระจกชั้นในนี้สามารถเคลื่อนย้ายและเปลี่ยนเป็นขนาดอื่นๆได้ ทั้งนี้เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดของตัวอย่างของแข็งที่จะทดสอบ ดังแสดงในภาพที่ 8 ของ ภาคผนวก ง.

เครื่องมือและอุปกรณ์

1.ตู้กระจกขนาด 24ซม.x25.5ซม.x24ซม.และขนาด 30ซม.x50ซม.x40ซม

2.เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำ

3.เทอร์โมมิเตอร์แบบ Liquid in glass ขนาดพิสัย 0-100 องศาเซลเซียส อ่านได้ละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส จำนวน 4 อัน

4.สายยางซิลิโคนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 มิลลิเมตร

5.ท่อแก้วรูปซ่อมที่มีรูเล็กๆอยู่ห่างกันเป็นระยะสม่ำเสมอ

การดำเนินการทดลอง

1.ใช้ตู้กระจกขนาด 30 ซม.x 50 ซม.x 40 ซม. เป็นตู้ชั้นนอกมีทางให้น้ำเข้าอยู่ด้านล่างและออกทางด้านบนของด้านตรงข้ามของตู้กระจก โดยต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำที่ได้ตั้งค่าอุณหภูมิไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส เพื่อให้น้ำกลั่นที่ไหลเวียนจากเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯเข้า-ออกในตู้กระจกชั้นนอก คงค่าที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส

2.ใช้ตู้กระจกขนาด 24 ซม.x 25.5 ซม.x 35 ซม. เป็นตู้กระจกชั้นในมาวางลงในตู้กระจกชั้นนอกแล้วใส่น้ำกลั่นลงไป โดยให้ระดับน้ำในตู้กระจกชั้นนอกสูงกว่าระดับน้ำในตู้กระจกชั้นใน เพื่อให้น้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นนอกสามารถปรับและควบคุมอุณหภูมิน้ำกลั่นตอนบนในตู้ชั้นในได้อย่างเพียงพอ

3.กำหนดบริเวณที่จะตรวจสอบอุณหภูมิจากหมายเลข 1-9(โดยหมายเลข 5 จะเป็นอุณหภูมิของน้ำบริเวณของตู้กรนะจกชั้นใน ซึ่งแบ่งออกเป็นตอนบน ตอนล่าง ด้านซ้ายและด้านขวา)ลักษณะดังแสดงใน **ภาพที่ 8** ของ**ภาคผนวก ง.**

โดยได้ทำการศึกษาทดลอง 2 แบบ ดังนี้

4.1.4-1)โดยใช้หลักการสมดุลย์ของความร้อน

ให้น้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯจะเป็นระบบส่วนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นและน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในและชั้นนอกเป็นระบบที่อุณหภูมิลดลง จากสมการที่ **ข.3**ใน **ภาคผนวก ข.** จะเขียนสมการคำนวณหาค่าอุณหภูมิที่จะต้องใช้ตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯได้ ดังนี้

$$m_{wb}c_w(T_f - T_L) = m_{w1}c_w(T_H - T_f)+m_{g1}c_g(T_H - T_f)+m_{w2}c_w(T_H - T_f) + m_{g2}c_g(T_H - T_f)$$

$$m_{wb}c_w(T_f - T_L) = (m_{w1}c_w + m_{w2}c_w + m_{g1}c_g + m_gc_g)(T_H - T_f)$$

จะได้ $$T_L = \frac{(m_{wb}c_wT_f) - [(m_{w1} + m_{w2})c_w + (m_{g1} + m_{g2})c_g](T_H - T_f)}{m_{wb}c_w} \quad ...(5)$$

เมื่อ m_{w1} คือมวลของน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นใน = 13.8 กก.

m_{w2} คือมวลของน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นนอก = 40.2 กก.

m_{wb} คือมวลของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ = 37.5 กก.

m_{g1} คือมวลของตู้กระจกที่ใส่น้ำกลั่นชั้นใน = 3.4 กก.

m_{g2} คือมวลของตู้กระจกที่ใส่น้ำกลั่นชั้นนอก = 9.7 กก.

c_w คือค่าความร้อนจำเพาะของน้ำกลั่นซึ่งมีค่า 1 คาลอรี่/กรัม-องศาเซลเซียส

c_g คือค่าความร้อนจำเพาะของกระจกซึ่งมีค่า 0.1988 คาลอรี่/กรัม-องศาเซลเซียส

T_H คืออุณหภูมิเดิมของน้ำกลั่นในตู้กระจก

T_L คืออุณหภูมิของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่จะต้องคำนวณหาค่าเพื่อใช้ตั้งเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ

T_f คืออุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกที่ต้องการในการทดลอง ซึ่งในการศึกษาทดลองนี้กำหนดให้มีค่าเท่ากับ 20 องศาเซลเซียส

เปิดให้น้ำกลั่นที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ T_L จากเครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำที่ต่อตรงอยู่กับตู้กระจกชั้นนอก น้ำกลั่นที่ไหลเวียนเข้า-ออกจะทำให้อุหภูมิของน้ำในตู้กระจกชั้นนอกลดลงและไปทำให้น้ำที่อยู่นิ่งในตู้กระจกชั้นในมีอุณหภูมิลดลงตามไปด้วยในลักษณะแบบbahting ทำการบันทึกค่าการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (โดยหมายเลข 5 จะเป็นอุณหภูมิของน้ำบริเวณตู้กระจกชั้นใน)ตามลำดับทุก 5 นาทีด้วยเทอร์โมมิเตอร์แบบ liquid in glass และได้ทำการปรับปรุงแก้ไขตามข้อสังเกตุในตอนท้ายของการศึกษาทดลองลักษณะที่ 4.หัวข้อที่ 4.1.1 เพื่อป้องกันมิให้น้ำกลั่นที่บริเวณต่างๆของตู้กระจกชั้นนอกมีค่าแตกต่างกันในเวลาเดียวกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีตู้กระจกชั้นในวางอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้เพิ่มเวลาที่ใช้ในการปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในได้อย่างสม่ำเสมอ ด้วยการใช้แท่งแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ซม. ทำเป็นรูปข่อมมีรูเล็กๆอยู่ห่างกัน 3 ซม.เป็นระยะสม่ำเสมอทางด้านบนดังแสดงไว้ด้านขวามือในภาพที่ 6 ของภาคผนวก ง. แล้วนำไปต่อเข้ากับทางให้น้ำกลั่นเข้าเพื่อให้

น้ำกลั่นที่ไหลเข้าสู่ในตู้กระจกชั้นนอกวิ่งไหลขึ้นทางด้านบนอย่างช้าๆและสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลทำให้น้ำกลั่นมีอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงเท่ากันทั่วทั้งตู้กระจกชั้นนอก ดังแสดงใน**ภาพที่ 9 ของภาคผนวก ง.**

จากผลการทดลองปรากฏว่าหลังจากปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯให้หยุดทำความเย็นแล้วปล่อยให้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิ T_L ในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯไหลเวียนเข้า-ออกตู้ในกระจกชั้นนอก ปรากฏว่าต้องใช้เวลาไม่น้อยกว่า 2.5 ชม.เพื่อจะทำให้น้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในมีอุณหภูมิลดลงเป็น 20 องศาเซลเซียส จากอุณหภูมิเดิมที่สูงกว่าไม่มากนัก(22.5 องศาเซลเซียส) และจะต้องใช้เวลามาก 3 ชม. ถ้าอุณหภูมิเดิมสูงกว่า 20.0 องศาเซลเซียสมาก(25.4 องศาเซลเซียส) และยังต้องใช้เวลานานมากๆในการปรับอุณหภูมิน้ำในเครื่องควบคุมฯเพื่อให้ได้ค่า T_L ตามที่ได้คำนวณค่าไว้และถึงแม้ว่าจะใช้ตู้กระจกชั้นในที่มีขนาดเล็กลงก็จะใช้เวลาใกล้เคียงกัน เนื่องจากปริมาตรน้ำของตู้กระจกชั้นนอกต้องใช้เพิ่มขึ้นเท่ากันหรือใกล้เคียงกับปริมาตรน้ำกลั่นที่ลดลงในตู้กระจกชั้นใน

ข้อมูลผลการศึกษาทดลองดังแสดงค่าใน**ตารางที่ 11-1**และ**11-2**ของภาคผนวก ค.

4.1.4-2)โดยไม่ใช้หลักการสมดุลย์ของความร้อน

ให้อุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นนอก (มีระดับน้ำเสมอกับทางไหลออก)มีค่าสูงกว่า20 องศาเซลเซียสไม่มากนักแล้วเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯให้ทำงานโดยไม่หยุดการปรับอุณหภูมิและให้คงค่าอุณหภูมิไว้ที่ 20 องศาเซลเซียส ให้น้ำกลั่นไหลเวียนเข้า-ออกในตู้กระจกชั้นนอกตลอดเวลา และวัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่บริเวณต่างๆทั้งในตู้กระจกชั้นนอกและตู้กระจกชั้นใน จนกระทั่งน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในมีอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสเท่ากันหมด รายละเอียดของข้อมูลผลการศึกษาทดลองแสดงใน**ตารางที่ 12 ของภาคผนวก ค.**

จากข้อมูลผลการทดลองปรากฏว่าจะใช้เวลานานเพียง 1.40 ชม.เพื่อจะทำให้น้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในมวล 13.5 กก.ลดอุณหภูมิจากเดิม 21.8 องศาเซลเซียสเป็น 20 องศาเซลเซียสซึ่งใช้เวลารวมน้อยกว่าการใช้หลักการสมดุลย์

ความร้อน จะเห็นว่าการเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯให้ทำการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นอยู่ตลอดเวลาให้คงค่าไว้ที่ 20 องศาเซลเซียสแล้วปล่อยให้ไหลเวียนเข้า-ออกตู้ **4.1.4-1)** โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออุณหภูมิเติมของน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นนอกมีค่าใกล้เคียง 20 องศาเซลเซียส

4.2 การควบคุมอุณหภูมิของน้ำกลั่นให้คงที่

เมื่อได้ทำการปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจก ให้มีค่าอุณหภูมิตามที่ต้องการแล้วจะต้องรักษาอุณหภูมินั้นให้คงที่นานเพียงพอสำหรับปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบ

จากการพิจารณารายละเอียดข้อมูลของแบบการศึกษาทดลองต่างๆที่ได้ดำเนินการไปแล้วใน **4.1** นั้น พบว่าการควบคุมของอุณหภูมิน้ำกลั่นให้คงที่ภายหลังจากการปรับอุณหภูมิแล้วนั้นสามารถทำได้ดังนี้

4.2.1 เมื่อสามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศในห้องทดลองได้

โดยการใช้เครื่องปรับอากาศที่มีอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ปรับอุณหภูมิภายในห้องปฏิบัติการทดลองให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำกลั่นในตู้กระจกที่ใช้ทำการทดลองมากที่สุด วิธีการนี้เหมาะสำหรับในกรณีที่ไม่ต้องการความละเอียดมากนัก เนื่องจากอุณหภูมิของน้ำกลั่นจะแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิของอากาศ และสิ่งแวดล้อมข้าง อีกทั้งยังขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศอีกด้วย

4.2.2 เมื่อไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของอากาศในห้องทดลองได้

จากการศึกษาทดลองโดยการใช้ตู้กระจกสองใบซ้อนกัน แล้วปล่อยน้ำกลั่นที่ได้ปรับให้มีอุณหภูมิคงค่าเท่ากับอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการใช้ในการปฏิบัติงาน จากเครื่องปรับและควบคุมอุณหภูมิให้ไหลเวียนเข้า-ออกในตู้กระจกชั้นนอกผ่านหลอดแก้วรูปซ่อมจนน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิสุดท้าย ดังที่กล่าวมาแล้วในข้อ **4.1.3-2** พบว่าเพื่อให้สามารถคงค่าอุณหภูมิสุดท้ายนี้ไว้ได้เป็นเวลานานตามความต้องการในการปฏิบัติงาน จะต้องยังคงปล่อยให้น้ำกลั่นไหลเวียนเข้า-ออกต่อไปอยู่ตลอดเวลาจนกระทั่งเลิกการปฏิบัติการหาค่าปริมาตรของของแข็ง โดยการชั่งในน้ำกลั่นที่นิ่งในตู้กระจกชั้นใน ด้วยเทคนิควิธีนี้จะสามารถคงค่าอุณหภูมิได้ดีและนานมากที่สุดเท่าที่ต้องการได้ดังแสดงใน**ภาพที่ 10** ของ**ภาคผนวก ง.**

บทที่ 5

บทวิจารณ์

จากการพิจารณาขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาวิจัย เครื่องมือ-อุปกรณ์ที่ใช้ และรายละเอียดของข้อมูลที่ได้จากศึกษาทดลองข้างต้นพบว่า

1. จะต้องสร้างอุปกรณ์ป้องกันการกระเพื่อมของอากาศบริเวณใกล้เครื่องชั่งซึ่งเป็นผลให้ตัวเลขแสดงค่าน้ำหนักหลักสุดท้ายของเครื่องชั่งละเอียดไม่สามารถหยุดนิ่งได้ง่าย
2. จากข้อมูลของเวลาที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯใช้ในการปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นเพื่อใช้ในการผสมกับน้ำกลั่นในตู้กระจก หรือเพื่อใช้ไหลเวียนในท่อทองแดงและตู้กระจกชั้นนอกในกรณีที่ใช้ตู้กระจกสองชั้นนั้น พบว่าเวลาที่ใช้จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ ดังนั้นถ้าใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าที่ใช้ในการทดลองแล้วก็จะลดเวลาในการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่น
3. เพื่อให้การปรับอุณหภูมิเร็วขึ้นจะต้องใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯจำนวน 2 เครื่อง เครื่องหนึ่งใช้ปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นสำหรับใช้ผสมกับน้ำกลั่นในตู้กระจกให้ได้อุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการเพื่อใช้ชั่งมวลตัวอย่างของแข็ง ส่วนอีกเครื่องหนึ่งใช้สำหรับไหลเวียนน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นนอก เพื่อทำให้น้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในคงค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการตลอดเวลาของปฏิบัติการวิเคราะห์ทดสอบ
4. การวัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่บริเวณต่างๆในตู้กระจกด้วยการอ่านค่าอุณหภูมิน้ำกลั่นจากเทอร์โมมิเตอร์แบบ Liquid in glass นั้นในความเป็นจริงแล้วผู้ทดลองไม่สามารถอ่านค่าได้พร้อมกันทุกจุดในเวลาเดียวกัน ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการจัดหาเครื่องบันทึกแบบไฮบริด(hybrid recorder)ซึ่งสามารถใช้บันทึกค่าอุณหภูมิได้พร้อมกันหลายจุดในเวลาเดียวกันจากเทอร์โมคัปเปิลหลายๆเส้น(โดยที่ปลายอีกด้านหนึ่งของแต่ละเส้นอยู่ที่บริเวณต่างๆของน้ำกลั่นในตู้กระจก ปลายด้านนี้จะใส่อยู่ในหลอดแก้วเล็กที่บรรจุปรอทเล็กและปิดแน่น)มาใช้แทน

