บทที่ 2

วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย

2.1.1 น้ำเสีย ที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจากสารอินทรีย์หลัก คือ โซเดียมอะซิเตด ที่มีความเข้มข้นซีโอดี (COD) เท่ากับ 3,000 6,000 9,000 และ 12,000 มก./ล. โดยมีสารบัฟเฟอร์และสารอาหารอื่นๆที่จำเป็นประกอบด้วยดังนี้

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบและสมบัติของน้ำเสียสังเคราะห์

ความเข้มข้นซีโอดี (mg/l)	3,000	6,000	9,000	12,000
-องค์ประกอบ				
โซเดียมอะซิเตท (CH_3COOH, g/l)	6.270	12.54	18.81	25.08
โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4, g/l)	0.625	1.250	1.875	2.500
แอมโมเนียม คลอไรด์ (NH_4Cl, g/l)	0.250	0.500	0.750	1.000
กรดไฮโดรคลอริก (HCl, ml/l)	0.250	0.500	0.750	1.000
นิเกิล คลอไรด์ ($NiCl_2$, mg/l)	0.250	0.500	0.750	1.000
เฟอร์ริก คลอไรด์ ($FeCl_3$ mg/l))	0.250	0.500	0.750	1.000
-ลักษณะสมบัติอื่นๆ				
สี	ใสไม่มีสี	ใสไม่มีสี	ใสไม่มีสี	ใสไม่มีสี
กรดไขมันระเหยง่าย (mg/l CH_3COOH)	37.14	67.44	92.85	142.7
สภาพด่าง (mg/l $CaCO_3$)	72.32	91.87	151.49	146.3
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย (mg/l)	12	24	32	35
ความเป็นกรด-ด่าง	5.848	5.715	5.606	5.596

2.1.2 จุลินทรีย์แบบไร้อากาศ ได้จากตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานปลาป่น

2.1.3 วิธีการวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ

ตัวแปร	วิธีการ#	อ้างอิง
ซีโอดี	Dichromate open reflux method	ALHA, AWWA, and WEF, 1995
กรดไขมันระเหยง่าย	Direct titration	ALHA, AWWA, and WEF, 1995
สภาพด่าง	Titration method	ALHA, AWWA, and WEF, 1995
ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย	Geometric method	ALHA, AWWA, and WEF, 1995

#รายละเอียดดูในภาคผนวก

2.2 อุปกรณ์

2.2.1 อุปกรณ์สำหรับการทดลองในห้องปฏิบัติการ ดังภาพประกอบ 2.1 และ 2.2

2.2.1.1 ถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ มีลักษณะเป็นปริซึมทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า ทำด้วยแก้ว จำนวน 3 ถัง มีขนาดมิติ ดังตารางที่ 2.2 ดังนี้

ตารางที่ 2.2 ขนาดถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ

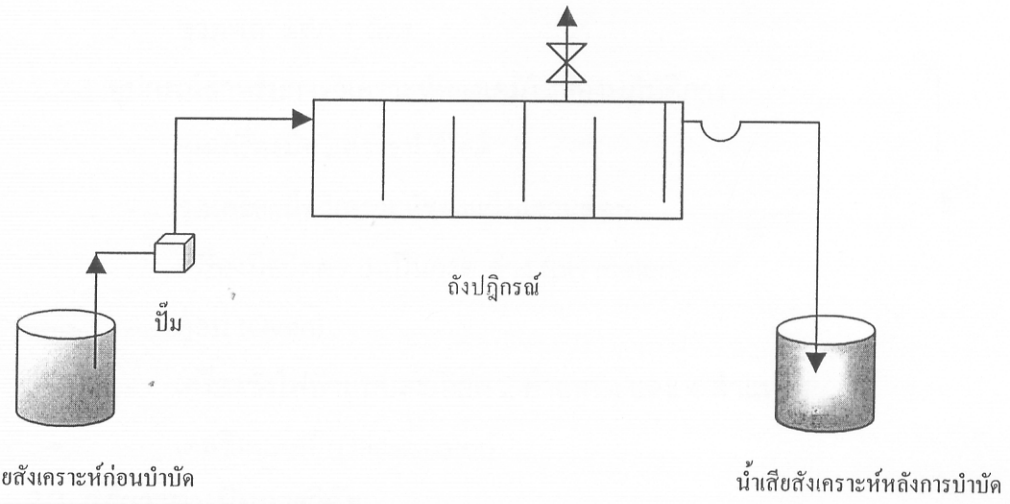
ถังปฏิกรณ์หมายเลข	1	2	3
ขนาดภายนอก			
-ความยาว (ซม.)	88	88	88
-ความกว้าง (ซม.)	22	22	22
-ความสูง (ซม.)	24	24	24
ปริมาตรน้ำที่บรรจุ (ล.)	36.6	36.6	36.6
จำนวนช่องภายในถังปฏิกรณ์	5	5	5
ปริมาตรช่อง (ซม.^{3})	4,680	4,680	4,680
ความสูงของระดับน้ำ (ซม.)	21	21	21
จำนวนจุดเก็บตัวอย่าง	5	5	5

2.2.1.2 ตัวกลางกรองของแต่ละถังปฏิกรณ์ มีสมบัติ (Specification) ดังตารางที่ 2.3

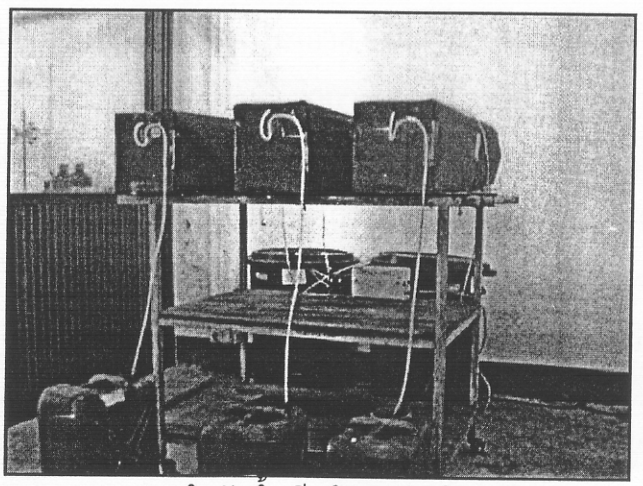
ตารางที่ 2.3 สมบัติของตัวกลางกรอง (Media properties)

ถังปฏิกรณ์หมายเลข	1	2	3
พารามิเตอร์			
-พื้นที่ผิวจำเพาะ ($ม^2/ม^3$)	100	358	423
-ช่องว่าง-(%)	82	74	70
-วัสดุ	Plastic	Plastic	Plastic
-เส้นผ่านศูนย์กลาง (ซม.)	1.905	0.794	0.635
-ความสูง (ซม.)	1	1	1

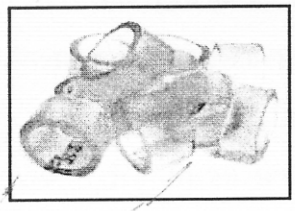
2.2.1.3 ปั๊ม (Peristatic pump) สำหรับป้อนน้ำเสียแก่ระบบ



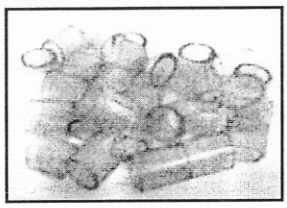
ภาพประกอบ 2.1 รายละเอียดของระบบบำบัดน้ำเสียจำลองในห้องปฏิบัติการ



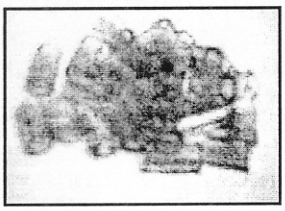
ภาพประกอบ 2.2 ระบบบำบัดน้ำเสียจำลองในห้องปฏิบัติการ



ก. พื้นที่ผิวจำเพาะ 100 ม^2/



ข. พื้นที่ผิวจำเพาะ 358 ม^2/



ค. พื้นที่ผิวจำเพาะ 423 ม^2/ม

ภาพประกอบ 2.3 ตัวกลางกรอง (Media) ในถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ

2.2.2 อุปกรณ์เก็บตัวอย่างน้ำ

- ถังพลาสติกขนาด 30 ลิตร
- ขวดพลาสติก 1 ลิตร

2.2.3 อุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ทางเคมีในห้องปฏิบัติการ

- ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ ซีโอดี
- ชุดเครื่องมือวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอย
- เครื่องมือวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
- ตู้อบ (Oven)
- เครื่องชั่งไฟฟ้าแบบละเอียด 2 ตำแหน่ง และ 4 ตำแหน่ง
- เดสซิเคเตอร์ (Dessiccator)

2.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

2.3.1 ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดของถัง ปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วนคือ

การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรองที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ ซึ่งมีการทดลองดังนี้

ในการเริ่มต้นระบบ (Start up) ทำการปรับสภาพตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจนของโรงงานผลิตปลาป่น โดยการเติมน้ำเสียสังเคราะห์ลงไปทุกๆ วัน วันละ 10 % ของปริมาณตะกอน จนครบ 100 % หลังจากนั้นนำน้ำเสียที่ได้รับการปรับสภาพแล้วนำไปใส่ลงในถังปฏิกรณ์ที่มีพื้นที่ผิวของตัวกลางกรองที่แตกต่างกันทั้ง 3 ชนิดจนเต็ม จากนั้นเติมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระยะเวลาการกักเก็บที่เท่ากัน คือ 10 วัน ภายใต้อุณหภูมิและสภาพภาพโดยปกติของห้องปฏิบัติการ การทดลองดำเนินต่อไปจนไปถึงสภาวะคงที่โดยกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนของซีโอดีน้ำเข้าและออกไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการทดลองต่อไปอีก 2 สัปดาห์จึงหยุดการทดลอง และทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ด้วยวิธีดังแสดงในตารางที่ 2.4

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของระยะเวลาการกักเก็บที่มีต่อประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศซึ่งมีการทดลองดังนี้

นำถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศที่ประสิทธิภาพในการบำบัดดีที่สุด มาปรับเปลี่ยนระยะเวลาการกักเก็บของน้ำเสีย กล่าวคือ 10 7 5 และ 4 วัน ภายใต้อุณหภูมิและสภาวะปกติของห้องปฏิบัติการ การทดลองดำเนินต่อไปจนไปถึงสภาวะคงที่โดยกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนของซีโอดีน้ำเข้าและออกไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการทดลองต่อไปอีก 2 สัปดาห์จึงหยุดการทดลองและทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ด้วยวิธีดังแสดงในตารางที่ 2.4

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดของถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ ซึ่งมีการทดลองดังนี้

นำถังปฏิกรณ์ในการทดลองที่ 2 ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด มาทำการปรับค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ กล่าวคือ 0.3 0.6 0.9 และ 1.2 กก.ซีโอดี/ลบ.ม.-วัน ที่ระยะกักเก็บที่ดีที่สุดในการทดลองที่ 2 ภายใต้อุณหภูมิและสภาพภาพโดยปกติของห้องปฏิบัติการ การทดลองดำเนินต่อไปจนไปถึงสภาวะคงที่โดยกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนของซีโอดีน้ำเข้าและออกไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการทดลองต่อไปอีก 2 สัปดาห์จึงหยุดการทดลอง และทำการวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ ด้วยวิธีดังแสดงในตารางที่ 2.4

จากทุกการทดลองนำข้อมูลที่ได้มาประมวลผลสภาวะการเดินระบบของตัวแปรต่างๆที่มีผลของประสิทธิภาพของระบบ และหาค่าความหนาของฟิล์มชีวะโดยใช้แบบจำลองฟิล์มชีวะของ Rittman and McCarty (1980a) เทียบกับค่าที่วัดได้จริงจากเครื่อง SEM

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดการวิเคราะห์

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์*
COD	Dichromate open reflux method
VSS	Dried at 103 ^{o}C/550 ^{o}C
pH	pH meter
VFA	Direct tritration method
Alkalinity	Direct tritration method
Biofilm Thickness	Scanning Electron Microscopy

* APHA,AWWA and WEF,1995, Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. 19th edition, American Public Health Association, Washington D.C.

2.3.2 สมการทางคณิตศาสตร์สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี

จากการทดลองเมื่อนำข้อมูลประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียทุกการทดลองหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นน้ำเสียซีโอดีทางเข้า (S_i) ความเข้มข้นน้ำเสียซีโอดีทางออก (S_e) ระยะเวลากักเก็บในถังปฏิกรณ์ (HRT) ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.1)

$$S_e = aSi^xHRT^y \qquad \text{-------} (2.1)$$

เมื่อ S_e = ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (มก./ล.)

S_i = ความเข้มข้นซีโอดีทางเข้า (มก./ล.)

HRT = ระยะเวลากักเก็บ (วัน)

a,x,y = ค่าคงที่

ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง S_e, S_i และ HRT โดยใช้วิธีวิเคราะห์ แบบ Nonlinear – regression โดยใช้โปรแกรม Polymath 5.1

จากสมการที่ (2.1) สามารถเพิ่มตัวแปรผลของพื้นที่ผิวของตัวกลางกรอง จะได้สมการที่ (2.2) เพื่อให้มีความถูกต้องในการทำนายประสิทธิภาพมากขึ้นดังนี้

$$S_e = aS_i^xHRT^yA_{sp}^z \qquad \text{-------} (2.2)$$

เมื่อ S_e = ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (มก./ล.)

S_i = ความเข้มข้นซีโอดีเข้าออก (มก./ล.)

HRT = ระยะเวลากักเก็บ (วัน)

A_{sp} = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง ($ม^2/ม^3$)

a, x, y, z = ค่าคงที่

ในการหาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง S_e, S_i HRT และ A_{sp} โดยใช้วิธีวิเคราะห์ แบบ Nonlinear – regression โดยใช้โปรแกรม Polymath 5.1

2.3.3 แบบจำลองฟิล์มชีวะในถังปฏิกรณ์แบบกรองไร้อากาศ

จากรูปแบบการคำนวณหาความหนาฟิล์มชีวะที่ได้นำเสนอในบทที่ 1 มีความซับซ้อน เนื่องจากสมการติดในรูปของดิฟเฟอร์เรนเชียล ดังสมการที่(1.1)-สมการที่(1.4) และใช้วิธีการลองผิดลองถูก

(Trial and Error) ดังสมการที่ (1.6)-สมการที่ (1.9) เพื่อหาค่าตัวแปรต่างๆ ดังนั้นการหาค่าตัวแปรต่างๆ เพื่อแทนค่าในสมการความหนาฟิล์มชีวะของ Rittmann และ McCarty (1980a) เพื่อให้ง่ายสำหรับการคำนวณ จึงได้นำสมการทางจลนพลศาสตร์ของโมนอด ดุลมวลสาร และอัตราการผุพังเนื่องจากแรงเฉือนมาใช้ ดังต่อไปนี้

การหาค่าฟลักซ์ของสารอาหารของจุลินทรีย์ (Substrate flux, J) สามารถคำนวณได้จากสมการดุลมวลสาร(Mass balance) จะได้

$$QS_i - QS_e - JVa = 0 \qquad \text{-------} \quad (2.3)$$

$$J = Q(S_i - S_e)/(Va) \qquad \text{-------} \quad (2.4)$$

เมื่อ Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate)

S_i = ความเข้มข้นซีโอดีทางเข้า (Substrate concentration inlet)

S_e = ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (Substrate concentration outlet)

J = ฟลักซ์ของสารอาหารของจุลินทรีย์ (Substrate flux)

V = ปริมาตรถังปฏิกรณ์ (Volume of the reactor)

a = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลาง (Specific surface area of media)

การหาค่าสัมประสิทธิ์การผลิตได้ของชีวมวล (Yield of biomass, Y) คำนวณได้ดังนี้

$$Y = dX/dS = (X_{inf} - X_{eff})/(S_i - S_e) \qquad \text{-------} \quad (2.5)$$

เมื่อ X_{inf} = ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายเริ่มต้น (Initial volatile suspended solid)

X_{eff} = ปริมาณของแข็งแขวนลอยระเหยง่ายสภาวะคงตัว (Steady-state volatile suspended solid)

S_i = ความเข้มข้นซีโอดีทางเข้า (Inlet substrate concentration)

S_e = ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (Outlet substrate concentration)

การหาค่าอัตราการผุพังของชีวมวล (Biomass decay and sloughing rate) สามารถหาได้จากผลรวมของอัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากการตายของชีวมวล โดยใช้สมการทางจลนพลศาสตร์ของโมนอด (Monod kinetics) และอัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากความเฉือน ซึ่งนำเสนอโดย Rittman and McCarty (1982) ดังนี้

$$b_s = b_{s1} + b_{s2} \quad \text{-------} \quad (2.6)$$

เมื่อ b_s = อัตราการผุพังของชีวมวล (Biomass decay and sloughing rate)

b_{s1}= อัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากการตายของชีวมวล (Endogenous decay rate)

b_{s2}= อัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากความเฉือน (Shear stress decay rate)

จากสมการที่ (2.6) สามารถหาค่าอัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากการตายของชีวมวล (b_{s1}) โดยใช้สมการทางจลนพลศาสตร์ของโมนอด (Monod kinetics) ดังนี้

$$\mu = (\mu max + S)/(K_s + S) \quad \text{-------(2.7)}$$

ดุลมวลจุลินทรีย์ $dX/dt = (Q/V)X_o - (Q/V)X - \mu X - b_{s1}X$ -------(2.8)

ที่สภาวะคงตัว $dX/dt = 0$ และ $X_0 = 0$ -------(2.9)

ดังนั้น $\mu = (\mu max + S)/(K_s + S) = (1/HRT) + b_{s1}$ -------(2.10)

ดุลมวลสารอาหาร $dS/dt = (Q/V)(S_i - S_e) - (\mu X/Y)$ -------(2.11)

ที่สภาวะคงตัว $dS/dt = 0$ -------(2.12)

ดังนั้น $0 = (Q/V)(S_i - S_e) - (\mu X/Y)$ -------(2.13)

แทนสมการที่ (2.10) ใน (2.13)

$$(1/HRT)(S_i - S_e) = (X/Y)((1/HRT) + b_{s1}) \quad \text{-------(2.14)}$$

$$(S_i - S_e)/(X * HRT) = (1/Y)(1/HRT) + (1/Y)\, b_{s1} \quad \text{-------(2.15)}$$

เมื่อ K_S = ความเข้มข้นสารอินทรีย์ในน้ำทิ้ง เมื่ออัตราการย่อยสลายเป็นครึ่งหนึ่งของอัตราการย่อยสลายสูงสุด (Monod half-velocity coefficient)

Q = อัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate)

S = ความเข้มข้นซีโอดี (Substrate concentration)

S_i = ความเข้มข้นซีโอดีทางเข้า (Substrate concentration inlet)

S_e = ความเข้มข้นซีโอดีทางออก (Substrate concentration outlet)

V = ปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (Volume of the reactor)

X = ความเข้มข้นของชีวมวลทางออก (Concentration of biomass outlet)

Y = สัมประสิทธิ์การผลิตได้ (Yield of biomass)

HRT = ระยะเวลากักเก็บ (Hydraulic retention time)

μ = อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Specific biomass growth rate)

μ_{max} = อัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์สูงสุด (Maximum specific biomass growth rate)

จากสมการที่ (2.15) สามารถหาค่า b_{s1} โดยเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง 1/HRT และ $(S_i-S_e)/(1+HRT)$ และ จากสมการที่ (2.16) สามารถหาค่า b_{s2} อัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากแรงเฉือน ซึ่งนำเสนอโดย Rittman and McCarty (1982) ดังนี้

$$b_{s2} = 2.29x\ 10^{-6}\ ((V_w u(1-\varepsilon)^3)/(d_p^2 \varepsilon^3 a))^{0.58} \qquad \text{-------(2.16)}$$

เมื่อ b_{s2} = อัตราการผุพังของชีวมวลเนื่องจากแรงเฉือน (day^{-1})

V_w = ความหนืดของน้ำเสีย (Viscosity, g/cm-day)

ε = ความพรุน (Void, m^3/m^3)

d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผลของตัวกลาง (Effective diameter, cm)

a = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง (Specific surface area of media, cm^2/cm^3)

การหาเส้นผ่าศูนย์กลางประสิทธิผล (Effective diameter, d_p) สามารถหาได้จากสมการ (Robert E.T, 1980)

$$d_p = 6\ (1-\varepsilon)/a \qquad \text{-------(2.17)}$$

เมื่อ d_p = เส้นผ่านศูนย์กลางประสิทธิผล (Effective diameter, cm)

ε = ความพรุน (Void, m^3/m^3)

a = พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวกลางกรอง (Specific surface area of media, cm^2/cm^3)

การคำนวณความหนาฟิล์มชีวะสามารถหาได้จากสมการของ Rittman and McCarty (1980a) ดังสมการที่ (1.5) โดยนำค่าต่างๆที่ได้จากการทดลองโดยการหาค่าตัวแปรต่าง ๆ ในสมการที่ (2.3)-สมการที่ (2.17)