การพัฒนาเครื่องวัดวอเตอร์แอคติวิตีแบบตัวเลข

นายศรีรัตน์ เชาวน์ทวี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
ภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหาร
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ 2533

ISBN 974-577-254-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I15099166

DEVELOPMENT OF DIGITAL WATER ACTIVITY METER

MR TRERAT CHAOWTHAWEE

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science
Department of Food Technology
Graduate School Chulalongkorn University
1990

ISBN 974-577-254-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาเครื่องวัดวอเตอร์แอคติวิตีแบบตัวเลข
โดย	นายตรีรัตน์ เชาวน์ทวี
ภาควิชา	เทคโนโลยีทางอาหาร
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติ ให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ ดร.ถาวร วัชราภัย)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ธัญพิพยากุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร.สายวรุพ ชัยวานิชศิริ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวแผ่นเดียว

ตรีรัตน์ เชาวน์หวี : การพัฒนาเครื่องวัดวอเตอร์แอคติวิตีแบบตัวเลข (DEVELOPMENT OF DIGITAL WATER ACTIVITY METER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์, 121 หน้า. ISBN 974-577-245-2

ผลจากการออกแบบทำให้ได้เครื่องวัดวอเตอร์แอคติวิตีที่มีการทำงานเป็นอัตโนมัติสะดวกในการใช้งาน มีการแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขสะดวกในการอ่านค่า หลักการของเครื่องคือการวัดค่าความดันไอน้ำของตัวอย่างโดยมานอมิเตอร์ที่ใช้อุปกรณ์วัดความดันแบบสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดสอบเบื้องต้น พบว่าความดันไอน้ำและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์วัดความดันมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง โดยมีค่าความชันเท่ากับ 4.94 Volt/PSI และมีค่าคงที่เท่ากับ -3.06 Volt และจากการทดลองวัดค่าความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ทำให้ทราบว่าความดันที่วัดได้และความดันจากตารางไอน้ำมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง โดยมีความชันเท่ากับ 0.54 และมีค่าคงที่เท่ากับ 0.66 PSI อันเป็นผลมาจากความดันเริ่มต้นในระบบ นั่นคือทำให้เกิดข้อจำกัดของเครื่องมือที่จะไม่สามารถวัดความดันที่ต่ำกว่า 0.66 PSI ได้ผลจากการวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตีของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆจะได้ค่าเฉลี่ยของค่าวอเตอร์แอคติวิตีเป็น 1.034 ซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.032 การ calibration ที่อุณหภูมิสูงกับที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่าความดันที่คำนวนได้ต่างกันเนื่องจากความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่างกัน อันเป็นผลมาจากอุปกรณ์วัดความดันสุญญากาศไม่มีการชดเชยอุณหภูมิ เมื่อเปลี่ยนเป็นแบบที่มีการชดเชยอุณหภูมิแล้วจะทำให้การวัดมีความถูกต้องมากขึ้น เมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าต่างๆกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีการอาหาร ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2532

TRERAT CHAOWTHAWEE: DEVELOPMENT OF DIGITAL WATER ACTIVITY METER. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SURAPONG NAVANKASATTUSAS 121 PP. ISBN 974-577-245-2

An easily operated automatic digital water activity meter is a result from this research, development and design. This meter displays digital result which can be read easily. Operating principle of the meter is to measure water vapor pressure of sample by solid state manometer with semiconductor pressure transducers. Preliminary test of the system showed that correlation between measured vapor pressure and output voltage was linear with a proportionality constant of 4.94 Volt/PSI and an offset of -3.06 Volt. The correlation between measured pressure and theoretical value was linear with a proportionality of 0.54 and offset of 0.66 PSI. Initial non zero differential pressure in the system required correction factor for the measured vapor pressure. The system is therefore not yet applicable to determine water activity of a sample with water vapor pressure below 0.66 PSI.For pure water at various temperatures the mean value of water activity determined was 1.034 with a standard deviation of 0.032. Vacuum pressure transducer without temperature compensation required measured vapor pressure correction at identical temperature of operating condition. Improved accuracy of the instrument was obtained with temperature compensated vacuum pressure transducer.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา เทคโนโลยีทางอาหาร ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา เทคโนโลยีการอาหาร