บทที่ 6

บทสรุป

จากรายละเอียดข้อมูลผลการศึกษาทดลองของการพัฒนาเทคนิคและเครื่องมือ-อุปกรณ์ที่ใช้ในการหาค่าปริมาตรของตัวอย่างของแข็งที่ต้องการจะหาค่าความหนาแน่นด้วยวิธีแทนที่ของเหลวโดยวิธีชั่งมวลตัวอย่างของแข็งในของเหลวที่นิ่ง สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ในการหาค่าปริมาตรด้วยวิธีชั่งในของเหลวที่อยู่นิ่ง(Hydrostatic weighing method)ของของแข็งที่มีขนาดใหญ่หรือมีน้ำหนักมาก แต่ไม่สามารถแบ่งหรือทำให้มีขนาดเล็กลงได้เพื่อหาค่าความหนาแน่นนั้น ทำได้โดยการปรับปรุงภาชนะใส่น้ำกลั่นเป็นตู้กระจกที่มีขนาดใหญ่เพียงพอกับขนาดของของแข็งและใช้เครื่องชั่งที่สามารถแขวนตัวอย่างทางด้านล่าง สามารถชั่งมวลได้มาก และมีความละเอียดสูง ส่วนการปรับระดับน้ำกลั่นในตู้กระจกให้คงอยู่ที่ระดับเดิมนั้นใช้หลักการแทนที่ของเหลวโดยใช้แท่งแก้วขนาดต่างๆที่ผูกด้วยเชือกเอ็นติดรอก ใส่ลงน้ำกลั่นแล้วดึงสูงขึ้นหรือปล่อยต่ำลง
2. การปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่จะใช้เป็นของเหลวที่นิ่ง สำหรับชั่งมวลของของแข็ง วิธีที่เหมาะสมที่สุดคือการผสมน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันโดยตรงตามหลักการสมดุลย์ทางความร้อนโดยให้มวลน้ำกลั่นในตู้ฯ(M_{WH})มีปริมาณน้อย แต่มีอุณหภูมิ(T_H)ใกล้ค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการมากที่สุด และใช้มวลน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(M_{WL})ให้มีปริมาณมากที่สุดเท่าที่จะใส่ได้ แล้วจะทำให้อุณหภูมิที่จะต้องปรับตั้งให้แก่น้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(T_L) มีค่าใกล้อุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการมากที่สุด ซึ่งจะทำให้ใช้เวลาน้อยที่สุดในการปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกให้มีค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ
3. การรักษาอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการใช้งานให้คงค่าอยู่ได้นานตามความต้องการนั้น วิธีที่ดีที่สุดคือการใช้ตู้กระจกสองชั้น ด้วยการให้น้ำกลั่นที่ไหลเวียนเข้า-ออกในตู้กระจกชั้นนอกถูกทำให้มีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิสุดท้ายของน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในที่ใช้ในการชั่งมวลของตัวอย่างของแข็ง โดยให้น้ำกลั่นไหลผ่านแท่งแก้วรูปซ่อมที่

เจาะรูเล็กๆอยู่เป็นระยะสม่ำเสมอ เนื่องจากวิธีอื่นนั้นถ้าหากไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการทดสอบให้มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการแล้ว อุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นในจะเปลี่ยนแปลงค่อนข้างเร็ว0

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการศึกษาวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความสนับสนุนจากหลายฝ่าย ข้าพเจ้าใคร่ขอขอบคุณ กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ได้ให้การสนับสนุนการศึกษาวิจัยนี้ในด้านสถานที่ เครื่องมือ-อุปกรณ์ และวัสดุต่างๆ ทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จตามเป้าหมายอย่างดียิ่ง

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณโสภณ จันทร์เผือก งานเครื่องแก้ว ฝ่ายเครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่งานช่าง กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิยาศาสตร์บริการ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการประดิษฐ์ชิ้นส่วนของอุปกรณ์บางส่วนที่ใช้ในการศึกษาทดลอง ทำให้การศึกษาวิจัยสำเร็จตามความประสงค์

สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอขอบคุณ ลูกจ้างฝ่ายฟิสิกส์ กองฟิสิกส์และวิศวกรรม กรมวิทยาศาสตร์บริการ ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการประกอบอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการศึกษาทดลองของงานศึกษาวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

1. ASTM(Vol.3)E12:"Standard Definition of Term Relating to DENSITY AND SPECIFIC GRAVITY OF SOLIDS,LIQUIDS AND GASES."
2. Patterson,J.B. "Density Measurement of Solids and Liquids." CSIRO Division of Applied Physics,Sydney,Australia.
3. Resnick,R. and Halliday,D."Quantity of Heat and Specific Heat" Physic Part1,SEC.22-2,pp.547-548,Nww York: Willy Toppan.(1960)

ภาคผนวก ก.

เครื่องมือ-อุปกรณ์และขั้นตอนการหาค่าความหนาแน่นของของแข็ง ด้วยวิธีชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่งของเทคนิคเดิม

1. <u>เทคนิคแบบที่ 1</u>

เครื่องมือ-อุปกรณ์

1) เครื่องชั่งไฟฟ้าชนิดจานเดียวแบบตู้กระจกที่สามารถชั่งค่าสูงสุดประมาณ<u>200 กรัม</u> มีความละเอียด 0.1 มิลลิกรัม (และ/หรือ 0.01 มิลลิกรัม)

2) บีกเกอร์ขนาด 250-500 ลูกบาศก์เซนติเมตรสำหรับใส่ของเหลว(น้ำกลั่น)

3) ที่วางบีกเกอร์

4) ตะแกรงลวดแสตนเลสสำหรับใส่วางตัวอย่างของแข็งเพื่อชั่งในของเหลวที่นิ่งโดยตะแกรงนี้จะถูกยึดติด หรือแขวนด้วยลวดเล็กๆที่ไปแขวนหรือยึดกับส่วนที่ต่ออยู่กับจานของเครื่องชั่ง

5) ของเหลวที่ทราบค่าความหนาแน่น(น้ำกลั่น)

ขั้นตอนในการดำเนินการวิเคราะห์ทดสอบ

1) เตรียมตัวอย่างของแข็งที่จะวิเคราะห์ทดสอบค่าความหนาแน่นให้มีขนาดพอเหมาะกับตะแกรงและมีน้ำหนักไม่เกินความจุของเครื่องชั่ง ถ้าตัวอย่างจำเป็นต้องไล่ความชื้นก็ให้นำไปอบไล่ความชื้นด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เสียก่อน แล้วจึงนำตัวอย่างของแข็งไปเก็บไว้ในเดสิเคเตอร์ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการพร้อมกับของเหลว(น้ำกลั่น)ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบเพื่อให้ตัวอย่างที่จะทดสอบและของเหลว(น้ำกลั่น)ที่ใช้ในการทดสอบมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการ

2) เปิดเครื่องชั่งแล้วตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องชั่ง

3) ชั่งน้ำหนักในอากาศของมวลตัวอย่างของแข็งเป็น m

4) นำที่วางบีกเกอร์วางคร่อมจานเครื่องชั่งแล้ววางบีกเกอร์ขนาด 250 ลบ.ซม. ที่ใส่ของเหลว(น้ำกลั่น)ประมาณ 200 ลบ.ซม.

5) แขวนตะแกรงลงในน้ำกลั่น แล้วปรับระดับน้ำกลั่นให้ตรงกับรอยยึดบนลวดที่แขวนตะแกรง ชั่งน้ำหนักของลวดกับแกรงแล้วบันทึกค่าเป็น m' (หรือtareให้เป็นศูนย์)

6)ใส่ตัวอย่างของแข็งลงในตะแกรงแล้วปรับระดับของของเหลวให้ตรงกับขีดเครื่องหมายบนลวด แล้วชั่งน้ำหนักในของเหลวที่นิ่งของมวลตัวอย่างของแข็งนั้น อ่านค่าและบันทึกไว้เป็น m"

7)นำค่าผลต่างของน้ำหนักของมวลตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ(m) กับน้ำหนักของมวลตัวอย่างที่ชั่งในของเหลวที่นิ่ง(m"-m') ซึ่งจะเท่ากับน้ำหนักมวลของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับตัวอย่าง ไปหารด้วยค่าความหนาแน่นของของเหลวที่อุณหภูมิห้องขณะทดสอบ(D_w)ก็จะเป็นค่าปริมาตรของตัวอย่างของแข็ง(V)ตามคำจำกัดความในหัวข้อ 1.1 ซึ่งเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{m-(m"-m')}{D_w} = \frac{m_w}{D_w}$$

$$= V_w$$

$$= V$$

8)นำ m และ V ไปแทนค่าลงในสมการที่(1) แล้วคำนวณหาค่าความหนาแน่น(D)ของตัวอย่างของแข็ง

ลักษณะการจัดเครื่องมือและการชั่งตัวอย่างด้วยเทคนิคแบบนี้ ดังแสดงในภาพที่ (2-1)ของภาคผนวก ง.

2. <u>เทคนิคแบบที่ 2</u>

เครื่องมือ-อุปกรณ์

1)เครื่องชั่งไฟฟ้าชนิดจานเดียวแบบ Top load สามารถชั่งค่าสูงสุดประมาณ 4,000 กรัม มีความละเอียด 0.1 กรัม

2)บีกเกอร์ขนาด 500 - 2,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรสำหรับใส่ของเหลว(น้ำกลั่น)

3)ฐาน(stand)ที่สามารถปรับความสูงของแขนที่ใช้สำหรับแขวน หรือยึดลวดที่ติดอยู่กับตะแกรงใส่ตัวอย่างของแข็ง

4)ตะแกรงสำหรับใส่หรือวางตัวอย่างของแข็งเพื่อชั่งในของเหลวที่นิ่ง ซึ่งตะแกรงจะถูกยึดติดหรือแขวนด้วยลวดเล็กๆที่แข็งที่ยึดอยู่กับแขนของฐาน

5)ของเหลวที่ทราบค่าความหนาแน่น(น้ำกลั่น)

ขั้นตอนในการดำเนินการวิเคราะห์ทดสอบ

1) เตรียมตัวอย่างของแข็งที่จะวิเคราะห์ทดสอบค่าความหนาแน่นให้มีขนาดพอเหมาะกับขนาดของตะแกรงและมีน้ำหนักไม่เกินความจุของเครื่องชั่ง เมื่อชั่งรวมกับของเหลวและปิกเกอร์ที่ใช้บรรจุของเหลว ถ้าตัวอย่างจำเป็นต้องไล่ความชื้นก็ให้นำไปอบไล่ความชื้นเสียก่อนด้วยตู้อบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วจึงนำตัวอย่างของแข็งไปเก็บในเดสิเคเตอร์ที่อยู่ในห้องปฏิบัติการเช่นเดียวกับของเหลว(น้ำกลั่น) ที่จะใช้ในการวิเคราะห์ทดสอบ เพื่อให้ตัวอย่างที่จะทดสอบกับของเหลว(น้ำกลั่น)ที่ใช้ในการทดสอบมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิของห้องปฏิบัติการ

2) เปิดเครื่องชั่งแล้วตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องชั่ง

3) ชั่งค่ามวลของตัวอย่างของแข็งในอากาศเป็น m

4) นำปิกเกอร์ที่บรรจุของเหลว(น้ำกลั่น)ประมาณ 1,700 ลบ.ซม. วางบนลงบนจานของเครื่องชั่ง

5) นำปลายของลวดหรือสายเอ็นที่แขวนตะแกรงใส่ตัวอย่างหรือที่ผูกตัวอย่างไปแขวนกับห่วงที่ปลายแขนของฐาน(stand)แล้วปรับเลื่อนตะแกรงลงมาในของน้ำกลั่น โดยให้ระดับของเหลวอยู่ที่ขีดเครื่องหมายบนลวดพอดี อ่านและบันทึกค่าของ(มวลปิกเกอร์และของเหลวที่บรรจุอยู่ในปิกเกอร์)+(มวลตะแกรงที่แขวนในของเหลวที่นิ่ง)เป็น **m'**

6) เลื่อนตะแกรงขึ้นจากของเหลวแล้วใส่ตัวอย่างของแข็งลงในตะแกรง (หรือผูกยึดกับลวด)แล้วเลื่อนตะแกรงที่ใส่ตัวอย่างแล้วงในของเหลวโดยให้ระดับของของเหลวยังคงอยู่ตรงกับขีดเครื่องหมายบนลวด อ่านและบันทึกค่าของ(มวลปิกเกอร์และมวลของเหลวที่บรรจุอยู่ในปิกเกอร์)+(มวลตะแกรงและตัวอย่างของแข็งที่แขวนในของเหลวที่นิ่ง)เป็น **m"**

7) นำค่าผลต่างของน้ำหนักของมวลตัวอย่างที่ชั่งในอากาศ(m)กับน้ำหนักของมวลตัวอย่างที่ชั่งในของเหลวที่นิ่ง(m"-m')ซึ่งจะเท่ากับน้ำหนักมวลของของเหลวที่มีปริมาตรเท่ากับตัวอย่าง(V_w)หารด้วยค่าความหนาแน่นของของเหลวที่อุณหภูมิห้องขณะทดสอบ(D_w) ก็จะเป็นปริมาตร(V)ของตัวอย่างของแข็งตามคำจัดความในหัวข้อ 1.1 ซึ่งเขียนเป็นรูปสมการได้ดังนี้

$$\frac{m-(m''-m')}{D_w} = \frac{m_w}{D_w}$$

$$= V_w$$

$$= V$$

8)นำ m และ V ไปแทนค่าลงในสมการที่(1)จะคำนวณหาค่าความหนาแน่น(D)ของตัวอย่างของแข็งที่ทดสอบได้

ลักษณะการจัดเครื่องมือและการชั่งตัวอย่างด้วยเทคนิคแบบนี้ ดังแสดงในภาพที่ (2-2)ของภาคผนวก ง.

