

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเคลือบผ้าด้วยกระบวนการโซล-เจล

ผลการทดสอบหาสภาวะที่เหมาะสม โดยศึกษาปัจจัยต่างๆ ได้แก่กระบวนการเคลือบผิว (จุ่มอัดหรือจุ่มแช่) เวลาในการแช่ผ้า ปริมาณน้ำ และอุณหภูมิ เป็นดังต่อไปนี้

ผลจากกระบวนการเคลือบผิว

ตารางที่ 4.1 แสดงผลจากกระบวนการเคลือบผิว ระหว่างวิธีจุ่ม-อัด และวิธีจุ่มแช่ โดยวิธีการจุ่มอัดหมายถึงการเคลือบผิวผ้าโดยการจุ่มลงในสารละลายและอัดด้วยลูกกลิ้ง ขณะที่การจุ่มแช่นั้นเป็นการจุ่มผ้าลงในสารละลายโซลและปล่อยให้แห้งเองที่อุณหภูมิห้อง ผ้าตัวอย่างที่เตรียมได้จะนำไปทดสอบการปลดปล่อยสารเคอร์คูมินลงในสารละลายตัวกลาง (อะซิเตตบัฟเฟอร์ผสมสารลดแรงตึงผิว 10% v/v) ซึ่งค่าการดูดกลืนแสงจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารเคอร์คูมินในตัวกลาง หากค่าการดูดกลืนแสงมาก แสดงว่าเคอร์คูมินมีความเข้มข้นสูง จากการทดสอบจะเห็นว่าการจุ่มแช่ให้ปริมาณเคอร์คูมินสูงกว่าการจุ่มอัด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การจุ่มอัดนั้นมีการบีบสารละลายจำนวนหนึ่งออกจากผ้า ซึ่งทำให้มีการสูญเสียทั้งเคอร์คูมินและสารตั้งต้นในกระบวนการโซลเจลบางส่วนออกไป ขณะที่การจุ่มแช่มีการสูญเสียน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบในการเคลือบผิวด้วยวิธีการจุ่มแช่คือ ลักษณะการเคลือบผิวเป็นไปอย่างไม่สม่ำเสมอ และผ้ามีความกระด้างมาก เนื่องจากซิลิกาที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์มีความหนาแน่นสูง ซึ่งอาจไม่เหมาะในการนำไปใช้งาน

ตารางที่ 4.1 ผลของกระบวนการที่ใช้ในการเคลือบผิวดต่อค่าการดูดกลืนคลืนแสงของสารตัวกลางในการทดสอบการปลดปล่อยสารเคอร์คูมินจากผ้า

กระบวนการที่ใช้ในการเคลือบผิว	ค่าการดูดกลืนคลืนแสงที่เวลาต่างๆ (ชั่วโมง)			
	3	6	24	27
วิธีจุ่มอัด	0.253	0.886	2.022	2.045
วิธีจุ่มแช่	0.678	2.348	4.682	4.460

หมายเหตุ การทดสอบค่าการดูดกลืนแสงในที่นี้เป็นเพียงการแสดงแนวโน้ม มิได้นำไปคำนวณเป็นความเข้มข้นของสารเคอร์คูมิน เนื่องจากค่าการดูดกลืนแสงที่สูงกว่า 1.00 นั้นจะมีค่าความผิดพลาดสูง

ผลจากเวลาในการแช่ผ้า

จากการศึกษาผลจากเวลาในการแช่ผ้าในสารละลายโซล พบว่า ระยะเวลาในการแช่ผ้านั้น ไม่มีผลต่อปริมาณของสารเคอร์คูมินที่ปลดปล่อยออกมาจากผ้าอย่างชัดเจน (แสดงผลในตารางที่ 4.2) ซึ่งอาจอธิบายได้ว่า การดูดซับสารตั้งต้นและสารเคอร์คูมินเข้าไปในผ้านั้นเสร็จสิ้น (เข้าสู่สมดุล) อย่างรวดเร็ว นั่นคือเคอร์คูมินและสาร TEOS สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เส้นใยและดูดซับบนเส้นใยเซลลูโลสได้ดี ซึ่งเป็นข้อได้เปรียบในการใช้งานในอุตสาหกรรม เนื่องจากระบวนการตกแต่งสำเร็จ (เคลือบผิว) ผ้านั้นมักเป็นแบบต่อเนื่อง¹

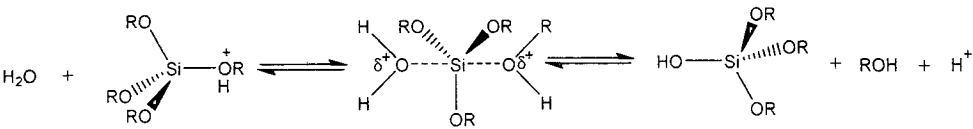
ตารางที่ 4.2 ผลของระยะเวลาแช่ผ้าในสารละลายโซลต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารตัวกลางในการทดสอบการปลดปล่อยสารเคอร์คูมินจากผ้า

เวลาในการแช่ผ้า (ชั่วโมง)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่เวลาต่างๆ (ชั่วโมง)			
	3	6	24	27
0.5	1.764	2.520	3.881	3.686
1	1.470	2.201	3.568	3.719
3	2.003	2.690	3.763	3.860

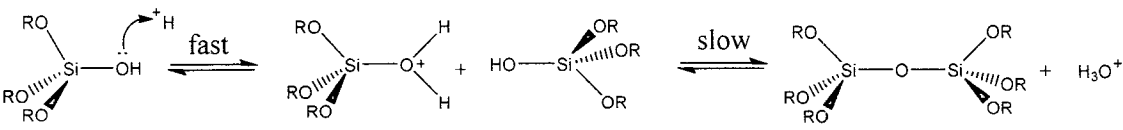
ผลจากอัตราส่วนของน้ำต่อสารตั้งต้น TEOS

ผลของปัจจัยอัตราส่วนของน้ำต่อสาร TEOS แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 เมื่อเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการโซล-เจลที่มีน้ำเป็นส่วนผสม กับกระบวนการที่ไม่ผสมน้ำ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า น้ำมีความจำเป็นต่อการสังเคราะห์ซิลิกาบนผิวผ้าเพื่อกักเก็บสารเคอร์คูมิน ซึ่งจะทำสารเคอร์คูมินติดอยู่ในตัวอย่างผ้าได้มาก จึงเห็นการปลดปล่อยสารเคอร์คูมินออกมาได้มาก การมีน้ำในระบบมีความจำเป็น เนื่องจากการเกิดโครงร่างตาข่ายผ่านกระบวนการโซล-เจลจะต้องเกิดผ่านปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis reaction) ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.1

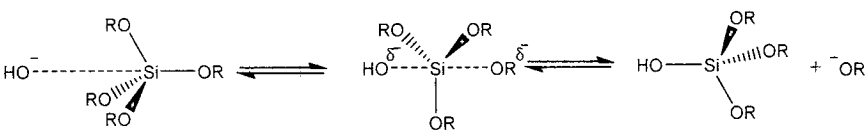
Acid-catalyzed hydrolysis



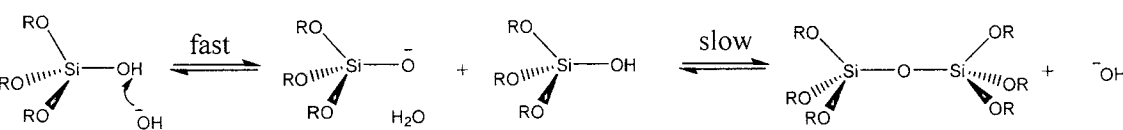
Acid-catalyzed condensation



Base-catalyzed hydrolysis



Base-catalyzed condensation



รูปที่ 4.1 แสดงขั้นตอนสำคัญในการเกิดพอลิเมอร์โซล-เจลของกระบวนการโซล-เจล โดยใช้ TEOS เป็นสารตั้งต้น (R คือหมู่เอทอกซี -OC₂H₅)

ตารางที่ 4.3 ผลของน้ำต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารตัวกลางในการทดสอบการปลดปล่อยสารเคอร์คิวมินจากผ้า

ตัวอย่าง	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่เวลาต่างๆ (ชั่วโมง)			
	3	6	24	27
อัตราส่วนน้ำต่อ TEOS เท่ากับ 3:1	0.678	2.348	4.682	4.460
ไม่ใส่น้ำในระบบ	0.253	0.886	2.022	2.045

จากผลของน้ำจะเห็นได้ว่า หากสารตั้งต้น TEOS ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นซิลิกาบนผ้าได้ จะทำให้ปริมาณเคอร์คิวมินที่ติดอยู่บนผ้านั้นน้อยกว่าเมื่อมีน้ำและกระบวนการโซล-เจลเกิดขึ้นสำเร็จ

ผลจากอุณหภูมิ

ผลของอุณหภูมิที่ทำให้ผ้าแห้งหลังจากตากแดดด้วยวิธีจุ่มแช่ แสดงไว้ในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าการดูดกลืนคลื่นแสงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ หรืออาจกล่าวได้ว่า การให้ความร้อนเพื่ออบผ้าไม่ทำให้โครงสร้างตาข่ายของซิลิกาบนผ้าฝ้ายมีความแตกต่างกันมากนัก และเนื่องจากเป็นการให้ความร้อนภายหลังนำผ้าขึ้นจากสารละลายโซลแล้ว จึงไม่มีผลต่อปริมาณเคอร์คิวมินหรือสารตั้งต้นที่ถูกดูดซับไว้ในผ้า ความร้อนที่ไม่เพียงพอที่จะทำให้โครงสร้างตาข่ายที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน มีรายงานว่าเคอร์คิวมินสามารถทนความร้อนได้ถึง 160°C³ อย่างไรก็ตาม การให้ความร้อนสูงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน และมีหลักฐานทางวิชาการว่า ความร้อนจะทำให้เกิดความเครียดและรบกวนในโครงสร้างตาข่ายทรวดตัวลง ทำให้สารที่กักเก็บได้เหลือน้อยลงด้วย

ตารางที่ 4.4 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ทำให้ผ้าที่ผ่านการจุ่มแช่ในสารละลายโซลแห้ง ต่อค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารตัวกลางในการทดสอบการปลดปล่อยสารเคอร์คิวมินจากผ้า

อุณหภูมิที่ใช้ทำให้ผ้าแห้ง	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่เวลาต่างๆ (ชั่วโมง)			
	3	6	24	27
อุณหภูมิห้อง 27°C	0.068	0.235	0.468	0.446
40°C	0.247	0.220	0.403	0.459
60°C	0.175	0.232	0.383	0.436
80°C	0.246	0.273	0.456	0.454

4.2 การหา % wet pickup และ % add-on

ตัวแปร % wet pickup ในกระบวนการตากแดดสำเร็จสิ่งทอ หมายถึง ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ในการตากแดดสำเร็จที่ถูกผ้าดูดซับในการจุ่มอัด สามารถคำนวณได้จากผลต่างน้ำหนักเปียกของผ้าซึ่งต้องชั่งทันทีหลังบีบอัด หักออกด้วยน้ำหนักแห้งของผ้าก่อนจุ่มสารละลาย และหารด้วยน้ำหนักแห้งของผ้าก่อนจุ่มสารละลาย ตามสมการ⁴

$$\%wet\ pickup=\frac{wt.of\ wet\ fabric\ after\ pad-wt.\ of\ dry,\ untreated\ fabric\times 100}{wt.\ of\ dry,\ untreated\ fabric}$$

