

การพัฒนาเครื่องวัดความหนาแน่น
สำหรับชั้นบัพเฟอร์ของเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ



ภาคภูมิ พรหมเอื้อ

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

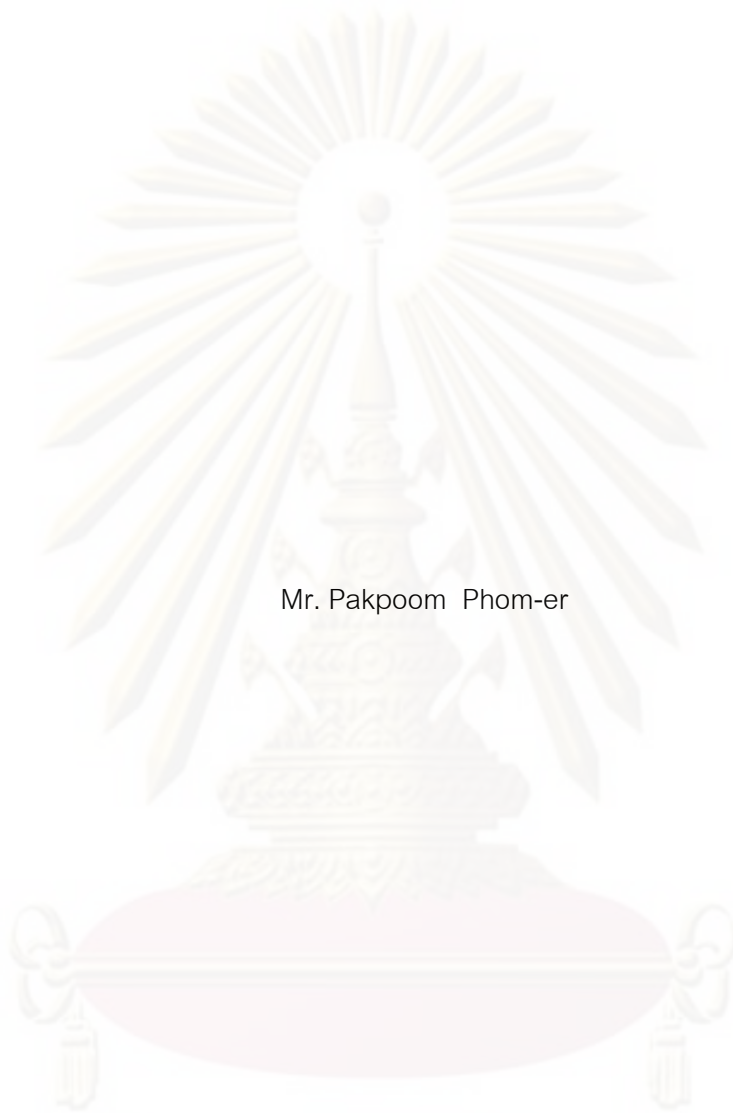
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2552

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A DENSITY MEASURING INSTRUMENT
FOR BUFFER LAYER OF TRISO NUCLEAR FUEL



Mr. Pakpoom Phom-er

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2009

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาเครื่องวัดความหนาแน่นสำหรับชั้นบัพเฟอร์ของ
เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ

โดย

นายภาคภูมิ พรหมเอื้อ

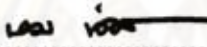
สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

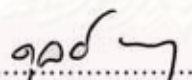
อ.ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต


..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศนირงวงศ์)

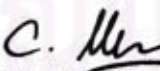
คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สัมฤทธิ์ นิลสุวรรณโฆสิต)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทร์ขาว)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชิดชนก มีใจเชื้อ)

ภาคภูมิ พรหมเอื้อ : การพัฒนาเครื่องวัดความหนาแน่นสำหรับชั้นบัฟเฟอร์ของเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ. (DEVELOPMENT OF A DENSITY MEASURING INSTRUMENT FOR BUFFER LAYER OF TRISO NUCLEAR FUEL) อ.ที่ปรึกษา
 วิทยานิพนธ์หลัก : อ.ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง, 61 หน้า.

ได้พัฒนาเครื่องวัดความหนาแน่นสำหรับชั้นบัฟเฟอร์ของเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ ซึ่งชั้นบัฟเฟอร์ที่ใช้เคลือบเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซในอนาคตนั้นได้ถูกออกแบบให้มีความหนาแน่นประมาณ 1.00 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นช่วงความหนาแน่นที่ใช้ในเครื่องวัดความหนาแน่นจะถูกจัดทำให้อยู่ในช่วง 0.90 - 1.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยจะใช้การผสมกันของไอโซโทปฟานอลและไดเอทิลีนไกลคอลเพื่อสร้างชั้นความหนาแน่นที่ต้องการ ลูกลอยที่ใช้เป็นตัวเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นทำมาจากพลาสติกทรงกลมกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ซึ่งลูกลอยจะถูกนำมาถ่วงน้ำหนักจนได้ค่าความหนาแน่นตามที่ต้องการ และจะถูกส่งไปวัดผลเพื่อหาค่าความหนาแน่นมาตรฐานก่อนจะนำมาใช้งาน โดยได้ผลการทดสอบความหนาแน่นของสารละลายและลูกลอยที่จัดทำโดยเทียบกับลูกลอยมาตรฐานให้ผลออกมาเป็นที่น่าพอใจ

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อนิติศ ภาคภูมิ พรหมเอื้อ
 สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ๑๐ ๗
 ปีการศึกษา...2552

5070394121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : DENSITY MEASURING / DENSITY GRADIENT COLUMN / TRISO
NUCLEAR FUEL / BUFFER LAYER / DENSITY TESTING

PAKPOOM PHOM-ER : DEVELOPMENT OF A DENSITY MEASURING
INSTRUMENT FOR BUFFER LAYER OF TRISO NUCLEAR FUEL.

THESIS ADVISOR : DOONYAPONG WONGSAWAENG, Ph.D., 61 pp.

A density measuring instrument for buffer layer of TRISO particle nuclear fuel was developed. The buffer layer of the particle fuel is typically fabricated with density of approximately 1.00 g/cm^3 . Thus, the range of density that the instrument needs to be able to measure is $0.90 - 1.10 \text{ g/cm}^3$. This was accomplished by using a liquid mixture of Isopropanol and Di-ethyleneglycol. Hollow spherical floats were made of plastic material with diameter of 15 millimeters. Each of the floats was loaded with appropriate amount of weight to obtain the desired density, which was later certified by an approved institution. The liquid mixture and floats were tested against commercial standard floats and results were satisfactory.

Department : NUCLEAR TECHNOLOGY.....

Field of Study : NUCLEAR TECHNOLOGY.....

Academic Year : 2009.....

Student's Signature *ภาคภูมิ พรหมเลิศ*

Advisor's Signature *ดร. โดONYAPO NG*

ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี สำหรับความรู้ ประสบการณ์ต่างๆ คำแนะนำที่มอบให้ ขอกราบขอบพระคุณ อ.ดร.ศุภยพงศ์ วงศ์แสง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รวมถึงคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีทุกท่านที่ช่วยดูแลเอาใจใส่

ข้าพเจ้าต้องขอกราบขอบพระคุณ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติที่ช่วยสนับสนุนเงินทุนในการทำวิจัย

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.ชิตชนก มีใจชื่อ อาจารย์ประจำภาควิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง และอาจารย์สมพงษ์ ชูติกุลสวัสดิ์ อาจารย์ห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ ชั้น 3 อาคารแถบนิเวศนิธิ ภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่คอยให้คำแนะนำและเป็นที่ปรึกษาถ่ายทอดความรู้ประสบการณ์ในการเตรียมการทดลองการหาค่าความหนาแน่นโดยใช้เทคนิค Density Gradient Column ให้แก่ข้าพเจ้า

ข้าพเจ้าขอขอบคุณ คุณสุรภิจ ชาวแก้ว สำหรับคำแนะนำต่าง ๆ ตลอดจนให้ความช่วยเหลือในการจัดทำชุดควบคุมระบบวัดระยะและระบบเลื่อนระดับในงานวิจัยชิ้นนี้

ข้าพเจ้าขอขอบคุณเพื่อนนิสิต รุ่นพี่ และรุ่นน้อง ตลอดจนบุคลากรทุกท่านในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ทุกคนที่คอยช่วยเหลือ ถามไถ่และให้กำลังใจ

สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า บิดา มารดา ที่อบรมสั่งสอน และพี่น้อง ที่คอยเป็นกำลังใจ ให้ข้าพเจ้าเสมอมา

ศูนย์วิทยุทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. แนวคิดและทฤษฎี.....	5
2.1 Density gradient column.....	5
2.2 การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นวัสดุ.....	7
2.3 สารละลาย.....	8
2.4 สารละลายของเหลวในของเหลว.....	9
2.5 เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ (TRISO Fuel Microsphere).....	10
2.6 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ.....	11
2.7 การแพร่ (Diffusion).....	18
3. วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	20

บทที่	หน้า
3.2 การทดสอบการเตรียมสารละลายและการสร้างชั้นความหนาแน่นจาก สารละลาย.....	23
3.3 การออกแบบและผลิตลูกลอยที่จะนำมาใช้งาน.....	24
3.4 การออกแบบกรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุม.....	29
3.5 ทดสอบลูกลอยพลาสติก.....	30
3.6 ทดสอบลูกลอยยาง.....	31
3.7 ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายกับค่าความ หนาแน่นของลูกลอย.....	33
4. ผลการทดสอบ.....	35
4.1 ผลการทดสอบการเตรียมสารละลายและการสร้างชั้นความหนาแน่นจาก สารละลาย.....	35
4.2 ผลการทดสอบลูกลอยพลาสติก.....	36
4.3 ผลการทดสอบลูกลอยยาง.....	37
4.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายกับค่าความ หนาแน่นของลูกลอย.....	37
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	51
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	51
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	52
รายการอ้างอิง.....	55
ภาคผนวก.....	56
ภาคผนวก ก REPORT ON TESTING AND ANALYSIS.....	57
ภาคผนวก ข รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์.....	58
ภาคผนวก ค CERTIFICATE OF CALIBRATION.....	59
ภาคผนวก ง CERTIFICATE OF CALIBRATION.....	60

สารบัญญัตราสาร

ตารางที่	หน้า
2.1	คู่มือของสารเคมีที่นำมาผสมและช่วงความหนาแน่นที่ได้ตาม ASTM D:1505..... 5
2.2	ชนิดของสารละลาย..... 9
3.1	ค่าความหนาแน่นของลูกลอยยาง 9 ลูก ที่ผลิตขึ้น..... 21
3.2	ค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติก 9 ลูก ที่ผลิตขึ้น..... 21
3.3	ค่าความหนาแน่นของลูกลอยมาตรฐานทั้ง 7 ลูก..... 22
3.4	อัตราส่วนในการผสมสารละลายสำหรับการทดสอบที่ 3.2..... 23
3.5	อัตราส่วนในการผสมสารละลายสำหรับการทดสอบที่ 3.5..... 30
3.6	ลูกลอยพลาสติกที่เลือกนำมาใช้ในการทดสอบ..... 31
3.7	อัตราส่วนในการผสมสารละลายสำหรับการทดสอบที่ 3.6..... 32
3.8	ลูกลอยยางที่เลือกนำมาใช้ในการทดสอบ..... 33
3.9	อัตราส่วนในการผสมสารละลายสำหรับการทดสอบที่ 3.7..... 33
4.1	ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งโดยเริ่มทำการวัดจากด้านล่างของกระบอกตวงจนถึงปากกระบอกตวงในการทดสอบลูกลอยมาตรฐานครั้งแรก..... 39
4.2	ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในการทดสอบครั้งแรก โดยทำการวัดจากตรงกลางของลูกลอยพลาสติกและเริ่มทำการวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง..... 40
4.3	ค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก..... 41
4.4	ระดับที่ได้เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ในการวัดบนตัวลูกลอยพลาสติก..... 42
4.5	ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งโดยเริ่มทำการวัดจากด้านล่างของกระบอกตวงจนถึงปากกระบอกตวงในการทดสอบลูกลอยมาตรฐานครั้งที่ 2..... 45
4.6	ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในการทดสอบครั้งที่ 2 โดยทำการวัดจากตรงกลางของลูกลอยพลาสติกและเริ่มทำการวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง..... 46
4.7	ค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งที่ 2..... 47

ตารางที่	หน้า
4.8	ระดับที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ในการวัดบนตัวลูกลอยพลาสติกจากการทดสอบในครั้งที่ 2..... 48
4.9	ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งที่ 2 กับค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก..... 50



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แบบจำลองการลอยตัวของ Floats และ ชิ้นวัสดุเมื่อทำการวัดค่าความหนาแน่น.....	7
2.2	แบบจำลองการวัดระยะระหว่าง Float กับ Specimen.....	7
2.3	รายละเอียดเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ (TRISO Fuel Microsphere).....	10
2.4	พิกโนมิเตอร์.....	13
2.5	เครื่องชั่งจลลิตีและขวดพิกโนมิเตอร์.....	15
2.6	การใช้ไฮโดรมิเตอร์วัดค่าความหนาแน่น.....	18
2.7	การแพร่.....	19
3.1	ลูกลอยมาตรฐาน.....	22
3.2	แบบร่างของลูกลอยที่จะผลิต.....	25
3.3	แม่พิมพ์ขึ้นรูปลูกลอยเกลียวใน.....	26
3.4	แม่พิมพ์ขึ้นรูปลูกลอยเกลียวนอก.....	26
3.5	ลูกลอยพลาสติกที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักและทดสอบค่าความหนาแน่น.....	27
3.6	ลักษณะของลูกลอยพลาสติกก่อนทำการถ่วงน้ำหนัก.....	27
3.7	ลูกลอยยางที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักและทดสอบค่าความหนาแน่น.....	28
3.8	ลักษณะของลูกลอยยางก่อนทำการถ่วงน้ำหนัก.....	28
3.9	กรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุมที่ออกแบบมาใช้ในการวิจัยโดยเฉพาะ.....	29
4.1	ลูกลอยมาตรฐานทั้ง 7 ลูก ลอยอยู่ในสารละลายที่เตรียมขึ้น.....	35
4.2	Isopropanol กับ Di-ethyleneglycol และสารละลายที่ได้จากการผสม.....	36
4.3	ลูกลอยพลาสติกทั้ง 5 ลูก ที่นำมาทดสอบในสารละลาย.....	36
4.4	ลูกลอยยางทั้ง 4 ลูก ที่นำมาทดสอบในสารละลาย.....	37
4.5	ผลการทดสอบลูกลอยพลาสติกเทียบกับลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก.....	38
4.6	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยมาตรฐานลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยมาตรฐาน (เริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง).....	39

รูปที่	หน้า	
4.7	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งแรก (ใช้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยตามที่ TISTR รับรองและเริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง).....	40
4.8	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งแรก (ใช้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยที่ผู้วิจัยวัดค่าโดยการชั่งน้ำหนักเทียบกับปริมาตรและเริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง).....	41
4.9	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของลูกลอยพลาสติกจากการทดสอบในครั้งแรกระหว่างค่าความหนาแน่นใหม่ที่คำนวณได้กับตำแหน่งที่ใช้ในการวัดระดับบนตัวลูกลอยพลาสติก (ด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างของลูกลอยพลาสติก).....	43
4.10	ผลการทดสอบลูกลอยพลาสติกเทียบกับลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งที่ 2.....	44
4.11	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยมาตรฐานลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งที่ 2 (เริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง).....	45
4.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งที่ 2 (ใช้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยตามที่ TISTR รับรองและเริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง).....	46
4.13	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งที่ 2 (ใช้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยที่ผู้วิจัยวัดค่าโดยการชั่งน้ำหนักเทียบกับปริมาตรและเริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง).....	47
4.14	กราฟแสดงความสัมพันธ์ของลูกลอยพลาสติกจากการทดสอบในครั้งที่ 2 ระหว่างค่าความหนาแน่นใหม่ที่คำนวณได้กับตำแหน่งที่ใช้ในการวัดระดับบนตัวลูกลอยพลาสติก (ด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างของลูกลอยพลาสติก).....	49

รูปที่		หน้า
4.15	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายจากการทดสอบครั้งที่ 2 กับค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก.....	50
5.1	โครงสร้างระบบของเครื่องวัดความหนาแน่น.....	54



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

อุปกรณ์ที่วัดระดับความหนาแน่น (Density gradient column) ใช้วัดค่าความหนาแน่นของสิ่งของขนาดเล็ก ที่ไม่สามารถหาปริมาตรได้อย่างแม่นยำ ซึ่งในทางนิวเคลียร์ได้นำมาใช้ในการวัดเพื่อหาค่าความหนาแน่นของวัสดุที่จะนำมาทำชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer) และชั้นอื่น ๆ ที่ใช้เคลือบเม็ดเชื้อเพลิงแบบไตรโซ (TRISO) สำหรับเตาปฏิกรณ์อุณหภูมิสูงแบบระบายความร้อนด้วยแก๊ส (High-Temperature Gas-Cooled Reactor) ในอนาคต อุปกรณ์ที่จัดทำจะมีช่วงการวัดค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง 0.90 - 1.10 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) เหตุผลที่ต้องการวัดความหนาแน่นในช่วงนี้ เพราะว่าชั้น Buffer ที่ใช้เคลือบเม็ดเชื้อเพลิงแบบไตรโซ (TRISO Fuel Microsphere) สำหรับ High-Temperature Gas-Cooled Reactor ในอนาคตนั้น ได้ถูกออกแบบให้มีความหนาแน่นประมาณ 1.00 g/cm^3 ชั้น Buffer นี้ต้องมีความหนาแน่นแม่นยำตามที่ได้ออกแบบไว้ เพราะหากความหนาแน่นที่ผลิตออกมาแตกต่างจากที่ได้ออกแบบไว้ อาจทำให้เม็ดเชื้อเพลิงเสียหายระหว่างการใช้งานได้ Density gradient column เป็นเครื่องมือในขั้นตอนควบคุมคุณภาพที่สำคัญของชั้น Buffer ในการผลิต TRISO Fuel Microsphere ปัจจุบัน Density gradient column ได้ถูกผลิตขายในราคาที่สูงมาก อีกทั้งระบบการวัดค่ายังไม่แม่นยำ เนื่องจากในปัจจุบันการวัดค่าจะทำโดยใช้ไม้บรรทัดหรือตลับเมตรวัดออกมา ดังนั้นการทำวิจัยชิ้นนี้จึงเน้นไปที่การประดิษฐ์ Density gradient column ออกมาเพื่อใช้งานในการวัดค่าความหนาแน่นของวัสดุที่จะนำมาทำชั้น Buffer และชั้นอื่น ๆ สำหรับใช้ในงานผลิตเม็ดเชื้อเพลิงต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาอุปกรณ์วัดความหนาแน่นแบบ Density Gradient Column สำหรับใช้วัดค่าความหนาแน่นของชั้น Buffer ซึ่งใช้เคลือบเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ สำหรับ High-Temperature Gas-Cooled Reactor