ภาคผนวก ข.

ทฤษฎีความร้อน

1. ปริมาณพลังงานความร้อน

จากทฤษฎีความร้อนที่ว่าปริมาณพลังงานความร้อน Q ที่ต้องให้แก่เทหวัตถุมวล m ที่มีค่าความร้อนจำเพาะ c ให้เพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิเดิมที่ T_i เป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ T_f นั้น คำนวณหาได้จากสมการ

$$Q = m\int_{T}^{T} c.dT$$

$$Q = mc\Delta T \qquad \text{.....(ข.1)}$$

เมื่อ ΔT คือผลต่างระหว่างอุณหภูมิเดิมกับอุณหภูมิสุดท้าย

2. สมดุลย์ความร้อน(Thermal equilibrium)

สมดุลย์ความร้อน(Thermal equilibrium)ที่เกิดจากการถ่ายเทความร้อนของเทหวัตถุสองระบบซึ่งเดิมมีอุณภูมิต่างกันถูกนำมาอยู่รวมกัน ระบบทั้งสองจะถ่ายเทความร้อนให้แก่กันและกันจนกระทั่งมีอุณหภูมิเท่ากัน นั่นคือปริมาณความร้อนที่เพิ่มขึ้นของระบบที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะเท่ากับปริมาณความร้อนที่ลดลงของระบบที่มีอุณหภูมิสูงกว่า ดังสมการ

Q ของระบบส่วนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น = Q ของระบบส่วนที่อุณหภูมิลดลง .....(ข.2)

$mc\Delta T$ ของระบบส่วนที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น = $mc\Delta T$ ของระบบส่วนที่อุณหภูมิลดลง .....(ข.3)

ภาคผนวก ค.

1.ตารางแสดงข้อมูลผลการทดลองหาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างของแข็ง

ตารางที่ 1 ค่าความหนาแน่นของตัวอย่างของแข็งที่หาค่าโดยเทคนิคเดิมกับเทคนิคใหม่

ตัวอย่างของแข็ง	ความหนาแน่น(กรัม/ลบ.ซม.)		
	เทคนิคแบบที่1	เทคนิคแบบที่2	เทคนิคใหม่
อะลูมิเนียมรูปพรรณ	2.8072	2.799	2.787
หยก	3.2144	3.216	3.215
กระจก	1.6405	1.643	1.641

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่าความหนาแน่นที่หาได้จากเทคเดิมและเทคนิคใหม่ของอะลูมิเนียมรูปพรรณแตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งเกิดขึ้นได้ เนื่องจากอากาศในรูพรุนของผิวชุบส่วนของหยกค่าแตกต่างกันประมาณ 0.001 กรัม/ลบ.ซม.เท่านั้น และของกระจกค่าแตกต่างกันประมาณ 0.002 กรัม/ลบ.ซม.เมื่อคิดถึงความคลาดเคลื่อนของเครื่องชั่งและจากผู้ทดลองแล้วกล่าวได้ว่า เทคนิคใหม่ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถใช้ทดสอบหาค่าความหนาแน่นของของแข็งที่มีขนาดใหญ่ๆได้ตามที่ต้องการโดยยังมีความถูกต้องเหมือนกับเทคนิคเดิม

2.ตารางแสดงข้อมูลการทดลองของการปรับและควบคุมอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจก

-ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นโดยตรง

เมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.

ตารางที่ 2-1 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกมีค่า 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องขณะทดลองมีค่า27.6 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.1	20.1	20.15	20.1	20.1
10	20.2	20.2	20.25	20.2	20.2
15	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3
20	20.4	20.45	20.5	20.45	20.45
25	20.5	20.5	20.65	20.55	20.55
30	20.6	20.65	20.7	20.65	20.65

จากตารางที่ 2-1 จะเห็นว่าเมื่อนำน้ำกลั่นที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียส ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง 27.6 องศาเซลเซียสนั้น อุณหภูมิของน้ำกลั่นจะคงค่าที่ 20.0 องศาเซลเซียสอยู่ได้เพียงประมาณ 5 นาทีเท่านั้น และมีอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิเฉลี่ยประมาณ 0.1 องศาเซลเซียสทุก 5 นาที ซึ่งการคงค่าอุณหภูมิยังนานไม่เพียงพอในการใช้ปฏิบัติงาน

ตารางที่ 2-2 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 25.0 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05
10	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
15	20.2	20.15	20.15	20.15	20.15
20	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
25	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3
30	20.4	20.4	20.4	20.4	20.4

จากตารางที่ 2-2 จะเห็นว่าเมื่อนำน้ำกลั่นที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิสูง 25.0 องศาเซลเซียสนั้น อุณหภูมิของน้ำกลั่นจะคงค่าที่ 20.0 องศาเซลเซียส อยู่ได้ประมาณ 5-10 นาทีเท่านั้น แล้วอุณหภูมิก็เพิ่มสูงขึ้นโดยมีอัตราการเพิ่มอุณหภูมิเฉลี่ย 0.1 องศาเซลเซียสทุก 5 นาที ซึ่งการคงค่าอุณหภูมิยังนานไม่เพียงพอในการใช้ปฏิบัติงาน

ตารางที่ 2-3 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 22.1 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
15	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
25	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
30	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

จากตารางที่ 2-3 จะเห็นว่าเมื่อนำน้ำกลั่นที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 22.1 องศาเซลเซียสซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำกลั่นแล้ว น้ำกลั่นจะสามารถคงค่าที่ 20.0 องศาเซลเซียสอยู่ได้นานมากกว่า 30 นาที ซึ่งนานมากขึ้นแต่ก็ยังไม่นานเพียงพอในการปฏิบัติงาน

เมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x35 ซม.

ตารางที่ 3-1 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 26.9 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.0	20.05	20.1	20.05	20.05
10	20.1	20.1	20.15	20.1	20.1
15	20.2	20.15	20.2	20.15	20.15
20	20.2	20.2	20.3	20.2	20.2
25	20.25	20.3	20.35	20.35	20.3
30	20.4	20.4	20.45	20.45	20.45

จากตารางที่ 3-1 จะเห็นว่าเมื่อนำน้ำกลั่นที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสแต่มีปริมาณมากขึ้นกว่าเดิมมาไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 26.9องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่น 6.9 องศาเซลเซียสแล้ว น้ำกลั่นจะสามารถคงค่าที่ 20.0 องศาเซลเซียสอยู่ได้นานประมาณ 5 นาทีเฉพาะที่ตอนล่างเท่านั้น ส่วนบริเวณอื่นๆอุณหภูมิจะเพิ่มขึ้นด้วยอัตราประมาณ 0.1 องศาเซลเซียส/ทุก 5 นาที ซึ่งการคงค่าอุณหภูมิยังนานไม่เพียงพอในการใช้ปฏิบัติงาน

ตารางที่ 3-2 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 24.8 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.0	20.0	20.05	20.0	20.0
10	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05
15	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
20	20.15	20.15	20.15	20.15	20.15
25	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
30	20.3	20.3	20.3	20.3	20.3

จากตารางที่ 3-2 จะเห็นว่าเมื่อนำน้ำกลั่นที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสแต่มีปริมาณมากขึ้นกว่าเดิมมาไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 24.8องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่น 4.8 องศาเซลเซียสแล้ว น้ำกลั่นจะสามารถคงค่าที่ 20.0 องศาเซลเซียสอยู่ได้นานประมาณ 5 นาทีนอกจากที่ตอนบนเท่านั้น จากนั้นน้ำก็จะมีอุณหภูมิสูงขึ้นด้วยอัตราประมาณ 0.05 องศาเซลเซียส/ทุก 5 นาที ในช่วงเวลาที่ 10 - 20 นาทีหลังจากนั้นก็เป็น 0.1 องศาเซลเซียส/ทุก 5 นาที ซึ่งการคงค่าอุณหภูมิยังนานไม่เพียงพอในการใช้ปฏิบัติงาน

ตารางที่ 3-3 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 22.1 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
15	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
25	20.0	20.0	20.05	20.0	20.0
30	20.0	20.0	20.05	20.05	20.05

จากตารางที่ 3-3 จะเห็นว่าเมื่อนำน้ำกลั่นที่ถูกทำให้มีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสแต่มีปริมาณมากขึ้นกว่าเดิมมาไว้ในสภาพแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ 22.1องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของน้ำกลั่นแล้ว น้ำกลั่นจะสามารถคงค่าที่ 20.0 องศาเซลเซียสอยู่ได้นานประมาณ 25-30 นาทีแต่ก็ยังไม่นานเพียงพอในการปฏิบัติงาน

เมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม.

ตารางที่ 4-1 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 27.3 องศาเซลเซียส และตั้งค่าอุณหภูมิน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯให้คงที่ ที่ 20.0 องศาเซลเซียสอุณหภูมิห้องขณะทดลอง 26.7 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3	27.3
5	21.9	21.9	21.8	21.9	21.9	21.6	21.7	21.6	21.6
10	21.6	21.6	21.6	21.7	21.4	21.3	21.3	21.2	21.2
15	21.3	21.3	21.3	21.3	21.1	20.9	20.9	20.7	20.7
20	21.0	21.0	21.0	21.1	20.9	20.6	20.6	20.5	20.5
25	20.8	20.8	22.7	22.8	20.6	20.5	20.5	20.3	20.3
30	20.7	20.7	22.6	22.6	20.6	20.4	22.4	20.3	20.3
35	23.7	23.7	23.5	23.7	23.5	23.5	23.4	23.3	23.3
40	23.2	23.2	23.2	23.3	23.2	23.0	23.0	23.0	23.0
45	22.9	22.9	22.9	23.0	22.8	22.6	22.6	22.6	22.6
50	22.5	22.5	22.5	22.6	22.5	22.2	22.2	22.2	22.2
55	22.1	22.1	22.1	22.1	22.0	21.8	21.8	21.8	21.8
60	21.6	21.6	21.6	21.6	21.8	21.3	21.4	21.3	21.3
65	21.3	21.3	21.3	21.3	21.5	21.0	21.0	21.0	21.0
70	21.0	21.1	21.0	21.0	21.1	20.8	20.8	20.8	20.8
75	21.1	21.1	21.1	21.1	20.8	20.5	20.5	20.5	20.5
80	20.8	20.8	20.9	20.8	20.5	20.3	20.3	21.3	21.3

ตารางที่ 4-1(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
85	20.5	20.5	20.5	20.5	20.3	20.1	20.1	20.1	20.1
90	20.3	20.3	20.3	20.3	20.1	20.0	20.0	21.0	21.0
95	20.1	20.1	20.1	20.2	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
100*	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
105	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
110	20.05	20.05	20.0	20.0	20.0	20.05	20.05	20.0	20.0
115	20.1	20.1	20.0	20.0	20.05	20.1	20.1	20.0	20.0
120	20.2	20.2	20.0	20.0	20.1	20.2	20.2	20.0	20.0
125	20.3	20.3	20.05	20.05	20.15	20.3	20.3	20.05	20.05
130	20.4	20.4	20.05	20.05	20.2	20.4	20.4	20.05	20.05
135	20.45	20.45	20.1	20.1	20.3	20.45	20.45	20.1	20.1

จากตาราง4-1 จะเห็นว่าเมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม.ใส่น้ำกลั่น 55 ลิตร(มวล 55 กก.)ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ"HETO" ที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 36 ลิตร (มวล 36 กก.)และตั้งอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสโดยปรับให้อัตราการไหลเวียนของน้ำเข้า-ออกสมดุลย์กันจนกระทั่งน้ำกลั่นในตู้กระจกมีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียส ก็ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯแล้วบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกทุกๆ 5 นาที ปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกเป็น 27.3 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้องทดลอง 26.7 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลานานถึง 95 นาที น้ำกลั่นจึงจะเริ่มมีอุณหภูมิเป็น 20.0 องศาเซลเซียสและคงค่าอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสได้นานเพียงประมาณ10 นาทีเท่านั้น (ช่วงนาทีที่ 100-110) จากนั้นอุณหภูมิของน้ำกลั่นก็เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 4-2 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 25.6 องศาเซลเซียสและตั้งค่าอุณหภูมิให้น้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯให้คงที่ ที่ 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 23.8 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6	25.6
5	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.3	25.2	25.3
10	25.0	25.0	25.0	25.0	24.8	24.7	24.7	24.6	24.6
15	24.1	24.2	24.3	24.3	24.1	24.0	23.9	23.8	23.8
20	23.8	23.8	23.9	24.0	23.7	23.6	23.6	23.6	23.6
25	23.3	23.3	23.4	23.4	23.2	23.2	23.1	23.1	23.1
30	22.9	23.0	23.0	23.0	22.9	22.8	22.8	22.7	22.7
35	22.5	22.5	22.5	22.4	22.6	22.45	22.3	22.1	22.2
40	22.1	22.1	22.2	22.1	22.1	22.0	21.9	21.9	21.9
45	21.9	21.9	21.9	22.1	21.9	21.9	21.9	21.8	21.8
50	21.6	21.6	21.8	21.8	21.6	21.6	21.6	21.6	21.6
55	21.4	21.4	21.6	21.6	21.5	21.3	21.3	21.2	21.2
60	21.2	21.2	21.3	21.3	21.3	21.2	21.1	21.1	21.1
65	21.1	21.1	21.2	21.2	21.2	20.9	20.9	20.9	20.9
70	20.9	20.9	21.0	21.0	20.9	20.8	20.8	20.8	20.8
75	20.7	20.7	20.7	20.7	20.8	20.6	20.6	20.6	20.55
80	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.4	20.45	20.4	20.4
85	20.35	20.35	20.35	20.35	20.35	20.35	20.35	20.3	20.3
90	20.15	20.15	20.2	20.2	20.15	20.15	20.15	21.15	21.15

ตารางที่ 4-2(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
95*	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
100	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
105	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
110	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
115	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
120	20.05	20.05	20.0	20.0	20.05	20.05	20.05	20.0	20.0
125	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05	20.05
130	20.1	20.1	20.05	20.05	20.05	20.1	20.1	20.5	20.5