(4.1)

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นว่า ค่า %wet pickup อยู่ในช่วง 73.4 ถึง 86.9% เนื่องจาก TEOS มีความหนาแน่นสูงกว่าเอทานอล ดังนั้น เมื่อผ้าดูดซับ TEOS จะทำให้น้ำหนักเปียกของผ้ามากกว่ากรณีตัวอย่างที่ไม่มี TEOS (ตัว control) ค่า % wet pickup ที่สูงจะบอกถึงปริมาณสารเคมีที่ดูดซับเข้าไปในผ้าได้มาก ดังนั้นสารเคมีเหล่านี้นักก็จะเกิดปฏิกิริยาดูดซับน้ำได้มากขึ้นเช่นกัน ซึ่งจะสะท้อนอยู่ในรูปของตัวแปรอีกตัวหนึ่งได้ นั่นคือ % add-on ซึ่งคำนวณได้จากการนำน้ำหนักของผ้าที่ผ่านการเคลือบผิวและทำให้แห้งแล้วหักออกด้วยน้ำหนักผ้าแห้งก่อนเคลือบผิว หาคด้วยน้ำหนักผ้าแห้งก่อนเคลือบผิว ดังสมการ⁵

$$\%add-on=\frac{wt.\ of\ dry,\ treated\ fabric-wt.\ of\ dry,\ untreated\ fabric\times 100}{wt.\ of\ dry,\ untreated\ fabric}$$

(4.2)

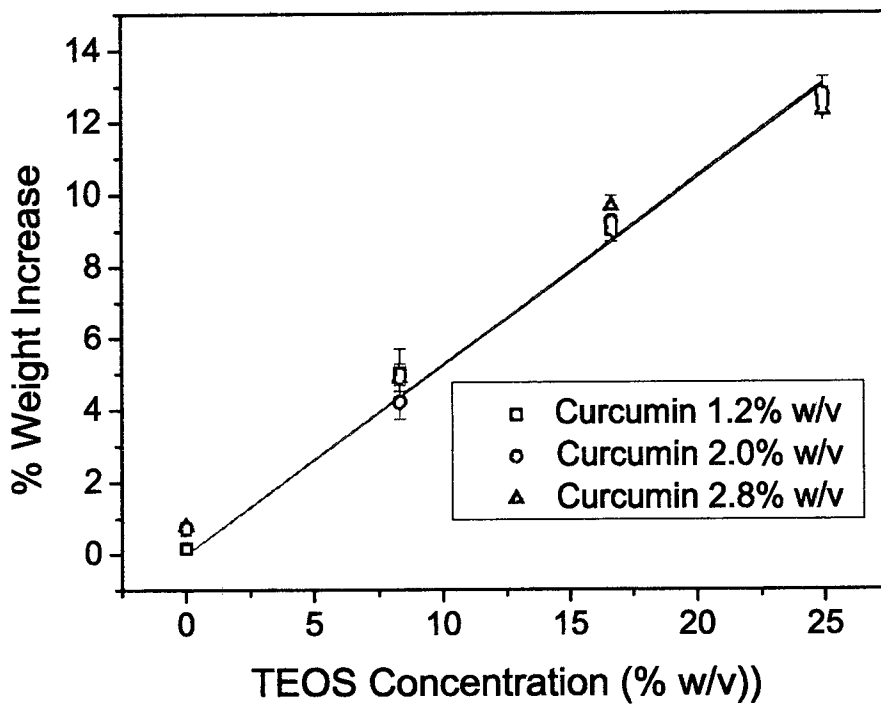
ดังนั้น % add-on จะบอกถึงปริมาณของสารเคมีในรูปของแข็งซึ่งเคลือบอยู่บนผิวผ้าได้สำเร็จ ภายหลังกระบวนการเคลือบผิว นั้นทำให้คาดได้ว่า ตัวอย่างที่มี % add-on มากจะมีปริมาณสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการโซล-เจลติดอยู่สูงเช่นกัน

ตารางที่ 4.5 ค่า % wet pickup และค่า % add-on

ตัวอย่าง	% wet pickup	% add-on
C-30	73.4±4.0	0.2±0.1
T10-30	82.4±1.1	5.1±0.6
T20-30	85.2±2.2	9.1±0.4
T30-30	84.9±3.3	12.8±0.2
C-50	74.8±4.0	0.7±0.2
T10-50	82.9±4.0	5.0±1.4
T20-50	83.1±3.2	9.4±0.2
T30-50	86.9±1.3	13.4±0.7
C-70	78.6±2.7	1.0±0.2
T10-70	83.0±5.9	5.0±0.4
T20-70	88.0±3.1	10.1±0.1
T30-70	85.6±3.4	13.0±0.2

4.3 ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารตั้งต้น กับน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของผ้าตัวอย่าง

น้ำหนักของผ้าตัวอย่างภายหลังการตกแต่งย่อมเพิ่มมากขึ้นจากน้ำหนักของสารเคมีที่ใช้ในการเคลือบผิว ซึ่งเมื่อหักน้ำหนักของเคอร์คูมินในผ้าออกแล้ว น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นย่อมเกิดจากน้ำหนักของซิลิกาบนผิวผ้า ซึ่งสังเคราะห์ได้จากกระบวนการโซล-เจลนั่นเอง จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่า ความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับความเข้มข้นของสารตั้งต้น TEOS นั้นเป็นเส้นตรงที่ทับกันโดยไม่ขึ้นกับความเข้มข้นเคอร์คูมินเริ่มต้นในสารละลายโซล ข้อมูลทุกเส้นมีค่าความชัน 0.52 และมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (correlation coefficient) สูงถึง 0.97-0.99 แสดงว่ามีความแม่นยำสูง นั่นคือ เราสามารถประมาณค่าน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นของชิ้นตัวอย่างได้จากค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของ TEOS อย่างน้อยในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษานี้



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นกับปริมาณความเข้มข้น TEOS เริ่มต้นในสารละลาย sol ที่ปริมาณเคอร์คูมินต่างๆ

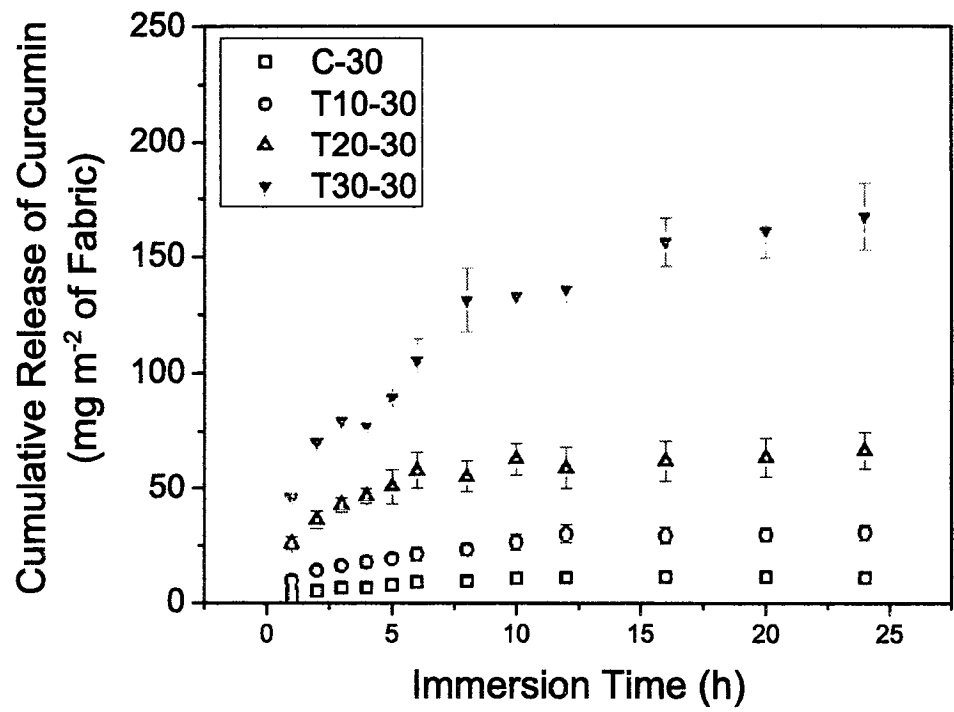
4.4 ศึกษาผลการปลดปล่อยสารเคอร์คูมินด้วยเทคนิค Total immersion

รูปที่ 4.3 แสดงการปลดปล่อยแบบสะสม (cumulative release) ของสารเคอร์คูมินจากตัวอย่างผ้า โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเคอร์คูมินเทียบกับพื้นที่ผิวผ้า (20 ตร.ซม.) แม้ว่าผ้าฝ้ายจะเป็นตัวดูดซับ

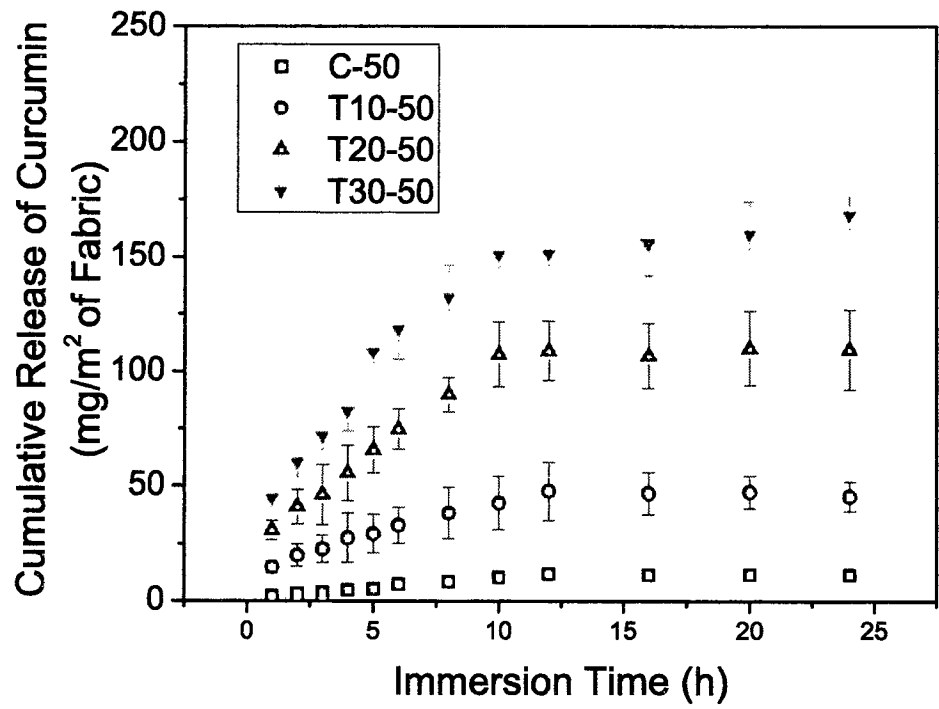
ที่ดีและน่าจะดูดซับเคอร์คูมินได้มาก แต่แรงระหว่างโมเลกุลของเส้นใยเซลลูโลสในผ้าฝ้ายกับเคอร์คูมินนั้นเป็นแรงระหว่างโมเลกุลอ่อนๆ ได้แก่ แรงแวนเดอร์วาลส์ และพันธะไฮโดรเจน ซึ่งการดูดซับนี้สามารถผันกลับได้ จึงทำให้โมเลกุลเคอร์คูมินหลุดจากผ้าฝ้ายได้ง่าย (สิดก) เมื่อทำการย้อมผ้าฝ้ายด้วยสีจากขมิ้นโดยไม่ใช้สารตัวช่วยอื่นๆ ดังนั้น เมื่อผ้าฝ้ายไม่ผ่านการเคลือบด้วยซิล-เจล สารเคอร์คูมินจะหลุดออกจากผ้าอย่างง่ายดายและรวดเร็ว ทำให้มีปริมาณเคอร์คูมินเหลืออยู่ในผ้าน้อย (อย่างไรก็ตาม มีการวิจัยว่าการเคลือบผิวผ้าฝ้ายด้วยกระบวนการซิล-เจลและให้ความร้อนเข้าช่วยจะทำให้โมเลกุลสีในโครงสร้างซีโรเจลติดดีขึ้น ทนต่อการซักมากขึ้น⁶) การปลดปล่อยของเคอร์คูมินออกจากผ้าชุดควบคุม (ชุดที่ไม่ผ่านกระบวนการซิล-เจล) จึงต่ำกว่าผ้าชุดที่มีการเคลือบด้วยซิล-เจล และเมื่อใช้สารตั้งต้น TEOS ในการเคลือบผิวผ้ามากขึ้น ก็จะทำให้พบว่ามีปริมาณเคอร์คูมินในผ้ามีมากขึ้นเช่นกันเนื่องจากโครงร่างตาข่ายมีความหนาแน่นมากขึ้น การทดสอบการปลดปล่อยสารเคอร์คูมินยวติที่ 24 ชั่วโมง เนื่องจากเส้นกราฟเริ่มเป็นเส้นตรง แสดงว่าการปลดปล่อยใกล้หรือเข้าสู่จุดสิ้นสุดแล้ว