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 สร้างลูกลอย (Floats) ไม่เกิน 5 ลูก ซึ่งแต่ละลูกจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.90 - 1.10 \text{ g/cm}^3$
- 1.3.2 สรรหาของเหลวที่เหมาะสมซึ่งสามารถนำมาใช้ร่วมกับลูกลอย ในช่วงความหนาแน่นข้างต้นได้
- 1.3.3 สร้าง Density Gradient Column สำหรับวัดความหนาแน่นของตัวอย่าง

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 จัดเตรียมเครื่องมือและวัสดุ ดังต่อไปนี้
 - 1.4.2.1 เตรียมของเหลวที่จะใช้ใน Density gradient column โดยของเหลวต้องมีระดับความหนาแน่นภายในหลอดออกมาอยู่ในช่วงที่ต้องการ อีกทั้งของเหลวที่จะใช้ภายในหลอดวัดนั้นยังต้องใสและไม่ทำลายชิ้นงานที่จะนำมาวัดค่าด้วย
 - 1.4.2.2 วัสดุที่จะใช้ทำหลอดบรรจุของเหลว
 - 1.4.2.3 วัสดุที่จะนำมาใช้ในการทำลูกลอย
- 1.4.3 ทดสอบของเหลวและระดับความหนาแน่น เนื่องจากการที่จะทำให้ลูกลอยสามารถลอยอยู่ที่ตำแหน่งของระดับความหนาแน่นที่เจาะจงได้นั้น จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำให้ของเหลวภายในหลอดวัดมีค่าความหนาแน่นไล่ระดับกันในช่วงของความหนาแน่นที่ต้องการ
- 1.4.4 จัดทำและขึ้นรูปลูกลอยให้ได้ค่าความหนาแน่นตามที่ต้องการ และทดสอบเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกับลูกลอยที่ได้จัดซื้อ
- 1.4.5 ทดลองขั้นสุดท้าย โดยวัดความหนาแน่นของ Buffer และนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นจริง หรือวัดความหนาแน่นของวัสดุอื่น ๆ ที่มีความหนาแน่นใกล้เคียงกับ Buffer (หากไม่สามารถหาตัวอย่างของชั้น Buffer ได้)

1.4.6 สรุปผลการทดลองและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้อุปกรณ์วัดความหนาแน่นแบบ Density Gradient Column สำหรับใช้วัดค่าความหนาแน่นของชั้น Buffer ซึ่งใช้เคลือบเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ สำหรับ High-Temperature Gas-Cooled Reactor

1.6 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 N.A. Pratten [1] (1981) ได้ทำการวิจัยโดยใช้เทคนิคในการหาค่าความหนาแน่นของนักวิจัยหลาย ๆ ท่าน เพื่อนำมาใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของชิ้นงานขนาดเล็กให้ได้อย่างแม่นยำ โดยงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การหาเทคนิคที่จะใช้หาค่าความหนาแน่นของสิ่งของขนาดเล็กให้ได้อย่างแม่นยำซึ่งเทคนิคที่ใช้ยังต้องเหมาะกับการใช้งานในห้องทดลองที่มีขนาดจำกัด อีกทั้งยังต้องใช้หาค่าความหนาแน่นเมื่อชิ้นงานนั้นเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความหนาแน่นไปได้อีกด้วย และเทคนิคที่นำมาใช้ทดลองมีดังนี้ Displacement methods, พิคโนมิเตอร์ (Pycnometry), Density gradient column, การชั่งน้ำหนักเทียบกับน้ำ (Hydrostatic weighing), คาร์ทีเซียนไดเวอร์ (Cartesian diver) ผลที่ได้จากการทดลองพบว่า Cartesian diver มีความแม่นยำมากที่สุด ลองลงมาจะเป็น Density gradient column, Hydrostatic weighing, Pycnometry และ Displacement methods ตามลำดับ

1.6.2 K.S.B. Rose, J. Williams และ G. Potts [2] (1974) ได้นำเสนอเทคนิคการหาค่าความหนาแน่นของวัสดุขนาดเล็กที่มีความหนาแน่นสูงในแบบที่ยังไม่ผ่านการฉายรังสีและผ่านการฉายรังสีแล้ว โดยวัสดุที่นำมาใช้ทดสอบเป็นยูเรเนียมไดออกไซด์ (UO_2) ใช้ Density gradient column เป็นเครื่องมือในการวัดค่าความหนาแน่น ซึ่งใช้เทคนิคในการปรับเทียบ (Calibrate) เครื่องมือดังนี้ ท่อที่ใช้เป็นท่อแก้วเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 มิลลิเมตร (mm) ยาว 850 mm โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 23 ± 1 องศาเซลเซียส ($^{\circ}C$) ของเหลวที่ใช้เป็นสารผสมระหว่างไตรเอทิลฟอสเฟต (Triethylphosphate) และเตตระโบรโมอีเทน (Tetrabromo-ethane) โดยผสมให้ได้ค่าความหนาแน่นออกมาอยู่ในช่วง 2.5 และ 2.6 g/cm^3 ซึ่งผลการทดสอบวัดค่าที่ได้ ได้ผลออกมาอย่างแม่นยำ

1.6.3 D.C. Canada และ W. R. Laing [3] (1967) ได้นำเสนอเทคนิคการใช้ Density gradient column เพื่อหาค่าความหนาแน่นของวัสดุที่จะนำมาทำเป็นชั้นเคลือบเม็ดเชื้อเพลิงแบบทรงกลมขนาดเล็ก (Microspheres) ที่ใช้ในเครื่องปฏิกรณ์ขั้นสูงแบบระบายความร้อนด้วยแก๊ส (Advanced Gas Cooled reactor) โดยวัสดุที่จะนำมาหาค่าความหนาแน่นนี้จะถูกนำมาทำเป็นชั้นไพโรคาร์บอน (Pyrocarbon) โดย Density gradient column นี้จะนำเอาของเหลวที่ทราบค่าความหนาแน่นมาผสมกันจนได้ช่วงความหนาแน่นออกมาตามที่ต้องการ ซึ่งของเหลวผสมจะถูกบรรจุอยู่ในท่อแก้วที่มี Float บวกตำแหน่งความหนาแน่นลอยอยู่ วัสดุที่จะนำมาวัดค่าจะถูกบรรจุลงในเครื่องวัดก่อนจะทำการอ่านค่าต่อไป ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้ Density gradient column มีความแม่นยำในการวัดค่าความหนาแน่นของวัสดุที่จะนำมาทำเป็นชั้นเคลือบเม็ดเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี

บทที่ 2 แนวคิดและทฤษฎี

2.1 Density gradient column

Density gradient column เป็นกระบอกตรงซึ่งมีขนาดใหญ่และสูง ภายในบรรจุด้วยสารละลายที่เกิดจากสารเคมีผสมในอัตราส่วนที่ต่างกัน โดยสารละลายที่มีความหนาแน่นสูงจะอยู่ด้านล่างสุดของกระบอก และความหนาแน่นของสารละลายจะลดลงเรื่อย ๆ จนถึงปากกระบอกตรง ซึ่งจะเป็นจุดที่สารละลายมีความหนาแน่นน้อยที่สุด การเตรียมสารละลายที่จะบรรจุลงไปภายในกระบอกตรงนี้จะเตรียมจากการผสมสารเคมีที่เป็นของเหลวที่มีความสามารถในการเข้ากันได้เป็นอย่างดี 2 ชนิด โดยสารเคมีทั้งสองที่จะนำมาใช้ในการผสมจะต้องมีคุณสมบัติสำคัญดังต่อไปนี้ [4]

2.1.1 ผสมเข้ากันได้จนเป็นเนื้อเดียวกัน

2.1.2 ไม่ทำปฏิกิริยาต่อกัน

2.1.3 มีค่าความหนืดต่ำ และระเหยกลายเป็นไอได้ยาก

2.1.4 มีความเฉื่อยต่อตัวอย่างที่จะนำมาทดสอบ คือไม่ทำให้เกิดการละลาย ไม่ทำให้เกิดการพองตัว ไม่เกิดปฏิกิริยา

2.1.5 เป็นของเหลวใส ปราศจากสี

คู่ของสารเคมีที่สามารถนำมาทำ Density gradient column ได้นั้นมีหลายชนิด ซึ่งในแต่ละคู่ก็จะให้ช่วงความหนาแน่นที่แตกต่างกันออกไปดังตารางต่อไปนี้

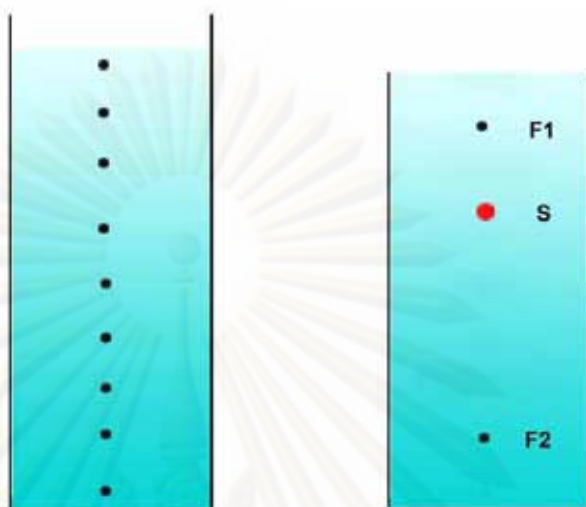
ตารางที่ 2.1 คู่ของสารเคมีที่นำมาผสมและช่วงความหนาแน่นที่ได้ตาม ASTM D:1505

ความหนาแน่น (g/cm ³)	สารที่ 1	สารที่ 2
0.79 - 0.98	Isopropanol	Water
0.79 - 0.98	Ethanol	Water
0.79 - 1.11	Isopropanol	Di-ethyleneglycol
0.79 - 1.59	Ethanol	Carbon Tetrachloride

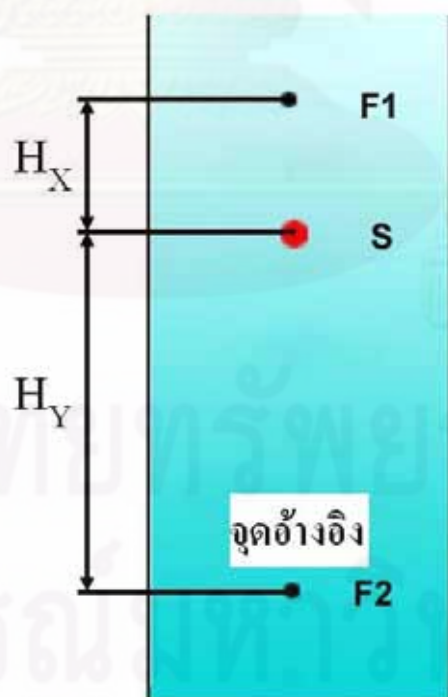
0.87 - 1.59	Toluene	Carbon Tetrachloride
0.98 - 1.00	Ethanol/Water	Water/Potassium-iodide
1.00 - 1.41	Water	Sodium Bromide
1.00 - 1.60	Water	Potassium Iodide
1.00 - 1.60	Water	Calcium Nitrate
1.10 - 2.80	Tetra-Bromoethane	Triethylphosphate
1.60 - 1.99	Carbon Tetrachloride	Trimethylenedibromide
1.99 - 2.18	Trimethylenedibromide	Ethylenebromide
2.19 - 2.89	Ethylenebromide	Bromoform
2.80 - 3.30	Triethylphosphate	Diodomethane

เมื่อเตรียมสารละลายในระบบออกดวงจนได้ชั้นความหนาแน่นตามที่ต้องการแล้ว จะนำลูกลอยมาตรฐานที่ทราบค่าความหนาแน่นใส่ลงไปในระบบออกดวง เพื่อวัดระดับความลึก ณ ตำแหน่งความหนาแน่นในชั้นสารละลาย จากนั้นนำตัวอย่างที่ต้องการทราบค่าความหนาแน่นใส่ ลงไปในระบบออกดวงแล้วทำการวัดระดับความลึกเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับตำแหน่งความลึกของ ลูกลอยมาตรฐาน ซึ่งจะทำให้ทราบค่าความหนาแน่นของชิ้นตัวอย่างที่นำมาทดสอบได้ทันที Density gradient column มักจะนิยมใช้ในการหาค่าความหนาแน่นของวัสดุขนาดเล็กที่จำเป็น จะต้องใช้ในจำนวนมาก ๆ ซึ่งจะทำให้การหาค่าความหนาแน่นสะดวกและรวดเร็ว อีกทั้งยังให้ผล การวัดที่ละเอียดอีกด้วย

2.2 การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของชิ้นวัสดุ



รูปที่ 2.1 แบบจำลองการลอยตัวของ Floats และ ชิ้นวัสดุเมื่อทำการวัดค่าความหนาแน่น



รูปที่ 2.2 แบบจำลองการวัดระยะระหว่าง Float กับ Specimen

การคำนวณหาค่าความหนาแน่นของขึ้นวัสดุทำได้ดังสมการต่อไปนี้

$$D_s = \frac{(D_2 H_x + D_1 H_y)}{(H_x + H_y)}$$

เมื่อ

- D_s = ค่าความหนาแน่นของ ขึ้นวัสดุ S (g/cm^3)
 D_1 = ค่าความหนาแน่นของ Floats F_1 (g/cm^3)
 D_2 = ค่าความหนาแน่นของ Floats F_2 (g/cm^3)
 H_x = ระยะที่วัดได้จากจุดอ้างอิง ถึง ตำแหน่งของ Floats F_1 (cm)
 H_y = ระยะที่วัดได้จากจุดอ้างอิง ถึง ตำแหน่งของ ขึ้นวัสดุ (cm)

2.3 สารละลาย

สารละลาย คือ สารผสมเนื้อเดียวของสารสองหรือมากกว่าสองชนิด ปริมาณของส่วนประกอบเปลี่ยนแปลงได้ แต่ก็เปลี่ยนแปลงอยู่ในขอบเขตจำกัด ส่วนประกอบของสารละลายมักเป็นสารบริสุทธิ์อาจเป็นแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง ส่วนประกอบที่มีปริมาณมากกว่า เรียกว่า ตัวทำละลาย ส่วนประกอบที่มีปริมาณน้อยกว่า เรียกว่า ตัวถูกละลาย สารละลายอาจมีตัวถูกละลายมากกว่าหนึ่งชนิด สารละลายจัดเป็นสารผสมดังนั้นสมบัติของสารละลายจึงไม่ต่างจากสมบัติของส่วนประกอบ ถึงแม้จะเป็นสารผสมแต่สารละลายก็มีเนื้อเดียวกันโดยตลอดไม่มีขอบเขตทางกายภาพแบ่งส่วนภายในระบบ มีสมบัติเหมือนกันทุกส่วน เช่น ความหนาแน่น มวลของสารละลายเท่ากับผลบวกของมวลของส่วนประกอบรวมกัน แต่ปริมาตรของสารละลายอาจเท่าหรือไม่เท่ากับผลบวกของปริมาตรของส่วนประกอบ [5]

ชนิดของสารละลาย สารละลายอาจมีสถานะเป็นแก๊ส ของเหลว หรือของแข็ง ใดอย่างหนึ่ง แต่เนื่องจากส่วนประกอบของสารละลายอาจจะเป็นแก๊ส ของเหลว หรือของแข็งก็ได้ จึงทำให้สารละลายมีได้ถึง 9 ชนิดตามประเภทของตัวถูกละลายและตัวทำละลาย ดังตาราง

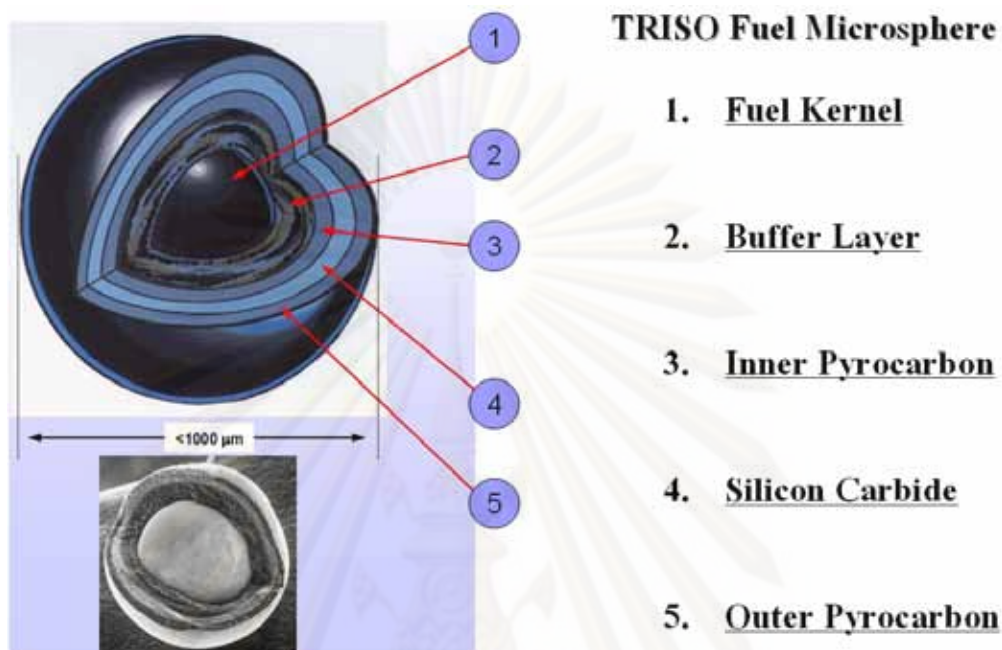
ตารางที่ 2.2 ชนิดของสารละลาย

สารละลาย	ตัวถูกละลาย	ตัวทำละลาย
แก๊ส	แก๊ส	แก๊ส
	ของเหลว	แก๊ส
	ของแข็ง	แก๊ส
ของเหลว	แก๊ส	ของเหลว
	ของเหลว	ของเหลว
	ของแข็ง	ของเหลว
ของแข็ง	แก๊ส	ของแข็ง
	ของเหลว	ของแข็ง
	ของแข็ง	ของแข็ง

2.4 สารละลายของเหลวในของเหลว

ถ้าผสมของเหลวสองชนิดเข้าด้วยกันไม่ว่าจะใช้ปริมาณของสารประกอบเท่าไรก็ตามแล้วได้สารละลายเนื้อเดียว จะสามารถกล่าวได้ว่าของเหลวทั้งสอง “ เข้ากันได้อย่างสมบูรณ์ ” แต่ในกรณีที่ของเหลวที่เป็นสารประกอบแยกตัวกันไม่รวมกันเลยแม้แต่น้อย เช่นนี้กล่าวได้ว่าของเหลวทั้งสอง “ เข้ากันไม่ได้ ” ของเหลวบางชนิด “ เข้ากันได้บางส่วน ” หมายความว่าปริมาณการละลายมีขอบเขตจำกัด การปนกันได้หรือไม่ได้ระหว่างของเหลวคู่หนึ่งมีเหตุเนื่องมาจากโครงสร้างโมเลกุล ถ้าโครงสร้างโมเลกุลคล้ายกันและชนิดของแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลคล้ายกันของเหลวทั้งสองจะผสมเข้ากันได้ดี ของเหลวที่มีโมเลกุลเป็นโมเลกุลมีขั้วจะละลายได้ดีในของเหลวที่มีโมเลกุลเป็นโมเลกุลมีขั้วเหมือนกัน ของเหลวที่มีโมเลกุลเป็นโมเลกุลไม่มีขั้วจะละลายได้ในของเหลวชนิดที่ไม่มีขั้วเหมือนกัน ถ้าเป็นของเหลวที่มีโมเลกุลต่างขั้วกันจะไม่ผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน [5]

