

รายการอ้างอิง

- Akbari, M., et al. (2011). "A microreactor modeling, analysis and optimization for methane autothermal reforming in fuel cell applications." Chemical Engineering Journal 166(3): 1116-1125.
- Chung, C., et al. (2011). "Design and experiments of a short-mixing-length baffled microreactor and its application to microfluidic synthesis of nanoparticles." Chemical Engineering Journal 168(2): 790-798.
- Corma, A., et al. (2007). "Processing biomass-derived oxygenates in the oil refinery: catalytic cracking (FCC) reaction pathways and role of catalyst." Journal of Catalysis 247(2): 307-327.
- Dummann, G., et al. (2003). "The capillary-microreactor: a new reactor concept for the intensification of heat and mass transfer in liquid-liquid reactions." Catalysis Today 79: 433-439.
- Ehrfeld, W., et al. (2005). Microreactors: New Technology for Modern Chemistry 2000, Wiley-VCH: Weinheim.
- Fang, W.-F. and J.-T. Yang (2009). "A novel microreactor with 3D rotating flow to boost fluid reaction and mixing of viscous fluids." Sensors and Actuators B: Chemical 140(2): 629-642.
- Fischer, W. and D.-S. i. Magdeburg (1998). Production of High Concentrated Monoglyceride. DGF-Symposium in Magdeburg. Germany: UIC, GmbH.
- Freitas, L., et al. (2009). "An integrated approach to produce biodiesel and monoglycerides by enzymatic interestification of babassu oil (< i> Orbinya</i> sp)." Process Biochemistry 44(10): 1068-1074.
- Harries, N., et al. (2003). "A numerical model for segmented flow in a microreactor." International journal of heat and mass transfer 46(17): 3313-3322.
- Heykants, E., et al. (1997). "Shape-selective zeolite catalysed synthesis of monoglycerides by esterification of fatty acids with glycerol." Studies in Surface Science and Catalysis 105: 1277-1284.
- Kaewthong, W., et al. (2005). "Continuous production of monoacylglycerols by glycerolysis of palm olein with immobilized lipase." Process Biochemistry 40(5): 1525-1530.
- Karinen, R. and A. Krause (2006). "New biocomponents from glycerol." Applied Catalysis A: General 306: 128-133.
- Kashid, M. N. and D. W. Agar (2007). "Hydrodynamics of liquid-liquid slug flow capillary microreactor: flow regimes, slug size and pressure drop." Chemical Engineering Journal 131(1): 1-13.



- Kashid, M. N., et al. (2007). "Computational modelling of slug flow in a capillary microreactor." Journal of Computational and Applied Mathematics 203(2): 487-497.
- Kockmann, N. (2007). Transport phenomena in micro process engineering. Springer.
- Kulkarni, A., et al. (2007). "Hydrodynamics and liquid phase residence time distribution in mesh microreactor." Chemical Engineering Science 62(24): 7484-7493.
- Kumacheva, E. and P. Garstecki "Introduction to Microfluidics." Microfluidic Reactors for Polymer Particles: 16-21.
- Nguyen, N.-T. (2011). Micromixers: fundamentals, design and fabrication. William Andrew.
- Pouilloux, Y., et al. (1999). "Reaction of glycerol with fatty acids in the presence of ion-exchange resins: Preparation of monoglycerides." Journal of Molecular Catalysis A: Chemical 149(1): 243-254.
- Pouilloux, Y., et al. (2000). "Synthesis of glycerol mono-octadecanoate from octadecanoic acid and glycerol. Influence of solvent on the catalytic properties of basic oxides." Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIC-Chemistry 3(7): 589-594.
- Shabaker, J., et al. (2004). "Aqueous-phase reforming of oxygenated hydrocarbons over Sn-modified Ni catalysts." Journal of Catalysis 222(1): 180-191.
- Ufer, A., et al. (2011). "Suspension catalysis in a liquid-liquid capillary microreactor." Chemical Engineering Journal 167(2): 468-474.
- Weiler, A. and M. Junkers (2009). "Using Microreactors in Chemical Synthesis: Batch Process versus Continuous Flow."
- Wirth, T. (2008). Microreactors in organic synthesis and catalysis. John Wiley & Sons.
- Zhao, C.-X., et al. (2011). "Nanoparticle synthesis in microreactors." Chemical Engineering Science 66(7): 1463-1479.
- Žnidaršič-Plazl, P. and I. Plazl (2009). "Modelling and experimental studies on lipase-catalyzed isoamyl acetate synthesis in a microreactor." Process Biochemistry 44(10): 1115-1121.



ภาคผนวก

เลขที่..... *รพ. 2956*
เลขทะเบียน..... *7238*
วันเดือนปี..... *16 มี.ค. 2560*

ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างการคำนวณ

1. การคำนวณหาปริมาตรของสลัก

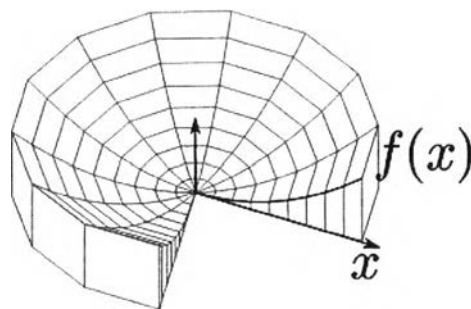
สลักของกรตอกทาโนอิกมีลักษณะคล้ายหัวกระสุนปืน ดังนั้นการคำนวณหาปริมาตรของสลักอย่างถูกต้องจะต้องนำคณิตศาสตร์กระบวนการหาปริมาตรของเซลล์ (shell method) มาประยุกต์ใช้ หลักการในการหาปริมาตรของเซลล์คือ การอินทิเกรตสมการส่วนโค้งรอบแกนหมุนตามสมการที่ (ก.1) โดยจะได้ปริมาตรส่วนโค้งดังแสดงในรูป ก.1

$$V = \lim_{\max \Delta x_i \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n 2\pi x_i^* f(x_i^*) \Delta x_i \quad (\text{ก.1})$$

$$= \int_a^b 2\pi x [f(x)] dx$$

$f(x)$ = สมการเส้นโค้งของปลายสลักหรือท้ายสลัก

a, b = ขอบเขตในการอินทิเกรตในแกน x



รูปที่ ก.1 ปริมาตรที่ได้จากการอินทิเกรตรอบแกนหมุนตามกระบวนการของเซลล์

เมื่อคำนวณหาปริมาตรส่วนโค้งของปลายและท้ายสลักได้แล้ว ต่อจากนั้นก็คำนวณหาปริมาตรทรงกระบอกของสลักตามสมการที่ ก.2 แล้วเอาปริมาตรที่คำนวณได้ดังกล่าวไปลบออกกับปริมาตรส่วนที่เกิดจากส่วนโค้งทั้งส่วนปลายและส่วนท้ายของสลักก็จะได้ปริมาตรของสลักที่แท้จริง

คำนวณตามขั้นตอนดังกล่าวกับสลักอื่น ๆ อย่างน้อย 5 สลัก ที่อัตราเร็วในการไหลเดียวกันแล้วนำปริมาตรที่คำนวณได้มาหาค่าเฉลี่ย

$$V_{\text{ทรงกระบอก}} = \pi r^2 h \quad (\text{ก.2})$$

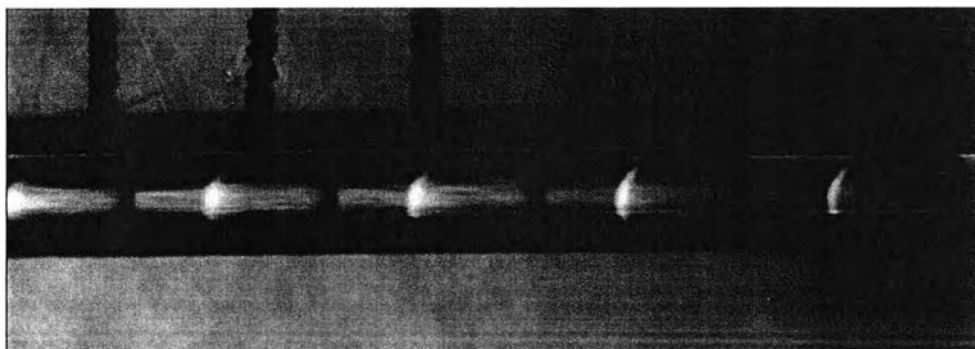
V = ปริมาตรทรงกระบอก (mm^3)

r = รัศมีของท่อ (mm)

h = ความยาวจากส่วนท้ายถึงส่วนปลายของสลัก (mm)

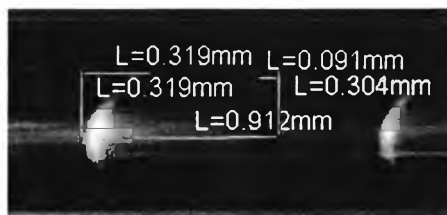
ตัวอย่างการคำนวณ ปริมาตรของสลักที่อัตราการไหลเข้าของกลีเซอรอลกับกรดออกทานอิกเท่ากันที่ 1200 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง

- บันทึกภาพรูปแบบการไหลจากกล้องสเตอริโอ



รูปที่ ก.2 ภาพของสลักที่ถ่ายได้จากกล้องสเตอริโอ

- วัดความยาว และวัดความยาวส่วนโค้งของปลายและท้ายสลัก และวัดระยะจากจุดกึ่งกลางของสลักไปถึงขอบสลัก โดยใช้โปรแกรมที่มาพร้อมกับกล้องสเตอริโอดังแสดงดังรูป



รูปที่ ก.3 ผลที่ได้จากการวัดความยาวในส่วนต่าง ๆ ของสลัก

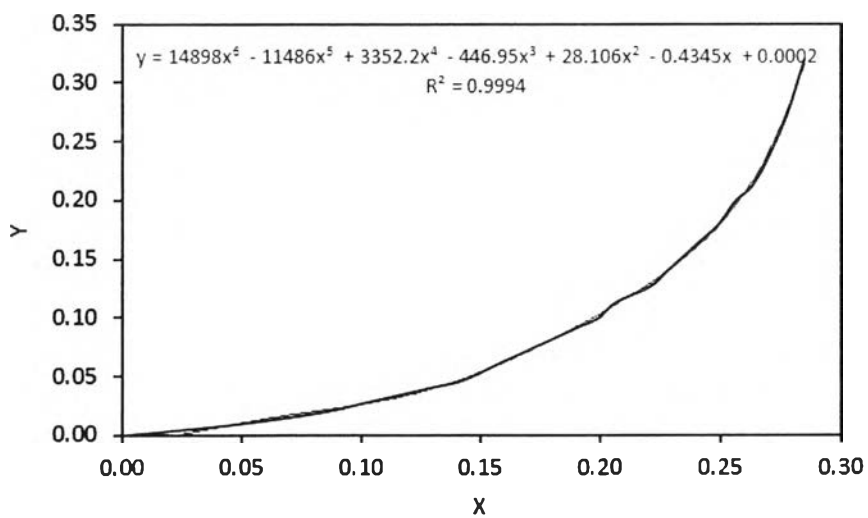
- หาสมการส่วนโค้ง และปริมาตรส่วนเกินของสลัก

➤ ส่วนปลายของสลัก

3.1.1 หาจุดบนเส้นโค้ง (ในรูปที่ ก.4) แล้วนำเอาไปพล็อตกราฟเพื่อหาสมการของเส้นโค้งจากเส้นแนวโน้ม (ในรูปที่ ก.5)



รูปที่ ก.4 การหาจุดบนเส้นโค้งของปลายสลัก



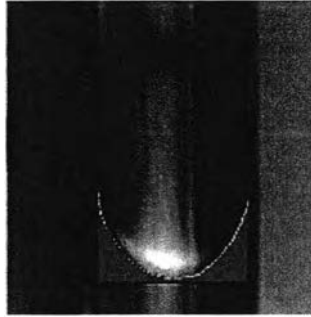
รูปที่ ก.5 กราฟของเส้นโค้งส่วนปลายสลัก

สมการความโค้งของส่วนหัวสลัก

$$f(x)_1 = 14875x^6 - 11464x^5 + 3343.3x^4 - 445.2x^3 + 27.927x^2 - 0.4257x \dots (1)$$

$$f(x)_2 = 0$$

- หาปริมาตรจากส่วนโค้งของส่วนปลาย (ในรูปที่ ก.6) สลักจากสมการที่ (ก.1)