รูปที่ 4.4 แสดงการปลดปล่อยแบบสะสม (cumulative release) ของสารเคอร์คูมินจากตัวอย่างผ้า โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์น้ำหนักเคอร์คูมินเทียบกับน้ำหนักเคอร์คูมินทั้งหมดที่อยู่ในผ้า พบว่าปริมาณเคอร์คูมินจากผ้าที่ผ่านการเคลือบซิล-เจล จะปล่อยเคอร์คูมินออกมาประมาณ 50-60% ของปริมาณเคอร์คูมินเริ่มต้น ส่วนผ้าชุดควบคุมปลดปล่อยออกมาประมาณ 70-80% เมื่อเวลาในการปลดปล่อยผ่านไป 24 ชั่วโมง โดยที่จะสังเกตได้ว่าตัวอย่างที่ใช้สารตั้งต้น TEOS นั้นจะมีการปลดปล่อยเคอร์คูมินเพิ่มขึ้นน้อยลง 12 ชั่วโมงผ่านไป

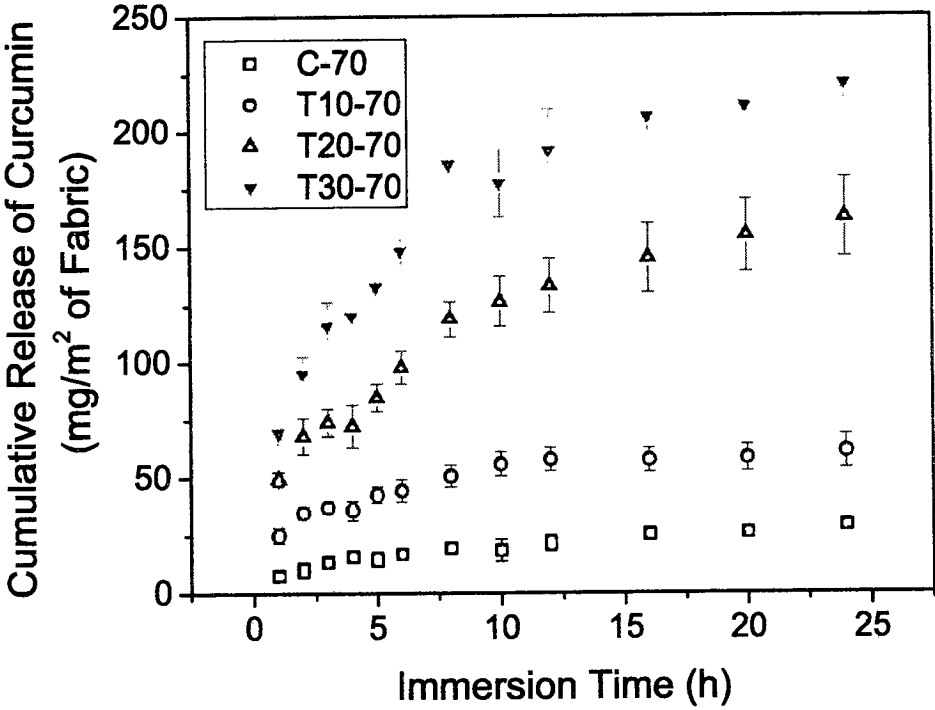
(a)



(b)

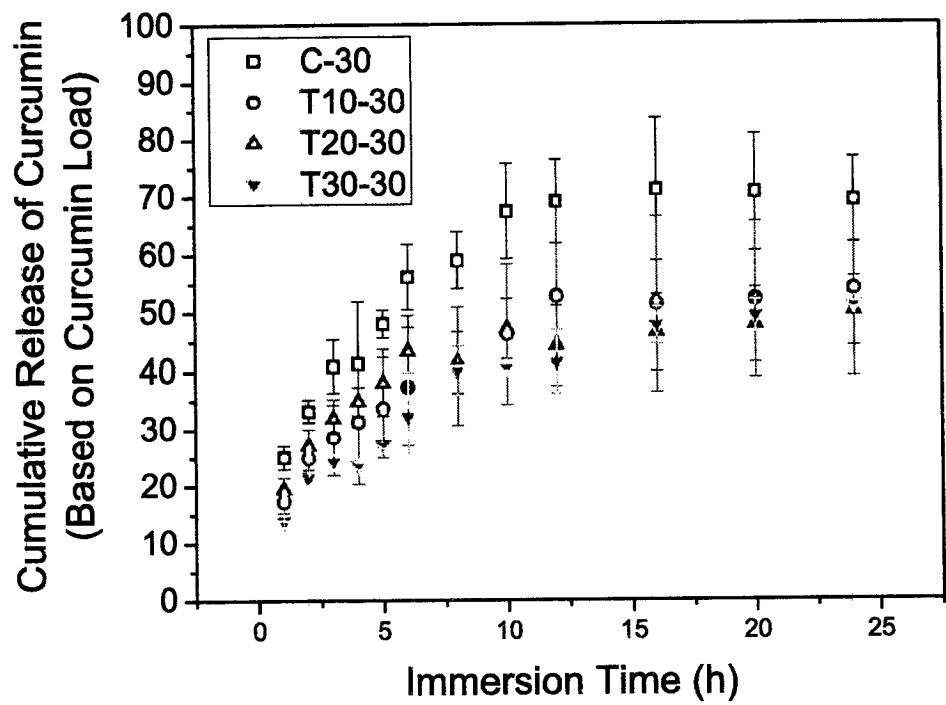


(C)

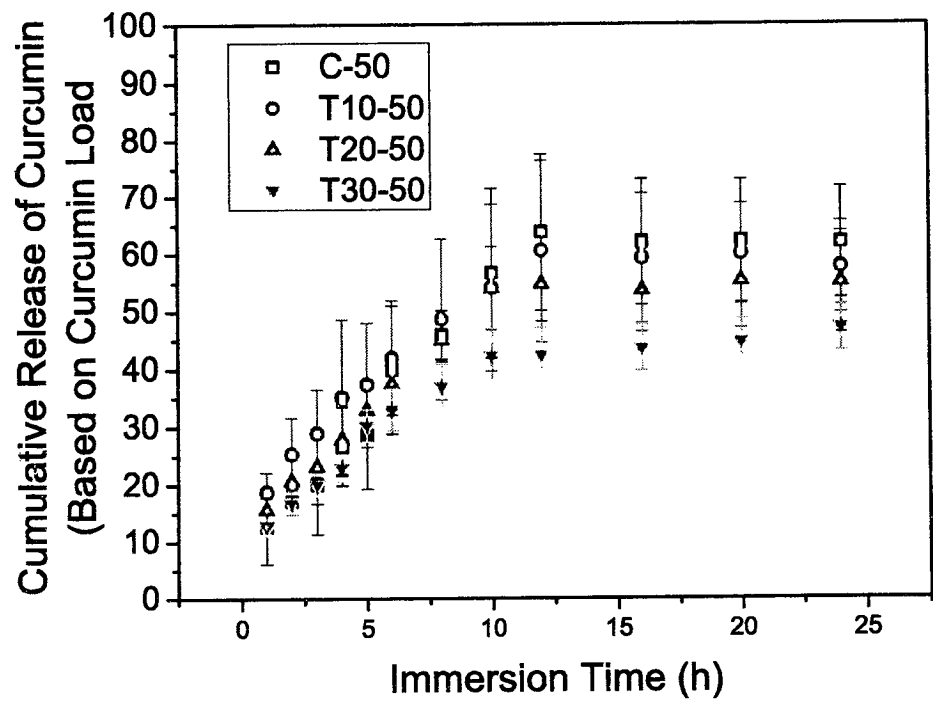


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงการปลดปล่อยแบบสะสมของสารเคอร์คูมินจากตัวอย่างผ้า โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักเคอร์คูมินที่ปลดปล่อยเทียบกับพื้นที่ผิวผ้า เปรียบเทียบกรณีเคอร์คูมิน (a) 0.3 (b) 0.5 (c) 0.7 กรัม

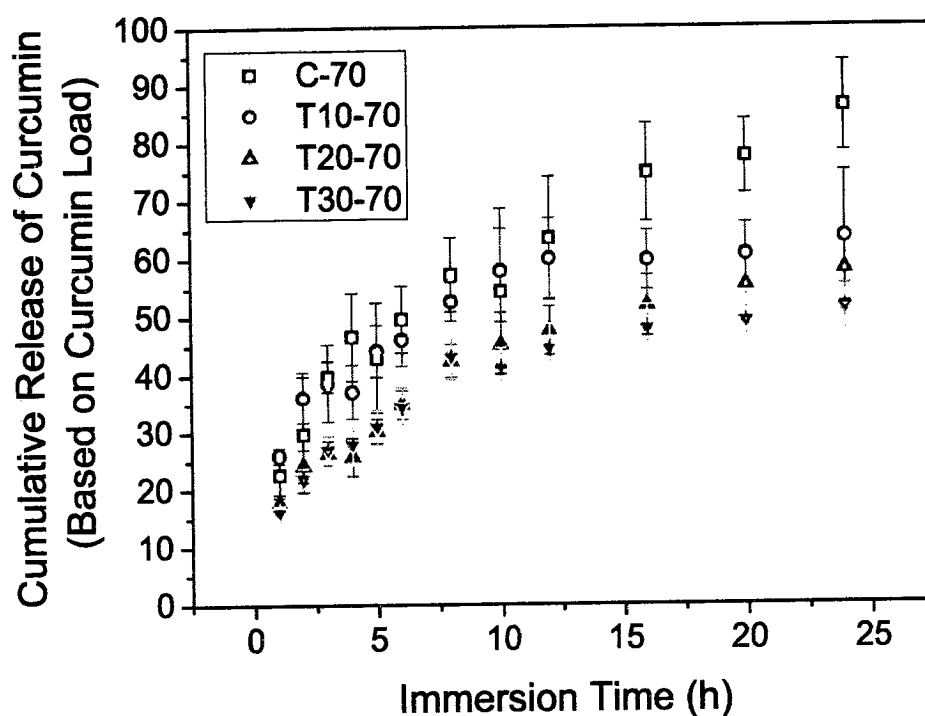
(a)



(b)



(c)



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการปลดปล่อยแบบสะสมของสารเคอร์คูมินจากตัวอย่างผ้า โดยคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ น้ำหนักเคอร์คูมินที่ปลดปล่อยเทียบกับปริมาณเคอร์คูมินในผ้าทั้งหมด เปรียบเทียบกรณีเคอร์คูมิน (a) 0.3 (b) 0.5 (c) 0.7 กรัม

4.5 ศีกษาการจลนศาสตร์การปลดปล่อยสารเคอร์คูมิน

กลไกการปลดปล่อยสารเคอร์คูมินจากพอลิเมอร์นั้นแบ่งได้เป็น 3 แบบใหญ่ๆ นั่นคือ กลไกการควบคุม โดยการแพร่ (diffusion) การเสื่อมสลาย (degradation) และการบวมตัว (swelling)⁷ ปัจจุบันนี้มีการสร้างตัวแบบคณิตศาสตร์เพื่ออธิบายการปลดปล่อยยาหลายตัวแบบ บางตัวแบบนั้นสร้างขึ้นจากทฤษฎี และบางตัวแบบสร้างขึ้นจากผลการทดลอง แต่ละตัวแบบที่ใช้ใช้อธิบายการปลดปล่อยยานั้นสัมพันธ์กับกลไกที่ควบคุมการปลดปล่อยยาที่ต่างๆกันออกไป^{8,9}

Zero order model การปลดปล่อยยาตามตัวแบบนี้ ตัวยาจะออกจากวัสดุปลดปล่อยยาดำวยอัตราเร็วที่คงที่ ดังแสดงได้โดยสมการ⁸

$$Q_t = Q_0 + K_0 t \quad (4.3)$$

เมื่อ Q_t คือปริมาณยาที่ปลดปล่อยออกมาสู่สารละลายในเวลา t (หน่วย %) Q_0 คือปริมาณยาเริ่มต้นในการละลาย (มักเป็นศูนย์) และ K_0 เป็นค่าคงที่อัตรา การปลดปล่อยยาแบบนี้พบได้ในระบบที่การปลดปล่อยยาถูกควบคุมด้วยการเสื่อมสลายของวัสดุปลดปล่อยยา¹⁰ โดย Aughenbaugh และคณะผู้วิจัยรายงานว่ากระบวนการปลดปล่อยเช่นนี้พบได้ใน sol-gel monoliths ที่มีพอลิแซ็กคาไรด์เป็นองค์ประกอบ¹¹

First order model การปลดปล่อยยาตามตัวแบบนี้ อัตราการปลดปล่อยตัวยาคจะขึ้นกับความแตกต่างระหว่างความเข้มข้นของชั้นของเหลวสถิตที่ติดกับวัสดุปลดปล่อยยา (static liquid layer) กับของเหลวที่ห่างออกไป (bulk liquid) ตามสมการนี้ ของแข็งจะไม่มี การเปลี่ยนแปลงพื้นที่ผิว นั่นคือไม่มีการสลายตัวของพื้นผิววัสดุปลดปล่อยยา สมการการปลดปล่อยยาเป็นดังนี้¹²

$$\ln[1 - (Q/Q_\infty)] = -K_1 t \quad (4.4)$$

เมื่อ Q_t เป็นปริมาณยาทั้งหมดที่ปลดปล่อยออกมาได้ที่ระยะเวลาอนันต์ ส่วน K_1 เป็นค่าคงที่อัตรา การปลดปล่อยยาแบบนี้พบได้ในระบบ โพลี-เจลที่ปลดปล่อยสาร bupivacaine จาก sol-gel granule และ vancomycin จาก sol-gel microsphere¹²

Higuchi model การปลดปล่อยยาตามตัวแบบนี้ ตัวยาคจะออกจากวัสดุปลดปล่อยยาที่แปรผันตามรากที่สองของระยะเวลา ซึ่งสามารถใช้อธิบายการปลดปล่อยของตัวยาผ่านวัสดุที่มีรูพรุนได้ กลไกการปลดปล่อยยาตามสมการนี้เกี่ยวข้องกับการที่โมเลกุลของสารละลายแทรกเข้าไปในช่องว่าง จากนั้นก็เกิดการละลายและชะเอาตัวยาคออกจากช่องว่างของวัสดุ กระบวนการนี้ควบคุมโดยการแพร่และขึ้นกับความเป็นรูพรุน (porosity) และความคดเคี้ยว (tortuosity) ของวัสดุ⁸

$$Q_t = [D\epsilon/\tau(2A - \epsilon C_s)] C_s t^{0.5} \quad (4.5)$$

สมการนี้เขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$Q_t = K_2 t^{0.5} \quad (4.6)$$

เมื่อ D คือค่าคงที่การแพร่ของยา E คือค่าความเป็นรูปทรงของเมทริกซ์ τ คือค่าความคงตัวของระบบ
โองว่างอะปิลลารีในวัสดุ A คือปริมาณยาทั้งหมดที่อยู่ในเมทริกซ์ และ K_2 เป็นค่าคงที่อัตราการปลดปล่อย
ยา ตัวแบบนี้สามารถใช้อธิบายระบบโซล-เจลได้หลายระบบ เช่น sol-gel microsphere และ sol-gel
nonolith¹¹⁻¹³

Hixson-Crowell model เป็นตัวแบบที่อธิบายการปลดปล่อยยาสำหรับระบบที่เมทริกซ์ของวัสดุปลดปล่อย
ยา มีการสลายตัวของยาที่ปลดปล่อยออกมา อัตราการปลดปล่อยควบคุมโดยอัตราการสลายตัวของเมทริกซ์ ไม่ใช่
อัตราการแพร่ของยาออกจากเมทริกซ์ สมการของตัวแบบนี้เป็นดังแสดงไว้ด้านล่าง⁸

$$Q_0^{1/3} - Q_t^{1/3} = K_3 t \quad (4.7)$$

เมื่อ K_3 เป็นค่าคงที่อัตรา ตัวแบบนี้ผ่านการทดสอบกับ sol-gel nanoparticle แต่ไม่สามารถอธิบายได้¹⁴

การจะตัดสินว่าตัวแบบใดจะอธิบายผลการทดลองได้ดีดั้นนั้น สามารถพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์
สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient, R^2) ซึ่งควรมีค่าใกล้เคียง 1 อย่างไรก็ตาม ในทางปฏิบัตินั้นมักพบว่า
ตัวแบบแต่ละตัวไม่ค่อยให้ผลแตกต่างกันมากนักเมื่อใช้ในการอธิบายผลการทดลอง^{15,16}

ผู้วิจัยเลือกนำผลการปลดปล่อยเคอร์คิวมินเฉพาะในช่วง 10 ชั่วโมงแรกมาอธิบายการปลดปล่อยยา
เนื่องจากมีหลักฐานว่า ที่การปลดปล่อยยาเกิน 50% จะให้ผลการทดลองที่เบี่ยงเบนไปจากตัวแบบมาก¹²
ค่าคงที่อัตราและค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ แสดงไว้ดังตารางที่ 4.6

จากผลการคำนวณค่าคงที่อัตรา พบว่า ทุกตัวแบบให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เกิน 0.90 แต่ตัว
แบบ Higuchi model และ First-order model ให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เกิน 0.95 แสดงว่าทั้งสองตัวแบบ
นี้ใช้อธิบายผลการปลดปล่อยเคอร์คิวมินได้ดีกว่าตัวแบบอื่นๆ ในแต่ละตัวแบบ ค่าคงที่อัตราของสารที่เคลือบ
ผิวด้วยกระบวนการโซล-เจลจะค่อนข้างใกล้เคียงกัน และต่ำกว่าชุดควบคุม โดยรวมค่าคงที่อัตราลดลง
ประมาณ 30% เมื่อทำการเคลือบผิวด้วยกระบวนการโซล-เจล จากผลการทดลองโดย Radin และคณะ
พบว่า Higuchi model และ First-order model สามารถใช้อธิบายการปลดปล่อยสาร bupivacaine และ
vancomycin ออกจากระบบ silica sol-gel microspheres ได้ ซึ่งในบางครั้ง ระบบการปลดปล่อยยาหนึ่งๆ
อาจมีตัวแบบที่อธิบายได้ดีมากกว่าหนึ่งตัวแบบ หากพิจารณาที่สมมติฐานที่ใช้ในการสร้างตัวแบบการ
ปลดปล่อยยาทั้งสองนี้ จะพบว่า ทั้งคู่ใช้สำหรับการอธิบายการปลดปล่อยยาแบบแพร่และไม่มีการบวมตัว
หรือสลายตัวของเมทริกซ์ ปริมาณยาในสารละลายนอกวัสดุปลดปล่อยยาดำกว่าปริมาณยาที่ผิววัสดุ
ปลดปล่อยยาอย่างน้อย 10 เท่า (perfect sink conditions)¹⁷ ซึ่งทำให้ปริมาณยาที่ปลดปล่อยออกมาต่อหนึ่ง
ช่วงเวลาน้อยลงเรื่อยๆ อธิบายได้ว่าเป็นเพราะเมื่อตัวยานในเมทริกซ์แพร่ออกไปมาก จะทำให้ระยะทางที่ต้อง

ซีในการแพร่ของตัวยานในเมทริกซ์ออกไปสู่สารละลายภายนอกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ในระบบที่เมทริกซ์เป็นซิลิกา
ไว้นๆ จะเป็นโครงสร้างตาข่ายสามมิติที่มีความแข็งเกร็ง (rigid) ย่อมคาดได้ว่าจะไม่มีการบวมตัวของเมท
ริกซ์เกิดขึ้น

ตารางที่ 4.6 ค่าคงที่อัตราและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของตัวแบบการปลดปล่อยยาต่างๆ

Sample	Zero-order		First-order		Higuchi		Hixson-Crowell	
	K_0 (% h ⁻¹)	R^2	K_1 (h ⁻¹)	R^2	K_2 (% h ^{-0.5})	R^2	K_3 (% h ⁻¹)	R^2
C-30	4.530	0.96	0.090	0.98	19.376	0.98	0.110	0.98
T10-30	2.948	0.96	0.044	0.98	12.689	1.00	0.060	0.97
T20-30	2.777	0.97	0.043	0.98	12.226	0.95	0.057	0.90
T30-30	2.947	0.95	0.042	0.95	12.497	0.95	0.058	0.95
C-50	4.826	0.99	0.082	0.98	21.764	0.96	0.106	0.99
T10-50	3.671	0.99	0.064	1.00	16.860	1.00	0.082	1.00
T20-50	4.254	1.00	0.067	0.99	17.758	0.97	0.089	0.99
T30-50	3.36	0.97	0.047	0.98	14.271	0.98	0.065	0.98
C-70	4.819	0.93	0.082	0.96	18.917	0.97	0.105	0.94
T10-70	3.215	0.95	0.058	0.97	13.683	0.96	0.073	0.96
T20-70	3.033	0.97	0.045	0.97	12.723	0.95	0.061	0.97
T30-70	2.889	0.93	0.042	0.97	12.440	0.96	0.057	0.93