2.5 เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ (TRISO Fuel Microsphere)



รูปที่ 2.3 รายละเอียดเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ (TRISO Fuel Microsphere)

เม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ (TRISO Fuel Microsphere) ประกอบไปด้วย 5 ชั้น ดังต่อไปนี้ [6]

2.5.1 เม็ดเชื้อเพลิง (Fuel Kernel) โดยปกติ Fuel Kernel จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง $200\ \mu\text{m} - 600\ \mu\text{m}$ เชื้อเพลิงที่นำมาใช้จะมีหลายชนิด โดยส่วนใหญ่จะใช้ UO_2 และ UCO นอกจากนี้ Fission Products ที่เกิดขึ้นก็จะถูกกักเก็บไว้ภายในนี้ด้วย

2.5.2 ชั้นบัฟเฟอร์ (Buffer Layer) ในชั้นนี้将有ความหนาอยู่ประมาณ $100 - 150\ \mu\text{m}$ ประกอบไปด้วยไพโรคาร์บอนความหนาแน่นต่ำ (Low density Pyrocarbon) ที่ออกแบบมาเพื่อรองรับผลผลิตจากการแบ่งแยกนิวเคลียส (Fission products) ที่ซึมออกมาจากชั้น Fuel Kernel ซึ่ง Fission products จะอยู่ภายในช่องว่างของชั้นนี้ นอกจากนี้ Buffer Layer ยังรองรับการขยายตัวออกของ Fuel Kernel ระหว่างเดินเครื่องปฏิกรณ์อยู่ด้วย ซึ่งความหนาแน่นของ Buffer Layer นี้จะมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.90 - 1.10\ \text{g/cm}^3$

2.5.3 ไพล์คาร์บอนชั้นใน (Inner Pyrocarbon) เป็นชั้นแรกที่จะป้องกันการรั่วไหลของ Fission Products และกักเก็บ Fission Products ที่อยู่ในสถานะก๊าซ เช่น คริปตอน ซีนอน นอกจากนี้ยังป้องกัน Fuel Kernel ไม่ให้ทำปฏิกิริยากับซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) ระหว่างการเคลือบชั้น Silicon Carbide ด้วย ชั้น Inner Pyrocarbon จะเกิดการหดตัวระหว่างเดินเครื่องปฏิกรณ์

2.5.4 ซิลิกอนคาร์ไบด์ (Silicon Carbide) ชั้นนี้มีหน้าที่กักเก็บและรับแรงดัน Fission Products ที่เป็นก๊าซหรือไอระเหยไม่ให้รั่วออกไป

2.5.5 ไพล์คาร์บอนชั้นนอก (Outer Pyrocarbon) เป็นวัสดุชนิดเดียวกับกับชั้น Inner Pyrocarbon ในชั้นนี้จะช่วยป้องกันการสึกกร่อนของชั้น Silicon Carbide ในระหว่างการผลิตเพื่อขึ้นรูปเม็ดเชื้อเพลิงด้วย นอกจากนี้การหดตัวของชั้น Inner Pyrocarbon และ Outer Pyrocarbon ยังส่งผลทำให้ชั้น Silicon Carbide เกิดการบีบอัดขึ้นภายใน ซึ่งมีผลให้เม็ดเชื้อเพลิงมีเสถียรภาพมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

2.6 การทดสอบหาค่าความหนาแน่นและความถ่วงจำเพาะ

ตามทฤษฎีที่กล่าวว่า “ความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างค่าความหนาแน่นของวัตถุ กับค่าความหนาแน่นของของไหลมาตรฐาน” การทดสอบวัสดุส่วนมาก วัสดุจะอยู่ในรูปของแข็งได้แก่ดิน หิน แร่ ออกไซด์ และสารประกอบต่าง ๆ ซึ่งของไหลมาตรฐานที่ใช้ ได้แก่ น้ำ โดยที่น้ำมีความหนาแน่นประมาณ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ดังนั้นค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุใด ๆ ที่ใช้ค่าความหนาแน่นของน้ำเป็นของไหลมาตรฐานในการเปรียบเทียบ จึงมีค่าใกล้เคียงที่สุด หรือถือได้ว่าเท่ากับค่าความหนาแน่นของวัตถุนั้น ๆ ดังนี้ [7]

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะของวัตถุ} &= \frac{\text{ความหนาแน่นของวัตถุ}}{\text{ความหนาแน่นของน้ำ}} \\ &= \text{ความหนาแน่นของวัตถุ} / 1 \end{aligned}$$

ดังนั้น $\text{ความถ่วงจำเพาะของวัตถุ} = \text{ความหนาแน่นของวัตถุ}$

ค่าความหนาแน่นที่ได้จากการทดสอบ จึงหมายถึง ค่าความถ่วงจำเพาะของวัตถุนั้น ๆ ซึ่งการทดสอบหาค่าความหนาแน่นมีหลายวิธี จำแนกตามลักษณะของวัสดุที่ต้องการทดสอบ เช่น วัสดุอยู่ในรูปผงจะหาความหนาแน่นโดยใช้ขวดพิคโนมิเตอร์ (Pycnometer) หาก

เป็นก้อนวัสดุจะใช้การชั่งน้ำหนักวัสดุนำมาเปรียบเทียบกับมวลของน้ำ ถ้าเป็นของผสม เช่น น้ำดิน น้ำเคลือบ ใช้การหาค่าความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนัก หรือใช้ไฮโดรมิเตอร์ แต่หากของผสมอยู่ในรูปผงแห้งสามารถหาค่าความหนาแน่นโดยการคำนวณ ซึ่งรายละเอียดของการทดสอบแต่ละวิธีมีดังต่อไปนี้

2.6.1 การหาค่าความหนาแน่นโดยใช้ขวดพิกโนมิเตอร์

เป็นการหาค่าความหนาแน่นของวัสดุที่คิดจากความหนาแน่นที่แท้จริง ไม่รวมช่องว่างหรือรูพรุนใด ๆ ทั้งสิ้นโดยวัสดุที่นำมาหาจะต้องเป็นผงและเป็นวัสดุที่ไม่ละลายน้ำ มีวิธีการทดสอบดังนี้

2.6.1.1 อบขวดพิกโนมิเตอร์พร้อมฝาให้แห้งสนิท ชั่งน้ำหนักบนตีกน้ำหนักเป็น P (กรัม)

2.6.1.2 เติมน้ำกลั่นบนตีกอุณหภูมิของน้ำกลั่นเป็น T_1 (องศาเซลเซียส) ปิดฝาและชั่งน้ำหนัก บนตีกน้ำหนักเป็น W_1 (กรัม)

2.6.1.3 เทน้ำกลั่นทิ้ง อบขวดให้แห้ง

2.6.1.4 ใส่ตัวอย่างที่ผ่านการบด ผ่านตะแกรง 100 เมช และอบแห้งประมาณ 8 - 12 กรัม ลงในขวด ปิดฝาชั่งน้ำหนักบนตีกน้ำหนักเป็น W (กรัม)

2.6.1.5 เติมน้ำกลั่น บนตีกอุณหภูมิของน้ำกลั่นเป็น T_2 (องศาเซลเซียส) ปิดฝาชั่งน้ำหนัก บนตีกน้ำหนักเป็น W_2 (กรัม) (อุณหภูมิ T_1 และ T_2 ควรแตกต่างกันไม่เกิน 5 องศาเซลเซียส)

2.6.1.6 คำนวณตามสูตร

$$\text{ความหนาแน่น (D)} = \frac{d_1 d_2 (W - P)}{(0.999973) [T_2 (W_1 - P) - T_1 (W_2 - W)]}$$

เมื่อ

- d_1 หมายถึงความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ T_1 (g/cm^3)
 d_2 หมายถึงความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิ T_2 (g/cm^3)
 P หมายถึงน้ำหนักของขวดพิคโนมิเตอร์ และฝาปิด (g)
 W หมายถึงน้ำหนักของขวดพิคโนมิเตอร์ ฝาปิดและตัวอย่าง (g)
 W_1 หมายถึงน้ำหนักของขวดพิคโนมิเตอร์ ฝาปิดและน้ำกลั่น (g)
 W_2 หมายถึงน้ำหนักของขวดพิคโนมิเตอร์ ฝาปิด ตัวอย่าง และน้ำกลั่น(g)

2.6.1.7 การรายงานค่าต้องรายงานถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 3 และการทดสอบซ้ำค่าที่ได้ควรแตกต่างจากครั้งแรกไม่เกิน 0.005

จากการคำนวณตามสูตรในข้อ 2.6.1.6 เนื่องจาก ความหนาแน่นของน้ำที่อุณหภูมิต่าง ๆ มีค่าประมาณ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร จึงสามารถคำนวณค่าความถ่วงจำเพาะได้จากสูตร

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{(W - P)}{(W_1 - P)} \quad \text{หรือ} \quad \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่าง}}{\text{น้ำหนักของน้ำกลั่น}}$$



รูปที่ 2.4 พิคโนมิเตอร์

2.6.2 การหาค่าความหนาแน่นโดยการชั่งน้ำหนัก

การนำวิธีการชั่งน้ำหนักวัสดุมาใช้ในการหาค่าความหนาแน่นและค่าความถ่วงจำเพาะ จำแนกเป็น 2 วิธีตามลักษณะของวัสดุที่นำมาทดสอบ ดังต่อไปนี้

2.6.2.1 เมื่อวัสดุ หรือตัวอย่างที่ต้องการทดสอบเป็นก้อน ในรูปของแข็งไม่ละลายน้ำ เช่น หินปูนม้า หินเขียวหนุมาน หรือผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการเผาแล้วจะทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ โดยใช้เครื่องชั่งจอลลี (Jolly Balance) จากทฤษฎีที่กล่าวว่า ค่าความถ่วงจำเพาะเป็นอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างมวลของวัตถุและมวลของน้ำ ดังนั้นจึงสามารถวัดหรือชั่งน้ำหนักของวัสดุในน้ำและน้ำหนักของวัตถุในอากาศ เพื่อนำมาคำนวณตามสูตร

$$\text{ความถ่วงจำเพาะ} = \frac{W_A}{(W_A - W_W)}$$

เมื่อ

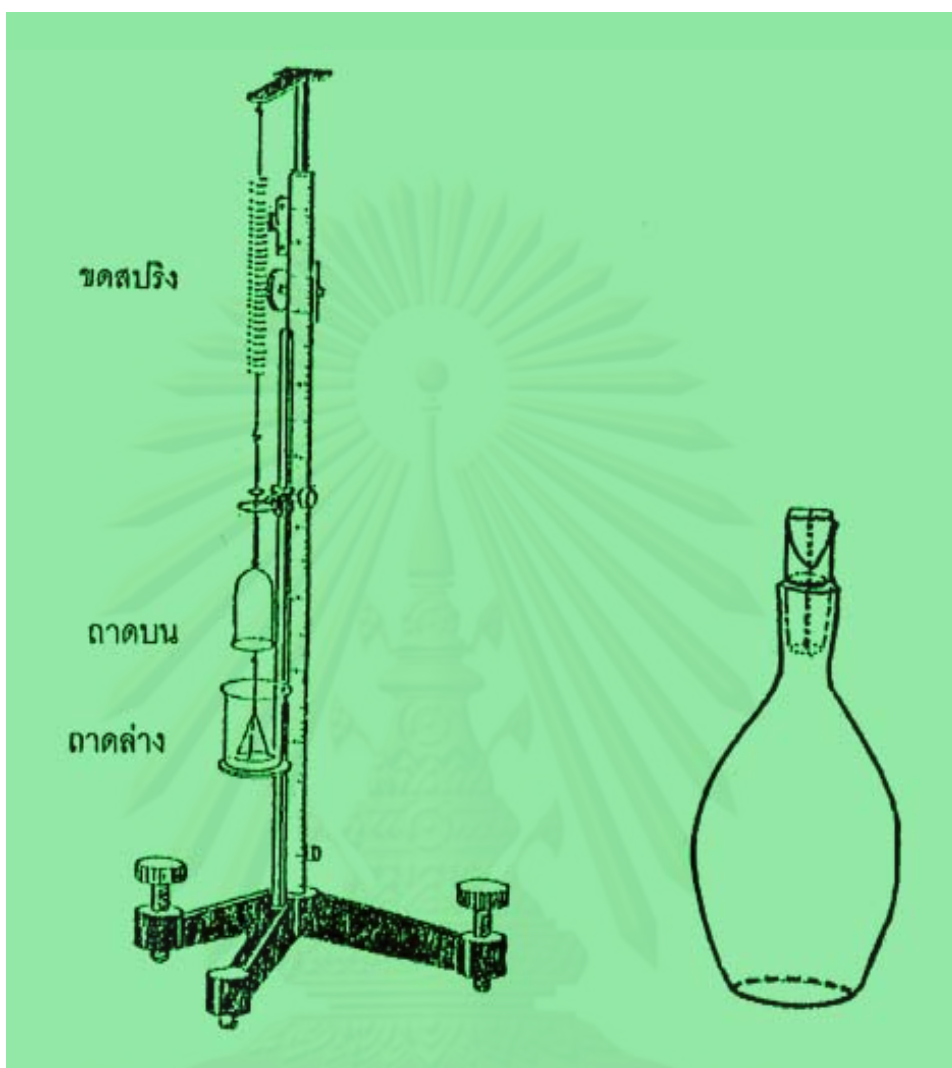
W_A หมายถึง น้ำหนักในอากาศ (g)

W_W หมายถึง น้ำหนักในน้ำ (g)

$W_A - W_W$ หมายถึง น้ำหนักที่หายไปในน้ำ หรือ น้ำหนักของน้ำ ที่ปริมาตรเท่ากัน

เครื่องชั่งจอลลี หลักการทำงานของเครื่องนั้นจะมีถาดสำหรับวางวัตถุจำนวนสองถาด ถาดบนสำหรับชั่งน้ำหนักตามปกติที่เรียกว่า “น้ำหนักในอากาศ” ส่วนถาดล่างจะชั่งวัตถุที่อยู่ในน้ำจะได้ค่าน้ำหนักที่เรียกว่า “น้ำหนักในน้ำ” ซึ่งค่าน้ำหนักที่อ่านได้จะอยู่บนสเกล โดยจะทำการอ่านค่าทั้งค่าที่ชั่งในน้ำและค่าที่ชั่งในอากาศ เพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าความถ่วงจำเพาะต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 เครื่องชั่งจลลลีและขวดพิคโนมิเตอร์

2.6.2.2 สำหรับตัวอย่างที่เป็นของผสมในรูปของของไหล เช่น น้ำดิน และน้ำเคลือบ เราสามารถใช้การชั่งน้ำหนักในการหาค่าความหนาแน่น โดยนำหลักการตามทฤษฎีที่กล่าวไว้ว่า ความหนาแน่นได้แก่อัตราส่วนของมวลต่อปริมาตรมาใช้ ซึ่งมีวิธีการปฏิบัติในการทดสอบดังนี้

2.6.2.2.1 ชั่งน้ำหนักภาชนะที่รู้ปริมาตร บันทึกน้ำหนักภาชนะ

เป็น W (g)

2.6.2.2.2 ใส่ตัวอย่างลงในภาชนะ บันทึกปริมาตรตัวอย่างเป็น V (cm^3) ชั่งน้ำหนัก และบันทึกเป็น W_s (g)

2.6.2.2.3 คำนวณตามสูตร

$$\begin{aligned} \text{ความหนาแน่นของวัตถุ (} d_s \text{)} &= \text{มวลของวัตถุ / ปริมาตรของวัตถุ} \\ &= \frac{(W_s - W)}{V} \end{aligned}$$

เมื่อ

W_s	หมายถึง	น้ำหนักของตัวอย่างและภาชนะ (g)
W	หมายถึง	น้ำหนักของภาชนะที่รู้ปริมาตร (g)
V	หมายถึง	ปริมาตรของตัวอย่างในภาชนะ (cm^3)

จาก

$$\begin{aligned} \text{ความถ่วงจำเพาะ} &= \text{ความหนาแน่นตัวอย่าง / ความหนาแน่นน้ำ} \\ &= d_s / d_w \end{aligned}$$

$$\text{แต่ความหนาแน่นของน้ำ (} d_w \text{)} = 1 \text{ g / 1 cm}^3$$

$$\text{ดังนั้นความถ่วงจำเพาะของตัวอย่าง} = \text{ความหนาแน่นของวัตถุ}$$

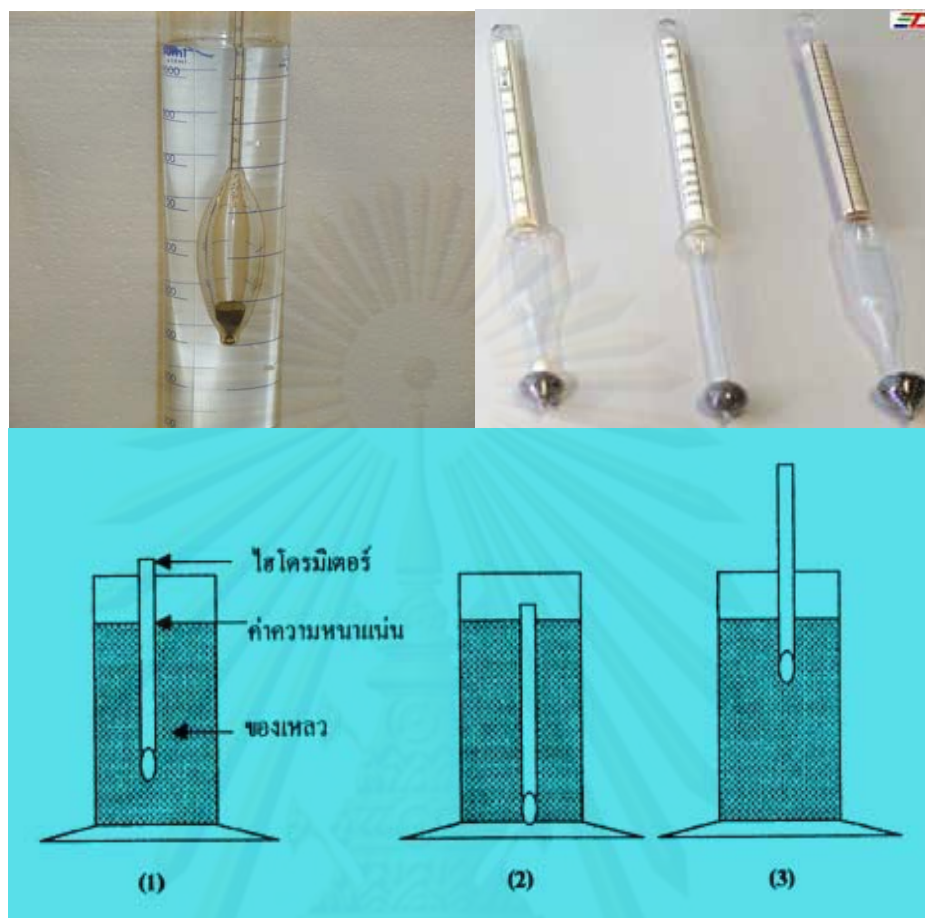
2.6.3 การหาค่าความหนาแน่นโดยใช้ไฮโดรมิเตอร์

ไฮโดรมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัดความหนาแน่น ของตัวอย่างที่อยู่ในรูปของเหลว อาจเป็นสารเดี่ยว เช่น น้ำ ก๊าซอินทรีย์และน้ำมัน เป็นต้น หรืออยู่ในรูปของผสมหรือสารแขวนลอย เช่น น้ำดิน น้ำเคลือบ ซึ่งของเหลวต่าง ๆ เหล่านี้จะมีค่าความหนาแน่นต่างกัน และไฮโดรมิเตอร์แต่ละอันก็จะใช้สำหรับการวัดค่าความหนาแน่นของของเหลวที่ความหนาแน่นช่วงหนึ่งเท่านั้น โดยที่ช่วงของความหนาแน่นที่จะใช้ไฮโดรมิเตอร์มาวัดนี้จะแตกต่างกันตามการผลิตของผู้ผลิต ไฮโดรมิเตอร์บางอันสามารถวัดความหนาแน่นของของเหลวในช่วงแคบ เช่น ระหว่าง 1.6 – 1.7 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร แต่บางอันสามารถวัดความหนาแน่นช่วงกว้าง เช่น ระหว่าง 1 – 2 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นต้น ดังนั้นการนำไฮโดรมิเตอร์มาใช้งานผู้ใช้ควรมีความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับ

ของเหลวที่ต้องการวัดความหนาแน่นเบื้องต้น ว่าจะมีความหนาแน่นอยู่ในช่วงใดหรือประมาณเท่าใด เพื่อให้สามารถจัดหาและเลือกใช้ไฮโดรมิเตอร์ได้ถูกต้อง

การใช้งานไฮโดรมิเตอร์โดยจุ่มไฮโดรมิเตอร์ลงในของเหลวที่ต้องการวัดค่าความหนาแน่นปล่อยให้ไฮโดรมิเตอร์จมลงในของเหลว จนกระทั่งหยุดนิ่งจึงอ่านค่าความหนาแน่นจากระดับตัวเลขบนแท่งไฮโดรมิเตอร์บริเวณผิวของของเหลว (รูปที่ 2.6 (1)) กรณีที่แท่งไฮโดรมิเตอร์จมทั้งหมด (รูปที่ 2.6 (2)) แสดงว่าต้องใช้ไฮโดรมิเตอร์ใหม่ที่มีระดับค่าการวัดความหนาแน่นต่ำกว่าเดิมเนื่องจากของเหลวมีค่าความหนาแน่นต่ำกว่าระดับความหนาแน่นของไฮโดรมิเตอร์ที่ใช้อยู่ในทางตรงข้ามกรณีที่ไฮโดรมิเตอร์ลอยอยู่เหนือของเหลวหรือจมเพียงเล็กน้อยไม่อยู่ในระดับที่จะอ่านค่าความหนาแน่นได้ (รูปที่ 2.6 (3)) หมายถึงค่าความหนาแน่นของของเหลวสูงกว่าที่จะใช้ไฮโดรมิเตอร์อันดังกล่าววัด หรืออาจจะหมายถึงของเหลวมีความหนืดและแรงตึงผิวสูง ไฮโดรมิเตอร์จึงไม่สามารถจมตัวลงได้

สิ่งที่ควรระวังสำหรับการใช้ไฮโดรมิเตอร์คือ การไม่ทราบค่าความหนาแน่นของของเหลวและใช้ไฮโดรมิเตอร์ที่มีระดับความหนาแน่นสูงกว่าระดับความหนาแน่นที่ต้องการทราบ เมื่อนำมาใช้งานหลังปล่อยให้ไฮโดรมิเตอร์จะจมลงสู่ก้นภาชนะอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งกระเปาะของไฮโดรมิเตอร์กระทบกับก้นภาชนะและแตกได้



รูปที่ 2.6 การใช้ไฮโดรมิเตอร์วัดค่าความหนาแน่น

2.7 การแพร่ (Diffusion)

เป็นการเคลื่อนที่ของอนุภาคในสารจากบริเวณที่มีความเข้มข้นของสารสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นของสารต่ำ ซึ่งเป็นผลมาจากอนุภาคของสารที่มีพลังงานจลน์อยู่ในตัวเอง จึงทำให้อนุภาคของสารเคลื่อนที่จนเกิดการกระทบกัน บริเวณใดที่มีอนุภาคของสารหนาแน่นมาก ก็จะมีการกระทบกันมากทำให้อนุภาคของสารกระจายไปในตัวกลางทุกทิศทาง

การแพร่แบบธรรมดาจะแพร่จากบริเวณที่มีความหนาแน่นมากไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อยจนความหนาแน่นของสารเท่ากัน สภาวะเช่นนี้เรียกว่าสมดุลของการแพร่ (dynamic equilibrium) ซึ่งอัตราการแพร่ไปและกลับจะเท่ากัน

2.7.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่

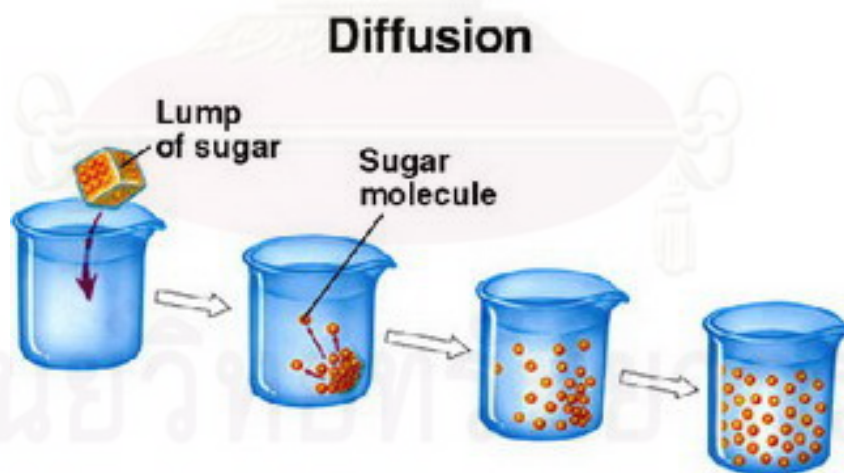
2.7.1.1 ความเข้มข้นของสารที่เกิดการแพร่ ถ้ามีความเข้มข้นมากความสามารถในการแพร่จะมาก

2.7.1.2 อุณหภูมิ ถ้าเพิ่มอุณหภูมิให้กับสารที่จะแพร่ ความสามารถในการแพร่จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิเป็นการเพิ่มพลังงานจลน์ของสาร

2.7.1.3 ความดัน ความดันที่เพิ่มขึ้นจะทำให้โมเลกุลของสารเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น เนื่องจากโมเลกุลในสารมีพื้นที่ในการแพร่น้อยลงดังนั้นอัตราการเคลื่อนที่ของโมเลกุลต่อพื้นที่จึงเพิ่มขึ้น

2.7.1.4 สิ่งเจือปนและตัวกลางในการแพร่ ถ้ามีสารอื่นที่ไม่ต้องการในการแพร่เข้ามาปะปนมากจะเป็นอุปสรรคในการแพร่ของสารที่ต้องการแพร่ ถ้าสิ่งเจือปนมากการแพร่จะช้าลงหรือตัวกลางในการแพร่มีโมเลกุลหนาแน่นมากการแพร่ก็ช้าลง รวมถึงเนื้อเยื่อต่าง ๆ ที่กั้นระหว่างการแพร่

2.7.1.5 การดูดติด ถ้าโมเลกุลของสารที่จะแพร่ถูกโมเลกุล อนุภาคหรือองค์ประกอบของสารอื่นในระบบการแพร่เดียวกันดูดติดไว้ ความสามารถในการแพร่จะต่ำลง



รูปที่ 2.7 การแพร่

บทที่ 3

วัสดุอุปกรณ์ สารเคมีและวิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

- 3.1.1 กระบอกตวงแก้วขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 3.1.2 กระบอกตวงแก้วขนาด 500 มิลลิลิตร
- 3.1.3 กระบอกตวงแก้วขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.1.4 ปีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 3.1.5 Isopropanol (ความหนาแน่น 0.786 g/cm^3)
- 3.1.6 Di-ethyleneglycol (ความหนาแน่น 1.120 g/cm^3)
- 3.1.7 Tetra-Bromoethane (ความหนาแน่น 2.963 g/cm^3)
- 3.1.8 Triethylphosphate (ความหนาแน่น 1.068 g/cm^3)
- 3.1.9 กรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุม
- 3.1.10 แท่งแก้วสำหรับคนสารขนาดยาว
- 3.1.11 แท่งแก้วสำหรับคนสารขนาดสั้น

3.1.12 ลูกกลอยยางขึ้นรูปทรงกลมกลวงสำหรับนำมาใช้กับสารละลายที่มีช่วงความหนาแน่นมากกว่า 1.00 g/cm^3 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ถ่วงน้ำหนักจนได้ค่าความหนาแน่นตามที่ต้องการ โดยผ่านการรับรองจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (TISTR) จำนวน 9 ลูก มีค่าความหนาแน่นดังนี้

ตารางที่ 3.1 ค่าความหนาแน่นของลูกลอยยาง 9 ลูก ที่ผลิตขึ้น

NO.	Density (g/cm ³)
1	2.13
2	2.03
3	1.99
4	1.94
5	1.89
6	1.89
7	1.78
8	1.72
9	1.67

3.1.13 ลูกลอยพลาสติกขึ้นรูปทรงกลมกลวง สำหรับนำมาใช้กับสารละลายที่มีช่วงความหนาแน่นต่ำกว่า 1.00 g/cm³ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5 เซนติเมตร ถ่วงน้ำหนักจนได้ค่าความหนาแน่นตามที่ต้องการ โดยผ่านการรับรองจากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (TISTR) จำนวน 9 ลูก มีค่าความหนาแน่นดังนี้

ตารางที่ 3.2 ค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติก 9 ลูก ที่ผลิตขึ้น

No.	Density (g/cm ³) (TISTR)	Density (g/cm ³) (จากการชั่งน้ำหนัก)
1	0.8714	0.8674 ± 0.0085
2	0.9008	0.8714 ± 0.0086
3	0.9636	0.9130 ± 0.0090
4	0.9916	0.9297 ± 0.0091
5	1.0365	0.9614 ± 0.0095
6	1.0642	0.9857 ± 0.0097
7	1.0786	0.9993 ± 0.0098

8	1.0907	1.0084 ± 0.0099
9	1.1338	1.0359 ± 0.0102

3.1.14 ลูกลอยมาตรฐาน ASTM Standards : D 1505 ลักษณะเป็นทรงกลม กลวงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6 – 0.8 เซนติเมตร จำนวน 7 ลูก ของภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยมีค่าความหนาแน่นดังนี้

ตารางที่ 3.3 ค่าความหนาแน่นของลูกลอยมาตรฐานทั้ง 7 ลูก

No.	Density (g/cm ³)
1	0.8415
2	0.8850
3	0.9285
4	0.9700
5	1.0141
6	1.0587
7	1.1004



รูปที่ 3.1 ลูกลอยมาตรฐาน

3.2 การทดสอบการเตรียมสารละลายและการสร้างชั้นความหนาแน่นจากสารละลาย

ในเบื้องต้นได้ทำการทดสอบเทคนิคการผสมและสร้างชั้นความหนาแน่นของสารละลาย โดยจะทำการทดสอบสร้างชั้นความหนาแน่นของสารละลายจาก Isopropanol ความหนาแน่น 0.786 g/cm^3 และ Di-ethyleneglycol ความหนาแน่น 1.12 g/cm^3 ให้เกิดชั้นความหนาแน่นของสารละลายที่ได้อยู่ในช่วง $0.786 - 1.12 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งช่วงความหนาแน่นที่ได้นี้จะครอบคลุมค่าความหนาแน่นของชั้น Buffer ที่มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วง $0.90 - 1.10 \text{ g/cm}^3$ ก่อนจะนำสารละลายที่ได้มาทดสอบว่าเกิดช่วงความหนาแน่นตามที่ต้องการหรือไม่ โดยบรรจุลูกลอยมาตรฐานที่มีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงดังกล่าวลงไปในสารละลาย ในการทดสอบจะปฏิบัติตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.2.1 วิธีการเตรียมสารละลายที่จะทำการทดสอบ

3.2.1.1 เตรียมสารละลายโดยนำ Isopropanol และ Di-ethyleneglycol มาผสมลงในบีกเกอร์ ซึ่งในการผสมแต่ละอัตราส่วนต้องคนสารจนผสมเข้ากันหมดเป็นเนื้อเดียว โดยผสมตามอัตราส่วนดังนี้

ตารางที่ 3.4 อัตราส่วนในการผสมสารละลายสำหรับการทดสอบที่ 3.2

สารที่ใช้	อัตราส่วนในการผสม (ปริมาตรรวม 100 mL)									
Isopropanol	0	1	2	3	4	5	6	7	8	10
Di-ethyleneglycol	10	9	8	7	6	5	4	3	2	0

3.2.1.2 จากนั้นรินสารละลายหมายเลข 1 ลงในกระบอกตวงขนาด 100 mL แล้วจึงเติมสารละลายอัตราส่วนต่อไปโดยใช้กรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุมตามลำดับจนครบ 10 อัตราส่วน โดยระวังขณะปล่อยสารลงในกระบอกตวงการปล่อยสารควรปล่อยแบบช้า ๆ เพื่อไม่ให้สารละลายแต่ละอัตราส่วนเกิดการผสมกัน

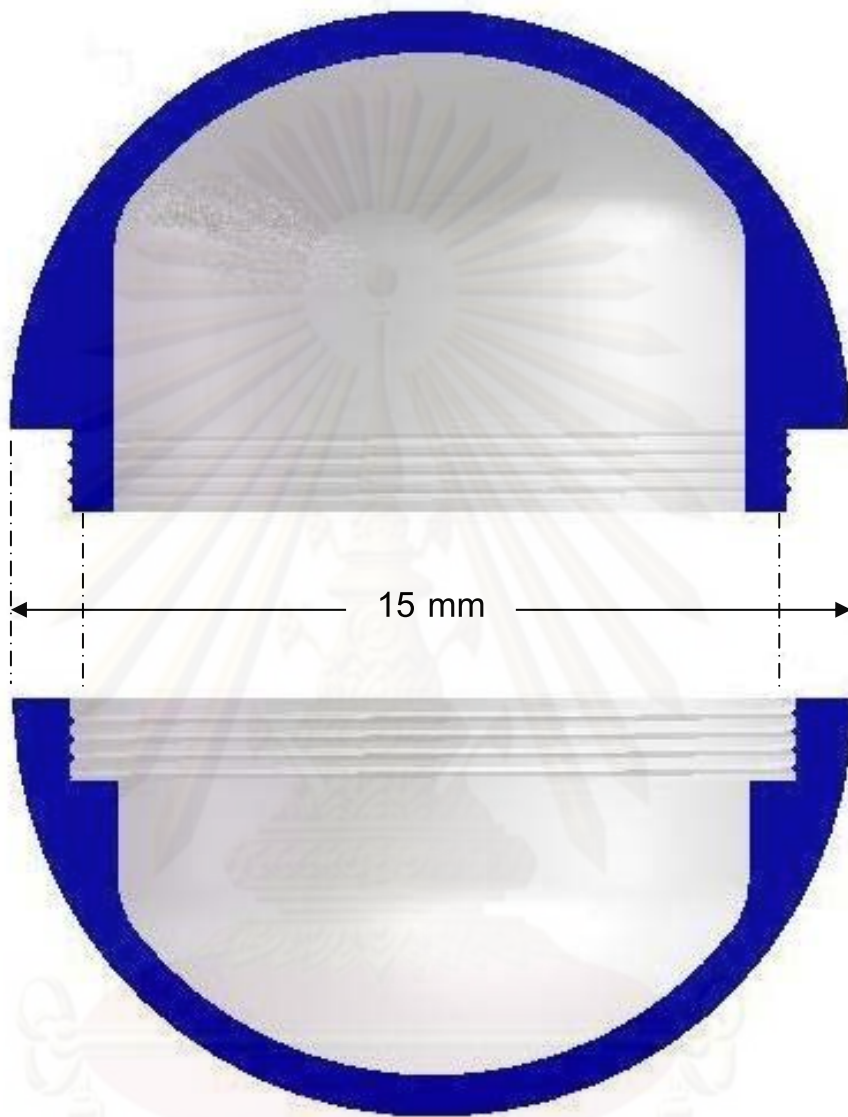
3.2.1.3 จะสังเกตพบว่าภายในกระบอกตวงจะเกิดชั้นของสารละลายขึ้น 10 ชั้น ตามที่ได้ผสมสารละลายเทลงไป โดยจะพบว่าสารละลายในแต่ละอัตราส่วนแยกชั้นกันอย่างชัดเจน

3.2.1.4 จุ่มแท่งแก้วลงไปในแนวตั้งอย่างช้า ๆ จนถึงก้นกระบอกลอย ให้แท่งแก้วแนบอยู่กับผนังของกระบอกลอย คนรอบกระบอกลอย 1 รอบ เพื่อเร่งการแพร่ระหว่างชั้นของสารละลาย แล้วจึงค่อย ๆ ยกแท่งแก้วออก แล้วทิ้งสารละลายไว้ 30 นาที เพื่อรอให้สารละลายเข้าสู่สมดุล

3.2.1.5 ทำการทดสอบสารละลายที่เตรียมไว้ ว่าได้ช่วงความหนาแน่นตามที่ต้องการหรือไม่ โดยทำการบรรจุลูกลอยมาตรฐาน 7 ลูก ลงไปภายในกระบอกลอยแล้วทำการสังเกตระดับของลูกลอยทั้ง 7 ลูก ว่าลอยอยู่ในชั้นของสารละลายหรือไม่