รูปที่ ก.6 ปริมาตรส่วนปลายสลักที่ได้จากการอินทิเกรตตามทฤษฎีของเซลล์

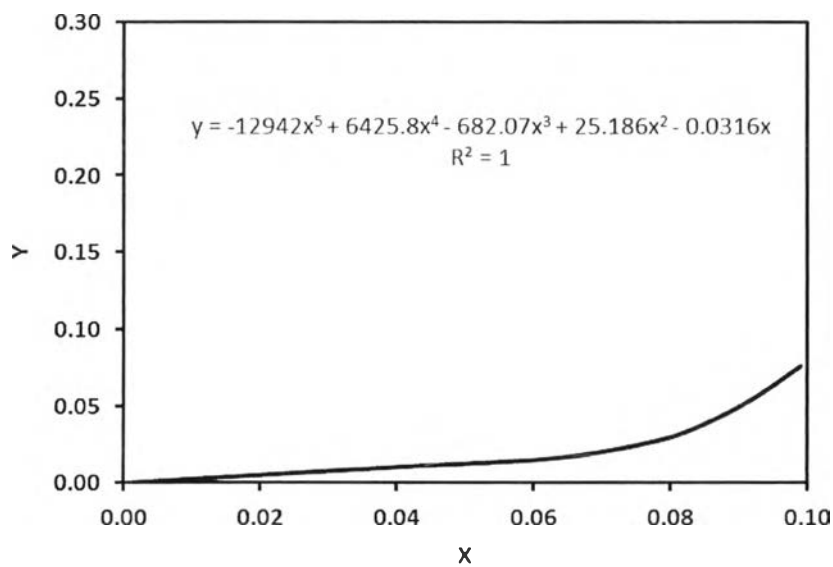
$$\begin{aligned}
 V &= 2\pi \int_0^{0.285} x(f(x)_1 - f(x)_2) dx \\
 &= 2\pi \int_0^{0.285} x [(14875x^6 - 11464x^5 + 3343.3x^4 - 445.2x^3 + 27.927x^2 - 0.4257x) - 0] dx \\
 &= 2\pi \int_0^{0.285} [(14875x^7 - 11464x^6 + 3343.3x^5 - 445.2x^4 + 27.927x^3 - 0.4257x^2)] dx \\
 &= 2\pi(0.0047697) \\
 &= 0.029968908 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

จากการหาปริมาตรพบว่าปริมาตรของส่วนโค้งตรงปลายสลักมีค่าเท่ากับ 0.029968908 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

- ส่วนท้ายของสลัก
 - หาจุดบนเส้นโค้ง (ในรูปที่ ก.7) แล้วนำมาไปพล็อตกราฟเพื่อหาสมการของเส้นโค้งจากเส้นแนวโน้ม (ในรูปที่ ก.8)



รูปที่ ก.7 การหาจุดบนเส้นโค้งของท้ายสลัก



รูปที่ ก.8 กราฟของเส้นโค้งส่วนท้ายสลัก

สมการความโค้งของส่วนท้ายสลัก

$$f(x)_1 = -19723x^5 + 9001.3x^4 - 878.23x^3 + 29.808x^2 - 0.0343x \quad ..(1)$$

๑.1)

$$f(x)_2 = 0$$

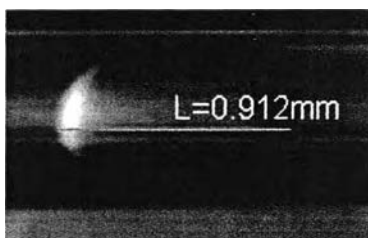


รูปที่ ก.9 ปริมาตรส่วนท้ายสลักที่ได้จากการอินทิเกรตตามทฤษฎีของเซลล์

$$\begin{aligned}
 V &= 2\pi \int_0^{0.091} x(f(x)_1 - f(x)_2) dx \\
 &= 2\pi \int_0^{0.091} x [(-19723x^5 + 9001.3x^4 - 878.23x^3 + 29.808x^2 - 0.0343x) - 0] dx \\
 &= 2\pi \int_0^{0.091} [(-19723x^6 + 9001.3x^5 - 878.23x^4 + 29.808x^3 - 0.0343x^2)] dx \\
 &= 2\pi(0.00011264) \\
 &= 0.000707738 \text{ mm}^3
 \end{aligned}$$

จากการหาปริมาตรพบว่าปริมาตรของส่วนโค้งตรงส่วนท้ายของสลักมีค่าเท่ากับ 0.000707738 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

- หาปริมาตรสลัก



รูปที่ ก.10 ความยาวจากส่วนปลายถึงส่วนท้ายของสลัก

หาปริมาตรทรงกระบอกที่เท่ากับความยาวของสลักจากสมการที่ (ก.2)

$$\begin{aligned} V_{\text{ทรงกระบอก}} &= \pi r^2 h = \pi (0.285)^2 (0.912) \\ &= 0.23272 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

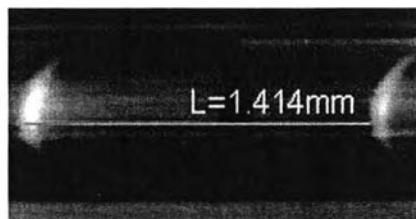
ดังนั้นปริมาตรทรงกระบอกที่ล้อมสลักที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.23272 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

หาปริมาตรของสลักจากสมการที่ (ก.3)

$$\begin{aligned} V_{\text{สลัก}} &= V_{\text{ทรงกระบอก}} - V_{\text{ปริมาตรส่วนเกินตรงหัว}} - V_{\text{ปริมาตรส่วนเกินตรงท้าย}} \quad (\text{ก.3}) \\ &= 0.23272 - 0.029968908 - 0.000707738 \\ &= 0.20204335 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาตรของสลักที่คำนวณได้มีค่าเท่ากับ 0.20204335 ลูกบาศก์มิลลิเมตร

- ปริมาตรบริเวณที่ไม่ใช่สลัก



รูปที่ ก.11 ความยาวจากส่วนปลายของสลักอันหนึ่งไปถึงส่วนปลายของสลักถัดไป

หาปริมาตรของบริเวณที่ไม่ใช่สลักสามารถหาได้จากสมการที่ (ก.4)

$$\begin{aligned} V_{\text{สลัก}} &= V_{\text{ทรงกระบอก}} - V_{\text{ปริมาตรสลัก}} \quad (\text{ก.4}) \\ V_{\text{สลัก}} &= \pi (0.285)^2 (1.414) - 0.2020433 \\ &= 0.1587753 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

ดังนั้นปริมาตรบริเวณที่ไม่ใช่สลักที่คำนวณได้เท่ากับ 0.1587753 ลูกบาศก์มิลลิเมตร



2. การคำนวณความเร็วของสลัก

สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความเร็วในการไหล คือ

$$v = \frac{F_T}{A} \quad (\text{ก.5})$$

โดยที่ v คือ ความเร็วในการไหล

F_T คือ อัตราการไหลรวม

A คือ พื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร

$$\text{ซึ่ง } A = \frac{\pi d^2}{4} \quad \text{เมื่อ } d \text{ คือเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่ออะฟิลลารี} \quad (\text{ก.6})$$

ตัวอย่างการคำนวณ อัตราการไหลรวม 2300 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง

เส้นผ่าศูนย์กลางภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร 0.57 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} \text{ความเร็วในการไหล} &= \frac{(2300 \mu\text{L}/\text{h}) \left(\frac{1 \text{ L}}{10^6 \mu\text{L}} \right) \left(\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \right) \left(\frac{10^9 \text{ mm}^3}{1 \text{ L}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right)}{\pi(0.57 \text{ mm})^2 / 4} \\ &= 2.5 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

ดังนั้น ความเร็วของสลักที่อัตราเร็วการไหลรวม 2300 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง เท่ากับ 2.5 มิลลิเมตรต่อวินาที

3. การคำนวณความดันลด

3.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความดันลดของสลักที่ไม่มีฟิล์ม
จากสมการของ Hagen – Poiseuille

$$\Delta P_G = \frac{[8\mu_G v \alpha l U]}{r^2} \quad (\text{ก.7})$$

$$\Delta P_O = \frac{[8\mu_o(1-\alpha)lU]}{r^2} \quad (\text{ก.8})$$

$$\text{ซึ่ง } v = \frac{Q_G + Q_O}{A} \quad (\text{ก.9})$$

และจากสมการของ Young – Laplace

$$P_C = \frac{2\gamma}{r} \cos\theta \quad (\text{ก.10})$$

$$\text{ดังนั้น } \Delta P = \frac{L}{l_U} (\Delta P_G + \Delta P_O) + \frac{2L-l_U}{l_U} P_C \quad (\text{ก.11})$$

- โดยที่
- P_C = ความดันของกะฟิลลารี (kPa)
 - ΔP = ความดันลด (kPa)
 - ΔP_G = ความดันลดของกลีเซอรอล (kPa)
 - ΔP_O = ความดันลดของกรดออกทานอิก (kPa)
 - Q_G = อัตราการไหลของกลีเซอรอล (m^3/s)
 - Q_O = อัตราการไหลของกรดออกทานอิก (m^3/s)
 - v = ความเร็วในการไหล (m/s)
 - α = สัดส่วนของวัฏภาคกลีเซอรอล
 - γ = แรงตึงผิวของท่อกะฟิลลารี (N/m)
 - μ_G = ความหนืดของกลีเซอรอล (Pa-s)
 - μ_O = ความหนืดของกรดออกทานอิก (Pa-s)
 - L = ความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (m)
 - l_U = ความยาวของสลัก (m)
 - r = รัศมีของกะฟิลลารี (m)
 - A = พื้นที่หน้าตัดของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (m^2)
 - θ = มุมสัมผัสระหว่างสลักกับท่อ

ตัวอย่างการคำนวณ ความดันลดที่ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0025 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ ก.1 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.7) – (ก.11) เพื่อหาความดันลดที่ ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0025 เมตรต่อวินาที

ตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
v	0.0025	เมตรต่อวินาที
A	0.78	-
γ	0.091	นิวตันต่อเมตร
μ_G	1.2	ปาสคาลวินาที
μ_O	0.02	ปาสคาลวินาที
L	0.2	เมตร
l_U	0.00064	เมตร
r	0.000285	เมตร
A	2.55×10^{-7}	ตารางเมตร
θ	25.62	องศา

$$\Delta P_G = \frac{8 \times (1.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}) \times (0.0025 \text{ m/s}) \times (0.78) \times (0.00064 \text{ m})}{(0.000285 \text{ mm})^2} = 147.17 \text{ kPa}$$

$$\Delta P_O = \frac{8 \times (0.02 \text{ Pa} \cdot \text{s}) \times (0.0025 \text{ m/s}) \times (1 - 0.78) \times (0.00064 \text{ m})}{(0.000285 \text{ mm})^2} = 3.14 \text{ kPa}$$

$$P_c = \frac{2 \times (0.091 \text{ N/m})}{0.000285 \text{ m}} \cos 25.62 = 576.89 \text{ kPa}$$

$$\begin{aligned} \Delta P &= \frac{0.2 \text{ m}}{0.00064 \text{ m}} (147.17 \text{ kPa} + 3.14 \text{ kPa}) + \frac{2(0.2 \text{ m}) - (0.00064 \text{ m})}{0.00064 \text{ m}} (576.9 \text{ kPa}) \\ &= 409.73 \text{ kPa} \end{aligned}$$

ดังนั้นความดันลดของสลักที่ไม่มีฟิล์มมาเคลือบที่ความเร็ว 0.0025 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 409.73 กิโลปาสคาล

1.1 สมการที่ใช้ในการคำนวณหาความดันลดของสลักที่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ

$$\frac{\Delta P}{L} = \left(\frac{\alpha}{1-k^4} \right) \left(\frac{\Delta P}{L} \right)_g ; k = \frac{r-h}{r} \quad (\text{ก.12})$$