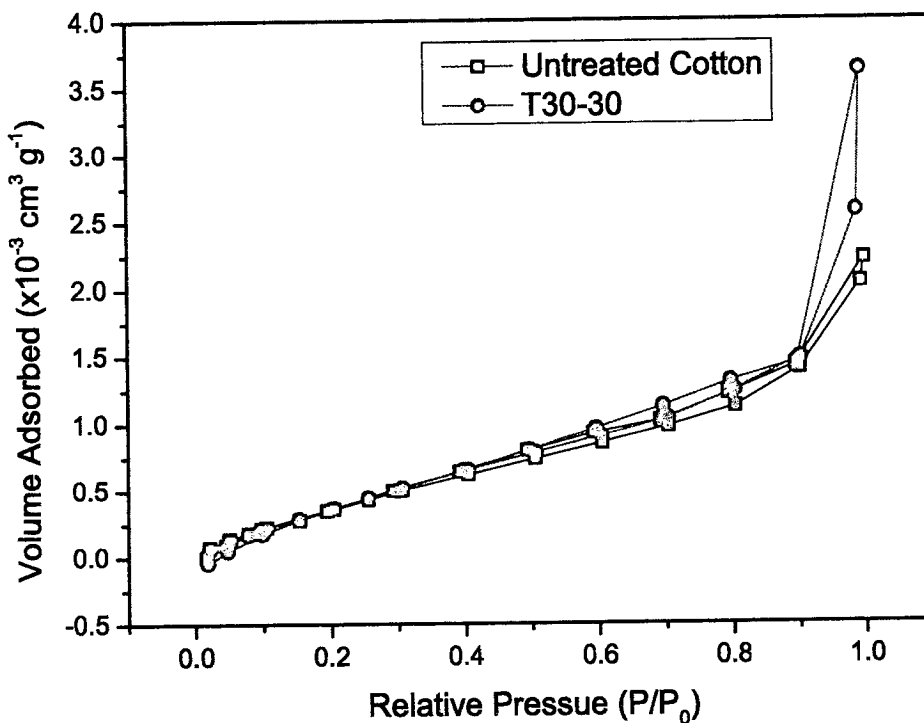
เพื่อยืนยันว่าไม่มีการสลายตัวของสารเคลือบผิวซิลิกาซึ่งสังเคราะห์จากกระบวนการโซล-เจล
ระหว่างการปลดปล่อยสารเคอร์คูมิน ผู้วิจัยจึงทำการวิเคราะห์ปริมาณซิลิกอนในรูปของ silicic acid ซึ่งเป็น
สารประกอบที่เกิดจากการไฮโดรไลซิสของซิลิกา ที่อาจเกิดจากการเสื่อมสลายของซิลิกานบนผิวผ้า ภายหลัง
การปลดปล่อยสารเคอร์คูมินไปแล้ว 24 ชั่วโมง สารละลายที่ได้จากการปลดปล่อยเคอร์คูมินถูกนำไปวัด
ปริมาณ silicic acid ด้วยวิธี Heteropolyblue¹⁸ สารละลายดังกล่าวถูกย่อยด้วยโซเดียมโบคาร์บอเนตเพื่อ
เปลี่ยนสารประกอบซิลิกอนที่ไม่สามารถทำปฏิกิริยากับ molybdate ได้ให้สามารถทำปฏิกิริยากับ

roybdate จากผลการทดลองพบว่าไม่มีสารประกอบซิลิกอนอยู่ในสารละลายดังกล่าว ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ซิลิกาไม่เกิดการเชื่อมสลายระหว่างการปลดปล่อยเคอร์คูมิน และดังนั้นยืนยันกลไกการปลดปล่อยเคอร์คูมิน ึ่งเกิดผ่านการแพร่ดังสมมติฐานของ Higuchi model และ First-order model

จากหลักฐานทางวิชาการ ซิลิกาจะเกิดไฮโดรไลซิสได้ดีในสภาวะเบส และซิลิกาปฐมภูมิตั้งเดิมที่ไม่มีรูพรุนจะเปลี่ยนอยู่ในรูป silicic acid ด้วยความเข้มข้นที่สมดุล (equilibrium concentration) เพียง 70 ppm ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียสเท่านั้น ดังนั้นในกรณีนี้ การละลายของซิลิกาในระบบจึงไม่มีนัยสำคัญ¹⁹

1.6 ผลการศึกษาพื้นที่ผิวจำเพาะและความเป็นรูพรุน

ไอโซเทอรั่มแสดงผลจากการดูดซับแก๊สไนโตรเจนของผ้าที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวเปรียบเทียบกับผ้าตัวอย่าง T30-30 แสดงไว้ในรูปที่ 4.5 ลักษณะไอโซเทอรั่มที่ปรากฏคือเป็นเส้นตรงค่อนข้างราบบริเวณช่วงกลางของไอโซเทอรั่ม ก่อนจะพุ่งสูงขึ้นในช่วงหลังบริเวณความดันสัมพัทธ์ (relative pressure) เข้าใกล้ 1 ซึ่ง IUPAC จัดแบ่งเป็นไอโซเทอรั่มประเภทที่ 2 (type II Isotherm)²⁰ ซึ่งบ่งชี้ถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวถึงหลายชั้น (unrestricted monolayer-multilayer adsorption) ไอโซเทอรั่มประเภทนี้พบได้ในวัสดุประเภทไม่มีช่องว่าง (non-porous) หรือวัสดุที่มีช่องว่างขนาดแมโครพอร์ (macropore)



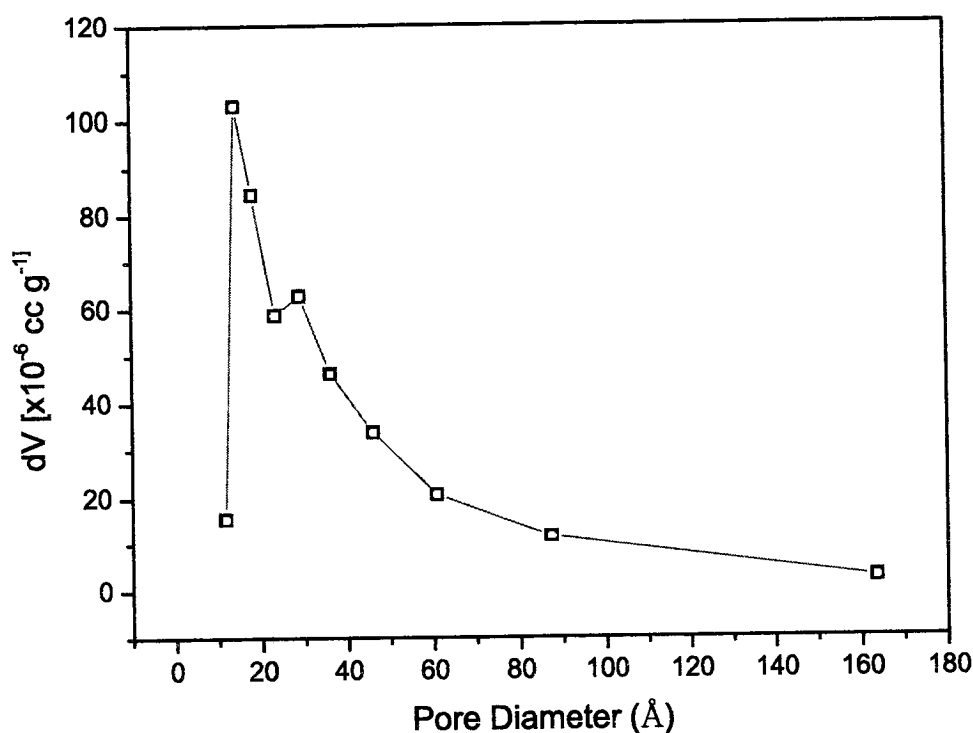
รูปที่ 4.5 ไอโซเทอรั่มการดูดซับและการปลดปล่อยแก๊สไนโตรเจนของตัวอย่าง

ผ้าฝ้ายนั้นเป็นวัสดุที่มีช่องว่างเป็นจำนวนมาก แบ่งเป็นช่องว่างที่อยู่ภายในตัวเส้นใย ระหว่างเส้นใย ภายในเส้นด้าย และระหว่างเส้นด้าย ขนาดของช่องว่างเหล่านี้ขึ้นอยู่กับขนาดเส้นใย ลักษณะการทอ และ จำนวนเส้นด้ายต่อนิ้วตลอดจนถึงลักษณะของการปั่นเกลียวเส้นด้าย ช่องว่างระหว่างเส้นใยและเส้นด้ายอยู่ในช่วงแมคโครพอร์ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร ทำให้ไม่สามารถวิเคราะห์ช่องว่างเหล่านี้ได้ด้วย เทคนิคการดูดซับแก๊สไนโตรเจน มีรายงานว่าช่องว่างระหว่างเส้นใยของผ้าทอนั้นอยู่ระหว่าง 2.0-4.5 ไมโครเมตร²² ดังนั้นช่องว่างระหว่างเส้นด้ายจะมีขนาดใหญ่กว่านี้ ในงานวิจัยชิ้นนี้ ผู้วิจัยใช้วิธี BJH ในการกำหนดขนาดช่องว่างช่วง 2-50 นาโนเมตร ซึ่งครอบคลุมช่วงมีโซพอร์ (mesopore) ถึง แมคโครพอร์ (macropore) การวิเคราะห์ในส่วนนี้จะมุ่งไปที่การวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนในชั้นซิลิกาที่เคลือบผิวของผ้า และมีความสัมพันธ์กับปริมาณการกักเก็บเคอร์คูมินที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสามารถใช้วิธี BJH ในการคำนวณได้

ไอโซเทอร์มผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบผิวนั้นไม่มีวงรอบฮิสเทอรีซิส (Hysteresis loop) แสดงว่าผ้าฝ้ายดังกล่าวไม่มีรูพรุนขนาดมีโซพอร์ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของไอโซเทอร์มประเภทที่ 4 (type IV sotherm) ขณะที่ตัวอย่าง T30-30 มีวงรอบฮิสเทอรีซิสเล็กๆปรากฏอยู่ บ่งชี้ว่าโครงสร้างของซิลิกามีรูพรุนระดับมีโซพอร์ แต่เนื่องจากปริมาตรซิลิกาที่เคลือบผิวมีน้อยกว่าปริมาตรเนื้อผ้าฝ้ายมาก ทำให้เห็นวงฮิสเทอรีซิสเล็กกว่าไอโซเทอร์มประเภทที่ 4 ที่จะพบได้ในซิลิกาบริสุทธิ์ที่สังเคราะห์จากปฏิกิริยาโซล-เจล

ปริมาตรรูพรุนโดยรวม (total pore volume) สามารถคำนวณได้จากปริมาตรแก๊สไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ 0.99 ในตัวอย่างผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการตกแต่งสำเร็จมีค่าเท่ากับ 0.003 ลบ.ซม.ต่อกรัม ขณะที่ผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบผิวซิลิกามีค่าเท่ากับ 0.004 ลบ.ซม.ต่อกรัม แสดงว่าปริมาตรของรูพรุนในผ้าฝ้ายที่เคลือบซิลิกาสูงกว่าผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว ทั้งนี้เพราะโครงสร้างซิลิกามีรูพรุนนั่นเอง

จากไอโซเทอร์มช่วงการปลดปล่อยแก๊ส (desorption) เมื่อคำนวณด้วยวิธี BJH พบว่า ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของมีโซพอร์ในซิลิกา คือ 14.3 นาโนเมตร การกระจายตัวของขนาดรูพรุนจากสมการ BJH แสดงดังรูปที่ 4.6 เมื่อใช้ t-method วิเคราะห์ พบว่าไม่มีรูพรุนระดับไมโครพอร์ในชั้นตัวอย่าง

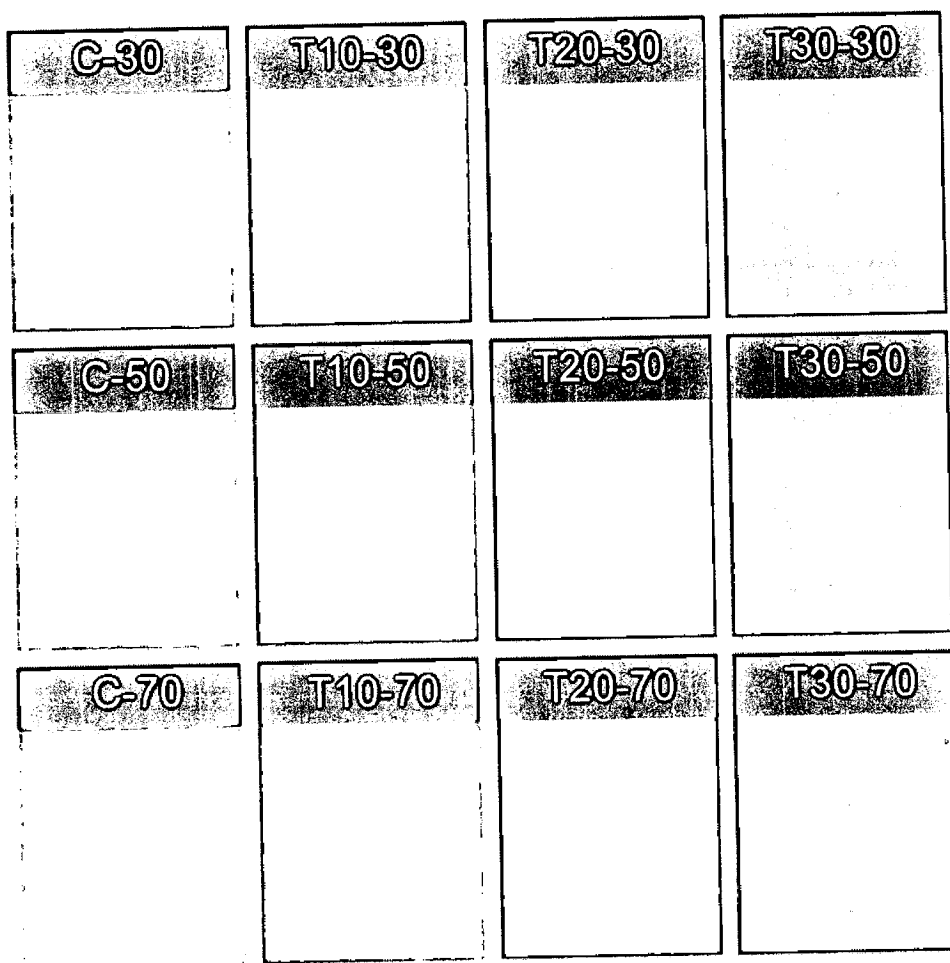


รูปที่ 4.6 การกระจายตัวของรูพรุนคำนวณตามวิธีของ BJH ในตัวอย่าง T30-30

เมื่อพิจารณาค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ด้วยวิธี BET จากช่วงกราฟที่ความดันสัมพัทธ์อยู่ที่ 0.05-0.30 พบว่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ยังไม่ผ่านการตกแต่งสำเร็จอยู่ที่ 1.95 ตร.ม./กรัม ส่วนผิวจำเพาะที่ตกแต่งสำเร็จอยู่ที่ 2.23 ตร.ม./กรัม และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สูงถึง 0.99 ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะที่ได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่นที่ศึกษาการเคลือบผิวด้วยซิลิกาในฐานข้อมูลวิชาการ²³

จากที่ได้กล่าวมาแล้วว่าค่าปริมาตรช่องว่างรวมและค่าพื้นที่ผิวในตัวอย่างผ้าที่เคลือบด้วยกระบวนการโซล-เจล สูงกว่าตัวอย่างที่ไม่ได้เคลือบผิวเล็กน้อย ซึ่งการเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยนี้แสดงให้เห็นว่าการเคลือบผิวไม่ได้เกิดขึ้นหนาเกินไป ปกติแล้วหากการเคลือบผิวด้วยโซล-เจลเกิดขึ้นหนามากจะทำให้ผ้าฝ้ายกระด้างมากและสูญเสียผิวสัมผัสที่ดี

ภาพของผ้าฝ้ายที่ผ่านการเคลือบผิวและไม่ผ่านการเคลือบผิวภายหลังการแช่ในเอทานอลเมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดแสดงไว้ในรูปที่ 4.7 ปริมาณเฮอร์คิวลินในผ้าฝ้ายที่เคลือบด้วยโซล-เจลมีมากกว่าเพราะรูพรุนที่อยู่ในโครงสร้างซิลิกา จึงเห็นผ้าฝ้ายมีสีเหลืองเข้มกว่าตัวอย่างที่ไม่มีการเคลือบผิว

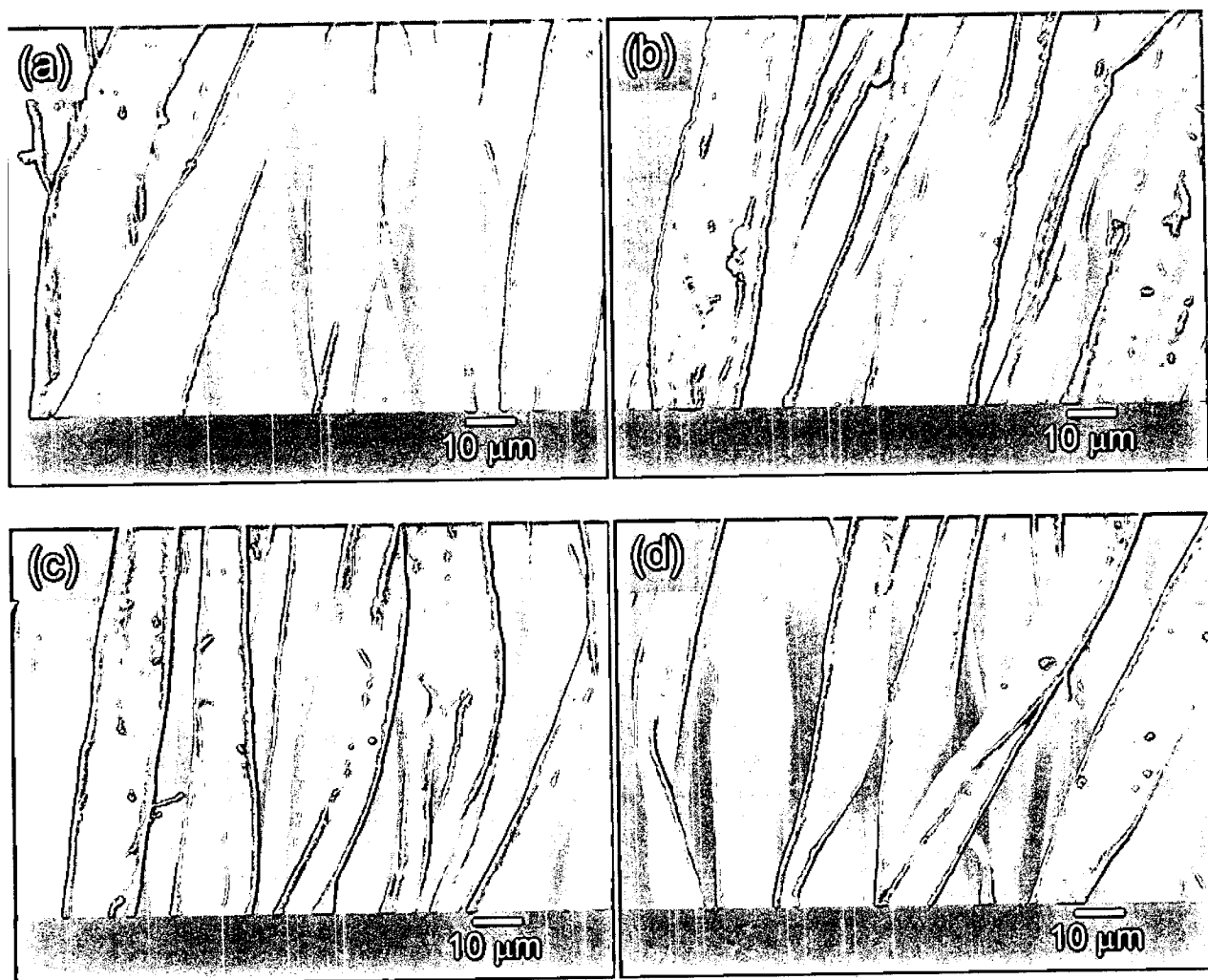


รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายตัวอย่างผ้าที่ปริมาณเคอร์คูมินและสารตั้งต้น TEOS ต่างๆ

4.7 สัณฐานวิทยาของผ้าตัวอย่าง

สัณฐานวิทยา (Morphology) ของผ้าที่เคลือบผิวด้วยสารตั้งต้นปริมาณต่างๆ และเคอร์คูมินที่ปริมาณ 0.07 กรัม เมื่อส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron micrograph) แสดงไว้ในรูปที่ 4.8 ตัวอย่างผ้าที่ไม่เคลือบซิลิกานั้นมีผิวที่ค่อนข้างเรียบ และแสดงโครงสร้างการบิดเกลียว ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของเส้นใยฝ้ายไว้อย่างชัดเจน การกระจายตัวของเคอร์คูมินเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ ไม่มีการจับตัวเป็นก้อน (agglomeration) บนผิวของเส้นใย

