

การวิจัยและการดำเนินงาน

3.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. ไทเทเนียม(IV)ไอโซโพรพอกไซด์ 97% (Titanium(IV)isopropoxide, $C_{12}H_{28}O_4Ti$) บริษัท Aldrich
2. กรดอะซิติก (Glacial acetic acid, CH_3COOH) บริษัท Carlo ERBA
3. ไอโซโพรพานอล (2-Propanol, $CH_3CH(OH)CH_3$) บริษัท Merck
4. อะซิติลอะซิโตน (Acetylacetone, $C_5H_8O_2$) บริษัท Laboratory Rasayan
5. กรดไนตริกเข้มข้น 65% (Conc. HNO_3)
6. กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 37% (Conc. HCl) บริษัท CARLO ERBA
7. ซิลเวอร์ไนเตรด 99.9% (Silver(I) nitrate, $AgNO_3$) บริษัท Merck

3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffractometer; XRD) บริษัท Bruker AG รุ่น D8 Advance
2. เครื่องวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อน (Thermogravimetric Analyser; TGA) บริษัท Perkin Elmer รุ่น Pyris 1 TGA
3. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrometer) ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Heλlos α
4. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) รุ่น LEO 1455 VP บริษัท LEO Electron Microscope
5. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)
6. เตาเผาสาร บริษัท Thermolyne รุ่น Furnace 6000
7. ตู้อบ บริษัท Fisher Scientific รุ่น Isotemp
8. เครื่องอัลตราโซนิก บริษัท Fisher Scientific Worldwide รุ่น ULTRASONIK
9. ชุดอุปกรณ์สำหรับการปั่นเคลือบ
10. เครื่องชั่งน้ำหนักอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง บริษัท Denver Instrument รุ่น TC – 254
11. เครื่องให้ความร้อนชนิดแผ่น (Hot plate) บริษัท Fisher Scientific
12. แท่งแม่เหล็กปั่นกวน

13. ครูชิเบิลชนิดพอสเลนและอะลูมินา
14. โรงอบสาร
15. บริษัทเครื่องแก้ว

3.3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.3.1 เตรียมสารละลายของไทเทเนียมไดออกไซด์

ทำการเตรียมสารละลายโซลตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมเป็น 0.05, 0.1, 0.15 และ 0.2 โมลาร์ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ตามขั้นตอนดังนี้

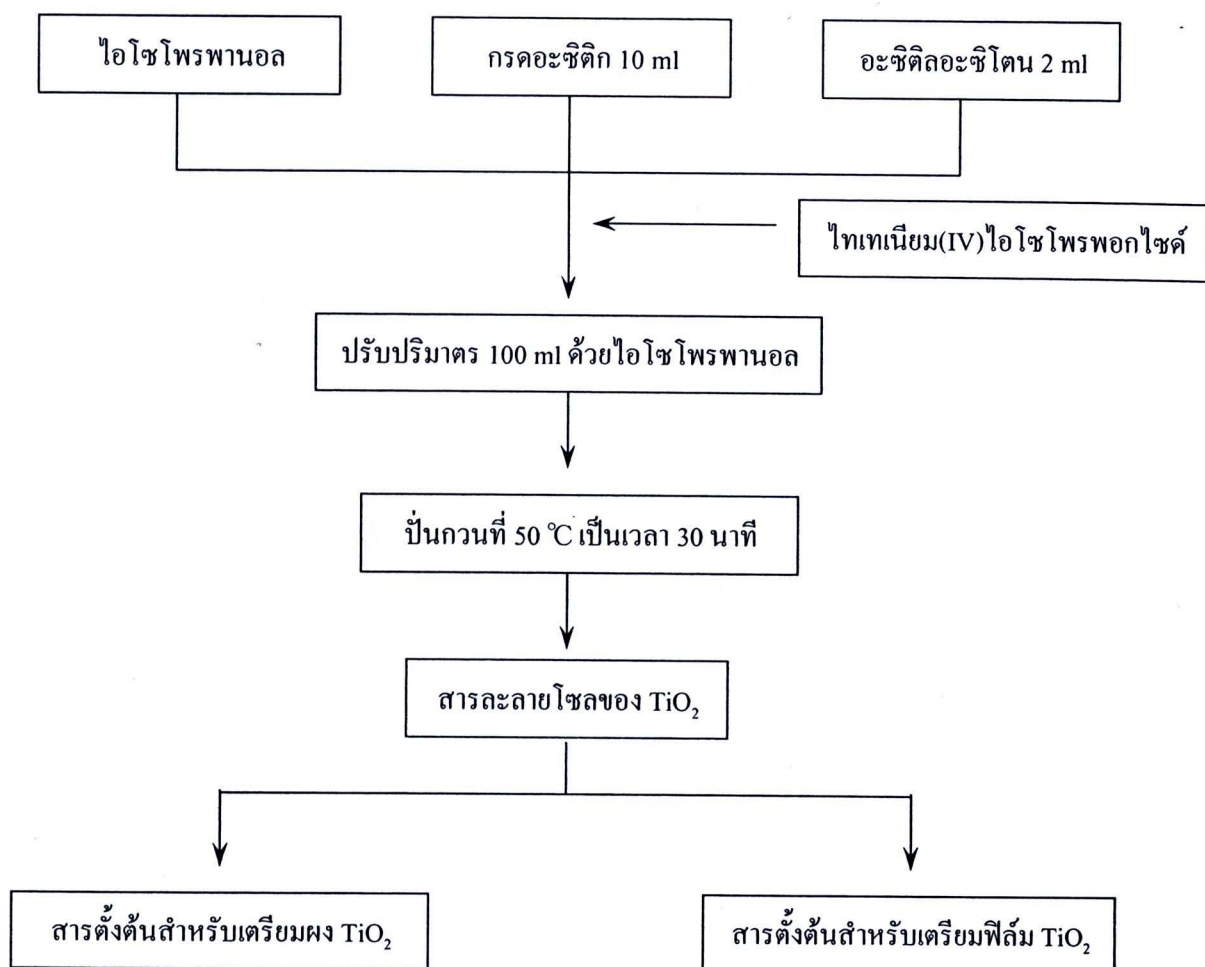
1. ผสมไอโซโพรพานอลประมาณ 50 มิลลิลิตร กรดอะซิติกปริมาตร 10 มิลลิลิตร อะซิติกอะซิโตนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. ปิเปตไทเทเนียม (IV) ไอโซโพรพอกไซด์ในปริมาตรต่างๆ ดังตารางที่ 3.1 เพื่อให้ได้โซลที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมตามต้องการ

ตารางที่ 3.1 ปริมาตรของ $C_{12}H_{28}O_4Ti$ ที่ใช้ในการเตรียมสารละลายโซลแต่ละความเข้มข้นของไทเทเนียม

ความเข้มข้นของไทเทเนียม (M)	ปริมาตร $C_{12}H_{28}O_4Ti$ (ml)
0.05	1.5343
0.1	3.0686
0.15	4.6029
0.2	6.1372

3. ปรับปริมาตรสารละลายให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยไอโซโพรพานอล
4. ทำการปั่นกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 50 °C เป็นเวลา 30 นาที

สารละลายโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ทุกความเข้มข้นที่เตรียมได้ จะถูกนำไปใช้เป็นสารละลายตั้งต้น (Precursor solution) ในการเตรียมผงละเอียดและฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์



รูปที่ 3.1 แผนภาพแสดงการเตรียมสารละลายโซลของ TiO_2

3.3.2 การศึกษาข้อมูลการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนของเจลตั้งต้น

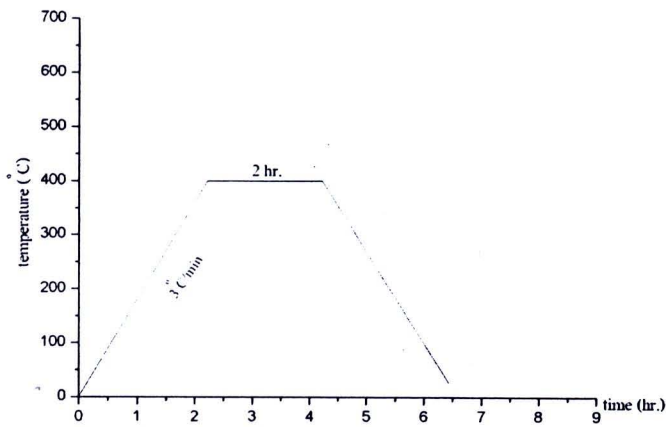
1. นำสารละลายโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ มาระเหยตัวทำละลายออกโดยการอบที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จะได้ผงตะกอนของโซลหรือเจลตั้งต้น (Xero-gel) ของไทเทเนียมไดออกไซด์
2. นำเจลตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการอบแล้วไปวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนด้วยเครื่อง TG/DTA
3. ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์การสลายตัวทางความร้อนของเจลตั้งต้นจะนำไปใช้อ้างอิงเพื่อ ออกแบบการเผาแคลไซน์เจลตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์

3.3.3 การศึกษาผลของอุณหภูมิการเผาแคลไซน์ที่มีต่อผงละเอียด TiO_2

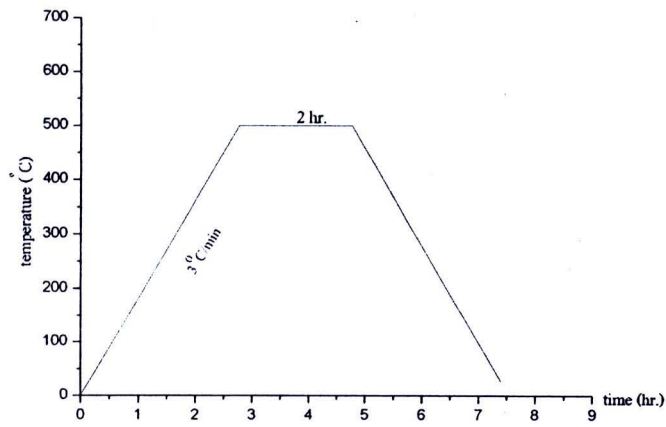
ทำการเผาแคลไซน์เจลตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่อุณหภูมิ 400 500 และ 600 °C ส โดยกำหนดอัตราเร็วในการเพิ่มอุณหภูมิ (Heating rate) เป็น 3°C / 1 min จากนั้นแช่ไว้ในอุณหภูมิที่กำหนดเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจากนั้นปล่อยให้เย็นตัวลงด้วยอัตราเร็วอิสระของเตาเผาจนถึงอุณหภูมิห้อง ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2

3.3.4 การปรับปรุงการเผาแคลไซน์ด้วยวิธีการเผาแบบ 2 ขั้นตอน

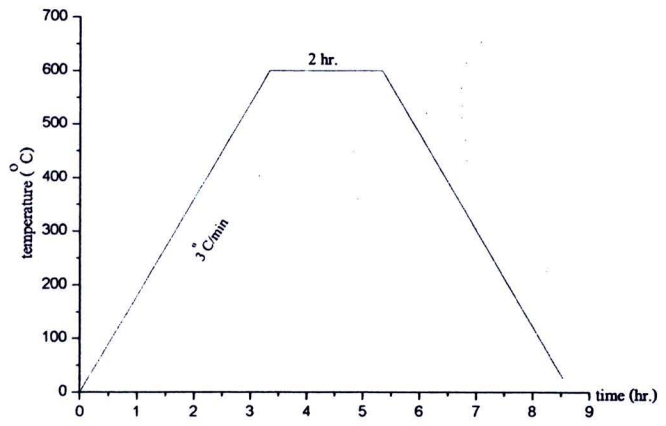
การเผาแคลไซน์แบบ 2 ขั้นตอน ในขั้นตอนแรกเป็นการเผาแคลไซน์ที่ให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่สารเกิดและอยู่ในรูปโครงสร้างผลึกที่ต้องการ โดยเวลาทำการเผาจะต้องไม่เกิดการเจริญเติบโตของนิวเคลียส โดยจะเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมนี้จากการทดลองในข้อ 3.3.3 ส่วนเวลาที่ใช้ในการเผาจะหาได้จากการเผาแคลไซน์ที่อุณหภูมิเหมาะสมเป็นเวลา 0.5-2.0 ชั่วโมง แล้วนำสารที่ได้ไปตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิค XRD เพื่อหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับการเผาแคลไซน์ จากนั้นจะทำการลดอุณหภูมิลงเพื่อให้สารที่ทำการแคลไซน์เฉื่อยลง แล้วจึงทำการให้ความร้อนขึ้นอีกครั้งในขั้นตอนที่ 2 โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาแนวโน้มของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเผาแคลไซน์ในขั้นตอนที่ 2 ซึ่งในการทดลองจะเลือกใช้อุณหภูมิที่จะมีค่าน้อยกว่า เท่ากับ และมากกว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาแคลไซน์ในขั้นตอนที่ 1 โดยจะบ่มไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ณ อุณหภูมิที่เลือก นำผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ได้มาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กระบวนการเตรียมเจลตั้งต้นและผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 3.4



(ก)



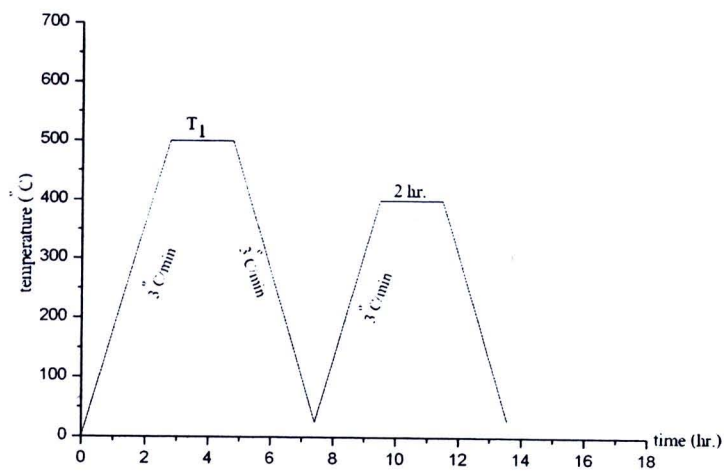
(ข)



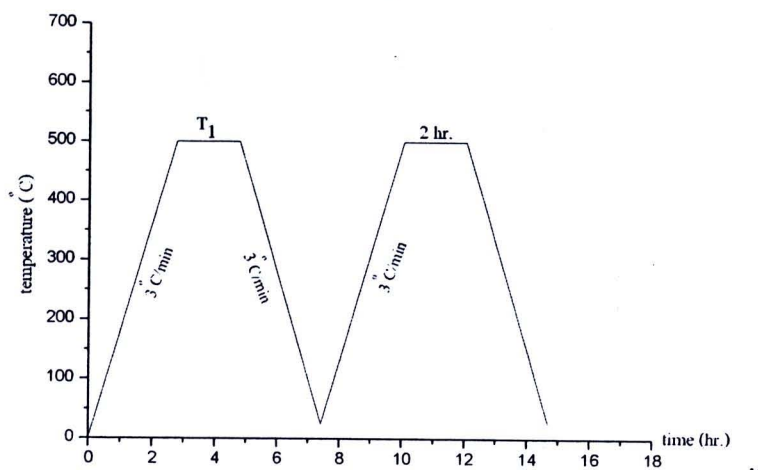
(ค)

รูปที่ 3.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์แบบ 1 ขั้นตอน

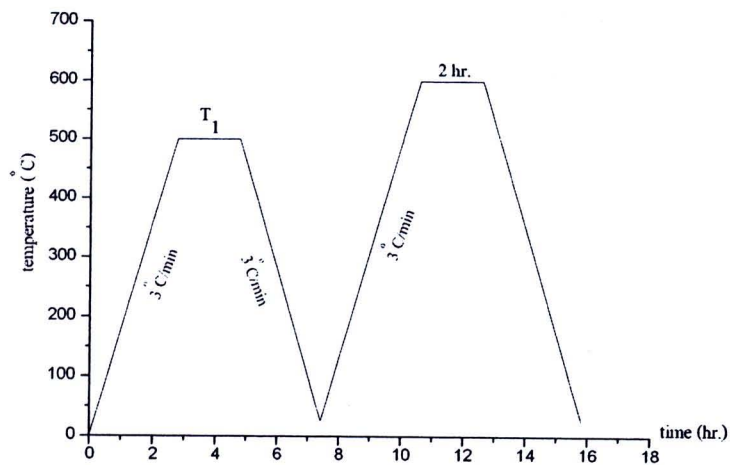
(ก) 400°C (ข) 500°C (ค) 600°C



(ก)

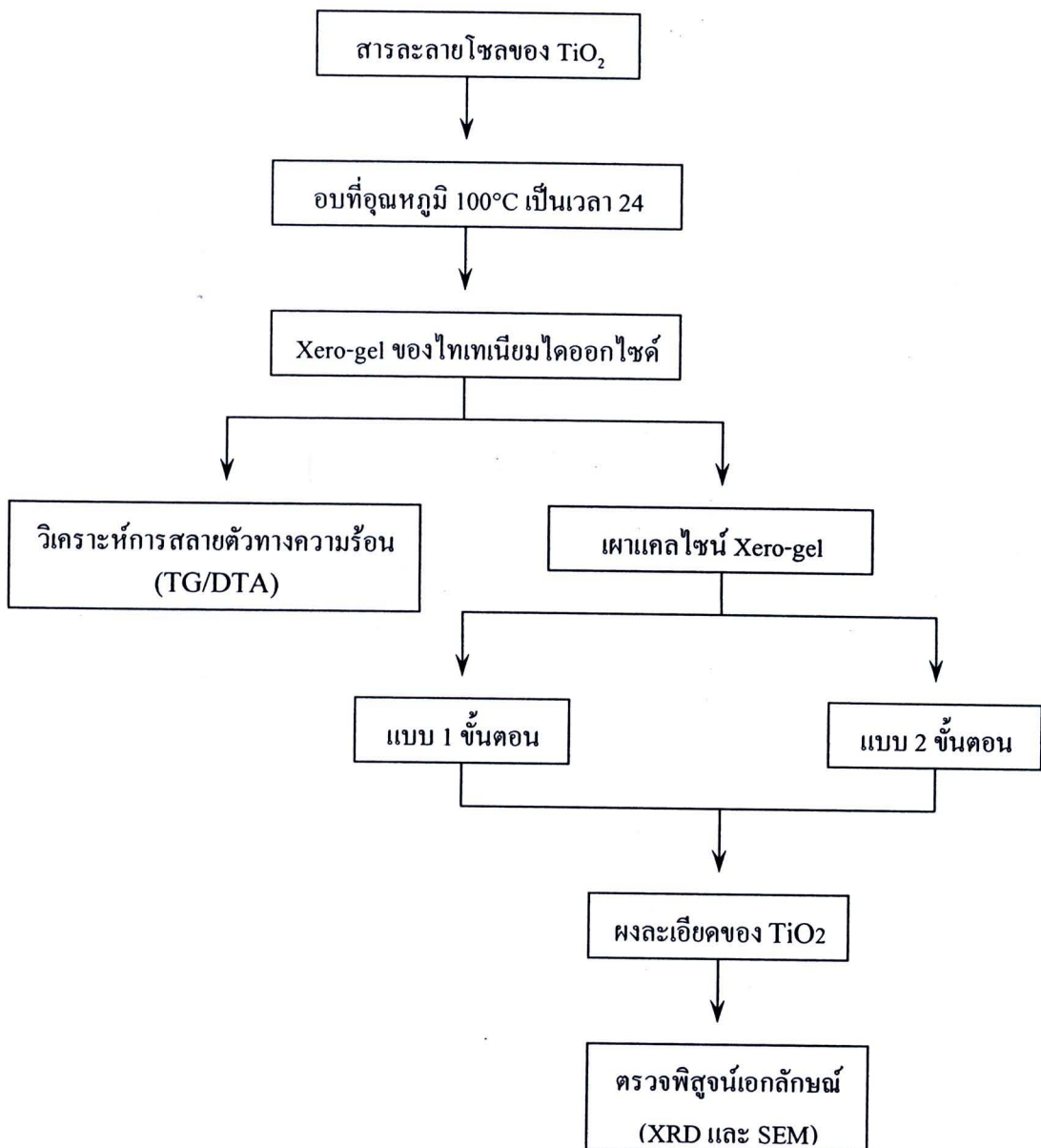


(ข)



(ค)

รูปที่ 3.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและเวลาในการเผาแคลไซน์แบบ 2 ขั้นตอน โดยอุณหภูมิในขั้นตอนที่ 2 เป็น (ก) 400°C (ข) 500°C (ค) 600°C



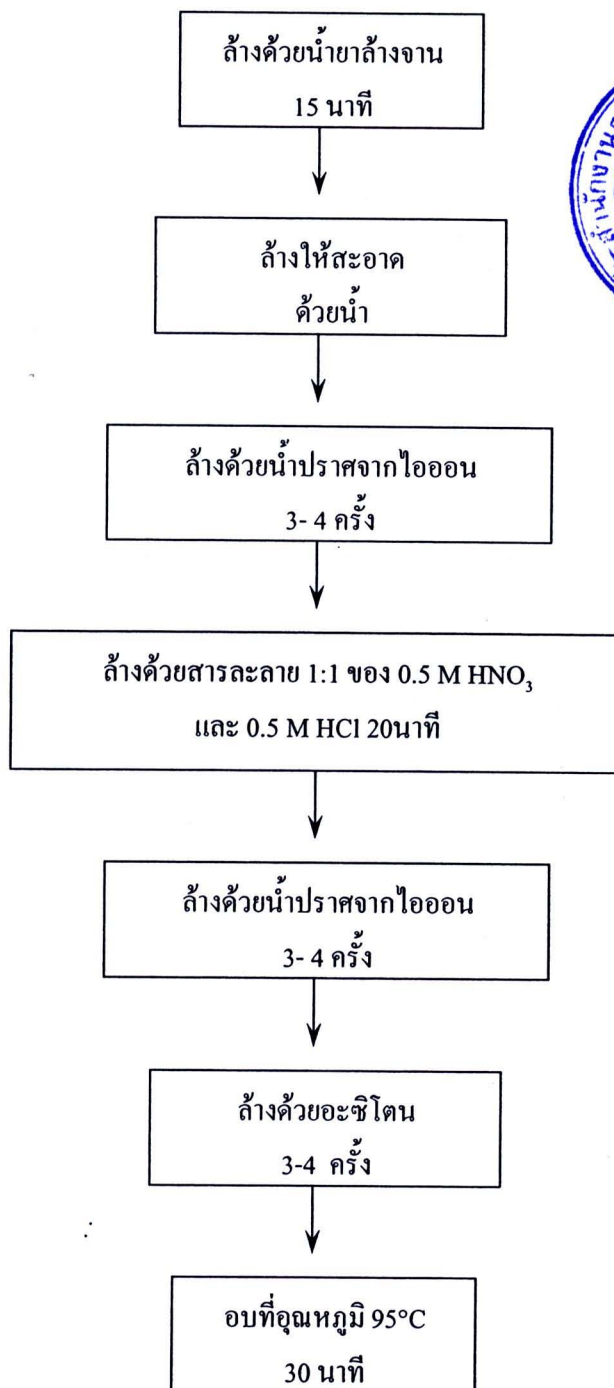
รูปที่ 3.4 แผนภาพแสดงการเตรียมเจลดั้งเดิมและผงละเอียดของ TiO_2

3.3.5 ขั้นตอนการขึ้นรูปฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์

ใช้เทคนิคการปั่นเคลือบในการขึ้นรูปบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยใช้สารละลายโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีความเข้มข้นต่างๆ เป็นสารละลายตั้งต้นในการเคลือบผิวหน้าของวัสดุรองรับที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้กระจกเป็นวัสดุรองรับ

3.3.5.1 การเตรียมวัสดุรองรับ (กระจก)

1. ทำความสะอาดกระจกด้วยน้ำยาล้างจานที่เจือจาง โดยใช้เครื่องอัลตราโซนิกเป็นเวลา 15 นาที
 2. ล้างด้วยน้ำสะอาด
 3. ล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน (น้ำ DI) 2-3 ครั้ง
 4. เตรียมกรดผสมระหว่างกรดไนตริกเข้มข้น 0.5 M และกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 M ในอัตราส่วน $\text{HCl} : \text{HNO}_3$ เป็น 1:1
 5. นำกระจกที่ล้างแล้วมาทำการโซนิเกตโดยใช้กรดผสม 20 นาทีเพื่อกำจัดไอออนและสิ่งสกปรกที่อาจตกค้างอยู่และทำให้เกิดออกไซด์บนผิวหน้าของกระจกเพื่อให้ฟิล์มยึดติดกับวัสดุรองรับได้ดีขึ้น
 6. ทำการล้างอีกครั้งในเครื่องอัลตราโซนิกโดยใช้น้ำปราศจากไอออน 3-4 ครั้ง
 7. ทำการล้างด้วยอะซิโตน 4-3 ครั้ง
 8. เมื่อทำการล้างแล้วให้เก็บกระจกโดยการแช่ในอะซิโตนเพื่อป้องกันผิวกระจกจากสิ่งสกปรกและการเกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ
 9. ก่อนนำไปใช้งานทุกครั้งต้องนำกระจกไปทำการอบในเตาที่อุณหภูมิ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- ขั้นตอนการเตรียมวัสดุรองรับ (กระจก) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.5

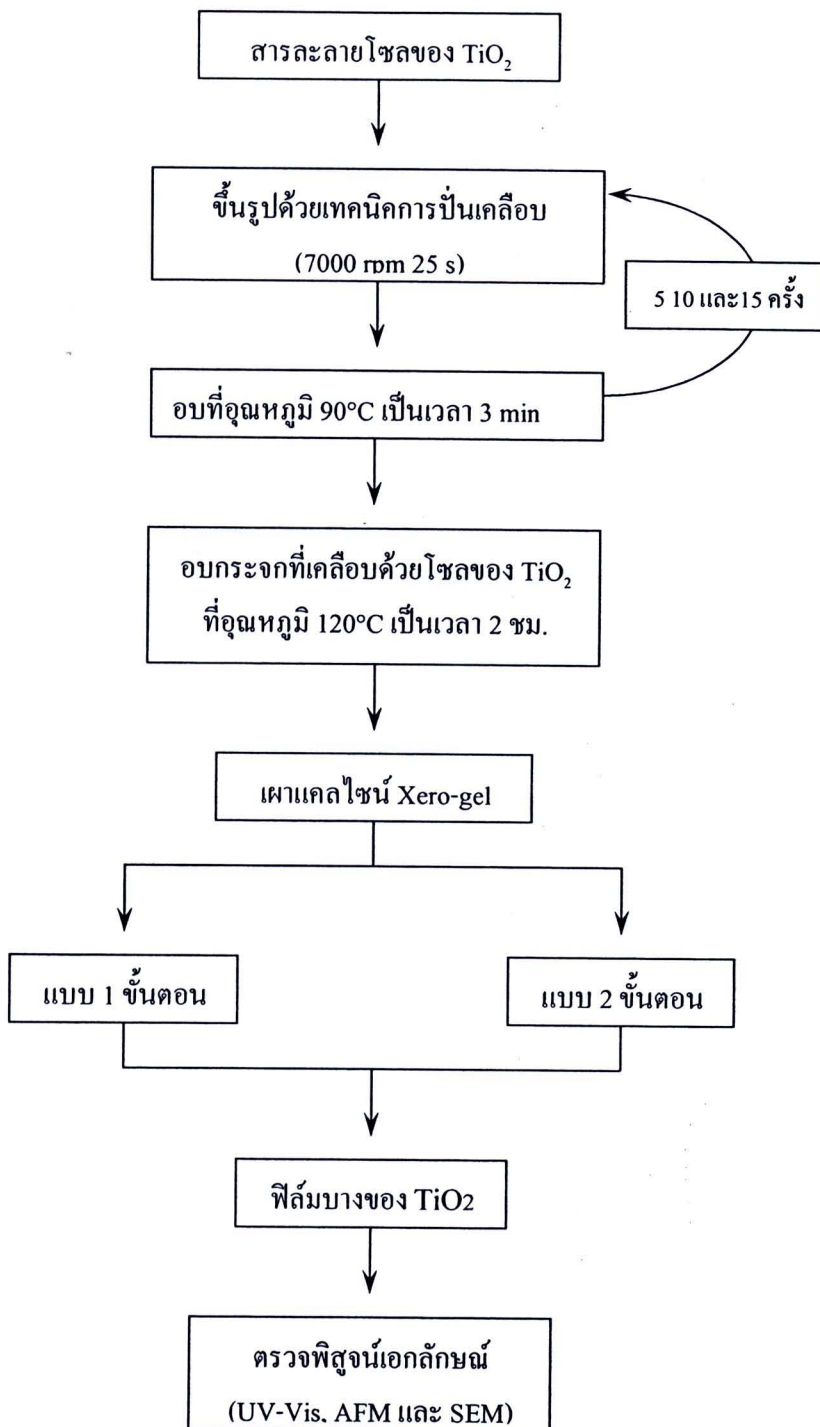


รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการเตรียมวัสดุรองรับ (กระจก)



3.3.5.2 การขึ้นรูปฟิล์มไทเทเนียมไดออกไซด์

1. ขึ้นรูปฟิล์มบางโดยปั่นเคลือบสารละลายโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ทุกความเข้มข้นบนกระจกที่เตรียมไว้ โดยใช้อัตราเร็วในการปั่นเคลือบ 7000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 25 วินาที
2. นำกระจกที่เคลือบแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 3 นาที
3. ทำการทดสอบซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-2 จนได้จำนวนชั้นของฟิล์มตามต้องการคือ 5 10 และ 15 ชั้น
4. นำกระจกที่ผ่านการปั่นเคลือบด้วยโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ตามจำนวนชั้นที่ต้องการ ไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
5. ทำการเผาแคลไซน์กระจกที่เคลือบด้วยโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ โดยทำการเผาด้วยวิธีการทั้ง 2 แบบและใช้เงื่อนไขในการเผาแคลไซน์เช่นเดียวกับการเผาผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งขั้นตอนการเตรียมฟิล์มแสดงดังรูปที่ 3.6
6. ตรวจสอบคุณสมบัติของฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrometer) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic force microscope, AFM)



รูปที่ 3.6 แสดงการเตรียมฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์

3.3.6 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซลเจลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน

ทำการเตรียมโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงินร้อยละ 0.5 1.0 1.5 และ 2.0 โดยโมล ในปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นของไทเทเนียมที่ให้ผงละเอียดและฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดจากการพิสูจน์เอกลักษณ์ การเตรียมสารละลายโซลเจลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงินมีขั้นตอนดังนี้

1. ผสมไอโซโพรพานอลประมาณ 50 มิลลิลิตร กรดอะซิติกปริมาตร 10 มิลลิลิตร อะซิติกอะซิโตนปริมาตร 2 มิลลิลิตร ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร
2. เปิดไทเทเนียม(IV)ไอโซโพรพอกไซด์ลงในสารละลายผสมในข้อที่ 1
3. ละลายซิลเวอร์ไนเตรดในน้ำปราศจากไอออนโดยใช้น้ำในปริมาตรที่น้อยที่สุด ปริมาณซิลเวอร์ไนเตรดที่ใช้ในการเจือแสดงดังตารางที่ 3.2

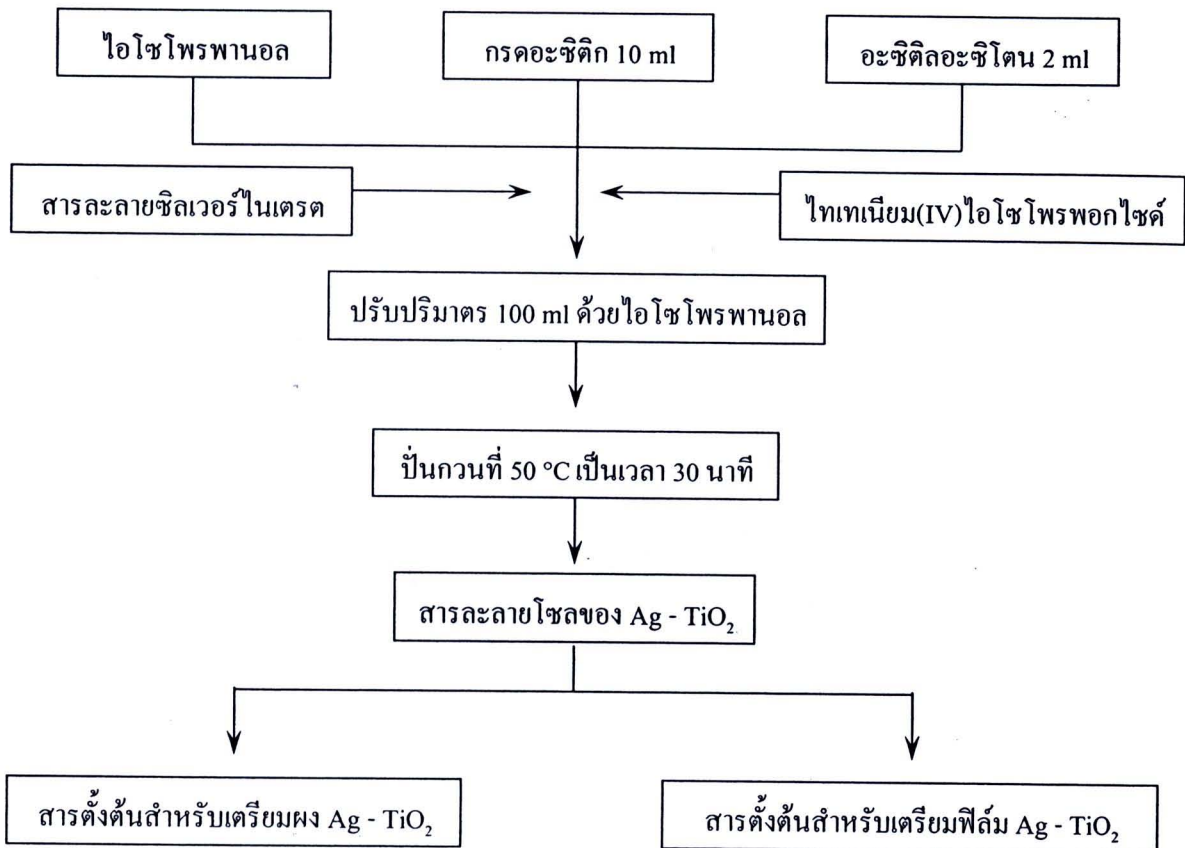
ตารางที่ 3.2 ปริมาณ AgNO_3 ที่ใช้ในการเจือสารละลายโซลเจล 0.1 M ไทเทเนียมที่ร้อยละของการเจือ Ag ต่างๆ

ร้อยละโดยโมลของ Ag	ปริมาณ AgNO_3 (g)
0.5	0.0085
1.0	0.0170
1.5	0.0255
2.0	0.0340

4. ผสมสารละลายซิลเวอร์ไนเตรดที่ได้ในข้อ 3 ลงในสารละลายข้อที่ 2 แล้วปรับปริมาตรสารละลายให้มีปริมาตร 100 มิลลิลิตร ด้วยไอโซโพรพานอล

5. ทำการปั่นกวนสารละลายที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 30 นาที

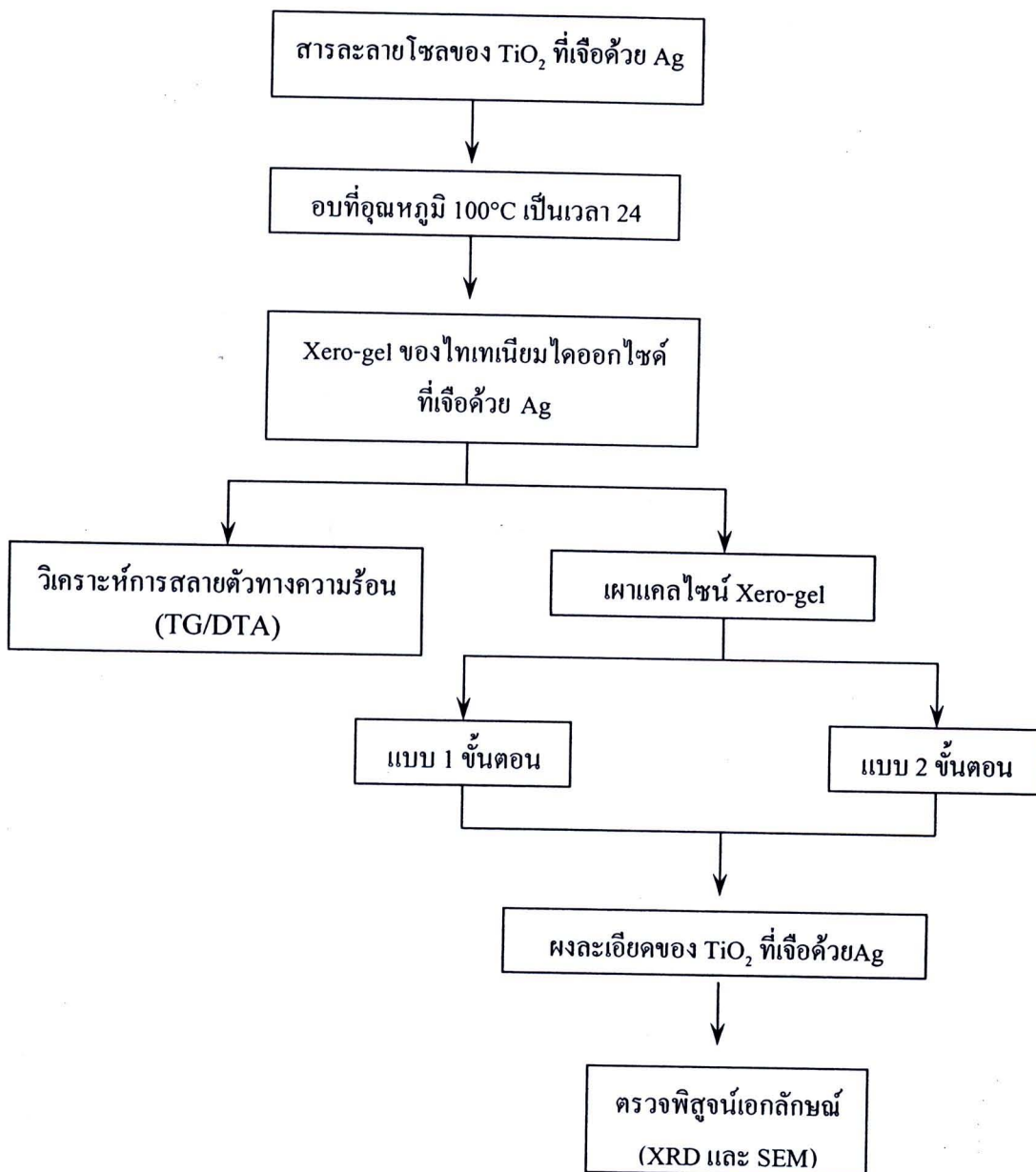
สารละลายโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงินในปริมาณต่างๆ จะถูกนำไปใช้เป็นสารละลายตั้งต้น (Precursor solution) ในการเตรียมผงละเอียดและฟิล์มบางเช่นเดียวกับไทเทเนียมไดออกไซด์บริสุทธิ์



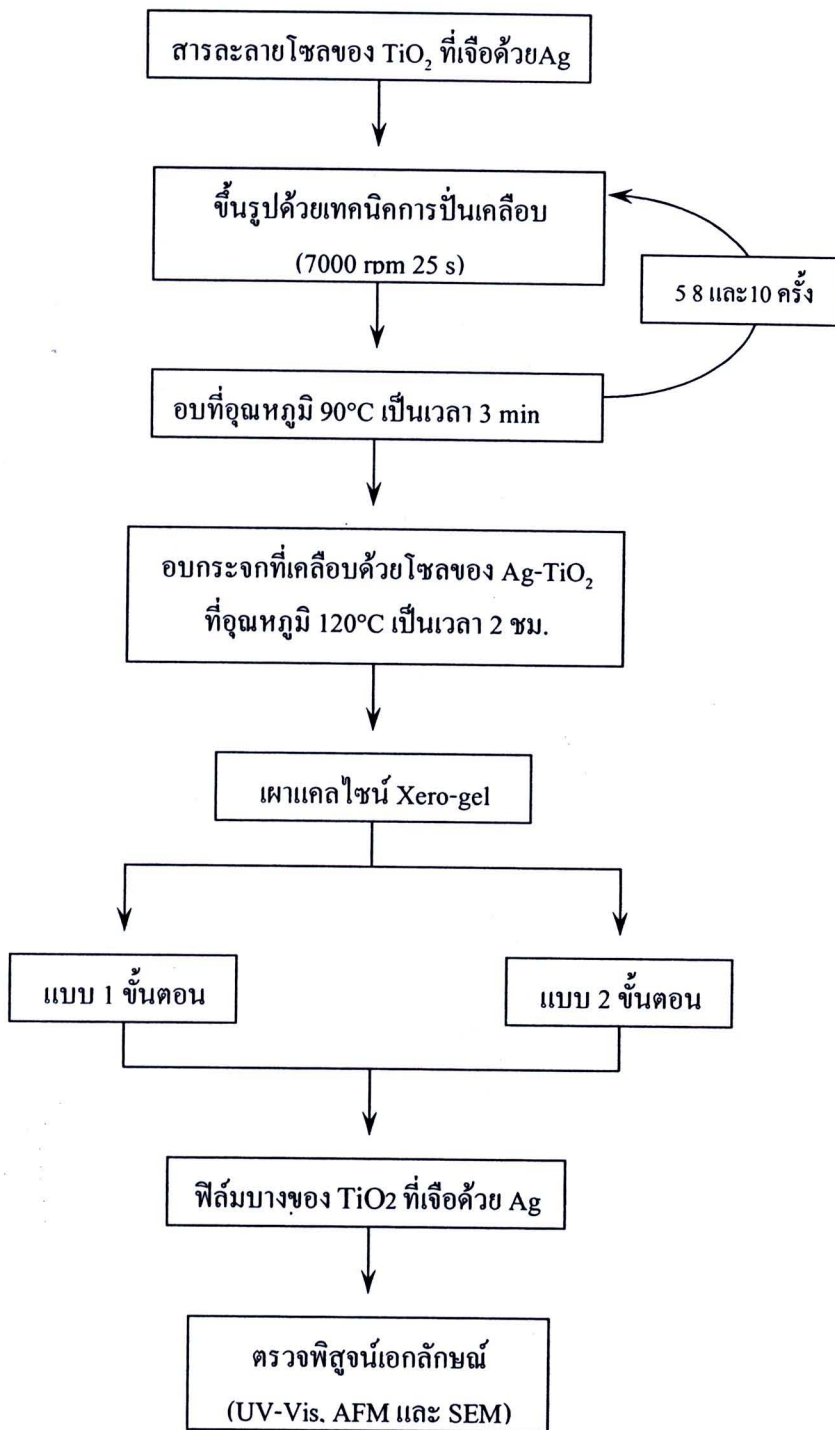
รูปที่ 3.7 แสดงการเตรียมสารละลายโซลของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน

3.3.7 ขั้นตอนการเตรียมผงละเอียดและฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน

การเตรียมผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน จะมีวิธีการเตรียมเช่นเดียวกับกระบวนการเตรียมผงละเอียดของไทเทเนียมไดออกไซด์ แต่สำหรับการเตรียมฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน จำนวนครั้งในการเคลือบเพื่อขึ้นรูปฟิล์มจะเป็น 5 8 และ 10 ชั้น ส่วนขั้นตอนและเงื่อนไขในการเผาแคลไซน์ การพิสูจน์เอกลักษณ์ ยังคงดำเนินงานในลักษณะเดียวกันกับผงละเอียดและฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ ซึ่งขั้นตอนการเตรียมผงละเอียดและฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงินแสดงได้ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ



รูปที่ 3.8 แผนภาพแสดงการเตรียมผงละเอียดของ TiO_2 ที่เจือด้วยโลหะเงิน



รูปที่ 3.9 แสดงการเตรียมฟิล์มบางของไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน

3.3.8 การตรวจสอบพฤติกรรมทางความร้อนของเจลตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน

ในกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเคมีหรือการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสารนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงทางความร้อนเกิดขึ้น ซึ่งความร้อนที่เปลี่ยนแปลงไปนั้นสามารถตรวจวัดได้ด้วยเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลเทอมอลอนาไลซิส (DTA) ส่วนพฤติกรรมการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนของสารสามารถวิเคราะห์ได้โดยเทคนิคเทอร์โมกราวิเมตริกอนาไลซิส (TGA) ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์จะทำให้ทราบถึงช่วงอุณหภูมิโดยประมาณในการเกิดปฏิกิริยาเคมีและการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของสาร ซึ่งช่วงอุณหภูมิดังกล่าวจะใช้เป็นช่วงอุณหภูมิสำหรับการเผาแคลไซน์เจลตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาพฤติกรรมทางความร้อนของสารด้วยเครื่อง TG/DTA ที่มีสถานะในการวิเคราะห์ ดังนี้

ช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการวิเคราะห์	50-700 °C
อัตราการให้ความร้อน	10°C/min
อัตราการไหลก๊าซไนโตรเจน	20 มิลลิลิตร/min
ปริมาณสารตัวอย่าง	20-30 mg
บรรยากาศที่ใช้ในการวิเคราะห์	ไนโตรเจน

3.3.9 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน

เจลตั้งต้นของไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงินที่ผ่านกระบวนการเผาแคลไซน์แล้วจะนำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อให้ทราบถึงชนิดและปริมาณของโครงสร้างผลึกที่เกิดขึ้นในผงละเอียดไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน เนื่องจากผลการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่แสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม (Intensity; I) กับค่ามุม 2θ ในสมการของแบรกก์ (สมการที่ 3.1) นั้นมีความจำเพาะเจาะจงต่อโครงสร้างผลึกแต่ละชนิด

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (3.1)$$

- เมื่อ θ คือ มุมที่รังสีเอกซ์ตกกระทบและเลี้ยวเบนกับระนาบของผลึก (hkl)
 n คือ เลขใด ๆ $n = 1, 2, 3, \dots$
 λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.54 06Å)

d คือ ค่าระยะห่างระหว่างระนาบของผลึก (hkl)

นอกจากนี้ข้อมูลที่ได้จากการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ยังสามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าเศษส่วนโดยมวลของโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ ค่าแลตทิซพารามิเตอร์ และขนาดอนุภาคของสารตัวอย่างได้อีกด้วย

3.3.9.1 การคำนวณค่าเศษส่วนโดยมวลของรูไทล์ (Mass fraction; X_R)

เศษส่วนโดยมวลของโครงสร้างผลึกแบบรูไทล์ในไทเทเนียมไดออกไซด์ที่ผ่านการเผาแคลไซน์แล้ว สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.2) ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของพีกหลักของโครงสร้างแบบอะนาเทส (I_A) และความเข้มของพีกหลักของโครงสร้างแบบรูไทล์ (I_R) (ref 1)

$$X_R = \frac{1}{1 + 0.8(I_A / I_R)} \quad (3.2)$$

3.3.9.2 การคำนวณค่าแลตทิซพารามิเตอร์ (Lattice parameter)

สำหรับค่าแลตทิซพารามิเตอร์ของโครงสร้างผลึกแบบอะนาเทสและรูไทล์ของ TiO_2 ที่มีระบบผลึกเป็นแบบเตตระโกนอล (Tetragonal) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3.3)

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.3)$$

เมื่อ hkl คือ ระนาบของผลึก

a และ c คือ แลตทิซพารามิเตอร์ ซึ่งในระบบผลึกแบบเตตระโกนอลมีลักษณะของหน่วยเซลล์ (Unit cell) ดังนี้ $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

3.3.9.3 การคำนวณขนาดของอนุภาค (Particle size)

การคำนวณขนาดอนุภาคของไทเทเนียมไดออกไซด์สามารถคำนวณได้จากสมการของเชียร์เลอร์ (Scherer equation) ดังสมการที่ (3.4)

$$\tau = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (3.4)$$

เมื่อ τ คือ ขนาดอนุภาค

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.54 06 Å)

β คือ ความกว้างของพีกที่ความสูงเป็นครึ่งหนึ่งของความสูงของพีก (FWHM)

ในงานวิจัยนี้ทำการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์สารตัวอย่างด้วยเทคนิค XRD ซึ่งมีสภาวะในการวิเคราะห์ ดังนี้

2 θ เริ่มต้น-สิ้นสุด	20°-80°
Step size	0.100°
Time/step	3 sec

3.3.10 การตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ของฟิล์มบางไทเทเนียมไดออกไซด์และไทเทเนียมไดออกไซด์ที่เจือด้วยโลหะเงิน

1. ศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
2. ศึกษาโครงสร้างในระดับจุลภาคและขนาดความสม่ำเสมอของอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM)
3. ศึกษาสมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) โดยวัดเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของรังสีในช่วงความยาวคลื่น 200 nm ถึง 500 nm