โดยที่ ΔP = ความดันลด (kPa)

α = สัดส่วนของวัฏภาคกลีเซอรอล

L = ความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร (m)

h = ความหนาของฟิล์ม (m)

r = รัศมีของคะพิลลารี (m)

l_g = ความยาวของวัฏภาคกลีเซอรอล (m)

ΔP_G = ความดันลดของกลีเซอรอล (kPa)

ตัวอย่างการคำนวณ ความดันลดของสลักที่ความเร็ว 0.0035 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ ก.2 ค่าของตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.12) เพื่อหาความดันลดที่ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0035 เมตรต่อวินาที

ตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
v	0.0035	เมตรต่อวินาที
α	0.37	-
L	0.2	เมตร
r	0.000285	เมตร
h	2.43×10^{-5}	เมตร
k	0.70	-
ΔP_g	231.08	กิโลปาสคาล
l_g	0.000388	เมตร

$$\Delta P = 0.2 \text{ m} \times \left(\frac{0.37}{1 - 0.70^4} \right) \times \left(\frac{231.08 \text{ kPa}}{0.000388 \text{ m}} \right) = 145.61 \text{ kPa}$$

ดังนั้นความดันลดของสลักที่มีฟิล์มมาเคลือบที่ความเร็ว 0.0025 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 145.61 กิโลปาสคาล

2. การคำนวณสัดส่วนโดยโมลของสลักกรดอกทานโอินอกและกลีเซอรอล

การคำนวณหาสัดส่วนโดยโมลพิจารณาจากวัฏภาคของสลักกรดอกทานโอินอกกับวัฏภาคของกลีเซอรอลที่รอบล้อมสลักกรดอกทานโอินอก

สมการการคำนวณสัดส่วนโดยโมลของสลักกรดอกทานโอินอก

$$\alpha_o = \frac{\rho_o V_o / Mw_o}{\left(\frac{\rho_o V_o}{Mw_o} + \frac{\rho_g V_g}{Mw_g} \right)} \quad (ก.13)$$

โดยที่ α_o = สัดส่วนโดยโมลของสลักกรดอกทานโอินอก

ρ_o = ความหนาแน่นของกรดอกทานโอินอก (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

V_o = ปริมาตรของสลักกรดอกทานโอินอก (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

Mw_o = น้ำหนักโมเลกุลของกรดอกทานโอินอก (กรัมต่อโมล)

ρ_g = ความหนาแน่นของกลีเซอรอล (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)

V_g = ปริมาตรของกลีเซอรอล (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

Mw_g = น้ำหนักโมเลกุลของกลีเซอรอล (กรัมต่อโมล)

ตัวอย่างการคำนวณ สัดส่วนโดยโมลของสลักกรดอกทานโอินอกที่อัตราเร็วในการไหล 0.0022 เมตรต่อวินาที

ตารางที่ ก.3 ค่าของตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.13) เพื่อหาสัดส่วนโดยโมลของสลักกรดอกทานโอินอกที่ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0022 เมตรต่อวินาที

ตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
ρ_o	0.91	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
V_o	0.00021	ลูกบาศก์เซนติเมตร
Mw_o	144	กรัมต่อโมล
ρ_g	1.257	กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
V_g	0.00016	ลูกบาศก์เซนติเมตร
Mw_g	92	กรัมต่อโมล

$$\alpha_o = \frac{(0.91 \text{ g/cm}^3)(0.00021 \text{ cm}^3) / (144 \frac{\text{g}}{\text{mole}})}{\left(\frac{0.091 \text{ g/cm}^3 \times 0.00021 \text{ cm}^3}{144 \frac{\text{g}}{\text{mole}}} + \frac{1.257 \text{ g/cm}^3 \times 0.00016 \text{ cm}^3}{92 \frac{\text{g}}{\text{mole}}} \right)}$$

$$\alpha_o = 0.38$$



ดังนั้น สัดส่วนโดยโมลของสลักกรดอกทานโออีกที่ความเร็วในการไหลที่ 0.0022 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 0.38

3. สมการการคำนวณสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอล

$$\alpha_g = 1 - \alpha_o \quad (\text{ก.14})$$

โดยที่ α_g = สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอล

α_o = สัดส่วนโดยโมลของกรดอกทานโออีก

ตัวอย่างการคำนวณ สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลที่อัตราเร็วในการไหล 0.0022 เมตรต่อวินาที โดยที่ สัดส่วนโดยโมลของสลักกรดอกทานโออีกเท่ากับ 0.38

$$\alpha_g = 1 - 0.38 = 0.62$$

ดังนั้น สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลที่ความเร็วในการไหลที่ 0.0022 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 0.62

4. การคำนวณพื้นที่ผิวของสลักกรดอกทานโออีก

สลักกรดอกทานโออีกมีลักษณะเหมือนหัวกระสุนโดยจะประกอบไปด้วย 3 ส่วนได้แก่ ส่วนหัวที่เป็นรูปครึ่งวงรี ส่วนลำตัวสลักเป็นรูปทรงกระบอก และส่วนท้ายเป็นวงกลม การหาพื้นที่ผิวของสลักกรดอกทานโออีกเกิดจากผลรวมของพื้นที่ครึ่งวงรี พื้นที่ทรงกระบอก และพื้นที่วงกลมตามสมการที่ (ก.15)

สมการในการคำนวณ พื้นที่ผิวของสลักกรดอกทานโออีก

$$A_s = \frac{ar\pi}{8} + 2\pi rh + \pi r^2 \quad (\text{ก.15})$$

โดยที่ A_s = พื้นที่ผิวสลัก (ตารางมิลลิเมตร)

a = ระยะความยาวในส่วนของครึ่งวงรี (มิลลิเมตร)

r = รัศมีของสลัก (มิลลิเมตร)

h = ระยะความยาวในส่วนของทรงกระบอก (มิลลิเมตร)

ตัวอย่างการคำนวณ พื้นที่ผิวของสลักกรดอกททาน็อก 0.0022 เมตรต่อวินาที
ตารางที่ ก.4 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.15) เพื่อหาพื้นที่ผิวของสลักกรดอกททาน็อกที่
ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0022 เมตรต่อวินาที

ตัวแปร	ค่าตัวแปร	หน่วย
a	0.319	มิลลิเมตร
r	0.285	มิลลิเมตร
h	0.631	มิลลิเมตร

$$A_s = \left(\frac{0.319 \times 0.285 \times \left(\frac{22}{7}\right)}{8} \right) + \left(2 \times \left(\frac{22}{7}\right) \times 0.285 \times 0.631 \right) + \left(\left(\frac{22}{7}\right) \times (0.285)^2 \right)$$

$$A_s = 1.42 \text{ mm}^2$$

ดังนั้น พื้นที่ผิวของสลักกรดอกททาน็อกที่ความเร็ว 0.0022 เมตรต่อวินาที เท่ากับ 1.42 ตาราง
มิลลิเมตร

5. การคำนวณร้อยละการเปลี่ยนไปของกรดอกททาน็อกและกลีเซอรอล

สมการที่ใช้คำนวณหาร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของกรดอกททาน็อกคือ สมการที่ (ก.16)

$$\% \text{ Conversion} = \frac{(\text{Mole feed} - \text{Mole in sample})}{\text{Mole feed}} \times 100 \quad (\text{ก.16})$$

โดยที่ % Conversion = ร้อยละการเปลี่ยนไปของกรดอกททาน็อก

Mole feed = จำนวนโมลของสารที่ป้อนเครื่องปฏิกรณ์

Mole in sample = จำนวนโมลของสารที่เหลือจากปฏิริยาเคมี

ตัวอย่างการคำนวณ ร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของกรดอกททาน็อกและกลีเซอรอลที่เวลาในการ
เกิดปฏิริยาเคมี 35 นาที

ตารางที่ ก.5 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.16) เพื่อหาร้อยการเปลี่ยนแปลงไปของกลีเซ
อรอลและกรดอกททาน็อกที่เวลาในการเกิดปฏิริยาเคมี 35 นาที

Mole feed		Mole in sample	
กลีเซอรอล	กรดอกททาน็อก	กลีเซอรอล	กรดอกททาน็อก
4.01×10^{-5}	1.55×10^{-5}	2.79×10^{-5}	4.09×10^{-6}

$$\% \text{ Conversion of Glycerol} = \frac{(4.01 \times 10^{-5} - 2.79 \times 10^{-5})}{4.01 \times 10^{-5}} \times 100$$

$$\% \text{ Conversion of Glycerol} = 30.46 \%$$

ดังนั้นร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของกลีเซอรอลที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที เท่ากับ 30.46

$$\% \text{ Conversion of Octanoic acid} = \frac{(1.55 \times 10^{-5} - 4.09 \times 10^{-6})}{1.55 \times 10^{-5}} \times 100$$

$$\% \text{ Conversion of Octanoic acid} = 73.54 \%$$

ดังนั้นร้อยละการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที เท่ากับ 73.5

6. การคำนวณร้อยละผลได้

สมการที่คำนวณร้อยละผลได้ของสารผลิตภัณฑ์คือ สมการที่ (ก.17)

$$\% \text{ Yield} = \frac{\text{Mole product in sample}}{\text{Mole feed of octanoic acid}} \times 100 \quad (\text{ก.17})$$

โดยที่ $\% \text{ Yield} =$ ร้อยละผลได้ของสารผลิตภัณฑ์

$\text{Mole product in sample} =$ โมลของผลิตภัณฑ์ในสารตัวอย่าง

$\text{Mole feed of octanoic acid} =$ โมลของกรดออกทานอิกที่ป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์

ตัวอย่างการคำนวณ ร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ที่เกิดขึ้นที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที ตารางที่ ก.6 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.17) เพื่อหาร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที

Mole feed of octanoic acid	Mole in sample of monoglycerides
1.55×10^{-5}	1.12×10^{-5}

$$\% \text{ Yield of monoglycerides} = \frac{1.12 \times 10^{-5}}{1.55 \times 10^{-5}} \times 100$$

$$\% \text{ Yield of monoglycerides} = 72.52 \%$$

ดังนั้น ร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที เท่ากับ 72.52

7. การคำนวณร้อยละการเลือกสรร

สมการคำนวณร้อยละการเลือกสรรคือ สมการที่ (ก.18)

$$\% \text{ Selectivity} = \frac{\text{mole of product}}{\text{mole total product}} \times 100 \quad (\text{ก.18})$$

โดยที่ $\% \text{ Selectivity}$ = ร้อยละการเลือกสรร

mole of product = โมลของสารผลิตภัณฑ์ที่สนใจ

$\text{mole total product}$ = โมลของสารผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

ตัวอย่างการคำนวณ ร้อยละการเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที

ตารางที่ ก.7 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.18) เพื่อหาร้อยละการเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที

Mole of monoglycerides	1.12×10^{-5}
Mole of diglycerides	9.30×10^{-7}

$$\% \text{ Selectivity monoglycerides} = \frac{1.12 \times 10^{-5}}{(9.30 \times 10^{-7} + 1.12 \times 10^{-5})} \times 100$$

$$\% \text{ Selectivity monoglycerides} = 85.77$$

ดังนั้น ร้อยละการเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที เท่ากับ 85.77

ภาคผนวก ข.