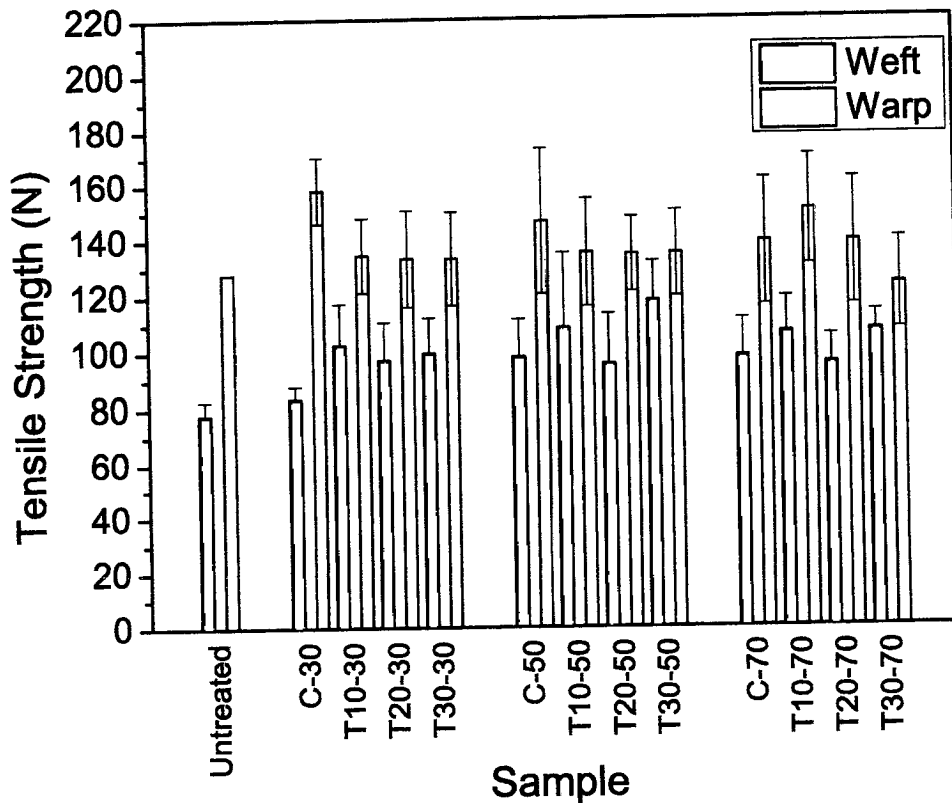
สำหรับตัวอย่างผ้าที่เคลือบด้วยโซล-เจล จะเห็นว่าชั้นฟิล์มซิลิกาที่ได้จากการสังเคราะห์ด้วยกระบวนการโซล-เจลไม่ได้เข้าไปเชื่อมระหว่างเส้นด้ายแต่อย่างใด ซึ่งถือเป็นลักษณะที่ดีในการพัฒนาผ้าปิดแผล ทั้งนี้เพราะการเชื่อมติดกันของเส้นด้ายจะทำให้อากาศและน้ำไม่สามารถถ่ายเทผ่านผ้าได้ การเคลือบผ้าด้วยซิลิกาจึงต้องควบคุมไม่ให้มีความหนามากเกินไป



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของตัวอย่าง (a) C-70, (b) T10-70, (c) T20-20, (d) T30-70

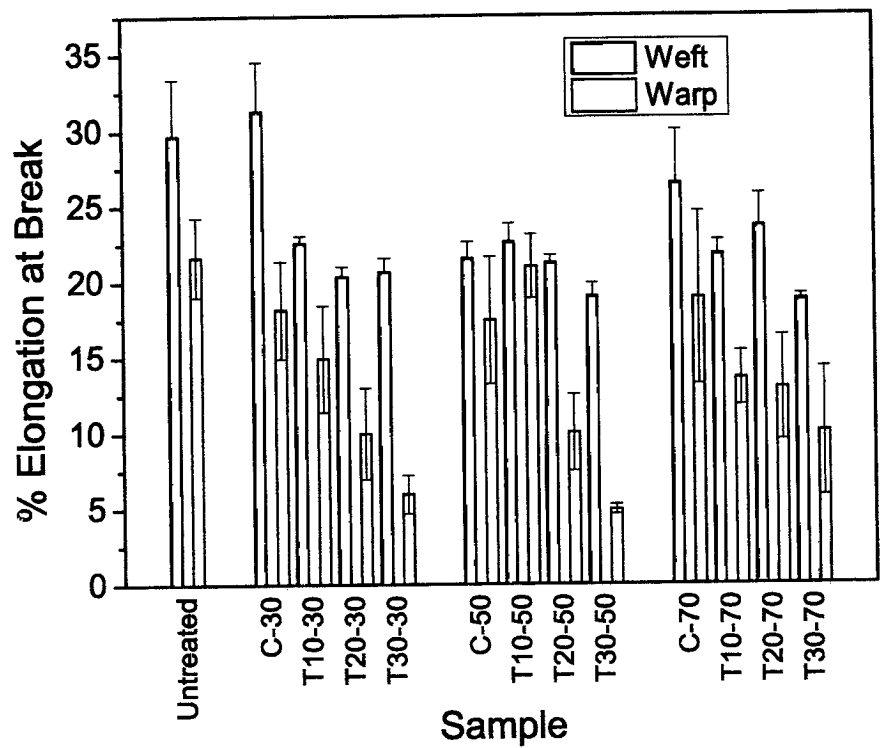
4.8 สมบัติเชิงกลของตัวอย่าง

สมบัติเชิงกลของผ้าเป็นสิ่งต้องคำนึงถึงในการใช้งาน สำหรับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยทดสอบสมบัติด้านการฉีกขาด (Tearing test) และสมบัติด้านการดึงยึด (Tensile test) ในแนวด้ายยืนและแนวด้ายพุ่ง

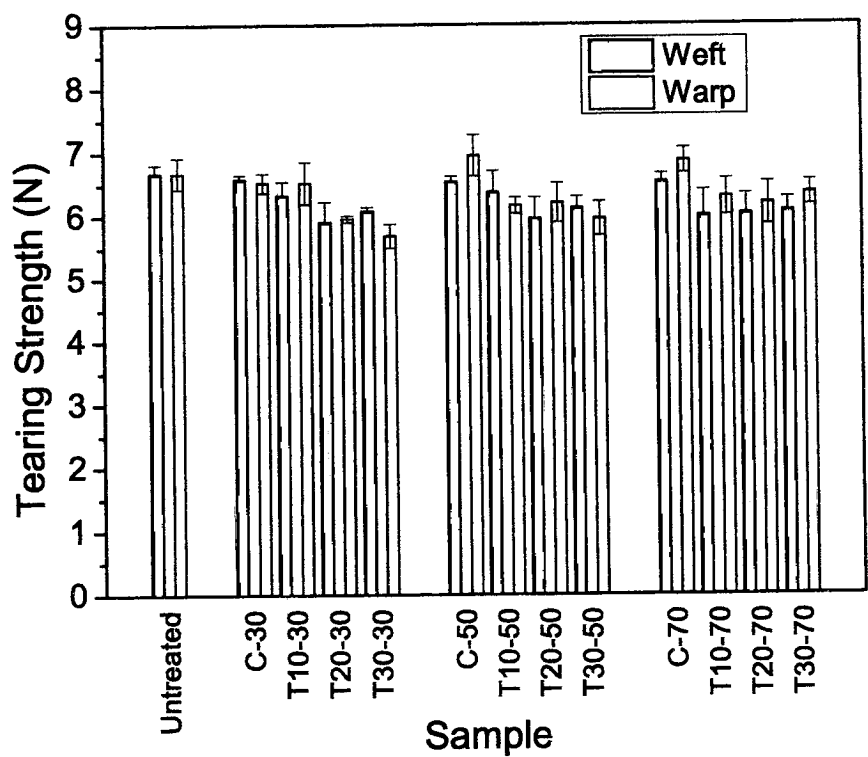


รูปที่ 4.9 แสดงความต้านทานการดึงยึดในแนวด้ายยืนและด้ายพุ่งของชิ้นตัวอย่าง

จากรูปที่ 4.9 ความต้านทานการดึงยึด (tensile strength) ในแนวด้ายยืนไม่ค่อยแตกต่างกับความต้านทานการดึงยึดของตัวอย่างที่ยังไม่ผ่านการตกแต่งสำเร็จมากนัก ส่วนแนวด้ายพุ่งจะเห็นการเพิ่มขึ้นของความต้านทานการดึงยึดอย่างชัดเจน โดยอยู่ที่ 7% สำหรับตัวอย่าง C-30 และ 52% สำหรับตัวอย่าง T30-50 ดังนั้น สารซิลิกาที่เคลือบผิวเส้นใยช่วยให้เส้นใยต้านทานการฉีกขาดจากการดึงยึดได้ดีขึ้น แต่จากรูปที่ 4.10 ซึ่งแสดงค่าระยะยืด ณ จุดขาด (elongation at break) จะพบว่า เส้นใยยึดตัวได้ลดลงเมื่อเคลือบผิวด้วยกระบวนการโซล-เจล ในฐานข้อมูลวิชาการพบการรายงานการเพิ่มขึ้นของค่าความต้านทานการดึงยึดในตัวอย่างผ้าที่เคลือบด้วยกระบวนการโซล-เจลเช่นกัน²⁴



รูปที่ 4.10 แสดงระยะยืด ณ จุดขาดของการทดสอบแรงดึงยืดในแนวด้ายยืนและด้ายพุ่งของชิ้นตัวอย่าง



รูปที่ 4.11 แสดงค่าความต้านทานแรงฉีกขาดในแนวด้ายยืนและด้ายพุ่งของชิ้นตัวอย่าง

ผลการทดสอบการต้านทานแรงฉีกขาดตามรูปที่ 4.11 พบว่า ผ้าที่ผ่านการเคลือบด้วยกระบวนการโซล-เจลจะฉีกขาดได้ง่ายกว่าผ้าที่ไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจล ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า การเคลือบผิวด้วยซิลิกาอาจจะยึดเส้นใยและเส้นด้ายเข้าด้วยกัน และทำให้เกิดแรงเสียดทานระหว่างเส้นใยและเส้นด้ายในการที่ระเคลื่อนที่ผ่านกัน ซึ่งการเคลื่อนที่นั้น หากเกิดได้ดีจะช่วยกระจายแรงตกกระทบ ทำให้เส้นใยและเส้นด้ายไม่ต้องรับแรงโดยตรงมากเกินไป แต่ในทางตรงกันข้าม เมื่อเส้นใยและเส้นด้ายไม่สามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ดี แรงที่ตกกระทบจะส่งไปที่เส้นใยและเส้นด้ายโดยตรง ทำให้ผ้าขาดได้ง่ายกว่า ในงานวิจัยชิ้นนี้ ค่าความต้านทานการฉีกขาดลดลงเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ตัวอย่างที่มีความต้านทานการฉีกขาดลดลงมากที่สุดคือ T30-30 ซึ่งลดลง 15% ในแนวด้ายยืน จากภาพแสดงพื้นผิวของเส้นใยที่ผ่านมา จะเห็นได้ว่าเส้นใยไม่ได้ถูกซิลิกายึดติดกัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าการฉีกขาดของตัวอย่างไม่ได้ลดลงมากนัก มีการรายงานการลดลงของความต้านทานแรงฉีกขาดเมื่อเคลือบผ้าด้วยกระบวนการโซล-เจลในงานวิจัยอื่นๆ^{24,25}

4.9 มุมสัมผัสของน้ำกับผ้า

ผลการหามุมสัมผัสของน้ำกับผ้า ระหว่างผ้าที่ผ่านกระบวนการโซล-เจล และผ้าที่ซึบสารเคอร์คูมินแต่ไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจล แสดงดังตารางที่ 4.7 ผลการทดลองพบว่าเมื่อเวลาผ่านไป ผ้าที่ผ่านกระบวนการโซล-เจลมีค่ามุมสัมผัสเริ่มที่ 74.8 องศา และลดน้อยลงเรื่อยๆกระทั่งเมื่อเข้าสู่วินาทีที่ 60 จะไม่สามารถวัดมุมสัมผัสได้ นั่นคือหยดน้ำถูกดูดซับเข้าในโครงสร้างผ้าหมดแล้ว ขณะที่ผ้าที่มีเพียงเคอร์คูมินแต่ไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจล ค่ามุมสัมผัสเริ่มต้นอยู่ที่ 128.3 องศาและเมื่อเวลาผ่านไป 60 วินาที ค่ามุมสัมผัสลดลงเพียงเล็กน้อย อยู่ที่ 127.1 องศา

การตกแต่งผ้าที่ผ่านกระบวนการโซล-เจล มีคุณสมบัติดูดซับของเหลวได้ดีเนื่องจากฟิล์มซิลิกาที่ได้จากกระบวนการโซล-เจลนั้นมีรูพรุนและมีสมบัติชอบน้ำ ทำให้ผิวของผ้าหรือเส้นใยของเหลวสามารถซึมผ่านได้ส่งผลให้ผ้ามีความชอบน้ำกว่าผ้าที่ซึบสารเคอร์คูมินแต่ไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจล ทั้งนี้เพราะสารเคอร์คูมินมีคุณสมบัติไม่ชอบน้ำ และละลายน้ำได้น้อยมาก ผ้าที่เคลือบด้วยเคอร์คูมินจึงสะท้อนน้ำ อย่างไรก็ตามหากนำไปซักและเคอร์คูมินที่ผิวหน้าผ้าบางส่วนหลุดออก จะได้สมบัติการดูดซึมน้ำดีขึ้น

ตารางที่ 4.7 ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับผ้า (องศา) ระหว่างผ้าที่ผ่านกระบวนการโซล-เจล กับผ้าที่ซุบสารเคอร์คูมินแต่ไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจลที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (วินาที)	ค่ามุมสัมผัสของน้ำกับผ้า (องศา)	
	ผ้าที่ผ่านกระบวนการโซล-เจล	ผ้าที่ซุบสารเคอร์คูมินแต่ไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจล
1	74.8 ± 3.4	128.3
10	23.8 ± 0.2	127.9
40	7.9 ± 0.5	127.5 ± 0.1
60	ไม่สามารถวัดได้	127.1 ± 0.1

4.10 การต้านเชื้อแบคทีเรียของตัวอย่าง

ภาพตัวอย่างบางส่วนจากการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC100-199 แสดงในรูปที่ 4.12 กลุ่มสีเหลืองในจานเพาะเชื้อคือกลุ่มของเชื้อแบคทีเรียที่เหลืองมีชีวิตอยู่ภายหลังจากสัมผัสกับสารสกัดจากผ้าตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัวอย่างที่ T30-70 จะเห็นว่าฆ่าเชื้อแบคทีเรีย *S. aureus* ได้ดี

สารเคอร์คูมินนั้นเป็นสารสีเหลืองที่พบในธรรมชาติและมีคุณสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียได้ ผลการลดลงของแบคทีเรีย (% Reduction) เมื่อให้สัมผัสกับสารที่สกัดจากผ้าตัวอย่างเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ถูกแสดงไว้ในตารางที่ 4.8 เมื่อทดสอบผ้าตัวอย่างที่มีเคอร์คูมินในปริมาณน้อยเนื่องจากไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจล จะพบว่าแทบไม่มีฤทธิ์ในการฆ่าเชื้อแบคทีเรียชนิด *S. aureus* เลย และมีฤทธิ์ฆ่า *E Coli* เล็กน้อย ขณะที่ตัวอย่างที่ใส่โซล-เจลเป็นปริมาณ 30 mmole ให้ผลการฆ่าเชื้อที่ดีกว่า โดยสามารถฆ่าเชื้อ ได้ดีถึง 99.41% แต่ฆ่า *E Coli* ได้น้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ผลการฆ่าเชื้อ ฆ่า *E Coli* เพิ่มขึ้นจาก 28.44 เป็น 37.03% เมื่อเพิ่มปริมาณเคอร์คูมินจาก 30 เป็น 70 มิลลิกรัม



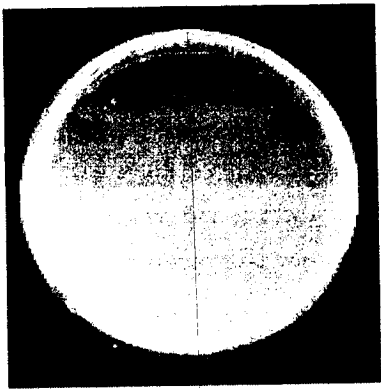
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.12 แสดงผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC 100-199 ของตัวอย่าง (a) ผ้าที่ไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจล (b) C30-30 (c) T30-30 และ (d) T30-70

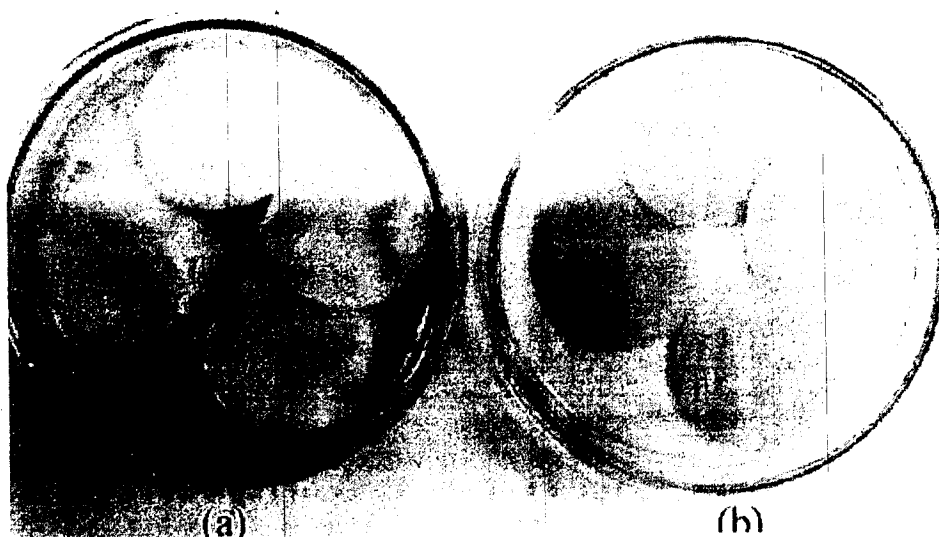
ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียตามมาตรฐาน AATCC 100-1999

Sample	Bacteria reduction percentage (%)	
	<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Escherichia coli</i>
C-30	0	5.83
C-50	0	16.88
C-70	0	0.83
T30-30	0	28.44
T30-50	38.23	30.60
T30-70	99.41	37.02

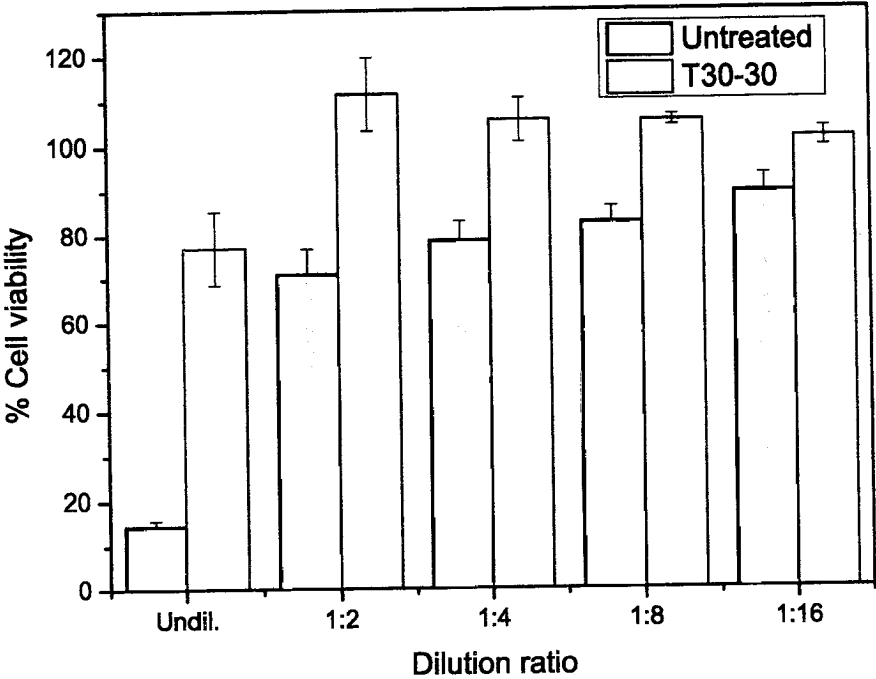
1.11 ผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์

ในการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity test) ตามมาตรฐาน 10993-5: Test on Extraction เตรียมตัวอย่างผ้าโดยตัดตามรูปที่ 4.13 ผลการทดสอบเซลล์ Human fibroblast กับสารเลี้ยงเซลล์ที่สกัดจากผ้าที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ได้แก่ ก่อนเจือจาง (undil.) และหลังการเจือจางด้วยสารเลี้ยงเซลล์ธรรมดาที่อัตราส่วน 1:2, 1:4, 1:8 และ 1:16 เมื่อเซลล์สัมผัสกับสารสกัดดังกล่าวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ผลปรากฏว่า ผ้าฝ้ายที่ยังไม่ผ่านการเคลือบผิวใดๆ มีความเป็นพิษต่อเซลล์มาก โดยมีเซลล์รอดชีวิตเพียง 14.55% ในสารสกัดจากผ้าที่ไม่ได้ทำการเจือจาง (รูปที่ 4.14) คาดว่าเกิดจากสารเคมีที่ตกค้างในผ้าฝ้าย เช่น สารฟอกขาว สารช่วยเปียก ต่าง ที่ต้องใช้ในกระบวนการฟอกสีและทำความสะอาดผ้า สารเหล่านี้กำจัดให้ออกหมดไปได้ยากและมักตกค้างอยู่ในผ้า ขณะที่ผ้าซึ่งผ่านกระบวนการเคลือบผิวมีเซลล์รอดชีวิตกว่า 76.83% ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษต่อเซลล์ เมื่อนำสารสกัดไปเจือจาง ปริมาณเซลล์ที่รอดชีวิตเพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นไปตามความคาดหมาย

ผลการศึกษาในตอนนี้นำสรุปได้ว่าเคอร์คูมินและซิลิกาที่สังเคราะห์ได้ไม่แสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ เมื่อทดสอบด้วยมาตรฐานดังกล่าว



รูปที่ 4.13 ภาพตัวอย่างสำหรับการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity test) ตามมาตรฐาน 10993-5: Test on Extraction ของตัวอย่าง (a) ผ้าฝ้ายที่ไม่ผ่านการเคลือบผิว และ (b) T30-70



รูปที่ 4.14 แสดงผลการทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (Cytotoxicity test) ตามมาตรฐาน 10993-5: Test on Extraction ของตัวอย่าง (a) ผ้าที่ไม่ผ่านกระบวนการโซล-เจล (b) C30-30 (c) T30-30 และ (d) T30-70

4.12 การทดสอบความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH Radical Scavenging Capacity Assay)

ผลการทดสอบการกำจัดอนุมูลอิสระ คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ แสดงในตารางที่ 4.9 จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้งพบว่า ผ้าที่ตกแต่งด้วยกระบวนการโซล-เจลให้ค่าการกำจัดอนุมูลอิสระกว่า 80%

ตารางที่ 4.9 ค่าการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH (DPPH Radical Scavenging Capacity Assay)

ตัวอย่าง	การวัดครั้งที่			ค่าเฉลี่ย % การกำจัดอนุมูลอิสระ
	1	2	3	
ตัวอย่างผ้าที่ทำให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง	89.02	79.57%	73.9%	80.8 ± 0.08