ปีการศึกษา 2532 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

ตรีรัตน์ เชาวน์ทวี : การพัฒนาเครื่องวัดวอเตอร์แอคติวิตีแบบตัวเลข (DEVELOPMENT OF DIGITAL WATER ACTIVITY METER) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.ดร.สุรพงศ์ นวังคสัตฤศาสน์, 121 หน้า. ISBN 974-577-245-2

ผลจากการออกแบบทำให้ได้เครื่องวัดวอเตอร์แอคติวิตีที่มีการทำงานเป็นอัตโนมัติสะดวกในการใช้งาน มีการแสดงผลออกมาเป็นตัวเลขสะดวกในการอ่านค่า หลักการของเครื่องคือการวัดค่าความดันไอน้ำของตัวอย่างโดยมานอมิเตอร์ที่ใช้อุปกรณ์วัดความดันแบบสารกึ่งตัวนำ ผลจากการทดสอบเบื้องต้น พบว่าความดันไอน้ำและแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากอุปกรณ์วัดความดันมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง โดยมีค่าความชันเท่ากับ 4.94 Volt/PSI และมีค่าคงที่เท่ากับ -3.06 Volt และจากการทดลองวัดค่าความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ทำให้ทราบว่าความดันที่วัดได้และความดันจากตารางไอน้ำมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง โดยมีความชันเท่ากับ 0.54 และมีค่าคงที่เท่ากับ 0.66 PSI อันเป็นผลมาจากความดันเริ่มต้นในระบบ นั่นคือทำให้เกิดข้อจำกัดของเครื่องมือที่จะไม่สามารถวัดความดันที่ต่ำกว่า 0.66 PSI ได้ ผลจากการวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตีของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆจะได้ค่าเฉลี่ยของค่าวอเตอร์แอคติวิตีเป็น 1.034 ซึ่งมีส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.032 การ calibration ที่อุณหภูมิสูงกับที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่าความดันที่คำนวนได้ต่างกันเนื่องจากความดันเริ่มต้นในระบบมีค่าต่างกัน อันเป็นผลมาจากอุปกรณ์วัดความดันสุญญากาศไม่มีการชดเชยอุณหภูมิ เมื่อเปลี่ยนเป็นแบบที่มีการชดเชยอุณหภูมิแล้วจะทำให้การวัดมีความถูกต้องมากขึ้นเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมมีค่าต่างๆกัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

TRERAT CHAOWTHAWEE: DEVELOPMENT OF DIGITAL WATER ACTIVITY METER. THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SURAPONG NAVANKASATTUSAS 121 PP. ISBN 974-577-245-2

An easily operated automatic digital water activity meter is a result from this research, development and design. This meter displays digital result which can be read easily. Operating principle of the meter is to measure water vapor pressure of sample by solid state manometer with semiconductor pressure transducers. Preliminary test of the system showed that correlation between measured vapor pressure and output voltage was linear with a proportionality constant of 4.94 Volt/PSI and an offset of -3.06 Volt. The correlation between measured pressure and theoretical value was linear with a proportionality of 0.54 and offset of 0.66 PSI. Initial non zero differential pressure in the system required correction factor for the measured vapor pressure. The system is therefore not yet applicable to determine water activity of a sample with water vapor pressure below 0.66 PSI. For pure water at various temperatures the mean value of water activity determined was 1.034 with a standard deviation of 0.032. Vacuum pressure transducer without temperature compensation required measured vapor pressure correction at identical temperature of operating condition.Improved accuracy of the instrument was obtained with temperature compensated vacuum pressure transducer.