จากตารางที่4-2 จะเห็นว่าเมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม.ใส่น้ำกลั่น55 ลิตร(มวล 55 กก.)ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ"HETO" ที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 36 ลิตร (มวล 36 กก.)และตั้งอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสโดยปรับให้อัตราการไหลเวียนของน้ำเข้า-ออกสมดุลย์กันจนกระทั่งน้ำกลั่นในตู้กระจกมีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียส ก็ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯแล้วบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกทุกๆ 5 นาที ปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกมีค่า 25.6 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิห้องทดลอง 23.8 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลา 95 นาทีและคงค่าอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียส ได้นาน 15 นาที(ช่วงนาทีที่ 95-110)

ตารางที่ 4-3 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 22.0 องศาเซลเซียสและตั้งค่าอุณหภูมิให้น้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิคงค่า ที่ 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องขณะทดลอง 21.8 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0
5	21.9	21.9	21.8	21.9	21.9	21.6	21.7	21.6	21.6
10	21.6	21.6	21.6	21.7	21.4	21.3	23.3	21.2	21.2
15	21.3	21.3	21.3	21.3	21.1	20.9	20.9	20.7	20.7
20	21.0	21.0	21.0	21.1	20.9	20.6	22.6	20.5	20.5
25	20.8	20.8	22.7	22.8	20.6	20.5	22.5	20.3	20.3
30	20.7	20.7	22.6	22.6	20.6	20.4	22.4	20.3	20.3
35	20.7	20.7	22.6	22.6	20.6	20.4	22.4	20.2	20.2
40	20.6	20.6	20.5	20.5	20.3	20.2	20.2	20.1	20.1
45	20.5	20.5	22.4	22.4	20.2	20.2	22.2	20.1	20.1
50	20.3	20.3	20.3	20.3	20.2	20.2	20.1	20.05	20.0
55	20.2	20.2	20.3	20.3	20.1	20.15	20.1	20.0	20.0
60	20.2	20.2	20.3	20.3	20.1	20.1	20.1	20.0	20.0
65	20.1	20.1	20.2	20.2	20.05	20.05	20.05	20.0	20.0
70	20.1	20.05	20.1	20.1	20.0	20.05	20.05	20.0	20.0
75*	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
80	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
85	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
90	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

ตารางที่ 4-3(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
95	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
100	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
105	20.05	20.05	20.0	20.0	20.05	20.0	20.05	20.05	20.0

จากตารางที่4-3 จะเห็นว่าเมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม. ใส่น้ำกลั่นปริมาณ 55 ลิตร(มวล 55 กก.)ต่อเข้ากับเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ"HETO"ที่มีน้ำกลั่นปริมาณ 36 ลิตร(มวล 36 กก.)และตั้งอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียส โดยปรับให้อัตราการไหลเวียนของน้ำเข้า-ออกสมดุลย์กันจนกระทั่งน้ำกลั่นในตู้กระจกมีอุณหภูมิ20.0 องศาเซลเซียสที่ปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯแล้วบันทึกค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกทุกๆ 5 นาที ปรากฏว่าเมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจกมีค่า22.0 องศาเซลเซียสและห้องทดลองมีอุณหภูมิ 21.8 องศาเซลเซียส ต้องใช้เวลา 75 นาทีและคงค่าอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสอยู่ได้นานมากขึ้นถึง 30 นาทีแต่ก็ยังนานไม่เพียงพอในการปฏิบัติงาน

จากผลการศึกษาทดลองปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกที่ใช้ในการหาค่าความหนาแน่นโดยใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นโดยตรงพบว่า วิธีนี้ยังไม่เหมาะสมเนื่องจากต้องใช้เวลาในการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นนานแต่คงค่าอุณหภูมิที่ต้องการใช้งานได้ในช่วงเวลาที่นานไม่เพียงพอต่อการปฏิบัติงานหาค่าความหนาแน่นของของแข็ง

หมายเหตุ เครื่องหมาย * แสดงเวลาที่หยุดการทำอุณหภูมิของเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ แล้วเปิดให้น้ำกลั่นไหลเวียนเข้า-ออกในตู้กระจก

-ใช้น้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันโดยตรง

ตารางที่ 5 แสดงผลการคำนวณค่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(T_L) ของการทดลองด้วยสัดส่วนของมวลและอุณหภูมิของน้ำกลั่นที่ต่างกัน

T_H °c	M_{WH} กก.	M_{WL} กก.	T_L °c
30	3	7	14.8
	5	5	8.8
	7	3	-5.3
25	3	7	17.4
	5	5	14.4
	7	3	7.4
22	3	7	18.9
	5	5	17.8
	7	3	14.9

ตารางที่ 5-1 (ใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.)

T_H °c	M_{WH} กก.	M_{WL} กก.	T_L °c
30	5	11	14.8
	8	8	9.1
	11	5	-3.5
25	5	11	17.4
	8	8	14.5
	11	5	8.3
22	5	11	19.0
	8	8	17.8
	11	5	15.3

ตารางที่ 5-2 (ใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x35 ซม.)

T_H °c	M_{WH} กก.	M_{WL} กก.	T_L °c
30	20	35	13.8
	27.5	27.5	9.3
	35	20	1.6
25	20	35	16.9
	27.5	27.5	14.7
	35	20	10.8
22	20	35	18.8
	27.5	27.5	17.9
	35	20	16.3

ตารางที่ 5-3 (ใช้ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม.)

จาก**ตารางที่** 5-1,5-2และ5-3 จะเห็นว่าผลการคำนวณค่าอุณหภูมิที่ใช้ปรับตั้งให้เครื่องควบคุมอุณหภูมิทำงาน(T_L)แสดงให้เห็นว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดคือให้มวลน้ำกลั่นในตู้ฯ(M_{WH})มีปริมาณน้อย(ใช้มวลน้ำกลั่น 3 กก.สำหรับตู้ขนาด 24x25.5x24 ซม.ใช้มวลน้ำกลั่น 5 กก.สำหรับตู้ขนาด 24x25.5x35 ซม. และมวลน้ำกลั่น 11 กก.สำหรับตู้ขนาด

30x50x40 ซม.)โดยให้น้ำกลั่นในตู้กระจกมีอุณหภูมิ(T_H)ใกล้ค่า 20.0 องศาเซลเซียสมากที่สุดคือ 22 องศาเซลเซียส และใช้มวลน้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(M_{WL})ให้มีปริมาณมากที่สุดเท่าที่จะใส่ได้(ใช้มวลน้ำกลั่น 7 กก.สำหรับตู้ขนาด 24x25.5x24 ซม.ใช้มวลน้ำกลั่น11 กก.สำหรับตู้ขนาด 24x25.5x35 ซม.และใช้มวลน้ำกลั่น 35 กก.สำหรับตู้ขนาด 30x50x40 ซม.) แล้วปรับตั้งอุณหภูมิให้แก่น้ำกลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(T_L)มีค่าใกล้ 20.0 องศาเซลเซียสมากที่สุด(อุณหภูมิ 18.9 องศาเซลเซียสสำหรับตู้ขนาด 24x25.5x24 ซม. อุณหภูมิ 19.0 องศาเซลเซียสสำหรับตู้ขนาด 24x25.5x35 ซม. และอุณหภูมิ 18.8องศาเซลเซียสสำหรับตู้ขนาด30x50x40 ซม.) ซึ่งจะทำให้การปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกให้มีค่า 20.0 องศาเซลเซียสใช้เวลาน้อยที่สุด

ตารางที่ 6 แสดงค่าอุณหภูมิสุดท้ายและเวลาที่คงค่า ที่ได้จากการทดลองเมื่อนำน้ำกลั่นมาผสมกันด้วยสัดส่วนของมวลและอุณหภูมิที่แตกต่างกันตามที่ได้คำนวณไว้

ตู้กระจก $(ซม.)^3$	T_H (^oc)	M_{WH} (กก.)	M_{WL} (กก.)	T_L (^oc)	T_f (^oc)	เวลาที่คงค่า T_f (นาที)
24x25.5x24	30	3	7	14.8	20	$\leq$ 5
	25			17.4	20	5
	22			18.9	20	$\geq$ 30
24x25.5x35	30	5	11	14.8	20	$\leq$ 5
	25			17.4	20	10
	22			19.0	20	$\leq$ 30
30x50x40	30	20	35	13.8	21.1	5
	25			16.9	20.5	15
	22			18.8	20.0	30

จากตารางที่ 6 จะเห็นว่าเมื่อนำผลที่ได้จากการคำนวณในตารางที่ 5-1,5-2 และ5-3 มาดำเนินการทดลองโดยปรับอุณหภูมิห้องและน้ำกลั่น(M_{WH})ที่ใส่ไว้ในตู้กระจกให้มีอุณหภูมิเท่ากันที่ 30 องศาเซลเซียส 25 องศาเซลเซียสและ 22 องศาเซลเซียส แล้วนำน้ำกลั่น(M_{WL})ที่ใช้เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ ปรับทำจนได้อุณหภูมิ(T_L)ที่คำนวณไว้ไปผสมกับน้ำกลั่นในตู้กระจก ตามลำดับของการศึกษาทดลองที่กำหนดไว้วัดอุณหภูมิสุดท้ายจริงของน้ำกลั่นที่ได้ผสมกันในตู้กระจกที่ปริเวณต่างๆ ที่ได้กำหนดไว้ทุกๆ5นาที เพื่อตรวจสอบดูว่าน้ำกลั่นจะยังคงค่าอุณหภูมิสุดท้ายนั้นได้นานเท่าไร ผลของการทดลองปรากฏว่าน้ำกลั่นที่ผสมกันในตู้กระจกขนาด30ซม.x50ซม.x40ซม. เมื่ออุณหภูมิของน้ำกลั่นและห้องปฏิบัติการในขณะทดลองมีค่าสูงกว่า 20.0 องศาเซลเซียสมาก (ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสและ 25 องศาเซล

เซียส)จะมีอุณหภูมิสุดท้ายไม่ตรงกับการคำนวณในตารางที่ 5-3 และอุณหภูมิสุดท้ายจะคงค่าได้นานที่สุดเมื่อน้ำกลั่นในตู้ฯมีอุณหภูมิเติม(22 องศาเซลเซียส) มีค่าใกล้เคียงกับค่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ต้องการใช้งาน(20.0 องศาเซลเซียส)

ใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.ทำการศึกษทดลองการคงค่าของอุณหภูมิโดยนำน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันโดยตรง

ตารางที่ 7-1 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องทดลอง 29.8 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.05	20.1	20.15	20.1	20.1
10	20.15	20.2	20.25	20.2	20.2
15	20.2	20.3	20.3	20.3	20.3
20	20.3	20.4	20.5	20.45	20.45
25	20.4	20.5	20.6	20.55	20.55
30	20.5	20.6	20.7	20.65	20.65

จากตารางที่ 7-1 จะเห็นว่าการคงค่าอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสของน้ำกลั่นในตู้กระจกซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการนำน้ำกลั่นที่มีมวล 3 กก.อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับน้ำกลั่นที่มีมวล 7 กก.อุณหภูมิ14.8 องศาเซลเซียส ตามการคำนวณในตาราว\งที่ 6 จะคงค่าอุณหภูมิอยู่ได้นาน $\leq$ 5 นาทีเท่านั้น

ตารางที่ 7-2 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของผ้ากลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องทดลอง 25 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.05	20.05	20.1	20.05	20.05
10	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
15	20.2	20.15	20.15	20.15	20.15
20	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
25	20.25	20.3	20.3	20.3	20.3
30	20.3	20.4	20.4	20.4	20.4

จากตารางที่ 7-2 จะเห็นว่าการคงค่าอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสของผ้ากลั่นในตู้กระจกซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการนำผ้ากลั่นที่มีมวล 3 กก.อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับผ้ากลั่นที่มีมวล 7 กก.อุณหภูมิ17.4 องศาเซลเซียส ตามการคำนวณในตารางที่ 6 จะคงค่าอุณหภูมิอยู่ได้นานประมาณ 5 นาทีเท่านั้นยกเว้นผ้ากลั่นบริเวณตอนบนจากนั้นอุณหภูมิของผ้ากลั่นก็เริ่มสูงเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 7-3 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องทดลอง 21.9 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
15	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
25	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
30	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

จากตารางที่ 7-3 จะเห็นว่าการคงค่าอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสของน้ำกลั่นในตู้กระจกซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการนำน้ำกลั่นที่มีมวล 3 กก.อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับน้ำกลั่นที่มีมวล 7 กก.อุณหภูมิ18.9 องศาเซลเซียส ตามการคำนวณในตารางที่ 6จะคงค่าอุณหภูมิอยู่ได้นาน $\geq$30 นาทีซึ่งก็ยังนานไม่พอในปฏิบัติงานทดสอบหาค่าความหนาแน่น

ใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x35 ซม.ทำการศึกษาทดลองการคงค่าของอุณหภูมิโดยนำน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันโดยตรง

ตารางที่ 8-1 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องทดลอง 29.9 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.05	20.1	20.1	20.1	20.1
10	20.1	20.15	20.3	20.2	20.2
15	20.15	20.15	20.4	20.3	20.3
20	20.2	20.3	20.5	20.4	20.4
25	20.3	20.4	20.6	20.5	20.5
30	20.4	20.5	20.7	20.65	20.65

จากตารางที่ 8-1 จะเห็นว่าการคงค่าอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสของน้ำกลั่นในตู้กระจกซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการนำน้ำกลั่นที่มีมวล 5 กก.อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับน้ำกลั่นที่มีมวล11 กก.อุณหภูมิ14.8 องศาเซลเซียส ตามการคำนวณในตารางที่ 6 จะคงค่าอุณหภูมิอยู่ได้นาน $\leq$ 5 นาที

ตารางที่ 8-2 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องทดลอง 24.8องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10	20.05	20.05	20.1	20.05	20.05
15	20.1	20.1	20.1	20.1	20.1
20	20.1	20.15	20.2	20.2	20.2
25	20.2	20.2	20.2	20.2	20.2
30	20.2	20.3	20.3	20.3	20.3

จากตารางที่ 8-2 จะเห็นว่าการคงค่าอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสของน้ำกลั่นในตู้กระจกซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการนำน้ำกลั่นที่มีมวล 5 กก.อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับน้ำกลั่นที่มีมวล11 กก.อุณหภูมิ17.4 องศาเซลเซียส ตามการคำนวณในตารางที่ 6 จะคงค่าอุณหภูมิอยู่ได้นานประมาณ 10 นาทีเท่านั้น ยกเว้นน้ำบริเวณตอนบนจากนั้นอุณหภูมิของน้ำกลั่นก็เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 8-3 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส อุณหภูมิห้องทดลอง 21.9 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
15	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
25	20.0	20.0	20.05	20.0	20.0
30	20.0	20.0	20.05	20.05	20.05