3.3 การออกแบบและผลิตลูกลอยที่จะนำมาใช้งาน

การผลิตลูกลอยที่นำมาใช้ในงานวิจัย ลูกลอยที่นำมาใช้ทดสอบหาค่าความหนาแน่นในช่วง $0.786 - 1.12 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งเป็นช่วงที่ครอบคลุมค่าความหนาแน่นของชั้น Buffer นั้น จะถูกผลิตมาจากเม็ดพลาสติกชนิด TPE (Thermoplastic Elastomer) มีค่าความหนาแน่นตามมาตรฐาน ASTM 1505 อยู่ที่ 0.885 g/cm^3 และในการหาค่าความหนาแน่นในช่วง $1.068 - 2.963 \text{ g/cm}^3$ ลูกลอยผลิตจากเม็ดยางชนิด EPDM (Ethylene Propylene Diene Monomer) มีค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 1.22 g/cm^3 โดยลูกลอยจะถูกออกแบบให้มีรูปร่างเป็นทรงกลมกลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 มิลลิเมตร ลักษณะตัวผู้ประกบเกลียวเข้ากับตัวเมีย ซึ่งทำให้การนำลูกลอยมาถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นตามที่ต้องการสะดวกยิ่งขึ้น ในการขึ้นรูปลูกลอยทั้ง 2 ชนิดจะใช้เครื่องอัดพลาสติกฉีดพลาสติกเข้าไปภายในแม่พิมพ์โลหะ ซึ่งแม่พิมพ์จะถูกทำไว้ด้วยน้ำยาหล่อลื่นเพื่อไม่ให้พลาสติกที่ฉีดเข้าไปติดกับแม่พิมพ์จนเสียรูปขณะทำการถอดแม่พิมพ์ออก ในการออกแบบลูกลอยในเบื้องต้นผู้ทำวิจัยจะพยายามทำให้ลูกลอยมีขนาดเล็กที่สุดเพื่อให้ง่ายต่อการวัดระดับของลูกลอยเมื่อถูกนำไปใช้งาน น้ำหนักของลูกลอยที่ผลิตมีผลต่อค่าความหนาแน่นเริ่มต้นก่อนที่จะนำลูกลอยมาถ่วงน้ำหนักเพื่อให้ได้ค่าความหนาแน่นตามที่ต้องการด้วย เมื่อถ่วงน้ำหนักลูกลอยจนได้ค่าความหนาแน่นตามที่ต้องการแล้ว จึงนำลูกลอยไปส่งวัดหาค่าความหนาแน่นเพื่อให้ได้มาตรฐานในแต่ละลูก โดยการวัดค่าจะนำไปให้สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (TISTR) วัดค่าและออกไปรับรองผลให้ก่อนจะนำมาใช้ในการทดสอบ



รูปที่ 3.2 แบบร่างของลูกกลอยที่จะผลิต

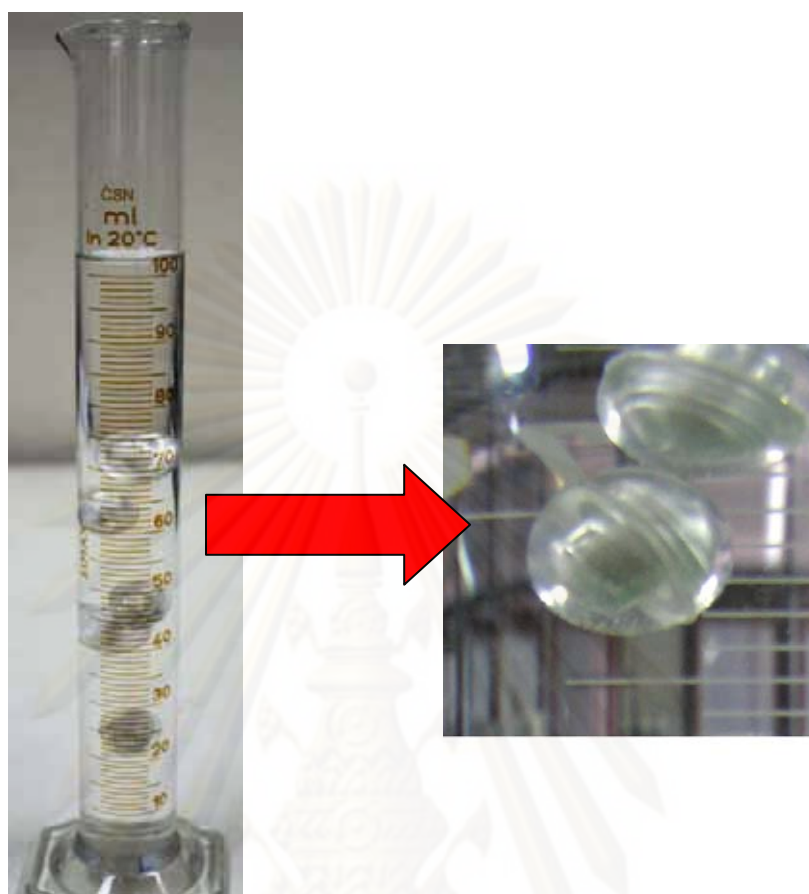
ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แม่พิมพ์ชิ้นรูปลูกลอยเกลียวใน



รูปที่ 3.4 แม่พิมพ์ชิ้นรูปลูกลอยเกลียวนอก



รูปที่ 3.5 ลูกกลอยพลาสติกที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักและทดสอบค่าความหนาแน่น



รูปที่ 3.6 ลักษณะของลูกกลอยพลาสติกก่อนทำการถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 3.7 ลูกลอยยางที่ผ่านการถ่วงน้ำหนักและทดสอบค่าความหนาแน่น



รูปที่ 3.8 ลักษณะของลูกลอยยางก่อนทำการถ่วงน้ำหนัก

3.4 การออกแบบกรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุม

ในขั้นตอนการเตรียมสารละลายลงไปภายในกระบอกตวงนั้น ต้องระวังไม่ให้เกิดการผสมกันที่ตกลงไปเกิดการผสมกันขึ้นอาจทำให้ชั้นความหนาแน่นของสารละลายที่ได้ผิดเพี้ยน จนทำให้การวัดค่าความหนาแน่นเกิดความคลาดเคลื่อน ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ออกแบบกรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุมขึ้น เพื่อให้การเทสารละลายเกิดความผิดพลาดน้อยลงอีกทั้งยังทำให้มีความสะดวกมากยิ่งขึ้น ส่วนประกอบหลักของกรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุมนี้จะประกอบไปด้วยกระเปาะกรวยที่อยู่เหนือวาล์วควบคุมการปล่อยสาร ซึ่งสามารถบรรจุสารละลายได้สูงสุด 100 มิลลิลิตร ปลายกรวยงอทำมุม 45 องศา เพื่อช่วยให้สารละลายไหลลงไปภายในกระบอกตวงได้อย่างนุ่มนวลที่สุด วาล์วควบคุมที่จะทำให้ผู้วิจัยสามารถควบคุมอัตราการไหลของสารละลายได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 3.9 กรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุมที่ออกแบบมาใช้ในการวิจัยโดยเฉพาะ

3.5 ทดสอบลูกลอยพลาสติก

นำลูกลอยพลาสติกที่ผ่านการวัดค่าความหนาแน่นแล้ว ไปทดสอบกับสารละลายที่เตรียมไว้ในช่วงความหนาแน่นที่ครอบคลุมค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติก โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.5.1 วิธีการเตรียมสารละลายที่จะนำมาทดสอบลูกลอยพลาสติก

3.5.1.1 เตรียมสารละลายโดยนำ Isopropanol และ Di-ethyleneglycol มาผสมลงในบีกเกอร์ ซึ่งในการผสมแต่ละอัตราส่วนต้องคนสารจนผสมเข้ากันหมดเป็นเนื้อเดียว โดยผสมตามอัตราส่วนดังนี้

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนในการผสมสารละลายสำหรับการทดสอบที่ 3.5

สารที่ใช้	อัตราส่วนในการผสม (ปริมาตรรวม 100 mL)									
Isopropanol	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Di-ethyleneglycol	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1

3.5.1.2 จากนั้นรินสารละลายหมายเลข 1 ลงในกระบอกตวงขนาด 100 mL แล้วจึงเติมสารละลายอัตราส่วนต่อไปโดยใช้กรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุมตามลำดับจนครบ 10 อัตราส่วน โดยระวังขณะปล่อยสารลงในกระบอกตวง การปล่อยสารควรปล่อยแบบช้า ๆ เพื่อไม่ให้สารละลายในแต่ละอัตราส่วนเกิดการผสมกัน

3.5.1.3 จะสังเกตพบว่าภายในกระบอกตวงจะเกิดขึ้นของสารละลายชั้น 10 ชั้น ตามที่ได้ผสมสารละลายเทลงไป โดยจะพบว่าสารละลายในแต่ละอัตราส่วนแยกชั้นกันอย่างชัดเจน

3.5.1.4 จุ่มแท่งแก้วลงไปในแนวตั้งอย่างช้า ๆ จนถึงก้นกระบอกตวง ให้แท่งแก้วแนบอยู่กับผนังของกระบอกตวง คนรอบกระบอกตวง 1 รอบ เพื่อเร่งการแพร่ระหว่างชั้นของสารละลาย แล้วจึงค่อย ๆ ยกแท่งแก้วออก แล้วทิ้งสารละลายไว้ 30 นาที เพื่อรอให้สารละลายเข้าสู่สมดุล

3.5.1.5 ทำการทดสอบลูกลอยพลาสติกกับสารละลายที่เตรียมไว้ โดยในการทดสอบจะเลือกลูกลอยพลาสติกที่เตรียมไว้มา 5 ลูก จากทั้งหมด 9 ลูก ซึ่งลูกลอยพลาสติกที่เลือกมาทั้ง 5 ลูก จะมีค่าความหนาแน่นห่างกันอยู่พอสมควรเพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตระดับการลอยของลูกลอยในสารละลายลูกลอยพลาสติกที่เลือกมาทดสอบ 5 ลูก มีค่าความหนาแน่นดังนี้

ตารางที่ 3.6 ลูกลอยพลาสติกที่เลือกนำมาใช้ในการทดสอบ

No.	Density (g/cm ³)
1	0.8714
3	0.9636
5	1.0365
7	1.0786
9	1.1338

นำลูกลอยพลาสติกทั้ง 5 ลูก ไปทดสอบกับสารละลายที่เตรียมไว้ สังเกตระดับการลอยของลูกลอยพลาสติกว่าอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่

3.6 ทดสอบลูกลอยยาง

นำลูกลอยยางที่ผ่านการวัดค่าความหนาแน่นแล้ว ไปทดสอบกับสารละลายที่เตรียมไว้ในช่วงความหนาแน่น 1.068 - 2.963 g/cm³ ซึ่งเกิดจากการผสมกันระหว่าง Tetra-Bromoethane และ Triethylphosphate โดยช่วงความหนาแน่นที่ได้ครอบคลุมค่าความหนาแน่นของลูกลอยยาง การทดสอบมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.6.1 วิธีการเตรียมสารละลายที่จะนำมาทดสอบลูกลอยยาง

3.6.1.1 เตรียมสารละลายโดยนำ Triethylphosphate และ Tetra-Bromoethane มาผสมลงในบีกเกอร์ ซึ่งในการผสมแต่ละอัตราส่วนต้องคนสารจนผสมเข้ากันหมดเป็นเนื้อเดียว โดยผสมตามอัตราส่วนดังนี้

ตารางที่ 3.7 อัตราส่วนในการผสมสารละลายสำหรับการทดสอบที่ 3.6

สารที่ใช้	อัตราส่วนในการผสม (ปริมาตรรวม 100 mL)									
Tetra-Bromoethane	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.25	6.5	7
Triethylphosphate	7	6.5	6	5.5	5	4.5	4	3.75	3.5	3

3.6.1.2 จากนั้นรินสารละลายหมายเลข 1 ลงในกระบอกตวงขนาด 100 mL แล้วจึงเติมสารละลายอัตราส่วนต่อไปโดยใช้กรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุมตามลำดับจนครบ 10 อัตราส่วน โดยระวังขณะปล่อยสารลงในกระบอกตวง การปล่อยสารควรปล่อยแบบช้า ๆ เพื่อไม่ให้สารละลายในแต่ละอัตราส่วนเกิดการผสมกัน

3.6.1.3 จะสังเกตเห็นว่าภายในกระบอกตวงจะเกิดขึ้นของสารละลายขึ้น 10 ชั้น ตามที่ได้ผสมสารละลายเทลงไป โดยจะพบว่าสารละลายในแต่ละอัตราส่วนแยกชั้นกันอย่างชัดเจน

3.6.1.4 จุ่มแท่งแก้วลงไปในแนวตั้งอย่างช้า ๆ จนถึงก้นกระบอกตวง ให้แท่งแก้วแนบอยู่กับผนังของกระบอกตวง คนรอบกระบอกตวง 1 รอบ เพื่อเร่งการแพร่ระหว่างชั้นของสารละลาย แล้วจึงค่อย ๆ ยกแท่งแก้วออก แล้วทิ้งสารละลายไว้ 30 นาที เพื่อรอให้สารละลายเข้าสู่สมดุล

3.6.1.5 ทำการทดสอบลูกลอยยางกับสารละลายที่เตรียมไว้ โดยในการทดสอบจะเลือกลูกลอยยางที่เตรียมไว้มา 4 ลูก จากทั้งหมด 9 ลูก ซึ่งลูกลอยยางที่เลือกมาทั้ง 4 ลูก จะมีค่าความหนาแน่นห่างกันอยู่พอสมควร เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตระดับการลอยของลูกลอยในสารละลาย ลูกลอยยางที่เลือกมาทดสอบ 4 ลูก มีค่าความหนาแน่นดังนี้

ตารางที่ 3.8 ลูกลอยยางที่เลือกนำมาใช้ในการทดสอบ

NO.	Density (g/cm ³)
1	2.13
3	1.99
5	1.89
9	1.67

นำลูกลอยยางทั้ง 4 ลูก ไปทดสอบกับสารละลายที่เตรียมไว้ สังเกตระดับการลอยของลูกลอยยางว่าอยู่ในช่วงที่ต้องการหรือไม่

3.7 ทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายกับค่าความหนาแน่นของลูกลอย

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกกับค่าความหนาแน่นของสารละลาย โดยจะเปรียบเทียบผลที่ได้กับลูกลอยมาตรฐานด้วย

3.7.1 ขั้นตอนในการทดสอบมีดังต่อไปนี้

3.7.1.1 เตรียมสารละลายโดยนำ Isopropanol และ Di-ethyleneglycol มาผสมลงในบีกเกอร์ ซึ่งในการผสมแต่ละอัตราส่วนต้องคนสารจนผสมเข้ากันหมดเป็นเนื้อเดียว โดยผสมตามอัตราส่วนดังนี้

ตารางที่ 3.9 อัตราส่วนในการผสมสารละลายสำหรับการทดสอบที่ 3.7

สารที่ใช้	อัตราส่วนในการผสม (ปริมาตรรวม 1000 mL)									
Isopropanol	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
Di-ethyleneglycol	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10

3.7.1.2 จากนั้นรินสารละลายหมายเลข 1 ลงในกระบอกตวงขนาด 1000 mL แล้วจึงเติมสารละลายอัตราส่วนต่อไปโดยใช้กรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุมตามลำดับจนครบ 10 อัตราส่วน โดยระวังขณะปล่อยสารลงในกระบอกตวงการปล่อยสารควรปล่อยแบบช้า ๆ เพื่อไม่ให้สารละลายแต่ละอัตราส่วนเกิดการผสมกัน

3.7.1.3 จะสังเกตเห็นว่าภายในกระบอกตวงจะเกิดขึ้นของสารละลายชั้น 10 ชั้น ตามที่ได้ผสมสารละลายเทลงไป โดยจะพบว่าสารละลายในแต่ละอัตราส่วนแยกชั้นกันอย่างชัดเจน

3.7.1.4 จุ่มแท่งแก้วลงไปในแนวตั้งอย่างช้า ๆ จนถึงก้นกระบอกตวง ให้แท่งแก้วแนบอยู่กับผนังของกระบอกตวง คนรอบกระบอกตวง 1 รอบ เพื่อเร่งการแพร่ระหว่างชั้นของสารละลาย แล้วจึงค่อย ๆ ยกแท่งแก้วออก แล้วทิ้งสารละลายไว้ 30 นาที เพื่อรอให้สารละลายเข้าสู่สมดุล

3.7.1.5 ทำการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นของสารละลายกับค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกทั้ง 9 ลูก และลูกลอยมาตรฐานทั้ง 7 ลูก โดยบรรจุลูกลอยทั้ง 2 อย่างลงในสารละลายที่เตรียมไว้ ทิ้งไว้ 5 นาที ก่อนจะทำการบันทึกตำแหน่งของลูกลอย เพื่อนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์และวิเคราะห์ผลต่อไป

3.7.1.6 ทำการทดสอบซ้ำโดยเริ่มเตรียมสารละลายใหม่ แล้วบรรจุลูกลอยทั้ง 2 อย่างลงในและทำการบันทึกผลที่ได้

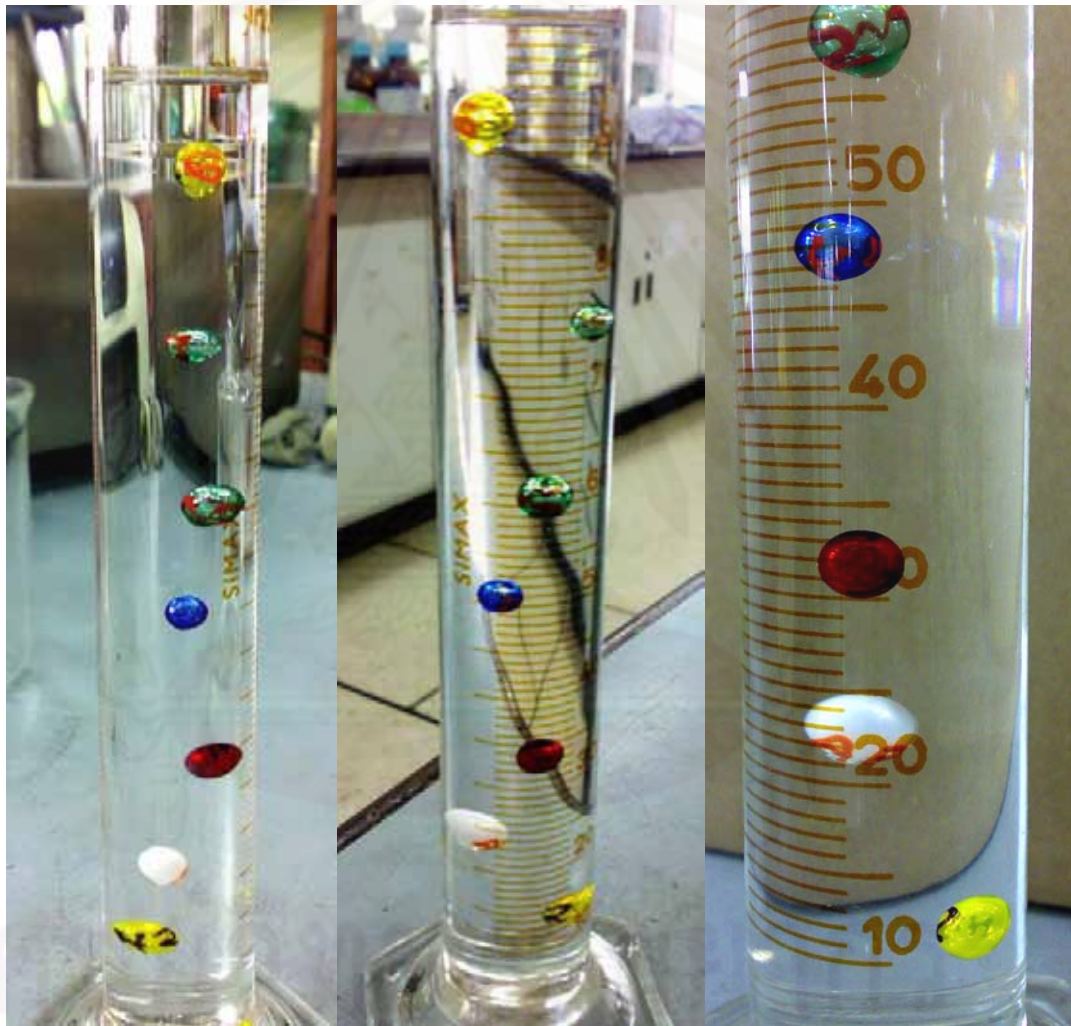
ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4 ผลการทดสอบ

4.1 ผลการทดสอบการเตรียมสารละลายและการสร้างชั้นความหนาแน่นจากสารละลาย

จากการทดสอบที่ 3.2 จะพบว่าลูกลอยมาตรฐานทั้ง 7 ลูก สามารถลอยอยู่ระหว่างภายในสารละลายที่เตรียมไว้ได้ ดังรูปที่ 4.1 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าช่วงความหนาแน่นของสารละลายที่เตรียมขึ้นสามารถนำมาใช้ในการทดสอบได้



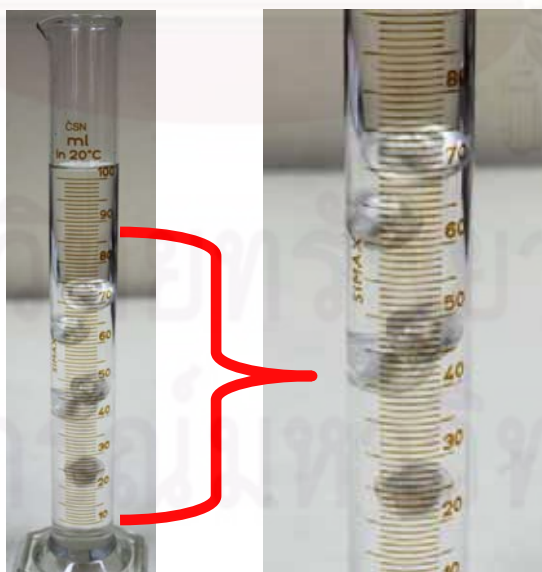
รูปที่ 4.1 ลูกลอยมาตรฐานทั้ง 7 ลูก ลอยอยู่ในสารละลายที่เตรียมขึ้น



รูปที่ 4.2 Isopropanol กับ Di-ethyleneglycol และสารละลายที่ได้จากการผสม

4.2 ผลการทดสอบลูกลอยพลาสติก

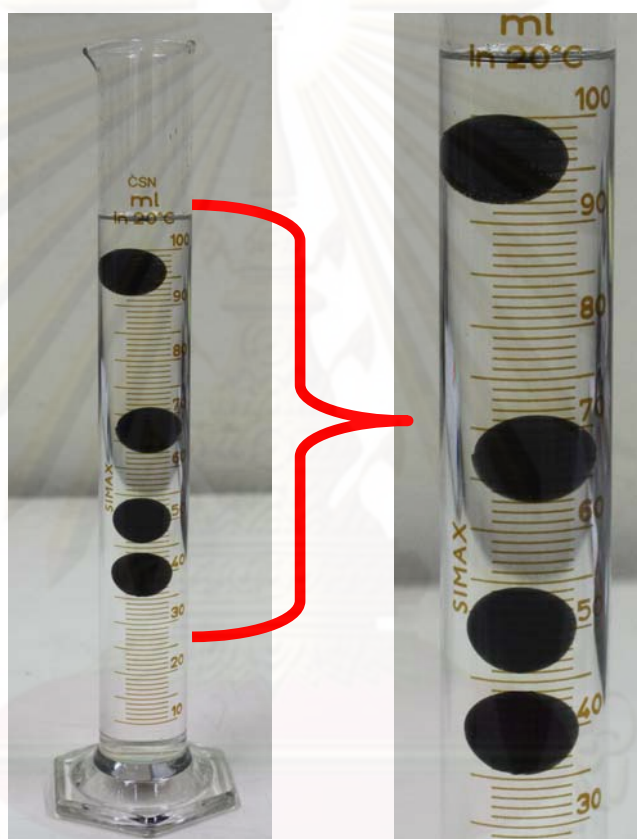
จากการทดสอบที่ 3.5 จะพบว่าลูกลอยพลาสติกทั้ง 5 ลูก สามารถลอยอยู่ระหว่างภายในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ ดังรูปที่ 4.3 จึงสรุปได้ว่าลูกลอยพลาสติกที่ทำขึ้นมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นในช่วงเดียวกันกับสารละลายที่เตรียมไว้ และลูกลอยพลาสติกพร้อมที่จะนำไปทดสอบหาค่าความสัมพันธ์กับสารละลายแล้ว



รูปที่ 4.3 ลูกลอยพลาสติกทั้ง 5 ลูก ที่นำมาทดสอบในสารละลาย

4.3 ผลการทดสอบลูกลอยยาง

จากการทดสอบที่ 3.6 จะพบว่าลูกลอยยางทั้ง 4 ลูก สามารถลอยอยู่ระหว่างภายในสารละลายที่ได้เตรียมไว้ ดังรูปที่ 4.4 จึงสรุปได้ว่าลูกลอยยางที่ทำขึ้นมีค่าความหนาแน่นอยู่ในช่วงที่กำหนดไว้ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นในช่วงเดียวกันกับสารละลายที่เตรียมไว้ และลูกลอยยางพร้อมที่จะนำไปทดสอบหาค่าความสัมพันธ์กับสารละลายแล้ว



รูปที่ 4.4 ลูกลอยยางทั้ง 4 ลูก ที่นำมาทดสอบในสารละลาย

4.4 ผลการทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอย

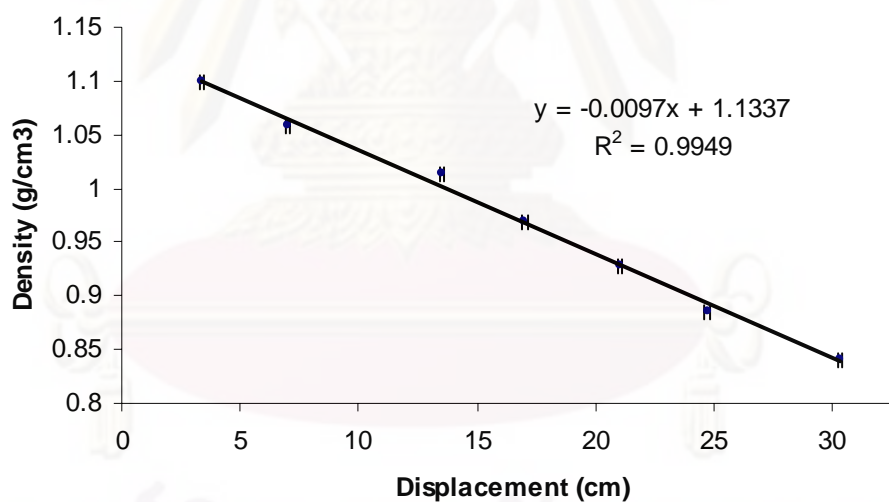
จากการทดสอบทั้งสองครั้งในการทดสอบที่ 3.7 ผลการทดสอบครั้งที่ 2 ลูกลอยมาตรฐานและลูกลอยพลาสติกลอยใกล้เคียงกับตำแหน่งในการทดสอบครั้งแรกมาก ซึ่งได้ผลการทดสอบโดยทำการวัดระดับที่ลูกลอยลอยจากด้านล่างของกระบอกตวงขึ้นมาจนถึงปากกระบอกตวงออกมาดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบลูกลอยพลาสติกเทียบกับลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก

ตารางที่ 4.1 ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งโดยเริ่มทำการวัดจากด้านล่างของกระบอกตวงจนถึงปากกระบอกตวงในการทดสอบลูกลอยมาตรฐานครั้งแรก

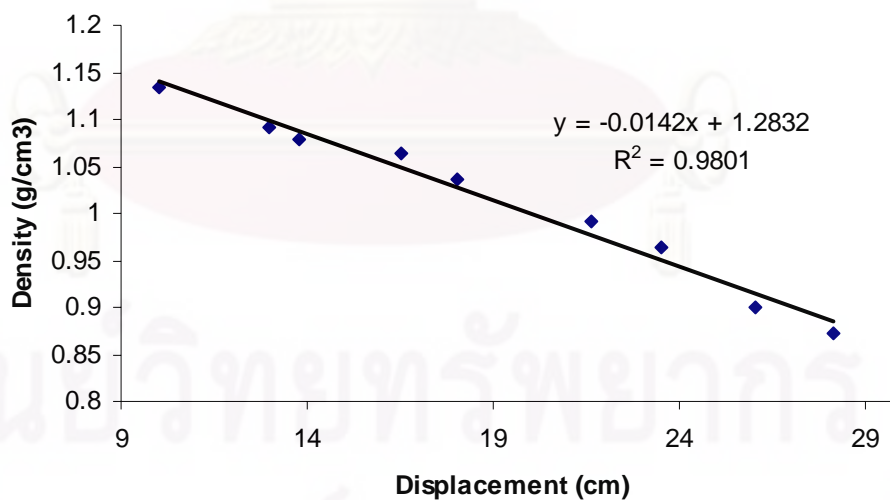
Float NO.	Density (g/cm ³)	Displacement at center \pm 0.1 (cm)
1	0.8415	30.3
2	0.8850	24.7
3	0.9285	21.0
4	0.9700	17.0
5	1.0141	13.5
6	1.0587	7.0
7	1.1004	3.4



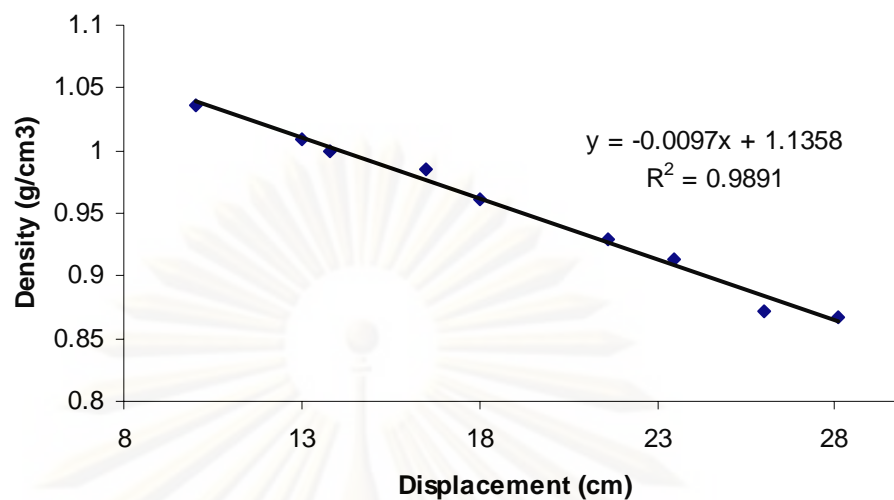
รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยมาตรฐานลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยมาตรฐาน (เริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง)

ตารางที่ 4.2 ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในการทดสอบครั้งแรก โดยทำการวัดจากตรงกลางของลูกลอยพลาสติกและเริ่มทำการวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง

Density (g/cm ³) (TISTR)	Density (g/cm ³) (จากการชั่งน้ำหนัก)	Displacement at Center ± 0.1 (cm)
0.8714	0.8674 ± 0.0085	28.1
0.9008	0.8714 ± 0.0086	26.0
0.9636	0.9130 ± 0.0090	23.5
0.9916	0.9297 ± 0.0091	21.6
1.0365	0.9614 ± 0.0095	18.0
1.0642	0.9857 ± 0.0097	16.5
1.0786	0.9993 ± 0.0098	13.8
1.0907	1.0084 ± 0.0099	13.0
1.1338	1.0359 ± 0.0102	10.0



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งแรก (ใช้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยตามที่ TISTR รับรองและเริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง)



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งแรก (ใช้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยที่ผู้วิจัยวัดค่าโดยการชั่งน้ำหนักเทียบกับปริมาตรและเริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง)

ทำการหาค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกใหม่ โดยนำตำแหน่งของลูกลอยพลาสติกที่ได้จากการทดสอบไปแทนค่าลงในตัวแปร X ของสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากกราฟของลูกลอยมาตรฐาน ซึ่งมีสมการดังนี้ $Y = -0.0097X + 1.1337$ และจะได้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งแรกมาใหม่ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก

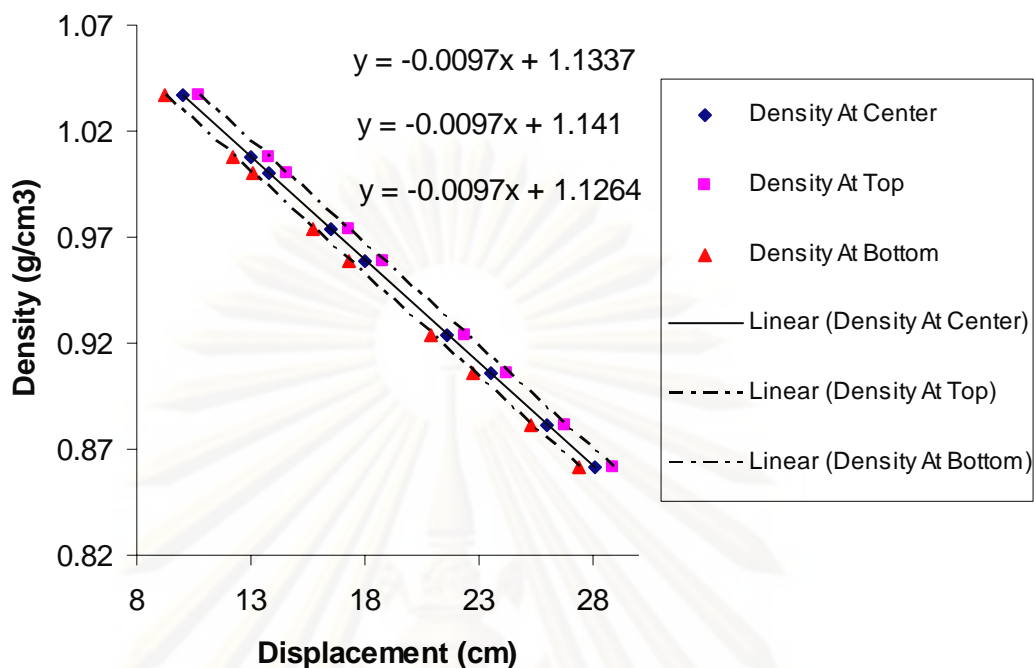
Displacement at center (cm)	ค่าความหนาแน่นใหม่ที่คำนวณได้ (g/cm ³)
28.1	0.8611
26.0	0.8815
23.5	0.9057
21.6	0.9242
18.0	0.9591

16.5	0.9736
13.8	0.9998
13.0	1.0076
10.0	1.0367

นำค่าความหนาแน่นของลูกกลอยพลาสติกที่ได้มาใหม่จากการคำนวณนี้ ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์กับตำแหน่งของลูกกลอย โดยเปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ในการวัดบนตัวลูกกลอยพลาสติกจากตรงกลางมาเป็นด้านบนและด้านล่างของลูกกลอยพลาสติกแทนดังที่แสดงในตารางที่ 4.4 และจะได้สมการความสัมพันธ์ดังรูปกราฟที่ 4.9

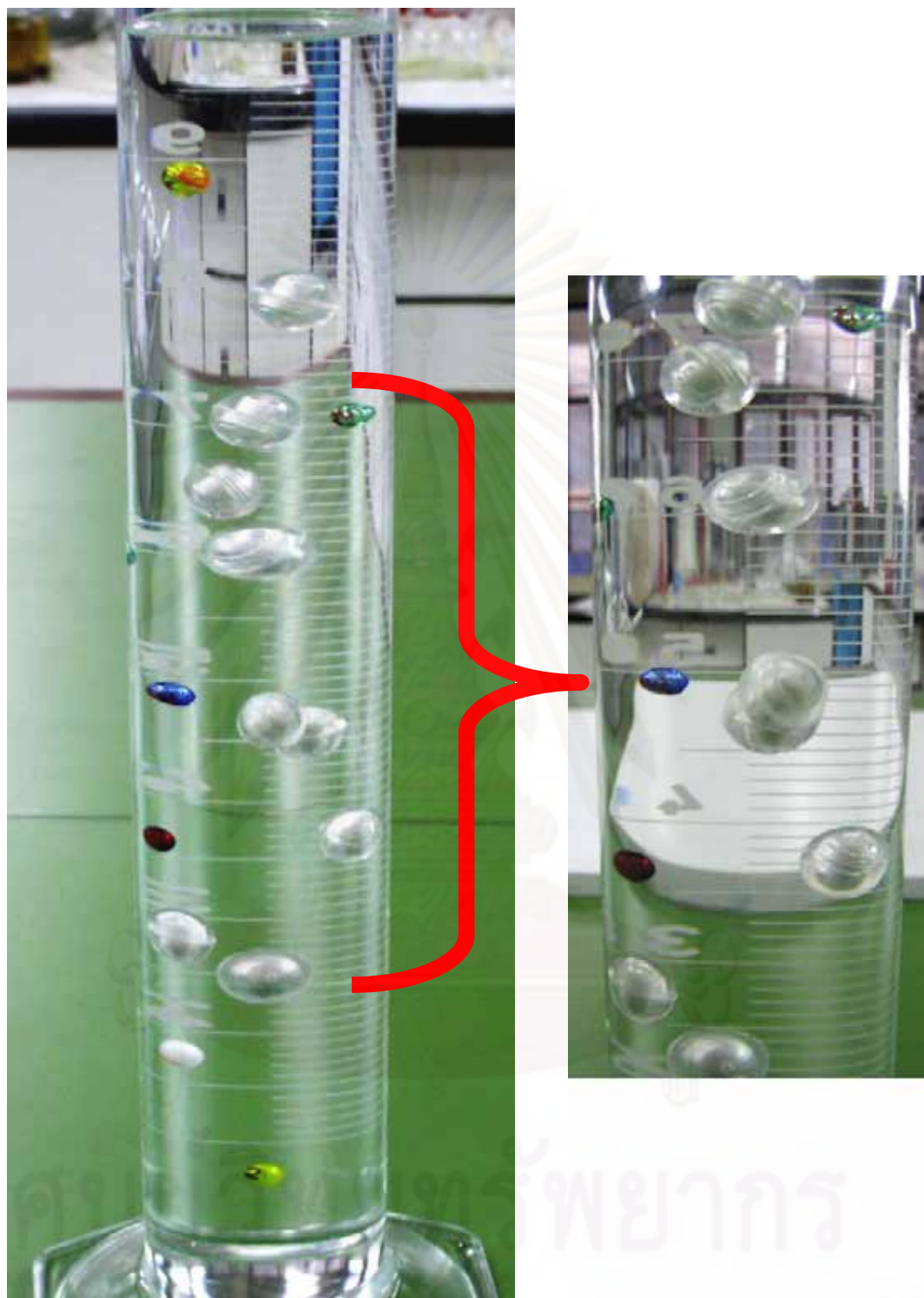
ตารางที่ 4.4 ระดับที่ได้เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ในการวัดบนตัวลูกกลอยพลาสติก