เส้นสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration curve)

เส้นสอบเทียบมาตรฐานเป็นเส้นตรงแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของสารตัวอย่างต่อน้ำหนักของสารละลายมาตรฐานกับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ใต้พีคของสารตัวอย่างต่อพื้นที่ใต้พีคของสารละลายมาตรฐาน การสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐานมีวัตถุประสงค์เพื่อนำไปเทียบหาปริมาณของสารตัวอย่างที่ตรวจพบในเครื่องตรวจวัดเดียวกัน เนื่องจากจากการวิเคราะห์หาปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์จะใช้เทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี ซึ่งข้อมูลที่ได้จากเทคนิคนี้คือพื้นที่ใต้พีคของสารชนิดต่าง ๆ ที่ปรากฏในช่วงเวลาต่าง ๆ กัน โดยสารชนิดเดียวกันจะปรากฏพีคที่ตำแหน่งเดียวกันเสมอ ดังนั้นการวิเคราะห์หาผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ จำเป็นต้องสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐานของสารทั้งหมดที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบชนิดของสาร และวิเคราะห์หาปริมาณของสารที่มีอยู่ในสารตัวอย่างนั้น ในงานวิจัยนี้สารที่คาดว่าจะมีอยู่สารตัวอย่าง ได้แก่ กลีเซอรอล กรดออกทาทานอิก โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ โดยใช้ เมทิลอันติคาโนเอต เป็นสารละลายมาตรฐาน

ขั้นตอนการสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐานนำเอาสารที่บริสุทธิ์ชนิดเดียวกับสารที่คาดว่าจะมีในสารตัวอย่างทั้งหมดมาเตรียมความเข้มข้นของสารแต่ละชนิด 5 ความเข้มข้น โดยใช้โพรินเป็นตัวทำละลาย และเติมสารละลายมาตรฐานเมทิลอันติคาโนเอตที่มีความเข้มข้น 1.5346 กรัมต่อมิลลิลิตร ปริมาณ 100 ไมโครลิตร เพื่อใช้เป็นสารอ้างอิงปริมาณความคลาดเคลื่อนจากเครื่องตรวจวัดทำให้ข้อมูลที่วิเคราะห์ได้มีความแม่นยำและน่าเชื่อถือมากขึ้น หลังจากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟีและนำข้อมูลที่ได้มาสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐาน ดังเช่นตัวอย่างการสร้างเส้นโค้งสอบเทียบของโมโนกลีเซอไรด์มาตรฐาน

ตัวอย่างการสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์

นำโมโนกลีเซอไรด์ที่บริสุทธิ์มาเตรียมความเข้มข้น 5 ความเข้มข้น แล้วนำมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีสามารถทราบพื้นที่ใต้พีคของสารแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ ข.1 ซึ่งแสดงข้อมูลสำหรับการสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์มาตรฐาน พบว่าพื้นที่ใต้พีคของโมโนกลีเซอไรด์มาตรฐานมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของโมโนกลีเซอไรด์มาตรฐานที่เพิ่มขึ้น

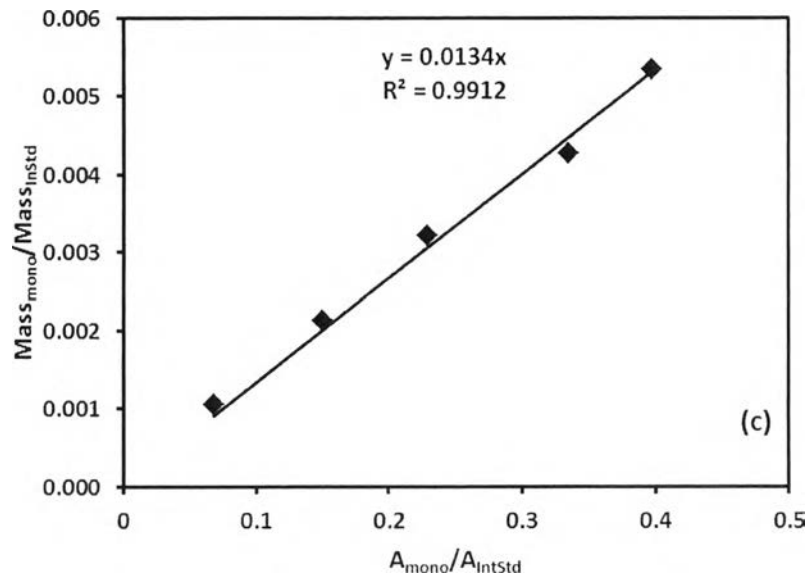
ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจากรูปกราฟโครมาโทแกรมเพื่อสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐานของโมนอกลิเซอไรด์มาตรฐาน

น้ำหนักโมนอกลิเซอไรด์มาตรฐาน/ น้ำหนักสารละลายมาตรฐาน	Retention time (min)		พื้นที่พีค	
	โมนอกลิ เซอไรด์ มาตรฐาน	สารละลาย มาตรฐาน	โมนอกลิ เซอไรด์ มาตรฐาน	สารละลาย มาตรฐาน
0.00171	4.869	6.134	5044.2	5609.0
0.00344	4.944	6.181	11352.7	6928.4
0.00513	4.976	6.171	14937.5	6262.3
0.00689	5.043	6.193	22580.2	6943.2
0.00864	5.099	6.219	29891.7	7916.8

เมื่อสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของโมนอกลิเซอไรด์ต่อน้ำหนักของสารละลายมาตรฐานกับอัตราส่วนระหว่างพื้นที่พีคของโมนอกลิเซอไรด์ต่อพื้นที่พีคของสารละลายมาตรฐาน ดังแสดงในรูปที่ ข.1 ได้เส้นสอบเทียบมาตรฐานของโมนอกลิเซอไรด์มาตรฐาน และมีความสัมพันธ์ตามสมการเส้นตรงดังแสดงในสมการที่ (ข.1)

$$y = 0.0134x \quad (\text{ข.1})$$

โดย y คือ อัตราส่วนระหว่างน้ำหนักของสารตัวอย่างต่อน้ำหนักของสารละลายมาตรฐาน
 x คือ อัตราส่วนระหว่างพื้นที่พีคของสารตัวอย่างต่อพื้นที่พีคของสารละลายมาตรฐาน



รูปที่ ข.1 เส้นสอบเทียบมาตรฐานของโมนอกลิเซอไรด์

ในการสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐานของกลีเซอรอล กรดออกทานอิก ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์สามารถทำได้ด้วยวิธีนี้เช่นเดียวกัน โดยที่สมการของเส้นสอบเทียบมาตรฐานของกลีเซอรอล กรดออกทานอิก ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่ช่วงเวลาที่ปรากฏพีคต่าง ๆ แสดงในตารางที่ ข.2

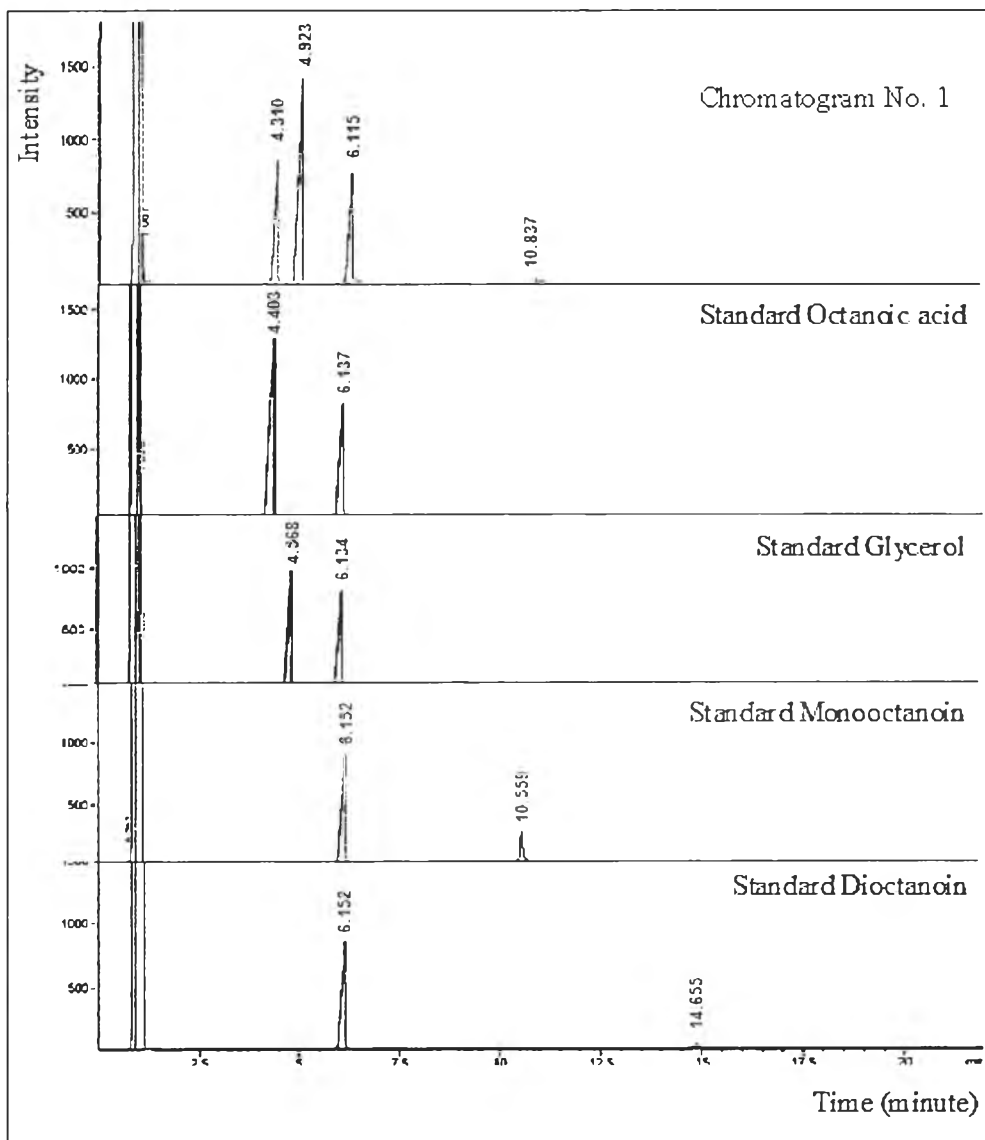
ตารางที่ ข.2 สมการความสัมพันธ์ของเส้นสอบเทียบมาตรฐานของสารมาตรฐานที่ช่วงเวลาที่ปรากฏพีค

สารมาตรฐาน	เวลาที่ปรากฏพีค (นาที)	สมการความสัมพันธ์
กรดออกทานอิก	4.4	$y = 0.0152x$
กลีเซอรอล	5.0	$y = 0.0105x$
โมนอกลิเซอไรด์	10.5	$y = 0.0134x$
ไดกลีเซอไรด์	14.0	$y = 0.0123x$
ไตรกลีเซอไรด์	18.7	$y = 0.0204x$

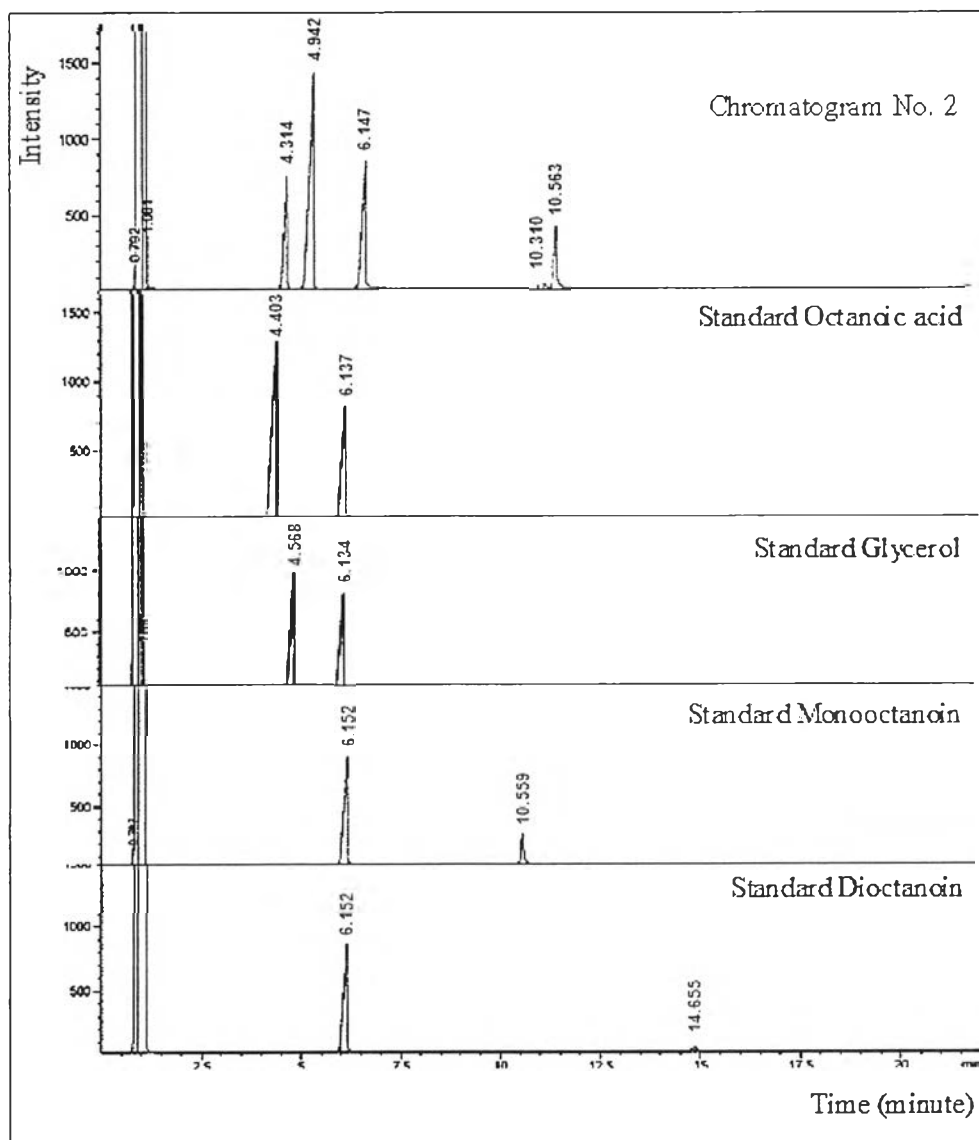
ภาคผนวก ค.
โครมาโทแกรม

ตารางที่ ค.1 ภาวะในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์และโครมาโทแกรม

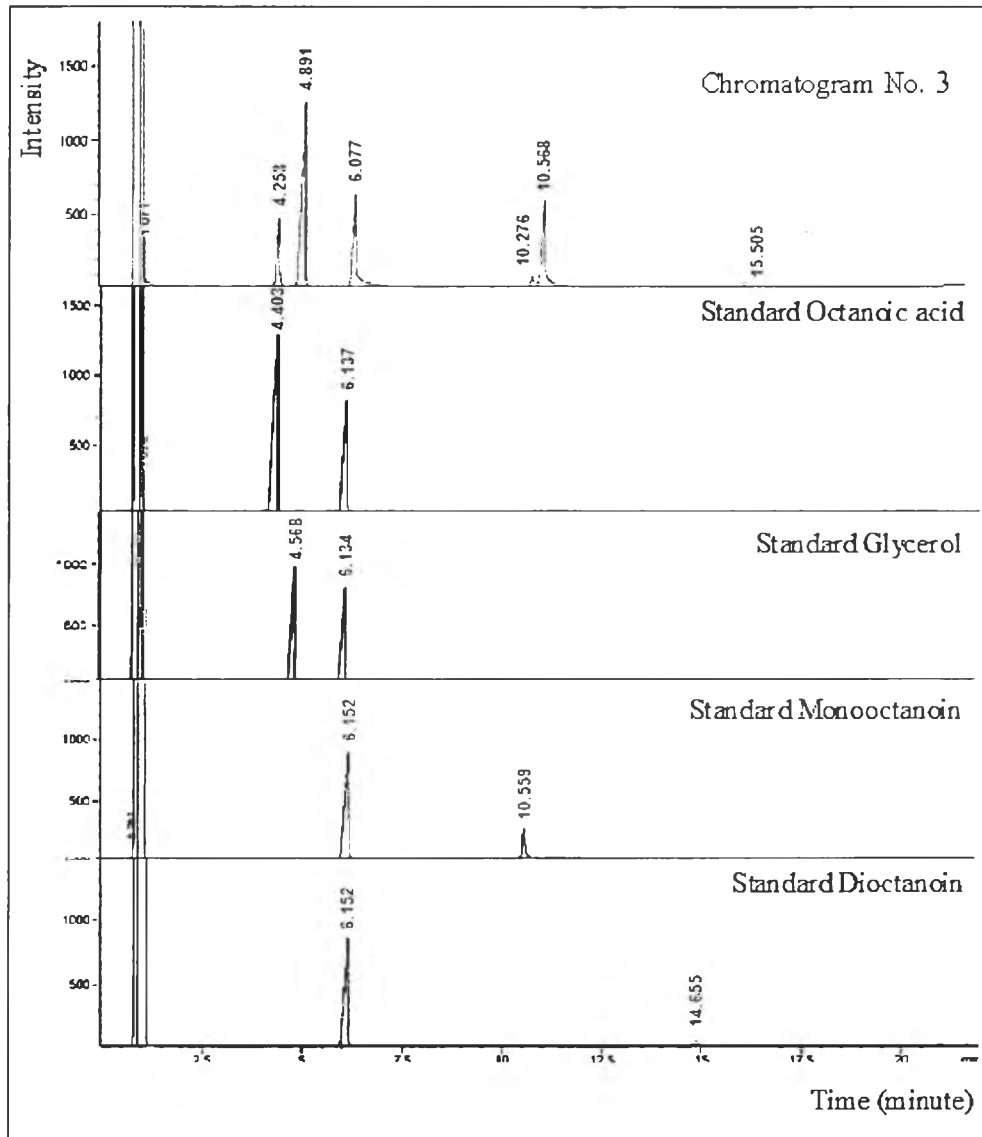
Conditions			
Temperature (°C)	Mole ratio glycerol : octanoic acid	Reaction time (min)	Chromatogram No.
80	2 : 1	25	1
100	2 : 1	25	2
110	2 : 1	25	3
120	2 : 1	25	4
140	2 : 1	25	5
160	2 : 1	25	6
180	2 : 1	25	7
120	3 : 1	25	8
120	4 : 1	25	9
120	4.5 : 1	25	10
120	2 : 1	15	11
120	2 : 1	20	12
120	2 : 1	30	13
120	2 : 1	35	14



รูปที่ ค.1 โครมาโทแกรมหมายเลข 1

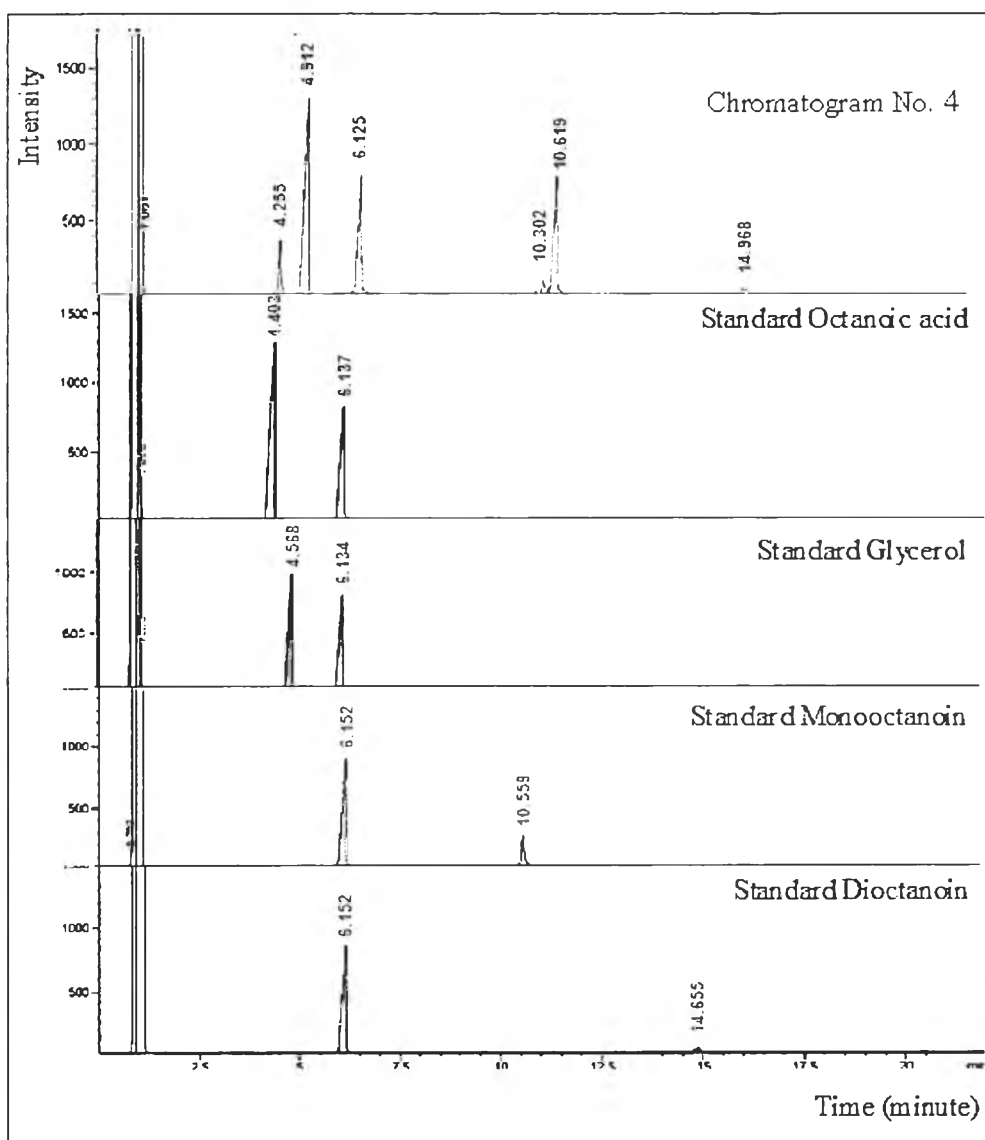


รูปที่ ค.2 โครมาโทแกรมหมายเลข 2

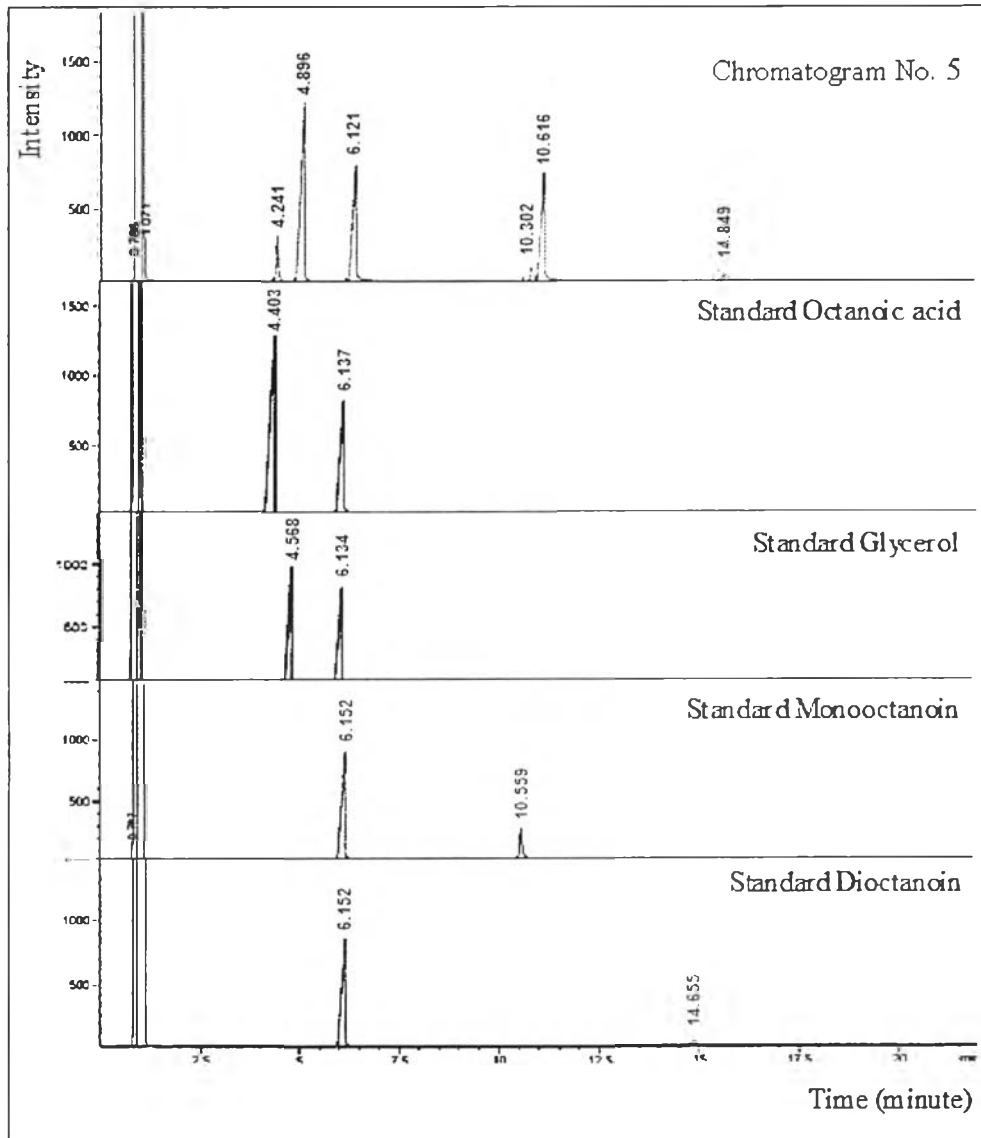


รูปที่ ค.3 โครมาโทแกรมหมายเลข 3



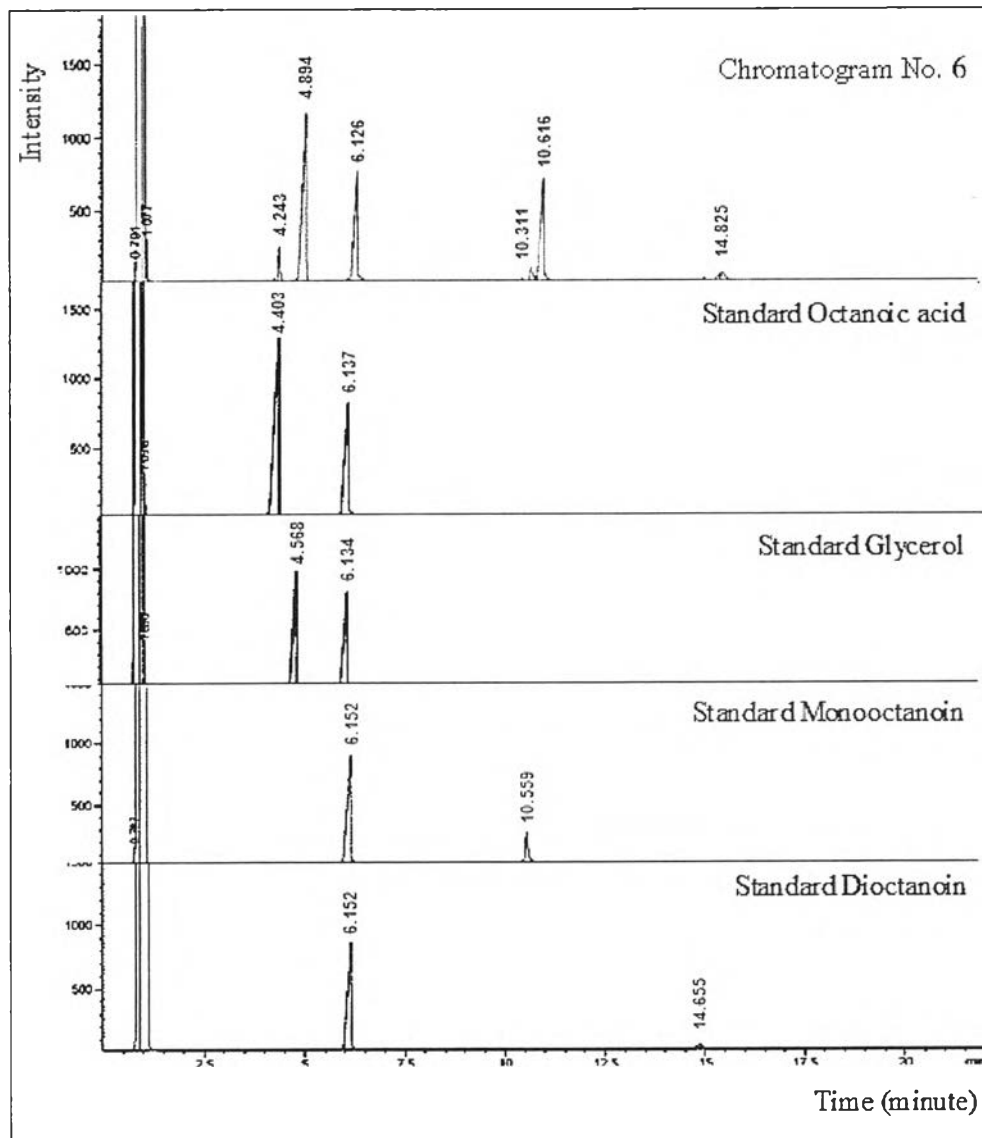


รูปที่ ค.4 โครมาโทแกรมหมายเลข 4

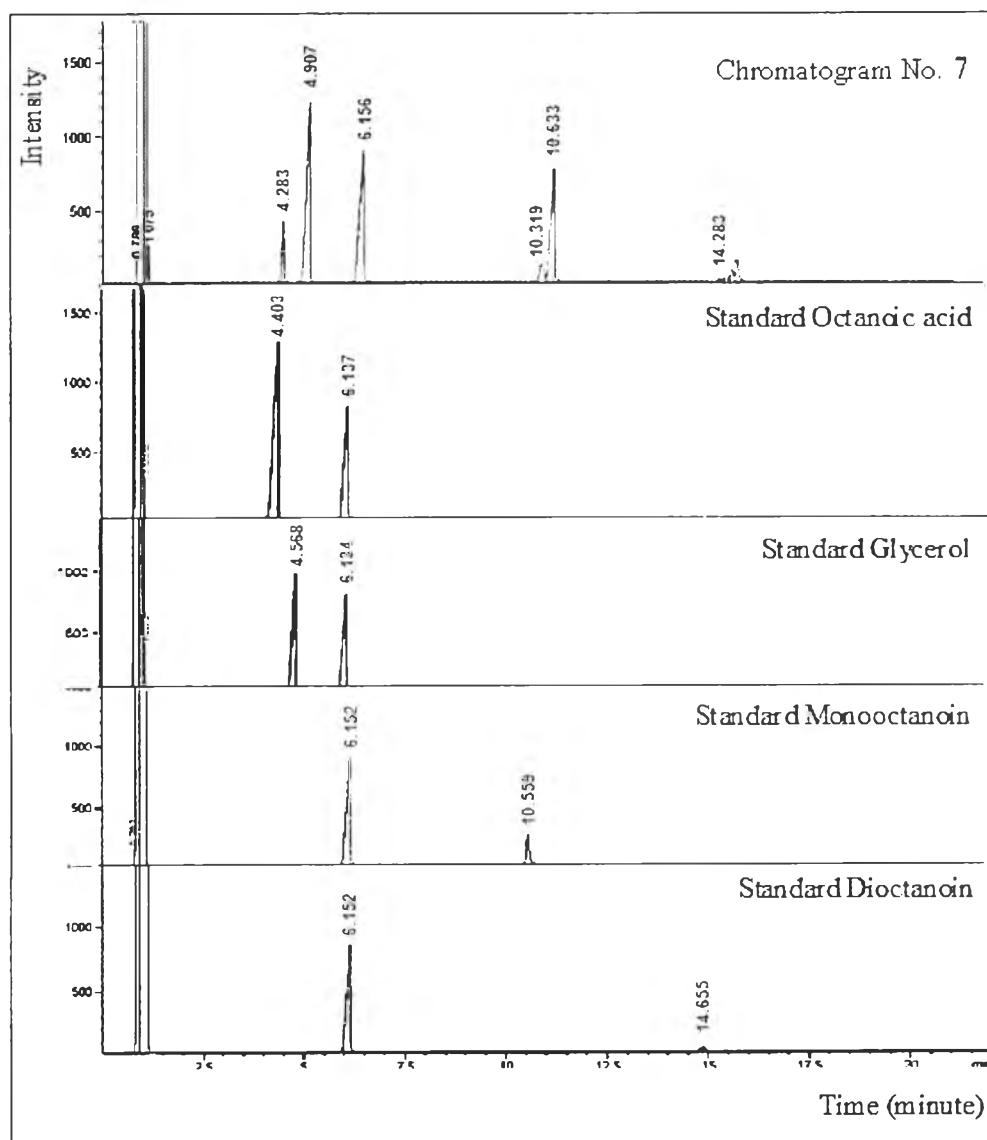


รูปที่ ค.5 โครมาโทแกรมหมายเลข 5

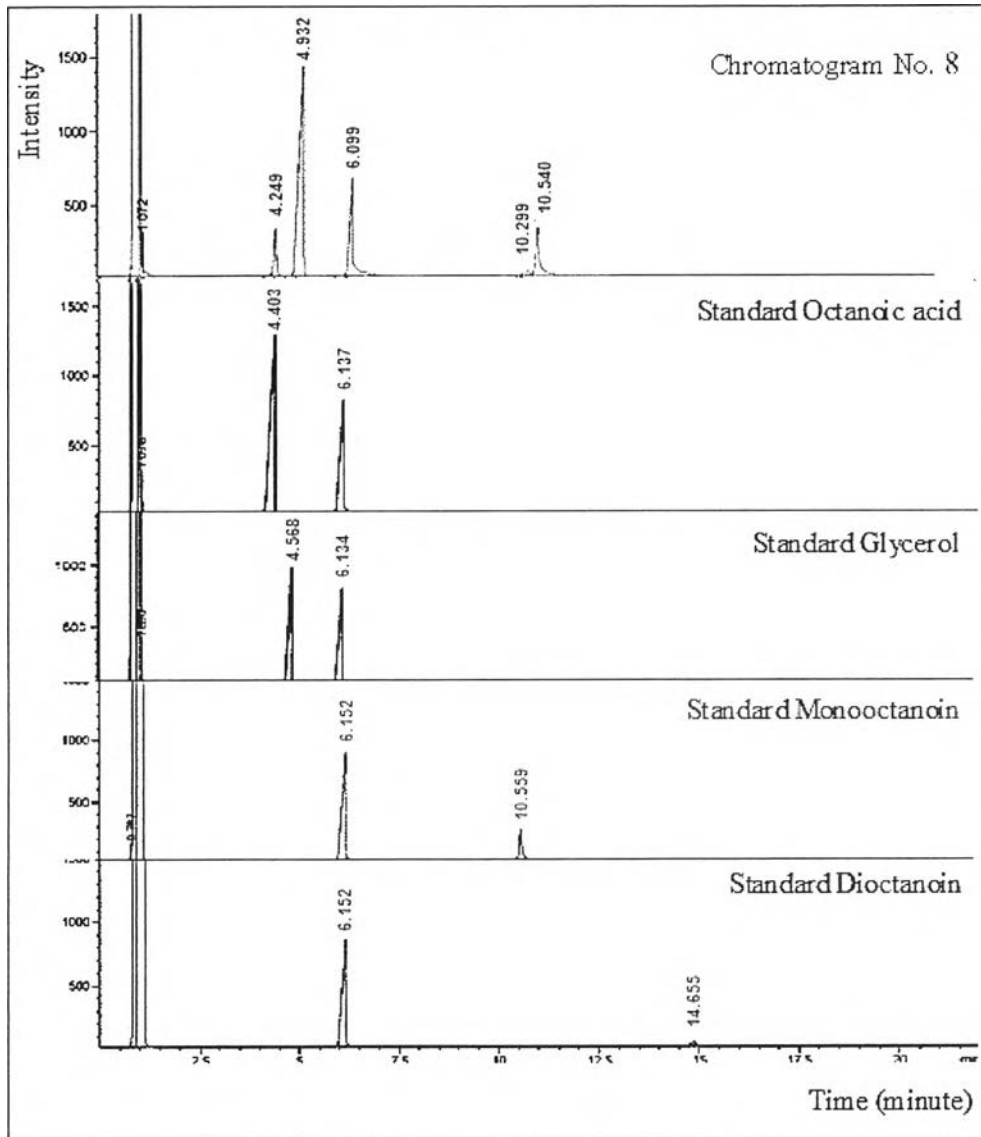




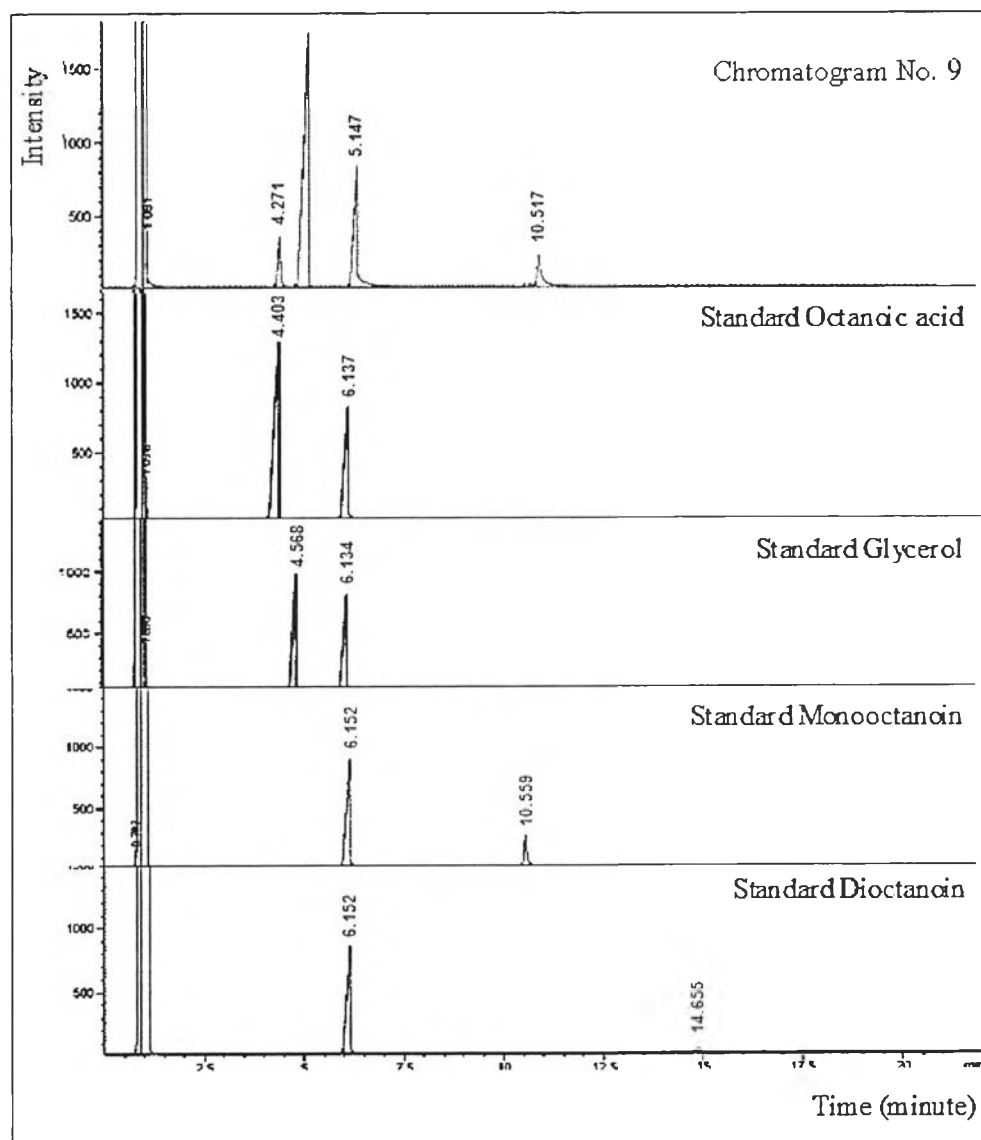
รูปที่ ค.6 โครมาโทแกรมหมายเลข 6



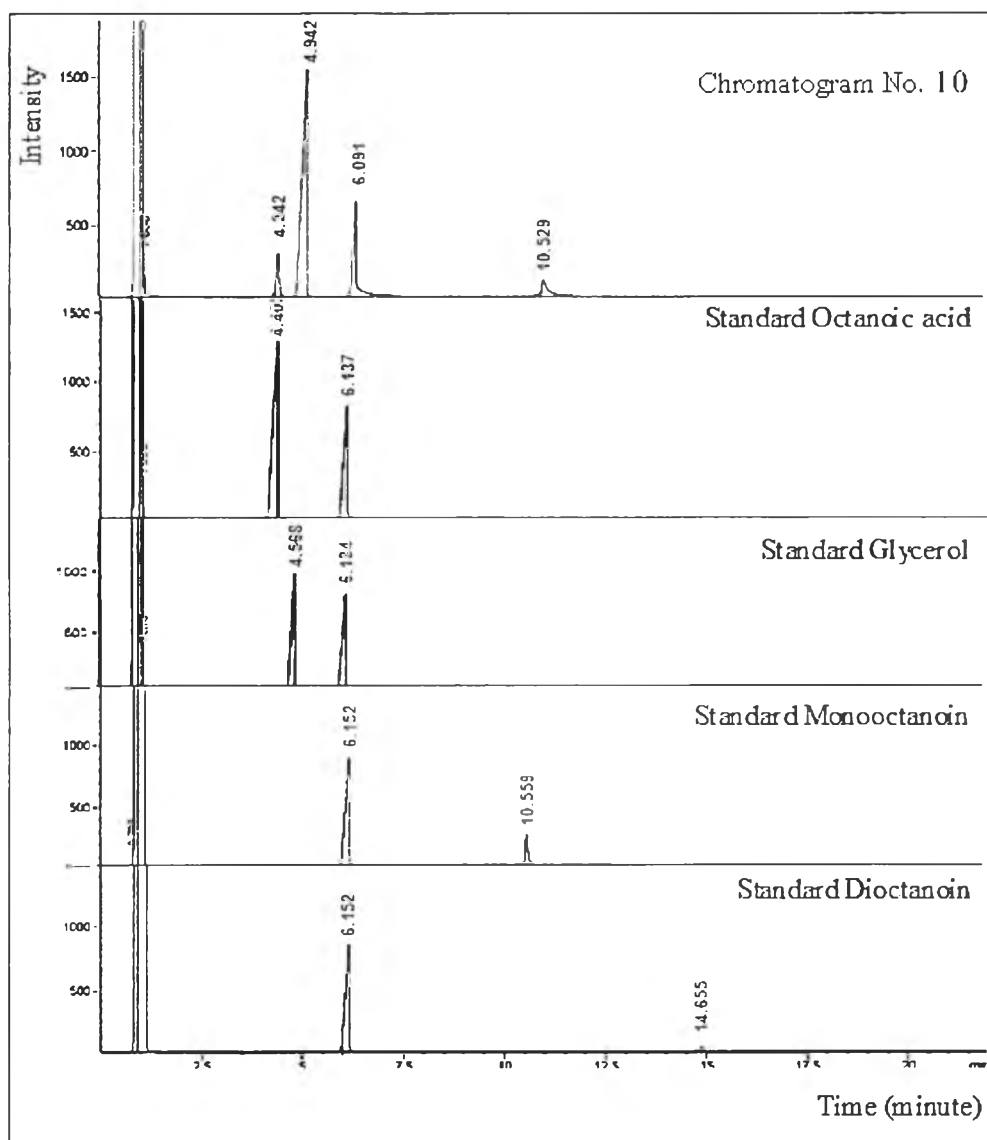
รูปที่ ค.7 โครมาโทแกรมหมายเลข 7



รูปที่ ค. 8 โครมาโทแกรมหมายเลข 8

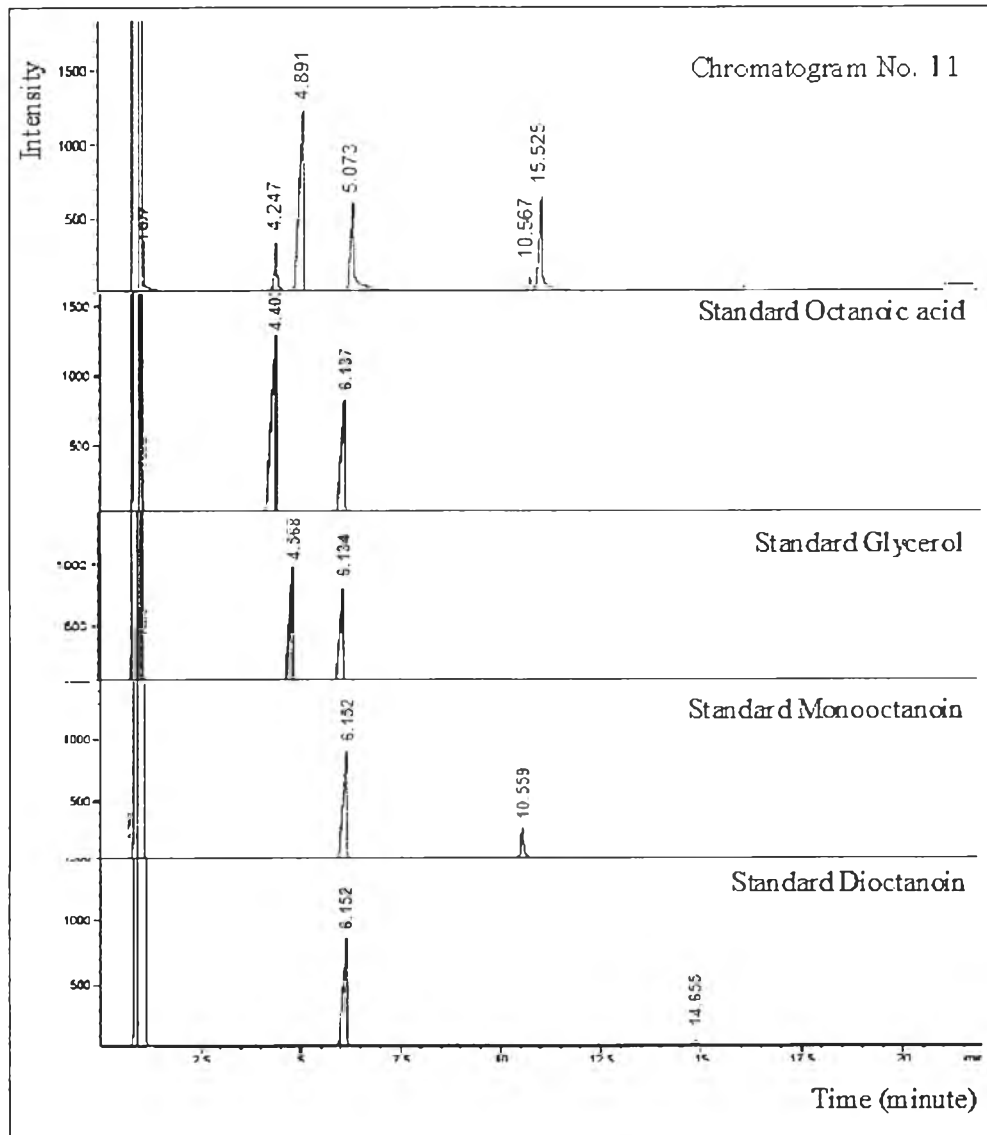


รูปที่ ค.9 โครมาโทแกรมหมายเลข 9



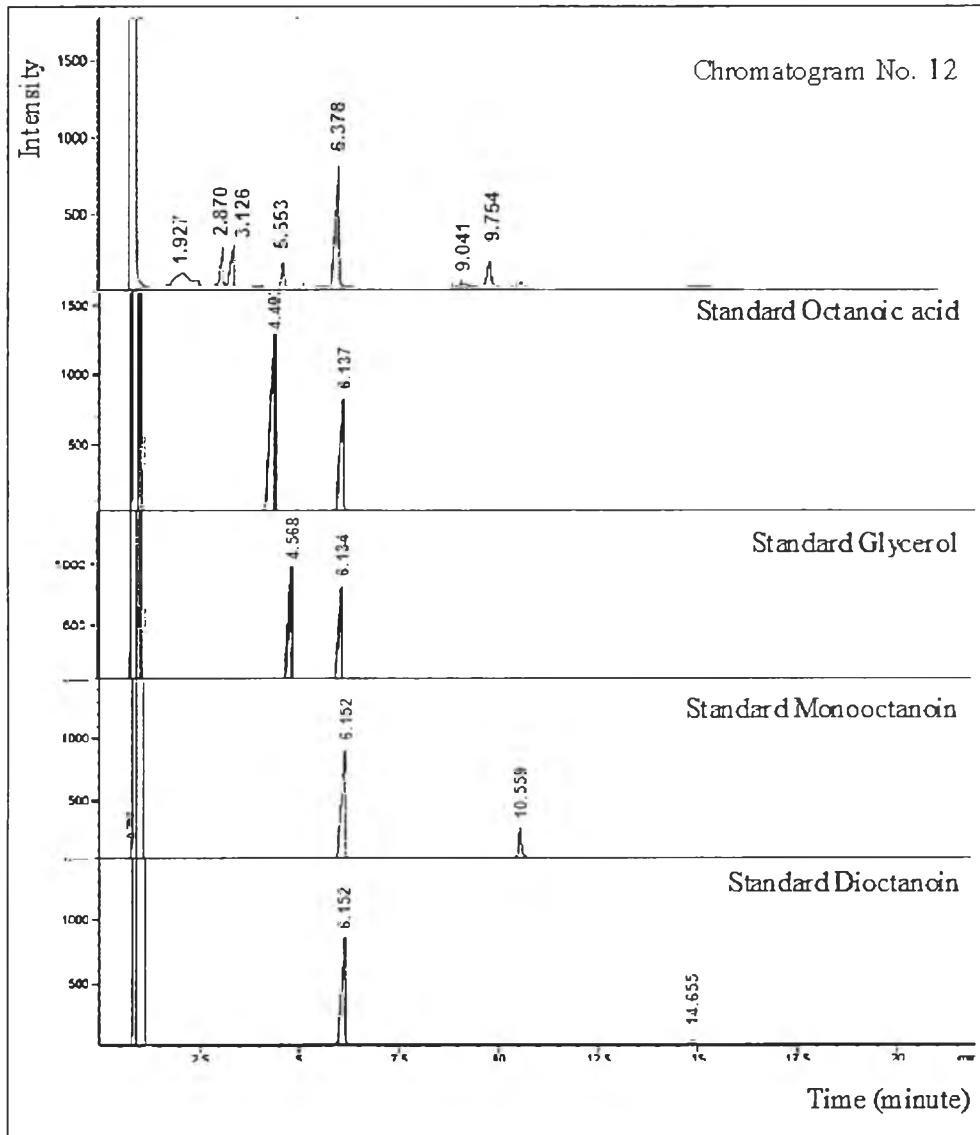
รูปที่ ค.10 โครมาโทแกรมหมายเลข 10





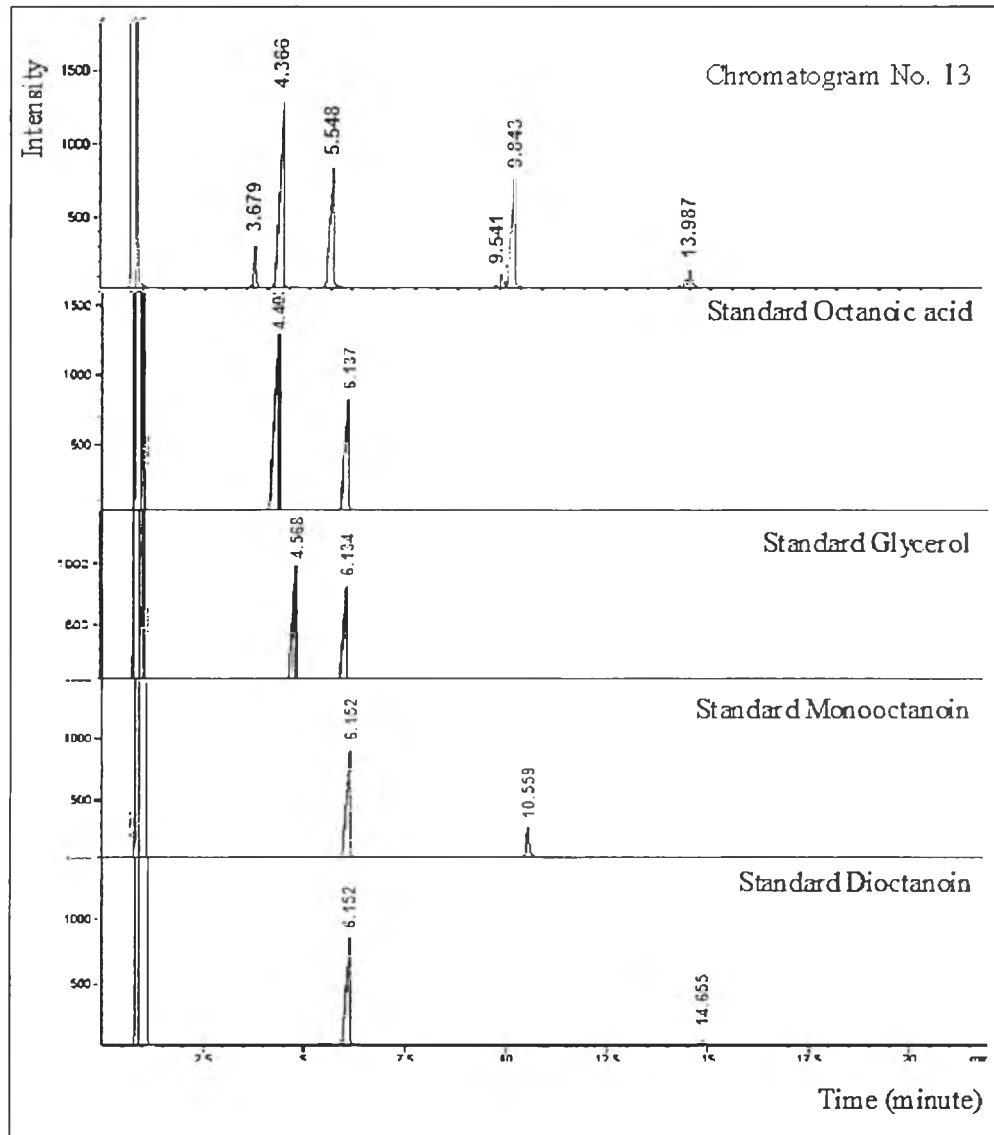
รูปที่ ค.11 โครมาโทแกรมหมายเลข 11





รูปที่ ค.12 โครมาโทแกรมหมายเลข 12

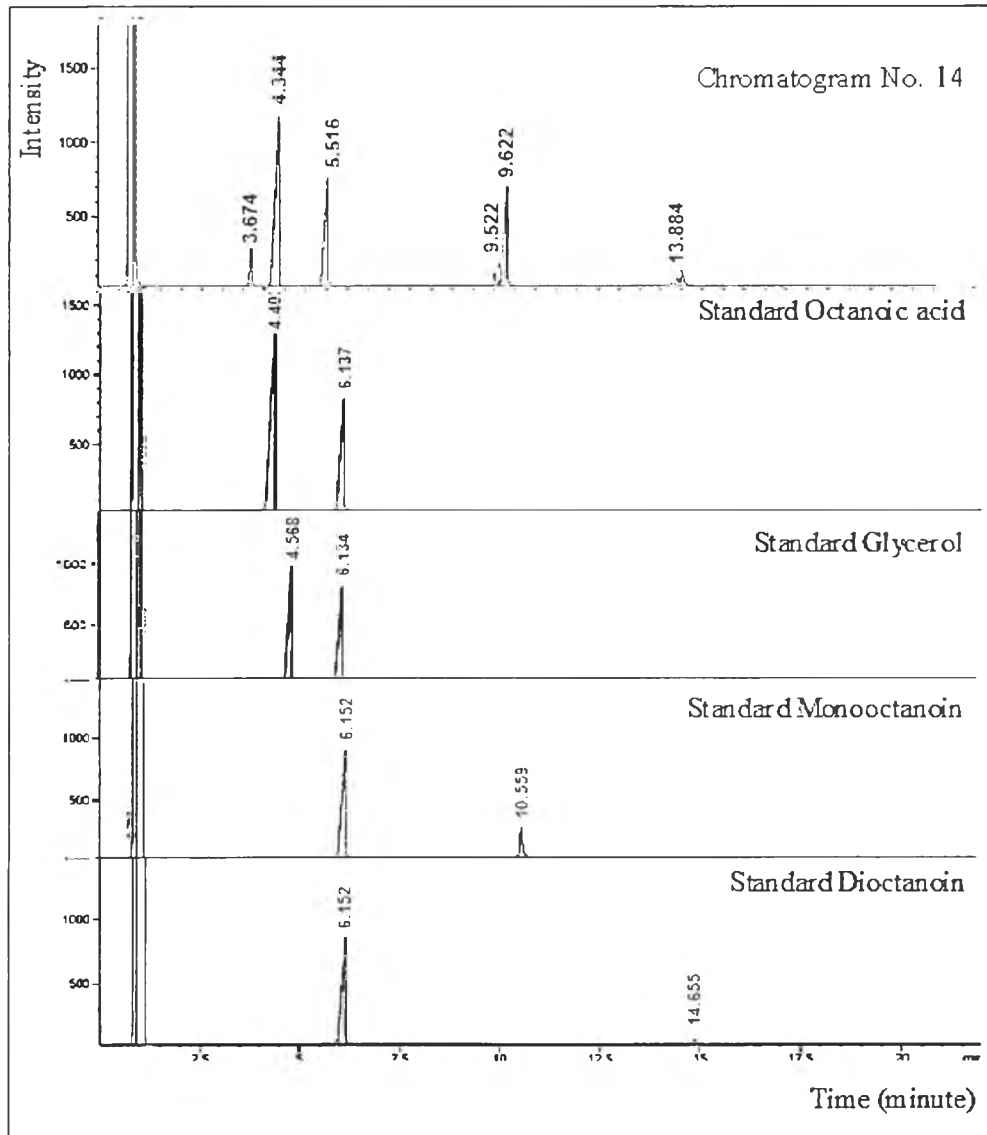




รูปที่ ค.13 โครมาโทแกรมหมายเลข 13



3542176982



รูปที่ ค.14 โครมาโทแกรมหมายเลข 14

ภาคผนวก ง.
ข้อมูลสารตั้งต้น

ตารางที่ ง.1 ข้อมูลที่สำคัญของสารตั้งต้น

สมบัติ	กลีเซอรอล	กรดออกทาโนอิก
สูตรโมเลกุล	$C_3H_5(OH)_3$	$C_8H_{16}O_2$
มวลโมเลกุล (กรัมต่อโมล)	92.09	144.22
ความหนาแน่น (กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร)	1.261	0.910
จุดหลอมเหลว (องศาเซลเซียส)	19.0	16.7
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	290.0	239.7
ความถ่วงจำเพาะ	1.2636	0.9088
ความหนืด (ปาสคาลวินาที)	1.2	5.8



3542176982

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายเมธี ศิริศิลป์ เกิดวันที่ 12 ส.ค. 2530 ที่อำเภอแม่แตง จังหวัดเชียงใหม่ ปัจจุบันอาศัยอยู่ที่บ้านเลขที่ 80/1650 ตำบลบางเมือง อำเภอเมือง จังหวัดสมุทรปราการ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย (ม.6) เมื่อ พ.ศ. 2548 จากโรงเรียนนวมินทราชูทิศ พายัพ อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ และจบการศึกษาระดับปริญญาตรีเมื่อ พ.ศ. 2552 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์ อำเภอเมือง จังหวัดนครปฐม ได้เข้าร่วมนำเสนอผลงานทางวิชาการในหัวข้อ "ความเลือกสรรในการสังเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพพิลลารี (Selective synthesis of monoglycerides in a capillary microreactor)" ในงาน 10 th Eco - energy and materials science and engineering symposium เมื่อวันที่ 5-8 ธันวาคม พ.ศ. 2555 ณ โรงแรมสุโขทัยแกรนด์ จังหวัดอุบลราชธานี

