

บทที่ 4 การศึกษาสมบัติทางกายภาพของตัวเก็บพลังงานที่อยู่ร่วมกับไททาเนียม ไดออกไซด์

จากผลการทดลองที่ผ่านมา พบว่า การเตรียมวานาเดียมเพนทอกไซด์ (V_2O_5) ร่วมกับไททาเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ด้วยวิธีโซล-เจลนั้น มิใช่เป็นเพียงการผสมเชิงกล หากแต่การผสมนั้นน่าจะเกิดการผสมทางเคมี และอาจส่งผลให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ขึ้น

ดังนั้นการทดลองนี้ จะทดสอบสมบัติทางกายภาพของตัวเก็บพลังงาน $TiO_{2(syn)}-V_2O_5$ ที่เตรียม โดยการปรับสัดส่วนโดยโมลของ $TiO_{2(syn)}: V_2O_5$ และอุณหภูมิในการเผาต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบกับ TiO_2 และ V_2O_5

โดยเน้นศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ ดังนี้

1. ศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเลต (Photopotential) เนื่องจาก ในสภาวะการใช้งานจริงฟิล์มของ $TiO_{2(syn)}-V_2O_5$ ต้องสามารถเก็บพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้
2. พลังงานแบนแกป (Energy band gap)

4.1 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเลต (Photopotential)

1) การเตรียมคอมโพสิตฟิล์มของ $TiO_{2(syn)}-V_2O_5$

ฟิล์ม $TiO_{2(syn)}-V_2O_5$ เตรียมจากการผสมโซลไททาเนียม (วิธีเตรียมเช่นเดียวกับบทที่ 2 ตอนที่ 3 ข้อที่ 1)) กับวานาเดียมเพนทอกไซด์ที่มีขายทางการค้า โดยปรับอัตราส่วนโดยโมลของ $TiO_{2(syn)}: V_2O_5$ เท่ากับ 10:0.33, 10:0.17 และ 10:0.1 จากนั้นสารผสมจะถูกเคลือบบนกระจก ITO ด้วยวิธี spin coating และนำฟิล์มที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 300, 350, 400, 450, 500, 550°C

ฟิล์มของ TiO_2 และฟิล์มของ V_2O_5 เตรียมขึ้นที่อุณหภูมิเดียวกันกับ ฟิล์ม $TiO_{2(syn)}-V_2O_5$ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบต่อไป

2) การวัดศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเลต

ฟิล์มที่เตรียมได้จะถูกนำไปประกอบในเซลล์ไฟฟ้าเคมีมาตรฐาน 3 ขั้ว โดย potentiostat จะทำหน้าที่วัดศักย์ไฟฟ้าของฟิล์ม ขณะที่ฟิล์มถูกฉายแสงอัลตราไวโอเลตที่มีความเข้มแสง 5 mW/cm^2 เช่นเดียวกันกับบทที่ 3 ตอนที่ 2

ตอนที่ 2 การวิเคราะห์พลังงานแบนแกป

การวิเคราะห์พลังงานแบนด์แกป ทำโดยการผสมของ $TiO_{2(syn)}-V_2O_5$ ที่อัตราส่วนเชิงโมล 10: 0.1 มาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับ V_2O_5 และ TiO_2 ซึ่งเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน สารผสมที่ได้

จะถูกนำมาวัดเป็นผงละเอียด แล้วนำมาอัดเป็นเม็ดด้วยเครื่องอัดเม็ด และนำไปวัดค่า Reflectance ด้วยเครื่อง Spectrophotometer for Color (ฟังก์ชัน Rsin)

4.2 ผลการทดลอง

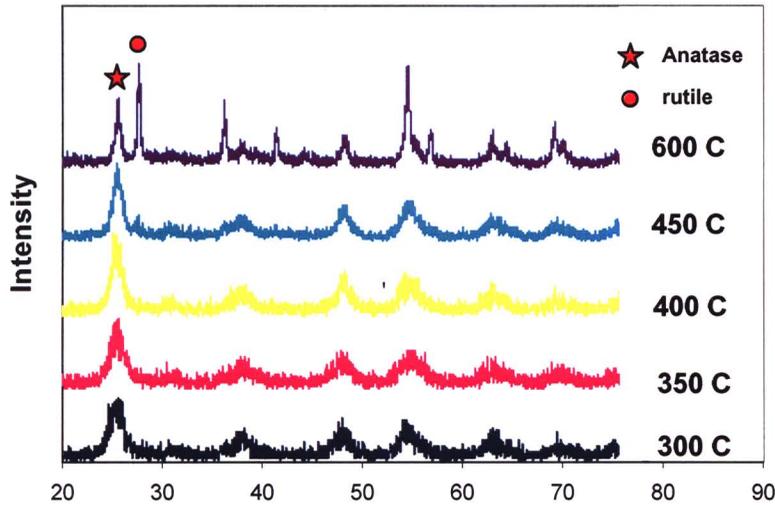
ตอนที่ 1 การวิเคราะห์ศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต (Photopotential)

เป็นที่ทราบกันดีว่า โครงสร้างอนาเทสของ TiO_2 เป็นโครงสร้างที่มีประสิทธิภาพในการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติกที่ดีกว่าโครงสร้างรูไทล์ และสำหรับระบบตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสงที่สามารถเก็บพลังงานได้นั้น จำเป็นต้องใช้ไททาเนียมไดออกไซด์ที่มีโครงสร้างอนาเทส เพื่อใช้เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนในที่ที่มีแสง (นั่นคือ เกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลติก) อย่างไรก็ตาม โครงสร้างอนาเทสมีความเสถียรที่อุณหภูมิต่ำ และเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โครงสร้างอนาเทสจะเปลี่ยนเป็นโครงสร้างรูไทล์

ตารางที่ 4.1 ศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต (Photopotential) ของฟิล์ม TiO_2 ที่เตรียมจากอุณหภูมิต่างๆ

Temp.($^{\circ}\text{C}$)	Photopotential (V vs. Ag/AgCl)
300	-0.22
350	-0.39
400	-0.45
450	-0.32
500	-0.26
550	0.26

จากผลการทดลองตรวจสอบค่าศักย์ไฟฟ้าของ TiO_2 ที่เตรียมได้จากอุณหภูมิต่างๆ ภายใต้การฉายแสง UV เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะเห็นว่าค่า Photopotential ของ TiO_2 มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิสูงถึง 450°C นั้น ค่า Photopotential มีค่าสูงขึ้นอีกครั้งหนึ่ง อาจเนื่องมาจาก ช่วงอุณหภูมิ $300 - 400^{\circ}\text{C}$ ฟิล์มของ TiO_2 มีการเกิดโครงสร้างแบบอนาเทสสมบูรณ์ขึ้น จึงทำให้การปลดปล่อยอิเล็กตรอนเกิดได้ดีที่อุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิ $450 - 550^{\circ}\text{C}$ ฟิล์มของ TiO_2 เริ่มเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างจากอนาเทสเป็นรูไทล์ ซึ่งโครงสร้างแบบรูไทล์นั้น มีอัตราการกลับมารวมตัวกันใหม่ของอิเล็กตรอนกับโฮล (Electron-hole recombination) สูง ทำให้การปลดปล่อยอิเล็กตรอนเกิดได้ไม่ดี ส่งผลให้ค่าศักย์ไฟฟ้าภายใต้การฉายแสงมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์ม TiO_2 คืออุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส



ตารางที่ 4.1 XRD patterns ของฟิล์ม TiO₂ ที่เตรียมจากอุณหภูมิต่างๆ

จากผลการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเครื่อง XRD (X-ray Diffractometer) ดังรูปที่ 4.1 โดยใช้ Cu K α (λ = 0.154051 nm) เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึก โดยพิจารณาการเกิดโครงสร้าง อนาเทสที่พีค (101) โครงสร้างรูไทล์ที่พีค (110) และโครงสร้างบรูคไคท์ที่พีค (121) แล้วคำนวณเปอร์เซ็นต์โดยมวลของ อนาเทส: รูไทล์: บรูคไคท์ (A: R: B) ที่พบในอนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่สังเคราะห์ได้ ดังสมการ 4.1-4.3

$$W_A = \frac{K_A A_A}{K_A A_A + A_R + K_B A_B} \quad (4.1)$$

$$W_R = \frac{A_R}{K_A A_A + A_R + K_B A_B} \quad (4.2)$$

$$W_B = \frac{K_B A_B}{K_A A_A + A_R + K_B A_B} \quad (4.3)$$

โดย

W_A, W_R, W_B คือ เศษส่วนมวลอนาเทส, รูไทล์, บรูคไคท์ ตามลำดับ

A_A, A_R, A_B คือ ความสูงของพีคมวลอนาเทส, รูไทล์, บรูคไคท์ ตามลำดับ

K_A, K_B คือ ค่าคงที่ซึ่งเท่ากับ 0.886, 2.721 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์โดยมวลของโครงสร้างอนาเทส: รูไทล์: บรูคไคท์ (A: R: B) ที่พบในอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมจากกรดไนตริกในสภาวะการเตรียมต่างๆ ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 เปอร์เซนต์โดยมวลของโครงสร้าง อนาเทส: รูไทล์: บรูกไคท์ (A: R: B) ที่พบใน
อนุภาคไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เตรียมได้จากกรดไนตริกในสภาวะการเตรียมต่าง ๆ

อุณหภูมิ (°C)	เปอร์เซนต์โดยมวลของโครงสร้าง		
	anatase	rutile	brookite
300	100	-	-
350	100	-	-
400	100	-	-
450	82	18	-
600	60	40	-

จากตาราง 4.2 พบว่า โครงสร้างอนาเทสเริ่มเปลี่ยนเป็นโครงสร้างรูไทล์ที่อุณหภูมิ 450°C และมีสัดส่วนโดยมวลของโครงสร้างรูไทล์เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งผลการวิเคราะห์โครงสร้างสอดคล้องกับศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต (Photopotential) ของ TiO₂ ดังตารางที่ 4.1

สำหรับฟิล์ม TiO_{2(syn)}-V₂O₅ ที่เตรียมจากอัตราส่วนเชิงโมลและอุณหภูมิต่างๆ และเมื่อนำไปวิเคราะห์หาค่า Photopotential ได้ผลดังตารางที่ 4.3

จากตารางที่ 4.2 จะเห็นว่าค่า Photopotential ของฟิล์ม TiO_{2(syn)}-V₂O₅ มีแนวโน้มลดลง เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น อย่างไรก็ตาม ฟิล์ม TiO_{2(syn)}-V₂O₅ ที่อัตราส่วน 10:0.33 และ 10:0.17 นั้นแม้ว่าจะเพิ่มอุณหภูมิในการเผา อย่างไรก็ตาม Photopotential ของฟิล์มดังกล่าวยังคงมีค่าสูงกว่าศักย์ไฟฟ้าในการเกิดสนิม (-0.1 V vs. Ag/AgCl) นั้นหมายความว่า สภาวะการเตรียมฟิล์มดังกล่าวไม่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นตัวเก็บพลังงาน

ในขณะที่ฟิล์ม TiO_{2(syn)}-V₂O₅ ที่อัตราส่วน 10:0.1 พบว่า ค่า Photopotential มีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น หากเปรียบเทียบกับฟิล์มที่มี TiO₂ เพียงอย่างเดียว พบว่าที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C ไททาเนียมไดออกไซด์ควรจะเปลี่ยนเฟสเป็นรูไทล์แล้ว ซึ่งส่งผลให้ Photopotential มีค่าเป็นบวกเพิ่มขึ้น แต่ในฟิล์ม TiO_{2(syn)}-V₂O₅ ไม่พบปรากฏการณ์ดังกล่าว นั้นแสดงให้เห็นว่า การมีเจือปนอยู่ของ V₂O₅ ส่งผลให้โครงสร้างอนาเทสมีความเสถียรสูงขึ้น (การเปลี่ยนโครงสร้างจากอนาเทสเป็นรูไทล์เกิดได้ยากขึ้น) หรือ TiO₂ สูญเสียสมบัติบางอย่าง โดยเกิดเป็นสารประกอบ TiO_{2(syn)}-V₂O₅ อย่างไรก็ตาม ควรนำฟิล์ม TiO_{2(syn)}-V₂O₅ ที่เตรียมได้ที่อุณหภูมิต่างๆ ไปวิเคราะห์ด้วย XRD เพื่อยืนยันสมมติฐานข้างต้น



ตารางที่ 4.3 ศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต (Photopotential) ของ $\text{TiO}_2(\text{syn})\text{-V}_2\text{O}_5$ ที่อัตราส่วนเชิงโมลและอุณหภูมิต่างๆ

อัตราส่วนเชิงโมล $\text{TiO}_2(\text{syn})\text{-V}_2\text{O}_5$	อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$)	Photopotential (V vs. Ag/AgCl)
10 : 0.33	300	0.92
	350	0.04
10 : 0.17	300	0.14
	350	-0.08
	400	-0.03
	450	0.02
10 : 0.1	300	0.07
	350	0.06
	400	-0.15
	450	-0.16
	500	-0.18
	550	0.12
	600	-0.28

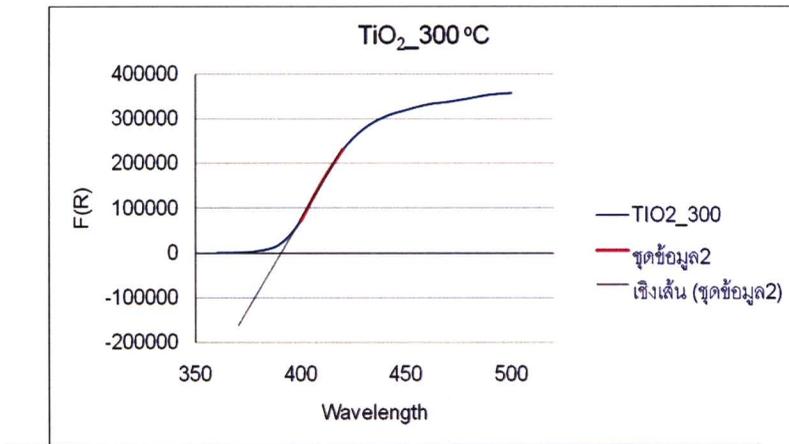
ตอนที่ 2 การวิเคราะห์พลังงานแบนด์แกป

จากผลการทดลองข้างต้น พบว่า การเจือ V_2O_5 เจือปนกับ TiO_2 ส่งผลต่อค่า Photopotential และ ยังอาจรวมไปถึงส่งผลต่อโครงสร้าง อีกทั้งพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นระบบ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้แสงที่สามารถเก็บพลังงานได้ในสภาวะจริง คือ อัตราส่วน $\text{TiO}_2(\text{syn})\text{:V}_2\text{O}_5$ เท่ากับ 10: 0.1

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการวิเคราะห์พลังงานแบนด์แกป โดยการนำสารแขวนลอยของ $\text{TiO}_2(\text{syn})\text{:V}_2\text{O}_5$ ที่อัตราส่วนเชิงโมล 10: 0.1 มาเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เปรียบเทียบกับ TiO_2 และ V_2O_5 ภายหลังจาก การเผา สารผสมที่ได้จะถูกนำมาบดเป็นผงละเอียด และนำมาอัดเป็นเม็ด เพื่อนำไปวัดค่า Reflectance จากนั้นนำค่า R ที่ได้มาคำนวณค่า F(R) จากสมการของคูเบลคา – มัง (Kubelka-Munk Equation) ดัง สมการ 4.3

$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (4.3)$$

จากนั้นทำการพลอตกราฟระหว่าง $F(R)$ ที่คำนวณได้กับความยาวคลื่น ดังรูป 4.2



รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $F(R)$ และ ความยาวคลื่น (Wavelength) ของไททาเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส

ค่าพลังงานแบนด์แกป หาจากกราฟความสัมพันธ์ของความยาวคลื่น (Wavelength) และ $F(R)$ โดยการลากเส้นผ่านกราฟความสัมพันธ์ ที่มีค่าความชันสูงสุด เพื่อหาจุดตัดแกน X (ดังรูปที่ 4.2) จากนั้นนำความยาวคลื่นที่ได้มาคำนวณหาพลังงานแบนด์แกป ดังสมการ 4.4

$$EnergyBandGap = \frac{1240}{Wavelength} \quad (4.4)$$

ตารางที่ 4.4 พลังงานแบนด์แกปของฟิล์มที่อุณหภูมิต่าง ๆ

Temp.(°C)	Energy Band Gap (eV)		
	TiO ₂	V ₂ O ₅	TiO _{2(syn)} ·V ₂ O ₅ = 10 : 0.1
ไม่เผา	-	2.48	-
300	3.37	2.56	2.69
350	3.35	2.56	2.82
400	3.31	2.48	3.22
450	3.26	2.48	3.31
500	3.18	-	3.39
550	3.10	-	3.13

จากตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า พลังงานแบนด์แกปของ TiO_2 นั้นมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นั่นอาจเป็นสิ่งที่ช่วยยืนยัน การเปลี่ยนโครงสร้างอนาเทสเป็นรูไทล์ที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากโครงสร้างอนาเทสมีค่าพลังงานแบนด์แกป 3.2 eV ในขณะที่โครงสร้างรูไทล์มีพลังงานแบนด์แกป 3.0 eV ดังนั้น จึงทำให้ค่าพลังงานแบนด์แกปของ TiO_2 ลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ในขณะที่ค่าพลังงานแบนด์แกปของ V_2O_5 มีค่าคงที่ที่ประมาณ 2.5 eV ในทุกๆ อุณหภูมิ

สำหรับของผสม $\text{TiO}_{2(\text{syn})}:\text{V}_2\text{O}_5$ พบว่า ค่าพลังงานแบนด์แกปมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิ คือ 300 – 350 °C ค่าพลังงานแบนด์แกปของผสม $\text{TiO}_{2(\text{syn})}:\text{V}_2\text{O}_5$ มีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงานแบนด์แกปของ V_2O_5 ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่า ในช่วงอุณหภูมินี้อุณหภูมิ TiO_2 ยังไม่เกิดโครงสร้างอนาเทสอย่างสมบูรณ์ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่ง คือ TiO_2 มีโครงสร้างเป็นอะมอร์ฟัส (Amorphous) ในขณะที่ช่วงอุณหภูมิ 400 – 500 °C อุณหภูมิ $\text{TiO}_{2(\text{syn})}:\text{V}_2\text{O}_5$ มีค่าพลังงานแบนด์แกปสูงขึ้น เมื่ออุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น และมีค่าใกล้เคียงกับพลังงานแบนด์แกปของ TiO_2 ที่มีโครงสร้างอนาเทส อย่างไรก็ตาม ค่าพลังงานแบนด์แกป $\text{TiO}_{2(\text{syn})}:\text{V}_2\text{O}_5$ มีค่าลดลง ที่อุณหภูมิ 550 °C นั่นอาจหมายถึง การเริ่มเปลี่ยนโครงสร้างจากอนาเทสเป็นรูไทล์ของ TiO_2 ที่อยู่ใน $\text{TiO}_{2(\text{syn})}:\text{V}_2\text{O}_5$ ที่อุณหภูมิ 550 °C แสดงให้เห็นว่าการการเจือ V_2O_5 อาจทำให้การเปลี่ยนโครงสร้างจากอนาเทสเป็นรูไทล์เกิดได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น

4.3 สรุปผลการทดลอง

การเจือของ V_2O_5 ในไททาเนียมไดออกไซด์ น่าจะเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่ ($\text{TiO}_{2(\text{syn})}-\text{V}_2\text{O}_5$) ซึ่งมีสารประกอบนี้ ศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต (Photopotential) และพลังงานแบนด์แกป (Energy band gap) แตกต่างจาก TiO_2 และ V_2O_5 ซึ่งเป็นสารตั้งต้น อย่างไรก็ตามความสามารถในการเก็บพลังงานของสารประกอบ $\text{TiO}_{2(\text{syn})}-\text{V}_2\text{O}_5$ ต้องทำการศึกษาต่อไป เพื่อเปรียบเทียบกับ TiO_2 และ V_2O_5 ตลอดจนตัวเก็บพลังงานดั้งเดิม WO_3

คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ศักย์ไฟฟ้าภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเล็ต (Photopotential), พลังงานแบนด์แกป (Energy band gap) และโครงสร้างผลึกของไททาเนียมไดออกไซด์ มีความสัมพันธ์กัน ดังนั้น การใช้ข้อมูลทางกายภาพตัวใดตัวหนึ่ง น่าจะทราบความสัมพันธ์ของข้อมูลตัวอื่นๆ ได้

ภาคผนวก ก.

การวิเคราะห์ค่าพลังงาน Band Gap

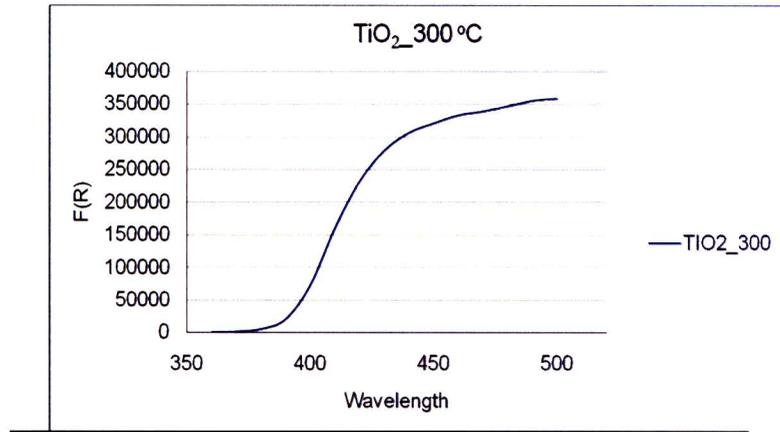
การวิเคราะห์ค่าพลังงาน Band Gap ด้วยเครื่อง Spectrophotometer for Color ฟังก์ชัน Rsin ซึ่งในภาคผนวก ก นี้ได้รวบรวมวิธีคำนวณค่าพลังงาน Band Gap และกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F(R) และ Wavelength ของ TiO_2 , V_2O_5 และ $\text{TiO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5$ ที่สภาวะต่างๆ

ตารางที่ ก 1 ค่าความยาวคลื่นและ F(R)

TiO ₂ _300			TiO ₂ _300		
wavelength	R	F(R)	wavelength	R	F(R)
360.0	9.8	3.95	560.0	92.03	45.02
370.0	13.57	5.82	570.0	92.23	45.12
380.0	22.15	10.10	580.0	92.54	45.48
390.0	34.97	16.50	590.0	92.94	45.61
400.0	53.22	25.62	600.0	93.2	45.69
410.0	69.04	33.53	610.0	93.36	45.86
420.0	78.04	38.03	620.0	93.71	46.07
430.0	82.96	40.49	630.0	94.13	46.11
440.0	85.55	41.78	640.0	94.2	46.53
450.0	86.86	42.44	650.0	95.04	46.68
460.0	87.95	42.98	660.0	95.35	46.50
470.0	88.47	43.24	670.0	94.98	46.58
480.0	89.14	43.58	680.0	95.14	46.71
490.0	89.86	43.94	690.0	95.4	46.81
500.0	90.13	44.07	700.0	95.6	46.87
510.0	90.61	44.31	710.0	95.73	46.93
520.0	90.86	44.44	720.0	95.85	47.03
530.0	91.46	44.74	730.0	96.04	47.05
540.0	91.53	44.77	740.0	96.08	47.10
550.0	91.6	44.81			

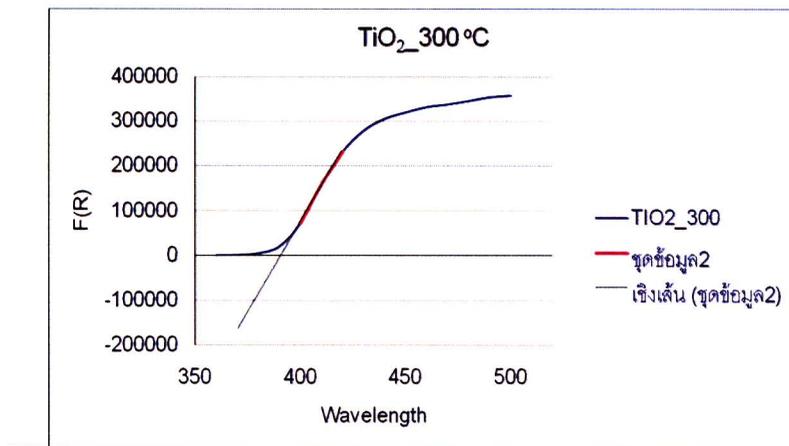
ค่า F(R) หาได้จากสมการ
$$F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R}$$

จากนั้นเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F(R) และ ความยาวคลื่นได้กราฟดังรูป ก.1



รูปที่ ก. 1 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F(R) และ ความยาวคลื่น

จากนั้นหาความชันสูงสุดลากตัดแกน X ได้ค่าความยาวคลื่นดังรูป

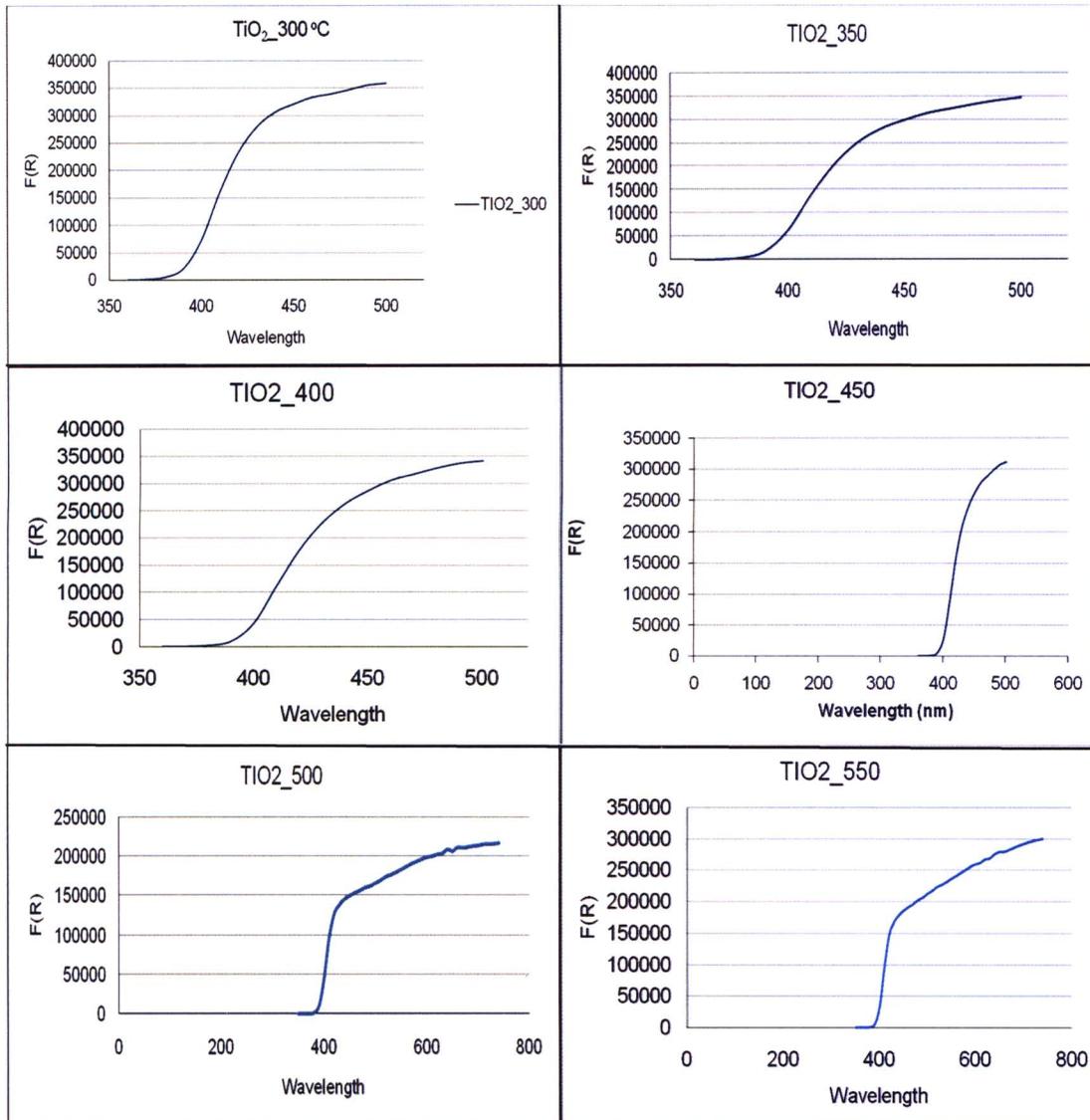


รูปที่ ก 2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F(R) และ ความยาวคลื่น

จากนั้นนำความยาวคลื่นที่ได้แทนค่าในสมการ
$$EnergyBandGap = \frac{1240}{Wavelength}$$

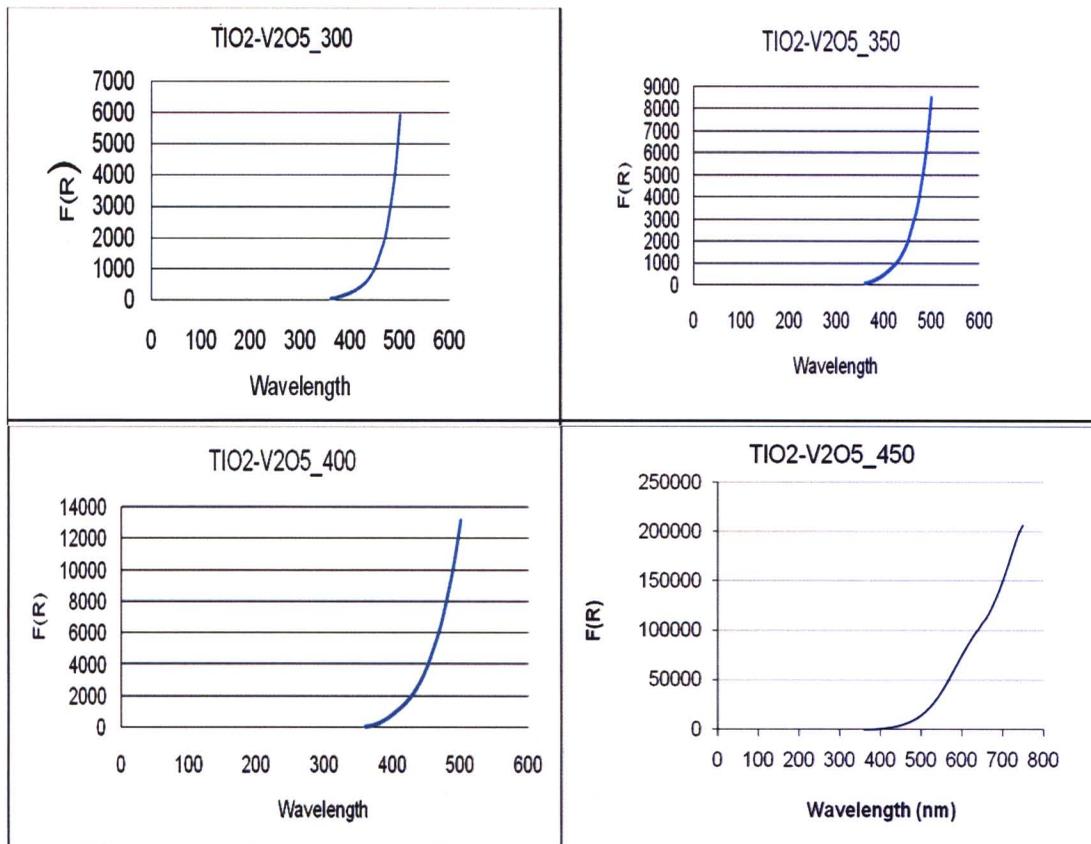
จะได้ค่าพลังงาน Band Gap ออกมา

กราฟแสดงผลวิเคราะห์ค่าพลังงาน Band Gap ด้วยเครื่อง Spectrophotometer for Color

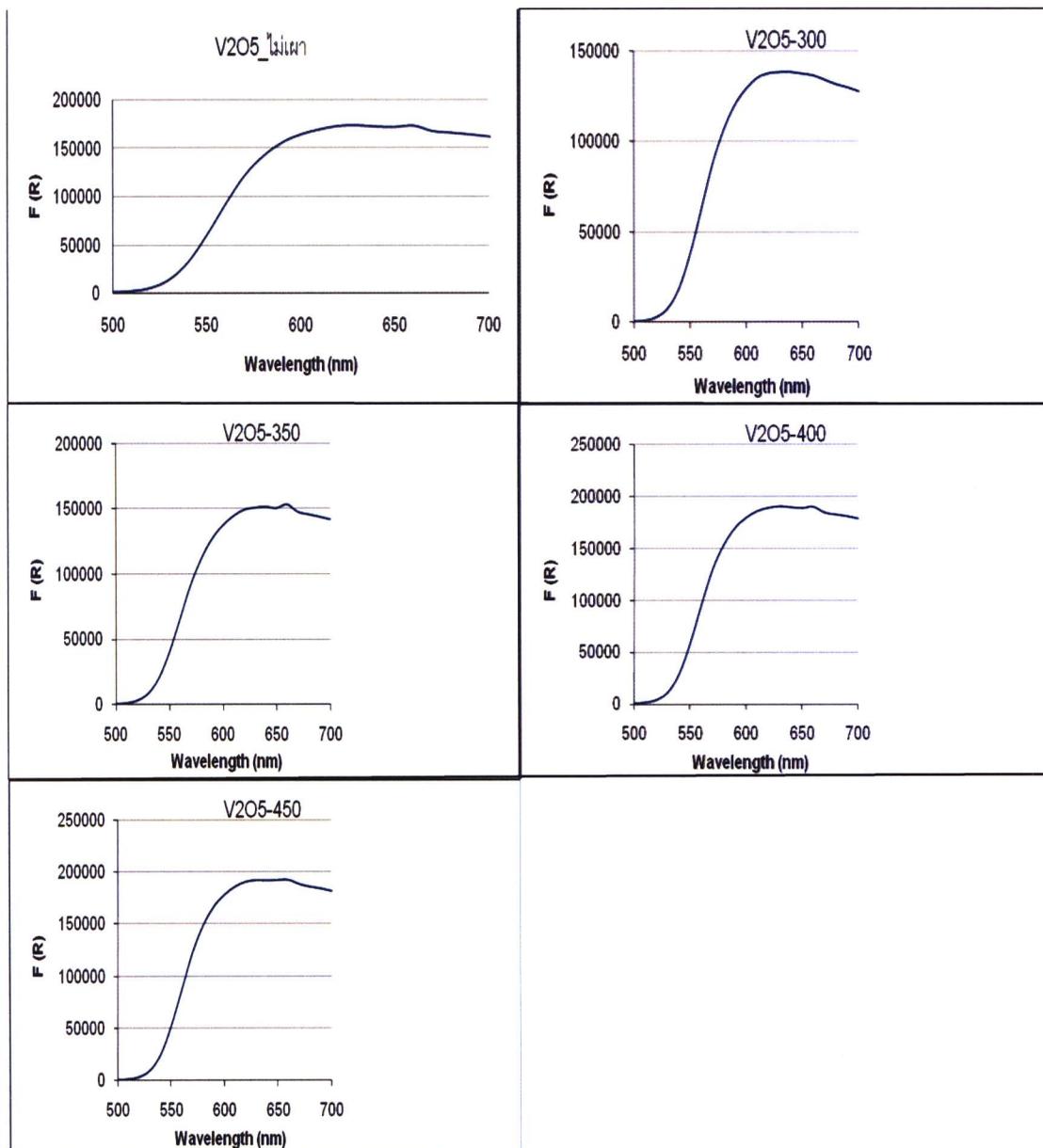


รูปที่ ก. 3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F(R) และ ความยาวคลื่น ของ TiO₂ ที่สภาวะต่างๆ





รูปที่ ก. 4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $F(R)$ และ ความยาวคลื่นของ V_2O_5 ที่สภาวะต่างๆ



รูปที่ ก. 5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง F(R) และ ความยาวคลื่นของ $\text{TiO}_2 - \text{V}_2\text{O}_5$ ที่สภาวะต่างๆ