จากตารางที่ 8-3 จะเห็นว่าการคงค่าอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสของน้ำกลั่นในตู้กระจกซึ่งเป็นอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการนำน้ำกลั่นที่มีมวล 5 กก.อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับน้ำกลั่นที่มีมวล11 กก.อุณหภูมิ19.0 องศาเซลเซียส ตามการคำนวณในตารางที่ 6จะคงค่าอุณหภูมิอยู่ได้นาน $\leq$30 นาทีซึ่งก็ยังนานไม่พอในปฏิบัติงานทดสอบหาค่าความหนาแน่น

ใช้ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม.ทำการศึกษาทดลองการคงค่าของอุณหภูมิโดยนำน้ำกลั่นที่มีอุณหภูมิต่างกันมาผสมกันโดยตรง

ตารางที่ 9-1 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 21.1องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องทดลอง 30.2 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	21.1	21.1	21.1	21.0	21.1	21.1	21.1	21.1	21.1
5	21.2	21.2	21.15	21.15	21.1	21.2	21.2	21.1	21.15
10	21.4	21.4	21.2	21.2	21.2	21.4	21.4	20.15	20.2
15	21.5	21.5	21.3	21.3	21.2	21.5	21.5	21.3	21.3
20	21.7	21.7	21.5	21.5	21.3	21.6	21.7	21.5	21.5
25	21.9	21.85	21.7	21.7	21.4	21.9	21.9	21.7	21.7
30	22.2	22.3	21.9	21.9	21.7	22.2	22.2	21.9	21.9

จากตารางที่ 9-1 จะเห็นว่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการนำน้ำกลั่นที่มีมวล 20 กก. อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับน้ำกลั่นที่มีมวล 35 กก.อุณหภูมิ13.8 องศาเซลเซียส ตามการคำนวณในตารางที่ 5 จะวัดค่าอุณหภูมิสุดท้ายได้จริงเป็น 21.1 องศาเซลเซียสไม่ใช่ 20.0 องศาเซลเซียสตามที่ได้ทำการคำนวณไว้ และคงค่าอุณหภูมิ 21.1 องศาเซลเซียสนี้อยู่ได้นานเพียงประมาณ 5 นาทีเท่านั้น

ปฏิบัติงานทดสอบหาค่าความหนาแน่น

ตารางที่ 9-2 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.5 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องทดลอง 24.8 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
10	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5	20.5
15	20.6	20.6	20.5	20.5	20.6	20.6	20.6	20.5	20.5
20	20.7	20.7	20.55	20.6	20.6	20.7	20.7	20.6	20.6
25	20.8	20.8	20.6	20.6	20.65	20.8	20.8	20.6	20.6
30	21.0	21.0	20.7	20.7	20.7	21.0	21.0	20.7	20.7

จากตารางที่ 9-2 จะเห็นว่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการนำน้ำกลั่นที่มีมวล 20 กก. อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับน้ำกลั่นที่มีมวล 35 กก.อุณหภูมิ16.9 องศาเซลเซียส ตามการคำนวณในตารางที่ 5 จะวัดค่าอุณหภูมิสุดท้ายได้จริงเป็น 20.5 องศาเซลเซียสไม่ใช่ 20.0 องศาเซลเซียสตามที่ได้ทำการคำนวณไว้ และคงค่าอุณหภูมิ 20.5 องศาเซลเซียสนี้อยู่ได้นานเพียงประมาณ 10 นาที และจะมีเพียงบริเวณตอนล่างของตู้ฯ เท่านั้นที่น้ำกลั่นจะคงอุณหภูมิอยู่ได้นานถึง 15 นาที

ตารางที่ 9-3 เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นของน้ำกลั่นในตู้กระจก 20.0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องทดลอง 21.8 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
5	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
10	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
15	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
20	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
25	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
30	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
35	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

จากตารางที่ 9-3 จะเห็นว่าอุณหภูมิสุดท้ายที่ได้จากการผสมน้ำกลั่นที่มีมวล 20 กก. อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียสผสมกันโดยตรงกับน้ำกลั่นที่มีมวล 35 กก.อุณหภูมิ18.8 องศาเซลเซียส วัดค่าได้ 20.0 องศาตรงตามที่คำนวณไว้ในตารางที่ 5 และสามารถคงค่าอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสนี้อยู่ได้นานมากกว่า 35 นาที

-<u>โดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนเพื่อปรับอุณหภูมิน้ำกลั่น</u>

เมื่อใช้หลักการสมดุลย์ความร้อน

ใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.

ตารางที่ 10-1 เมื่อ m_{WL} = 33 กก., m_{WH} = 14.6 กก., m_c = 0.147 กก.
m_g = 3 กก., T_L = 16.4°c, T_H = 27.9 องศาเซลเซียส
และอุณหภูมิห้องทดลอง 28.4 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	27.9	27.9	27.9	27.9	27.9
5	25.5	26.7	26.9	26.7	26.6
10	22.7	25.8	26.2	25.7	25.7
15	21.6	25.0	25.8	25.0	24.8
20	21.0	24.2	25.2	24.1	23.8
25	20.5	23.5	24.8	23.8	23.5
30	20.2	23.3	24.3	23.4	23.2
35	20.0	22.6	24.0	22.8	22.7
40	19.8	22.1	23.6	22.4	22.3
45	19.7	21.6	23.1	21.9	21.9
50	19.6	21.3	22.8	21.5	21.5
55	19.6	21.0	22.5	21.2	21.1
60	19.6	20.8	22.3	20.9	20.8
65	19.5	20.7	22.1	20.8	20.7
70	19.5	20.6	21.9	20.7	20.6

ตารางที่ 10-1(ต่อ)

(วินาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
[illegible]	19.6	20.5	21.6	20.6	20.5
[illegible]	19.6	20.5	21.3	20.5	20.4
[illegible]	19.6	20.4	21.1	20.4	20.3
[illegible]	19.6	20.4	21.0	20.3	20.3
[illegible]	19.5	20.3	20.9	20.2	20.2
[illegible]	19.5	20.3	20.8	20.2	20.2
105	19.5	20.3	20.6	20.2	20.2
110	19.6	20.2	20.5	20.2	20.2
115	19.6	20.2	20.4	20.1	20.1
[illegible]	19.6	20.1	20.4	20.1	20.1
125	19.6	20.1	20.3	20.1	20.1
130	19.6	20.1	20.3	20.1	20.1
135	19.6	20.0	20.2	20.0	20.0
140	19.6	20.0	20.1	20.0	19.9
145	19.7	20.0	20.1	20.0	20.0
150	19.7	20.0	20.1	20.0	20.0
155	19.7	19.9	20.0	20.0	20.0
160	19.7	19.9	20.0	20.0	20.0
165	19.7	19.9	20.0	20.0	20.0
170	19.8	19.9	20.0	20.0	20.0
175	19.8	19.9	20.0	20.0	20.0

ตารางที่ 10-1(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
180	19.8	19.9	20.0	19.9	19.9
185	19.9	19.9	20.0	19.9	19.9
190	19.9	19.9	20.0	20.0	20.0
200	19.95	20.0	20.0	20.0	20.0
205	19.9	20.0	20.0	20.0	20.0
210	20.0	20.0	20.1	20.0	20.0
215	20.0	20.0	20.1	20.1	20.1
220	20.0	20.0	20.1	20.1	20.1

จากตารางที่ 10-1 จะเห็นว่าในการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสโดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน โดยใช้หลักการสมดุลย์ความร้อนนั้นเมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.ใส่น้ำกลั่นมวล 14.6 กก.อุณหภูมิ 27.9 องศาเซลเซียส แล้วใช้น้ำมวล 33 กก.อุณหภูมิ 16.4 องศาเซลเซียส วิ่งไหลเวียนในขดท่อทองแดงซึ่งวางแช่น้ำกลั่นอยู่ในตู้กระจกปรากฏว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริเวณตอนล่างจะมีค่า 20.0 องศาเซลเซียสเมื่อเวลา 35 นาที ส่วนบริเวณตอนกลาง ด้านขวาและด้านซ้ายต้องใช้เวลานานถึง 135 นาที และจะต้องใช้เวลานานประมาณ 200 นาที(ประมาณ 3 ชั่วโมง)จึงจะได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสเท่ากันทุกบริเวณ

ตารางที่ 10-2 เมื่อ m_{wL} = 33 กก., m_{wH} = 14.6 กก., m_c = 0.147 กก. m_g = 3 กก., T_L= 19.7°c, T_H=20.6 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้องทดลอง 23.6 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	20.6	20.6	20.65	20.6	20.6
5	20.4	20.6	20.6	20.5	20.5
10	20.35	20.5	20.6	20.5	20.5
15	20.3	20.45	20.5	20.5	20.5
20	20.3	20.5	20.5	20.45	20.5
25	20.2	20.4	20.45	20.4	20.4
30	20.2	20.3	20.4	20.3	20.3
35	20.1	20.2	20.3	20.2	20.3
40	20.1	20.2	20.2	20.2	20.2
45	20.0	20.1	20.2	20.2	20.2
50	20.0	20.0	20.2	20.1	20.1
55	20.0	20.0	20.1	20.1	20.1
60	20.0	20.0	20.1	20.1	20.1
65	20.0	20.1	20.2	20.1	20.1
70	20.1	20.1	20.2	20.2	20.2
75	20.1	20.15	20.3	20.2	20.2
80	20.2	20.2	20.4	20.3	20.3

จากตารางที่ 10-2 จะเห็นว่าในการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสโดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน โดยใช้หลักการสมดุลย์

ความร้อนนั้นเมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.ใส่น้ำกลั่นมวล 14.6 กก.อุณหภูมิ 20.6 องศาเซลเซียส แล้วใช้น้ำมวล 33 กก.อุณหภูมิ 19.7 องศาเซลเซียส วิ่งไหลเวียนในขดท่อทองแดงซึ่งวางแช่น้ำกลั่นอยู่ในตู้กระจกปรากฏว่าอุณหภูมิของน้ำกลั่นบริเวณตอนล่างและตอนกลางเท่านั้นที่สามารถปรับอุณหภูมิเป็น 20.0 องศาเซลเซียสได้ โดยใช้เวลานาน 50 นาทีแต่คงค่าอุณหภูมินี้อยู่ได้นานเพียง 10-15 นาทีเท่านั้น

ตารางที่ 10-3 เมื่อ m_{wL} = 40 กก., m_{wH} = 15.0 กก, m_c = 0.147 กก. m_g = 3 กก., T_L = 19.5°c, T_H =21.0 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิห้อง 23.1 องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	21.0	21.0	21.0	21.0	21.0
5	20.7	20.9	21.0	20.9	20.9
10	20.5	20.7	20.8	20.7	20.6
15	20.4	20.6	20.8	20.6	20.6
20	20.3	20.5	20.7	20.5	20.5
25	20.2	20.5	20.7	20.45	20.4
30	20.1	20.4	20.6	20.4	20.4
35	20.0	20.3	20.6	20.3	20.3
40	20.0	20.2	20.5	20.2	20.2
45	20.0	20.1	20.35	20.1	20.1
50	20.0	20.0	20.2	20.1	20.1

ตารางที่ 10-1(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
55	20.0	20.0	20.1	20.0	20.0
60	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
65	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
70	20.0	20.0	20.1	20.0	20.0

จากตารางที่ 10-3 จะเห็นว่าในการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสโดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน โดยใช้หลักการสมดุลย์ความร้อนนั้นเมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.ใส่น้ำกลั่นมวล 15 กก. อุณหภูมิ 21.0 องศาเซลเซียส แล้วใช้น้ำมวล 40 กก.อุณหภูมิ 19.5 องศาเซลเซียส วิ่งไหลเวียนในขดท่อทองแดงซึ่งวางแช่น้ำกลั่นอยู่ในตู้ระจกปรากฏว่าต้องใช้เวลานาน 60นาที จึงจะสามารถปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจกเป็น 20.0 องศาเซลเซียส ได้ทั่วทุกบริเวณ แต่คงค่าอุณหภูมินี้อยู่ได้นานเพียง5นาทีเท่านั้นอุณหภูมิของน้ำบริเวณตอนบนก็เริ่มเพิ่มสูงขึ้น

ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม.

ตารางที่ 10-4 เมื่อ m_{WL} = 40 กก.,m_{WH} = 52 กก,m_C = 0.363 กก. m_g =9.7 กก.,T_L = 17.0°c,T_H =22.2 องศาเซลเซียสและ อุณหภูมิห้องทดลอง 22.5องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2
5	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2	22.2
10	22.2	22.1	22.1	22.1	22.2	22.2	22.1	22.1	22.1
15	22.1	22.1	22.1	22.1	22.2	22.1	22.1	22.1	22.1
20	22.1	22.1	22.1	22.1	22.2	22.1	22.1	22.1	22.1
25	22.1	22.0	22.0	22.0	22.1	22.1	22.0	22.0	22.0
30	22.0	22.0	22.0	22.0	22.1	22.0	22.0	22.0	22.0
35	22.0	22.0	22.0	22.0	22.1	22.0	22.0	22.0	22.0
40	22.0	21.9	21.9	21.9	22.1	22.0	21.9	21.9	21.9
45	21.9	21.9	21.9	21.9	22.1	21.9	21.9	21.9	21.9
50	21.9	21.9	21.9	21.8	22.1	21.9	21.9	21.9	21.9
55	21.8	21.8	21.8	21.8	22.0	21.9	21.8	21.9	21.9
60	21.8	21.8	21.8	21.8	22.0	21.8	21.8	21.8	21.8
65	21.8	21.8	21.8	21.7	22.0	21.8	21.8	21.8	21.8
70	21.7	21.7	21.7	21.7	22.0	21.8	21.7	21.8	21.8
75	21.7	21.7	21.7	21.7	21.9	21.7	21.7	21.7	21.7
80	21.7	21.7	21.6	21.6	21.9	21.7	21.7	21.7	21.7
85	21.6	21.6	21.6	21.6	21.9	21.6	21.6	21.6	21.6

ตารางที่ 10-4(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
90	21.6	21.6	21.6	21.6	21.8	21.6	21.6	21.6	21.6
95	21.6	21.5	21.5	21.5	21.8	21.6	21.6	21.6	21.6
100	21.5	21.5	21.5	21.5	21.8	21.5	21.5	21.5	21.5
105	21.5	21.5	21.5	21.5	21.8	21.5	21.5	21.5	21.5
110	21.5	21.4	21.4	21.4	21.8	21.5	21.5	21.5	21.5
115	21.4	21.4	21.4	21.4	21.7	21.4	21.4	21.4	21.4
120	21.4	21.3	21.3	21.3	21.7	21.4	21.4	21.4	21.4
125	21.4	21.3	21.3	21.3	21.7	21.4	21.4	21.3	21.3
130	21.3	21.3	21.2	21.2	21.6	21.3	21.3	21.3	21.3
125	21.3	21.2	21.2	21.2	21.6	21.3	21.3	21.2	21.2
130	21.2	21.2	21.1	21.2	21.6	21.3	21.2	21.2	21.2
135	21.2	21.2	21.1	21.1	21.6	21.2	21.2	21.1	21.1
140	21.2	21.1	21.0	21.1	21.5	21.2	21.1	21.1	21.1
145	21.1	21.1	21.0	21.0	21.5	21.2	21.1	21.1	21.1
150	21.1	21.1	21.0	21.0	21.5	21.1	21.1	21.0	21.0
155	21.1	21.0	21.9	21.0	21.5	21.1	21.0	21.0	21.0
160	21.0	21.0	20.9	20.9	21.4	21.0	21.0	20.9	21.0
165	20.9	20.9	20.9	20.9	21.4	20.9	20.9	20.9	20.9
170	20.9	20.9	20.8	20.9	21.4	20.9	20.9	20.9	20.9
175	20.9	20.8	20.8	20.8	21.4	20.9	20.8	20.8	20.8
180	20.8	20.8	20.8	20.8	21.3	20.8	20.8	20.8	20.8

ตารางที่ 10-4(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
185	20.8	20.8	20.8	20.8	21.3	20.8	20.8	20.8	20.8
190	20.8	20.8	20.7	20.8	21.3	20.8	20.8	20.8	20.8
195	20.7	20.7	20.7	20.7	21.3	20.8	20.7	20.7	20.7
200	20.7	20.7	20.7	20.7	21.3	20.8	20.7	20.7	20.7
205	20.7	20.7	20.7	20.7	21.2	20.7	20.7	20.7	20.7
210	20.7	20.7	20.7	20.7	21.2	20.7	20.7	20.7	20.7
215	20.7	20.7	20.6	20.6	21.2	20.7	20.6	20.6	20.6
220	20.6	20.6	20.6	20.6	21.2	20.7	20.6	20.6	20.6
225	20.6	20.6	20.6	20.6	21.2	20.6	20.6	20.6	20.6
230	20.6	20.6	20.6	20.6	21.1	20.6	20.6	20.6	20.6
235	20.6	20.6	20.6	20.6	21.1	20.6	20.6	20.6	20.6
240	20.5	20.5	20.5	20.5	21.1	20.6	20.5	20.5	20.5
245	20.5	20.5	20.5	20.5	21.1	20.5	20.5	20.5	20.5
250	20.5	20.5	20.5	20.5	21.0	20.5	20.5	20.5	20.5
255	20.6	20.6	20.6	20.6	21.0	20.5	20.6	20.6	20.5
260	20.6	20.6	20.6	20.6	21.0	20.6	20.6	20.6	20.6
265	20.6	20.6	20.6	20.6	21.0	20.6	20.6	20.6	20.6
270	20.7	20.7	20.7	20.7	21.1	20.7	20.7	20.7	20.6
275	20.7	20.7	20.7	20.7	21.1	20.7	20.7	20.7	20.7

จากตารางที่ 10-4 จะเห็นว่าในการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสโดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน โดยใช้หลักการสมดุลย์

ความร้อนนั้นเมื่อใช้ตู้กระจกขนาด 30x50x40 ซม.ใส่น้ำกลั่นมวล 52 กก.อุณหภูมิ22.2 องศาเซลเซียส แล้วใช้น้ำมวล 40 กก.อุณหภูมิ 17.0 องศาเซลเซียส วิ่งไหลเวียนในขดท่อทองแดงซึ่งวางแช่น้ำกลั่นอยู่ในตู้กระจก ปรากฏว่าสามารถปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจกได้อุณหภูมิสุดท้ายเพียง 20.5 องศาเซลเซียสที่บริเวณตอนล่าง และบริเวณที่อยู่ใกล้กับขดท่อทองแดงเท่านั้นโดยใช้เวลานานถึง 245นาที และคงค่าอุณหภูมินี้อยู่ได้นานเพียง 5 นาทีเท่านั้น อุณหภูมิของน้ำก็เริ่มเพิ่มสูงขึ้น

จากผลการศึกษาทดลองด้วยวิธีนี้แสดงให้เห็นว่าเป็นวิธีที่ไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นที่ใช้สำหรับการปฏิบัติงานตามที่ต้องการ

เมื่อไม่ใช้หลักการสมดุลย์ความร้อน

ใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.

ตารางที่ 10-5 ใช้ตู้กระจกขนาด 24ซม.x25.5ซม.x24ซม.ใส่น้ำกลั่นอุณหภูมิ 23.0 องศาเซลเซียส มวล14.5กก.อุณหภูมิห้องทดลอง 22.5องศาเซลเซียส

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
0	23.0	23.0	23.0	23.0	23.0
5	22.5	22.9	22.9	22.8	22.8
10	22.2	22.7	22.7	22.7	22.7
15	22.0	22.5	22.5	22.6	22.6
20	21.8	22.4	22.5	22.5	22.5
25	21.6	22.3	22.4	22.4	22.4
30	21.5	22.2	22.4	22.4	22.4
35	21.4	22.1	22.3	22.3	22.3
40	21.3	22.0	22.2	22.2	22.2
45	21.2	21.9	22.1	22.1	22.1
50	21.2	21.8	22.0	22.0	22.0
55	21.1	21.7	21.9	21.9	21.9
60	21.1	21.6	21.9	21.8	21.8
65	21.1	21.6	21.8	21.7	21.7
70	21.0	21.5	21.7	21.6	21.6
75	21.0	21.5	21.7	21.5	21.5
80	21.0	21.4	21.6	21.4	21.4
85	20.9	21.4	21.6	21.4	21.4

ตารางที่ 10-5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
90	20.9	21.3	21.5	21.3	21.3
95	20.9	21.3	21.5	21.3	21.3
100	20.8	21.2	21.4	21.3	21.3
105	20.8	21.2	21.4	21.2	21.2
110	20.8	21.2	21.3	21.2	21.2
115	20.7	21.1	21.3	21.2	21.2
120	20.7	21.1	21.2	21.1	21.1
125	20.7	21.1	21.2	21.1	21.1
130	20.6	21.0	21.2	21.1	21.0
135	20.6	21.0	21.1	21.0	21.0
140	20.6	20.9	21.1	21.0	21.0
145	20.5	20.9	21.1	20.9	20.9
150	20.5	20.9	21.0	20.9	20.9
155	20.5	20.8	21.0	20.8	20.8
160	20.4	20.8	20.9	20.8	20.8
165	20.4	20.7	20.9	20.7	20.7
175	20.4	20.7	20.8	20.6	20.6
185	20.3	20.6	20.8	20.6	20.6
190	20.3	20.6	20.7	20.5	20.5
195	20.2	20.5	20.6	20.5	20.5
200	20.2	20.5	20.5	20.4	20.4

ตารางที่ 10-5 (ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิ(องศาเซลเซียส)				
	ตอนล่าง	ตอนกลาง	ตอนบน	ด้านขวา	ด้านซ้าย
205	20.1	20.4	20.4	20.4	20.4
210	20.1	20.3	20.4	20.3	20.3
215	20.1	20.3	20.4	20.3	20.3
220	20.1	20.3	20.4	20.3	20.3
225	20.0	20.3	20.3	20.2	20.2
230	20.0	20.3	20.3	20.2	20.2
235	20.0	20.2	20.3	20.2	20.2
240	20.0	20.2	20.2	20.1	20.1
230	20.0	20.2	20.2	20.1	20.1
245	20.0	20.2	20.2	20.1	20.1
250	20.0	20.2	20.2	20.1	20.1
255	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0
260	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0
265	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0
270	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0
275	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0
280	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
285	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
290	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

จากตารางที่ 10-5 จะเห็นว่าในการปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสโดยใช้ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อนโดยไม่ใช้หลักการสมดุลย์

ความร้อนนั้น ด้วยการใช้ตู้กระจกขนาด 24x25.5x24 ซม.ใส่น้ำกลั่นมวล 14.5 กก. อุณหภูมิ 23.0 องศาเซลเซียส แล้วให้น้ำในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่ได้ปรับตั้งให้ทำอุณหภูมิที่ 20.0 องศาเซลเซียสตลอดเวลาวิ่งไหลเวียนในขดท่อทองแดงซึ่งวางแช่น้ำกลั่นอยู่ในตู้กระจก ปรากฏว่าต้องใช้เวลานานถึง 280 นาที(4 ชั่วโมง 40 นาที) จึงสามารถปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจกให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสทั่วทุกบริเวณ

- โดยใช้ตู้กระจกสองใบซ้อนกัน

เมื่อใช้หลักการสมดุลย์ความร้อน

ตารางที่ 11-1 เมื่อ m_{w1}= 13.8 กก., m_{w2}= 40.2 กก., m_{wb}= 37.5 กก. T_H= 22.5 องศาเซลเซียส, T_L= 14.7 องศาเซลเซียส(เครื่องควบคุมอุณหภูมิฯต้องใช้เวลาปรับค่า T_L นานประมาณ 3.5 ชม.)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของน้ำที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)											
	1	2	3	4	5 ขน	ล่าง	ซ้าย	ขวา	6	7	8	9
0	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	23.5
5	22.1	22.1	22.1	22.1	22.4	22.4	22.3	22.4	22.1	22.1	22.1	22.1
15	21.7	21.7	21.7	21.7	22.3	22.1	22.0	22.0	21.7	21.7	21.7	21.7
20	21.4	21.4	21.4	21.4	22.1	21.7	21.8	21.8	21.4	21.4	21.4	21.4
25	21.0	21.0	21.0	21.0	21.9	21.3	21.5	21.5	21.0	21.0	21.0	21.0
30	20.6	20.6	20.6	20.6	21.7	20.8	21.2	21.2	20.6	20.6	20.6	20.6
35	20.3	20.3	20.3	20.3	21.6	20.5	21.8	21.8	20.3	20.3	20.3	20.3
40	20.0	20.0	20.0	20.0	21.4	20.1	21.4	21.5	20.0	20.0	20.0	20.0
45	19.8	19.8	19.8	19.8	21.2	20.0	21.1	21.1	19.8	19.8	19.8	19.8
50	19.6	19.6	19.6	19.6	21.0	20.5	20.9	20.9	19.6	19.6	19.6	19.6
55	19.5	19.5	19.5	19.5	20.0	20.3	20.8	20.8	19.5	19.5	19.5	19.5
60	19.5	19.5	19.5	19.5	20.9	20.1	20.7	20.7	19.5	19.5	19.5	19.5
65	19.5	19.5	19.5	19.5	20.9	20.1	20.6	20.7	19.5	19.5	19.5	19.5
70	19.4	19.4	19.4	19.4	20.9	19.7	20.5	20.5	19.4	19.4	19.4	19.4
75	19.4	19.4	19.4	19.4	20.9	19.7	20.5	20.5	19.4	19.4	19.4	19.4

ตารางที่ 11-1(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของผ้าที่ยริเวณตมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)											
	1	2	3	4	5 ขน	ล่าง	ซ้าย	ขวา	6	7	8	9
80	19.4	19.4	19.4	19.4	20.9	19.7	20.4	20.4	19.4	19.4	19.4	19.4
90	19.5	19.5	19.5	19.5	20.9	19.7	20.4	20.4	19.5	19.5	19.5	19.5
95	19.5	19.5	19.5	19.5	20.8	19.7	20.4	20.3	19.5	19.5	19.5	19.5
100	19.6	19.6	19.6	19.6	20.7	19.8	20.3	20.3	19.6	19.6	19.6	19.6
105	19.6	19.6	19.6	19.6	20.6	19.8	20.3	20.3	19.6	19.6	19.6	19.6
110	19.7	19.7	19.7	19.7	20.6	19.9	20.3	20.3	19.7	19.7	19.7	19.7
115	19.7	19.7	19.7	19.7	20.5	19.9	20.3	20.3	19.7	19.7	19.7	19.7
120	19.8	19.8	19.8	19.8	20.4	19.9	20.2	20.2	19.8	19.8	19.8	19.8
125	19.8	19.8	19.8	19.8	20.3	20.0	20.2	20.2	19.8	19.8	19.8	19.8
130	19.9	19.9	19.9	19.9	20.3	20.0	20.2	20.2	19.9	19.9	19.9	19.9
135	19.9	19.9	19.9	19.9	20.2	20.0	20.1	20.1	19.9	19.9	19.9	19.9
140	20.0	20.0	20.0	20.0	20.2	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0
145	20.0	20.0	20.0	20.0	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
150	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
155	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
160	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

จากตารางที่ 11-1 จะเห็นว่าในการศึกษาทดลองใช้ตู้กระจกสองชั้นเพื่อปรับอุณหภูมิของผ้ากลั่นในตู้กระจกชั้นในให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสนั้น หลังจากปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯเมื่อผ้ากลั่น(M_{wb} = 37.5 กก.)ในอ่างเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯถูกปรับอุณหภูมิ(T_L

= 14.7 องศาเซลเซียส) ได้ตามที่คำนวณโดยใช้หลักการสมดุลย์ของความร้อนในสมการที่ 5 แล้วปล่อยให้น้ำไหลเวียนเข้า-ออกในตู้กระจกชั้นนอกที่มีน้ำกลั่น(M_{w2}) โดยผ่านหลอดแก้วรูปซ่อมที่มีรูเล็กๆสำหรับกระจายน้ำให้ทั่วทั้งตู้

ปรากฏว่าต้องใช้เวลานานถึง 150 นาที(2.5 ชั่วโมง)น้ำกลั่นในตู้กระจกชั้นใน ซึ่งใช้ในการปฏิบัติงานจึงจะมีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสเท่ากันหมดทุกบริเวณและอุณหภูมิจะสามารถคงค่าอยู่ที่ 20.0 องศาเซลเซียสได้นานตามที่ต้องการ

ตารางที่ 11-2 เมื่อ m_{w1}=13.5 กก. m_{w2}=40.2 กก. m_{wb}=33.0 กก. T_H=25.4 องศาเซลเซียสและ T_L=10.8 องศาเซลเซียส (ต้องใช้เวลาปรับค่า T_L นานประมาณ 4 ชม.)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของผ้าที่บริเวณตามายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)											
	1	2	3	4	5 บน	5 ล่าง	5 ซ้าย	5 ขวา	6	7	8	9
0	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4	25.4
5	23.2	23.2	23.2	23.2	25.2	23.6	24.1	24.2	23.2	23.2	23.2	23.2
10	21.3	21.3	21.3	21.3	24.9	21.8	22.8	22.8	21.3	21.3	21.3	21.3
15	20.5	20.5	20.5	20.5	24.4	21.3	22.1	22.1	20.5	20.5	20.5	20.5
20	19.8	19.8	19.8	19.8	24.1	21.0	21.9	22.0	19.8	19.8	19.8	19.8
25	19.4	19.4	19.4	19.4	23.8	20.7	21.6	21.6	19.4	19.4	19.4	19.4
30	18.9	18.9	18.9	18.9	23.4	20.3	21.3	21.3	18.9	18.9	18.9	18.9
35	18.6	18.6	18.6	18.6	23.2	20.1	21.1	21.0	18.6	18.6	18.6	18.6
40	18.4	18.4	18.4	18.4	23.0	19.9	21.0	21.0	18.4	18.4	18.4	18.4
45	18.2	18.2	18.2	18.2	22.8	19.6	20.8	20.8	18.2	18.2	18.2	18.2
50	18.0	18.0	18.0	18.0	22.6	19.4	20.6	20.6	18.0	18.0	18.0	18.1
55	18.0	18.0	18.0	18.0	22.4	19.1	20.6	20.6	18.0	18.0	18.0	18.0
60	18.0	18.0	18.0	18.0	22.2	18.7	20.4	20.5	18.0	18.0	18.0	18.0
65	18.0	18.0	18.0	18.0	22.0	18.5	20.2	20.2	18.0	18.0	18.0	18.0
70	17.9	17.9	17.9	17.9	21.9	18.4	20.0	20.0	18.0	18.0	18.0	18.0
75	17.9	17.9	17.9	17.9	21.8	18.2	19.8	19.8	17.9	17.9	17.9	17.6
80	18.0	18.0	18.0	18.0	21.6	18.3	19.8	19.8	18.0	18.0	18.0	18.0
85	18.0	18.0	18.0	18.0	21.4	18.4	19.9	19.9	18.0	18.0	18.0	18.0
90	18.1	18.1	18.1	18.1	21.2	18.6	19.9	19.9	18.1	18.1	18.1	18.2

ตารางที่ 11-2(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของผ้าที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)											
	1	2	3	4	5 บน	5 ล่าง	5 ซ้าย	5 ขวา	6	7	8	9
95	18.2	18.2	18.2	18.2	21.1	18.8	20.0	20.0	18.2	18.2	18.2	18.2
100	18.3	18.3	18.3	18.3	21.0	18.9	19.9	19.9	18.3	18.3	18.3	18.3
105	18.4	18.4	18.4	18.4	20.9	19.0	19.7	19.7	18.4	18.4	18.4	18.4
110	18.5	18.5	18.5	18.5	20.8	19.1	19.8	19.7	18.5	18.5	18.5	18.5
115	18.6	18.6	18.6	18.6	20.8	19.2	19.9	19.9	18.6	18.6	18.6	18.6
120	18.8	18.8	18.8	18.8	20.7	19.3	19.9	20.0	18.8	18.8	18.8	18.8
125	18.9	18.9	18.9	18.9	20.7	19.3	20.0	20.0	18.9	18.9	18.9	18.9
130	19.0	19.0	19.0	19.0	20.6	19.4	20.0	20.0	19.0	19.0	19.0	19.0
135	19.1	19.1	19.1	19.1	20.6	19.4	20.1	20.1	19.1	19.1	19.1	19.1
140	19.2	19.2	19.2	19.2	20.6	19.5	20.1	20.1	19.2	19.2	19.2	19.2
145	19.3	19.3	19.3	19.3	20.5	19.5	20.1	20.1	19.3	19.3	19.3	19.3
150	19.4	19.4	19.4	19.4	20.5	19.6	20.2	20.2	19.4	19.4	19.4	19.4
155	19.5	19.5	19.5	19.5	20.5	19.6	20.2	20.2	19.5	19.5	19.5	19.5
160	19.6	19.6	19.6	19.6	20.4	19.7	20.3	20.3	19.6	19.6	19.6	19.6
165	19.7	19.7	19.7	19.7	20.4	19.7	20.3	20.3	19.7	19.7	19.7	19.7
170	19.8	19.8	19.8	19.8	20.4	19.8	20.3	20.3	19.8	19.8	19.8	19.8
175	19.9	19.8	19.8	19.8	20.3	19.9	20.2	20.2	19.9	19.8	19.8	19.8
180	19.9	19.9	19.9	19.9	20.3	20.0	20.2	20.2	19.9	19.9	19.9	19.9
185	20.0	20.0	20.0	20.0	20.2	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0
190	20.0	20.0	20.0	20.0	20.2	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0

ตารางที่ 11-2(ต่อ)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของฝ้าที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)											
	1	2	3	4	5 บน	5 ล่าง	5 ซ้าย	5 ขวา	6	7	8	9
195	20.0	20.0	20.0	20.0	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
200	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
205	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
210	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
215	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

จากตารางที่ 11-2 จะเห็นว่าในการศึกษาทดลองใช้ตู้กระจกสองชั้นเพื่อปรับอุณหภูมิของฝ้ากลั่นในตู้กระจกชั้นในให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสนั้น หลังจากปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯเมื่อฝ้ากลั่น(H_{wb}=33.0 กก.)ในอ่างเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯถูกปรับอุณหภูมิ(T_L=10.8 องศาเซลเซียส)ได้ตามที่คำนวณโดยใช้หลักการสมดุลย์ของความร้อนในสมการที่ 5 แล้วปล่อยให้ฝ้าไหลเวียนเข้า-ออกในตู้กระจกชั้นนอกที่มีฝ้ากลั่น(H_{w2}) โดยผ่านหลอดแก้วรูปซ่อมที่มีรูเล็กๆสำหรับกระจายฝ้าให้ทั่วทั้งตู้

ปรากฏว่าต้องใช้เวลานานถึง 200 นาที(3 ชั่วโมง50 นาที) ฝ้ากลั่นในตู้กระจกชั้นใน(H_{w1}) ซึ่งใช้ในการปฏิบัติงานจึงจะมีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียส ทั่วเท่ากันหมดทุกบริเวณ เทคนิคนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ปฏิบัติงาน เนื่องจากจะต้องใช้เวลานานมากในการปรับอุณหภูมิของฝ้ากลั่นในเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯ(T_L)และถ่ายเทความร้อน เพื่อให้อุณหภูมิของฝ้ากลั่นในตู้กระจกชั้นในมีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซล เซียสเท่ากันหมดทุกบริเวณ

เมื่อไม่ใช้หลักการสมดุลย์ความร้อน

ตารางที่ 12 เมื่อ m_{w1}=13.5 กก. m_{w2}=40.2 กก. m_{wb}=33.0 กก. T_H=21.8 องศาเซลเซียสและ T_L= 20.0 องศาเซลเซียส(ต้องใช้เวลาปรับค่าT_Lนานประมาณ 45 นาที)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของผ้าที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)											
	1	2	3	4	5				6	7	8	9
					บน	ล่าง	ซ้าย	ขวา				
0	21.8	21.8	21.8	21.8	23.0	22.9	23.0	23.0	21.8	21.8	21.8	23.8
5	21.6	21.6	21.5	21.5	23.0	22.6	22.9	22.9	21.6	21.6	21.5	21.5
10	21.3	21.3	21.3	21.3	22.9	22.3	22.8	22.8	21.3	21.3	21.3	21.3
15	21.1	21.1	21.1	21.1	22.7	22.0	22.6	22.6	21.1	21.1	21.1	21.1
20	20.8	20.8	20.8	20.8	22.5	21.7	22.3	22.3	20.8	20.8	20.8	20.8
25	20.6	20.6	20.6	20.6	22.3	21.3	22.0	22.1	20.6	20.6	20.6	20.6
30	20.4	20.4	20.4	20.4	22.0	20.9	21.8	21.8	20.4	20.4	20.4	20.4
35	20.3	20.3	20.3	20.3	21.7	20.7	21.5	21.5	20.3	20.3	20.3	20.3
40	20.2	20.2	20.2	20.2	21.4	20.5	21.3	21.3	20.2	20.2	20.2	20.2
45	20.2	20.2	20.2	20.2	21.1	20.3	21.1	21.1	20.2	20.2	20.2	20.2
50	20.2	20.2	20.2	20.2	20.8	20.3	20.9	20.9	20.2	20.2	20.2	20.2
55	20.1	20.1	20.1	20.1	20.6	20.2	20.6	20.7	20.1	20.1	20.1	20.1
60	20.1	20.1	20.1	20.1	20.4	20.2	20.5	20.5	20.1	20.1	20.1	20.1
65	20.1	20.1	20.1	20.1	20.4	20.1	20.4	20.4	20.1	20.1	20.1	20.1
70	20.1	20.1	20.1	20.1	20.3	20.1	20.3	20.3	20.1	20.1	20.1	21.1
75	20.0	20.0	20.0	20.0	20.3	20.1	20.2	20.2	20.0	20.0	20.0	20.0
80	20.0	20.0	20.0	20.0	20.2	20.0	20.2	20.2	20.0	20.0	20.0	20.0

ตารางที่ 12(ต่อ)

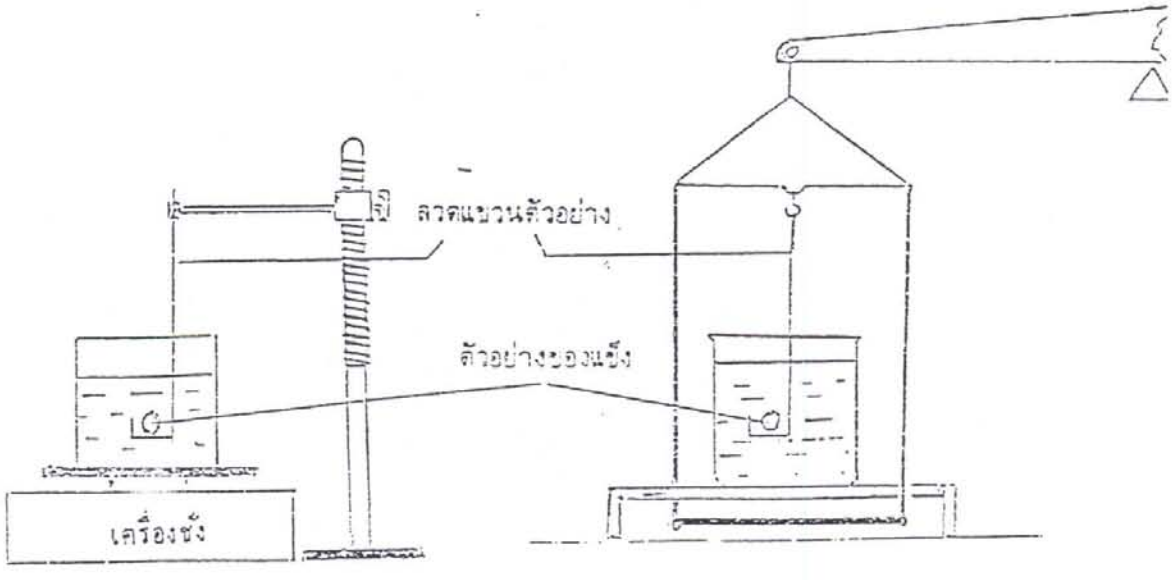
เวลา (นาที)	อุณหภูมิของผ้าที่บริเวณหมายเลข 1-9 (องศาเซลเซียส)											
	1	2	3	4	5 ขม ล่าง		ซ้าย ขวา		6	7	8	9
85	20.0	20.0	20.0	20.0	20.2	20.0	20.2	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0
95	20.0	20.0	20.0	20.0	20.1	20.0	20.1	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0
100	20.0	20.0	20.0	20.0	20.1	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
105	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
110	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0

ตามตารางที่ 12 จะเห็นว่าเมื่อทำการศึกษาทดลองใช้ตู้กระจกสองชั้นเพื่อปรับอุณหภูมิของผ้ากลั่นในตู้กระจกชั้นในให้ได้อุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสนั้นโดยไม่ใช้หลักการสมดุลย์ของความร้อน ด้วยการปล่อยให้ผ้ากลั่นในอ่างเครื่องควบคุมอุณหภูมิฯที่ได้ปรับให้คงค่าอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสไหลเวียนเข้า-ออก ในตู้กระจกชั้นนอกที่มีผ้ากลั่น(H_{w2})อยู่ตลอดเวลา ปรากฏว่าใช้เวลานาน 105 นาที(1 ชั่วโมง 45 นาที)ผ้ากลั่นในตู้กระจกชั้นใน(H_{w1})ซึ่งใช้ในการปฏิบัติงานก็จะมีอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสเท่ากันทุกบริเวณ และยังคงค่าอุณหภูมิ 20.0 องศาเซลเซียสได้ตลอดเวลาที่ยังคงเปิดเครื่องควบคุมอุณหภูมิและไหลเวียนน้ำ

จากผลการศึกษาวิจัย เห็นได้อย่างชัดเจนว่าเทคนิคนี้เหมาะสมที่สุดในการปรับอุณหภูมิของผ้ากลั่นที่จะใช้ในการหาค่าความหนาแน่นให้ได้อุณหภูมิที่ต้องการโดยใช้เวลาน้อยที่สุดและสามารถคงค่าอุณหภูมิที่ต้องการไว้ได้นานตามที่ต้องการ

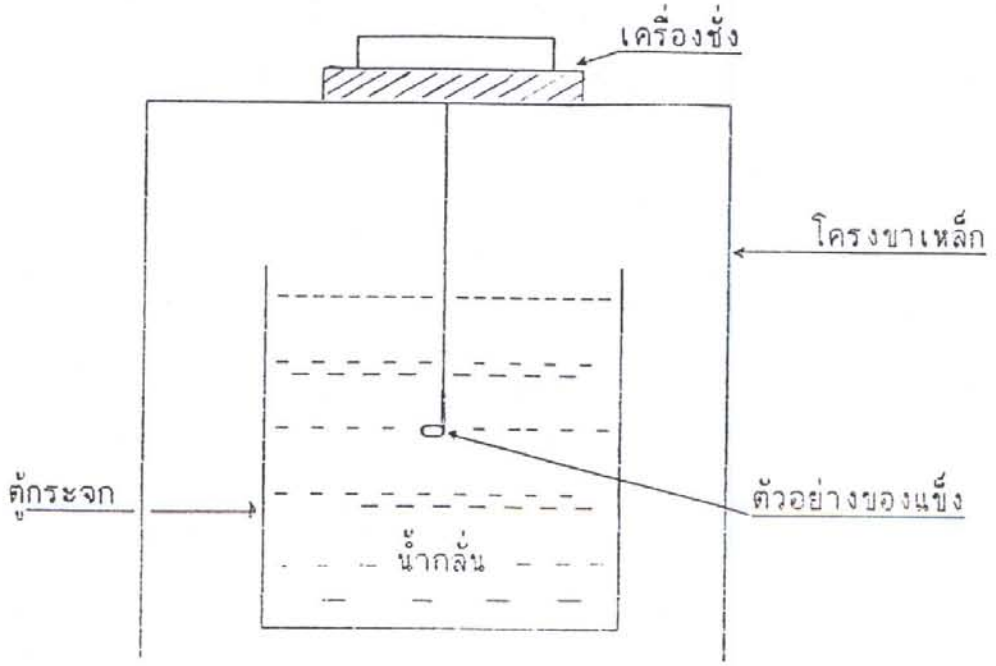
ภาคผนวก ง.
ภาพแสดงลักษณะเครื่องมือ-อุปกรณ์และการทดลองแบบต่างๆ

ภาพที่ 1 แสดงลักษณะและขนาดของขวดปิกนอมิเตอร์แบบต่างๆ



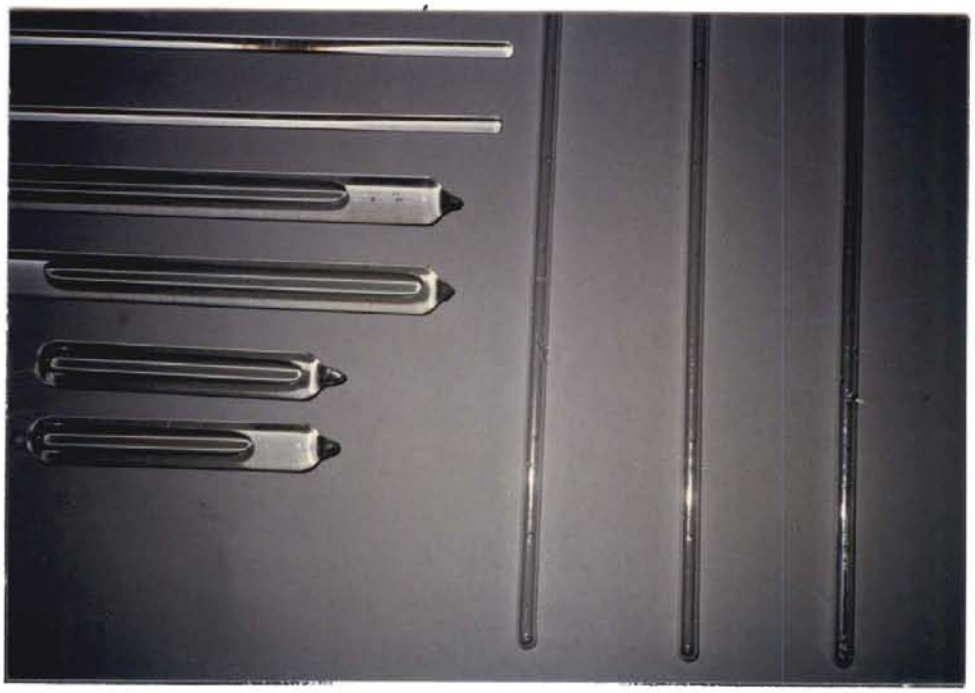
2-1 2-2

ภาพที่ 2 แสดงการจัดวางเครื่องมือ-อุปกรณ์และลักษณะการชั่งของแข็งในของเหลวที่อยู่นิ่งของเทคนิคเดิมแบบที่1(ภาพ2-1)และแบบที่2(ภาพ2-2)

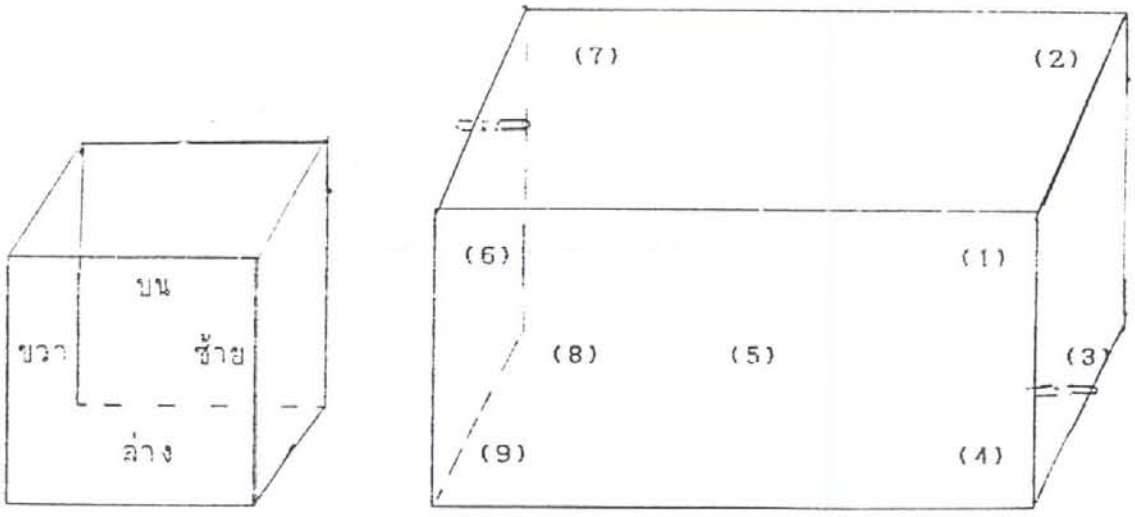


ภาพที่ 3 ลักษณะการชั่งของแข็งในของเหลวที่นิ่งโดยเทคนิคแบบใหม่

ภาพที่ 4 การทดลองหาค่าปริมาตรของตัวอย่างอะลูมิเนียมรูปพรรณ ด้วยการชั่งในของเหลวที่อยู่นิ่ง ด้วยเทคนิคแบบใหม่

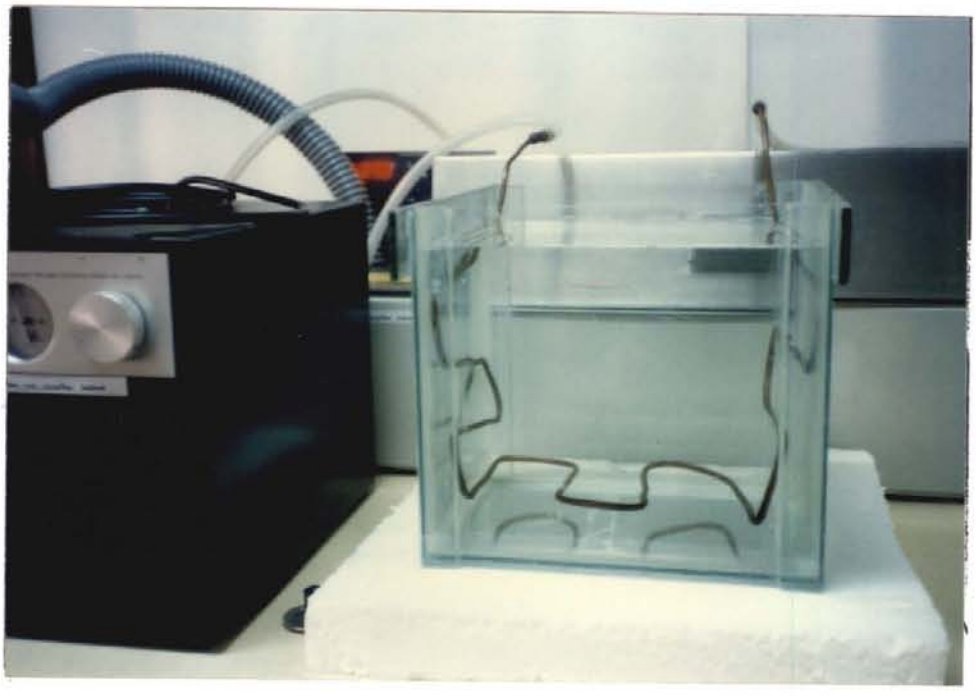


ภาพที่ 5 แท่งแก้วขนาดต่างๆที่ใช้ในการปรับระดับน้ำกลั่นในตู้กระจก และหลอดแก้วรูปซ่อมที่มีรูเล็กๆอยู่ห่างกันระยะสม่ำเสมอ

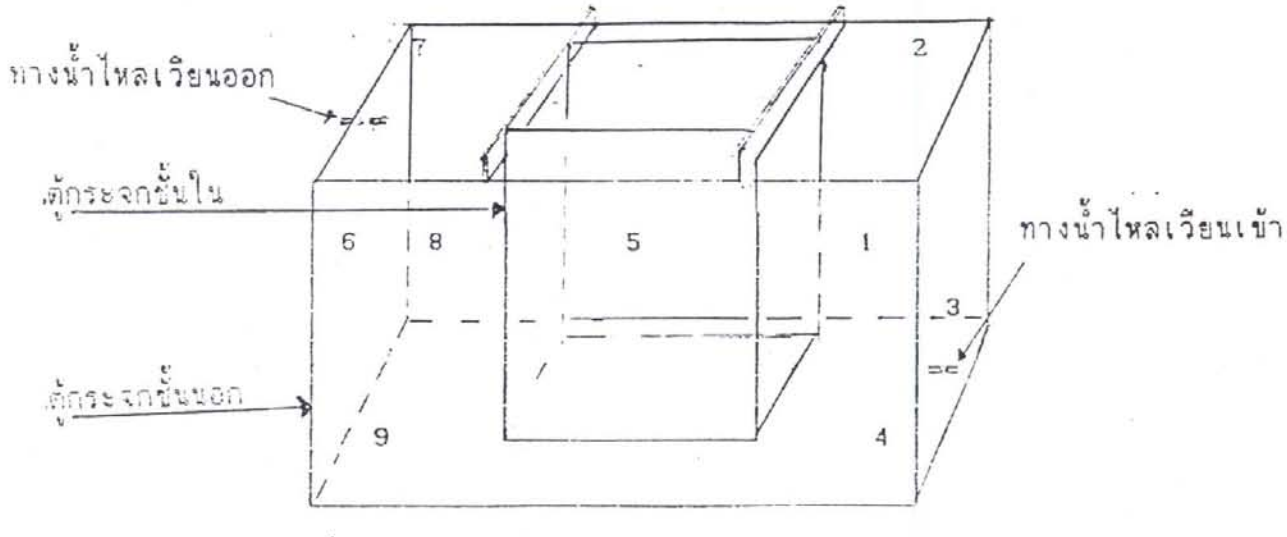


(6-1) (6-2)

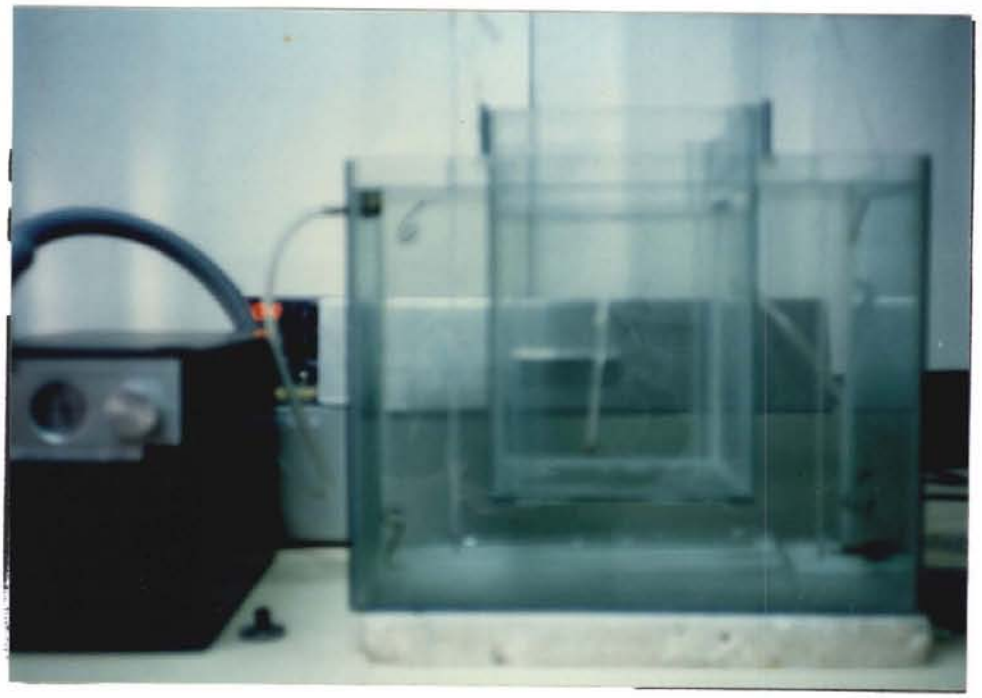
ภาพที่ 6 แสดงตำแหน่งบริเวณต่างๆที่กำหนดไว้วัดอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจก
(6-1)สำหรับตู้ขนาด 24x25.5x24 ซม.กับ 24x25.5x35 ซม.และ
(6-2)สำหรับตู้ขนาด 30x50x40 ซม.



ภาพที่ 7 การทดลองปรับอุณหภูมิของน้ำกลั่นในตู้กระจกโดยใช้
ท่อทองแดงเป็นตัวกลางถ่ายเทความร้อน



ภาพที่ 8 แสดงลักษณะการจัดวางตู้กระจก 2 ใบซ้อนกัน
และตำแหน่งของบริเวณที่วัดอุณหภูมิของน้ำกลั่น



ภาพที่ 9 การทดลองปรับอุณหภูมิน้ำกลั่นในตู้กระจกโดยใช้ตู้กระจกสองใบซ้อนกัน

ภาพที่ 10 การทดลองชั่งอะลูมิเนียมรูปพรรณในของเหลวที่นิ่งโดยทำการปรับและควบคุมอุณหภูมิด้วยเทคนิคและอุปกรณ์ที่ได้วิจัยพัฒนาขึ้นใหม่