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้ากราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงศ์ นวังคสัตถุศาสน์ อย่างสูง ในความกรุณาให้คำแนะนำและความช่วยเหลือทางด้านวิชาการตลอดระยะการปฏิบัติงาน

ขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่าน เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาควิชาเทคโนโลยีทางอาหารที่ให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ

ขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยนี้

กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่สนับสนุนและให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านมาโดยตลอด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฌ
สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการ	ฎ
บทที่	
1. บทนำ	1
2. วารสารปริทัศน์	4
3. การทดลอง	17
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	22
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	76
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก ก	81
ภาคผนวก ข	83
ภาคผนวก ค	94
ประวัติผู้เขียน	121

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ผลของความดันของกาซที่ไม่ถูกดูดซับด้วยสารดูดความชื้นที่มีต่อค่าวอเตอร์แอคติวิตีที่คำนวณได้โดยวิธีต่างๆ	12
2.2	ความแปรปรวนในการวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตีของน้ำบริสุทธิ์	13
4.1	สัญญาณการทำงานของเทอร์โมสตัท	33
4.2	ข้อมูลแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากขา + ของ LM335	37
4.3	ข้อมูลจากพอร์ท A ของ 8255 ในการควบคุมวาล์วและเครื่องกำเนิดสุญญากาศตามลำดับการทำงานของเครื่อง	38
4.4	เลขรหัสฐานสองและฐานสิบหกซึ่งเป็นแอดเดรสของหน่วยความจำ	39
4.5	ผลของการถอดรหัสที่อินพุท A และ B มีค่าต่างๆกัน	40
4.6	คำควบคุม(control word)ของ 8255 ใน mode 0 (6)	45
4.7	ค่าของเลขฐานสองที่ใช้ในการแสดงผลของแอลอีดี 7 ส่วนเป็นตัวเลขต่างๆ	46
4.8	รหัสของคีย์ต่างๆ	47
4.9	แรงดันที่จุด TP2 และความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิต่างๆ	63
4.10	ผลของ regression analysis ระหว่างความดัน(X)และแรงดันไฟฟ้า(Y)	64
4.11	ตำแหน่งข้อมูลและค่าความดันที่วัดได้ ณ อุณหภูมิต่างๆ	66
4.12	ผลของ regression analysis ระหว่างความดันที่วัดได้(X)และความดันจากตาราง(Y)	67
4.13	ผลการทดลองวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี	69
4.14	ตำแหน่งข้อมูลและค่าความดันที่วัดได้ ณ อุณหภูมิต่างๆ เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้น 25°C	70
4.15	ผลของ regression analysis ระหว่างความดันที่วัดได้(X)และความดันจากตาราง(Y)	71
4.16	ค่าความดันที่วัดได้ ณ อุณหภูมิต่างๆ เมื่ออุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆ	72

สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่		หน้า
4.17	regression ของค่าความดันที่วัดได้(X) ที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆและความดันจากตาราง(10)(Y).....	73
4.18	ค่าวอเตอร์แอคติวิตีของน้ำบริสุทธิ์ และสารละลายเกลืออิ่มตัวที่อุณหภูมิ 40 °C รวมทั้งอุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆกัน.....	75
4.19	ความถูกต้องของเครื่องมือ.....	75

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	เครื่องมือของ Lewicki ประกอบด้วย S คือ ขวดบรรจุตัวอย่าง Ts คือ อุปกรณ์วัดอุณหภูมิของตัวอย่าง D คือ ขวดบรรจุสารดูดความชื้น และ L คือ เครื่องกำเนิดความร้อน.....	9
2.2	เครื่องมือของ Nunes T_M คือ อุณหภูมิภายในมานอมิเตอร์ T_R คือ อุณหภูมิห้อง และ Ts คือ อุณหภูมิของตัวอย่าง.....	10
2.3	เครื่องมือของ Benado และ Rizvi PT คือ อุปกรณ์วัดความดัน (pressure transducer) PSR คือ อุปกรณ์แสดงผล TC คือ ตัวควบคุมอุณหภูมิ H คือ ตัวกำเนิดความร้อน RTD คือ เทอร์โมมิเตอร์ F คือ พัดลม Vx(x = 1-6) คือ วาล์ว SF คือ ขวดบรรจุสารตัวอย่าง DF คือ ขวดบรรจุสารดูดความชื้น.....	11
2.4	โครงสร้างภายในของ Z80 A.....	14
2.5	โครงสร้างของอุปกรณ์วัดความดัน.....	14
2.6	ลักษณะของ LM335H และการต่อขาในตัวถังโลหะแบบ TO-46.....	15
3.1	ลักษณะของโปรโตบอร์ด.....	18
4.1	แผนภูมิแสดงความต้องการของระบบ.....	22
4.2	แผนภูมิแสดงส่วนประกอบของเครื่องวัดวอเตอร์แอคติวิตีแบบตัวเลขควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์.....	23
4.3	ลักษณะของมานอมิเตอร์ PT1 คือ differential pressure transducer PT2 คือ vacuum pressure transducer SF คือ ขวดบรรจุตัวอย่าง V1 และ V2 คือ วาล์ว.....	26
4.4	ลักษณะภายนอกของอุปกรณ์วัดความดัน MPX200GVP และ MPX2010DP...	26
4.5	วงจรส่วนวัดความดัน.....	29
4.6	วงจรส่วนวัดความดันสุญญากาศของระบบ.....	30
4.7	วงจรส่วน A/D converter ที่ใช้ ADC0808.....	31
4.8	วงจรหารสัญญาณนาฬิกา.....	32
4.9	วงจรส่วนควบคุมอุณหภูมิ.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.10	วงจรตรวจสอบอุณหภูมิในขวดบรรจุตัวอย่าง	35
4.11	วงจร A/D converter ที่ใช้ DAC0808	36
4.12	วงจรที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์วัดอุณหภูมิ LM335	37
4.13	แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้า	38
4.14	วงจรหลักในส่วนของวงจรกำเนิดสัญญาณนาฬิกา วงจรถอดรหัส และหน่วยความจำ	41
4.15	วงจรส่วนอินพุทเอาท์พุทส่วนที่ 1 ส่วนแสดงผล และคีย์บอร์ด	43
4.16	วงจรส่วนอินพุทเอาท์พุทส่วนที่ 2	44
4.17	ลักษณะของแอลอีดี 7 ส่วน และคีย์สวิทช์ที่ใช้ในวงจร	46
4.18	ลักษณะของส่วนบรรจุสารตัวอย่างที่ทำจากสเตนเลส	48
4.19	ระบบของมานอมิเตอร์ที่เสร็จสมบูรณ์แล้ว	50
4.20	ลักษณะภายนอกของ เครื่องต้นแบบ	51
4.21	ผังงานของโปรแกรมหลัก	52
4.22	ผังงานของโปรแกรมย่อยรับข้อมูลอุณหภูมิ	55
4.23	ผังงานของโปรแกรมย่อยการทำให้ระบบเป็นสุญญากาศ	56
4.24	ผังงานของโปรแกรมย่อยอ่านค่าความดันไอน้ำ	58
4.25	ผังงานของโปรแกรมย่อยการคูณ	59
4.26	ผังงานของโปรแกรมย่อยการหาร	61
4.27	ผังงานของโปรแกรมย่อยหาร เลขขนาด 32 บิท ด้วย 16 บิท	62
4.28	กราฟระหว่างความดันและแรงดันไฟฟ้า	64
4.29	กราฟแสดง regression ระหว่างความดัน(X)และแรงดันไฟฟ้า(Y)	65
4.30	กราฟระหว่างความดันที่วัดได้จาก MPX2010DP และความดันจากตาราง	67
4.31	กราฟแสดง regression ระหว่างความดัน(X)และความดันทางทฤษฎี(Y)	68
4.32	กราฟแสดง regression ระหว่างความดัน(X)และความดันทางทฤษฎี(Y)	71
4.33	กราฟแสดง regression ระหว่างค่าความดันที่วัดได้(X)และความดันจากตาราง(10)(Y)ที่อุณหภูมิเริ่มต้นต่างๆ	74

สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการ

A_w คือ วอเตอร์แอคติวิตี

P คือ ความดันไอน้ำของสารตัวอย่าง

P_o คือ ความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิที่ใช้วัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี

$P(H_2O)$ คือ ความดันไอของน้ำในอากาศ

%ERH คือ ร้อยละของความชื้นสัมพัทธ์สมดุลย์

n_1 คือ จำนวนโมล(moles)ของน้ำในสารละลาย

n_2 คือ จำนวนโมลของตัวถูกละลาย(solute)

G คือ จำนวนกรัมของสารละลายที่ใช้

ΔT_f คือ จุดเยือกแข็งที่ลดลง($^\circ C$)

K_f คือ ค่าคงที่ สำหรับน้ำมีค่าเท่ากับ 1.86

ΔH_1 คือ ระดับของน้ำมันที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการวัดค่าความดันไอจากขวดที่บรรจุตัวอย่าง(mm)

ΔH_2 คือ ระดับของน้ำมันที่เปลี่ยนไปเมื่อทำการวัดค่าความดันไอจากขวดที่บรรจุสารดูดความชื้น(mm)

h_1 คือ ระดับของน้ำมันเมื่อทำการวัดขวดตัวอย่าง(mm)

h_{2u} คือ ระดับของน้ำมันหลังจากมีการให้สารดูดความชื้นสัมผัสกับกาซในระบบท่อ(mm)

C คือ ค่าสัมประสิทธ์ของระบบ มีค่า = $(1+V_d/V_t)$ เมื่อ V_t คือ ปริมาตรของท่อและขวดบรรจุตัวอย่าง และ V_d คือ ปริมาตรของขวดบรรจุสารดูดความชื้น

R คือ ค่าคงที่ของกาซ

P_{sat} คือ ค่าความดันไอของน้ำบริสุทธิ์ ณ อุณหภูมิที่ทำการทดลอง

P_1 คือ ค่าความดันรวมที่วัดได้ครั้งแรก

P_2 คือ ค่าความดันของกาซที่ไม่ถูกดูดซับด้วยสารดูดความชื้น

P^* คือ ค่าความดันเริ่มต้นในขวดที่บรรจุสารดูดความชื้น

P_{do} คือ ค่าความดันที่เกิดจากสารดูดความชื้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สัญลักษณ์ที่ใช้ในสมการ(ต่อ)

P_{11} คือ ค่าความดันของกาซที่ไม่ถูกดูดซับด้วยสารดูดความชื้นในขวดที่บรรจุตัวอย่าง

P_a คือ ความดันในระบบท่อทางด้านขวดบรรจุสารตัวอย่าง

P_b คือ ความดันในระบบท่อด้านสุญญากาศของอุปกรณ์วัดความดัน

V_a คือ ปริมาตรของระบบท่อทางด้านขวดบรรจุสารตัวอย่างรวมกับปริมาตรของขวดบรรจุสารตัวอย่าง

V_b คือ ปริมาตรของระบบท่อด้านสุญญากาศของอุปกรณ์วัดความดัน

n_a คือ จำนวนโมลของกาซในระบบท่อทางด้านขวดบรรจุสารตัวอย่างรวมกับจำนวนโมลของกาซในขวดบรรจุสารตัวอย่าง

n_b คือ จำนวนโมลของกาซในระบบท่อด้านสุญญากาศของอุปกรณ์วัดความดัน

T คือ อุณหภูมิ($^{\circ}C$)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย