

ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลของเมนทอลในบุหรืรสมเมนทอล

ปริญญานิพนธ์
ของ
บุญธิดา แสนบรรดิษฐ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ตุลาคม 2551

ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายทอดเทมพลของเมนทอลในบุหรืรสมเมนทอล

ปริญญานิพนธ์
ของ
บุญธิดา แสนบรรดิษฐ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ตุลาคม 2551
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายทอดเทมพลของเมนทอลในบุหรืรสมเมนทอล

บทคัดย่อ
ของ
บุญธิดา แสงบรรดิษฐ์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

ตุลาคม 2551

บุญธิดา แสนบรรดิษฐ์. (2551). *ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลของเมนทอลในบุหรีรสเมนทอล*.
ปริญญาานิพนธ์ วศ.ม.(วิศวกรรมเคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทร
วิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สีนสุภา จัยจุลเจิม, ดร.อุดมชัย จิ
นะดิษฐ์.

เมนทอลเป็นสารปรุงแต่งรสชาติที่มีค่า LD_{50} สูงและได้รับความนิยมเติมลงในผลิตภัณฑ์
บุหรี เพื่อเพิ่มความหอม ลดความระคายเคืองและจุก โดยปกติปริมาณเมนทอลที่เติมลงในบุหรีจะอยู่
ในช่วง 0.2 ถึง 0.8 เปอร์เซ็นต์ แล้วแต่ยี่ห้อหรือตรา เนื่องจากเมนทอลเป็นสารที่ระเหิดได้ง่าย ดังนั้น
จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมการหายไปของเมนทอลในบุหรีเพื่อให้ผลิตภัณฑ์มีคุณภาพสม่ำเสมอ
งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการแพร่ของเมนทอลในอากาศโดยการเปรียบเทียบน้ำหนักเมนทอลที่
ลดลงตามเวลาเมื่ออยู่ในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน การวิเคราะห์หาปริมาณเมนทอลในบุหรีจะใช้
เทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟี พบว่าค่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อการแพร่ของเมนทอลแต่อุณหภูมิมี
ผลต่อการแพร่ จากผลที่ได้นำมาหาสมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลสู่อากาศ
และนำไปเปรียบเทียบกับสมการเอมพิริคัลของ Slattery ที่ใช้ค่าตัวแปรระหว่างส่วนผสมของน้ำกับ
ก๊าซที่ไม่มีขั้ว พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกันมาก สำหรับอัตราการหายไปของเมนทอลในกันกรอง
บุหรีพบว่ามีความต่ำกว่าอัตราการลดลงของเมนทอลบริสุทธิ์และยังพบว่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมี
ค่าสูงเมื่ออุณหภูมิสูง โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมของเมนทอลที่อยู่ในกันกรองของบุหรี
ในช่วง 0.042 ถึง 0.089 เซนติเมตรต่อวินาที เมื่อใช้อุณหภูมิ 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส ความชื้น
สัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : การถ่ายเทมวล เมนทอล บุหรีรสเมนทอล

FACTORS INFLUENCING THE MASS TRANSFER OF MENTHOL FROM
MENTHOLATED CIGARETTE

AN ABSTRACT
BY
BOONTHIDA SANBUNDIT

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Engineering Degree in Chemical Engineering
at Srinakharinwirot University

October 2008

Boonthida Sanbundit. (2008). *Factors influencing the mass transfer of menthol from mentholated cigarette*. Master thesis, M.Eng. (Chemical Engineering). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee : Assist. Prof. Dr. Sinsupha Chuichulcherm, Dr. Udomchai Chinadit.

Menthol is one of the favorite flavor additives due to its high LD₅₀ value, so many cigarette manufacturers use menthol as an additive not only to enhance the cigarette flavor but also to reduce the throat and sinus irritation. Mentholated cigarette contains menthol between 0.2 to 0.8 % depending on brand. Due to its low sublimation temperature, menthol concentration in cigarette should be controlled for good quality during production and storage process. Diffusion coefficients for pure menthol in air were measured by weighing the test specimen under desired conditions. The concentrations of menthol in cigarette were measured using Gas Chromatography. It was found that the menthol diffusion coefficient in air was not affected by humidity but sensitive to temperature. The resulting correlation in the experiment can be obtained and compared with other theoretical and empirical correlations, and it agrees well with the correlation proposed by Slattery that used factor between water with non-polar gases. Even though the rate of mass transfer for menthol in cigarette increased with temperature, it was found to be less than pure menthol. Mass transfer coefficients of menthol in cigarette were calculated to be in a range from 0.042 to 0.089 cm/sec in the operating temperature for 20 to 40 °C with 60 %RH.

Keyword : mass transfer , menthol , mentholated cigarette

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

ปัจจัยที่มีผลต่อการถ่ายเทมวลของเมนทอลในบุหรืรสมเมนทอล

ของ
บุญธิดา แสนบรรดิษฐ์

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวិชากรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย สันติวัฒนกุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2551

คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่า

.....ประธาน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิ้นสุภา จุ้ยจุลเจิม)

.....ประธาน
(รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริวรรณ ศรีสรณ์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อุดมชัย จินะดิษฐ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สิ้นสุภา จุ้ยจุลเจิม)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร. อุดมชัย จินะดิษฐ์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จรรย์ ฉัตรมานพ)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จได้ด้วยดีเป็นเพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สินศุภา จุ้ยจุลเจิม ประธานกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ และ อาจารย์ ดร.อุดมชัย จินะดิษฐ์ กรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ท่านทั้งสองได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำในการจัดทำงานวิจัยนี้ทุกขั้นตอน อีกทั้งทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ในการทำงานวิจัยด้านวิศวกรรมเคมีและรู้ถึงคุณค่าของงานวิจัยทางวิศวกรรมเคมีที่สามารถดัดแปลงการวิจัยให้เหมาะสมกับการทำงานในด้านวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์เคมีได้อย่างมีคุณค่ามากขึ้น

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ศิริวรรณ ศรีสรจันทร์ ประธานสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ ฉัตรมานพ กรรมการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ที่ให้ข้อเสนอแนะและอภิปรายผลจากงานวิจัยในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณฝ่ายวิจัยและพัฒนา โรงงานยาสูบ ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยมาโดยตลอด ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความรู้แก่ผู้วิจัยในการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมเคมี ซึ่งทำให้ผู้วิจัยรู้ว่าการศึกษาในระดับปริญญาโทของผู้วิจัยนั้นมิได้สิ้นสุดลงเพียงการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลงได้ หากผู้วิจัยได้ซึมซับเอากระบวนการเรียนรู้ที่ได้รับในระยะเวลา 2 ปีที่ผ่านมา ให้กลายเป็นการเรียนรู้ที่ต้องสืบเนื่องต่อไปอย่างไม่สิ้นสุด และนำเอาความรู้นั้นไปยังประโยชน์ให้แก่ผู้อื่นต่อ ๆ ไปอีกด้วย

ท้ายสุดผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดา สามี พี่ น้อง เพื่อน และลูก ๆ ทุกคนที่ให้ทั้งกำลังใจและกำลังใจที่ดีเยี่ยมตลอดระยะเวลาที่ศึกษาและทำงานวิจัย

บุญธิดา แสนบรรดิษฐ์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
ขอบเขตงานวิจัย.....	1
วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	1
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	7
วิธีการวิเคราะห์เมนทอล.....	25
ทฤษฎีการถ่ายเทมวล.....	25
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	31
สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	31
เครื่องวิเคราะห์.....	31
อุปกรณ์สำหรับการทดลอง.....	31
วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
วิธีวิเคราะห์ปริมาณเมนทอลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี.....	36
4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	40
ผลการศึกษาการถ่ายเทมวลของเมนทอลสู่อากาศ.....	40
ผลการศึกษาการถ่ายเทมวลของเมนทอลในบุหรี.....	52
การนำสมการมาใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต.....	71
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	74
สรุปผลการทดลอง.....	74
ข้อเสนอแนะ.....	76
บรรณานุกรม.....	77

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ภาคผนวก.....	80
ภาคผนวก ก.....	81
ภาคผนวก ข.....	100
ภาคผนวก ค.....	111
ภาคผนวก ง.....	116
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	121

บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	แสดงคุณสมบัติโดยทั่วไปของเมนทอล.....	6
2	การเตรียม Working Standard.....	36
3	แสดงผลการทดสอบความแตกต่างปริมาณเมนทอลด้วยโปรแกรม SPSS.....	41
4	แสดงปริมาตรของโมเลกุล.....	42
5	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลสู่อากาศ.....	45
6	แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ของเมนทอลและอากาศ ที่ใช้ในการคำนวณค่า สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลในอากาศ.....	48
7	แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ได้จากการคำนวณและการทดลองที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส.....	48
8	เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลสู่อากาศระหว่างการทดลอง กับสมการ 77.....	51
9	ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล.....	59
10	ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเมนทอล จากการทดลอง.....	61
11	อัตราการหายไปช่วงแรกของเมนทอลในบุหรีและค่าสัมประสิทธิ์ช่วงแรก ของการถ่ายเทมวล (k_c).....	63
12	ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ k'	64
13	Slope ระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลาและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉลี่ย ของเมนทอล (k_{ov}).....	67
14	แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในรูปของ Sum of the square deviation ระหว่าง ผลที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณตามสมการ 88 และ 89.....	71

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 โครงสร้างทางเคมีของเมนทอล.....	3
2 อิแนนทีโอเมอร์และสเตอริโอไอโซเมอร์ของเมนทอล.....	4
3 โครงสร้างของเมนทอลตามธรรมชาติ.....	4
4 กลไกการสังเคราะห์เมนทอล.....	5
5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเมนทอล.....	6
6 แผนภาพมวนบุหรี.....	12
7 การไหลของก๊าซเข้าและออกจากมวนบุหรี.....	20
8 วิธีการหาอัตราการหายไปของเมนทอล.....	32
9 วิธีการหาความเข้มข้นของเมนทอลบริสุทธิ์ในอากาศที่จุดสมดุล.....	33
10 บุหรีบรรจุในกล่องพลาสติก (ก) 3.15x8.40x9.50 เซนติเมตร (ข) 3.15x8.40x0.75 เซนติเมตร.....	34
11 วิธีการหาความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่จุดสมดุลเมื่อเมนทอลบรรจุ ในบุหรี.....	35
12 วิธีวิเคราะห์เมนทอลในบุหรี.....	37
13 แสดงอัตราการหายไปของปริมาณเมนทอลเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลง ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส.....	40
14 แสดงอัตราการหายไปของปริมาณเมนทอลเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 60 เปอร์เซ็นต์.....	42
15 การทดลอง (ก) อัตราการหายไปของเมนทอลสู่อากาศ และ (ข) หาความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่ผิวเมนทอล.....	44
16 เปรียบเทียบความเข้มข้นของไอเมนทอลในอากาศเมื่อเก็บไว้ในภาชนะปิด ที่เวลาต่างกัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....	45
17 แสดงความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่ผิวเมนทอลที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	46
18 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลที่ได้จากการทดลองและ สมการต่าง ๆ.....	49
19 กราฟระหว่าง $\ln D_{AB}$ ที่ได้จากการทดลองกับ $\ln (T/298.16)$ เส้นทึบคือค่าเฉลี่ย 50	
20 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลสู่อากาศระหว่างการทดลอง กับสมการ 77.....	51
21 บุหรีบรรจุในกล่องพลาสติกทรงสูง 3.15x8.40x9.50 เซนติเมตร (A).....	52

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

22	บุหรีบรรจุในกล่องพลาสติกทรงเตี้ย 3.15x8.40x0.75 เซนติเมตร (B).....	53
23	อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ บรรจุในกล่องทรงสูง เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม.....	53
24	อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ บรรจุในกล่องทรงเตี้ย เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม.....	54
25	เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีระหว่างสภาวะ A และ B ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม.....	55
26	เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีระหว่างสภาวะ A และ B ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม.....	56
27	เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีระหว่างสภาวะ A และ B ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม.....	56
28	เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีระหว่างสภาวะ A และ B ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม.....	57
29	เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีระหว่างสภาวะ A และ B ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม.....	57
30	การทดลองหาความเข้มข้นของเมนทอลที่ผิวบุหรี.....	60
31	เปรียบเทียบความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่ผิวบุหรี เมื่อเก็บไว้ในภาชนะปิด ที่เวลาต่างกัน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส.....	61
32	แสดงค่าความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่ผิวบุหรีที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....	62
33	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k' กับอุณหภูมิ.....	65
34	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลา กรณีบรรจุบุหรีในกล่องทรงสูง เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือเส้นแสดงค่าเฉลี่ย.....	66

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ

หน้า

35	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลา กรณีบรรจุบูรีในกล่องทรงเตี้ย เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือเส้นแสดงค่าเฉลี่ย.....	67
36	แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{ov} กับอุณหภูมิ.....	68
37	อัตราการหายไปของเมนทอลในบูรีที่บรรจุในกล่องทรงสูง (A) เส้นประที่แสดงในภาพประกอบ คือเส้นที่คำนวณจากสมการ 88.....	70
37	อัตราการหายไปของเมนทอลในบูรีที่บรรจุในกล่องทรงเตี้ย (B) เส้นประที่แสดงในภาพประกอบ คือเส้นที่คำนวณจากสมการ 89.....	70

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เมนทอลถือเป็นสารเติมแต่งผลิตภัณฑ์เพื่อให้ความเย็นที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมอาหาร ยา และบุหรี เป็นต้น ในอุตสาหกรรมบุหรีจะเติมเมนทอลลงไปในช่วง 2.0-6.0 มิลลิกรัมต่อมวนแล้วแต่ยี่ห้อหรือตรา เมนทอลเป็นสารที่ระเหยได้ง่าย จึงส่งผลให้ขั้นตอนการผลิต และขั้นตอนการเก็บรักษาก่อนที่จะบริโภคมีความสำคัญต่อรสชาติความเย็นของบุหรี บุหรีรส เมนทอลจะมีมาตรฐานปริมาณเมนทอลในบุหรีเพื่อให้ความเย็นของบุหรีมีความคงที่จนถึงมือผู้บริโภค และเนื่องจากเมนทอลเป็นสารที่ระเหยง่ายซึ่งขึ้นกับอิทธิพลต่าง ๆ เช่น อุณหภูมิ ทำให้ต้องระวังเรื่องการเก็บซึ่งจะมีผลต่อการหายไปของเมนทอล

ในกระบวนการผลิตมีความสำคัญมาก ถ้าสภาวะแวดล้อมไม่เหมาะสมหรือปล่อยให้บุหรีอยู่ในขั้นตอนการผลิตนานเกินไปจะทำให้เมนทอลต่ำกว่ามาตรฐาน ขั้นตอนการบริโภคก็เช่นเดียวกัน ถ้าเปิดช่องไว้นานหรืออยู่ในสภาวะไม่เหมาะสมก็จะทำให้ความเย็นลดลง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาการแพร่ของเมนทอลในอากาศ

1.2.2 เปรียบเทียบการหายไปของเมนทอลในบุหรีที่อุณหภูมิต่างกัน

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาการแพร่ของเมนทอล โดยศึกษาการหายไปของเมนทอลที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันแล้วนำมาเปรียบเทียบกับค่าการแพร่ ที่ได้จากการคำนวณ

1.3.2 เปรียบเทียบอิทธิพลของอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการหายไปของเมนทอลในบุหรี

1.3.3 เปรียบเทียบการหายไปของเมนทอลในบุหรีระหว่างสภาวะที่ไม่มีลมพัดผ่านและสภาวะที่มีลมพัดผ่าน

1.4 วิธีการดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีการแพร่ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ศึกษาการแพร่ของเมนทอล

1.4.2.1 การหายไปของเมนทอล ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 50, 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

1.4.2.2 การหายไปของเมนทอล ที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

1.4.2.3 ศึกษาปริมาณเมนทอลที่จุดสมดุล (Equilibrium) ที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

1.4.3 ศึกษาการแพร่ของเมนทอลในบุหรี

1.4.3.1 การหายไปของเมนทอลในบุหรี ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ มีลมพัดผ่าน 0.24 เมตรต่อวินาที โดยทำที่ 2 สภาวะ

- บรรจุบุหรีในกล่องพลาสติกทรงสูง
- บรรจุบุหรีในกล่องพลาสติกทรงเตี้ย

1.4.3.2 ศึกษาปริมาณเมนทอลในบุหรีที่จุดสมดุล ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์

1.4.4 วิเคราะห์ สรุปผลการวิจัย และทำรายงานการวิจัย

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ควบคุมสภาวะและการจัดเก็บบุหรีในกระบวนการผลิตและก่อนการบริโภคให้เหมาะสม เพื่อควบคุมคุณภาพบุหรีรสเมนทอลให้เป็นไปตามมาตรฐาน

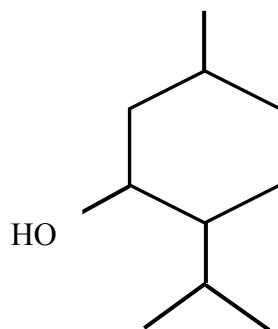
1.5.2 นำข้อมูลไปใช้ในการพัฒนาการผลิตบุหรีรสเมนทอล เพื่อลดค่าใช้จ่าย และการสูญเสียของเมนทอลในช่วงการผลิต

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

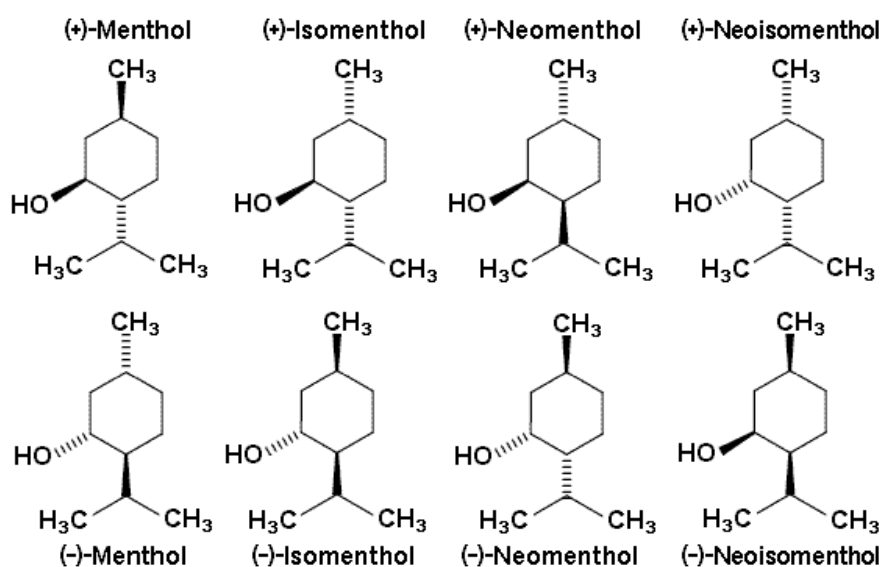
เมนทอล (Wikipedia 2007: Online) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะโควาเลนต์ (Covalent Bond) เกิดจากการสังเคราะห์หรือสกัดได้จากพืชจำพวกมินท์ (Mint) เช่น เปปเปอร์มินท์ (Peppermint) เมนทอลมีลักษณะเป็นไขรวมเป็นผลึกสีขาว เป็นของแข็งที่อุณหภูมิห้อง โดยธรรมชาติเมนทอลจะอยู่ในรูป (-) menthol เมนทอลมีคุณสมบัติทำให้เกิดอาการชา และลดอาการระคายเคือง นอกจากนี้ยังใช้กันแพร่หลายในการบรรเทาอาการระคายเคือง

เมนทอลรู้จักกันครั้งแรกที่ประเทศญี่ปุ่นมานานกว่า 2000 ปี แต่เริ่มนำเข้ามาในตะวันออกเมื่อปี ค.ศ.1771 เมนทอล มีชื่อทางเคมีว่า (-)-menthol หรือ (1R,2S,5R)-menthol พบในน้ำมันเปปเปอร์มินท์ มีสูตรโมเลกุลคือ $C_{10}H_{20}O$ และมีสูตรโครงสร้างดังภาพประกอบ 1 เมนทอลที่เป็นธรรมชาติจะมี 1 เอแนนทิโอเมอร์ (Enantiomer) และมี 7 สเตอริโอไอโซเมอร์ (Stereoisomer) ดังภาพประกอบ 2

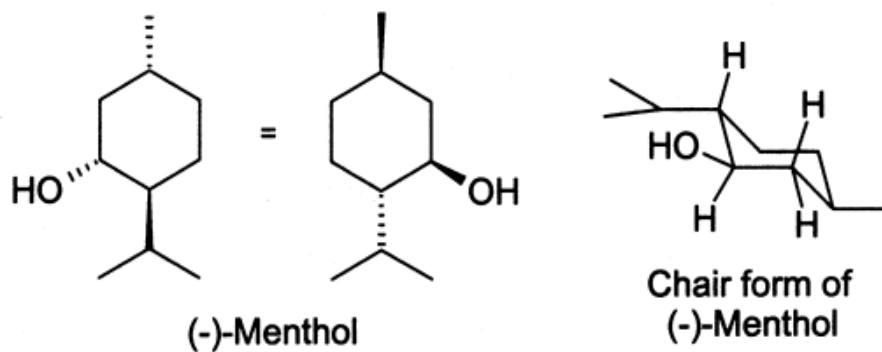


ภาพประกอบ 1 โครงสร้างทางเคมีของเมนทอล

เมนทอลตามธรรมชาติกลุ่มไอโซโพรพิล (Isopropyl group) สามารถสลับซ้ายขวาระหว่างกลุ่มเมทิลและแอลกอฮอล์ (Methyl and Alcohol groups) ได้ซึ่งสามารถเขียนได้ดังภาพประกอบ 3



ภาพประกอบ 2 เอแนนทิโอเมอร์และสเตอริโอไอโซเมอร์ของเมนทอล



ภาพประกอบ 3 โครงสร้างของเมนทอลตามธรรมชาติ

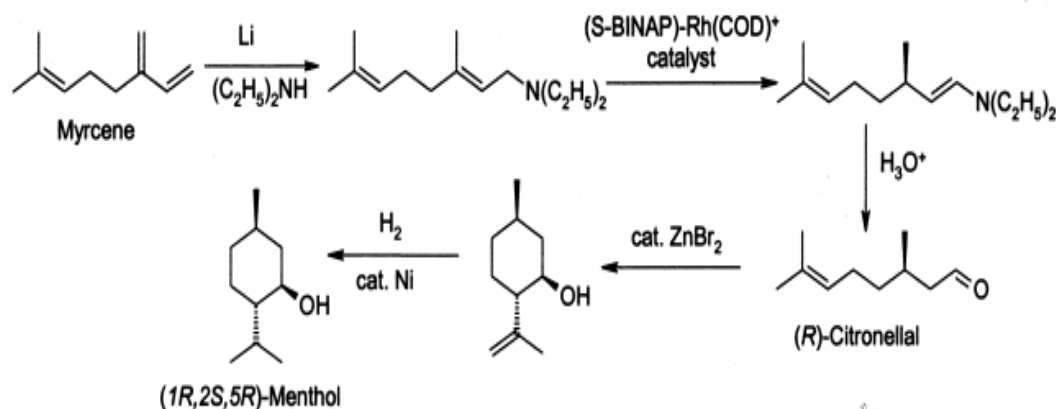
เมนทอลมีค่า LD_{50} (oral) ในหนูทดลองเท่ากับ 3,300 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม และ LD_{50} (skin) ในกระต่ายทดลองเท่ากับ 15,800 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งมีความเป็นพิษต่ำ ดังนั้นจึงนิยมนำมาเติมลงในผลิตภัณฑ์หลายอย่าง เช่นผลิตภัณฑ์ที่ช่วยบรรเทาอาการคัน อาการเจ็บปวดที่ปากหรือคอ เช่น ลิฟท์ปาล์ม ใช้ในผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดปาก เช่น น้ำยาบ้วนปาก ยาสีฟัน สเปรย์ฉีดป้องกัน

กลิ่นปาก หรืออาจผสมในลูกอมหรือหมากฝรั่ง นอกจากนี้ยังเติมลงในผลิตภัณฑ์บุหรี่ เพื่อเพิ่มความหอม ลดความระคายคอและจุกในขณะสูบบุหรี่ และช่วยทำให้กลิ่นควันบุหรี่ที่พ่นออกมาหอมขึ้น

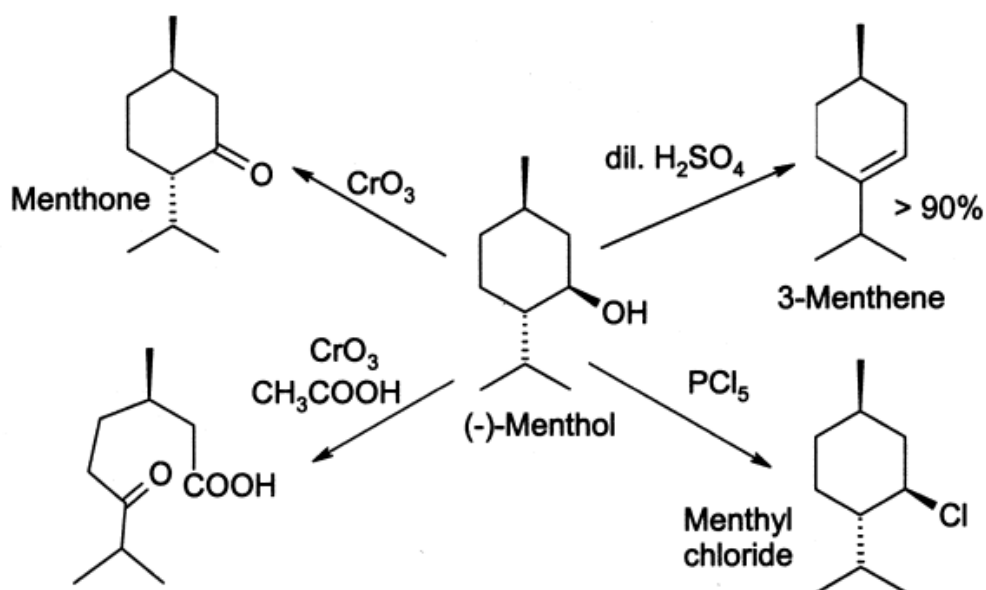
เมนทอลใช้กันอย่างแพร่หลายทำให้ความต้องการเมนทอลเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการคิดค้นเมนทอลสังเคราะห์ขึ้นโดย Ryoji Noyori และคณะ (Wikipedia 2007: Online) โดยใช้ไมซีน (Myrcene) เป็นสารเริ่มต้นมีกลไกดังภาพประกอบ 4 เมนทอลสังเคราะห์สามารถตรวจสอบได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography Mass Spectrometer (GC-MS) ซึ่งตามธรรมชาติเมนทอลจะมีสารอื่น ๆ ปน อยู่เช่น เมนโทน (Menthone) และ เอสเทอร์เมทิลอะซิเตต (Ester Menthyl Acetate) เป็นต้น แต่สารสังเคราะห์จะมีเฉพาะเมนทอลเท่านั้น

คุณสมบัติทางเคมีของเมนทอลสามารถถูกออกซิไดส์ได้ด้วยกรดโครมิก (Chromic Acid) ไปเป็นเมนโทนและในบางสภาวะก็สามารถออกซิไดส์ต่อทำให้วงแหวนแตกออก นอกจากนี้เมนทอลยังเกิดการดีไฮเดรตไปเป็น 3-เมนทีน (3-Menthene) โดยทำปฏิกิริยากับ 2 เปอร์เซนต์กรดซัลฟริก และเมื่อเมนทอลทำปฏิกิริยากับ PCl_5 จะได้เมทิลคลอไรด์ (Menthyl Chloride) ดังภาพประกอบ 5

เมนทอลทำให้มีความรู้สึกเย็นเนื่องจากเมื่อเราหายใจ กิน หรือสัมผัสที่ผิวหนัง เมนทอลจะไปกระตุ้นปลายประสาทสัมผัสของผิวหนังให้มีความรู้สึกเย็น เมนทอลไม่ได้ทำให้อุณหภูมิลดลงเหมือนกับสารที่ทำให้รู้สึกร้อนในพริกไทยไม่ได้ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่จะไปกระตุ้นปลายประสาทสัมผัสให้มีความรู้สึกร้อน คุณสมบัติโดยทั่วไปของเมนทอลตามตาราง 1



ภาพประกอบ 4 กลไกการสังเคราะห์เมนทอล



ภาพประกอบ 5 กลไกการเกิดปฏิกิริยาของเมนทอล

ตาราง 1 แสดงคุณสมบัติโดยทั่วไปของเมนทอล

คุณสมบัติ	เมนทอล
CAS number	89-78-1
น้ำหนักโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	156.27
จุดหลอมเหลว (เคลวิน)	318.00
จุดเดือด (เคลวิน)	485.00
ความดันวิกฤติ (critical pressure , atm)	26.75
อุณหภูมิวิกฤติ (critical temperature , K)	657.85
ความหนาแน่นสถานะของแข็ง (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	0.89
ปริมาตรโมเลกุล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)	189.88

ที่มา: วิกีพีเดีย และ Air Property Calculator : ออนไลน์

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 งานวิจัยเกี่ยวกับการแพร่

2.1.1.1 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารสู่อากาศ

โกลด์สเตียน และโช (Goldstein; & Cho. 1995: 416-434) ศึกษาการแพร่ของ แนพทาซีน (Naphthalene) โดยหลอมแนพทาซีนใส่แม่พิมพ์ทำให้เป็นก้อนที่มีขนาดแน่นอน ศึกษาการหายไปด้วยการวัดขนาดของก้อนเทียบกับเวลา ซึ่งโดยปกติอาจใช้ชั่งน้ำหนักเทียบกับเวลาก็ได้ แต่เครื่องชั่งที่ใช้วัดต้องมีค่าความละเอียด (Resolution) 0.1 มิลลิกรัมและค่าร้อยละของความคลาดเคลื่อนต้องน้อยกว่า 1 เมื่อเครื่องชั่งมีขนาด 200 กรัม การศึกษาครั้งนี้สามารถเขียนสมการค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้ดังนี้

$$D_{\text{naph}} = 0.0681 \left(\frac{T}{298.16} \right)^{1.93} \left(\frac{1.013 \times 10^5}{P_{\text{atm}}} \right) \quad (1)$$

$$\nu_{\text{air}} = 0.1556 \left(\frac{T}{298.16} \right)^{1.7774} \left(\frac{1.013 \times 10^5}{P_{\text{atm}}} \right) \quad (2)$$

$$Sc = 2.28 \left(\frac{T}{298.16} \right)^{-0.1526} \quad (3)$$

เมื่อ D_{naph} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของแนพทาซีนสู่อากาศ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที

ν_{air} คือความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) ของอากาศ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที

Sc คือค่าชmidt นัมเบอร์ (Schmidt Number) สำหรับแนพทาซีนในอากาศ

T คืออุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน

P คือความดัน มีหน่วยเป็นปาสกาล

การศึกษานี้ศึกษาทั้งการถ่ายเทมวลและการถ่ายเทความร้อน ค่าที่ได้เทียบกับทฤษฎีและผลการวิจัยต่าง ๆ ที่ผ่านมามีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน

2.1.1.2 การศึกษาการแพร่ของเมนทอลในบุหรื

บรอซซ์คี (Borschke. 1993: 47-70) กล่าวว่าเมนทอลเริ่มใช้กับผลิตภัณฑ์ยาสูบในช่วง ค.ศ.1920-1929 แต่มาพัฒนาและแพร่หลายกันมากในช่วง ค.ศ.1960-1969 เทคนิคในการเติมเมนทอลลงในผลิตภัณฑ์บุหรืมีด้วยกันหลายวิธีเช่นการฉีดสารละลายเมนทอลลงบนยาเส้นก่อนมวนเป็นบุหรื การฉีดเมนทอลในกระดาษมวนหรือกระดาษพันกันกรอง การฉีดเมนทอลลงบนกระดาษห่อซอง การฉีดเมนทอลลงในกันกรองในกระบวนการผลิตกันกรอง และการใช้เส้นด้ายที่มีเมนทอลใส่ในกันกรอง เป็นต้น ความสม่ำเสมอของเมนทอลในผลิตภัณฑ์บุหรืก็ขึ้นกับการแพร่ของเมนทอลสู่กันกรองและยาเส้น ดังนั้นจึงต้องมีการพัฒนาวิธีการเติมเมนทอลเพื่อให้เมนทอลอยู่ในบุหรืให้นานจนถึงมือผู้บริโภค เคอร์แลน (Curran. 1975: 69-70) ศึกษาการแพร่ของเมนทอลสู่กันกรองโดยการเติมสาร คือ ไตรอะซิทีน (Triacetin) ไตรเอทิลกลีคอล ไดอะซิเตท (Triethylene Glycol Diacetate) ไตรอะซิทีน กับกลีเซอรอล (Glycerol) และไตรอะซิทีน กับ 1, 2 โพรพานไดออล (1,2-Propanediol) ในปริมาณต่าง ๆ กัน พบว่าประสิทธิภาพการแพร่ดีที่สุดเมื่อเติมไตรอะซิทีน 5 เปอร์เซ็นต์

มาทิส (Mathis. 1983: 1-8) ศึกษาการแพร่ของสารหอมในบุหรืและชี้ให้เห็นว่าสิ่งแวดล้อมมีผลต่อความดันไอของสารเหล่านั้น เมื่อส่วนประกอบของสารในบุหรืเปลี่ยนไปจะมีผลต่ออัตราการแพร่และระดับสมดุลของความดันไอของสารเหล่านั้น ดังนั้นการเติมเมนทอลในเส้นใยกันกรอง จึงต้องเลือกสภาวะและสารที่เป็นตัวผสมให้เหมาะสม เพื่อให้เกิดการดูดซึมเมนทอลในเส้นใยกันกรองที่ดีที่สุด เหตุผลมาจากทฤษฎีทั้งทางอุณหพลศาสตร์และทางจลนพลศาสตร์ ดังนี้

ทางอุณหพลศาสตร์ (Thermodynamic Viewpoint) คือการเติมสารเพื่อให้เมนทอลละลายในเส้นใยกันกรองมากขึ้น ซึ่งดูจากค่าการละลายของสาร เช่นในกันกรองที่เป็นเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose Acetate) ค่าการละลายจะใกล้เคียงกับไตรอะซิทีน ส่วนยาเส้นค่าการละลายของยาสูบจะมีค่าใกล้เคียงกับกลีเซอรอล ดังนั้นในกันกรองจะใช้ไตรอะซิทีนเป็นตัวผสม ส่วนในยาเส้นจะใช้กลีเซอรอล

ทางจลนพลศาสตร์ (Kinetic Viewpoint) คือการเพิ่มอัตราการแพร่ของเมนทอลในเส้นใยกันกรองโดยการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการแพร่ของตัวผสมและเมนทอลสูงขึ้น ทำให้ซึมเข้าไปในเส้นใยได้ดีขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการสูบบุหรี่การเปลี่ยนแปลงของตัวผสมจะลดลงเพียงเล็กน้อย

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาการแพร่ของเมนทอลในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ 4 รูปแบบคือ

2.1.1.2.1 การแพร่ระหว่างกันกรองกับยาเส้น

เพื่อให้เกิดความสมดุลของสารดังนั้นสารจึงมีการแพร่อยู่ตลอดเวลาจนกว่าจะเกิดความสมดุล เคอร์แลน (Curran. 1972: 40-42) ได้มีการศึกษาการแพร่ของเมนทอลจากกันกรองไปยังยาเส้นและอิทธิพลที่มีผลต่อปริมาณเมนทอลเมื่อเวลาผ่านไป โดยศึกษา 2 กรณีคือ การเติมเมนทอลลงในยาเส้นในปริมาณ 26 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก และเติมเมนทอลในกันกรองเซลลูโลสอะซิเตท ในปริมาณเดียวกัน ศึกษาการแพร่ของเมนทอลในส่วนต่าง ๆ เป็นเวลา 28 วัน ผลการศึกษา

พบว่าหลังจากเม้นทอลอยู่ในบุหรี่ 28 วัน เม้นทอลจะแพร่จากยาเส้นไปก้นกรอง 20 เปอร์เซ็นต์ และจากก้นกรองไปยังยาเส้น 41 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณเม้นทอลในบุหรี่จะสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 50 ถึง 60 วัน โดยจะพบเม้นทอลในยาเส้น 70 เปอร์เซ็นต์ และ ก้นกรอง 30 เปอร์เซ็นต์

นอกจากนี้ เรียว ชอคเลย์ และ เรย์โนลด์ส์ (Riehl; Shockley; & Reynolds. 1973: 10-11) ได้ศึกษาการกระจายเม้นทอลระหว่างยาเส้นกับก้นกรองและการแพร่ของเม้นทอลไปสู่ควันบุหรี่ โดยศึกษา 2 กรณีคือ การเติมเม้นทอลลงในยาเส้นและในก้นกรองเซลลูโลสอะซิเตท ปริมาณ 2.7 มิลลิกรัมต่อมวน ศึกษาการแพร่ของเม้นทอลในส่วนต่าง ๆ เป็นเวลา 7 สัปดาห์ ผลการศึกษาพบว่า ทั้ง 2 กรณี ปริมาณเม้นทอลจะคงที่ทั้งหมดเมื่อเวลาผ่านไป 4 สัปดาห์ และพบปริมาณเม้นทอลในยาเส้นกรณี que เติมเม้นทอลในยาเส้นและก้นกรอง 70 เปอร์เซ็นต์และ 40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ยาเส้นในบุหรี่แต่ละตราใช้ใบยาที่มีโครงสร้างและคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกัน ดังนั้น การแพร่ของเม้นทอลจากยาเส้นไปยังก้นกรองก็แตกต่างกัน เบคชิน และคณะ (Baek Shin; et al. 2005: abstr. SSPT 52) ได้ศึกษาการแพร่ของเม้นทอลในยาเส้นไปยังก้นกรอง โดยศึกษาใบยาเวอร์ยีนีแยล่าง (KFL) ใบยาเวอร์ยีนีแยบน (KFU) ใบยาเบอร์เลย์ (B) และเส้นยาพอง (Expanded tobacco, EX) ใช้ก้นกรองเซลลูโลสอะซิเตท ที่มี ไตรอะซิติน 6 เปอร์เซ็นต์ ฉีดเม้นทอล 0.8 เปอร์เซ็นต์ ลงในยาเส้นแต่ละชนิด เก็บที่สภาวะคงที่ วัดทุก 15 วันเป็นเวลา 2 เดือน ผลการทดลองพบว่าการแพร่ของเม้นทอลในยาเส้นชนิดต่าง ๆ ไปยังก้นกรองได้ผลดังนี้ KFL 59, B 53, EX 48, และ KFU 36 เปอร์เซ็นต์

2.1.1.2.2 การแพร่ของเม้นทอลไปกับควันบุหรี่เมื่อมีการสูบ

เมื่อทำการสูบบุหรี่ เม้นทอลจะแพร่ไปตามควันบุหรี่ ซึ่งเกิดจากแรงในการสูบ ลักษณะการแพร่แตกต่างกันไปตามปริมาณความเข้มข้น ชนิดก้นกรอง ชนิดใบยา วิธีการเติมเม้นทอล เป็นต้น เรียว ชอคเลย์ และ เรย์โนลด์ส์ (Riehl; Shockley; & Reynolds. 1973: 10-11) ได้ศึกษาการแพร่ของเม้นทอลไปสู่ควันบุหรี่ โดยศึกษา 2 กรณีคือ การเติมเม้นทอลลงในยาเส้นและในก้นกรองเซลลูโลสอะซิเตท ปริมาณ 2.7 มิลลิกรัมต่อมวน ศึกษาการแพร่ของเม้นทอลในส่วนต่าง ๆ เป็นเวลา 7 สัปดาห์พบว่าปริมาณเม้นทอลในควันทั้ง 2 กรณีจะมีการส่งผ่าน ได้ 16 เปอร์เซ็นต์ของเม้นทอลทั้งหมด แสดงให้เห็นว่าที่เวลา 7 สัปดาห์เม้นทอลจะสมดุลกันระหว่างยาเส้นกับก้นกรองทำให้การส่งผ่านไปยังควันเท่ากัน แต่เนื่องจากยาเส้นในบุหรี่แต่ละตราใช้ใบยาที่มีโครงสร้างและคุณสมบัติเฉพาะตัวที่แตกต่างกันการแพร่ของเม้นทอลจึงอาจแตกต่างกันโดย เบคชิน และคณะ (Baek Shin; et al. 2005: abstr. SSPT 52) ได้ศึกษาการแพร่ของเม้นทอลในใบยาหลายชนิดที่ผ่านไปในควันบุหรี่ที่สูบเข้าไป โดยศึกษาใบยาเวอร์ยีนีแยล่าง (KFL) ใบยาเวอร์ยีนีแยบน (KFU) ใบยาเบอร์เลย์ (B) และเส้นยาพอง (Expanded tobacco, EX) ใช้ก้นกรองเซลลูโลสอะซิเตท ที่มี ไตรอะซิติน 6 เปอร์เซ็นต์ ฉีดเม้นทอล 0.8 เปอร์เซ็นต์ลงในยาเส้นแต่ละชนิด เก็บที่สภาวะคงที่ ทำการวัดทุก 15 วันเป็นเวลา 2 เดือน ผลการทดลองพบว่าการเคลื่อนที่ของเม้นทอลไปยังควันบุหรี่ได้ผลดังนี้ KFL 14.7, B 11.8, EX 10.8, และ KFU 10.2 เปอร์เซ็นต์

2.1.1.2.3 การแพร่ของเมนทอลออกจากช่องบุหรี

บุหรีที่บรรจุอยู่ในช่องที่ปิดสนิท เมนทอลจะมีการแพร่ออกนอกช่องน้อยมาก เพราะต้องแพร่ผ่านกระดาษห่อช่องและฟิล์มห่อช่องออกมา มิยาซึ และนาคาชิ (Miyachi; & Nakanishi. 2006: abstr. PT 11) ศึกษาการแพร่ของเมนทอลในบุหรีที่บรรจุในช่องปิดสนิทโดยใช้หลักการของความดันไอมาใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งพบว่าความดันไอในช่องจะมีค่าเท่ากับความดันไออิ่มตัว และความดันไอยังคงที่จนกระทั่งเมนทอลในรูปของแข็งหมดไปจากช่องหลังจากนั้นความดันไอจะค่อย ๆ ลดลง ความดันไอนี้จะวัดโดยเครื่อง Differential Scanning Calorimeter (DSC) และใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านช่องบุหรี และสัมประสิทธิ์การซึมผ่านวัสดุห่อหุ้มช่อง การหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านช่องจะสมมุติว่าชั้นของไบยาสูบในช่องบุหรีมีขนาดเท่ากัน ส่วนการหาค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านสมมุติว่าเป็นการซึมผ่านแบบคงตัว (Steady-state transfer) พบว่าเมื่อเทียบผลการทดลองกับโมเดลทางคณิตศาสตร์เป็นจริง และปริมาณเมนทอลที่หายไปจากห่อช่องที่ปิดสนิทสามารถประมาณค่าได้จากค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน

2.1.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับรูปแบบโมเดลของการแพร่

รูปแบบสมการที่ใช้ในการศึกษาการแพร่อาจแบ่งได้เป็น 2 ลักษณะคือ

2.1.2.1 รูปแบบอย่างง่าย

เป็นรูปแบบสมการที่ไม่ซับซ้อนซึ่ง มาทิส (Mathis. 1983: 1-8) ได้ศึกษาการเคลื่อนย้ายสารหอมที่ระเหยง่ายจากกันกรองไปยังยาเส้นในบุหรี โดยสามารถเขียนกราฟได้ตามสมการ

$$M(t) = M_{eq} (1 - e^{-kt}) \quad (4)$$

เมื่อ	$M(t)$	คือระดับการเคลื่อนย้ายที่เวลา t
	M_{eq}	คือระดับการเคลื่อนย้ายที่สมดุล
	e	คือลอการิทึมฐาน e (Natural base)
	k	คือค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1
	t	คือเวลา

การแปลค่าของข้อมูลการเคลื่อนย้ายนี้ทำให้สามารถประมาณค่าครึ่งชีวิตและระดับสมดุลของสารหอมระเหยได้

นอกจากนี้มาทิส (Mathis. 1983: 1-8) ยังได้อธิบายรูปแบบ (Computer model) ที่เลียนแบบพฤติกรรมของเมนทอล รูปแบบนี้เป็น finite difference simulation สามารถประมาณ

กระบวนการเคลื่อนย้ายและการแพร่ โดยใช้พื้นฐานจากกฎการแพร่ของฟิค (Fick law) และกฎการละลายของเฮนรี (Henry law)

กฎของฟิค ได้อธิบายการไหลของสารดังนี้

$$F = -D \left(\frac{dc}{dx} \right) \quad (5)$$

เมื่อ	F	คือฟลักซ์ของเมนทอลต่อหน่วยพื้นที่ต่อวินาที
	D	คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอล มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที
	C	คือความเข้มข้นของเมนทอล มีหน่วยเป็นโมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
	x	คือระยะทาง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร

กฎของเฮนรี ได้อธิบายถึงการละลายของสาร

$$P = r x P^0 \quad (6)$$

เมื่อ	P	คือความดันไอของเมนทอลในสารละลาย
	r	คือActivity Coefficient ของเมนทอล
	x	คืออัตราส่วนโมลของเมนทอลในสารละลาย
	P^0	คือความดันไอของเมนทอลบริสุทธิ์

2.1.2.2 รูปแบบไร้มิติ (dimensionless)

สำหรับการศึกษาการแพร่ของสารในบุหรี ซึ่งมีลักษณะเป็นท่อกลมการศึกษาจึงแยกออกเป็น 2 แนวทางด้วยกันคือ

2.1.2.2.1 การแพร่เมื่อไม่มีลมผ่านภายในท่อ

โอ และจอง (Oh; & Jheong 2004: 15-25) ศึกษาการแพร่ความชื้นในมวนบุหรีภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง โดยใช้ทฤษฎีการส่งผ่านความร้อนและมวล และตั้งสมมุติฐานว่า

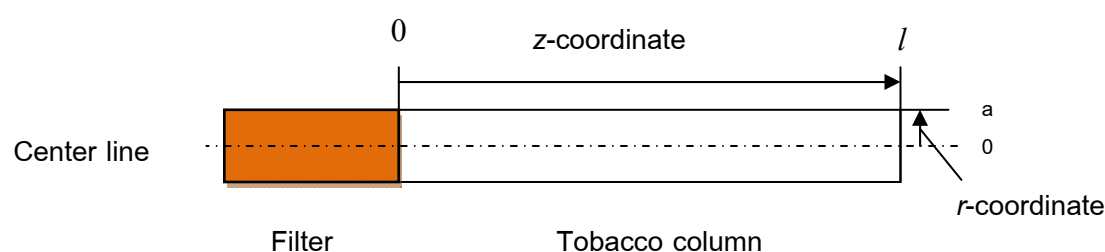
1. ความชื้นในระบบนี้คือไอระเหยของน้ำ (Water Vapor)
2. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของระบบเป็นเนื้อเดียวกัน
3. การเปลี่ยนแปลงการแพร่ความชื้นน้อยมากตัดทิ้งได้
4. ความหนาแน่นรวมในระบบคงที่

5. เนื่องจากไม่มีการไหลในระบบดังนั้นในรูปแบบการพาในสมการความต่อเนื่อง (Continuity Equation) ตัดทิ้งได้

6. การกระจายความชื้นในมุมต่าง ๆ ในระบบมีค่าน้อยมากตัดทิ้งได้

7. ความชื้นที่ผ่านไปยังก้นกรองของบุหรี่น้อยมากตัดทิ้งได้

การพัฒนาารูปแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับแท่งบุหรี่ที่มีก้นกรอง ใช้สมการพื้นฐานจากระบบทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate System) ดังภาพประกอบ 6 งานวิจัยนี้ออกแบบไว้ 3 รูปแบบดังนี้



ภาพประกอบ 6 แผนภาพมวนบุหรี่

รูปแบบที่ I แบ่งเป็น 2 แบบคือ I-I , I-II การแพร่ของความชื้นเกิดขึ้นในเวลาเดียวกันทั้งหมดทั้งในแนวแกน (z) และแนวรัศมี (r)

รูปแบบที่ II การแพร่ของความชื้นเกิดขึ้นเฉพาะแนวแกน

รูปแบบที่ III การแพร่ของความชื้นเกิดขึ้นเฉพาะแนวรัศมี

รูปแบบที่ I ทดลองวางมวนบุหรี่ทั้งมวนในสภาวะที่มีการแพร่ทั้งตามแนวแกนและตามแนวรัศมี ซึ่งตามปกติความชื้นในมวนบุหรี่ จะแพร่ผ่านทั้งที่กระดาษห่อมวน (ตามแนวแกน) และปลายทั้ง 2 ของมวนบุหรี่ (ตามแนวรัศมี) การออกแบบโมเดลแยกสมการเป็น 2 แบบ รูปแบบที่ I-I คิดเฉพาะตามแนวแกนและรูปแบบที่ I-II คิดเฉพาะตามแนวแกนรัศมี โดยใช้สมการพื้นฐานจากระบบทรงกระบอกดังสมการ 7

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_e \left[\frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right] + I \quad (7)$$

รูปแบบที่ I-I ศึกษาเฉพาะการแพร่ตามแนวแกนคือที่ผิวกระตาศห่อมนทั้งหมด และรวมเทอมของวัสดุต้นกำเนิด (Material Source Term , I) เข้าไปด้วย ดังนั้นจะได้สมการ 8

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} + I \quad (8)$$

โดยที่ I เป็นสมการการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และสมการการดูดซึมความชื้นของยาสูบอธิบายได้ในรูปสมการเอ็กโพเนนเชียล เมื่อแทนค่า I ในสมการ 8 จะได้

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} - k(c - c'_s) \quad (9)$$

โดยที่สภาวะเริ่มต้นเป็น

$$c=c_0 \quad 0 \leq z \leq l, t = 0 \quad (10)$$

และสภาวะขอบเขตเป็น

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad z = 0, t > 0 \quad (11)$$

$$D_e \frac{\partial c}{\partial z} = a(c_s - c) \quad z = l, t > 0 \quad (12)$$

คำตอบของสมการ 9 ภายใต้สภาวะที่กำหนด ตามวิธีการของ แดคังเวิร์ท (Danckwert's Method) จะได้

$$\frac{M_t}{c_0 - c_s} = A\rho \sum_{n=1}^{\infty} g \left\{ \frac{kt(\nu + k) - \nu \exp[-(\nu + k)t] + \nu}{(\nu + k)^2} \right\} \quad (13)$$

$$\text{โดยที่ } \beta \tan \beta = L; L = (\alpha / D_e)l; \nu = \beta^2 D_e / l^2; g = \frac{2L\alpha}{L^2 + L + \beta^2}$$

รูปแบบที่ I-II ศึกษาเฉพาะการแพร่ในแนวแกนรัศมีคือที่ปลายทั้ง 2 ของมวลนุหรีเท่านั้น และรวมเทอมของวัสดุต้นกำเนิดเข้าไปด้วย ดังนั้นจากสมการ 7 จะได้สมการ

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_e}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + D_e \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} - k'(c - c_s) \quad (14)$$

โดยที่สภาวะเริ่มต้นเป็น

$$c=c_0 \quad 0 \leq r \leq a, \quad t = 0 \quad (15)$$

และสภาวะขอบเขตเป็น

$$\frac{\partial c}{\partial r} = 0 \quad r = 0, \quad t > 0 \quad (16)$$

$$D_e \frac{\partial c}{\partial r} = a'(c'_s - c) \quad r = a, \quad t > 0 \quad (17)$$

คำตอบของสมการ 14 ภายใต้สภาวะที่กำหนด ตามวิธีการของ แด็งเงิลส์ท จะได้

$$\frac{M_t}{c_0 - c'_s} = \pi d \rho \sum_{n=1}^{\infty} g \left\{ \frac{k't(\nu + k') - \nu \exp[-(\nu + k')t] + \nu}{(\nu + k')^2} \right\} \quad (18)$$

$$\text{โดยที่ } \beta J_1(\beta) - L J_0(\beta) = 0; L = (\alpha' / D_e) a; \nu = \beta^2 D_e / a^2; g = \frac{4L^2 D_e}{\beta^2 + L^2}$$

$$\text{และ } \frac{c - c_0}{c'_s - c_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2L J_0(r\beta_n / a)}{(\beta_n^2 + L^2) J_0(\beta_n)} \left\{ \frac{k' + \nu \exp[-(\nu + k')t]}{\nu + k'} \right\} \quad (19)$$

รูปแบบที่ II ทดลองพันตัวมวนบุหรี่ด้วยเซลโลเฟนเทป (Cellophane Tape) ให้การแพร่เกิดเฉพาะตามแนวแกนเท่านั้น เพื่อศึกษาการส่งผ่านความชื้นเฉพาะตามแนวแกน สมการที่ใช้จะง่ายกว่ารูปแบบที่ I ดังนั้นจากสมการ 7 จะได้

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (20)$$

โดยที่สภาวะเริ่มต้นเป็น

$$c = c_0 \quad 0 \leq z \leq l, \quad t = 0 \quad (21)$$

และสภาวะขอบเขตเป็น

$$\frac{\partial c}{\partial z} = 0 \quad z = 0, \quad t > 0 \quad (22)$$

$$D_e \frac{\partial c}{\partial z} = a(c_s - c) \quad z = l, t > 0 \quad (23)$$

คำตอบของสมการ 20 ภายใต้สภาวะที่กำหนด ตามวิธีการของ แดคังเวิร์ท จะได้

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2L \cos(\beta_n z / l) \exp(-\beta_n^2 D_e t / l^2)}{\beta_n^2 (L^2 + L + \beta_n^2)} \quad (24)$$

โดยที่ $\beta \tan \beta = L; L = (\alpha / D_e)l$

$$\text{และ } \frac{c - c_0}{c_s - c_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2L \cos(\beta_n z / l) \exp(-\beta_n^2 D_e t / l^2)}{(L^2 + L + \beta_n^2) \cos \beta_n} \quad (25)$$

รูปแบบที่ III ทดลองปิดหัวและท้ายมวนบุหรี่ด้วยเซลโลเฟนเทป ให้การแพร่เกิดเฉพาะตามแนวแกนรัศมีเท่านั้น เพื่อศึกษาการส่งผ่านความชื้นเฉพาะตามแนวแกนรัศมี ดังนั้นจากสมการ 7 จะได้

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{D_e}{r} \frac{\partial c}{\partial r} + D_e \frac{\partial^2 c}{\partial r^2} \quad (26)$$

โดยที่สภาวะเริ่มต้นเป็น

$$c=c_0 \quad 0 \leq r \leq a, t = 0 \quad (27)$$

และสภาวะขอบเขตเป็น

$$\frac{\partial c}{\partial r} = 0 \quad r = 0, t > 0 \quad (28)$$

$$D_e \frac{\partial c}{\partial r} = a'(c'_s - c) \quad r = a, t > 0 \quad (29)$$

คำตอบของสมการ 26 ภายใต้สภาวะที่กำหนด ตามวิธีการของ แดคังเวลล์ท จะได้

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4L^2 \exp(-\beta_n^2 D_e t / a^2)}{\beta_n^2 (\beta_n^2 + L^2)} \quad (30)$$

โดยที่ $\beta J_1(\beta) - LJ_0(\beta) = 0; L = (\alpha' / D_e)a$

$$\text{และ } \frac{c - c_0}{c'_s - c_0} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2LJ_0(r\beta_n / a)}{(\beta_n^2 + L^2)J_0(\beta_n)} \exp(-\beta_n^2 D_e t / a^2) \quad (31)$$

เมื่อได้รูปแบบสมการทั้ง 4 แบบแล้วทำการวิเคราะห์คำตอบ โดยเทียบกับผลการทดลองทั้ง 3 แบบ ใช้หุ้ 3 ตรา เก็บในตู้ควบคุมอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 52 เปอร์เซ็นต์ หาปริมาณความชื้นเทียบกับเวลานาน 2 สัปดาห์ ผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจากสมการรูปแบบ โดยค่าสัมประสิทธิ์การพามวล (Convective Mass Transfer Coefficient, α) ที่ใช้ในการคำนวณหาได้จากสมการพื้นฐาน

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{N_a}{\rho} \zeta \exp\left(-\nu \frac{\Psi}{T}\right) (c - c_s)^x \quad (32)$$

$$\alpha = -\frac{\zeta}{\rho(1-\varepsilon)} \exp\left(-\frac{\Psi}{T}\right) \quad (33)$$

สมการ 33 ค่าตัวแปรต่าง ๆ เป็นค่าที่ได้จากการทดลองของมารามาทซึและคณะ (Oh; & Jheong 2004: 15-25; อ้างอิงจาก Muramatsu. 1979. Combust. Flame. pp. 245-262) ที่อุณหภูมิ 298 เคลวิน ทำให้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การพามวลได้ และค่าการแพร่ความชื้นในยาเส้นหาได้จากสมการของโคบารีและคณะ (Oh; & Jheong 2004: 15-25; อ้างอิงจาก Kobari. 1985. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. pp. 188-194)

$$D_e = 396 \left(\frac{T}{273} \right)^{1.75} \quad (34)$$

สมการ 34 แสดงให้เห็นว่าค่าการแพร่ของความชื้นขึ้นกับอุณหภูมิเท่านั้นดังนั้นค่าความชื้นสัมพัทธ์จึงตัดทิ้งได้ สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การพามวลในแนวแกนรัศมีที่ทะลุผ่านกระดาษห่อมวนหาได้จากทฤษฎีของแผ่นฟิล์มดังนี้

$$\alpha' = \frac{D_L}{\tau} \quad (35)$$

$$D_L = 3.6 \times 10^7 \exp(3.19c/\varepsilon - 27.04) \quad (36)$$

$$\tau = \tau_1 + \delta \quad (37)$$

สมการ 36 ของโคบารีและคณะ (Oh; & Jheong 2004: 15-25; อ้างอิงจาก Kobari. 1985. Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. pp. 188-194) ใช้หาการแพร่ของน้ำในใบยาเบียร์เลย์และเวอร์ยีนี พบว่ามีค่า 1.563×10^{-4} และ 1.568×10^{-4} ตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ สมการนี้ค่าการแพร่ของน้ำขึ้นกับค่าความชื้น การคำนวณค่าการแพร่จึงใช้ค่าเฉลี่ยระหว่าง ค่าความชื้นเริ่มต้นและที่จุดสมดุล สมการ 37 สามารถหาความหนาของแผ่นฟิล์มบนยาเส้นช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงความชื้น (τ_1) โดยใช้ทฤษฎี

$$\tau_1 = \frac{D_L}{\alpha} \quad (38)$$

ค่าคงที่การคายความชื้นแปรผันตรงกับการแพร่ความชื้น ค่าคงที่การคายความชื้นตามแนวแกน (k') หาได้จากการทดลอง และค่าคงที่การคายความชื้นตามแนวแกนรัศมี (k) หาได้จากสมการ

$$k = \frac{k' \tau_1}{\tau} \quad (39)$$

ผลจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าที่คำนวณได้จากสมการรูปแบบต่าง ๆ พบว่า รูปแบบที่ I-I ไม่เหมาะสมกับการทดสอบ รูปแบบที่ I-II , II , III ผลการทดลองมีแนวโน้มใกล้เคียงกับสมการรูปแบบ ดังนั้นโมเดล I-II , II , III สามารถใช้อธิบายพฤติกรรมของความชื้นในบุงหรีได้ และพบว่าความชื้นส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นมาจากการพามวล (Convective Mass Transfer) ที่แพร่ผ่านวัสดุห่อซองเข้ามา

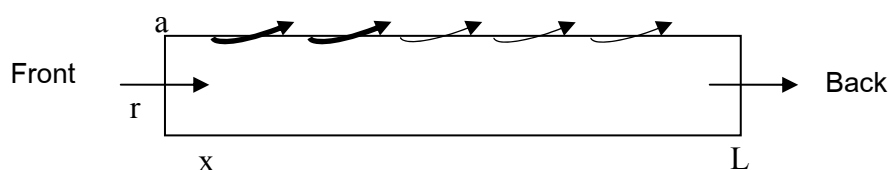
สัญลักษณ์ที่ใช้

- A คือพื้นที่ตัดขวางของแท่งบุงหรี มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
- a คือรัศมีของแท่งบุงหรี มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
- c คือค่าความชื้นของยาสูบ มีหน่วยเป็นกรัมต่อกรัม
- c_s, c'_s คือค่าความชื้นที่จุดสมดุลของยาสูบ มีหน่วยเป็นกรัมต่อกรัม
- D_e คือประสิทธิภาพการแพร่ความชื้น มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง
- D_L คือการแพร่ของน้ำ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง
- I คือเทอมของวัสดุต้นกำเนิด มีหน่วยเป็นต่อชั่วโมง
- J_i คือเบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ i (Bessel Function)
- k, k' คือค่าคงที่การคายความชื้น มีหน่วยเป็นต่อชั่วโมง
- l คือความยาวแท่งบุงหรี มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
- M คือปริมาณการแพร่ความชื้นทั้งหมด มีหน่วยเป็นกรัม
- N_s คือพื้นที่ผิวของยาเส้นทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของมวลบุงหรี มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
- r คือแนวแกนรัศมี
- z คือแนวแกน

T	คืออุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน
a	คือรัศมีของแท่งบุหรี มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
t	คือเวลา มีหน่วยเป็นชั่วโมง
α	คือสัมประสิทธิ์การพามวลตามแนวแกน มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อชั่วโมง
α'	คือสัมประสิทธิ์การพามวลตามแนวแกนรัศมี มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อชั่วโมง
δ	คือความหนากระดาษห่อฉนวน มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
ε	คืออัตราส่วนช่องว่างเทียบกับความหนาแน่น (Void Ratio Based on Apparent Density) ไม่มีหน่วย
ζ	คือสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง
ρ	คือความหนาแน่นของการบรรจุ มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
τ, τ'	คือความหนาแผ่นฟิล์ม มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
χ	คือค่าคงที่จากการทดลอง ไม่มีหน่วย
ψ	คือค่าคงที่จากการทดลอง มีหน่วยเป็นเคลวิน

2.1.2.2.2 การแพร่เมื่อมีลมผ่านภายในท่อ

บุหรีเมื่อมีการสูบลมการแพร่ย่อมสูงกว่าการแพร่ของสารตามปกติเพราะมีแรงลมจากภายนอกเข้ามาช่วยด้วย รอสตามี และฮาเจียลิกอล โมฮัมหมัด (Rostami; & Hajaligol Mohammad. 2003: 263-280) ได้ศึกษารูปแบบการแพร่ของก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ และ ก๊าซอื่น ๆ ผ่านกระดาษฉนวนบุหรีในช่วงขณะสูบลม โดยศึกษาช่วงหลังจากการเผาไหม้ไปประมาณ 5 เซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่อุณหภูมิของก๊าซไม่มีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้บริเวณนี้ยังสมมุติว่าเป็นช่วงที่เกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิส (pyrolysis) อย่างสมบูรณ์ และอัตราการไหลของก๊าซไม่เปลี่ยนแปลง ดังภาพประกอบ 7 กำหนดให้ระยะนี้คือที่ตำแหน่ง x



ภาพประกอบ 7 การไหลของก๊าซเข้าและออกจากฉนวนบุหรี

ก๊าซ i ไหลเข้าด้วยความเข้มข้นหนึ่งที่ $x=0$ บางส่วนจะแพร่ออกที่กระดาษพันฉนวน ที่เหลือไปออกที่ $x=L$ โดยที่ $L \gg a$ สมการการแพร่ของก๊าซ i เป็นดังนี้

$$U_0 \frac{\partial C}{\partial x} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C}{\partial r} \right) \quad (40)$$

สภาวะขอบเขตเป็น

$$x = 0, \quad 0 < r < a, \quad C = C_0 \quad (41)$$

$$r = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial r} = 0 \quad (42)$$

$$r = a, \quad -\rho D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_a = \frac{(C - C_\infty)_a}{R_m} \quad (43)$$

เมื่อ	ρ	คือความหนาแน่นของสารผสม
	D	คือค่าการแพร่ของมวลก๊าซ
	U_0	คือความเร็วเฉลี่ยของสารผสมตามแนวรัศมี
	C_∞	คือความเข้มข้นของก๊าซในบรรยากาศ
	R_m	คือความต้านทานรวมต่อการถ่ายเทมวลซึ่งรวมการแพร่ผ่านกระดาดและ

การพาที่ผิว

ตัวแปรเหล่านี้หาได้จากคุณสมบัติของกระดาดและจากการทดลองที่ผ่านมา
ถ้ากำหนดให้ non-dimensional variable เป็น

$$\theta = \frac{(C - C_\infty)}{(C_0 - C_\infty)} \quad (44)$$

ดังนั้นสมการ 40 และสภาวะขอบเขตจะกลายเป็น

$$U_0 \frac{\partial \theta}{\partial x} = D \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right) \quad (45)$$

$$x = 0, \quad 0 < r < a, \quad \theta = 1 \quad (46)$$

$$r = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial r} = 0 \quad (47)$$

$$r = a, \quad -\rho D \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_a = \frac{\theta}{R_m} \quad (48)$$

แก้มการ 40 ภายใต้สภาวะที่กำหนดจะได้

$$\frac{C - C_\infty}{C_0 - C_\infty} = \sum_1^\infty \frac{2BJ_0(r\beta_n/a)}{(\beta_n^2 + B^2)J_0\beta_n} e^{-\beta_n^2 Dx/U_0 a^2} \quad (49)$$

โดยที่ $B = a/(\rho DR_m)$ ซึ่งเป็นค่าเชิงปริมาณ

$$\beta_n's \text{ เป็นจำนวนรากของสมการ } \beta J_1(\beta) - BJ_0(\beta) = 0 \quad (50)$$

J_0 และ J_1 เป็นฟังก์ชันอันดับที่ศูนย์และหนึ่งของเบสเซล ตามลำดับ β ขึ้นกับการแพร่ของก๊าซในแท่งซึ่งขึ้นกับพื้นที่ผิวและค่าความต้านทานการแพร่ของกระดาดซึ่งก็คือค่า B

ผลรวมมวลของการแพร่ของก๊าซออกจากกรูพรุนของแท่งตามแนวแกนรัศมี a และตามความยาว L คำนวณได้จาก

$$\begin{aligned}
m_L &= \int_0^L 2\pi a \left(-\rho D \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_a \right) dx \\
&= 4\pi \rho a^2 U_0 (C_0 - C_\infty) B \sum_1^\infty \frac{J_1(\beta_n)}{\beta_n (\beta_n^2 + B^2) J_0(\beta_n)} \left(1 - e^{-\beta_n^2 DL / U_0 a^2} \right) \quad (51)
\end{aligned}$$

อัตราส่วนการแพร่ต่อการไหลภายในแท่งคำนวณได้จาก

$$\frac{m_L}{\rho U_0 \pi a^2 (C_0 - C_\infty)} = 4B \sum_1^\infty \frac{J_1(\beta_n)}{\beta_n (\beta_n^2 + B^2) J_0(\beta_n)} \left(1 - e^{-\beta_n^2 DL / U_0 a^2} \right) \quad (52)$$

ค่า R_m คือความต้านทานรวมต่อการถ่ายเทมวลระหว่างผิวของแท่งบุหรีกับบรรยากาศซึ่งรวมการแพร่ผ่านกระดาดและการพาที่ผิว หาได้จากสมการ

$$R_m = \frac{1}{k_D} + \frac{t}{\rho D_p} \quad (53)$$

เมื่อ k_D คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยการพาที่ผิวหน้า มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อตารางเมตรต่อวินาที

t คือความหนาของกระดาด มีหน่วยเป็นเมตร

D_p คือการแพร่ของก๊าซในรูกระดาด มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล มีความสัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนซึ่งขึ้นกับความเร็วของอากาศรอบแท่ง ถ้าอุณหภูมิที่ผิวกับอากาศต่างกันเล็กน้อยค่าการพาอิสระก็สามารถตัดทิ้งได้ อย่างไรก็ตามการไหลของอากาศนอกแท่งบุหรีไม่สามารถประมาณได้ ในสภาวะปกติค่าความเร็วของอากาศอาจอยู่ในช่วง 100 ถึง 150 เซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งก็ไม่เสมอไป เช่นห้องที่มีเครื่องปรับอากาศปิดหน้าต่างและประตูมีค่าความเร็วของอากาศในช่วง 10 ถึง 50 เซนติเมตรต่อวินาที ค่าความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนผ่านท่อทรงกระบอกหาได้จากสมการ

$$Nu_D = \frac{h}{Dk} = C Re_D^m Pr^{0.37} \quad (54)$$

$$1 < Re_D < 40 \quad , C = 0.75 , m = 0.4$$

$$40 < Re_D < 1000 \quad , C = 0.51 , m = 0.5$$

สำหรับการไหลของอากาศภายนอกท่อทรงกระบอกที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร เมื่อ $Re_D = 1$ และ 1000 หาความเร็วลมได้ 0.25 และ 250 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

สมการ 54 สามารถหาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลได้ โดยสมมุติค่าอัตราส่วนการถ่ายเทความร้อนต่อการถ่ายเทมวล (Lewis Number) ของอากาศผสมที่ประมาณว่าเป็นเนื้อเดียวกัน

$$k_D = \frac{h}{c_p} \quad (55)$$

เมื่อ c_p คือค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ

ค่าความต้านทานอีกตัวหนึ่งคือการแพร่ของ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ผ่านรูของกระดาสซึ่งหาได้จากสมการที่ได้จากการทดลองของเบเคอและโรบินสัน (Rostami; & Hajaligol Mohammad. 2003: 263-280; อ้างอิงจาก Baker; & Robinson. 1994. CORESTA Congress. pp. 63-73)

$$D_{p,CO} = 1.58 \times 10^{-7} Z^{1/2} \quad (56)$$

เมื่อ $D_{p,CO}$ คือการแพร่ของ ก๊าซคาร์บอนมอนนอกไซด์ผ่านรูของกระดาส มีหน่วยเป็น ตารางเมตรต่อวินาที

Z คือความสามารถในการแทรกซึมผ่านได้ของกระดาส มีหน่วยเป็น CU หรือ ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

สมการ 56 ใช้กับกระดาศที่มีความหนา 30 ถึง 50 ไมโครเมตร กรณีของก๊าซอื่นค่าการแพร่ของก๊าซผ่านรูของกระดาศหาได้จากสมการ

$$D_p = \left(\frac{D_0}{D_{0,CO}} \right) 1.58 \times 10^{-7} Z^{1/2} \quad (57)$$

เมื่อ D_0 คือการแพร่ของก๊าซในก๊าซผสมมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป

ตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้หาได้จากคุณสมบัติของกระดาศ และจากการทดลองที่ผ่าน ๆ มา เมื่อแทนค่าในสมการรูปแบบแล้วนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดลอง พบว่ามีแนวโน้มใกล้เคียงกัน จากนั้นศึกษาอิทธิพลที่มีผล 3 กรณีคือ ความหนาและความสามารถในการซึมผ่านของกระดาศ ขนาดความยาวและเส้นผ่าศูนย์กลางของบุหรี และความเร็วของอากาศ พบว่าการแพร่ของแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์เพิ่มขึ้นเมื่อค่าความยาวของบุหรี ความสามารถในการซึมผ่านของกระดาศ หรือความเร็วภายนอกของอากาศที่เพิ่มขึ้น และแก๊สที่มีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่สูงจะแพร่ออกในอัตราที่สูงด้วย

2.2 วิธีการวิเคราะห์เมทอล

การวิเคราะห์เมทอลขึ้นอยู่กับตัวอย่างที่จะวิเคราะห์ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้สามารถแยกการวิเคราะห์ตามลักษณะตัวอย่างเป็น 2 แบบคือ

2.2.1 การวิเคราะห์การหายไปของเมทอลบริสุทธิ์ (Goldstein; & Cho. 1995: 416-434) สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

2.2.1.1 การวัดขนาดของก้อนเมทอล

2.2.1.2 การชั่งน้ำหนักของเมทอล

2.2.2 การวิเคราะห์ปริมาณเมทอลในบุหรี ยาเส้น ก้นกรอง หรือ จากควันบุหรี สามารถทำได้ 2 วิธีคือ

2.2.2.1 วัดด้วยเครื่อง Colorimetry ทำการกลั่น แล้วทำปฏิกิริยากับ N,N-dimethyl-paminobenzaldehyde ใน 80 เปอร์เซนต์กรดซัลฟูริก วัดที่ 540 nm. (Riehl; Shockley; & Reynolds. 1973: 10-11)

2.2.2.2 วัดด้วยเครื่อง Gas chromatograph –FID Detector (Curran. 1972: 40-42; Riehl; Shockley; & Reynolds. 1973: 10-11; Mathis. 1983: 1-8)

2.3 ทฤษฎีการถ่ายเทมวล

การถ่ายเทมวล หมายถึง การที่องค์ประกอบหนึ่งในของผสมเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า หรือมีผลต่างของความเข้มข้น ซึ่งแบ่งกลไกการถ่ายเทมวลได้เป็น 2 แบบ คือ

โมเลกุลเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) โดยที่ตัวกลางหรือของผสมนั้นอยู่นิ่ง ซึ่งเรียกว่า การถ่ายเทมวลโดยการแพร่ของโมเลกุล (Molecular Diffusion)

โมเลกุลเคลื่อนที่ภายในของไหลที่มีการเคลื่อนที่ โดยที่ของไหลนั้นสัมผัสกับอีกเฟสหนึ่งที่ไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งเรียกว่า การพามวล (Convective Mass Transfer)

การแพร่จะมีอัตราการถ่ายเทมวลที่ช้ากว่าการพามวลและทั้งสองกลไกอาจเกิดขึ้นได้พร้อม ๆ กัน

การแพร่ของโมเลกุลเขียนให้อยู่ในรูปของฟลักซ์เชิงมวลหรือเชิงโมล ตามกฎข้อที่หนึ่งของฟิค (Fick's first law) กล่าวว่า ระบบซึ่งอุณหภูมิและความดันคงที่ การแพร่ขององค์ประกอบ A ในทิศทางใด ๆ คือ

$$N_A = -D_{AB} \frac{(C_{A,s} - C_{A,\infty})}{(z_2 - z_1)} \quad (58)$$

และฟลักซ์ในเทอมของสัมประสิทธิ์การพามวล คือ

$$N_A = k_c (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (59)$$

เมื่อ	N_A	คือฟลักซ์เชิงมวล	
	D_{AB}	คือสัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient)	หน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที
	$C_{A,s}$	คือความเข้มข้นที่ผิว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	
	$C_{A,\infty}$	คือความเข้มข้นในของไหล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร	
	z	คือระยะทาง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร	
	k_c	คือสัมประสิทธิ์การพามวล มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที	

ค่า k_c สำหรับการระเหิดของของแข็งไปยังอากาศ มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบ (Laminar) และแบบปั่นป่วน (Turbulent) ดังนี้

$$Sh = \frac{k_c L}{D_{AB}} \quad (60)$$

$$Re < 3 \times 10^5 \quad \text{เป็นการไหลแบบราบเรียบ} \quad S_h = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (61)$$

$$Re > 3 \times 10^5 \quad \text{เป็นการไหลแบบปั่นป่วน} \quad S_h = 0.036 Re^{0.8} Sc^{1/3} \quad (62)$$

สามารถหาค่าที่เกี่ยวข้องได้จากสมการดังนี้

$$Re = \frac{Lv}{\nu} \quad (63)$$

$$S_c = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (64)$$

เมื่อ	L	คือระยะทางของผิวที่ลมพัดผ่าน มีหน่วยเป็นเมตร
	V	คือความเร็วลม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
	ν	คือความหนืดจลนศาสตร์ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที

$$N_A = \frac{dC_A}{Adt} \quad (65)$$

ดังนั้นเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ได้จากการทดลอง ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าจากการทดลองได้อาจจะต้องใช้วิธีคำนวณจากสมการกึ่งทฤษฎีหรือสมการเอมพิริคัล (Empirical Equation) ซึ่งมีหลายแบบด้วยกัน ดังนี้

2.3.1. Hirsfelder, Bird, & Spertz (Welty; Wicks; & Wilson. 1984: 431-456) ได้รวมผลของแรงดึงดูดและแรงผลักระหว่างโมเลกุลของคู่ก๊าซไว้ในตัวแปรเลนนาร์ด โจนส์ (Lennard-

Jones) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานศักย์ โดยใช้ได้ดีกับก๊าซผสม 2 ชนิดที่ไม่มีขั้ว (nonpolar) มีความหนาแน่นต่ำ ความดันไม่สูง และก๊าซไม่ทำปฏิกิริยากัน ผลที่ได้คือสมการสำหรับคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตั้งสมการ

$$D_{AB} = \frac{0.001858 T^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{\frac{1}{2}}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_D} \quad (66)$$

2.3.2. Wilke-Lee (Treybal 1980: 21-87) ได้ปรับปรุงสมการของ Hirschfelder, Bird & Spurtz ใหม่ โดยใช้ความสัมพันธ์กับแรงโมเมนต์ขั้วคู่ (Dipole Moment) ซึ่งอยู่ใน r_{AB} (Molecular Separation at Collision) มากขึ้น เพื่อใช้กับส่วนผสมระหว่างก๊าซที่ไม่มีขั้วและ ระหว่างก๊าซที่มีขั้ว (polar) กับไม่มีขั้วได้

$$D_{AB} = \frac{\left(1.084 - 0.249 \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}} \right) T^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{p_i(r_{AB})^2 f\left(\frac{kT}{\epsilon_{AB}}\right)} \quad (67)$$

2.3.3. Fuller Schettler และ Giddings (Welty; Wicks; & Wilson. 1984: 431-456) ได้เสนอสมการเอมพิริคัล ซึ่งใช้สะดวกกว่าสมการที่กล่าวมาแล้ว ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ของเลนนาร์ด โจนส์ ได้ สมการนี้ใช้ค่าปริมาตรอะตอมของแต่ละโมเลกุลของก๊าซมารวมกันดังนี้

$$D_{AB} = \frac{1.0 \times 10^{-3} T^{1.75} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{\frac{1}{2}}}{P \left[(\Sigma V_A)^{\frac{1}{3}} + (\Sigma V_B)^{\frac{1}{3}} \right]^2} \quad (68)$$

2.3.4. Slattery และคณะ (Bird; Stewart; & Lightfoot. 2002: 513-542) ได้พัฒนาสมการมาจากการทดลองต่าง ๆ ซึ่งพบว่าก๊าซผสม 2 ชนิด ที่ความดันต่ำ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะเป็นสัดส่วนกลับกับความดัน และสัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นสมการนี้จึงขึ้นอยู่กับความดันและอุณหภูมิ รวมเอาทฤษฎีพลังจอน์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยโดยเพิ่มความสัมพันธ์ของโมเมนต์ชั่วครู่ ซึ่งแสดงออกในค่า a และ b ดังสมการ

$$p(D_{AB}) = a \left(\frac{T}{\sqrt{T_{CA} T_{CB}}} \right)^b (P_{CA} P_{CB})^{\frac{1}{3}} (T_{CA} T_{CB})^{\frac{5}{12}} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (69)$$

สำหรับส่วนผสมของก๊าซที่ไม่มีขั้ว รวมทั้งฮีเลียมและไฮโดรเจน	$a = 2.745 \times 10^{-4}$
	$b = 1.823$
สำหรับส่วนผสมของน้ำกับก๊าซที่ไม่มีขั้ว	$a = 3.640 \times 10^{-4}$
	$b = 2.334$

เมื่อ D_{AB}	คือสัมประสิทธิ์การแพร่ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที
P, p	คือความดัน มีหน่วยเป็นบรรยากาศ
p_t	คือความดันสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร.
T	คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นเคลวิน
M_A, M_B	คือน้ำหนักโมเลกุลของสาร A และ B ตามลำดับ มีหน่วยเป็นกรัมต่อโมล
V_A, V_B	คือปริมาตรอะตอมของสาร A และ B ตามลำดับ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล
P_{CA}, P_{CB}	คือความดันที่จุดวิกฤต (Critical Pressure) ของสาร A และ B ตามลำดับ มีหน่วยเป็นบรรยากาศ
T_{CA}, T_{CB}	คืออุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) ของสาร A และ B ตามลำดับ มีหน่วยเป็น เคลวิน
σ_{AB}	คือค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของการชน (collision diameter) หรือตัวแปร เลนฮาร์ด โจนส์มีหน่วยเป็น $^{\circ}\text{A}$ ซึ่งหาได้จากสมการ

$$\sigma = 1.18 V_b^{\frac{1}{3}} \quad \text{หรือ} \quad \sigma = 0.84 V_c^{\frac{1}{3}} \quad \text{หรือ} \quad \sigma = 2.44 \left(\frac{T_c}{P_c} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\sigma_{AB} = \frac{(\sigma_A + \sigma_B)}{2} \quad (70)$$

r_{AB} คือค่าการแยกของโมเลกุลเมื่อมีการชน (Molecular Separation at Collision) มีหน่วยเป็น nm หาได้จาก $(r_A + r_B)/2$ เมื่อ $r = 1.18v^{1/3}$

V_b, v คือปริมาตรของสาร 1 โมล ที่จุดเดือดปกติ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล

V_c คือปริมาตรของสาร 1 โมลที่จุดเดือดวิกฤติ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล

Ω_D หรือ $f(kT/\epsilon_{AB})$ คือค่าคอลลิชัน อินทิเกรล (Collision Integral) หรือค่าตัวแปรคอลลิชัน

ϵ_{AB} คือพลังงานของโมเลกุลที่กระทำต่อกัน (Energy of Molecular Attraction) หาได้จาก

$$\frac{\epsilon}{k} = 0.77T_c \quad \text{หรือ} \quad \frac{\epsilon}{k} = 1.15T_b \quad \text{หรือ} \quad \frac{\epsilon}{k} = 1.21T_b \quad (\text{สำหรับสมการ 67})$$

$$\epsilon_{AB} = \sqrt{\epsilon_A \epsilon_B} \quad (71)$$

k คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann's Constant)

T_b คืออุณหภูมิจุดเดือดปกติ มีหน่วยเป็นเคลวิน

T_c คืออุณหภูมิวิกฤติ มีหน่วยเป็นเคลวิน

อย่างไรก็ตามสำหรับส่วนผสมของคู่ก๊าซที่มีขั้ว หรือ อากาศกับก๊าซที่มีขั้ว ยังไม่มีตัวเลขค่าคงที่ที่ทดลองไว้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารมาตรฐานเมนทอล ((-) Menthol , $C_{10}H_{20}O$) บริษัท Sigma Chemical Co. ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.2 โพรพิลเบนโซเอท (Propylbenzoate , $C_{10}H_{12}O_2$) บริษัท Merck Schuchardt OHG ประเทศเยอรมนี

3.1.3 เมทิลแอลกอฮอล์ (Methanol , CH_3OH) บริษัท J.T. Baker ประเทศสหรัฐอเมริกา

3.1.4 บุหรี่รสเมนทอล โรงงานยาสูบ กระทรวงการคลัง ประเทศไทย มีความยาวมวน 8.4 เซนติเมตร ความยาวก้นกรอง 2 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.7875 เซนติเมตร บรรจุเมนทอล ภายในก้นกรองด้วยเส้นด้ายที่ชุบเมนทอลปริมาณ 3.0 ± 0.2 มิลลิกรัมต่อมวน

3.2 เครื่องวิเคราะห์

3.2.1 เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ (Humidity Chamber) รุ่น KBP 6395 F ประเทศนอร์เวย์

3.2.2 เครื่องชั่ง Mettler Toledo รุ่น AX205 ประเทศสวิสเซอร์แลนด์

3.2.3 เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography (GC)) รุ่น Finnigan Trace GC ultra ประเทศอิตาลี

3.2.4 เครื่องเขย่า (Rotary Shaker) รุ่น RMS-250 บริษัท SIBATA Scientific Technology Ltd. ประเทศญี่ปุ่น

3.3 อุปกรณ์สำหรับการทดลอง

3.3.1 หลอดพลาสติกขนาด 1.05x1.05x4.50 เซนติเมตร

3.3.2 กล่องพลาสติกขนาด 3.15x8.40x0.75 เซนติเมตร

3.3.3 กล่องพลาสติกขนาด 3.15x8.40x9.50 เซนติเมตร

3.3.4 ขวด Erlenmeyer flask ขนาด 100 มิลลิลิตร ที่มีฝาปิดแบบ ground joint จำนวน 20 ใบ

3.3.5 ขวด Volumetric flask ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จำนวน 1 ใบ

3.3.6 ขวด Volumetric flask ขนาด 10 มิลลิลิตร จำนวน 7 ใบ

3.3.7 อุปกรณ์ดูดจ่ายสารโดยอัตโนมัติ (Dispenser) ขนาด 25 มิลลิลิตร

3.3.8 อุปกรณ์ดูดจ่ายสารโดยอัตโนมัติ (Transfer Pipette) ขนาด 100 – 1,000 ไมโครลิตร

3.3.9 อุปกรณ์ในการกรองตัวอย่าง (Syringe Filters Nylon) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13 มิลลิเมตร 0.45 ไมครอน

3.3.10 ขวดสำหรับใส่ตัวอย่างฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟพร้อมฝาและซีพัตัม (Vial and Septum) ขนาด 1.5 มิลลิลิตร

3.3.11 ขวดสำหรับใส่ตัวอย่างฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ พร้อมฝาและซีพัตัม ขนาด 20 มิลลิลิตร

3.3.12 เข็มฉีดยา (Syringe Type Gas) ขนาด 100 ไมโครลิตร

3.4 วิธีดำเนินการวิจัยแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

3.4.1 หาค่าอัตราการหายไปของเมนทอล

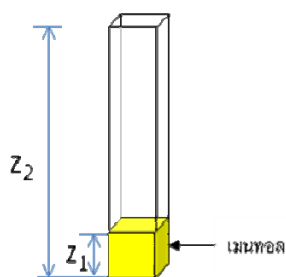
3.4.2 หาความเข้มข้นของเมนทอลบริสุทธิ์ในอากาศที่จุดสมดุล

3.4.3 หาค่าอัตราการหายไปของเมนทอลในตัวอย่างบุหรีรสเมนทอล

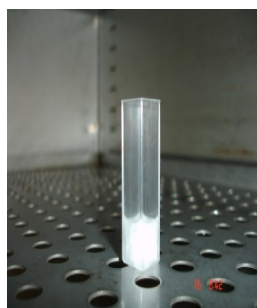
3.4.4 หาความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่จุดสมดุลเมื่อเมนทอลบรรจุในบุหรี

3.4.1 หาค่าอัตราการหายไปของเมนทอล

3.4.1.1 หลอมเมนทอลจนเหลวแล้วดูดด้วยอุปกรณ์ดูดจ่ายสารโดยอัตโนมัติขนาด 1,000 ไมโครลิตร ใส่ในหลอดพลาสติกขนาด $1.05 \times 1.05 \times 4.50$ เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 8



หลอดบรรจุเมนทอล



ควบคุมอุณหภูมิและ
ความชื้นสัมพัทธ์



ชั่งหลอดบรรจุเมนทอล

ภาพประกอบ 8 วิธีการหาค่าอัตราการหายไปของเมนทอล

3.4.1.2 ปลอ่ยให้แข็งตัวที่อุณหภูมิห้อง

3.4.1.3 ตั้งอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่เครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ รอจนเครื่องมืออุณหภูมิและความชื้นตามที่ต้องการ

3.4.1.4 นำหลอดพลาสติกที่บรรจุเมนทอลแล้วไปแช่ด้วยเครื่องชั่งตวงวัด 5 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนัก

3.4.1.5 นำหลอดพลาสติกเข้าเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น จับเวลา 4 ชั่วโมง แล้วนำออกมาชั่งบันทึกน้ำหนัก ทดลอง 14 ซ้ำ

3.4.1.6 ทำซ้ำข้อ 3.4.1.5 ที่เวลาผ่านไป 8, 15, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.4.1.7 ทำซ้ำข้อ 3.4.1.1 ถึง 3.4.1.6 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ดังนี้

- ความชื้นสัมพัทธ์ 60 และ 80 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์

3.4.1.8 ผลที่ได้คำนวณหาอัตราการหายไปของเมนทอลเทียบกับเวลา

3.4.2 หาความเข้มข้นของเมนทอลบริสุทธิ์ในอากาศที่จุดสมดุล

3.4.2.1 บรรจุเมนทอลในขวดใส่ตัวอย่างปิดฝาที่มีเซ็นเซอร์ให้สนิท ดังภาพประกอบ 9



เมนทอลในขวดตัวอย่าง



ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์



ดูดอากาศฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ภาพประกอบ 9 วิธีการหาความเข้มข้นของเมนทอลบริสุทธิ์ในอากาศที่จุดสมดุล

3.4.2.2 เก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 3 วัน

3.4.2.3 ดูดอากาศในขวดตัวอย่างด้วยเข็มฉีดยาฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ปริมาณ 50 ไมโครลิตร โดยตั้งสภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ตามข้อ 3.5 ทดลอง 5 ซ้ำ

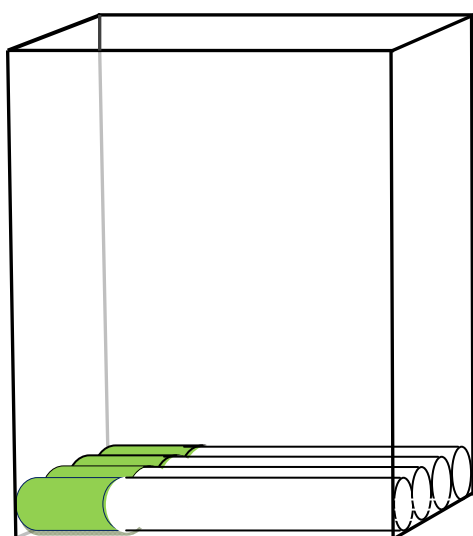
3.4.2.4 คำนวณปริมาณเมททอลเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน
เมททอล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

3.4.2.5 ทำซ้ำข้อ 3.4.2.1 ถึง 3.4.2.4 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 30 และ 35 องศา
เซลเซียส

3.4.3 หาดัชนีการหายไปของเมททอลในบุหรีตัวอย่าง

3.4.3.1 ตั้งอุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ ที่เครื่อง
ควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ รอจนเครื่องมีอุณหภูมิและความชื้นตามที่ต้องการ

3.4.3.2 นำบุหรีจำนวน 4 มวน ใส่ในกล่องพลาสติกขนาด 315x8.40x9.50 เซนติเมตร
และขนาด 3.15x8.40x0.75 เซนติเมตร ดังภาพประกอบ 10 ก. และ ข. ตามลำดับ



(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 10 บุหรีบรรจุในกล่องพลาสติก

(ก) 3.15 x 8.40 x 9.50 เซนติเมตร

(ข) 3.15 x 8.40 x 0.75 เซนติเมตร

3.4.3.3 นำกล่องพลาสติกเข้าเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้น จับเวลา 5 ชั่วโมง นำ
ตัวอย่างออกมาแล้วดำเนินการตามข้อ 3.5 ทดลอง 5 ซ้ำ

3.4.3.4 ทำซ้ำข้อ 3.4.3.1 ที่เวลาผ่านไป 15, 25, 50, 75 และ 100 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.4.3.5 ทำซ้ำข้อ 3.4.3.1 ถึง 3.4.3.4 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 25, 30, 35 และ 40 องศา

เซลเซียส

3.4.3.6 ผลที่ได้คำนวณหาอัตราการหายไปของเมนทอล

3.4.4 หาความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่จุดสมดุลเมื่อเมนทอลบรรจุในบุหรี

3.4.4.1 บรรจุตัวอย่างบุหรีในขวดใส่ตัวอย่าง จำนวน 4 มวน ปิดฝาที่มีเช็พท์มให้สนิท ดัง

ภาพประกอบ 11



บุหรีในขวดตัวอย่าง



ควบคุมอุณหภูมิและ
ความชื้นสัมพัทธ์



ดูดอากาศฉีดเข้าเครื่อง
แก๊สโครมาโตกราฟี

ภาพประกอบ 11 วิธีการหาความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่จุดสมดุลเมื่อเมนทอลบรรจุในบุหรี

3.4.4.2 เก็บในเครื่องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 4 วัน

3.4.4.3 ดูดอากาศในขวดตัวอย่างด้วยเข็มฉีดยาฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ปริมาณ 100 ไมโครลิตร โดยตั้งสภาวะของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ตามข้อ 3.5 ทดลอง 5 ซ้ำ

3.4.4.4 คำนวณปริมาณเมนทอลเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายมาตรฐาน เมนทอล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร

3.4.4.5 ทำซ้ำข้อ 3.4.4.1 ถึง 3.4.4.4 แต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส

3.5 วิธีวิเคราะห์ปริมาณเมณฑลด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

วิธีการวิเคราะห์ตามวิธีของฝ่ายวิจัยและพัฒนา โรงงานยาสูบ กระทรวงการคลัง

3.5.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

3.5.1.1 เตรียมน้ำยาเมณฑลต่อโพพิวเบนโซเอท (1000 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัม) ใช้สำหรับเป็น Internal Standard

3.5.1.2 ชั่งเมณฑลอย่างละเอียด 0.1 กรัม ละลายด้วยสารละลายในข้อ 3.5.1.1. ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร แล้วดูตมา 1 มิลลิลิตร ทำเป็น 10 มิลลิลิตร จะได้ความเข้มข้น 1 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ใช้สำหรับเป็น Stock Standard

3.5.1.3 เตรียม Working Standard โดยดูสูตรมาตรฐานจาก Stock Standard และปรับปริมาตรให้ได้ 10 มิลลิลิตร ด้วยสารละลายจากข้อ 3.5.1.1. ตามตาราง 2

ตาราง 2 การเตรียม Working Standard

No.	วิเคราะห์เมณฑลในบุหรี		วิเคราะห์เมณฑลในอากาศ	
	Stock Standard 10 มก.ต่อ มล.		Stock Standard 1 มก.ต่อ มล.	
	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (มก.ต่อ มล.)	ปริมาตร (มล.)	ความเข้มข้น (มก.ต่อ มล.)
1	0.30	0.30	0.10	0.01
2	0.40	0.40	0.20	0.02
3	0.50	0.50	0.30	0.03
4	0.60	0.60	0.40	0.04
5	0.70	0.70	0.50	0.05
6	-	-	0.60	0.06

3.5.2 การเตรียมตัวอย่างสำหรับวิเคราะห์เมนทอลในบุหรี่

3.5.2.1 ดูดน้ำยาเมทธานอลต่อโพรพิลเบนโซเอท (1000 มิลลิลิตรต่อ 1 กรัม) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ด้วย Dispenser ใส่ขวด Erlenmeyer flask ขนาด 100 มิลลิลิตร

3.5.2.2 นำตัวอย่างบุหรี่จากกล่องพลาสติกจำนวน 4 มวน กรีดบุหรี่ใส่ขวด Erlenmeyer flask ที่เตรียมไว้

3.5.2.3 ใส่เครื่องเขย่า ความเร็ว 150 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 นาที

3.5.2.4 กรองสารละลายมาตรฐานและตัวอย่างใส่ Vial เตรียมฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ดังภาพประกอบ 12



เติมน้ำยาเมทธานอลต่อโพรพิลเบนโซเอท



กรีดบุหรี่ใส่ขวด Erlenmeyer flask



เขย่า 150 รอบ/นาที นาน 30 นาที



วิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

ภาพประกอบ 12 วิธีวิเคราะห์เมนทอลในบุหรี่

3.5.3 วิธีการใช้เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

เตรียมเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยเปิดอุ่นเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟก่อนการทดสอบ อย่างน้อย 1 ชั่วโมง ปรับสภาวะเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบ (GC Parameters)

3.5.3.1 อุณหภูมิคอลัมน์ (Column/Oven)

	Temp. (°C)	Hold time (min)
Initial	80	0.5
Ramp1 Rate (°C/min) 20.0	180	2.0

3.5.3.2 อุณหภูมิส่วนฉีดสารตัวอย่าง (Injector/Inlet)

Temperature (°C)	240
Mode	Split
Split Flow (ml/min)	150
Split Ratio	50

3.5.3.3 อุณหภูมิตัวอ่านสัญญาณ (Detector)

Base Temperature (°C)	250
Flow (ml/min)	
Air	400
H ₂	40
Make up	30

3.5.3.4 อัตราการไหลในคอลัมน์ (column flow)

Flow (ml/min)	3.0
Flow Mode	Constant Flow
Gas Saver	
Flow (ml/min)	50.00
Time (min)	1.50

3.5.3.5 เตรียมตารางกราฟนิโคตินมาตรฐานเพื่อเทียบกับสารละลายตัวอย่าง

3.5.3.6 ฉีดสารละลายมาตรฐานเมนทอลปริมาตร 0.5 ไมโครลิตร จำนวน 6 จุด เข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

3.5.3.7 สร้างกราฟเส้นตรงของสารละลายมาตรฐานเมนทอลด้วยโปรแกรมควบคุมการทำงานของเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี โดยเส้นกราฟต้องมีค่า r^2 มากกว่าหรือเท่ากับ 0.995

3.5.3.8 นีดสารละลายตัวอย่าง ปริมาตร 0.5 ไมโครลิตรสำหรับการวิเคราะห์ในตัวอย่าง บุหรี่ และนิตตัวอย่างอากาศ 100 ไมโครลิตรสำหรับการวิเคราะห์เมณฑอลที่จุดสมดุล เข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี

3.5.3.9 นำค่าที่ได้จากการเทียบกับกราฟมาตรฐานไปคำนวณดังนี้

เมณฑอลในบุหรี่ (มิลลิกรัมต่อมวน) = เมณฑอล (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) X 25 มิลลิลิตร

4 มวน

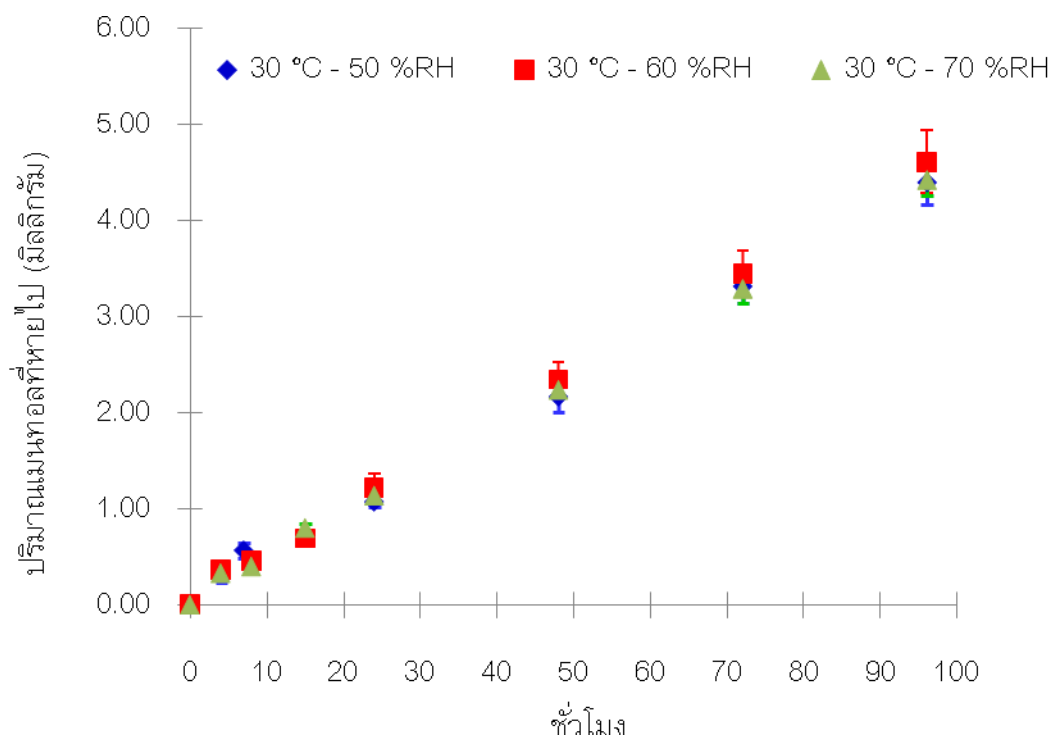
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 ผลการศึกษาการถ่ายเทมวลของเมณฑอลสู่อากาศ

4.1.1 ความชื้นสัมพัทธ์ต่อการถ่ายเทมวล

จากภาพประกอบ 13 แสดงอัตราการหายไปของปริมาณเมณฑอลเมื่ออุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส แต่เปลี่ยนแปลงความชื้นสัมพัทธ์ 50, 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์ พบว่าอัตราการหายไปของเมณฑอลที่เปลี่ยนแปลงตามความชื้นสัมพัทธ์ใกล้เคียงกันมาก เมื่อนำผลที่ได้ไปทดสอบค่าความแตกต่างด้วยโปรแกรม SPSS พบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตาราง 3 แสดงว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อการแพร่ของเมณฑอลในอากาศ



ภาพประกอบ 13 แสดงอัตราการหายไปของปริมาณเมณฑอลเมื่อความชื้นสัมพัทธ์เปลี่ยนแปลง ที่อุณหภูมิคงที่ 30 องศาเซลเซียส

ตาราง 3 แสดงผลการทดสอบความแตกต่างปริมาณเมทิลด้วยโปรแกรม SPSS

	SS	df	MS	F	P-Value
Between Groups	0.933	2	0.467	0.291	0.748
Within Groups	264.666	165	1.604		
Total	265.599	167			

หมายเหตุ SS = Sum of Squared Deviations

df = Degrees of Freedom

MS = Mean of Square

F = Variance Ratio

ค่า P-Value มากกว่า 0.5 แสดงว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่ออัตราการหายไปของเมทิลที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ปรากฏการณ์ที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่มีผลต่อการแพร่ของเมทิลในอากาศ สอดคล้องกับผลการทดลองของโกลด์สเตียน และโคช (Goldstein; & Cho. 1995: 416-434) ที่ศึกษาการแพร่ของเนพทาไลน์ในอากาศและพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อการแพร่ของเนพทาไลน์เช่นกัน ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้จากการเคลื่อนที่แบบเกิดอันตรกิริยาน้อยมาก (Very Low Interactive Model) เนื่องจากปริมาตรโมเลกุลของเมทิลมีค่าสูงกว่าปริมาตรโมเลกุลเฉลี่ยของอากาศและไอน้ำมาก ดังแสดงในตาราง 4 ส่งผลให้โมเลกุลของเมทิลไม่สามารถแยกแยะความแตกต่างของมวลสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อเมทิลว่ามาจากอนุภาคของน้ำหรืออากาศอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นความสามารถในการถ่ายเทมวลของเมทิลจึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญระหว่างการมีน้ำในอากาศที่ระดับความชื้นสัมพัทธ์ต่างกัน ดังผลการทดลองของโกลด์สเตียน และโคชดังที่กล่าวข้างต้น

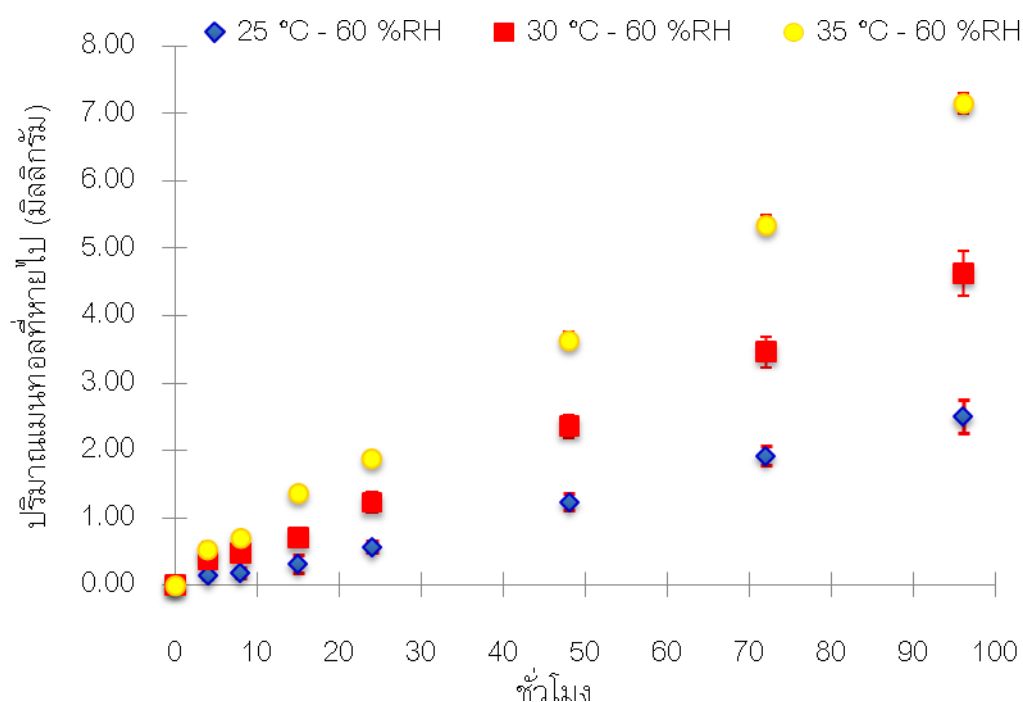
นอกจากนี้จากการที่เมทิลมีหมู่ไฮดรอกซิล (Hydroxyl Group) อยู่ใกล้กับหมู่แอลคิล (Alkyl Group) ทำให้ความแรงของขั้วลดลง ดังนั้นแรงโมเมนต์ขั้วคู่ระหว่างน้ำกับเมทิลจึงมีค่าน้อยมาก

ตาราง 4 แสดงปริมาตรของโมเลกุล

โมเลกุล	ปริมาตรโมเลกุล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)
เมนทอล ($C_{10}H_{20}O$)	189.88
น้ำ (H_2O)	12.70
อากาศ (Air)	20.10
ออกซิเจน (O_2)	16.66
ไนโตรเจน (N_2)	17.90

4.1.2 อุณหภูมิต่อการถ่ายเทมวล

จากภาพประกอบ 14 แสดงอัตราการหายไปของปริมาณเมนทอลเมื่อความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 60 เปอร์เซ็นต์ แต่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการหายไปของเมนทอลเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ โดยที่อุณหภูมิสูงอัตราการหายไปของเมนทอลจะสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ แสดงว่าอุณหภูมามีผลต่อการแพร่ของเมนทอลในอากาศ



ภาพประกอบ 14 แสดงอัตราการหายไปของปริมาณเมนทอลเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง ที่ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 60 เปอร์เซ็นต์

การที่อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการระเหิดของเมนทอล เนื่องจากอุณหภูมิส่งผลต่อพลังงานภายในโมเลกุล เมื่อโมเลกุลมีการสั่นแรงขึ้น แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals Force) ระหว่างโมเลกุลเมนทอลด้วยกันจะลดลง ส่งผลให้โมเลกุลระเหิดออกไปได้ง่ายขึ้น

4.1.3 การคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลสู่อากาศ

จากการทดลองศึกษาปริมาณการหายไปของเมนทอลสู่อากาศเทียบกับเวลา ดังภาพประกอบ 15 (ก) พบว่าเมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ที่ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ อัตราการหายไปของเมนทอลคือ 0.025, 0.048 และ 0.075 มิลลิกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ นำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยใช้สมการ 72 ค่าต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองมีค่าตามตาราง 5 และตั้งสมมติฐานว่า

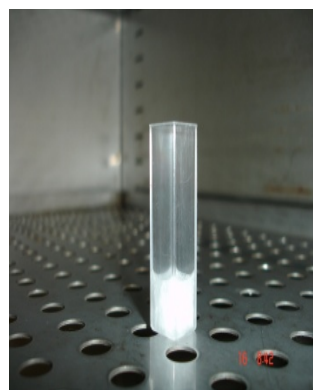
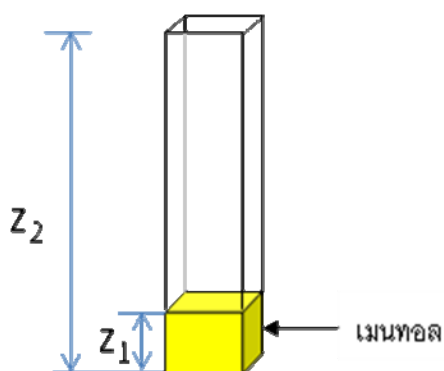
1. พื้นที่ผิวหน้าของเมนทอลที่สัมผัสกับอากาศมีลักษณะเรียบและมีค่าเท่ากับพื้นที่หน้าตัดของภาชนะบรรจุ
2. เมนทอลบรรจุในภาชนะทรงสูงดังนั้นจึงไม่มีค่า Force Convection Mass Transfer
3. ความหนาแน่นรวมในระบบคงที่
4. ความเข้มข้นของไอเมนทอลที่ผิวหน้าเมนทอลมีค่าเท่ากับความเข้มข้นของไอเมนทอลที่จุดสมดุลที่อุณหภูมินั้น ๆ
5. ความเข้มข้นของไอเมนทอลในอากาศที่เวลาเริ่มต้นมีค่าเป็นศูนย์

$$\frac{dC}{Adt} = N = -D_{AB} \frac{(C_{A,s} - C_{A,\infty})}{(z_2 - z_1)} \quad (72)$$

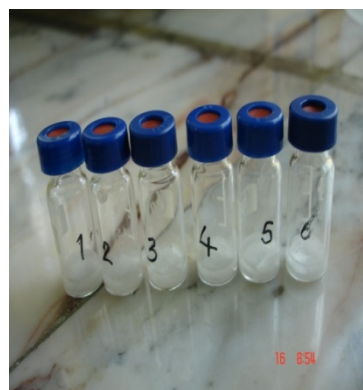
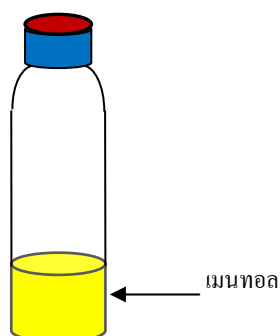
เมื่อ	N	คือฟลักซ์ของเมนทอลต่อหน่วยพื้นที่ต่อวินาที
	D_{AB}	คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอล มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที
	C	คือปริมาณเมนทอล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม
	$C_{A,s}$	คือความเข้มข้นของไอเมนทอลที่ผิวเมนทอล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
	$C_{A,\infty}$	คือความเข้มข้นของไอเมนทอลในอากาศ มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
	A	คือพื้นที่ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร
	z	คือระยะทาง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
	t	คือเวลา มีหน่วยเป็นวินาที

ในการทดลองหาความเข้มข้นของไอเมนทอลที่ผิวของเมนทอลจะทำในสภาวะสมดุลระหว่างไอและของแข็งของเมนทอลในภาชนะปิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าระยะเวลาที่ใช้ในการ

ทดลองเป็นเวลาที่เหมาะสมแล้วจริง จึงทำการหากราฟสมดุลของเมณฑอลตามเวลา ซึ่งทำการทดลองดังภาพประกอบ 15 (ข) โดยนำเมณฑอลใส่ในขวดตัวอย่างที่ปิดสนิทแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาต่าง ๆ แล้วเก็บตัวอย่างอากาศที่อ้อมตัวด้วยเมณฑอลไปวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี เปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมณฑอล พบว่าค่าความเข้มข้นของไอเมณฑอลที่ผิวเมณฑอลเริ่มเข้าสู่สมดุลตั้งแต่วันที่ 2 เป็นต้นไป ดังภาพประกอบ 16 ซึ่งเป็นตัวอย่างของกราฟสมดุลเมื่อควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส ยิ่งอุณหภูมิสูงขึ้น จะเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น ดังนั้นการทดลองขั้นต่อไปจะหาค่าความเข้มข้นของไอเมณฑอลที่สมดุล โดยเก็บเมณฑอลไว้ในขวดทดลองเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 3 วัน ที่อุณหภูมิ 25 และ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

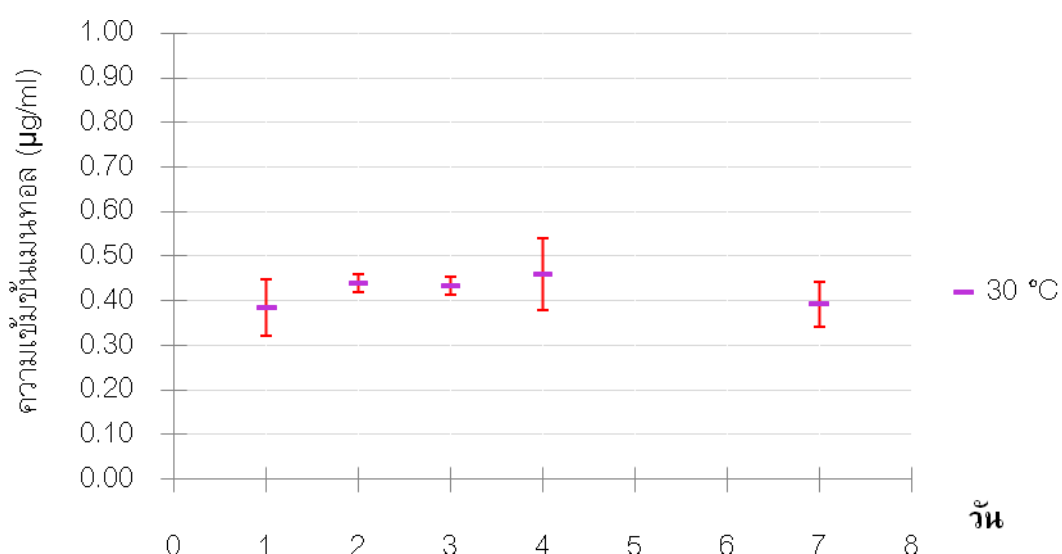


(ก)



(ข)

ภาพประกอบ 15 การทดลอง (ก) อัตราการหายไปของเมณฑอลสู่อากาศ และ (ข) หาความเข้มข้นของไอเมณฑอลในอากาศที่ผิวเมณฑอล

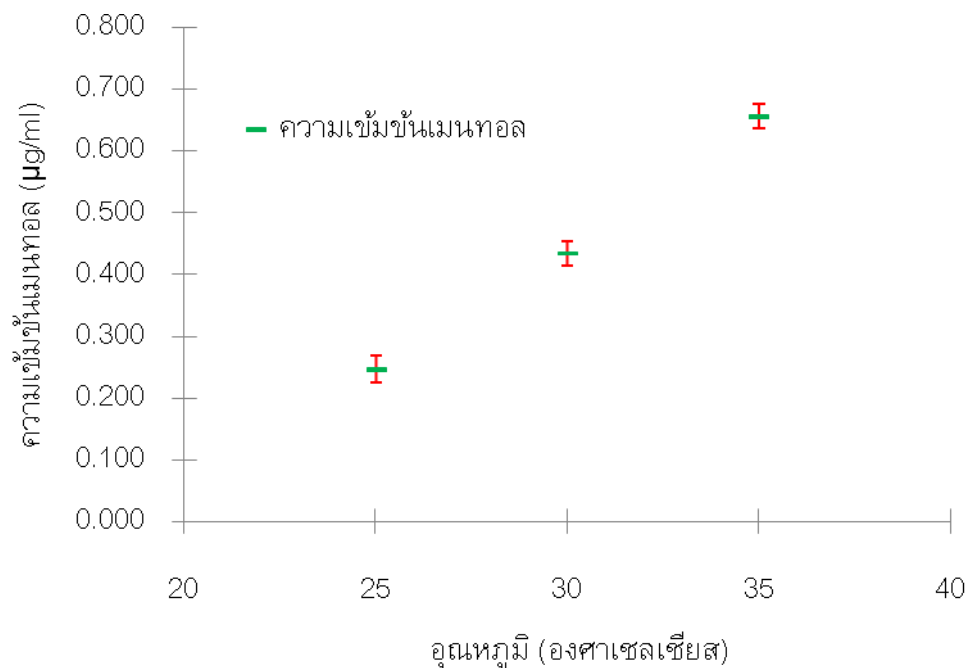


ภาพประกอบ 16 เปรียบเทียบความเข้มข้นของไอเมนทอลในอากาศเมื่อเก็บไว้ในภาชนะปิดที่เวลาต่างกัน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

จากการทดลองจะได้ค่าความเข้มข้นของไอเมนทอลในอากาศที่ผิวเมนทอลที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพประกอบ 17 และค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองดูได้จากตาราง 5 จากนั้นนำค่าตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลสู่อากาศที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ได้ 0.083, 0.090 และ 0.094 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ

ตาราง 5 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลสู่อากาศ

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	25	30	35
อัตราการหายไปของเมนทอล (มิลลิกรัมต่อชั่วโมง)	0.025	0.048	0.075
ความเข้มข้นของไอเมนทอลในอากาศ (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	0.246	0.434	0.655
พื้นที่ (ตารางเซนติเมตร)	1.102	1.102	1.102
ระยะทาง $z_2 - z_1$ (เซนติเมตร)	3.250	3.240	3.260



ภาพประกอบ 17 แสดงความเข้มข้นของเมณฑอลในอากาศที่ผิวเมณฑอลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

4.1.4 เปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมณฑอลสู่อากาศที่ได้จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการต่าง ๆ

จะเห็นว่าเราสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมณฑอลสู่อากาศได้จากการทดลอง และนำค่าที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ด้วยสมการกึ่งทฤษฎีหรือสมการเอมพิริคัล โดยการศึกษาครั้งนี้จะเปรียบเทียบกับ 4 สมการคือ

4.1.4.1 สมการของ Hirsfelder , Bird & Sportz (Welty; Wicks; & Wilson. 1984: 431-456) ดังสมการ 66

$$D_{AB} = \frac{0.001858T^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{\frac{1}{2}}}{P\sigma_{AB}^2\Omega_D} \quad (66)$$

4.1.4.2 สมการของ Wilke-Lee (Treybal 1980: 21-87) ดังสมการ 67

$$D_{AB} = \frac{\left(1.084 - 0.249 \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}\right) T^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{p_t (r_{AB})^2 f\left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}}\right)} \quad (67)$$

4.1.4.3 สมการของ Fuller Schettler และ Giddings (Welty; Wicks; & Wilson. 1984: 431-456) ดังสมการ 68

$$D_{AB} = \frac{1.0 \times 10^{-3} T^{1.75} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}\right)^{\frac{1}{2}}}{P \left[(\Sigma V_A)^{\frac{1}{3}} + (\Sigma V_B)^{\frac{1}{3}} \right]^2} \quad (68)$$

4.1.4.4 สมการของ Slattery และคณะ (Bird; Stewart; & Lightfoot. 2002: 513-542) ดังสมการ 69

$$p(D_{AB}) = a \left(\frac{T}{\sqrt{T_{CA} T_{CB}}} \right)^b (P_{CA} P_{CB})^{\frac{1}{3}} (T_{CA} T_{CB})^{\frac{5}{12}} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (69)$$

โดยกรณีที่ 1 $a = 3.640 \times 10^{-4}$ $b = 2.334$ สำหรับส่วนผสมของน้ำกับก๊าซไม่มีขั้ว

กรณีที่ 2 $a = 2.745 \times 10^{-4}$ $b = 1.823$ สำหรับส่วนผสมของก๊าซที่ไม่มีขั้ว

ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณดูได้จากตาราง 6

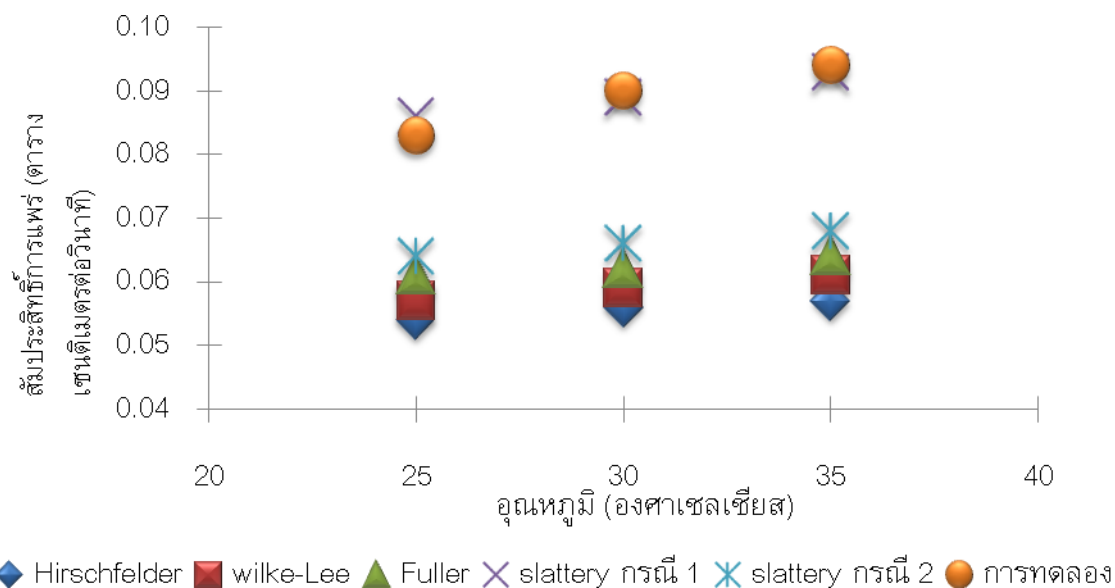
เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมฆทอลในอากาศ ผลที่ได้เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่าค่าที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับสมการของ slattery กรณีที่ 1 ที่ใช้ค่า a และ b สำหรับส่วนผสมของน้ำกับก๊าซที่ไม่มีขั้ว ผลที่ได้ดูจากตาราง 7 และภาพประกอบ 18

ตาราง 6 แสดงค่าตัวแปรต่าง ๆ ของเมฆทอลและอากาศ ที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมฆทอลในอากาศ

อุณหภูมิ (เคลวิน), T	298, 303 และ 308
ความดัน (บรรยากาศ), P	0.99
น้ำหนักโมเลกุลของอากาศ (กรัมต่อโมล), M_A	28.96
น้ำหนักโมเลกุลของเมฆทอล (กรัมต่อโมล), M_B	156.26
ปริมาตรอะตอมของอากาศ (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล), V_A	20.10
ปริมาตรอะตอมของเมฆทอล (ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล), V_B	189.88
จุดเดือดของเมฆทอล (เคลวิน), T_b	485.00
อุณหภูมิที่จุดวิกฤติของเมฆทอล (เคลวิน), T_c	657.85
อุณหภูมิที่จุดวิกฤติของอากาศ (เคลวิน), T_c	132.40
ความดันที่จุดวิกฤติของเมฆทอล (บรรยากาศ), P_c	26.75
ความดันที่จุดวิกฤติของอากาศ (บรรยากาศ), P_c	37.00

ตาราง 7 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมฆทอลสู่อากาศที่ได้จากการคำนวณและการทดลองที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส

สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมฆทอล (D_{AB}) (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	25	30	35
Hirsfelder	0.054	0.056	0.057
Wilke-Lee	0.057	0.059	0.061
Fuller	0.061	0.062	0.064
Slattery กรณีที่ 1	0.086	0.089	0.093
Slattery กรณีที่ 2	0.064	0.066	0.068
จากการทดลอง	0.083	0.090	0.094



ภาพประกอบ 18 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลที่ได้จากการทดลองและสมการต่าง ๆ

4.1.5 ศึกษาสมการที่ใช้หาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลอง

จากผลการทดลองทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลสู่อากาศที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.996 บรรยากาศ ถ้าต้องการหาค่าที่อุณหภูมิอื่นจะต้องหาสมการที่เหมาะสมที่จะทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ เนื่องจากการแพร่ของเมนทอลในอากาศแปรผันตรงกับอุณหภูมิและแปรผกผันกับความดัน ดังนั้นสมการพื้นฐานของการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คือ

$$D_{AB} = a \left[\frac{T}{298.16} \right]^b (C) \quad (73)$$

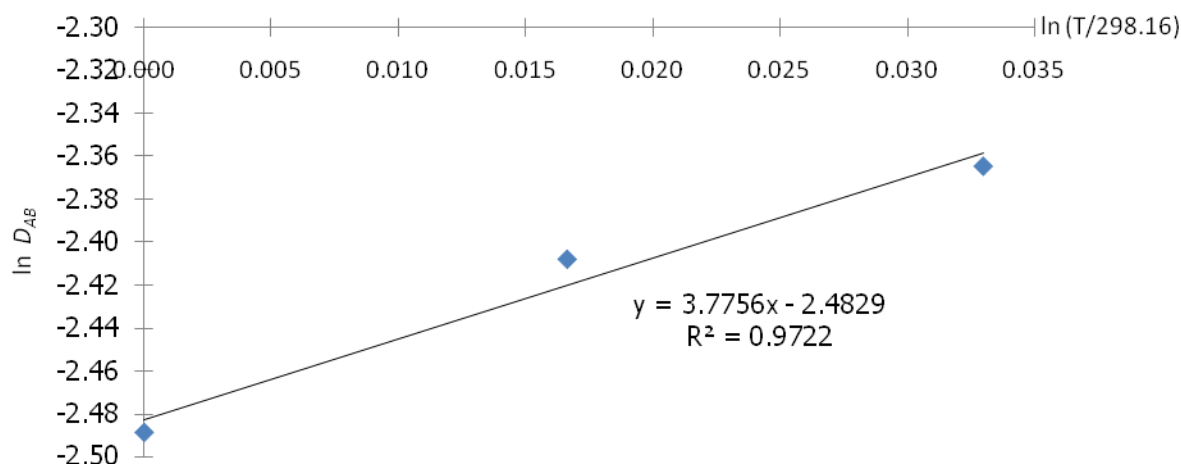
$$D_{AB} = aC \left[\frac{T}{298.16} \right]^b \quad (74)$$

$$\ln D_{AB} = \ln aC + \ln \left[\frac{T}{298.16} \right]^b \quad (75)$$

$$\ln D_{AB} = \ln aC + b \ln \left[\frac{T}{298.16} \right] \quad (76)$$

เมื่อ D_{AB} คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทอล มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที
 a, b คือค่าคงที่
 C คือ $1/P$
 P คือความดันขณะทำการทดลอง มีหน่วยเป็นบรรยากาศ
 T คืออุณหภูมิขณะทำการทดลอง มีหน่วยเป็นเคลวิน

วาดกราฟระหว่าง $\ln D_{AB}$ กับ $\ln (T/298.16)$ จะได้จุดตัดและ slope ซึ่งจะนำมาคำนวณค่า a และ b ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 กราฟระหว่าง $\ln D_{AB}$ ที่ได้จากการทดลองกับ $\ln (T/298.16)$ เส้นทึบคือค่าเฉลี่ย

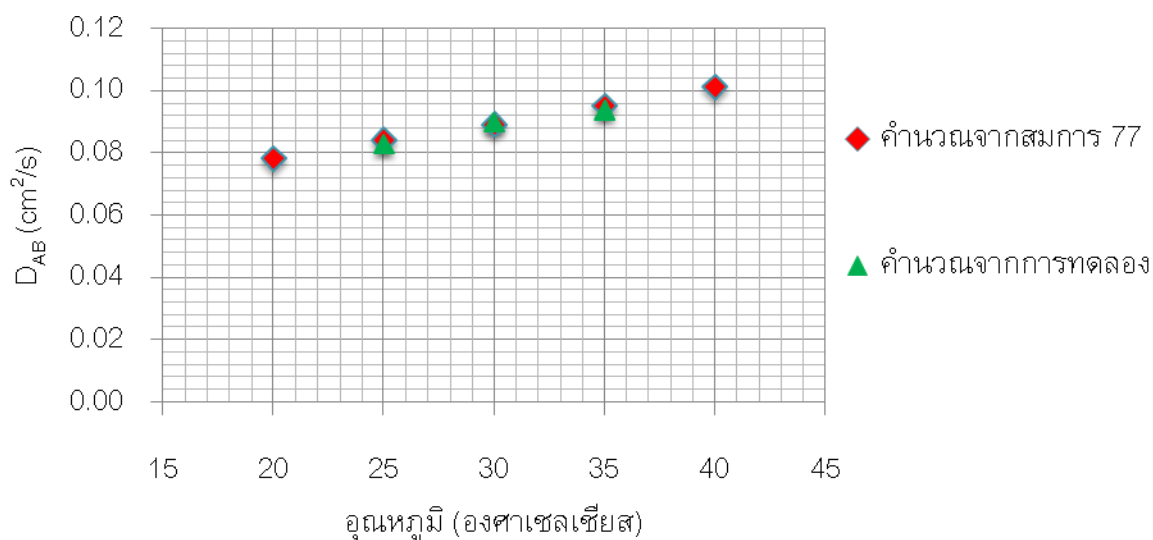
จากกราฟ slope มีค่า 3.7756 และ $\ln aC$ มีค่า -2.4829 ดังนั้นสามารถหาค่าคงที่ a และ b ได้ 0.08315 และ 3.7756 ตามลำดับ เมื่อแทนค่า a และ b ในสมการ 73 จะได้สมการที่ใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทอลสู่อากาศดังสมการ 77 เมื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทอลสู่

อากาศจากสมการ 77 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ จะได้ค่าดังตาราง 8 นำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองพบว่ามีความใกล้เคียงกัน ในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 40 องศาเซลเซียส ที่ความดันบรรยากาศ ดังภาพประกอบ 20 ดังนั้นสมการ 77 สามารถใช้ทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทิลแอลกอฮอล์ได้ดี

$$D_{AB} = 0.08315 \left[\frac{T}{298.16} \right]^{3.7756} \left[\frac{1}{P} \right] \quad (77)$$

ตาราง 8 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทิลแอลกอฮอล์ระหว่างการทดลองกับสมการ 77

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	20	25	30	35	40
จากการทดลอง	-	0.083	0.090	0.094	-
จากสมการ	0.078	0.084	0.089	0.095	0.101

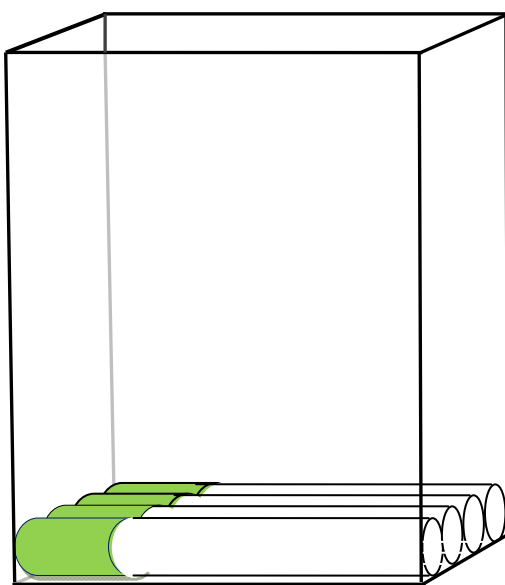


ภาพประกอบ 20 เปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมทิลแอลกอฮอล์ระหว่างการทดลองกับสมการ 77

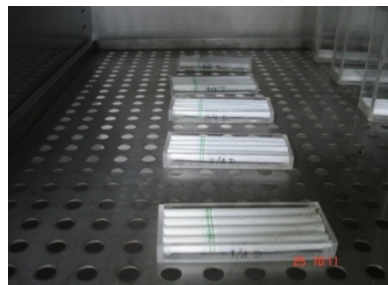
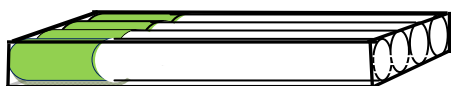
4.2 ผลการศึกษาการถ่ายเทมวลของเมททอลในบุหรี

4.2.1 อุณหภูมิต่อการถ่ายเทมวลของเมททอลในบุหรี

จากการทดลองหาสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมททอลสู่อากาศพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อการแพร่ แต่อุณหภูมิมีผลต่อการแพร่ ดังนั้นการศึกษการแพร่ของเมททอลในบุหรีเราจึงศึกษาเฉพาะผลของอุณหภูมิ โดยทำการศึกษาที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส เนื่องจากในกระบวนการผลิตจะมีเครื่องบรรจุที่มีลักษณะแตกต่างกัน 2 แบบคือ เครื่องบรรจุแบบต่อเนื่องซึ่งเป็นเครื่องรุ่นใหม่ที่ทำกรมวนแล้วส่งต่อไปห่อซองภายในเครื่องเดียวกัน และเครื่องบรรจุที่แยกจากเครื่องมวนซึ่งต้องทำการมวนก่อนแล้วใส่ถาดวางในรถเข็นเพื่อส่งต่อมาเข้าเครื่องห่อซองอีกทีหนึ่ง ดังนั้นการทดลองจึงทำที่ 2 สภาวะคือใส่ในกล่องพลาสติกทรงสูง (A) เพื่อเป็นตัวแทนบุหรีที่บรรจุในเครื่องบรรจุแบบต่อเนื่องในกรณีเครื่องหยุดการทำงาน และกล่องพลาสติกทรงเตี้ย (B) เพื่อเป็นตัวแทนบุหรีที่วางบนรถเข็นรอการบรรจุด้วยเครื่องห่อซองอีกทีหนึ่ง ซึ่งการทดลองนี้จะใช้เวลา 100 ชั่วโมง ดังภาพประกอบ 21 และ 22



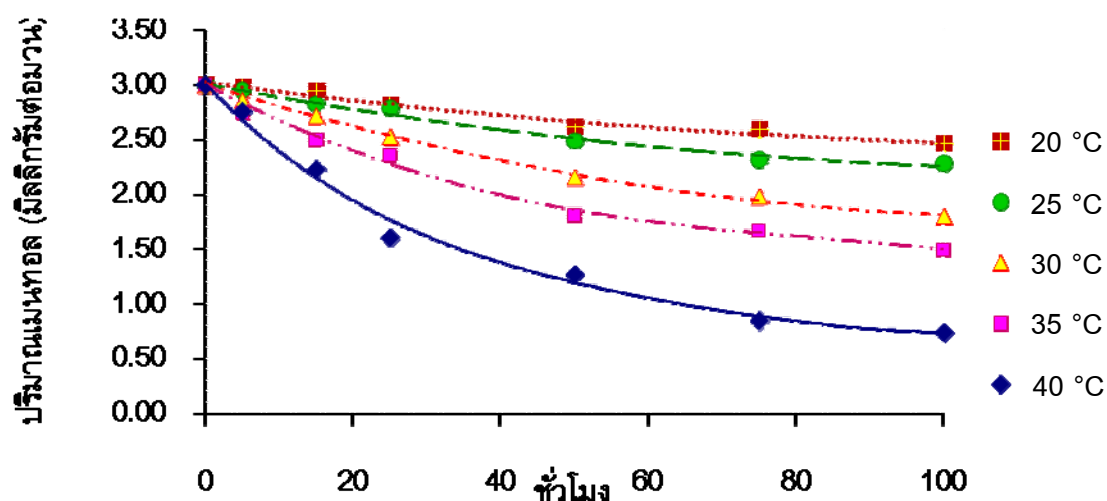
ภาพประกอบ 21 บุหรีบรรจุในกล่องพลาสติกทรงสูง 3.15x8.40x9.50 เซนติเมตร (A)



ภาพประกอบ 22 บุหรี่บรรจุในกล่องพลาสติกทรงเตี้ย 3.15x8.40x0.75 เซนติเมตร (B)

4.2.1.1 ศึกษาการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่บรรจุในกล่องพลาสติกทรงสูง

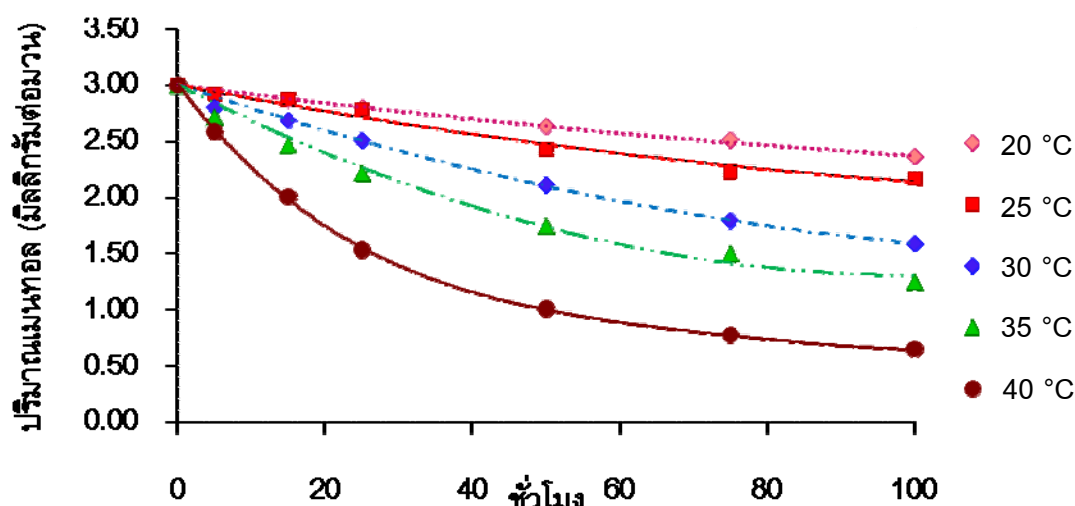
ภาพประกอบ 23 แสดงอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยบรรจุบุหรี่ในกล่องทรงสูง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการหายไปของเมนทอลน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาผ่านไป 100 ชั่วโมงอัตราการหายไปเริ่มคงที่ โดยปริมาณเมนทอลที่หายไปเมื่อเวลา 100 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ประมาณ 0.50, 0.75, 1.25, 1.50 และ 2.25 มิลลิกรัมต่อมวน ตามลำดับ ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงอัตราการหายไปจะสูงกว่าอุณหภูมิต่ำมาก และเมื่อเวลาประมาณ 100 ชั่วโมงผ่านไป อัตราการหายไปมีแนวโน้มเข้าใกล้สู่สมดุล



ภาพประกอบ 23 อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ บรรจุในกล่องทรงสูง เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม

4.2.1.2 ศึกษาการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่บรรจุในกล่องพลาสติกทรงเตี้ย

ภาพประกอบ 24 แสดงอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสที่ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 70 เปอร์เซ็นต์ โดยบรรจุบุหรี่ในกล่องทรงเตี้ย ที่มีลมพัดผ่านด้วยความเร็ว 240 มิลลิเมตรต่อวินาที ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่อุณหภูมิต่ำอัตราการหายไปของเมนทอลน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง และเมื่อเวลาผ่านไป 100 ชั่วโมงอัตราการหายไปเริ่มคงที่ โดยปริมาณเมนทอลที่หายไปเมื่อเวลา 100 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ประมาณ 0.60, 0.90, 1.40, 1.75 และ 2.35 มิลลิกรัมต่อมวน ตามลำดับ ดังนั้นที่อุณหภูมิสูงอัตราการหายไปจะสูงกว่าอุณหภูมิต่ำมาก และเมื่อเวลาประมาณ 100 ชั่วโมงผ่านไป อัตราการหายไปมีแนวโน้มเข้าใกล้สู่สมดุล



ภาพประกอบ 24 อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ บรรจุในกล่องทรงเตี้ย เส้นที่แสดงในภาพประกอบคือเส้นแนวโน้ม

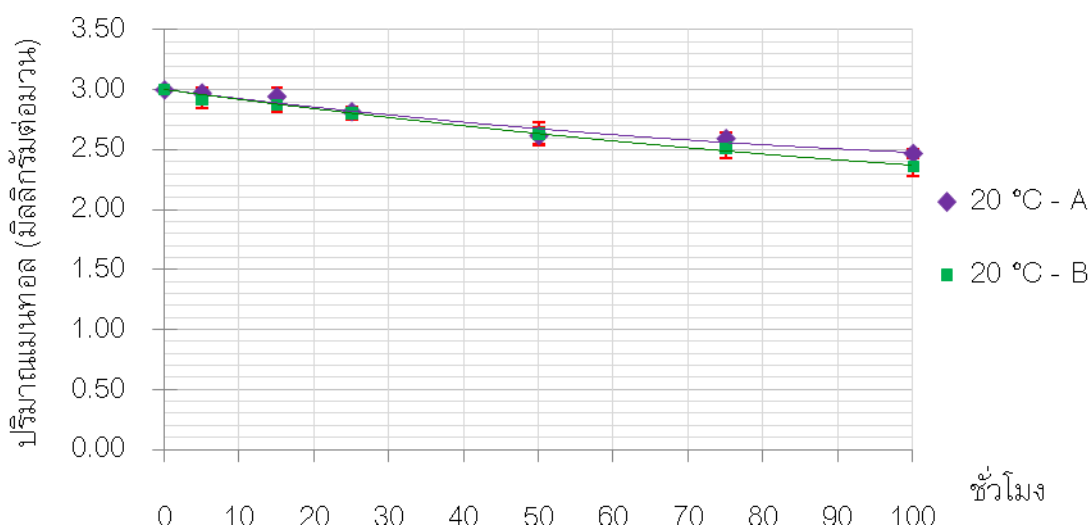
4.2.1.3 เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ ระหว่างบุหรี่ที่บรรจุในกล่องพลาสติกทรงสูงและทรงเตี้ย ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การบรรจุบุหรี่ในกล่องพลาสติกทรงสูงถือว่าการแพร่ของเมนทอลในอากาศเพียงอย่างเดียวแต่การบรรจุในกล่องพลาสติกทรงเตี้ยจะมีลมพัดผ่านผิวหน้าของมวนบุหรี่โดยมีความเร็วลมประมาณ 240 มิลลิเมตรต่อวินาที ซึ่งอาจมีผลต่อการแพร่ของเมนทอลที่อุณหภูมิต่าง ๆ

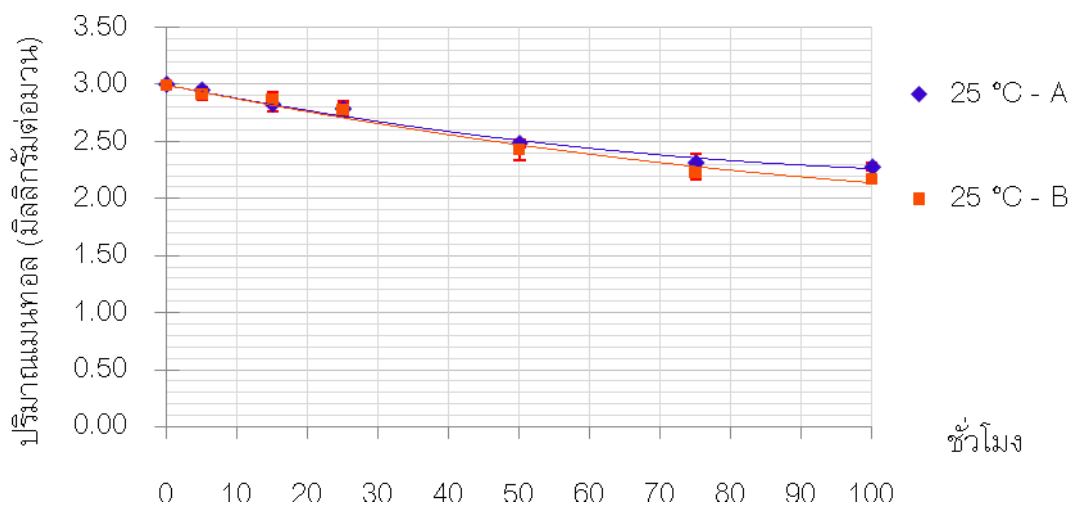
โดยทำการทดลองที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 70 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองแสดงดังภาพประกอบ 25 ถึง 29

จากภาพประกอบ 25 ถึง 27 พบว่า 20 ชั่วโมงแรกของการทดลองอัตราการแพร่ใกล้เคียงกันมากเนื่องจากมีอุณหภูมิต่ำ แต่เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 25 ชั่วโมง อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีที่บรรจุในกล่องพลาสติกทรงเตี้ยสูงกว่าทรงสูง เนื่องจากบุหรีในกล่องทรงเตี้ยมีลมพัดผ่านบริเวณผิวหน้าทำให้การแพร่ของเมนทอลสูงกว่าบุหรีที่มีการแพร่ของเมนทอลในอากาศเพียงอย่างเดียว

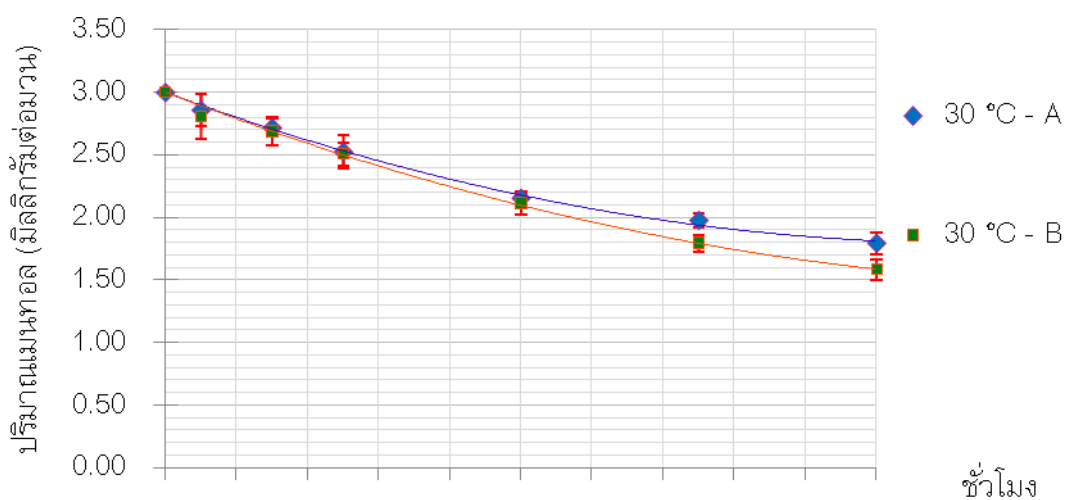
จากภาพประกอบ 28 และ 29 พบว่า อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีที่บรรจุในกล่องพลาสติกทรงเตี้ยสูงกว่าทรงสูงตั้งแต่เริ่มทำการทดลอง เนื่องจากอุณหภูมิสูงและบุหรีในกล่องทรงเตี้ยมีลมพัดผ่านบริเวณผิวหน้าทำให้การแพร่ของเมนทอลสูงกว่าเมื่อใส่บุหรีในกล่องทรงสูงซึ่งเป็นการแพร่ผ่านอากาศเพียงอย่างเดียว แสดงให้เห็นว่าที่อุณหภูมิต่ำ ความเข้มข้นของเมนทอลที่กระดาษพันกันกรองและผิวหน้าของมวลบุหรีมีค่ามาก แม้ว่ามีลมพัดผ่านแต่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลในอากาศที่มีค่าต่ำจะยังมีอิทธิพลอยู่สูง จนเมื่อเวลาผ่านไปทำให้ความเข้มข้นของเมนทอลที่ผิวหน้าบุหรีลดลง จึงต้องมีการดึงเมนทอลในกันกรองผ่านชั้นมายังผิวหน้าซึ่งจะทำให้ช้ากว่า การมีลมพัดผ่านจะช่วยให้เมนทอลมีการแพร่จากบุหรีขึ้นมาสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น และเมื่อเมนทอลแพร่ผ่านกระดาษพันกันกรองการแพร่จะเกิดเร็วขึ้น เนื่องจากมีการพามวล สำหรับที่อุณหภูมิสูงการแพร่ของเมนทอลช่วงแรกขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและลมพัดผ่าน เพราะค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลที่อุณหภูมิสูงจะมีค่าสูงอยู่แล้ว ทำให้การแพร่ของเมนทอลระหว่างมวลบุหรีกับกระดาษพันกันกรองเกิดขึ้นเร็วมาก



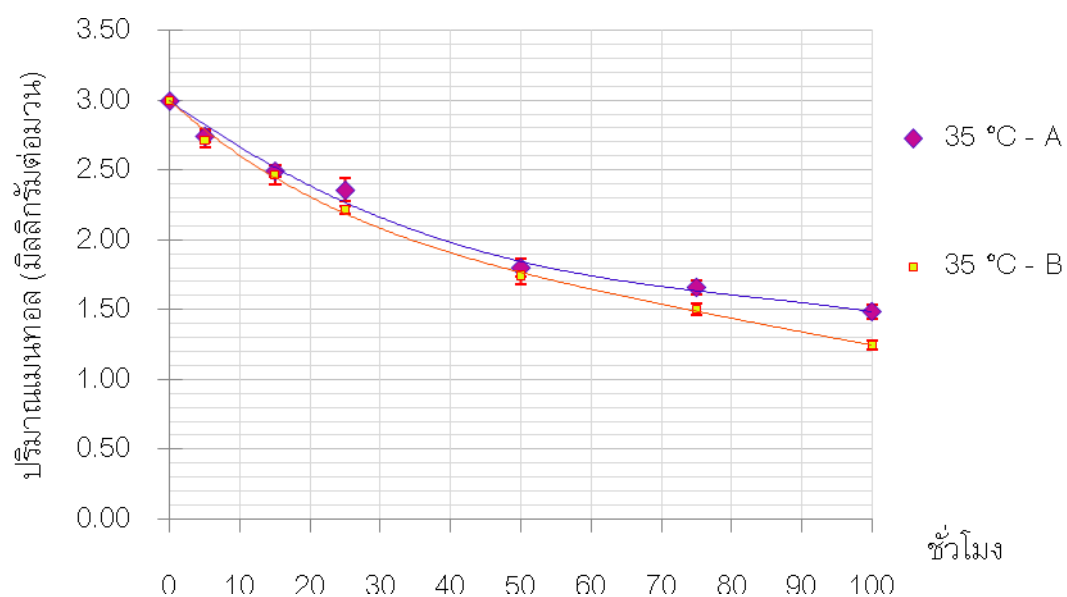
ภาพประกอบ 25 เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีระหว่างสถานะ A และ B ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือ เส้นแนวโน้มน



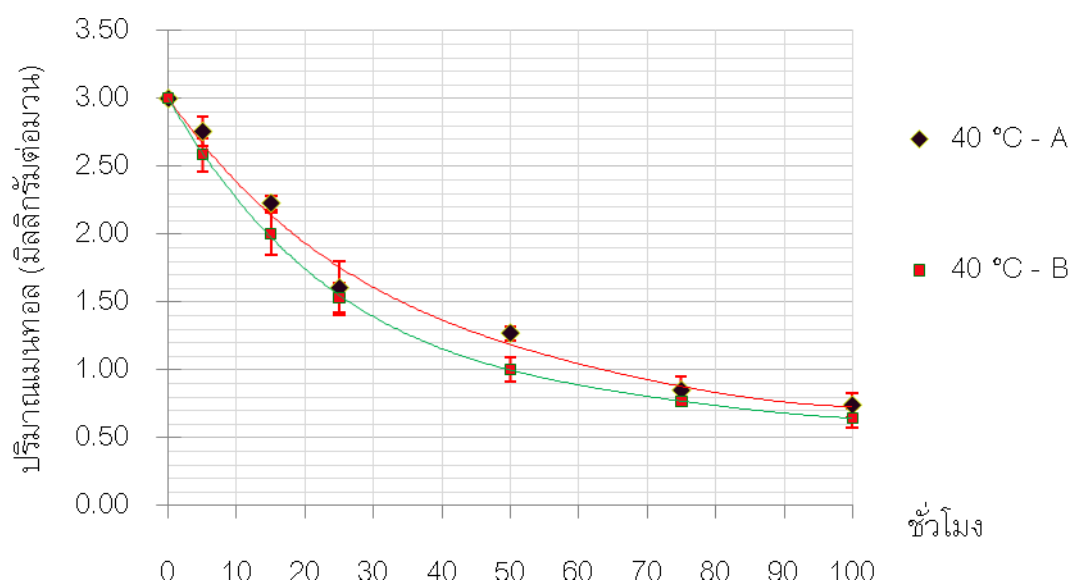
ภาพประกอบ 26 เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ระหว่างสถานะ A และ B ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือ เส้นแนวโน้ม



ภาพประกอบ 27 เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ระหว่างสถานะ A และ B ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือ เส้นแนวโน้ม



ภาพประกอบ 28 เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ระหว่างสภาวะ A และ B ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือ เส้นแนวโน้ม



ภาพประกอบ 29 เปรียบเทียบอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ระหว่างสภาวะ A และ B ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์ เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือ เส้นแนวโน้ม

4.2.1.4 การศึกษาสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (k_c)

การทดลองศึกษาการแพร่ของเม็นทอลในบุหรี จะพบว่าการแพร่ของเม็นทอลประกอบไปด้วยการแพร่และการพามวล การแพร่เกิดเมื่อเม็นทอลในก้นกรองแพร่ผ่านกระดาษพันก้นกรองออกจากก้นกรองบุหรี ส่วนการพาเกิดเมื่อเม็นทอลที่บริเวณผิวก้นกรองถูกลมพัดพาให้ เกิดการถ่ายเทมวลให้เร็วขึ้น การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเม็นทอลในบุหรี สามารถหาได้จากการคำนวณและจากการทดลอง

ซึ่งโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลสำหรับการระเหิดของของแข็งไปยังอากาศ มีความสัมพันธ์สอดคล้องกับสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ชั้นขอบเขตการไหลแบบราบเรียบและแบบปั่นป่วน ดังนี้

$$Sh = \frac{k_c L}{D_{AB}} \quad (60)$$

$$Re < 3 \times 10^5 \text{ เป็นการไหลแบบราบเรียบ } Sh = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (61)$$

$$Re > 3 \times 10^5 \text{ เป็นการไหลแบบปั่นป่วน } Sh = 0.036 Re^{0.8} Sc^{1/3} \quad (62)$$

สามารถหาค่าที่เกี่ยวข้องได้จากสมการดังนี้

$$Re = \frac{Lv}{\nu} \quad (63)$$

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (64)$$

เมื่อ	k_c	คือสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที
	L	คือระยะทางของผิวที่ลมพัดผ่าน มีหน่วยเป็นเมตร
	v	คือความเร็วลม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที
	ν	คือความหนืดจลนศาสตร์ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที
จากสมการ 60 เราสามารถหาค่า k_c ได้จากค่าตัวแปรต่าง ๆ ในตาราง 9		

ตาราง 9 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

ตัวแปร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	20	25	30	35	40
ความหนืดจลนศาสตร์ ของอากาศ (ตารางเมตรต่อวินาที) $\times 10^5$	1.550	1.600	1.640	1.690	1.740
สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอล (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)	0.078	0.084	0.089	0.095	0.101
ระยะทางของผิวที่ลมพัดผ่าน (เมตร)	0.020				
ความเร็วลม (เมตรต่อวินาที)	0.240				

จากข้อมูลในตาราง 9 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียสได้ 0.57, 0.60, 0.62, 0.64 และ 0.67 เซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ ค่าที่ได้นี้เป็นค่าที่คำนวณได้จากตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ใช้ในการทดลองแต่สำหรับค่า k_c ที่ได้จากการทดลองสามารถหาได้จากสมการ ของฟลักซ์ในทอมของสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล

$$N_A = k_c (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (59)$$

$C_{A,s}$ คือความเข้มข้นที่ผิวหาได้จากการทดลองโดยถือว่าความเข้มข้นที่ผิวคือความเข้มข้นของสารที่สมดุล ณ.อุณหภูมิใด ๆ

$C_{A,\infty}$ คือความเข้มข้นในของไหลซึ่งถือว่าที่เริ่มต้นการทดลองความเข้มข้นในของไหลมีค่าเป็นศูนย์

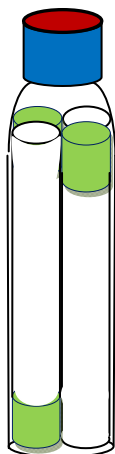
สำหรับการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจากผลการทดลอง จะตั้งสมมุติว่า

1. การแพร่ของเมนทอลจากมวลบุหรีเกิดเฉพาะบริเวณก้นกรองเท่านั้น เนื่องจากบุหรีที่ใช้ทดลองเป็นบุหรีที่มีการเติมเมนทอลเฉพาะในก้นกรอง และการทดลองเริ่มทำหลังจากมวลเสร็จและมีระยะเวลาทำการทดลอง 100 ชั่วโมง ดังนั้นการแพร่ของเมนทอลไปยังยาเส้นน้อยมาก เพราะจากการศึกษาของเคอร์แลน และเรียว (Curran. 1972: 40-42; Riehl; Shockley; & Reynolds. 1973: 10-11) พบว่าการแพร่ของเมนทอลไปยังก้นกรองช่วงเวลา 28 วันสามารถแพร่ได้ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น

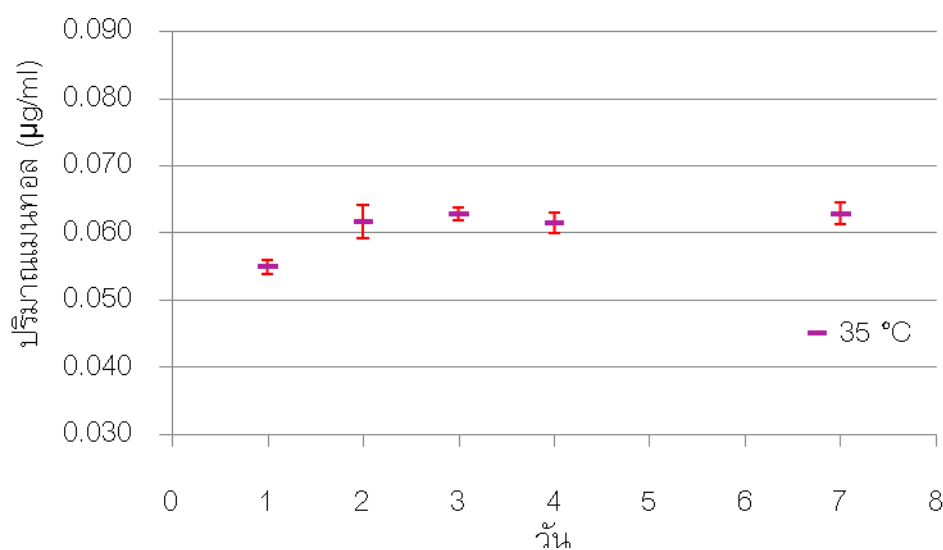
2. พื้นที่ด้านกว้างของมวลบุหรีใช้เส้นผ่าศูนย์กลางของมวลบุหรี เนื่องจากมวลบุหรีลักษณะเป็นเส้นโค้งถือว่าการแพร่เกิดได้ดีเฉพาะส่วนที่ตั้งฉากกับผิวหน้าภาชนะบรรจุเท่านั้น

3. การคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลจากการทดลองทำได้ 2 กรณีคือกรณีที่ 1 ช่วงการหายไปของเมเนทอลช่วงแรกซึ่งอัตราการหายไปสูง และกรณีที่ 2 อัตราการหายไปเฉลี่ยเชิงลอการิทึมตามระยะเวลา

ในการทดลองหาความเข้มข้นของเมเนทอลในอากาศที่ผิวบุหรีจะทำในสภาวะสมดุลระหว่างไอเมเนทอลในอากาศกับในบุหรี ซึ่งบรรจุในภาชนะปิดที่อุณหภูมิต่าง ๆ เพื่อให้แน่ใจว่าระยะเวลาที่ใช้ในการทดลองเป็นเวลาที่เมเนทอลอยู่ในสภาวะสมดุลแล้วจริง จึงทำการหากราฟสมดุลของเมเนทอลตามเวลา ซึ่งทำการทดลองดังภาพประกอบ 30 โดยนำบุหรีใส่ในขวดตัวอย่างที่ปิดสนิทแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ที่เวลาต่าง ๆ แล้วเก็บตัวอย่างอากาศที่สัมผัสด้วยเมเนทอลไปวัดด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานเมเนทอล พบว่าค่าความเข้มข้นของเมเนทอลในอากาศที่ผิวเมเนทอลเริ่มเข้าสู่สมดุลตั้งแต่วันที่ 2 เป็นต้นไป ดังภาพประกอบ 31 ซึ่งเป็นตัวอย่างของกราฟสมดุลเมื่อควบคุมอุณหภูมิที่ 35 องศาเซลเซียส ดังนั้นการทดลองขั้นต่อไปจะหาค่าความเข้มข้นของเมเนทอลที่สมดุล โดยเก็บเมเนทอลไว้ในขวดทดลองเป็นเวลาไม่น้อยกว่า 4 วัน ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30 และ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์



ภาพประกอบ 30 การทดลองหาความเข้มข้นของเมเนทอลที่ผิวบุหรี

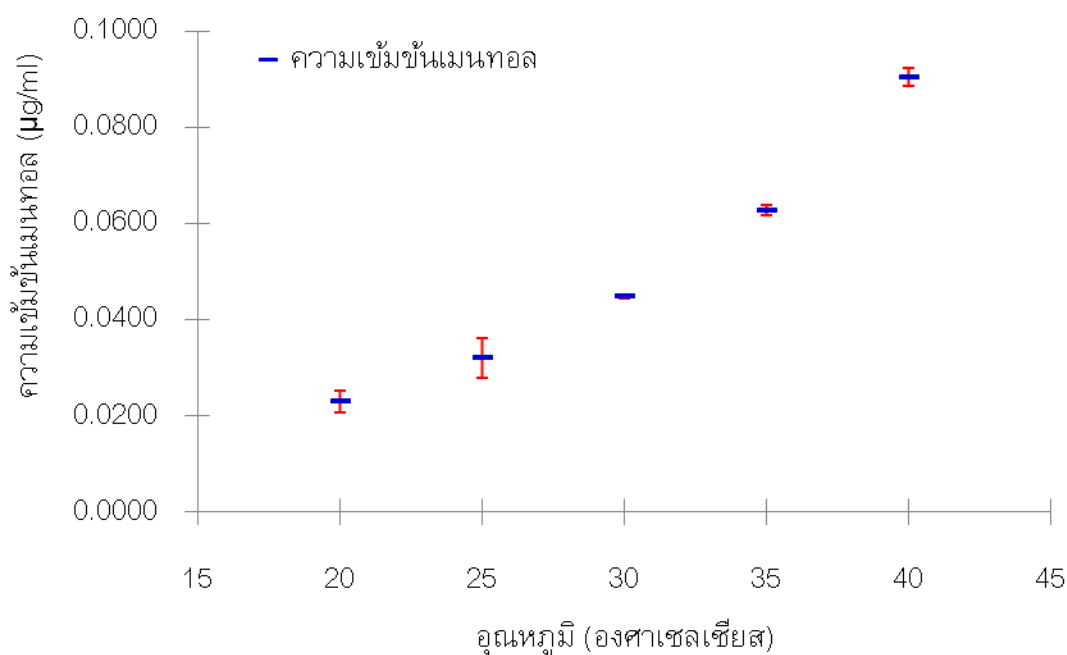


ภาพประกอบ 31 เปรียบเทียบความเข้มข้นของเมณฑอลในอากาศที่ผิวบุหรี เมื่อเก็บไว้ในภาชนะปิดที่เวลาต่างกัน ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส

จากการทดลองจะได้ค่าความเข้มข้นของเมณฑอลในอากาศที่ผิวบุหรี ($C_{A,s}$) ที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพประกอบ 32 และค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองดูได้จากตาราง 10 จากนั้นนำค่าตัวแปรต่าง ๆ เหล่านี้ไปคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเมณฑอลสู่อากาศ

ตาราง 10 ค่าตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเมณฑอลจากการทดลอง

ตัวแปร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	20	25	30	35	40
ความเข้มข้นของเมณฑอลที่ผิวบุหรี (ไมโครกรัมต่อมิลลิตร)	0.0230	0.0320	0.0448	0.0628	0.0905
สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมณฑอล (ตารางเซนติเมตรต่อวินาที)	0.078	0.084	0.089	0.095	0.101
พื้นที่การแพร่ของเมณฑอล (ตารางเซนติเมตรต่อมวนบุหรี)	1.575				



ภาพประกอบ 32 แสดงค่าความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่ผิวบุหรีที่อุณหภูมิต่าง ๆ

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเมนทอลจากบุหรีทำได้ 2 กรณี คือ

กรณีที่ 1 คำนวณจากอัตราการหายไปของเมนทอลในช่วงแรก (k_c) ซึ่งมีอัตราการหายไปสูง โดยคำนวณแยกระหว่าง 2 การทดลอง

1. การทดลองบรรจุบุหรีในกล่องทรงสูง (A)
2. การทดลองบรรจุบุหรีในกล่องทรงเตี้ย (B)

อัตราการหายไปหาได้จากค่าความชันจากกราฟที่ได้จากการทดลอง คำนวณค่าสัมประสิทธิ์ช่วงแรกของการถ่ายเทมวล k_c ได้จากสมการ 59 โดยใช้ค่าตัวแปรต่าง ๆ จากตาราง 10

ตัวอย่าง การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล k_c

อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีได้จากค่าความชันของกราฟระหว่างปริมาณเมนทอลกับเวลา สมมุติให้มีค่า x มิลลิกรัมต่อ 4 มวนต่อวินาที

ความเข้มข้นของเมนทอลที่ผิว ($C_{A,s}$) สมมุติให้มีค่า y มิลลิกรัมต่อ 4 มวนต่อมิลลิลิตร

พื้นที่กันกรองบุหรี สมมุติให้มีค่า A ตารางเซนติเมตรต่อ 4 มวน

ดังนั้นจากสมการ 59 เมื่อแทนค่าจะได้

$$k_c = \frac{N_A}{C_{A,s}} = \frac{\left[\frac{x}{A} \right]}{C_{A,s}} = \frac{x}{A \cdot y} \quad (78)$$

จากการคำนวณจะได้ค่า k_c มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที ผลการคำนวณดังตาราง 11

ตาราง 11 อัตราการหายไปช่วงแรกของเมนทอลในบูห์รีและค่าสัมประสิทธิ์ช่วงแรกของการถ่ายเทมวล (k_c)

อัตราการหายไปของเมนทอลในบูห์รี (มิลลิกรัมต่อ 4 มวนต่อวินาที) $\times 10^6$	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	20	25	30	35	40
การทดลองบรรจุบูห์รีในกล่องทรงสูง (A)	7.94	11.57	21.37	32.68	64.10
การทดลองบรรจุบูห์รีในกล่องทรงเตี้ย (B)	8.42	12.63	23.15	34.72	75.76
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล (k_c) (เซนติเมตรต่อวินาที)					
การทดลองบรรจุบูห์รีในกล่องทรงสูง ($k_{c,A}$)	0.0548	0.0574	0.0757	0.0826	0.1124
การทดลองบรรจุบูห์รีในกล่องทรงเตี้ย ($k_{c,B}$)	0.0581	0.0626	0.0820	0.0878	0.1329

กรณีที่ 2 คำนวณจากอัตราการหายไปของเมนทอลเฉลี่ย (k_{ov}) โดยคำนวณแยกระหว่าง 2 การทดลอง

1. การทดลองบรรจุบูห์รีในกล่องทรงสูง (A)
2. การทดลองบรรจุบูห์รีในกล่องทรงเตี้ย (B)

สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉลี่ย k_{ov} หาได้จากสมการที่ 79

$$-\frac{dm_A}{Adt} = k_{ov} (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (79)$$

เมื่อ $C_{A,\infty} = 0$

m_A คือน้ำหนักของเมนทอลในบูห์รีต่อ 1 ชุด (4 มวน) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม

k_{ov} คือค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมทั้งหมด มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อ

วินาที

$$-\frac{dm_A}{dt} = k_{ov} * A * C_{A,S} \quad (80)$$

$$\text{เมื่อกำหนดให้} \quad C_{A,S} = \frac{m_{A,e}}{k'} \quad (81)$$

และ $k' = \frac{m_{A,e}}{C_{A,e}}$ คือค่าคงที่ของการระเหิดผ่านกั้นกรองและกระตาศนวนบุหรี มีหน่วยเป็น มิลลิตรต่อ 4 มวน ซึ่งเป็นการตั้งสมการตามสมดุล ระหว่างของแข็งกับความเข้มข้นเชิงไอของของแข็ง

$m_{A,e}$ คือเมณฑอลที่เหลื่อในบุหรีที่จุดสมดูล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อ 1 ชุด (4 มวน)

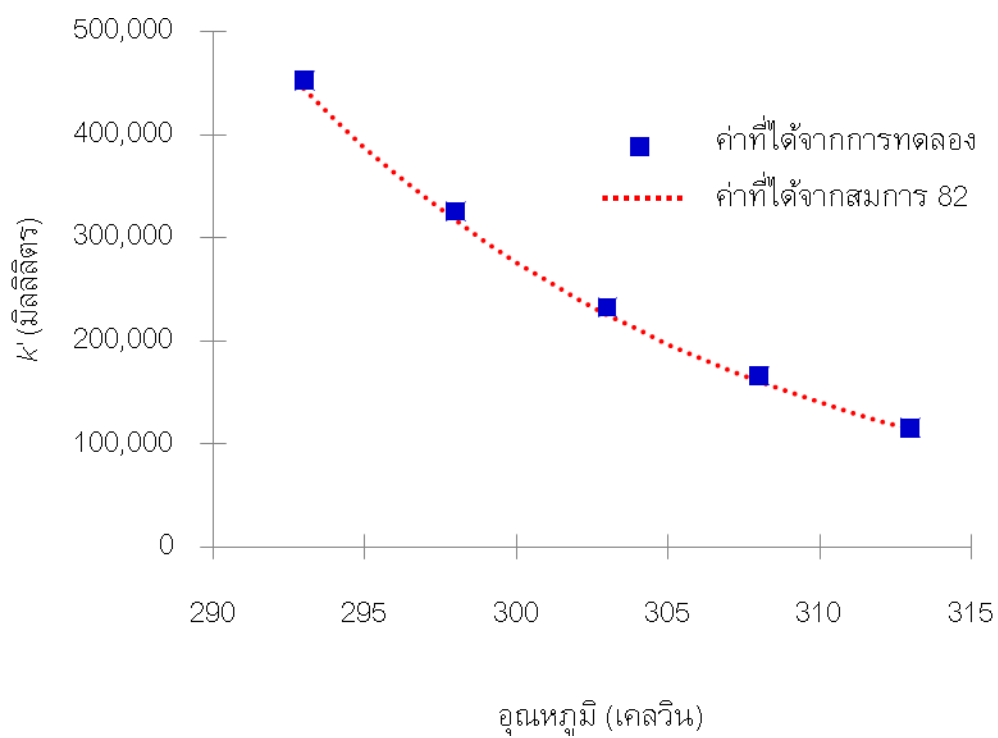
$C_{A,e}$ คือความเข้มข้นของเมณฑอลในอากาศที่จุดสมดูล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิตร

สำหรับการคำนวณค่า k' ได้ผลดังตาราง 12 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง k' กับ อุณหภูมิได้ดังภาพประกอบ 33 และสมการ 82

$$k' = 2 * 10^{14} e^{-0.068T} \quad (82)$$

ตาราง 12 ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ k'

ตัวแปร	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	20	25	30	35	40
เมณฑอลในอากาศที่จุดสมดูล (ไมโครกรัมต่อมิลลิตร)	0.0230	0.0320	0.0448	0.0628	0.0905
เมณฑอลที่เหลื่อในบุหรีที่จุดสมดูล (มิลลิกรัม)	10.3998	10.3997	10.3996	10.3994	10.3991
k' (มิลลิตรต่อ 1 ชุด (4 มวน)) $\times 10^{-5}$	4.5216	3.2499	2.3213	1.6560	1.1491



ภาพประกอบ 33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k' กับอุณหภูมิ

เมื่อทราบค่า k' นำค่าที่ได้มาใช้ในสมการ 80 และ 81 สามารถจัดเรียงสมการใหม่ได้เป็น

$$-\frac{dm_A}{m_A} = \frac{k_{ov}A}{k'} dt \quad (83)$$

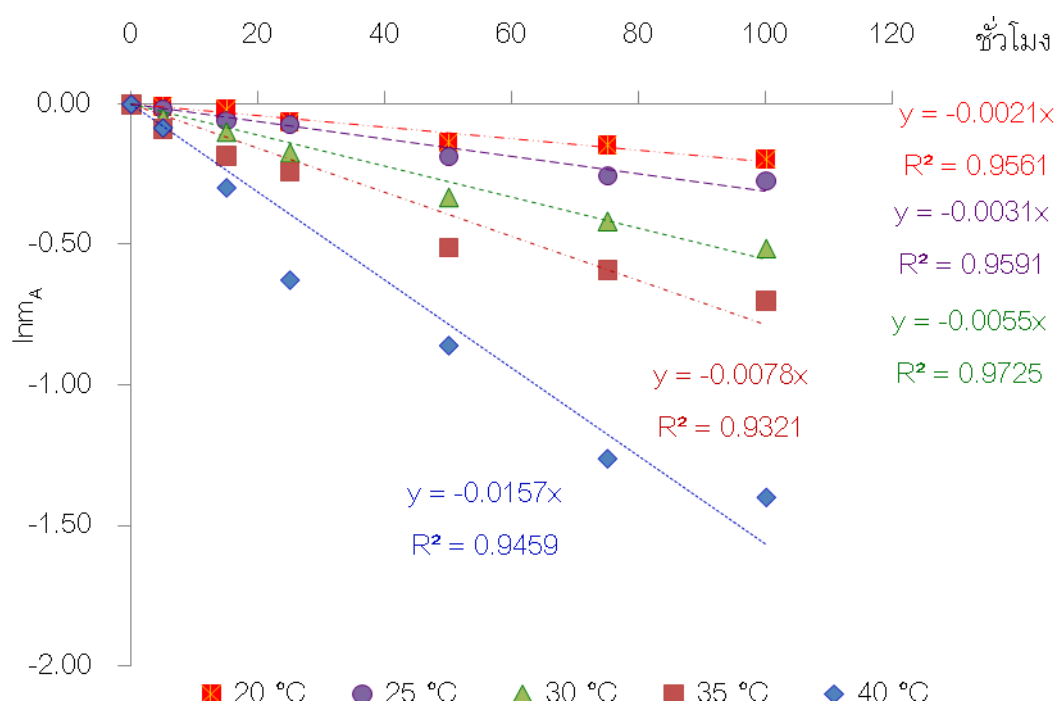
เมื่อทำอินทิเกรตจะได้

$$-\ln m_A = \frac{k_{ov}A}{k'} t \quad (84)$$

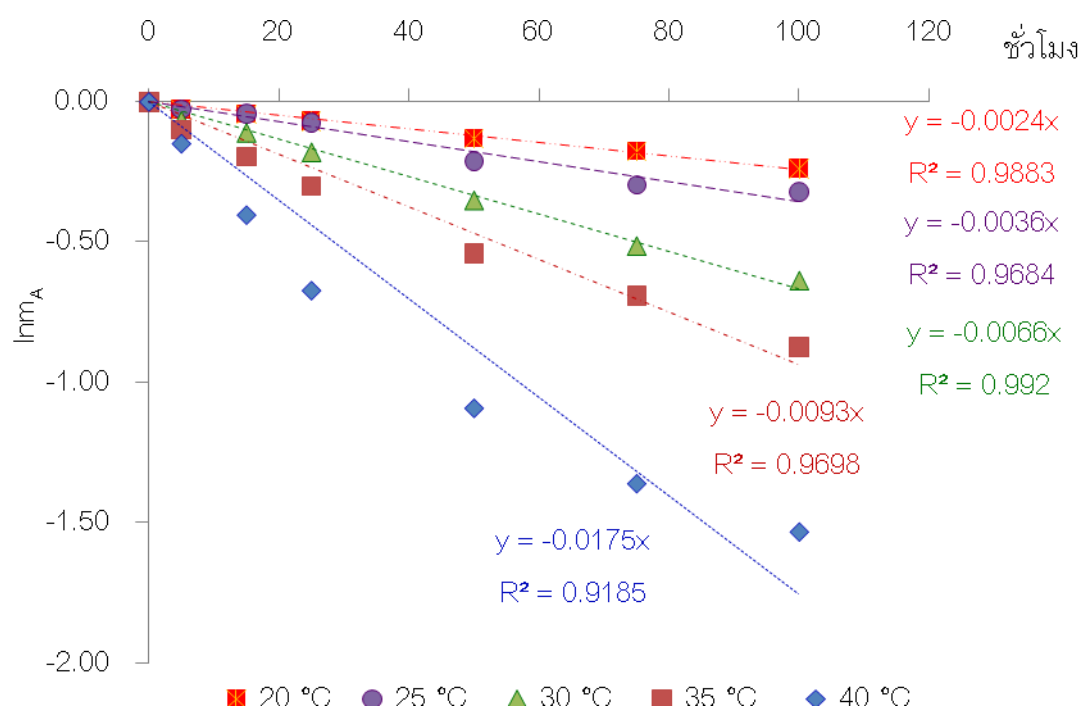
จากสมการ 84 เมื่อวาดกราฟระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลาจะได้ค่า slope เป็น $-\frac{k_{ov}A}{k'}$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉลี่ย (k_{ov}) ได้จากสมการ 85 และได้ผลการทดลองดังตาราง 13

$$x = -\frac{k_{ov}A}{k'} \quad (85)$$

เมื่อ x คือ slope ในภาพประกอบ 34 และ 35



ภาพประกอบ 34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลา กรณีบรรจุหุรีในกล่องทรงสูง เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือเส้นแสดงค่าเฉลี่ย



ภาพประกอบ 35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลา กรณีบรรจุหรีในกล่องทรงเตี้ย เส้นที่แสดงในภาพประกอบ คือเส้นแสดงค่าเฉลี่ย

ตาราง 13 Slope ระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลาและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉลี่ยของเมมทอล (k_{ov})

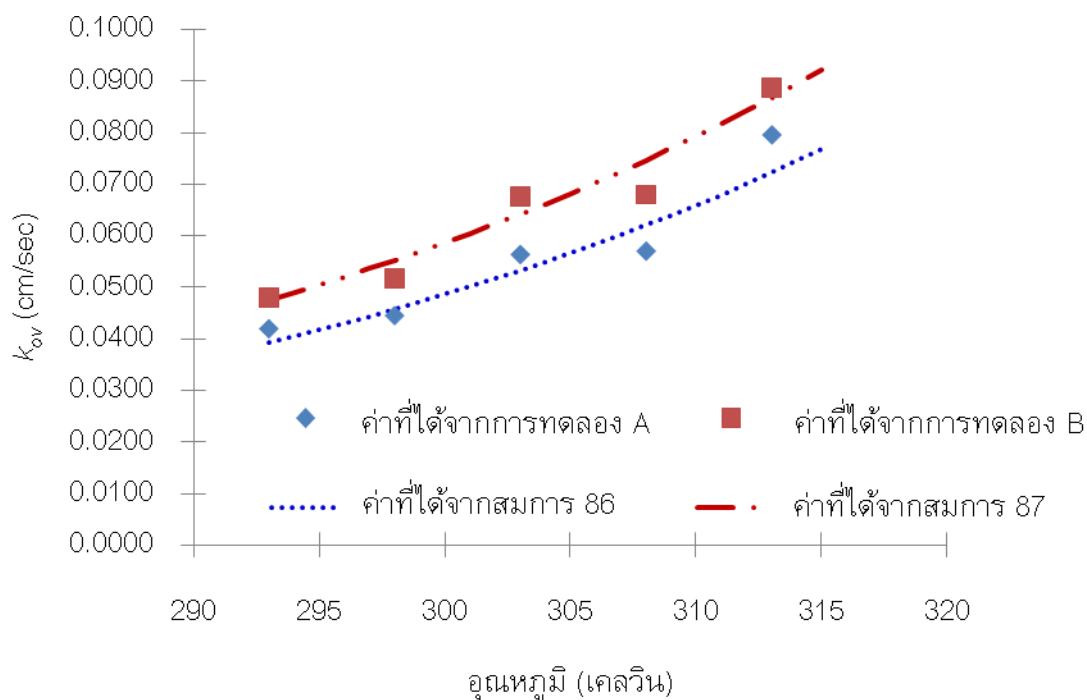
Slope ระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลา (ต่อชั่วโมง)	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	20	25	30	35	40
บรรจุหรีในกล่องทรงสูง (A)	-0.0021	-0.0031	-0.0055	-0.0078	-0.0157
บรรจุหรีในกล่องทรงเตี้ย (B)	-0.0024	-0.0036	-0.0066	-0.0093	-0.0175
ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉลี่ย (k_{ov}) (เซนติเมตรต่อวินาที)					
บรรจุหรีในกล่องทรงสูง ($k_{ov,A}$)	0.0419	0.0444	0.0563	0.0570	0.0795
บรรจุหรีในกล่องทรงเตี้ย ($k_{ov,B}$)	0.0478	0.0516	0.0676	0.0679	0.0887

สำหรับความสัมพันธ์ระหว่าง k_{ov} กับอุณหภูมิแสดงดังภาพประกอบ 36 ซึ่งพบว่าค่า k_{ov} แบบที่มีลมพัดผ่านมีค่าสูงกว่า และสามารถทำนายค่า k_{ov} ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้ดังสมการ 86 กรณี

การแพร่แบบไม่มีลมพัดผ่าน และสมการ 87 กรณีการแพร่แบบมีลมพัดผ่าน การใช้สมการจะใช้สมการเอ็กโพเนนเชียลซึ่งเป็นการเลียนแบบความสัมพันธ์ของสมการอาร์เรเนียส ซึ่งจะเหมาะสมกว่าการใช้สมการเส้นตรง

$$k_{ov,A} = 5 * 10^{-6} e^{0.0306 T} \quad (86)$$

$$k_{ov,B} = 6.8 * 10^{-6} e^{0.0302 T} \quad (87)$$



ภาพประกอบ 36 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง k_{ov} กับอุณหภูมิ

จากการทดลองที่ผ่านมาเราสามารถหาความสัมพันธ์ในรูปสมการของอัตราการแพร่ของเมทอลในบุหรีทั้งในกรณีที่ไม่มีลมพัดผ่านและมีลมพัดผ่านได้ตั้งสมการ 88 และ 89

กรณีที่ไม่มิลมพัดผ่าน โดยบรรจุบุหรี่ในกล่องทรงสูง (A)

$$m_{A,A} = m_{A,0} e^{-t(5.67 \cdot 10^{-16} e^{0.0986T})} \quad (88)$$

กรณีที่มีลมพัดผ่าน โดยบรรจุบุหรี่ในกล่องทรงเตี้ย (B)

$$m_{A,B} = m_{A,0} e^{-t(7.7112 \cdot 10^{-16} e^{0.0984T})} \quad (89)$$

เมื่อ $m_{A,A}$, $m_{A,B}$ คือปริมาณเมนทอลในบุหรีที่เวลาต่าง ๆ ในกรณี A และ B มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมวน

$m_{A,0}$ คือปริมาณเมนทอลในบุหรีที่เวลาเริ่มต้น มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมวน

t คือเวลา มีหน่วยเป็นวินาที

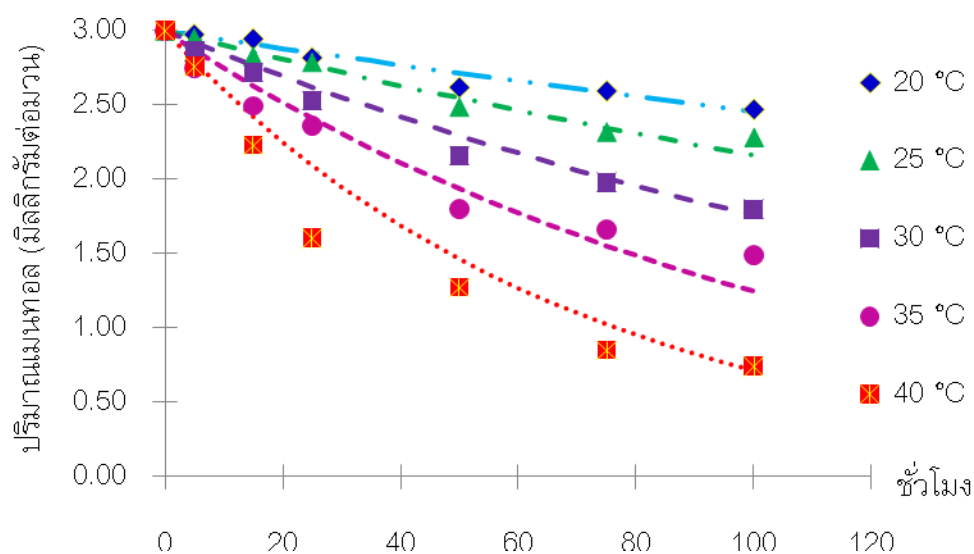
T คืออุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน

เมื่อวาดกราฟเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองกับผลที่ได้จากการคำนวณจากสมการ 88 และ 89 ดังภาพประกอบ 37 และ 38 จะเห็นได้ว่าสมการที่ 88 และ 89 จะทำนายผลได้ดีมากในช่วงอุณหภูมิ 20 ถึง 30 องศาเซลเซียส แต่มีค่าความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูงเมื่อบุหรีถูกเก็บที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ซึ่งดูได้จากค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับจากสมการ ดังแสดงในตาราง 14 ที่เป็นเช่นนี้อาจอธิบายได้ 2 ประการคือ

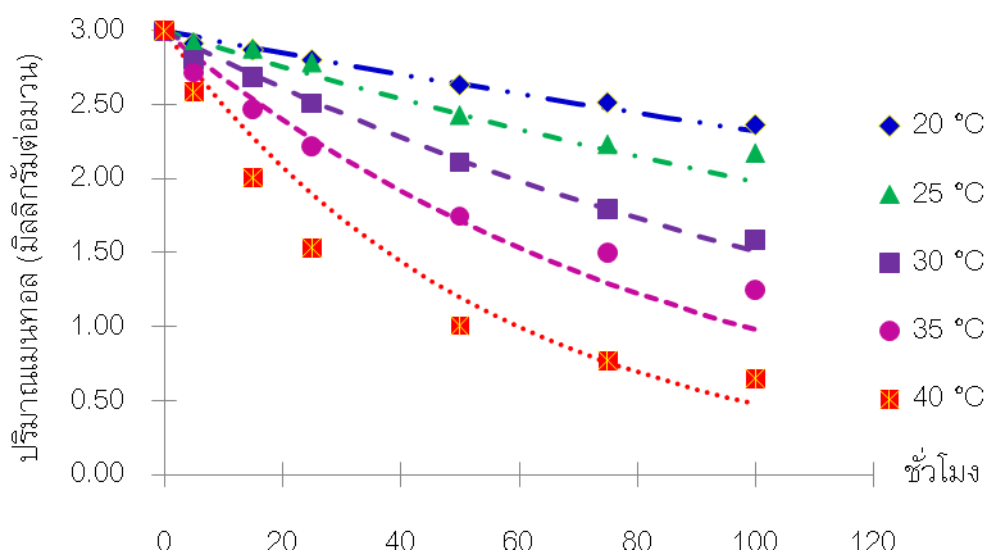
1. การที่อุณหภูมิสูงทำให้การแพร่ของเมนทอลที่ผิวหน้าบุหรีเกิดขึ้นเร็วในช่วงแรกจนทำให้ปริมาณเมนทอลที่ผิวบุหรีลดลงอย่างรวดเร็ว แต่เมนทอลที่อยู่ภายในก้นกรองแพร่ออกมาสู่ผิวหน้าช้ากว่าทำให้อัตราการแพร่ลดลงในช่วงหลัง

2. ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ใกล้จุดหลอมเหลวของเมนทอล (42 องศาเซลเซียส) จึงทำให้การแพร่ของเมนทอลในบุหรีมีการเบี่ยงเบนไปจากการแพร่ที่เกิดจากการระเหิดปกติ

จากเหตุผลข้างต้นส่งผลให้การใช้สมการที่ 88 และ 89 มีข้อจำกัดในการใช้ในช่วงอุณหภูมิสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส



ภาพประกอบ 37 อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่บรรจุในกล่องทรงสูง (A) เส้นประที่แสดงในภาพประกอบ คือเส้นที่คำนวณจากสมการ 88



ภาพประกอบ 38 อัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่บรรจุในกล่องทรงเตี้ย (B) เส้นประที่แสดงในภาพประกอบ คือเส้นที่คำนวณจากสมการ 89

ตาราง 14 แสดงค่าความคลาดเคลื่อนในรูปของ Sum of the square deviation ระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับที่ได้จากการคำนวณตามสมการ 88 และ 89

Sum of the square deviation	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	20	25	30	35	40
บรรจุบูห์ในกล่องทรงสูง (A)	0.012	0.020	0.039	0.123	0.346
บรรจุบูห์ในกล่องทรงเตี้ย (B)	0.006	0.051	0.016	0.138	0.297

4.3 การนำสมการมาใช้ในการควบคุมกระบวนการผลิต

ปัจจุบันการผลิตบูห์รสเมนทอลกระทำในห้องที่มีอุณหภูมิประมาณ 25 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องปรับอากาศ และมีความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 60 ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการควบคุมคุณภาพของบูห์รสเมนทอลกำหนดให้บูห์ต้องมีปริมาณเมนทอลอยู่ในมาตรฐานของแต่ละยี่ห้อแล้วแต่สูตรในการผลิต เช่นยี่ห้อที่กำหนดมาตรฐานปริมาณเมนทอล 3.00 ± 0.2 มิลลิกรัมต่อมวน ถ้าก่อนการบรรจุของบูห์มีปริมาณเมนทอลเฉลี่ย 3.00 มิลลิกรัมต่อมวน ดังนั้นเราสามารถนำสมการ 88 และ 89 กำหนดมาตรฐานของเวลาที่ใช้ในการบรรจุของในกระบวนการผลิตได้

4.3.1 แนวทางการกำหนดมาตรฐานของเวลาที่ใช้ในการบรรจุของ

ปัจจุบันกระบวนการผลิตแยกเครื่องเป็น 2 แบบคือ เครื่องบรรจุแบบต่อเนื่องซึ่งเป็นเครื่องรุ่นใหม่ที่ทำกรรมแล้วส่งต่อไปห่อซองภายในเครื่องเดียวกัน และเครื่องบรรจุที่แยกจากเครื่องมวนซึ่งต้องทำการมวนก่อนแล้วใส่ถาดวางในรถเข็นเพื่อส่งต่อมาเข้าเครื่องห่อซองอีกทีหนึ่ง ดังนั้นอัตราการแพร่ของทั้ง 2 กรณีนี้จึงแตกต่างกัน วิธีการคำนวณจะใช้สมการที่ต่างกันด้วยซึ่งก็ขึ้นกับกระบวนการผลิต จากข้อกำหนดตามมาตรฐานของบูห์

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อ } m_{A,A}, m_{A,B} &= 2.8 \text{ มิลลิกรัมต่อมวน} \\
 m_{A,0} &= 3.0 \text{ มิลลิกรัมต่อมวน} \\
 T &= 298 \text{ เคลวิน}
 \end{aligned}$$

สามารถคำนวณข้อจำกัดของเวลาได้ 2 กรณีดังนี้

4.3.1.1 กรณีที่บูห์ค้างในเครื่องบรรจุบูห์ ซึ่งจะอยู่ภายในตัวเครื่องดังนั้นจึงไม่มีผลจากลมพัดผ่านผิวหน้าบูห์เข้ามาเกี่ยวข้อง การคำนวณเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานของเวลาที่ใช้ในการบรรจุของกรณีนี้จะใช้สมการ 88

$$m_{A,A} = m_{A,0} e^{-t(5.67*10^{-16} e^{0.0986T})} \quad (88)$$

แทนค่าในสมการ 88 จะได้

$$2.8 = 3e^{-t(5.67*10^{-16} e^{0.0986*298})}$$

$$t = 21 \quad \text{ชั่วโมง}$$

4.3.1.2 กรณีที่บูห์รวางอยู่นอกเครื่องบรรจุบูห์รี ซึ่งมีความเร็วลมเข้ามาเกี่ยวข้อง แต่เนื่องจากความเร็วลมที่ใช้ในการทดลองนี้คือ 24 เซนติเมตรต่อวินาที เป็นความเร็วลมตามปกติภายในอาคารที่มีการควบคุมอุณหภูมิซึ่งจะมีความเร็วลมอยู่ในช่วง 10 ถึง 50 เซนติเมตรต่อวินาที (Rostami; & Hajaligol Mohammad. 2003: 263-280) ดังนั้นการคำนวณเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานของเวลาที่ใช้ในการบรรจุของในกรณีที่บูห์รวางอยู่นอกเครื่องบรรจุสามารถใช้สมการ 89 คำนวณได้ดังนี้

$$m_{A,B} = m_{A,0} e^{-t(7.7112*10^{-16} e^{0.0984T})} \quad (89)$$

แทนค่าในสมการ 89 จะได้

$$2.8 = 3e^{-t(7.7112*10^{-16} e^{0.0984*298})}$$

$$t = 16 \quad \text{ชั่วโมง}$$

จากการคำนวณพบว่าถ้าสภาวะในกระบวนการผลิตมีอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเครื่องบรรจุแบบต่อเนื่องเสียจะต้องแก้ไขและทำการห่อซองบูห์รีให้เสร็จภายใน 21 ชั่วโมง ในขณะที่

ที่ถ้าเครื่องแบบไม่ต่อเนื่องเสียต้องรีบนำบุหรีไปห่อซองให้เสร็จภายใน 16 ชั่วโมง จึงจะทำให้ปริมาณเมนทอลในบุหรีไม่ต่ำกว่ามาตรฐานที่กำหนด

4.3.2 ในกรณีที่เครื่องปรับอากาศขัดข้อง

บางครั้งที่เครื่องปรับอากาศเกิดขัดข้องระหว่างการผลิตจนทำให้อุณหภูมิสูงถึง 30 องศาเซลเซียส ก็ยังสามารถใช้สมการที่ 88 และ 89 คำนวณเพื่อเป็นแนวทางในการกำหนดมาตรฐานของเวลาได้เหมือน 4.3.1 เพียงแต่เปลี่ยนอุณหภูมิเป็น 303 เคลวิน ก็จะได้มาตรฐานของเวลาในการผลิต ในกรณีที่บุหรีค้างในเครื่องบรรจุและบุหรีวางนอกเครื่องบรรจุ 13 และ 10 ชั่วโมงตามลำดับ

4.3.3 ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่เปลี่ยนแปลงภายในห้องบรรจุ

จากการทดลองพบว่าความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศไม่มีผลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่ออัตราการระเหิดของเมนทอล ดังนั้นในกรณีที่ความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศในห้องบรรจุเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาลหรืออุณหภูมิ ก็ยังสามารถควบคุมเวลาในการบรรจุได้เหมือนเดิม แต่ก็ควรระวังแม้ว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่ออัตราการระเหิดของเมนทอล แต่อาจจะมีผลต่อความชื้นของยาเส้นและวัสดุอื่น ๆ ในบุหรี

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาอัตราการหายไปของปริมาณเมณฑอลที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 50, 60 และ 70 เปอร์เซ็นต์ พบว่าความชื้นสัมพัทธ์ไม่มีผลต่อการแพร่ของเมณฑอลในอากาศ แต่อุณหภูมิมีผลต่อการแพร่โดยการแพร่จะสูงที่อุณหภูมิสูง ซึ่งเป็นไปตามการศึกษาของโกลด์สไตน์ และโคช (Goldstein; & Cho. 1995: 416-434) ที่พบว่าการแพร่ของเนพทาไลน์ไม่ขึ้นกับความชื้นสัมพัทธ์แต่ขึ้นกับอุณหภูมิและความดัน และจากการทดลองสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่อุณหภูมิ 25, 30 และ 35 องศาเซลเซียส ได้ 0.083, 0.090 และ 0.094 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลองกับค่าที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการเอมพิริคัล พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับสมการของ Slattery ในกรณีที่ใช้ค่าตัวแปร a และ b สำหรับใช้กับส่วนผสมของน้ำกับก๊าซที่ไม่มีขั้ว ซึ่งก็ใกล้เคียงกับการทดลองของเมณฑอลซึ่งมีขั้วเหมือนน้ำ และอากาศซึ่งไม่มีขั้ว

เนื่องจากอัตราการหายไปของเมณฑอลมีผลจากอุณหภูมิและความดัน ทำให้ได้สมการในการทำนายค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมณฑอลในอากาศ ดังนี้

$$D_{AB} = 0.08315 \left[\frac{T}{298.16} \right]^{3.7756} \left[\frac{1}{P} \right] \quad (77)$$

เมื่อคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมณฑอลจากสมการที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ได้ค่า 0.078, 0.084, 0.089, 0.095 และ 0.101 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที ตามลำดับซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลอง

สำหรับการศึกษาการแพร่ของเมณฑอลในบุหรีที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ที่ 2 สภาวะคือใส่ในกล่องพลาสติกทรงสูง และกล่องพลาสติกทรงเตี้ย พบว่าที่อุณหภูมิต่ำอัตราการหายไปของเมณฑอลน้อยกว่าที่อุณหภูมิสูง ซึ่งก็เป็นไปตามทฤษฎีเกี่ยวกับการแพร่ที่อุณหภูมิสูงการแพร่ต้องดีกว่าที่อุณหภูมิต่ำ และที่บรรจุในกล่องพลาสติกทรงสูงอัตราการหายไปของเมณฑอลน้อยกว่าที่บรรจุในกล่องทรงเตี้ย เนื่องจากกล่องทรงเตี้ยมีลมพัดผ่านผิวหน้าบุหรีด้วยความเร็ว 240 มิลลิเมตรต่อวินาที ทำให้เมณฑอลมีการแพร่จากบุหรีขึ้นมาสู่ผิวหน้าได้เร็วขึ้น และเมื่อเมณฑอลแพร่ผ่านกระดาษพันกันกรองการแพร่จะเกิดเร็วขึ้น เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 100 ชั่วโมง อัตราการหายไปมีแนวโน้มเข้าใกล้สู่สมดุล ซึ่งอาจเกิดจากปริมาณเมณฑอลบริเวณ

ผิวหน้าของบุหรีมีปริมาณลดลง การแพร่ของเมนทอลจึงขึ้นอยู่กับอัตราการแพร่ของเมนทอลจากเส้นด้ายที่ชุบเมนทอลภายในบุหรีผ่านเส้นใยกันกรองสู่ผิวกันกรองซึ่งจะต้องขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอลผ่านเส้นใยกันกรอง ดังนั้นทำให้การแพร่ช่วงหลังเริ่มเข้าสู่สมดุล หรืออาจเกิดจากการที่อุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงอุณหภูมิของเมนทอล (42 องศาเซลเซียส) ทำให้การแพร่ของเมนทอลในบุหรีมีการเบี่ยงเบนไปจากการแพร่ที่เกิดจากการระเหิดปกติ

จากข้อมูลที่ได้สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของเมนทอลได้ในช่วง 0.0419 ถึง 0.0887 เซนติเมตรต่อวินาที และสามารถหาความสัมพันธ์ในรูปสมการของอัตราการแพร่ของเมนทอลในบุหรีทั้งในกรณีที่ไม่มีลมพัดผ่านและมีลมพัดผ่านได้ดังนี้

สภาวะที่ไม่มีลมพัดผ่าน (Natural Convection)

$$m_{A,A} = m_{A,0} e^{-t(5.67 \cdot 10^{-16} e^{0.0986T})} \quad (88)$$

สภาวะที่มีลมพัดผ่าน (Forced Convection)

$$m_{A,B} = m_{A,0} e^{-t(7.7112 \cdot 10^{-16} e^{0.0984T})} \quad (89)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลที่คำนวณได้จากสมการ พบว่าที่อุณหภูมิต่ำสามารถทำนายอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรีได้ดีกว่าที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงมีผลของการแพร่ของเมนทอลผ่านกันกรองที่ไม่ได้นำตัวแปรเหล่านี้มาใช้ในสมการ

ผลการทดลองที่ได้นำไปใช้กับการควบคุมอุณหภูมิในการผลิตโดยอุณหภูมิที่เหมาะสมไม่ควรเกิน 25 องศาเซลเซียส และต้องบรรจุบุหรีใส่ซองภายใน 16 ชั่วโมงซึ่งจะทำให้เมนทอลหายไปน้อยกว่า 0.20 มิลลิกรัมต่อมวน เพื่อป้องกันการสูญเสียเมนทอลไปในปริมาณไม่เกิน 7 เปอร์เซ็นต์ และที่อุณหภูมินี้ความเร็วลมภายในห้องผลิตมีผลน้อยมากต่อการถ่ายเทมวลของเมนทอลในบุหรีสำหรับผู้บริโภคควรเปิดซองแล้วปิดให้สนิทเก็บในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 25 องศาเซลเซียส จะทำให้รสชาติและความเย็นของเมนทอลคงสภาพเดิมได้นานที่สุด

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลในข้อ 4.3 ควรจะมีการทดสอบกับการผลิตจริง โดยเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามสมการ 88 และ 89

5.2.2 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการวางแผนควบคุมระบบสถานะที่ใช้ในการผลิต

5.2.3 แม้ว่าความชื้นสัมพัทธ์จะไม่มีผลต่อการระเหิดของเมนทอลแต่อาจมีผลต่อยาเส้นและวัสดุอื่น ๆ ที่ใช้ในการผลิต ดังนั้นจึงควรทำการทดลองเพื่อหาความสำคัญของความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่มีผลต่อกระบวนการผลิตและนำไปใช้ในการวางแผนระบบควบคุมคุณภาพในการผลิตให้ดียิ่งขึ้น

5.2.4 เพื่อให้สามารถใช้สมการทำนายอัตราการแพร่ของเมนทอลในบุหรีที่มีหลากหลายชนิดได้ดียิ่งขึ้น ควรศึกษาในบุหรีกรณีอื่น ๆ อีก เนื่องจากบุหรีมีการเติมเมนทอลหลายแบบ วัสดุที่ใช้ในการผลิตบุหรีก็แตกต่างกัน ทำให้การแพร่ในแต่ละแบบแตกต่างกันด้วย ดังนั้นจึงยังมีตัวแปรอีกมากที่มีผลต่อการแพร่ของเมนทอลในบุหรี

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- Air Property Calculator.** (2007) Retrieved January 15, 2007, from
URL:http://users.wpi.edu/~ierardi/FireTools/air_prop.html
- Baek, Shin; et al. (2005). **Comparison of Menthol from Filler to Filter and Mainstream Smoke with Leaf Tobaccos.** Coresta Meet. Smoke Science/Product Technology Groups, Stratford-upon-Avon, abstr. SSPT 52.
- Bird, R. B.; Stewart, W. E.; & Lightfoot, E. N. (2002). **Principle of Mass Transfer.**, 2nd ed. John Wiley & Sons. : 513-542.
- Borschke, A. J. (1993). **Review of Technologies Relating to Menthol Use in Cigarettes.** In : 47th Tobacco Chemists' Research Conference , p. 47-70. North Carolina
- Curran, J. G. (1972). **Delivery of Menthol from Cigarettes Containing Either a Mentholated Filter or Mentholated Tobacco.** Tobacco Science. 16: 40-42.
- Curran, J. G. (1975). **Effect of Certain Liquid Filter Additives on Menthol Delivery.** Tobacco Science. 19: 69-70.
- Density of Air :** Importance of Temperature. (2007). Retrieved January 15, 2007, from
URL:<http://en.wikipedia.org/wiki/Density-of-air>
- Goldstein, R. J.; & Cho, H. H. (1995). **A Review of Mass Transfer Measurements Using Naphthalene Sublimation.** Experimental Thermal and Fluid Science. 10(4): 416-434.
- Helena, Sovova; Roumiana, P. Stateva; & Anatolii, A. Galushko (2006). **High-Pressure Equilibrium of Menthol + CO₂.** Journal of Supercritical Fluids. 1-9.
- Mathis, D. E. (1983). **Migration and Delivery of Filter Flavors.** Beitrage Zur Tabak. 12(1): 1-8.
- Menthol** (2007). Retrieved January 15, 2007, from
URL:<http://en.wikipedia.org/wiki/Menthol>
- Miyauchi M.; & Nakanishi Y. (2006). **Estimation Method for the Amount of Menthol Escaping from a Pack of Cigarettes.** Coresta Congress, Smoke Science/Product Technology Groups, Paris, abstr. PT 11.
- Oh, I. H.; & Jheong, G. R. (2004). **Diffusion of Moisture in a Cigarette Tobacco Column at Room Condition.** Beitrage Zur Tabak. 21(1): 15-25.
- Riehl, T. F.; Shockley, L. L.; & Reynolds, M. L. (1973). **Menthol Distribution and Transfer.** Tobacco Science. 17: 10-11.

- Rostami, Ali A.; & Hajaligol Mohammad R. (2003). **Modeling the Diffusion of Carbon Monoxide and Other Gases from the Paper Wrapper of a Cigarette During Puffing**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 66: 263-280.
- Treybal, R. E. (1980). **Mass Transfer Operations**., 3rd ed. Ny , McGraw-Hill. :21-87.
- Welty, J. R.; Wicks, C. E.; & Wilson, R. E. (1984). **Fundamentals of Momentum , Heat ,and Mass Transfer**., 3rd ed. John Wiley & Sons. : 431-456.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ผลการทดลองและการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอล

ตาราง ก-1 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมนทอลที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมนทอล (กรัม) เมื่อชั่งในชั่วโมงที่						
	4	8	15	24	48	72	96
1	0.00035	0.00034	0.00032	0.00075	0.00129	0.00206	0.00260
2	0.00022	0.00025	0.00032	0.00076	0.00120	0.00188	0.00246
3	0.00018	0.00019	0.00028	0.00088	0.00139	0.00209	0.00260
4	0.00020	0.00026	0.00028	0.00088	0.00133	0.00207	0.00260
5	0.00016	0.00022	0.00030	0.00097	0.00160	0.00233	0.00305
6	0.00015	0.00022	0.00030	0.00080	0.00124	0.00197	0.00255
7	0.00027	0.00033	0.00032	0.00083	0.00149	0.00216	0.00264
8	0.00004	0.00014	0.00032	0.00080	0.00130	0.00186	0.00250
9	0.00010	0.00015	0.00032	0.00074	0.00125	0.00186	0.00241
10	0.00007	0.00014	0.00028	0.00081	0.00121	0.00196	0.00259
11	0.00009	0.00012	0.00028	0.00091	0.00134	0.00209	0.00258
12	0.00005	0.00009	0.00030	0.00083	0.00126	0.00191	0.00252
13	0.00001	0.00006	0.00030	0.00083	0.00136	0.00195	0.00262
14	0.00005	0.00005	0.00032	0.00078	0.00123	0.00193	0.00250
ค่าเฉลี่ย	0.00014	0.00018	0.00030	0.00083	0.00132	0.00201	0.00259
SD.	0.00010	0.00009	0.00002	0.00006	0.00011	0.00013	0.00015

ตาราง ก-2 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมนทอลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 50 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมนทอล (กรัม) เมื่อชั่งในชั่วโมงที่					
	4	7	24	48	72	96
1	0.00041	0.00064	0.00104	0.00204	0.00318	0.00420
2	0.00043	0.00062	0.00098	0.00186	0.00303	0.00399
3	0.00038	0.00057	0.00110	0.00220	0.00333	0.00438
4	0.00035	0.00057	0.00096	0.00210	0.00312	0.00415
5	0.00034	0.00055	0.00105	0.00209	0.00320	0.00420
6	0.00034	0.00057	0.00103	0.00209	0.00327	0.00422
7	0.00032	0.00057	0.00104	0.00216	0.00323	0.00426
8	0.00033	0.00059	0.00115	0.00229	0.00357	0.00468
9	0.00036	0.00063	0.00106	0.00225	0.00330	0.00434
10	0.00035	0.00064	0.00115	0.00249	0.00370	0.00489
11	0.00031	0.00051	0.00118	0.00223	0.00334	0.00452
12	0.00028	0.00052	0.00113	0.00217	0.00343	0.00457
13	0.00022	0.00049	0.00105	0.00207	0.00332	0.00449
14	0.00022	0.00046	0.00108	0.00227	0.00337	0.00462
ค่าเฉลี่ย	0.00033	0.00057	0.00107	0.00217	0.00331	0.00439
SD.	0.00006	0.00006	0.00006	0.00015	0.00017	0.00025

ตาราง ก-3 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมทิลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมทิล (กรัม) เมื่อชั่งในชั่วโมงที่						
	4	8	15	24	48	72	96
1	0.00044	0.00047	0.00068	0.00112	0.00209	0.00310	0.00411
2	0.00039	0.00046	0.00070	0.00110	0.00208	0.00306	0.00410
3	0.00054	0.00063	0.00075	0.00144	0.00246	0.00368	0.00460
4	0.00042	0.00049	0.00062	0.00158	0.00255	0.00364	0.00473
5	0.00043	0.00049	0.00075	0.00121	0.00228	0.00350	0.00451
6	0.00042	0.00053	0.00064	0.00131	0.00244	0.00373	0.00491
7	0.00036	0.00046	0.00072	0.00113	0.00219	0.00317	0.00418
8	0.00042	0.00050	0.00068	0.00109	0.00241	0.00357	0.00503
9	0.00035	0.00047	0.00070	0.00127	0.00247	0.00350	0.00479
10	0.00030	0.00044	0.00075	0.00115	0.00240	0.00348	0.00495
11	0.00017	0.00029	0.00062	0.00124	0.00268	0.00375	0.00494
12	0.00021	0.00032	0.00075	0.00102	0.00230	0.00322	0.00429
13	0.00026	0.00039	0.00064	0.00109	0.00217	0.00344	0.00489
14	0.00036	0.00048	0.00072	0.00129	0.00240	0.00351	0.00463
ค่าเฉลี่ย	0.00036	0.00046	0.00069	0.00122	0.00235	0.00345	0.00462
SD.	0.00010	0.00008	0.00005	0.00015	0.00017	0.00023	0.00033

ตาราง ก-4 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมทอลที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมทอล (กรัม) เมื่อชั่งในชั่วโมงที่						
	4	8	15	24	48	72	96
1	0.00040	0.00037	0.00075	0.00106	0.00223	0.00317	0.00425
2	0.00032	0.00038	0.00077	0.00123	0.00224	0.00331	0.00442
3	0.00039	0.00042	0.00085	0.00112	0.00228	0.00340	0.00459
4	0.00029	0.00038	0.00077	0.00107	0.00212	0.00343	0.00447
5	0.00033	0.00041	0.00083	0.00118	0.00232	0.00329	0.00455
6	0.00030	0.00048	0.00096	0.00109	0.00232	0.00352	0.00472
7	0.00027	0.00038	0.00077	0.00107	0.00228	0.00341	0.00443
8	0.00035	0.00041	0.00083	0.00124	0.00233	0.00335	0.00441
9	0.00025	0.00038	0.00077	0.00114	0.00224	0.00332	0.00436
10	0.00040	0.00040	0.00079	0.00112	0.00231	0.00332	0.00454
11	0.00033	0.00039	0.00079	0.00117	0.00227	0.00332	0.00449
12	0.00037	0.00040	0.00081	0.00121	0.00207	0.00305	0.00425
13	0.00033	0.00039	0.00078	0.00107	0.00221	0.00325	0.00447
14	0.00028	0.00038	0.00076	0.00117	0.00215	0.00298	0.00407
ค่าเฉลี่ย	0.00033	0.00040	0.00080	0.00114	0.00224	0.00329	0.00443
SD.	0.00005	0.00003	0.00005	0.00006	0.00008	0.00015	0.00016

ตาราง ก-5 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมทอลที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

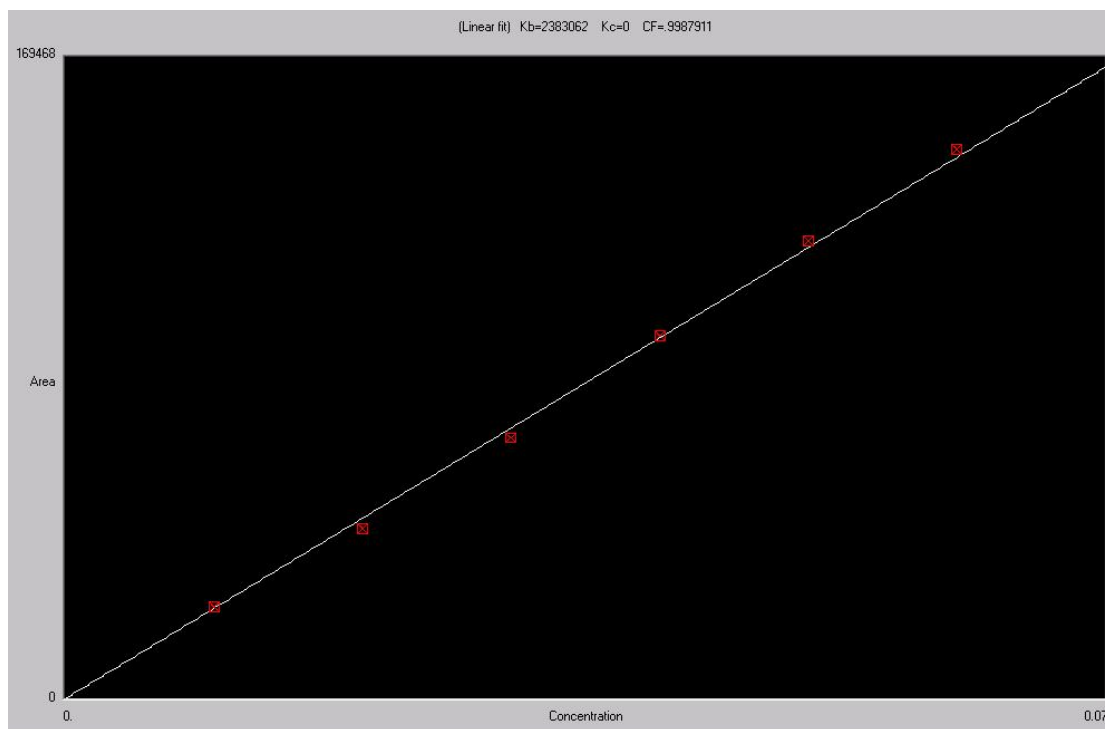
ครั้งที่	น้ำหนักเมทอล (กรัม) เมื่อชั่งในชั่วโมงที่						
	4	8	15	24	48	72	96
1	0.00059	0.00076	0.00132	0.00206	0.00364	0.00518	0.00682
2	0.00060	0.00079	0.00156	0.00196	0.00368	0.00542	0.00715
3	0.00066	0.00083	0.00149	0.00183	0.00354	0.00533	0.00708
4	0.00055	0.00079	0.00147	0.00189	0.00362	0.00532	0.00706
5	0.00051	0.00066	0.00132	0.00180	0.00342	0.00507	0.00684
6	0.00058	0.00074	0.00120	0.00194	0.00366	0.00540	0.00706
7	0.00050	0.00062	0.00123	0.00187	0.00359	0.00524	0.00687
8	0.00055	0.00075	0.00132	0.00192	0.00380	0.00549	0.00733
9	0.00054	0.00069	0.00156	0.00178	0.00351	0.00522	0.00687
10	0.00055	0.00062	0.00149	0.00179	0.00376	0.00556	0.00760
11	0.00048	0.00070	0.00147	0.00192	0.00380	0.00558	0.00733
12	0.00046	0.00062	0.00132	0.00175	0.00344	0.00525	0.00724
13	0.00042	0.00062	0.00120	0.00197	0.00373	0.00545	0.00744
14	0.00046	0.00059	0.00123	0.00193	0.00374	0.00537	0.00735
ค่าเฉลี่ย	0.00053	0.00070	0.00137	0.00189	0.00364	0.00535	0.00715
SD.	0.00006	0.00008	0.00013	0.00009	0.00013	0.00015	0.00025

ตาราง ก-6 ความเข้มข้นของเมฆทอลในอากาศที่เวลาต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 60 เปอร์เซ็นต์

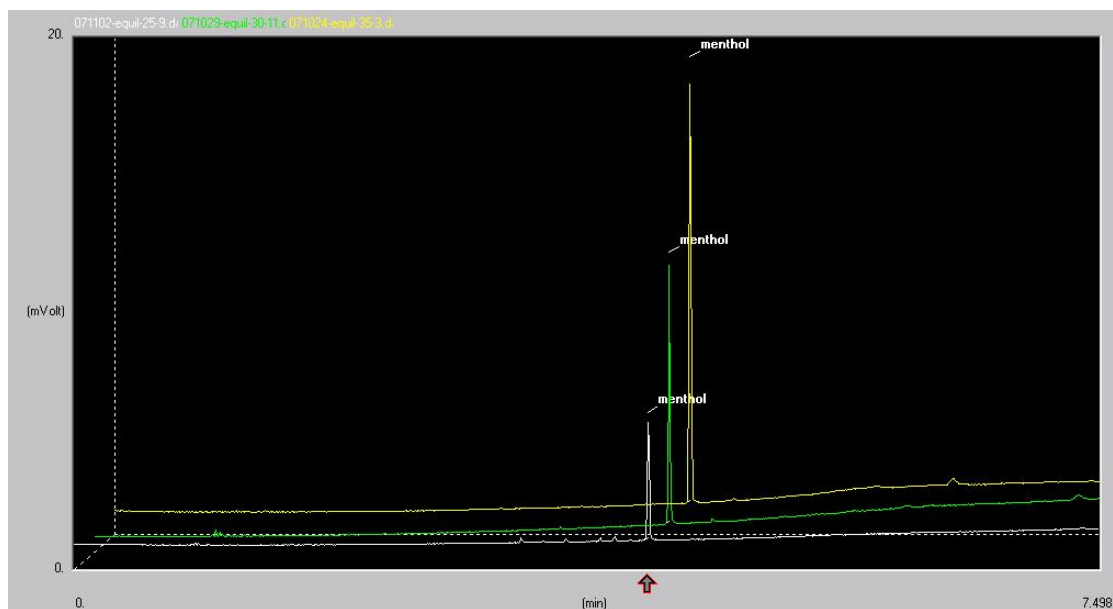
ครั้งที่	ปริมาณเมฆทอลในอากาศ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ที่เวลา (วัน)				
	1	2	3	4	7
1	3.60E-04	4.40E-04	4.58E-04	3.80E-04	4.00E-04
2	4.58E-04	4.60E-04	4.08E-04	4.60E-04	3.40E-04
3	3.40E-04	4.20E-04	4.22E-04	5.40E-04	4.40E-04
4	-	-	4.38E-04	-	-
5	-	-	4.44E-04	-	-
ค่าเฉลี่ย	3.86E-04	4.40E-04	4.34E-04	4.60E-04	3.93E-04
SD	6.32E-05	1.94E-05	1.97E-05	8.00E-05	5.03E-05

ตาราง ก-7 ความเข้มข้นของเมฆทอลในอากาศที่จุดสมดุลงที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความชื้นสัมพัทธ์คงที่
60 เปอร์เซ็นต์

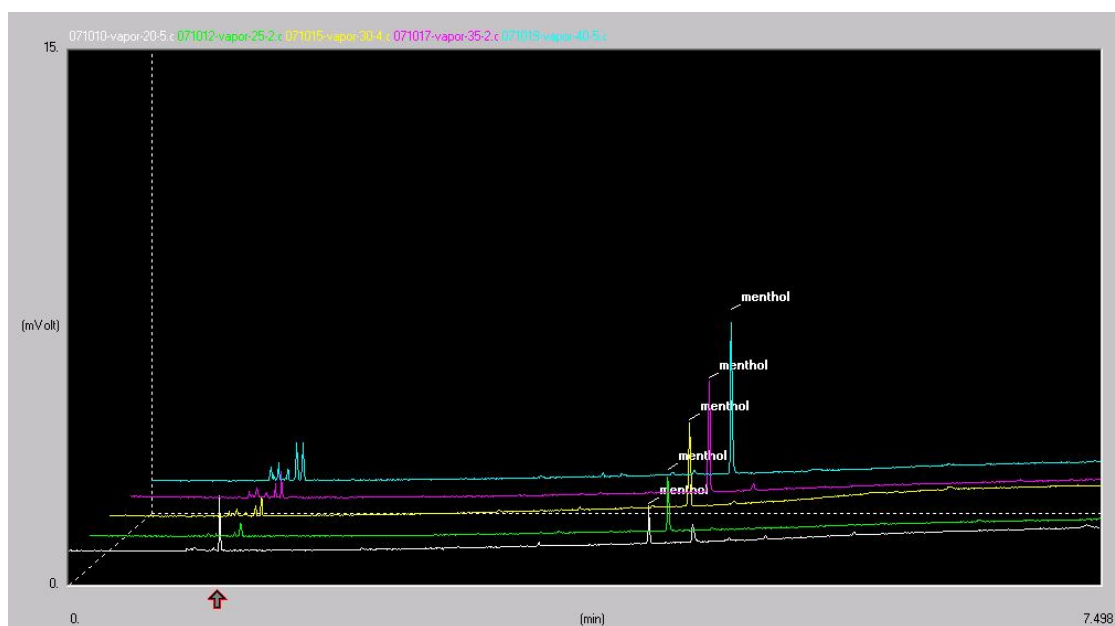
ครั้งที่	ปริมาณเมฆทอลในอากาศ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		
	25	30	35
1	2.36E-04	4.58E-04	6.70E-04
2	2.40E-04	4.08E-04	6.72E-04
3	2.55E-04	4.22E-04	6.25E-04
4	2.21E-04	4.38E-04	6.62E-04
5	2.78E-04	4.44E-04	6.45E-04
ค่าเฉลี่ย	2.46E-04	4.34E-04	6.55E-04
SD	2.16E-05	1.97E-05	1.97E-05



ภาพประกอบ ก-1 Calibration Curve ของสารละลายมาตรฐานเมนทอลสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณ
ความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศ



ภาพประกอบ ก-2 พีกเมนทอลในอากาศที่จุดสมดุล อุณหภูมิ 20, 25 และ 30 องศาเซลเซียส
ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์RH



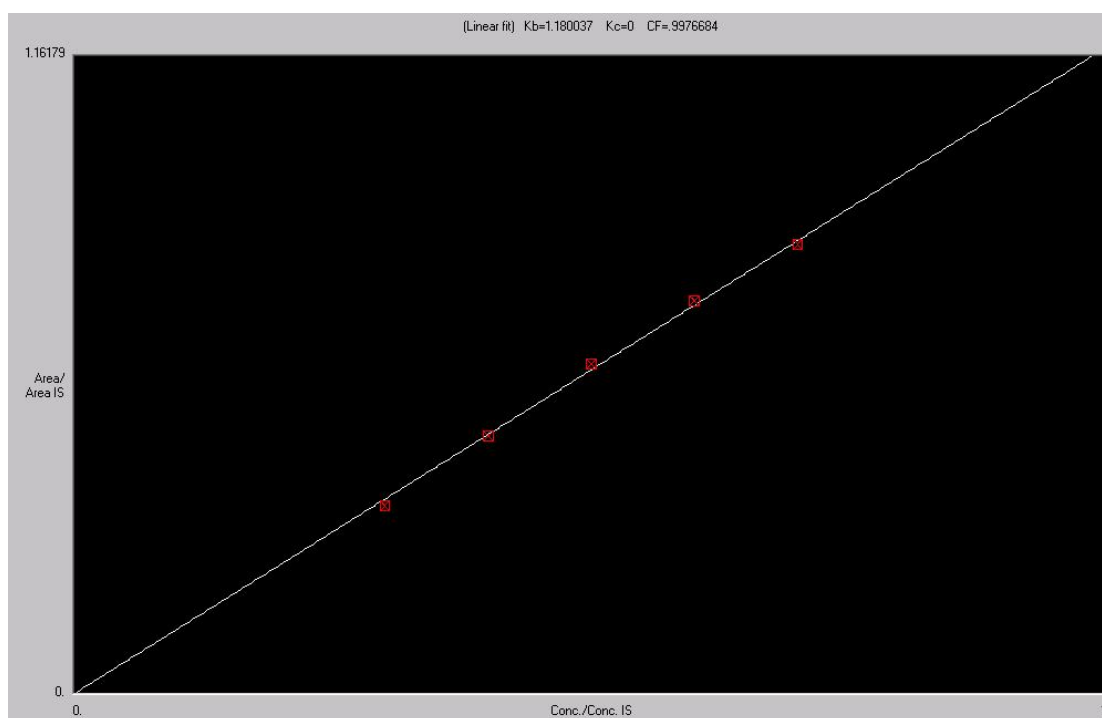
ภาพประกอบ ก-3 พิคเมนทอลในอากาศที่ผิวบุหรีที่จุดสมดุล อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35 และ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 70 เปอร์เซ็นต์RH

ตาราง ก-8 ความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่ผิวบุหรีที่เวลาต่าง ๆ เมื่ออุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 70 เปอร์เซ็นต์

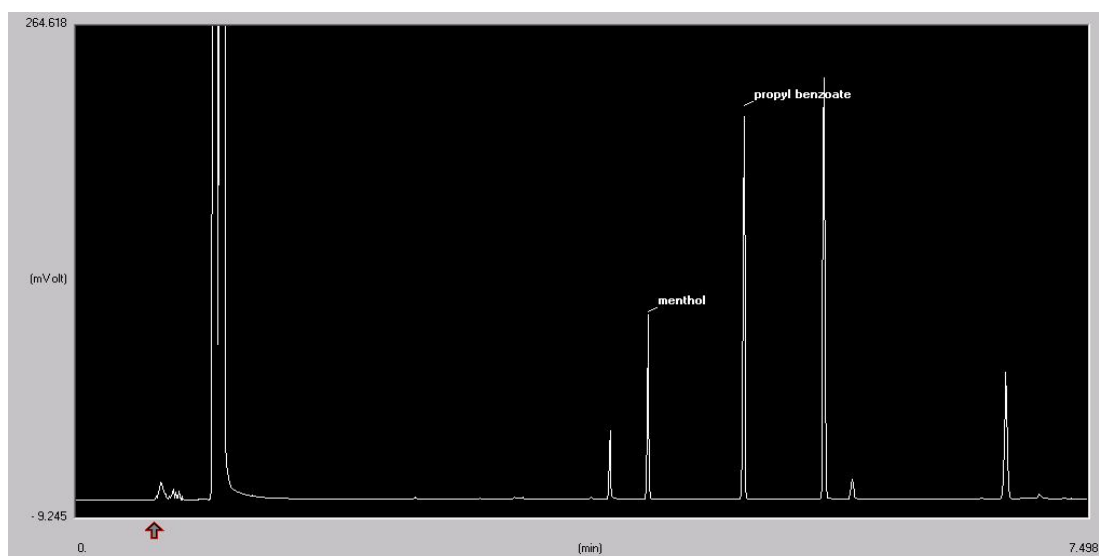
ครั้งที่	ปริมาณเมนทอลในอากาศ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ที่เวลา (วัน)				
	1	2	3	4	7
1	5.60E-05	6.20E-05	6.19E-05	6.00E-05	6.35E-05
2	5.47E-05	6.40E-05	6.15E-05	6.15E-05	6.40E-05
3	5.40E-05	5.90E-05	6.31E-05	6.30E-05	6.10E-05
4	-	-	6.37E-05	-	-
5	-	-	6.40E-05	-	-
ค่าเฉลี่ย	5.49E-05	6.17E-05	6.28E-05	6.15E-05	6.28E-05
SD.	1.01E-06	2.52E-06	1.07E-06	1.50E-06	1.61E-06

ตาราง ก-9 ความเข้มข้นของเมทอลในอากาศที่ผิวบุหรีที่จุดสมดุลที่อุณหภูมิต่าง ๆ ความชื้นสัมพัทธ์คงที่ 70 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	ปริมาณเมทอลในอากาศ (มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	20	25	30	35	40
1	2.10E-05	2.76E-05	4.47E-05	6.19E-05	9.16E-05
2	2.45E-05	2.86E-05	4.42E-05	6.15E-05	9.32E-05
3	2.60E-05	3.19E-05	4.52E-05	6.31E-05	9.00E-05
4	2.07E-05	3.75E-05	4.50E-05	6.37E-05	8.85E-05
5	2.27E-05	3.43E-05	4.51E-05	6.40E-05	8.92E-05
ค่าเฉลี่ย	2.30E-05	3.20E-05	4.48E-05	6.28E-05	9.05E-05
SD.	2.29E-06	4.06E-06	3.99E-07	1.07E-06	1.89E-06



ภาพประกอบ ก-4 Calibration Curve ของสารละลายมาตรฐานเมทอลสำหรับวิเคราะห์หาปริมาณความเข้มข้นของเมทอลในบุหรี



ภาพประกอบ ก-5 พิคเมนทอลในบุหรี่

ตาราง ก-10 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่บรรจุในกล่องทรงสูงที่เวลาต่าง ๆ
อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมนทอล (มิลลิกรัมต่อมาน) เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.97	3.00	2.80	2.67	2.52	2.39
2(1)	3.02	2.92	2.90	2.69	2.55	2.51
3(1)	3.02	3.03	2.80	2.62	2.65	2.49
4(1)	2.94	2.95	2.78	2.61	2.57	2.48
5(1)	2.92	2.82	2.80	2.49	2.66	2.46
1(2)	2.97	3.00	2.80	2.67	2.52	2.39
2(2)	3.02	2.92	2.90	2.69	2.55	2.51
3(2)	3.02	3.03	2.80	2.62	2.65	2.49
4(2)	2.94	2.95	2.78	2.61	2.57	2.48
5(2)	2.92	2.82	2.80	2.49	2.66	2.46
ค่าเฉลี่ย	2.97	2.94	2.82	2.62	2.59	2.47
SD.	0.04	0.07	0.04	0.07	0.06	0.04

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-11 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่บรรจุในกล่องทรงสูงที่เวลาต่าง ๆ
อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมนทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.98	2.79	2.71	2.47	2.21	2.26
2(1)	2.95	2.86	2.72	2.44	2.34	2.28
3(1)	2.92	2.91	2.86	2.54	2.32	2.32
4(1)	2.97	2.83	2.83	2.49	2.30	2.30
5(1)	2.92	2.75	2.82	2.49	2.42	2.24
1(2)	2.98	2.79	2.71	2.47	2.21	2.26
2(2)	2.95	2.86	2.72	2.45	2.34	2.28
3(2)	2.92	2.91	2.86	2.54	2.32	2.32
4(2)	2.97	2.83	2.83	2.49	2.30	2.30
5(2)	2.92	2.75	2.82	2.50	2.42	2.24
ค่าเฉลี่ย	2.95	2.83	2.79	2.49	2.32	2.28
SD.	0.03	0.06	0.06	0.03	0.07	0.03

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-12 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่บรรจุในกล่องทรงสูงที่เวลาต่าง ๆ
อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมนทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.97	2.59	2.68	2.11	1.97	1.77
2(1)	2.95	2.79	2.53	2.20	1.96	1.75
3(1)	3.08	2.75	2.26	2.20	1.88	1.83
4(1)	2.91	2.76	2.62	2.20	2.02	1.67
5(1)	3.00	2.70	2.57	2.06	2.04	1.93
1(2)	2.77	2.59	2.60	2.11	1.97	1.77
2(2)	2.74	2.79	2.53	2.20	1.96	1.76
3(2)	2.75	2.75	2.26	2.20	1.88	1.84
4(2)	2.69	2.76	2.62	2.20	2.02	1.67
5(2)	2.72	2.70	2.57	2.06	2.04	1.93
ค่าเฉลี่ย	2.86	2.72	2.52	2.15	1.98	1.79
SD.	0.13	0.07	0.14	0.06	0.06	0.09

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-13 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมทอลในบุหรีที่บรรจุในกล่องทรงสูงที่เวลาต่าง ๆ
อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในชั่วโมงที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.69	2.44	2.24	1.91	1.63	1.54
2(1)	2.75	2.46	2.32	1.77	1.66	1.53
3(1)	2.80	2.55	2.41	1.72	1.73	1.47
4(1)	2.71	2.53	2.47	1.85	1.68	1.41
5(1)	2.78	2.50	2.35	1.78	1.60	1.43
1(2)	2.69	2.44	2.24	1.86	1.63	1.56
2(2)	2.75	2.46	2.32	1.78	1.66	1.55
3(2)	2.80	2.55	2.41	1.72	1.73	1.49
4(2)	2.71	2.54	2.48	1.85	1.68	1.43
5(2)	2.78	2.51	2.35	1.79	1.60	1.46
ค่าเฉลี่ย	2.75	2.50	2.36	1.80	1.66	1.49
SD.	0.04	0.04	0.08	0.06	0.05	0.05

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-14 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมนทอลในบุหรี่ที่บรรจุในกล่องทรงสูงที่เวลาต่าง ๆ
อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมนทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในชั่วโมงที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.56	2.22	1.60	1.23	1.00	0.70
2(1)	2.72	2.21	1.40	1.29	0.68	0.76
3(1)	2.78	2.18	1.68	1.24	0.91	0.91
4(1)	2.88	2.20	1.94	1.36	0.86	0.66
5(1)	2.83	2.33	1.39	1.22	0.79	0.66
1(2)	2.57	2.22	1.60	1.23	0.99	0.70
2(2)	2.73	2.21	1.40	1.29	0.68	0.76
3(2)	2.79	2.19	1.68	1.24	0.91	0.92
4(2)	2.88	2.20	1.95	1.36	0.87	0.66
5(2)	2.84	2.33	1.40	1.23	0.80	0.67
ค่าเฉลี่ย	2.76	2.23	1.61	1.27	0.85	0.74
SD.	0.11	0.05	0.20	0.05	0.11	0.09

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-15 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมเนทอลในบู่ที่บรรจุในกล่องทรงเตี้ย ที่เวลาต่าง ๆ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมเนทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.89	2.90	2.82	2.54	2.64	2.45
2(1)	2.92	2.96	2.83	2.72	2.55	2.33
3(1)	2.91	2.88	2.76	2.51	2.55	2.40
4(1)	2.83	2.82	2.87	2.73	2.41	2.22
5(1)	3.02	2.81	2.73	2.69	2.42	2.42
1(2)	2.89	2.90	2.82	2.54	2.64	2.45
2(2)	2.92	2.96	2.83	2.72	2.55	2.33
3(2)	2.91	2.88	2.76	2.51	2.55	2.40
4(2)	2.83	2.82	2.87	2.73	2.41	2.22
5(2)	3.02	2.81	2.73	2.69	2.42	2.42
ค่าเฉลี่ย	2.91	2.87	2.80	2.63	2.52	2.36
SD.	0.06	0.06	0.05	0.09	0.09	0.08

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-16 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมทอลในบู่ที่บรรจุในกล่องทรงเตี้ย ที่เวลาต่าง ๆ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.85	2.90	2.88	2.47	2.16	2.17
2(1)	2.87	2.81	2.73	2.54	2.16	2.16
3(1)	3.00	2.84	2.71	2.37	2.29	2.20
4(1)	2.93	2.97	2.81	2.49	2.22	2.18
5(1)	2.96	2.87	2.78	2.29	2.31	2.14
1(2)	2.85	2.91	2.89	2.46	2.16	2.17
2(2)	2.87	2.89	2.73	2.54	2.17	2.16
3(2)	3.00	2.84	2.72	2.36	2.30	2.20
4(2)	2.93	2.97	2.81	2.48	2.22	2.18
5(2)	2.96	2.87	2.78	2.29	2.31	2.14
ค่าเฉลี่ย	2.92	2.89	2.79	2.43	2.23	2.17
SD.	0.05	0.05	0.06	0.09	0.06	0.02

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-17 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมทอลในบู่ที่บรรจุในกล่องทรงเตี้ย ที่เวลา
ต่าง ๆ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.79	2.72	2.56	2.11	1.76	1.48
2(1)	2.93	2.51	2.36	2.03	1.75	1.53
3(1)	2.97	2.86	2.60	2.26	1.92	1.72
4(1)	3.05	2.68	2.44	2.12	1.77	1.59
5(1)	3.02	2.66	2.57	2.03	1.76	1.62
1(2)	2.50	2.72	2.56	2.11	1.76	1.48
2(2)	2.85	2.51	2.36	2.03	1.75	1.53
3(2)	2.67	2.86	2.60	2.26	1.92	1.72
4(2)	2.65	2.68	2.45	2.12	1.77	1.59
5(2)	2.61	2.66	2.58	2.03	1.76	1.62
ค่าเฉลี่ย	2.80	2.69	2.51	2.11	1.79	1.59
SD.	0.18	0.11	0.09	0.09	0.06	0.08

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-18 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมทอลในบุหรีที่บรรจุในกล่องทรงเตี้ย ที่เวลาต่าง ๆ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซนต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.80	2.38	2.23	1.72	1.51	1.21
2(1)	2.64	2.41	2.26	1.64	1.57	1.23
3(1)	2.73	2.45	2.18	1.82	1.45	1.25
4(1)	2.70	2.49	2.20	1.79	1.49	1.27
5(1)	2.72	2.57	2.22	1.76	1.49	1.25
1(2)	2.81	2.39	2.23	1.72	1.51	1.18
2(2)	2.63	2.42	2.26	1.65	1.57	1.25
3(2)	2.73	2.47	2.18	1.82	1.45	1.28
4(2)	2.71	2.51	2.20	1.79	1.49	1.29
5(2)	2.72	2.58	2.22	1.76	1.49	1.27
ค่าเฉลี่ย	2.72	2.47	2.22	1.75	1.50	1.25
SD.	0.05	0.07	0.03	0.06	0.04	0.03

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ตาราง ก-19 ผลการทดลองอัตราการหายไปของเมทอลในบู่ที่บรรจุในกล่องทรงเตี้ย ที่เวลาต่าง ๆ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ 60 เปอร์เซ็นต์

ครั้งที่	น้ำหนักเมทอล (มิลลิกรัมต่อมวน) เมื่อเก็บตัวอย่างในช่วงเวลาที่					
	5	15	25	50	75	100
1(1)	2.53	1.76	1.47	1.04	0.83	0.61
2(1)	2.67	1.89	1.41	1.04	0.72	0.64
3(1)	2.48	2.03	1.63	0.96	0.77	0.60
4(1)	2.45	2.15	1.70	1.14	0.78	0.60
5(1)	2.79	2.18	1.45	0.87	0.75	0.79
1(2)	2.53	1.77	1.47	1.03	0.83	0.60
2(2)	2.67	1.89	1.41	1.04	0.72	0.64
3(2)	2.48	2.04	1.63	0.96	0.77	0.60
4(2)	2.46	2.16	1.70	1.14	0.78	0.60
5(2)	2.79	2.18	1.45	0.87	0.76	0.79
ค่าเฉลี่ย	2.58	2.01	1.53	1.01	0.77	0.65
SD.	0.13	0.16	0.11	0.09	0.04	0.07

หมายเหตุ ตัวเลขหน้าหมายถึงหมายเลขตัวอย่าง ตัวเลขในวงเล็บหมายถึงการฉีดสารครั้งที่

ภาคผนวก ข

ตัวอย่างการคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่และการพามวลของเมทอล
ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการเอ็มพริคัล

1. Hirsfelder, Bird, & Sportz (Welty; Wicks; & Wilson. 1984: 431-456)

$$D_{AB} = \frac{0.001858 T^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right]^{\frac{1}{2}}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_D} \quad (66)$$

เมื่อ M_A	= 28.964	กรัมต่อโมล
M_B	= 156.267	กรัมต่อโมล
P	= 0.996	บรรยากาศ
T	= 298	เคลวิน
$T_{c,B}$	= 657.85	เคลวิน
$P_{c,B}$	= 26.75	บรรยากาศ
σ_A	= 3.617	°A

$$\sigma_B = 2.44 \left(\frac{T_c}{P_c} \right)^{\frac{1}{3}} = 2.44 \left(\frac{657.85}{26.75} \right)^{\frac{1}{3}} = 7.096 \quad ^\circ A$$

$$\sigma_{AB} = \frac{(\sigma_A + \sigma_B)}{2} = \frac{(3.617 + 7.096)}{2} = 5.36 \quad ^\circ A$$

$$\frac{\varepsilon_A}{k} = 97 \text{ จู๊ได้จากภาคผนวกตาราง ค-2}$$

$$\frac{\varepsilon_B}{k} = 0.77T_{c,B} = 0.77(657.85) = 506.54$$

$$\frac{\varepsilon_{A,B}}{k} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_A}{k}\right) \times \left(\frac{\varepsilon_B}{k}\right)} = \sqrt{(97) \times (506.54)} = 221.66$$

$$\frac{kT}{\varepsilon_{A,B}} = \frac{298}{221.66} = 1.34$$

$$\Omega_D = 1.26 \text{ จู๊ได้จากภาคผนวกตาราง ค-1}$$

แทนค่าจะได้

$$D_{AB} = \frac{(0.001858)(298)^{3/2} \left[\frac{1}{(28.964)} + \frac{1}{(156.267)} \right]^{1/2}}{(0.996)(5.36)^2 (1.26)}$$

$$D_{AB} = \frac{(0.001858)(5144.278)(0.202)}{(0.996)(28.73)(1.26)} = \left(\frac{1.9307}{36.055} \right) = 0.054 \quad cm^2 / sec$$

2. Wilke-Lee (Treybal 1980: 21-87)

$$D_{AB} = \frac{\left(1.084 - 0.249 \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}\right) T^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}}{p_t (r_{AB})^2 f\left(\frac{kT}{\varepsilon_{AB}}\right)} \quad (67)$$

เมื่อ $M_A = 28.964$ กรัมต่อโมล

$M_B = 156.267$ กรัมต่อโมล

$p_t = 101 \times 10^3$ นิวตันต่อตารางเมตร

$T = 298$ เคลวิน

$v_A = 10(0.0148) + 20(0.0037) + 0.0074 = 0.2294$ ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลโมล

ดูได้จากดูได้จากภาคผนวกตาราง ค-4

$r_A = 0.3711$ ดูได้จากภาคผนวกตาราง ค-3 nm

$r_B = 1.18 v^{\frac{1}{3}} = 1.18 (0.2294)^{\frac{1}{3}} = 0.722$ nm

$r_{AB} = \frac{(r_A + r_B)}{2} = \frac{(0.3711 + 0.722)}{2} = 0.547$ nm

$T_{b,B} = 485$ เคลวิน

$\frac{\varepsilon_A}{k} = 78.6$

$$\frac{\varepsilon_B}{k} = 1.21T_{b,B} = 1.21(485) = 586.85$$

$$\frac{\varepsilon_{A,B}}{k} = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_A}{k}\right) \times \left(\frac{\varepsilon_B}{k}\right)} = \sqrt{(78.6) \times (586.85)} = 214.77$$

$$\frac{kT}{\varepsilon_{A,B}} = \frac{298}{214.77} = 1.388$$

$$f(kT/\varepsilon_{AB}) = 0.627 \text{ ดูได้จากภาคผนวกภาพประกอบ ค-1}$$

แทนค่าจะได้

$$D_{AB} = \frac{\left(1.084 - 0.249 \sqrt{\frac{1}{28.964} + \frac{1}{156.267}}\right) (298)^{3/2} \sqrt{\frac{1}{28.964} + \frac{1}{156.267}}}{(101)(0.547)^2 (0.627)}$$

$$D_{AB} = \frac{\left(1.084 - 0.249 \sqrt{\frac{1}{28.964} + \frac{1}{156.267}}\right) (298)^{3/2} \sqrt{\frac{1}{28.964} + \frac{1}{156.267}}}{(101 \times 10^3)(0.547)^2 (0.627)}$$

$$D_{AB} = \frac{(1.084 - 0.0503)(5144.278)(0.202)}{18948} = 0.057 \quad cm^2 / sec$$

3. Fuller Schettler และ Giddings (Welty; Wicks; & Wilson. 1984: 431-456)

$$D_{AB} = \frac{1.0 \times 10^{-3} T^{1.75} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{\frac{1}{2}}}{P \left[(\Sigma V_A)^{\frac{1}{3}} + (\Sigma V_B)^{\frac{1}{3}} \right]^2} \quad (68)$$

เมื่อ $M_A = 28.964$	กรัมต่อโมล
$M_B = 156.267$	กรัมต่อโมล
$V_A = 20.10$	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล
$V_B = 189.88$	ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล
$P = 0.996$	บรรยากาศ
$T = 298$	เคลวิน

แทนค่าจะได้

$$D_{AB} = \frac{1.0 \times 10^{-3} (298)^{1.75} \left(\frac{1}{28.964} + \frac{1}{156.267} \right)^{\frac{1}{2}}}{0.996 \left[(20.1)^{\frac{1}{3}} + (189.88)^{\frac{1}{3}} \right]^2}$$

$$D_{AB} = \frac{1.0 \times 10^{-3} (21373.639)(0.202)}{(0.996)(71.684)}$$

$$D_{AB} = 0.061 \quad cm^2 / sec$$

4. Slattery และคณะ (Bird; Stewart; & Lightfoot. 2002: 513-542)

$$p(D_{AB}) = a \left(\frac{T}{\sqrt{T_{CA}T_{CB}}} \right)^b (P_{CA}P_{CB})^{\frac{1}{3}} (T_{CA}T_{CB})^{\frac{5}{12}} \left(\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (69)$$

เมื่อ $M_A = 28.964$ กรัมต่อโมล

$M_B = 156.267$ กรัมต่อโมล

$p = 0.996$ บรรยากาศ

$T = 298$ เคลวิน

$T_{CA} = 132.40$ เคลวิน

$T_{CB} = 657.85$ เคลวิน

$P_{CA} = 37.00$ บรรยากาศ

$P_{CB} = 26.75$ บรรยากาศ

ถ้า $a = 2.745 \times 10^{-4}$ $b = 1.823$

แทนค่าจะได้

$$(0.996)D_{AB} = 2.745 \times 10^{-4} \left(\frac{298}{\sqrt{(132.40)(657.85)}} \right)^{1.823} (26.75 \times 37)^{\frac{1}{3}} (132.40 \times 657.85)^{\frac{5}{12}} \left(\frac{1}{28.964} + \frac{1}{156.26} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$(0.996)D_{AB} = 2.745 \times 10^{-4} \left(\frac{298}{295.126} \right)^{1.823} (9.966)(114.37)(0.202)$$

$$(0.996)D_{AB} = 2.745 \times 10^{-4} \left(\frac{298}{295.126} \right)^{1.823} (9.966)(114.37)(0.202)$$

$$D_{AB} = \frac{(2.745 \times 10^{-4})(1.0178)(9.966)(114.37)(0.202)}{0.996} = 0.064 \quad cm^2 / sec$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากการทดลอง

$$N_A = -D_{AB} \frac{(C_{A,s} - C_{A,\infty})}{(z_2 - z_1)} \quad (58)$$

$$N_A = \frac{dC_A}{A dt} \quad (65)$$

เมื่อ	z_1	= 1.02	เซนติเมตร
	z_2	= 4.27	เซนติเมตร
	$C_{A,s}$	= 0.000246	มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
	$C_{A,\infty}$	= 0	มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
	$\frac{dC_A}{dt}$	= -0.025	มิลลิกรัมต่อชั่วโมง
	A	= 1.1025	ตารางเซนติเมตร
แทนค่าจะได้			

$$-\frac{0.025}{(1.1025)} = -D_{AB} \frac{(0.000246 - 0)}{(4.27 - 1.02)} \quad cm^2 / hr.$$

$$D_{AB} = \frac{(299.58)}{(3600)} = 0.083 \quad cm^2 / sec$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลมวล (k_c)

$$Sh = \frac{k_c L}{D_{AB}} \quad (60)$$

$$Re = \frac{Lv}{\nu} \quad (63)$$

$$S_c = \frac{\nu}{D_{AB}} \quad (64)$$

เมื่อ

L	= 2	เซนติเมตร
D _{AB}	= 0.084	ตารางเซนติเมตรต่อวินาที
V	= 24	เซนติเมตรต่อวินาที
ν	= 1.595 × 10 ⁻⁵	ตารางเมตรต่อวินาที

เมื่อแทนค่าจะได้

$$S_c = \frac{1.595 \times 10^{-5} \times 10^4}{0.084} = 1.899$$

$$Re = \frac{(2)(24)}{(1.595 \times 10^{-5} \times 10^4)} = 300.9$$

$$Re < 3 \times 10^5 \quad \text{เป็นลามินาร์} \quad S_h = 0.664 Re^{1/2} Sc^{1/3} \quad (61)$$

$$S_h = 0.664(300.9)^{1/2}(1.899)^{1/3} = 14.26$$

$$k_c = \frac{(14.26)(0.084)}{2} = 0.60 \quad cm/sec$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ช่วงแรกของการถ่ายเทมวลของเมททอลในบุหรี (k_c)

$$N_A = k_c (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (59)$$

$$N_A = \frac{dC_A}{A dt} \quad (65)$$

วิธีการคำนวณในกรณีที่บรรจุในกล่องพลาสติกทรงสูงและทรงเตี้ยจะเหมือนกัน ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

เมื่อ	$C_{A,s}$	= y	= 3.2×10^{-5}	มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
	$C_{A,\infty}$	= 0		มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
	$\frac{dC_A}{dt}$	= x	= 1.157×10^{-5}	มิลลิกรัมต่อวินาที
	A	= 6.3		ตารางเซนติเมตร

เมื่อแทนค่าในสมการ 78 จะได้

$$k_c = \frac{N_A}{C_{A,s}} = \frac{\left[\frac{x}{A} \right]}{C_{A,s}} = \frac{x}{A \cdot y} \quad (78)$$

$$k_c = \frac{1.157 \times 10^{-5}}{(6.3)(3.2 \times 10^{-5})} = 0.0574 \quad cm/sec$$

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์เฉลี่ยของการถ่ายเทมวลของเมททอลในบุหรี (k_{ov})

$$-\frac{dm_A}{A dt} = k_{ov} (C_{A,s} - C_{A,\infty}) \quad (79)$$

$$-\frac{dm_A}{dt} = k_{ov} * A * C_{A,S} \quad (80)$$

เมื่อกำหนดให้ $C_{A,S} = \frac{m_{A,e}}{k'}$ (81)

$$-\frac{dm_A}{m_A} = \frac{k_{ov} A}{k'} dt \quad (83)$$

อินทิเกรตสมการ 83 จะได้

$$-\ln m_A = \frac{k_{ov} A}{k'} t \quad (84)$$

จากสมการที่ 84 เมื่อวาดกราฟระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลาจะได้ค่า slope เป็นค่า $\frac{k_{ov} A}{k'}$ ที่อุณหภูมิต่าง ๆ ดังนั้นสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลเฉลี่ย (k_{ov}) ได้จากสมการ 85

$$x = \frac{k_{ov} A}{k'} \quad (85)$$

แทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ดังนี้

$$\begin{aligned} m_{A,e} &= 0.0320 && \text{ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร} \\ C_{A,e} &= 10.3997 && \text{มิลลิกรัม} \end{aligned}$$

$$k' = \frac{(10.3997)(1000)}{0.0320} = 3.2499 \times 10^5 \quad \text{มิลลิลิตร}$$

ตัวแปร	เวลา (ชั่วโมง)						
	0	5	15	25	50	75	100
m_A	3.00	2.95	2.83	2.79	2.49	2.32	2.28
$\frac{m_A}{m_{A,0}}$	1.000	0.9835	0.9424	0.9293	0.8290	0.7730	0.7606
$\ln m_A$	0	-0.0166	-0.0593	-0.0734	-0.1875	-0.2575	-0.2736

เมื่อวาดกราฟระหว่าง $\ln m_A$ กับเวลา จะได้ slope -0.0031 ต่อชั่วโมง

$$A = 6.3$$

ตารางเซนติเมตร

$$-0.0031 = -\frac{k_{ov}(6.3)}{3.2499 \times 10^5}$$

$$k_{ov} = \frac{0.0031 \times 3.2499 \times 10^5}{6.3} = 159.92 \quad cm/hr$$

$$k_{ov} = \frac{159.92}{3600} = 0.0444 \quad cm/sec$$

ภาคผนวก ค
ค่าคงที่ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ

ตาราง ค-1 ค่าคงที่ที่ใช้ในการคำนวณในสมการ 66

Table K.1 The Collision Integrals, Ω_μ and Ω_D , Based on the Lennard-Jones Potential*

$\kappa T/\epsilon$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (For viscosity and thermal conductivity)	Ω_D (For mass diffusivity)	$\kappa T/\epsilon$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (For viscosity and thermal conductivity)	Ω_D (For mass diffusivity)
0.30	2.785	2.662	1.75	1.234	1.128
0.35	2.628	2.476	1.80	1.221	1.116
0.40	2.492	2.318	1.85	1.209	1.105
0.45	2.368	2.184	1.90	1.197	1.094
0.50	2.257	2.066	1.95	1.186	1.084
0.55	2.156	1.966	2.00	1.175	1.075
0.60	2.065	1.877	2.10	1.156	1.057
0.65	1.982	1.798	2.20	1.138	1.041
0.70	1.908	1.729	2.30	1.122	1.026
0.75	1.841	1.667	2.40	1.107	1.012
0.80	1.780	1.612	2.50	1.093	0.9996
0.85	1.725	1.562	2.60	1.081	0.9878
0.90	1.675	1.517	2.70	1.069	0.9770
0.95	1.629	1.476	2.80	1.058	0.9672
1.00	1.587	1.439	2.90	1.048	0.9576
1.05	1.549	1.406	3.00	1.039	0.9490
1.10	1.514	1.375	3.10	1.030	0.9406
1.15	1.482	1.346	3.20	1.022	0.9328
1.20	1.452	1.320	3.30	1.014	0.9256
1.25	1.424	1.296	3.40	1.007	0.9186
1.30	1.399	1.273	3.50	0.9999	0.9120
1.35	1.375	1.253	3.60	0.9932	0.9058
1.40	1.353	1.233	3.70	0.9870	0.8998
1.45	1.333	1.215	3.80	0.9811	0.8942
1.50	1.314	1.198	3.90	0.9755	0.8888
1.55	1.296	1.182	4.00	0.9700	0.8836
1.60	1.279	1.167	4.10	0.9649	0.8788
1.65	1.264	1.153	4.20	0.9600	0.8740
1.70	1.248	1.140	4.30	0.9553	0.8694
			4.40	0.9507	0.8652

(continued)

* Taken from J. O. Hirschfelder, R. B. Bird, and E. L. Spotz, *Chem. Revs.*, **44**, 205 (1949).

Table K.1 (*continued*)

$\kappa T/\epsilon$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (For viscosity and thermal conductivity)	Ω_D (For mass diffusivity)	$\kappa T/\epsilon$	$\Omega_\mu = \Omega_k$ (For viscosity and thermal conductivity)	Ω_D (For mass diffusivity)
4.50	0.9464	0.8610	10.0	0.8242	0.7424
4.60	0.9422	0.8568	20.0	0.7432	0.6640
4.70	0.9382	0.8530	30.0	0.7005	0.6232
4.80	0.9343	0.8492	40.0	0.6718	0.5960
4.90	0.9305	0.8456	50.0	0.6504	0.5756
5.0	0.9269	0.8422	60.0	0.6335	0.5596
6.0	0.8963	0.8124	70.0	0.6194	0.5464
7.0	0.8727	0.7896	80.0	0.6076	0.5352
8.0	0.8538	0.7712	90.0	0.5973	0.5256
9.0	0.8379	0.7556	100.0	0.5882	0.5170

ตาราง ค-2 ค่าคงที่ ใช้ในการคำนวณในสมการ 66

Table K.2 Lennard-Jones Force Constants Calculated from Viscosity Data*

Compound	Formula	ϵ_A/κ , in K	σ , in Å
Acetylene	C ₂ H ₂	185	4.221
Air		97	3.617
Argon	A	124	3.418
Arsine	AsH ₃	281	4.06
Benzene	C ₆ H ₆	440	5.270
Bromine	Br ₂	520	4.268
<i>i</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	313	5.341
<i>n</i> -Butane	C ₄ H ₁₀	410	4.997
Carbon dioxide	CO ₂	190	3.996
Carbon disulfide	CS ₂	488	4.438
Carbon monoxide	CO	110	3.590
Carbon tetrachloride	CCl ₄	327	5.881
Carbonyl sulfide	COS	335	4.13
Chlorine	Cl ₂	357	4.115
Chloroform	CHCl ₃	327	5.430
Cyanogen	C ₂ N ₂	339	4.38
Cyclohexane	C ₆ H ₁₂	324	6.093
Ethane	C ₂ H ₆	230	4.418
Ethanol	C ₂ H ₅ OH	391	4.455
Ethylene	C ₂ H ₄	205	4.232
Fluorine	F ₂	112	3.653
Helium	He	10.22	2.576

(continued)

* R. C. Reid and T. K. Sherwood, *The Properties of Gases and Liquids*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1958.

† Calculated from virial coefficients.

ตาราง ค-3 ค่าคงที่ ใช้ในการคำนวณในสมการ 66

Table 2.2 Force constants of gases as determined from viscosity data

Gas	$\epsilon/k, K$	r, nm	Gas	$\epsilon/k, K$	r, nm
Air	78.6	0.3711	HCl	344.7	0.3339
CCl ₄	322.7	0.5947	He	10.22	0.2551
CH ₃ OH	481.8	0.3626	H ₂	59.7	0.2827
CH ₄	148.6	0.3758	H ₂ O	809.1	0.2641
CO	91.7	0.3690	H ₂ S	301.1	0.3623
CO ₂	195.2	0.3941	NH ₃	558.3	0.2900
CS ₂	467	0.4483	NO	116.7	0.3492
C ₂ H ₆	215.7	0.4443	N ₂	71.4	0.3798
C ₃ H ₈	237.1	0.5118	N ₂ O	232.4	0.3828
C ₆ H ₆	412.3	0.5349	O ₂	106.7	0.3467
Cl ₂	316	0.4217	SO ₂	335.4	0.4112

† From R. A. Svehla, *NASA Tech. Rept. R-132*, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, 1962.

ตาราง ค-4 ค่าคงที่ ใช้ในการคำนวณในสมการ 67

Table 2.3 Atomic and molecular volumes

Atomic volume, $m^3/1000 \text{ atoms} \times 10^3$		Molecular volume, $m^3/kmol \times 10^3$		Atomic volume, $m^3/1000 \text{ atoms} \times 10^3$		Molecular volume, $m^3/kmol \times 10^3$	
Carbon	14.8	H ₂	14.3	Oxygen	7.4	NH ₃	25.8
Hydrogen	3.7	O ₂	25.6	In methyl esters	9.1	H ₂ O	18.9
Chlorine	24.6	N ₂	31.2	In higher esters	11.0	H ₂ S	32.9
Bromine	27.0	Air	29.9	In acids	12.0	COS	51.5
Iodine	37.0	CO	30.7	In methyl ethers	9.9	Cl ₂	48.4
Sulfur	25.6	CO ₂	34.0	In higher ethers	11.0	Br ₂	53.2
Nitrogen	15.6	SO ₂	44.8	Benzene ring: subtract	15	I ₂	71.5
In primary amines	10.5	NO	23.6	Naphthalene ring: subtract	30		
In secondary amines	12.0	N ₂ O	36.4				

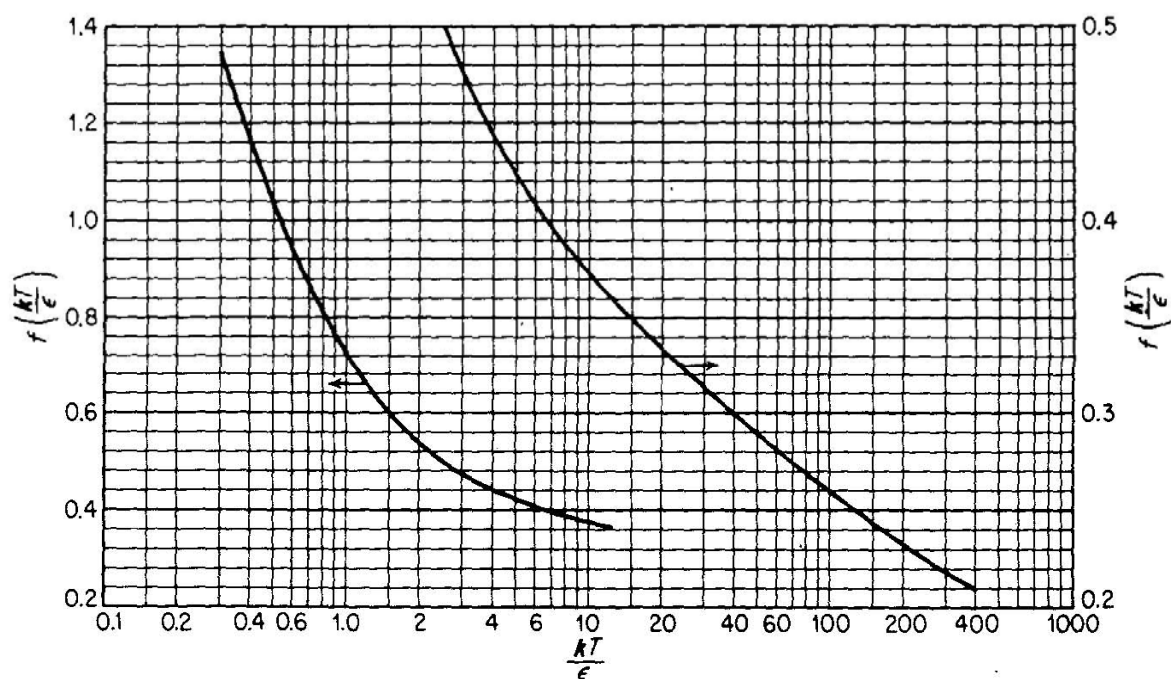


Figure 2.5 Collision function for diffusion.

ภาพประกอบ ค-1 ค่าคงที่ใช้ในการคำนวณในสมการ 67

ภาคผนวก ง

คำอธิบายสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ความหมาย
A	พื้นที่ตัดขวางของแท่งบุหรี มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตร (สมการ 7-39)
a	รัศมีของแท่งบุหรี มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
a, b	ค่าคงที่ (บทที่ 3)
C	$1/P$
C	ความเข้มข้นของเมนทอล มีหน่วยเป็นโมลต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
C_{∞}	ความเข้มข้นของก๊าซในบรรยากาศ
$C_{A,\infty}$	ความเข้มข้นในของไหล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
$C_{A,e}$	ความเข้มข้นของเมนทอลในอากาศที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
$C_{A,s}$	ความเข้มข้นที่ผิว มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
c	ค่าความชื้นของยาสูบ มีหน่วยเป็นกรัมต่อกรัม
c_p	ค่าความร้อนจำเพาะของอากาศ
c_s, c'_s	ค่าความชื้นที่จุดสมดุลของยาสูบ มีหน่วยเป็นกรัมต่อกรัม
D	ค่าการแพร่ของมวลก๊าซ
D	สัมประสิทธิ์การแพร่ของเมนทอล มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที
D_{AB}	สัมประสิทธิ์การแพร่ (Diffusion Coefficient) มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที (สมการ 65-71)
D_e	ประสิทธิภาพการแพร่ความชื้น มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง
D_L	การแพร่ของน้ำ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง
D_0	การแพร่ของก๊าซในก๊าซผสมมากกว่า 2 ชนิดขึ้นไป
D_{naph}	สัมประสิทธิ์การแพร่ของแนพทาไลน์สู่อากาศ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที (สมการ 1, 2, และ 3)
D_p	การแพร่ของก๊าซในรูกระดาศ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที
$D_{p,CO}$	การแพร่ของ ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ผ่านรูของกระดาศ มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที
e	Natural base
F	ฟลักซ์ของเมนทอลต่อหน่วยพื้นที่ต่อวินาที (สมการ 5)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
I	เทอมของแหล่งกำเนิดวัสดุ มีหน่วยเป็นต่อชั่วโมง
J_i	เบสเซลฟังก์ชันอันดับที่ i (Bessel Function)
k, k'	ค่าคงที่การคายความร้อน มีหน่วยเป็นต่อชั่วโมง
$k' = \frac{m_{A,e}}{C_{A,e}}$	ค่าคงที่ของการระเหิดผ่านกั้นกรองและกระดามวนบุหรี มีหน่วยเป็น
มิลลิลิตรต่อ 4 มวน	
k	ค่าคงที่ของบรอกซ์แมนส์ (Boltzmann's Constant)
k	ค่าคงที่อัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับ 1
k_c	สัมประสิทธิ์การพามวล มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที
$k_{C,A}, k_{C,B}$	สัมประสิทธิ์ช่วงแรกของการถ่ายเทมวลในกรณี A และ B มีหน่วยเป็น
เซนติเมตรต่อวินาที	
k_D	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยการพาที่ผิวหน้า มีหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อ
ตารางเมตรต่อวินาที	
$k_{ov,A}, k_{ov,B}$	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลรวมทั้งหมดในกรณี A และ B มีหน่วยเป็น
เซนติเมตรต่อวินาที	
l	ความยาวแท่งบุหรี มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
L	ระยะทางของผิวที่ลุ่มพัดผ่าน มีหน่วยเป็นเมตร (สมการ 60-64)
M	ปริมาณการแพร่ความร้อนทั้งหมด มีหน่วยเป็นกรัม
$M(t)$	ระดับการเคลื่อนย้ายที่เวลา t (สมการ 4)
M_A, M_B	น้ำหนักโมเลกุลของสาร A และ B ตามลำดับ มีหน่วยเป็นกรัมต่อโมล
m_A	น้ำหนักของเมนทอลในบุหรีต่อ 1 ชุด (4 มวน) มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม
$m_{A,0}$	ปริมาณเมนทอลในบุหรีที่เวลาเริ่มต้น มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อมวน
$m_{A,A'}, m_{A,B}$	ปริมาณเมนทอลในบุหรีที่เวลาต่าง ๆ ในกรณี A และ B มีหน่วยเป็น
มิลลิกรัมต่อมวน	
$m_{A,e}$	เมนทอลที่เหลือในบุหรีที่จุดสมดุล มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อ 1 ชุด (4
มวน)	
M_{eq}	ระดับการเคลื่อนย้ายที่สมดุล
N_A	ฟลักซ์เชิงมวล (สมการ 58-59)

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
N_s	พื้นที่ผิวของยาเส้นทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของมวลบุหรี มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
P	ความดัน มีหน่วยเป็นปาสกาล (สมการ 1-3)
P, p	ความดัน มีหน่วยเป็นบรรยากาศ
P	ความดันขณะทำการทดลอง มีหน่วยเป็นบรรยากาศ (สมการ 77)
P	ความดันไอของเมนทอลในสารละลาย (สมการ 6)
P^0	ความดันไอของเมนทอลบริสุทธิ์
P_{CA}, P_{CB}	ความดันที่จุดวิกฤต (Critical Pressure) ของสาร A และ B ตามลำดับ มีหน่วยเป็นบรรยากาศ
p_t	ความดันสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นนิวตันต่อตารางเมตร.
r	แนวแกนรัศมี
r	Activity Coefficient ของเมนทอล
r_{AB}	ค่าคอลลิชัน ของการแยกโมเลกุล (Molecular Separation at Collision) มีหน่วยเป็น nm
R_m	ความต้านทานรวมต่อการถ่ายเทมวลซึ่งรวมการแพร่ผ่านกระดาษและการพาที่ผิว
Sc	ค่าชmidt นัมเบอร์ (Schmidt Number) สำหรับแนพทาลีนในอากาศ
t	เวลา
t	ความหนาของกระดาษ มีหน่วยเป็นเมตร
T	อุณหภูมิ มีหน่วยเป็นเคลวิน
T	อุณหภูมิขณะทำการทดลอง มีหน่วยเป็นเคลวิน
T	อุณหภูมิสัมบูรณ์ มีหน่วยเป็นเคลวิน
T_b	อุณหภูมิจุดเดือดปกติ มีหน่วยเป็นเคลวิน
T_c	อุณหภูมิวิกฤติ มีหน่วยเป็นเคลวิน
T_{CA}, T_{CB}	อุณหภูมิวิกฤติ (Critical Temperature) ของสาร A และ B ตามลำดับ มีหน่วยเป็น เคลวิน
U_0	ความเร็วเฉลี่ยของสารผสมตามแนวรัศมี
V	ความเร็วลม มีหน่วยเป็นเมตรต่อวินาที

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
V_A, V_B เซนติเมตรต่อโมล	ปริมาตรอะตอมของสาร A และ B ตามลำดับ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล
V_b, v ต่อโมล	ปริมาตรของสาร 1 โมล ที่จุดเดือดปกติ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล
V_c ต่อโมล	ปริมาตรของสาร 1 โมลที่จุดเดือดวิกฤติ มีหน่วยเป็นลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล
x	ระยะทาง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
x	อัตราส่วนโมลของเมนทอลในสารละลาย
Z	ความสามารถในการแทรกซึมผ่านได้ของกระดาษ มีหน่วยเป็น CU หรือตารางเซนติเมตรต่อนาที
z	ระยะทาง มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
z	แนวแกน
δ	ความหนากระดาษห่อผนว มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
ρ	ความหนาแน่นของการบรรจุ มีหน่วยเป็นกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
ρ	ความหนาแน่นของสารผสม (สมการ 40-57)
τ, τ'	ความหนาแผ่นฟิล์ม มีหน่วยเป็นเซนติเมตร
ψ	ค่าคงที่จากการทดลอง มีหน่วยเป็นเคลวิน
χ	ค่าคงที่จากการทดลอง ไม่มีหน่วย
ν วินาที	ความหนืดจลนศาสตร์ (Kinematic Viscosity) มีหน่วยเป็นตารางเมตรต่อวินาที
ν_{air}	ความหนืดจลนศาสตร์ของอากาศ มีหน่วยเป็นตารางเซนติเมตรต่อวินาที
α	สัมประสิทธิ์การพามวลตามแนวแกน มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อชั่วโมง
α' ชั่วโมง	สัมประสิทธิ์การพามวลตามแนวแกนรัศมี มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อชั่วโมง
ζ ชั่วโมง	สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความชื้น มีหน่วยเป็นกรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อชั่วโมง
ε	อัตราส่วนช่องว่างเทียบกับความหนาแน่น (Void Ratio Based on Apparent Density) ไม่มีหน่วย

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

สัญลักษณ์	ความหมาย
ϵ_{AB}	พลังงานของโมเลกุลที่กระทำต่อกัน (Energy of Molecular Attraction)
σ_{AB}	ค่าคอลลิชัน ไดอะมิเตอร์ (collision diameter) หรือตัวแปร เลนนาร์ด
โจนส์มีหน่วยเป็น °A	
$\Omega_D, f(kT/\epsilon_{AB})$	ค่าคอลลิชัน อินทิเกรล (Collision Integral) หรือค่าตัวแปรคอลลิชัน

ประวัติย่อผู้วิจัย

ประวัติย่อผู้วิจัย

ชื่อ ชื่อสกุล	บุญธิดา แสนบรรดิษฐ์
วันเดือนปีเกิด	24 พฤศจิกายน พ.ศ. 2509
สถานที่เกิด	นครปฐม
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	12/4 ม. 9 ต. ไไร่ขิง อ. สามพราน จ. นครปฐม
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	นักวิทยาศาสตร์ 5
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	กองวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ยาสูบ ฝ่ายวิจัยและพัฒนา โรงงานยาสูบ กระทรวงการคลัง
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2527	มัธยมศึกษาตอนปลาย จากโรงเรียนสตรีวัดระฆัง
พ.ศ. 2531	วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ วิทยาเขตบางแสน
พ.ศ. 2551	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมเคมี จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