Displacement at center (cm)	Displacement at top (cm)	Displacement at bottom (cm)
28.10	28.85	27.35
26.00	26.75	25.25
23.50	24.25	22.75
21.60	22.35	20.85
18.00	18.75	17.25
16.50	17.25	15.75
13.80	14.55	13.05
13.00	13.75	12.25
10.00	10.75	9.25



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของลูกลอยพลาสติกจากการทดสอบในครั้งแรก ระหว่างค่าความหนาแน่นใหม่ที่คำนวณได้กับตำแหน่งที่ใช้ในการวัดระดับบนตัวลูกลอยพลาสติก (ด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างของลูกลอยพลาสติก)

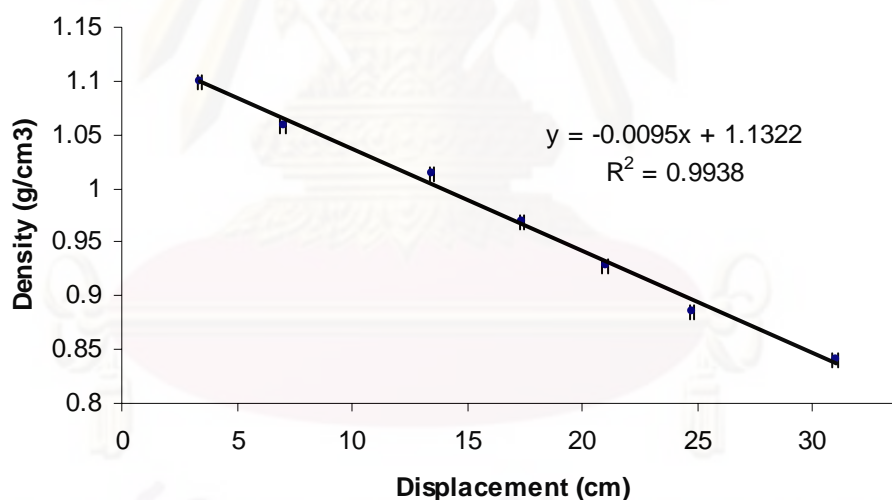
จากสมการที่ได้ในรูปกราฟที่ 4.9 จะพบว่าค่าความหนาแน่นเมื่อวัดจากตรงกลางของลูกลอยพลาสติกจะต่างจากค่าความหนาแน่นที่ได้เมื่อวัดที่ด้านล่างและด้านบนของลูกลอยพลาสติกอยู่ 0.0073 g/cm^3



รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบลูกลอยพลาสติกเทียบกับลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งที่ 2

ตารางที่ 4.5 ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งโดยเริ่มทำการวัดจากด้านล่างของกระบอกตวงจนถึงปาก
กระบอกตวงในการทดสอบลูกลอยมาตรฐานครั้งที่ 2

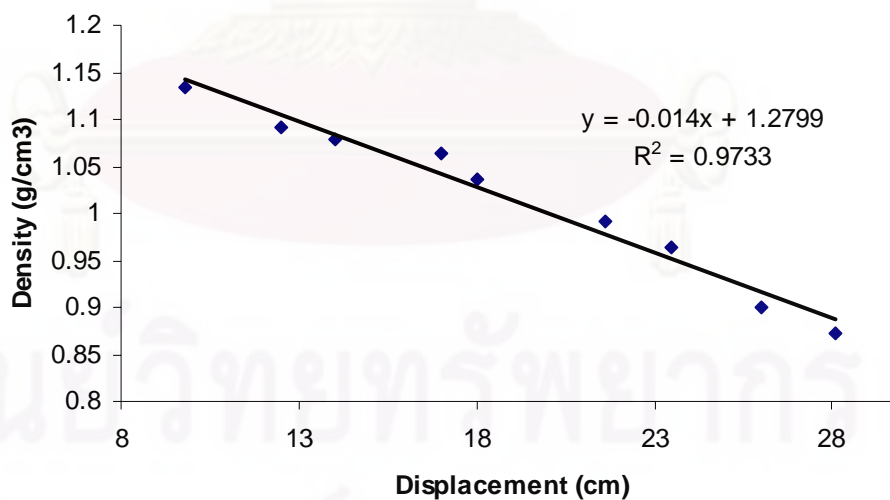
Float NO.	Density (g/cm ³)	Displacement at center \pm 0.1 (cm)
1	0.8415	31.0
2	0.8850	24.8
3	0.9285	21.0
4	0.9700	17.4
5	1.0141	13.5
6	1.0587	7.0
7	1.1004	3.4



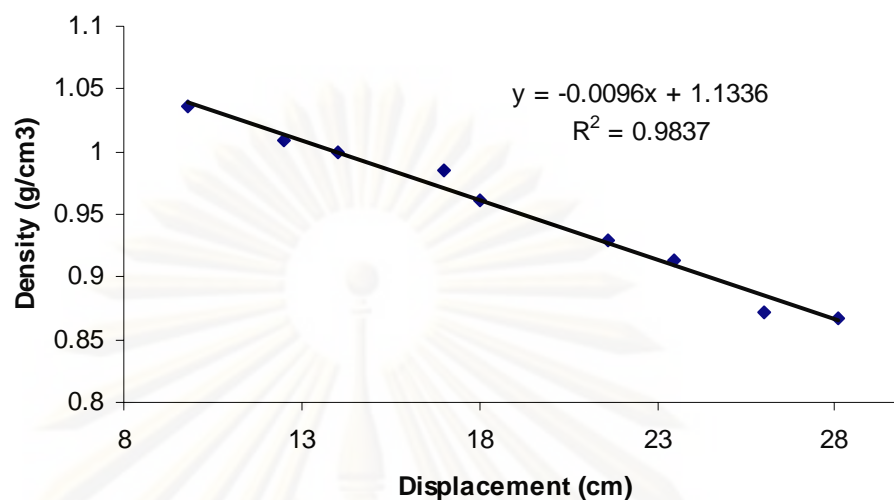
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยมาตรฐานลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งที่ 2 (เริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง)

ตารางที่ 4.6 ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในการทดสอบครั้งที่ 2 โดยทำการวัดจากตรงกลางของลูกลอยพลาสติกและเริ่มทำการวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง

Density (g/cm ³) (TISTR)	Density (g/cm ³) (จากการชั่งน้ำหนัก)	Displacement at Center ± 0.1 (cm)
0.8714	0.8674 ± 0.0085	28.1
0.9008	0.8714 ± 0.0086	26.0
0.9636	0.9130 ± 0.0090	23.5
0.9916	0.9297 ± 0.0091	21.6
1.0365	0.9614 ± 0.0095	18.0
1.0642	0.9857 ± 0.0097	17.0
1.0786	0.9993 ± 0.0098	14.0
1.0907	1.0084 ± 0.0099	12.5
1.1338	1.0359 ± 0.0102	9.8



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งที่ 2 (ใช้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยตามที่ TISTR รับรองและเริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง)



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งที่ 2 (ใช้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยที่ผู้วิจัยวัดค่าโดยการชั่งน้ำหนักเทียบกับปริมาตรและเริ่มวัดจากด้านล่างของกระบอกตวง)

ทำการหาค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกใหม่ โดยนำตำแหน่งของลูกลอยพลาสติกที่ได้จากการทดสอบในครั้งที่ 2 ไปแทนค่าในตัวแปร X ของสมการความสัมพันธ์ที่ได้จากกราฟของลูกลอยมาตรฐาน ซึ่งมีสมการดังนี้ $Y = -0.0095X + 1.1322$ และจะได้ค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งที่ 2 ออกมาใหม่ดังตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งที่ 2

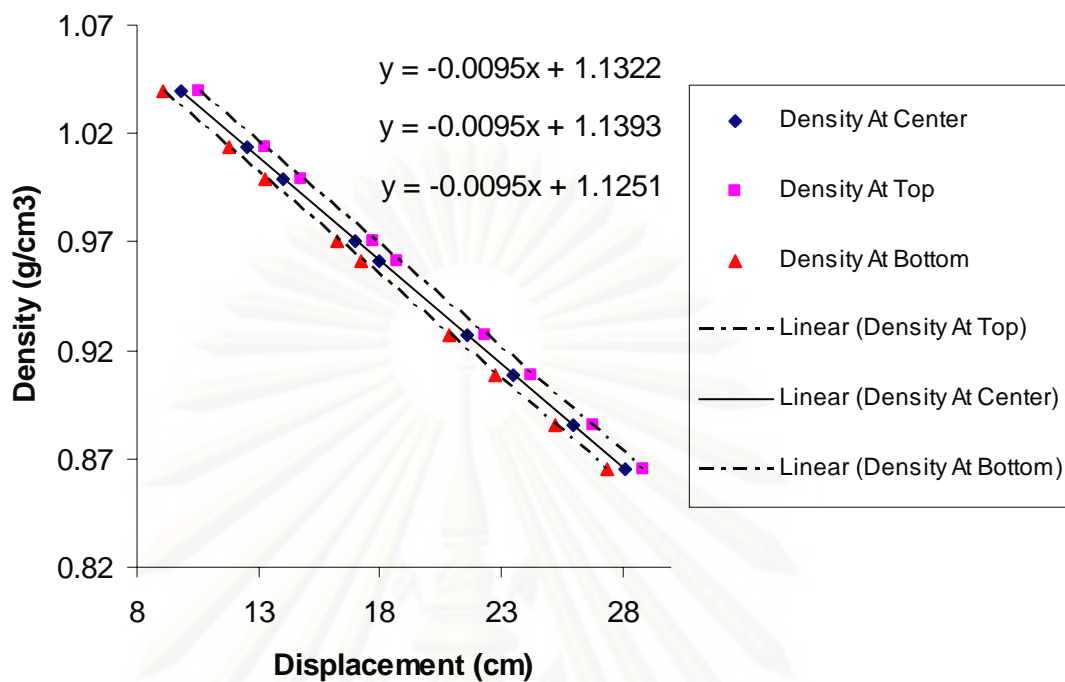
Displacement at center (cm)	ค่าความหนาแน่นใหม่ที่คำนวณได้ (g/cm ³)
28.1	0.8652
26.0	0.8852
23.5	0.9089
21.6	0.9270

18.0	0.9612
17.0	0.9707
14.0	0.9992
12.5	1.0134
9.8	1.0391

นำค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่ได้มาใหม่จากการคำนวณนี้ ไปสร้างกราฟความสัมพันธ์กับตำแหน่งของลูกลอย โดยเปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ในการวัดบนตัวลูกลอยพลาสติกจากตรงกลางมาเป็นด้านบนและด้านล่างของลูกลอยพลาสติกแทนดังที่แสดงในตารางที่ 4.8 และจะได้สมการความสัมพันธ์ดังรูปกราฟที่ 4.14

ตารางที่ 4.8 ระดับที่วัดได้เมื่อเปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ในการวัดบนตัวลูกลอยพลาสติกจากการทดสอบในครั้งที่ 2

Displacement at center (cm)	Displacement at top (cm)	Displacement at bottom (cm)
28.10	28.85	27.35
26.00	26.75	25.25
23.50	24.25	22.75
21.60	22.35	20.85
18.00	18.75	17.25
17.00	17.75	16.25
14.00	14.75	13.25
12.50	13.25	11.75
9.80	10.55	9.05



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของลูกลอยพลาสติกจากการทดสอบในครั้งที่ 2 ระหว่างค่าความหนาแน่นใหม่ที่คำนวณได้กับตำแหน่งที่ใช้ในการวัดระดับบนตัวลูกลอยพลาสติก (ด้านบน ตรงกลาง และด้านล่างของลูกลอยพลาสติก)

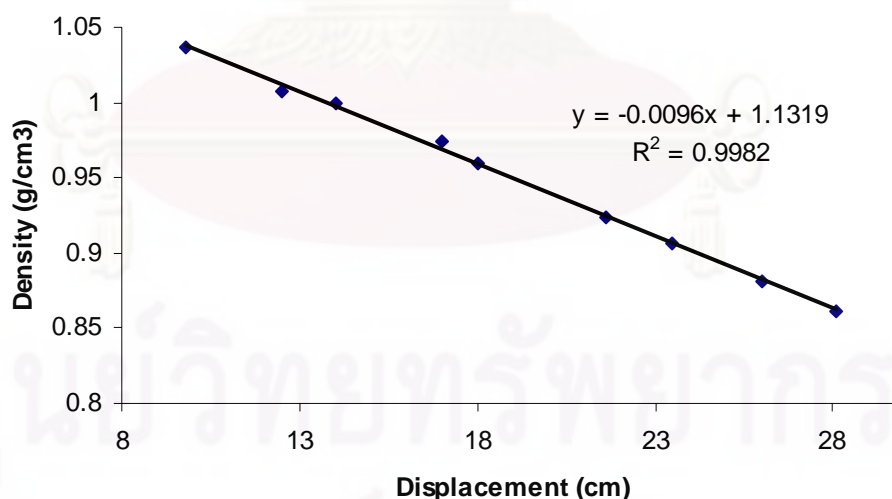
จากสมการที่ได้ในรูปกราฟที่ 4.14 จะพบว่าค่าความหนาแน่นที่ได้เมื่อวัดจากตรงกลางของลูกลอยพลาสติกจะต่างจากค่าความหนาแน่นที่ได้เมื่อวัดที่ด้านล่างและด้านบนของลูกลอยพลาสติกอยู่ 0.0071 g/cm^3

หากนำค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่ได้มาใหม่ จากการคำนวณโดยนำตำแหน่งของลูกลอยพลาสติกไปแทนค่าในสมการเทียบความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานที่ได้จากการทดสอบในครั้งแรก มาใช้กับตำแหน่งของลูกลอยพลาสติกที่วัดได้ในการทดสอบครั้งที่ 2 จะได้ผลออกมาดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.9 ผลที่ได้จากการวัดตำแหน่งของลูกลอยพลาสติกในการทดสอบครั้งที่ 2 กับค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก

Displacement at Center ± 0.1 (cm)	ความหนาแน่นที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก (g/cm ³)
28.1	0.8611
26.0	0.8815
23.5	0.9058
21.6	0.9242
18.0	0.9591
17.0	0.9737
14.0	0.9998
12.5	1.0076
9.8	1.0367



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งที่ลูกลอยพลาสติกลอยในสารละลายจากการทดสอบครั้งที่ 2 กับค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติกที่คำนวณได้จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยของการพัฒนาเครื่องวัดความหนาแน่นสำหรับชั้นบัพเฟอร์ของเม็ดเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 สามารถสร้างลูกลอยจำนวน 9 ลูก ที่จะนำมาใช้งานกับของเหลวในช่วงความหนาแน่น $0.90 - 1.10 \text{ g/cm}^3$ ได้ตรงตามเป้าหมาย

5.1.2 ได้ของเหลวในรูปสารละลายที่เกิดจากการผสมกันระหว่าง Isopropanol กับ Di-ethyleneglycol ที่ทำให้เกิดช่วงความหนาแน่น $0.786 - 1.12 \text{ g/cm}^3$ ซึ่งครอบคลุมช่วงความหนาแน่น $0.90 - 1.10 \text{ g/cm}^3$ ตามที่ต้องการนำมาใช้งาน

5.1.3 ลูกลอยและสารละลายที่ได้ผลิตขึ้น สามารถนำไปใช้งานร่วมกันเพื่อหาค่าความหนาแน่นในช่วง $0.786 - 1.12 \text{ g/cm}^3$ ได้ ซึ่งครอบคลุมช่วงความหนาแน่นของชั้นบัพเฟอร์ของเชื้อเพลิงนิวเคลียร์แบบไตรโซ

5.1.4 จากผลการทดสอบ 4.4 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอย พบว่าในการทดสอบครั้งแรกสารละลายที่เตรียมขึ้นกับลูกลอยมาตรฐานมีค่าความเป็นเชิงเส้น (R^2) อยู่ที่ 0.9949 และมีค่า R^2 ในการทดสอบครั้งที่ 2 อยู่ที่ 0.9938 ซึ่งจากผลการทดสอบดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าสารละลายที่เตรียมขึ้นสามารถนำมาใช้งานร่วมกับลูกลอยมาตรฐานได้จริง

5.1.5 จากผลการทดสอบ 4.4 การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของสารละลายกับความหนาแน่นของลูกลอย พบว่าค่า R^2 ของลูกลอยพลาสติกเปลี่ยนแปลงไปตามค่าความหนาแน่นที่นำมาใช้ โดยหากใช้ค่าความหนาแน่นที่ TISTR รับรองผล จะได้ค่า R^2 ในการทดสอบทั้งสองครั้งอยู่ที่ 0.9801 และ 0.9733 ตามลำดับ ในขณะที่เมื่อใช้ค่าความหนาแน่นที่ผู้วิจัยทำการชั่งน้ำหนักของลูกลอยเปรียบเทียบกับปริมาตรจะได้ค่า R^2 อยู่ที่ 0.9891 และ 0.9837 ตามลำดับ อีกทั้งในการทดสอบผู้วิจัยได้ทดลองนำค่าความหนาแน่นของลูกลอยพลาสติก ที่คำนวณได้ใหม่จากสมการความสัมพันธ์ของลูกลอยมาตรฐานในการทดสอบครั้งแรก มาใช้กับตำแหน่งที่วัดได้จากการทดสอบในครั้งที่ 2 พบว่าค่า R^2 ของลูกลอยพลาสติกเพิ่มขึ้นเป็น 0.9982 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความหนาแน่นของลูกลอยที่จะนำมาใช้เป็นจุดอ้างอิงใน

Density Gradient Column เพื่อวัดค่าความหนาแน่นนั้น จะต้องเป็นค่าที่แน่นอนซึ่งสามารถใช้ อ้างอิงเป็นค่าความหนาแน่นของลูกลอยเมื่อนำลูกลอยไปใช้งาน

5.1.6 จากผลการทดสอบ 4.4 จะพบว่าตำแหน่งบนลูกลอยที่ใช้ในการวัดระดับ ที่ลูกลอยลอยนั้น มีผลต่อสมการความสัมพันธ์และค่าความหนาแน่นที่จะคำนวณหาได้ เมื่อ เปรียบเทียบค่าความต่างของความหนาแน่นซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งที่ใช้ในการวัด จะพบว่า คล้ายกับค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดในกรณีของลูกลอยมาตรฐาน ถ้าหากพิจารณาดู แล้วค่าความต่างที่เกิดจากการเปลี่ยนตำแหน่งในการวัดนี้ก็คือค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นจาก การวัดเมื่อใช้ลูกลอยพลาสติกนั่นเอง เนื่องจากขนาดของลูกลอยพลาสติกมีขนาดใหญ่กว่าลูกลอย มาตรฐานจึงทำให้การวัดระดับที่ลูกลอยลอยนั้น จะพิจารณาจากตำแหน่งตรงกลางของลูกลอย เพียงอย่างเดียวไม่ได้ ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าลูกลอยพลาสติกมีค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัด เมื่อทำการวัดระดับจากตรงกลางของลูกลอยอยู่ที่ ± 0.75 เซนติเมตร

5.1.7 การนำ Density gradient column ไปใช้งาน เมื่อเตรียมสารละลายกับ ลูกลอยตามขั้นตอนที่ผู้วิจัยได้ใช้ในการทดสอบเรียบร้อยแล้ว จะต้องทำการบันทึกตำแหน่งของลูก ลอยและนำไปสร้างกราฟเทียบมาตรฐาน เพื่อตรวจดูความพร้อมของระบบก่อนนำไปใช้งานทุก ครั้ง

5.1.8 จากการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นที่ได้ระหว่างการใช้ลูกลอยมาตรฐาน และลูกลอยที่ผลิตขึ้น พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนในระดับที่มั่นใจอยู่ที่ $\pm 0.0021 \text{ g/cm}^3$ เมื่อลูก ลอยที่ผลิตขึ้นอ้างอิงค่าความหนาแน่นจากที่ผู้วิจัยได้ทำการชั่งน้ำหนักเทียบกับปริมาตร และจะได้ ค่าความคลาดเคลื่อนในระดับที่มั่นใจอยู่ที่ $\pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ เมื่อลูกลอยที่ผลิตขึ้นอ้างอิงค่าความ หนาแน่นจากที่ TISTR ได้รับรองมา

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากระบบที่พัฒนาขึ้นยังมีขีดจำกัดของการใช้งาน จึงขอเสนอแนะแนวทาง ปรับปรุง และพัฒนาเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ดังนี้

5.2.1 ขนาดของลูกลอยที่ผลิตขึ้นมายังมีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับขนาด ของลูกลอยมาตรฐาน ดังนั้นควรมีการลดขนาดของลูกลอยให้เล็กลง ซึ่งสามารถทำได้หากเปลี่ยน วัสดุที่จะนำมาทำลูกลอย แต่จะมีค่าใช้จ่ายที่สูงขึ้นเนื่องจากการหล่อขึ้นรูปลูกลอยก็จะต้องทำ

แม่พิมพ์ใหม่ทั้งหมด อีกทั้งควรจะมีผลทำให้ลูกกลอยมีขนาดเล็กที่สุดและเท่ากันทั้งหมด เพื่อทำให้ความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัดมีค่าน้อยลงและคงที่ ซึ่งจะทำให้การหาค่าความหนาแน่นแม่นยำยิ่งขึ้น

5.2.2 ลูกกลอยที่ผลิตขึ้นควรได้รับการปรับเทียบค่าความหนาแน่นจากสถาบันที่มีมาตรฐานและเชี่ยวชาญในเรื่องการหาค่าความหนาแน่นโดยเฉพาะ ซึ่งจะทำให้ลูกกลอยสามารถนำไปใช้งานได้มีประสิทธิภาพและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น

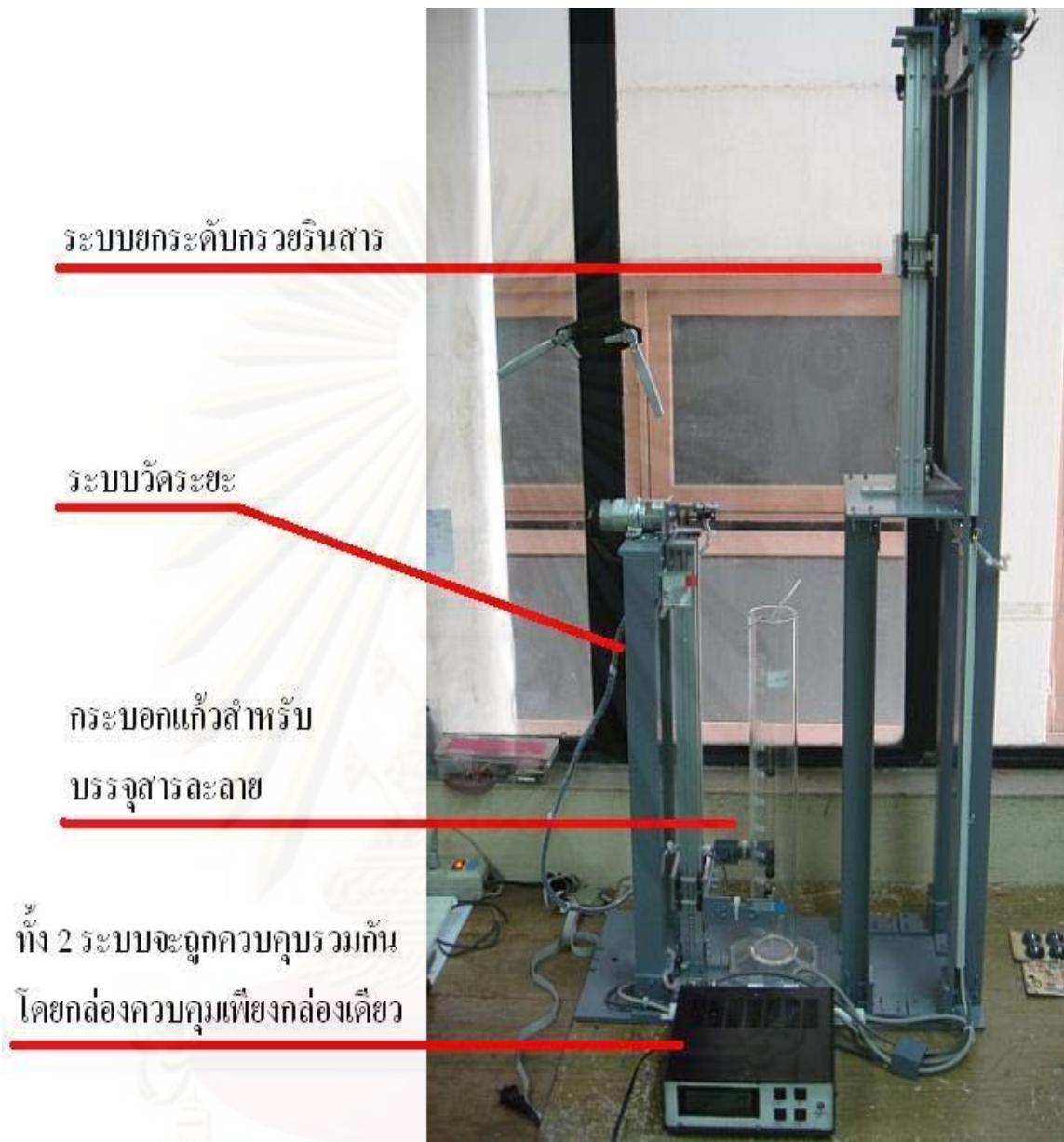
5.2.3 กรณีที่สารละลายและลูกกลอยถูกใช้งานอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลาานานหรือมีการรบกวนสารละลาย จนทำให้ตำแหน่งของลูกกลอยในระบบเปลี่ยนแปลงไป จะต้องทำการวัดตำแหน่งและสร้างกราฟเทียบมาตรฐานเพื่อใช้ในการหาค่าความหนาแน่นใหม่ทุกครั้ง

5.2.4 ในการทำงานวิจัยขั้นนี้ได้พัฒนาและออกแบบเครื่องมือเพิ่มเติมที่จะช่วยให้การเตรียมสารละลายและการวัดระดับของลูกกลอยสะดวกยิ่งขึ้นแต่ยังมีสิ่งที่ต้องแก้ไขอยู่บ้างในเรื่องของระบบวัดระยะ โดยเครื่องมือที่พัฒนาเพิ่มเติมมีรายละเอียดดังนี้

5.2.4.1 ระบบวัดระยะ เมื่อกดปุ่มเริ่มทำงาน ระบบจะทำงานโดยอัตโนมัติตรวจหาลูกกลอยที่ลอยอยู่ในสารละลาย โดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับแสงหาตำแหน่งที่ลูกกลอยลอย และจะแสดงผลที่ได้ผ่านหน้าจอบนกล่องควบคุม

5.2.4.2 ระบบยกกระดับกรวยปล่อยสาร ระบบนี้จะทำงานเมื่อผู้ใช้กดปุ่มค้างไว้เท่านั้น ซึ่งจะช่วยในการเลื่อนระดับกรวยปล่อยสารแบบมีวาล์วควบคุม ทำให้การเตรียมสารละลายลงไปภายในกระบอกตวงมีความสะดวกรวดเร็วและแม่นยำยิ่งขึ้น

5.2.4.3 ระบบควบคุมการทำงาน การควบคุมระบบทั้งหมดจะถูกควบคุมผ่านกล่องควบคุมเพียงกล่องเดียว ซึ่งสามารถเลือกคำสั่งในการใช้งานได้ตามต้องการ



รูปที่ 5.1 โครงสร้างระบบของเครื่องวัดความหนาแน่น

ศูนย์วิจัยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- 1 N.A. Pratten . The precise measurement of the density of small samples. Journal of Materials Science 16, 1981,pp.1737 – 1747.
- 2 K.S.B. Rose, J. Williams and G. Potts. A technique for measuring the density of small fragments of high - density materials both before and after irradiations. Journal of Nuclear Materials 51,1974,pp.195-198.
- 3 D.C. Canada and W.R. Laing. Use of a density gradient column to measure the density of microspheres. Anal. Chem, 1967,pp.691–692.
- 4 ชิตชนก มีใจชื่อ. เอกสารประกอบการสอนปฏิบัติการพอลิเมอร์1. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง, 2549
- 5 พิมพ์พัฒน์ สิมะวัฒน์. เคมีเชิงฟิสิกส์. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันราชภัฏ อุบลราชธานี, 2542
- 6 ดุลยพงศ์ วงศ์แสง. Introduction to generation IV high-temperature gas-cooled reactor technology and TRISO particle fuel design project. นวัตกรรมเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2550
- 7 ดวงเพ็ญ ศรีบัวงาม และ อนุรักษ์ ปิติรักษ์สกุล. วัสดุโลหะ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

Request No. BK.PTL 098/52

1/1

MTC.PTL.BK.No. 098/52

REPORT ON TESTING AND ANALYSIS

Submitted by : NUCLEAR TECHNOLOGY FACULTURE OF ENGINEERING
CHULALONGKORN UNIVERSITY

Address : PAYATHAI ROAD PATHUMWAN BANGKOK 10330

Condition of testing item : Float

Teating/analysis of : Density of Float

Date of receipt : 2 June 2009

Date of testing : 18 June 2009

Method of testing/analysis : ASTM : D 792

Condition of testing/analysis : Temperature 23 ± 2 °CRelative humidity : 55 ± 5 %

Result of testing/analysis : -

Item	Density, gm/cm ³
1	0.871409141
2	0.900846003
3	0.963600324
4	0.991636418
5	1.036555303
6	1.064240843
7	1.078613058
8	1.090680392
9	1.133793223

TESTED/ANALYSED BY :

Ratana Jaiaree

(Mr. Ratana Jaiaree)

Ref : 1124252052900808001

Date : 19 June 2009

APPROVED BY :



(Mr. Suchart Keawthong)

Director

PHYSICAL TESTING LABORATORY

TISTR

The above results are valid exclusively for the tested / analysed sample(s) calibrated item(s) as mentioned in this report/certificate
Advertising the Report/Certificate and publicity of the results except in full are prohibited unless written permission is obtained from the governor of TISTR.

ภาคผนวก ข

คำขอบริการที่ บข.ทฟ. 095/52	1/1	ที่ ศทท.ทฟ.บข. 095/52																				
รายงานผลการทดสอบและวิเคราะห์																						
ชื่อผู้ขอรับบริการ: ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย																						
ที่อยู่: ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330																						
สภาพตัวอย่างชิ้นงาน: ลูกบอลยาง (ลูกบอลยาง)																						
การทดสอบ/วิเคราะห์: ลูกบอลยาง (ลูกบอลยาง)																						
วันที่รับงาน: 6 พฤษภาคม 2552		วันที่ทดสอบ: 21 พฤษภาคม 2552																				
วิธีการทดสอบ/วิเคราะห์: ASTM : D792																						
ภาวะการทดสอบ/วิเคราะห์: อุณหภูมิ 23±2 °ซ		ความชื้นสัมพัทธ์ 55±5 %																				
ผลการทดสอบ/วิเคราะห์																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ตัวอย่างที่</th> <th>ค่าความหนาแน่น, gm/cm³</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1.67</td></tr> <tr><td>2</td><td>1.72</td></tr> <tr><td>3</td><td>2.03</td></tr> <tr><td>4</td><td>1.89</td></tr> <tr><td>5</td><td>1.89</td></tr> <tr><td>6</td><td>1.78</td></tr> <tr><td>7</td><td>2.13</td></tr> <tr><td>8</td><td>1.94</td></tr> <tr><td>9</td><td>1.99</td></tr> </tbody> </table>			ตัวอย่างที่	ค่าความหนาแน่น, gm/cm ³	1	1.67	2	1.72	3	2.03	4	1.89	5	1.89	6	1.78	7	2.13	8	1.94	9	1.99
ตัวอย่างที่	ค่าความหนาแน่น, gm/cm ³																					
1	1.67																					
2	1.72																					
3	2.03																					
4	1.89																					
5	1.89																					
6	1.78																					
7	2.13																					
8	1.94																					
9	1.99																					
ผู้ทดสอบ/วิเคราะห์ 	ผู้รับรอง 																					
(นายรัตน์ะ ใจอารีย์)	(นายสิทธิ์พงษ์ โสวีรกรณ์)																					
Ref.1124252050400704001	นักวิชาการ 9																					
วันที่: 26 พฤษภาคม 2552	ปฏิบัติงานแทนผู้อำนวยการห้องปฏิบัติการทดสอบทางฟิสิกส์																					
<p>ผลการทดสอบ/วิเคราะห์/สอบเทียบ นี้ รับรองเฉพาะตัวอย่างรายการที่ได้ระบุไว้เท่านั้น การนำรายงานผล/ใบรับรองนี้ไปโฆษณาและการคัดถ่ายหรือการนำผลบางส่วนไปเผยแพร่ต่อสาธารณะต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากผู้ว่าฯ จว.</p>																						

ภาคผนวก ค



CERTIFICATE OF CALIBRATION

CUSTOMER NAME & ORDER NO. : INTRO ENTERPRISE CO.LTD.
 ITE 005 LL/96
 LLOYD ORDER NUMBER : 104224
 ISSUE DATE : 30. SEPT. 1996
 CERTIFICATE NO. : DL00558 (SET ONE)

We certify that the Davenport Glass Marker Floats below have been calibrated to the satisfaction of our procedures, are within the stated tolerances and thus conform with the requirements of BS 3715:1964 and ASTM D1505-85 1990.

FLOAT NUMBER	DENSITY (kg/m ³)	WEIGHT (mg)	FLOAT IDENTIFICATION COLOURS & MARKINGS
04727	900.0	142.31	CLEAR, 2 BLUE SPOTS
04726	912.5	117.48	BLUE, 5 GREY SPOTS
04725	925.0	149.29	CLEAR, 3 BROWN MARKS
04724	937.5	139.48	CLEAR, BLUE MARK
04723	950.0	156.87	GREEN, WHITE/PINK MARKS
04722	962.5	120.56	CLEAR, BLACK MARK
04721	975.0	111.82	FROSTED, ORANGE MARKS
04720	987.5	174.51	CLEAR, 4 GREY SPOTS
04719	1000.0	183.74	BLUE, YELLOW MARKS

NOTE: The densities of the floats supplied were determined by obtaining a hydrostatic balance in known density liquids. These densities were determined by using a PAAR DMA 48 density meter, calibrated with standard traceable NAMAS liquids. The density of the floats will not vary from the certified density by more than ± 0.2 kg/m³. These floats were calibrated in a temperature controlled bath at $23^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, calibrated with a NAMAS traceable thermometer serial no. : NF 919079 6

Signed by : Jonathan Cross
 Density Laboratory

M. S. Ryan
 Quality Manager

Davenport is a division of Lloyd Instruments Ltd.

ภาคผนวก ง

CERTIFICATE OF CALIBRATION

CUSTOMER NAME & ORDER NO. : INTRO ENTERPRISE CO.LTD.
 ITE 005 LL/96
 LLOYD ORDER NUMBER : 104224
 ISSUE DATE : 30.SEPT.1996
 CERTIFICATE NO. : DL00559 (SET TWO)

We certify that the Davenport Glass Marker Floats below have been calibrated to the satisfaction of our procedures, are within the stated tolerances and thus conform with the requirements of BS 3715:1964 and ASTM D1505-85 1990.

FLOAT NUMBER	DENSITY (kg/m ³)	WEIGHT (mg)	FLOAT IDENTIFICATION COLOURS & MARKINGS
04718	999.9	158.87	YELLOW, WHITE MARKS
04717	1025.0	143.31	CLEAR, 4 PINK SPOTS
04716	1050.0	141.83	LIGHT BLUE, BLACK MARKS
04715	1075.0	166.22	CLEAR, 5 GREEN SPOTS
04714	1100.0	196.61	GREEN TINT, 2 GREEN MARKS
04713	1124.9	245.63	BLUE, 3 PINK MARKS
04712	1150.0	194.48	CLEAR, WHITE PATCH, YELLOW MARK -
04711	1175.0	279.39	CLEAR, 3 GREY, 2 RED SPOTS
04710	1200.0	169.17	GREEN, 6 YELLOW SPOTS

NOTE: The densities of the floats supplied were determined by obtaining a hydrostatic balance in known density liquids. These densities were determined by using a PAAR DMA 48 density meter, calibrated with standard traceable NAMAS liquids. The density of the floats will not vary from the certified density by more than ± 0.2 kg/m³. These floats were calibrated in a temperature controlled bath at $23^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$, calibrated with a NAMAS traceable thermometer serial no. : NF 919079 6

Signed by : Jonathan Cross
 Density Laboratory

M. Bryant
 Quality Manager

Davenport is a division of Lloyd Instruments Ltd.

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภาคภูมิ พรหมเอื้อ เกิดเมื่อวันที่ 26 มิถุนายน พ.ศ. 2528 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปี พ.ศ. 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2550



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย