

บทที่ 3

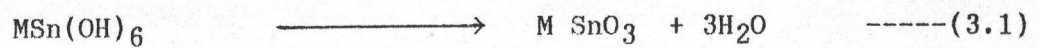
ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.1 การสังเคราะห์สารประกอบดีบุกอนินทรีย์

จากการสังเคราะห์สารประกอบ metal hydroxy stannate ทั้ง 10 ตัว เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ผลผลิตและตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของสารได้ผล แสดงดังตารางที่

3.1

จากตารางที่ 3.1 พบว่าได้เปอร์เซ็นต์ผลผลิตในระดับสูง สารประกอบทั้งหมดไม่มีจุดหลอมเหลว แต่จะเกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนเกิดเป็น metastannate, $M\text{SnO}_3$ แสดงปฏิกิริยา ดังสมการที่ (3.1)



เมื่อ M ได้แก่ Mg Ca Ba Co Ni Cu Zn Sn และ ZrO และ $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ จะสลายตัวเป็น Na_2SnO_3

ตารางที่ 3.1 เปอร์เซนต์ผลผลิตและสมบัติทางกายภาพของสารประกอบ

metal hydroxy stannate

สารประกอบ ดีบุกอนินทรีย์	%ผลผลิต	สถานะ	สี	จุดสลายตัว (°C)	ตัวทำละลาย
$\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$	98	ของแข็ง	ขาว	140	น้ำ
$\text{MgSn}(\text{OH})_6$	100	ของแข็ง	ขาว	340	-
$\text{CaSn}(\text{OH})_6$	95	ของแข็ง	ขาว	>360	-
$\text{BaSn}(\text{OH})_6$	96	ของแข็ง	ขาว	>360	-
$\text{CoSn}(\text{OH})_6$	100	ของแข็ง	ชมพูม่วง	320	-
$\text{NiSn}(\text{OH})_6$	97	ของแข็ง	เขียวอ่อน	322	-
$\text{CuSn}(\text{OH})_6$	94	ของแข็ง	ฟ้า	250	-
$\text{ZnSn}(\text{OH})_6$	97	ของแข็ง	ขาว	300	-
$\text{SnSn}(\text{OH})_6$	97	ของแข็ง	เหลืองอ่อน	110	-
$\text{ZrOSn}(\text{OH})_6$	99	ของแข็ง	ขาว	146	-

หมายเหตุ ค่าที่แสดงเป็นผลของการสังเคราะห์ตามวิธีที่ 1 ซึ่งให้ผลใกล้เคียงกันกับ
วิธีที่ 2

3.2 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารประกอบ metal hydroxy stannate

3.2.1 การพิสูจน์โดยการหาปริมาณธาตุ

ผลการทดลองวิเคราะห์ปริมาณธาตุ โดยเทคนิค AAS ICP-AES FES และ CHN elemental analysis แสดงดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ปริมาณธาตุในสารประกอบดีบุกอนินทรีย์

สารประกอบ ดีบุกอนินทรีย์	% M*		% Sn		% H		% O	
	Expt.	Calc.	Expt.	Calc.	Expt.	Calc.	Expt.	Calc.
$\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_8$	17.68	17.24	44.28	44.50	2.15	2.27	35.89	35.99
$\text{MgSn}(\text{OH})_6$	10.20	9.92	49.01	48.44	2.48	2.47	38.31	39.17
$\text{CaSn}(\text{OH})_6$	15.63	15.37	45.94	45.52	2.25	2.32	36.18	36.79
$\text{BaSn}(\text{OH})_6$	38.98	38.36	34.58	33.15	1.62	1.69	24.82	26.80
$\text{CoSn}(\text{OH})_6$	21.48	21.08	42.86	42.45	2.18	2.16	33.48	34.31
$\text{NiSn}(\text{OH})_6$	21.15	21.01	42.56	42.48	2.20	2.17	34.09	34.34
$\text{CuSn}(\text{OH})_6$	22.78	22.36	42.01	41.76	2.02	2.13	33.19	33.75
$\text{ZnSn}(\text{OH})_6$	22.09	22.85	40.93	41.49	2.01	2.11	34.97	33.55
$\text{SnSn}(\text{OH})_6$	-	-	70.58	69.94	1.80	1.78	27.62	28.28
$\text{ZrOSn}(\text{OH})_6$	28.56	27.82	34.52	36.19	1.74	1.84	35.21	34.15

* M = Na, Mg, Ca, Ba, Co, Ni, Cu, Zn และ Zr

ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณของโลหะ M, ดีบุก, ไฮโดรเจน และออกซิเจนของสารประกอบทุกตัว มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ความแตกต่างที่เกิดขึ้นนี้อาจเนื่องมาจากขั้นตอนการเตรียมสารละลายเพื่อทำการวิเคราะห์ จากข้อมูลผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุอาจกล่าวได้ว่า สารประกอบที่เตรียมได้เป็นสารประกอบที่ต้องการ

3.2.2 การพิสูจน์โดยการหาสูตรโครงสร้าง

3.2.2.1 การพิสูจน์โดยอินฟราเรดสเปกตรัม

สามารถแปลความหมายของอินฟราเรดสเปกตรัมของ metal hydroxy stannate ที่เตรียมได้ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ผลการแปลความหมาย (interpretation) อินฟราเรดสเปกตรัมของสารประกอบดีบุกกอนินทรีย์

สเปกตรัม	สารประกอบ ดีบุกกอนินทรีย์	ความถี่		การแปลความหมาย
		Expt.	Ref.	
จ.1	$\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$	3597	3597±10	O-H stretch
		890	898±5	O-H bending
		500	No.ref.	O-H asym. bending
จ.2	$\text{MgSn}(\text{OH})_6$	3230		O-H stretch
		1180	No.ref.	O-H bending
		773		O-Sn stretch

ตารางที่ 3.3 ผลการแปลความหมาย (interpretation) อินฟราเรดสเปกตรัมของ สารประกอบดีบุกอนินทรีย์ (ต่อ)

สเปกตรัม	สารประกอบ ดีบุกอนินทรีย์	ความถี่		การแปลความหมาย
		Expt.	Ref.	
จ.3	CaSn(OH) ₆	3233		O-H stretch
		1095	No.ref.	O-H bending
		692		O-Sn stretch
		510		O-H asym. bending
จ.4	BaSn(OH) ₆	3120		O-H stretch
		1442		O-H bending
		1125	No.ref.	O-H bending
		760		O-Sn stretch
		522		O-H asym.bending
จ.5	CoSn(OH) ₆	3100	3050- 3160	O-H stretch
		1170	1175	O-H bending
		780	745-840	O-Sn stretch
		533	534	O-H asym.bending

ตารางที่ 3.3 ผลการแปลความหมาย (interpretation) อินฟราเรดสเปกตรัมของ สารประกอบดีบุกอนินทรีย์ (ต่อ)

สเปกตรัม	สารประกอบ ดีบุกอนินทรีย์	ความถี่		การแปลความหมาย
		Expt.	Ref.	
จ.6	NiSn(OH) ₆	3160	3120-	O-H stretch
			3260	
		1187	1187	O-H bending
		790	785-850	O-Sn stretch
		530	532	O-H asym.bending
จ.7	CuSn(OH) ₆	3090	3090	O-H stretch
		1143	1143	O-H bending
		741	725-845	O-Sn stretch
		532	532	O-H asym.bending
จ.8	ZnSn(OH) ₆	3220	3220	O-H stretch
		1185	1183	O-H bending
		785	786	O-Sn stretch

ตารางที่ 3.3 ผลการแปลความหมาย (interpretation) อินฟราเรดสเปกตรัมของ สารประกอบดีบุกอนินทรีย์ (ต่อ)

สเปกตรัม	สารประกอบ ดีบุกอนินทรีย์	ความถี่		การแปลความหมาย
		Expt.	Ref.	
จ.9	SnSn(OH) ₆	3410		O-H stretch
		1168	No.ref.	O-H bending
		600		O-Sn stretch
		545		O-H asym.bending
จ.10	ZrOSn(OH) ₆	3440		O-H stretch
		1350	No.ref.	O-H bending
		650		O-Sn stretch
		500		O-H asym.bending

จากตารางที่ 3.3 พบว่าสารประกอบ metal hydroxy stannate มีหมู่ฟังก์ชันที่สำคัญในการตรวจสอบทางเทคนิค IRS คือ vibration ของ O-H แบบ stretching ที่ความถี่ช่วง 3090-3600 cm⁻¹ เป็นแบนด์กว้าง ยกเว้น Na₂Sn(OH)₆ มีแบนด์แคบ มี O-H bending ซึ่งเป็นแบนด์แสดงพันธะ Sn-O-H มีความถี่ในช่วง 890-1442 cm⁻¹ และแบนด์สำคัญอีกแบนด์หนึ่ง แสดง stretching ของพันธะ O-Sn ที่ความถี่ช่วง 600-800 cm⁻¹ นอกจากนี้ยังพบแบนด์แสดง bending อย่างไม่มีสมมาตรของพันธะ O-H ที่ความถี่ช่วง 500-550 cm⁻¹ จากผลการวิเคราะห์พบว่าข้อมูลที่ได้สอดคล้องกับสูตรของสารที่ต้องการเตรียม แต่ทั้งนี้ไม่สามารถยืนยันพันธะระหว่าง Na-O และพันธะกลุ่มโลหะ M กับ O ได้

3.2.2.2 การพิสูจน์โดยอาศัย X-ray diffraction pattern

ผลการทดลองแสดงดังรูปในภาคผนวก จ เมื่อเปรียบเทียบ pattern ของสารตัวอย่างที่ทดสอบกับ pattern ของสารมาตรฐาน พบว่าใกล้เคียงกัน เมื่อใช้พิจารณาาร่วมกันไปกับการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุองค์ประกอบของสารและอินฟราเรดสเปกตรัม สามารถยืนยันการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารได้ สำหรับกรณีสารประกอบ $\text{SnSn}(\text{OH})_6$ และ $\text{ZrOSn}(\text{OH})_6$ ซึ่งเป็นสารใหม่ที่สังเคราะห์ขึ้นยังไม่มีสารมาตรฐานเปรียบเทียบ จึงสามารถยืนยันการพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารได้เพียงปริมาณธาตุองค์ประกอบและอินฟราเรดสเปกตรัมเท่านั้น $\text{SnSn}(\text{OH})_6$ มีลักษณะค่อนข้าง เป็นผลึกที่สมบูรณ์ แต่ $\text{ZrOSn}(\text{OH})_6$ ที่เตรียมได้มีลักษณะ เป็นผลึกที่ไม่สมบูรณ์นัก

3.3 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของการตกตะกอน metal hydroxy stannate

ตารางที่ 3.4 สภาวะที่เหมาะสมของระบบการตกตะกอน $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ ในผ้าฝ้าย

ตัวแปร	สภาวะที่ใช้
ความเข้มข้นของสารละลาย $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$	3% W/V
ความเข้มข้นของสารละลาย NaCl^*	1% W/V
อัตราส่วนปริมาตรของสารละลายต่อ น้ำหนักผ้า	30 มิลลิลิตร/กรัม
อุณหภูมิการบำบัด	70°C
ระยะเวลาการบำบัด	1 ชั่วโมง
สภาพสารละลาย	สารละลายถูกกวนตลอดเวลา
อุณหภูมิในการทำให้ผ้าแห้งหลังการบำบัด	60°C

*NaCl ถูกใช้เป็นตัวช่วยในการตกตะกอน $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ เกิดได้เร็วขึ้น ลักษณะ
เช่นนี้ เรียกว่า NaCl ว่าเป็น mordant

ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลสภาวะที่เหมาะสมของระบบการตกตะกอนของ

$\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ ในผ้าฝ้าย โดยอาศัยผลการหาค่า LOI และการทดสอบการติดไฟในแนวดิ่ง ซึ่งให้ผลที่สอดคล้องกัน โดยกล่าวได้ว่า ประสิทธิภาพการหน่วงไฟมีค่าสูง เมื่อใช้ $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ ที่มีความเข้มข้นสูง ค่าอัตราส่วนปริมาตรของสารละลายต่อน้ำหนักผ้าเป็น 30 มิลลิลิตร/กรัม และทำที่อุณหภูมิสูงเป็นเวลานาน แต่การเลือกสภาวะที่เหมาะสม จำเป็นต้องพิจารณาถึงการเกี่ยวพันให้สามารถรักษาสภาพเนื้อผ้าให้คงทน และกระทำการได้โดยสะดวกรวดเร็ว จึงทำที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ซึ่งจะเป็นการส่งเสริมทำให้สารเคมีจำนวนน้อยลง ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย โดยใช้ 3% $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ และควรใช้ 1% NaCl เพื่อเป็น mordant ด้วย จากเกณฑ์การกำหนดนี้ เมื่อตรวจสอบแล้วพบว่ามีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการหน่วงไฟ (ให้ค่า LOI = 29)

หากจะเปรียบเทียบกับสภาวะอื่น ๆ เช่น การทำโดยจัดให้ตัวแปรต่าง ๆ เหมือนสภาวะที่กำหนดทุกประการ ยกเว้นอุณหภูมิที่ใช้เป็น 100°C พบว่าให้ประสิทธิภาพการหน่วงไฟดีขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันมากนัก (ให้ค่า LOI = 30) สำหรับการเปลี่ยนแปลงเวลาให้นานขึ้นเป็น 2 ชั่วโมง ก็ให้ผลในทางองเดียวกัน (LOI = 30) และกรณีการเปลี่ยนความเข้มข้นเป็น 4% $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ ให้ผลการหน่วงไฟดีกว่าพอสมควร (ให้ค่า LOI = 31) แต่มีผลให้เนื้อผ้าค่อนข้างแข็งหยาบเกินไป และต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายยิ่งขึ้น

สำหรับการเลือกหาสภาวะที่เหมาะสมในการตกตะกอน $\text{MSn}(\text{OH})_6$ ในผ้าฝ้าย ทางานลักษณะเดียวกันกับการตกตะกอนด้วย $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ ในที่นี้เลือกสุ่มทดสอบเฉพาะกับการตกตะกอนด้วย $\text{CaSn}(\text{OH})_6$, $\text{CoSn}(\text{OH})_6$ และ $\text{NiSn}(\text{OH})_6$ ปรากฏว่าให้ผลที่เหมาะสมทางองเดียวกันกับการตกตะกอนด้วย $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ คือ ทำที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้สารละลายโลหะเวเลนซ์สองเข้มข้น 1.5, 1.5 และ 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักต่อปริมาตรตามลำดับ แต่ไม่จำเป็นต้องใช้ NaCl ในขั้นตอนของ bath ที่สอง เพราะให้ผลไม่แตกต่างกัน กรณีที่ใช้และไม่ใช้ NaCl

ลักษณะสีของผ้าฝ้าย ภายหลังจากการตกตะกอนด้วย metal hydroxy stannate พบว่า ผ้ายังคงมีสีขาวดังเดิม ในกรณีที่สารที่ตกตะกอนมีสีขาว และจะมีสีเปลี่ยนไปตามสีของสารนั้น ในกรณีสารที่มีสีอื่น ๆ (แสดงในตารางที่ 3.5) ซึ่งนับเป็นข้อจำกัดอย่างหนึ่ง ในการเลือกใช้สาร หน่วงไฟที่มีสี กล่าวคือ กรณีสารหน่วงไฟมีสีที่ไม่ใช่สีขาว จำเป็นต้อง เลือกใช้กับผ้าที่มีสีเฉดเดียวกับ สีของสารหน่วงไฟจึงจะ ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงสีของเนื้อผ้า แต่สำหรับสารหน่วงไฟที่มีสีขาว เมื่อละลายน้ำจะใสและตกตะกอนในผ้า ดังนั้นสารกลุ่มหลังนี้จึงสามารถใช้งานได้กว้างขวาง กว่าสารกลุ่มแรกมาก

3.4 การทดสอบความสามารถในการติดไฟ

ผลการสังเกตลักษณะการติดไฟของผ้าก่อนและหลังการบำบัดแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติทางกายภาพของผ้าฝ้ายตัวอย่างกับการทดสอบการติดไฟ

ผ้าฝ้ายเมื่อตกตะกอน โดยสารประกอบ	ลักษณะสี ก่อนเผา	ลักษณะการติดไฟ	หลังเผา	
			ลักษณะส่วน ที่เหลือ	ปริมาณควัน
—	ขาว	ลุกติดไฟรวดเร็ว	เถ้าเทาขาว	ค่อนข้างมาก
$\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$	ขาว	ลุกติดไฟและดับเร็ว แต่ จะคุไหม้ภายใน	เถ้าดำ ถ่านเกรียมดำ	น้อย
$\text{MgSn}(\text{OH})_8$	ขาว	ลุกติดไฟช้า ๆ และดับ เร็วพอประมาณ	เถ้าเทาดำ ถ่านเกรียมดำ	น้อยมาก
$\text{CaSn}(\text{OH})_6$	ขาว	ลุกติดไฟช้า ๆ และดับ เร็วพอประมาณ	เถ้าเทาดำ ถ่านเกรียมดำ	น้อย
$\text{BaSn}(\text{OH})_6$	ขาว	ลุกติดไฟเร็วและดับ ค่อนข้างช้า	เถ้าดำเทา ถ่านเกรียมดำ	น้อย
$\text{CoSn}(\text{OH})_6$	ชมพูอ่อน	ลุกติดไฟและดับเร็วพอ ประมาณ มีการคุไหม้	เถ้าดำเขียว ถ่านเกรียมดำ	น้อย

ตารางที่ 3.5 สมบัติทางกายภาพของผ้าฝ้ายตัวอย่างกับการทดสอบการติดไฟ (ต่อ)

ผ้าฝ้ายเมื่อตกตะกอน โดยสารประกอบ	ลักษณะสี ก่อนเผา	ลักษณะการติดไฟ	หลังเผา	
			ลักษณะส่วน ที่เหลือ	ปริมาณควัน
NiSn(OH)_6	เขียวอ่อน	ลุกติดไฟช้า ๆ และดับ เร็วพอประมาณ	เถ้าเขียว เหลือง ปนดำ ถ่านเกรียมดำ	น้อยมาก
CuSn(OH)_6	ฟ้าอ่อน	ลุกติดไฟเร็ว เมื่อ เปลวไฟดับจะคุไหมอยู่ ภายใน	เถ้าดำน้ำตาล ถ่านเกรียมดำ	ค่อนข้างมาก
ZnSn(OH)_6	ขาว	ลุกติดไฟช้า ๆ และดับ เร็วพอประมาณ	เถ้าดำ ถ่านเกรียมดำ	ปานกลาง
SnSn(OH)_6	เหลืองอ่อน	ลุกติดไฟช้า ๆ และดับ ค่อนข้างรวดเร็ว	เถ้าดำ ถ่านเกรียมดำ	น้อย
ZrOSn(OH)_6	ขาว	ลุกติดไฟพอประมาณ เมื่อ เปลวไฟดับจะคุไหม ภายใน	เถ้าดำเทา ถ่านเกรียมดำ	น้อย

จากตารางที่ 3.5 แสดงถึงลักษณะการเปลี่ยนแปลงที่สังเกตได้จากการทดสอบหาความสามารถในการติดไฟของผ้าฝ้าย ทั้งประเภทเฉพาะผ้าฝ้ายอย่างเดียวและประเภทที่ตกตะกอนด้วยสารประกอบกลุ่ม metal hydroxy stannate จากผลการทดสอบพบว่า ผ้าฝ้ายที่ไม่มีการเติมสารกลุ่ม metal hydroxy stannate แสดงค่า LOI = 19 (LOI = 18.4 รายงานโดย I.T.R.L.) มีการลุกติดไฟที่รวดเร็ว และผ้าที่วันที่มีปริมาณสูงกว่าผ้าฝ้ายที่มีการเติมสารกลุ่มนี้ลงไป ซึ่งจะเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนเมื่อใช้ปริมาณสารที่เพียงพอต่อการหน่วงไฟ (แสดงค่า LOI > 29) นั้นแสดงให้เห็นว่าสารประกอบ metal hydroxy stannate มีคุณสมบัติในการหน่วงไฟในผ้าฝ้ายได้ นอกจากนี้ยังมีความสามารถในการลดปริมาณควันได้ด้วย โดยหากเปรียบเทียบเฉพาะจากการสังเกตปริมาณควันที่เกิดขึ้นขณะเผาหรือหลังเผา จะเห็นว่าการตกตะกอนด้วยสารประกอบ $MgSn(OH)_6$ หรือ $NiSn(OH)_6$ จะให้ปริมาณควันที่น้อยกว่าสารประกอบชนิดอื่น ๆ ในกลุ่มเดียวกันนี้

ผลการทดสอบพฤติกรรมการติดไฟ โดยวิธีหาค่า LOI และวิธีทดสอบการติดไฟแบบแนวตั้งของผ้าฝ้ายที่ตกตะกอนด้วยสารประกอบ metal hydroxy stannate ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และแสดงปริมาณตึบูกในผ้าตัวอย่าง ทั้งก่อนและหลัง ชักล้าง แสดงดังตารางที่ 3.6

เมื่อพิจารณาในแง่การติดไฟ กรณีที่ใช้สารกลุ่มนี้กับผ้าฝ้ายในปริมาณที่พอเพียงต่อการหน่วงไฟ พบว่าสารประกอบ $MgSn(OH)_6$ $CaSn(OH)_6$ $NiSn(OH)_6$ และ $ZnSn(OH)_6$ มักจะลุกติดไฟ ในระดับช้า ๆ โดยใกล้เคียงกัน และจะดับไฟได้ในเวลาอันรวดเร็วพอประมาณ (7, 8, 9 และ 10 วินาทีตามลำดับ) ส่วนการใช้สารประกอบ $SnSn(OH)_6$ นี้จะลุกติดไฟอย่างช้า ๆ และดับไฟในเวลาค่อนข้างรวดเร็ว (4 วินาที) แต่สำหรับการใช้สารประกอบ $Na_2Sn(OH)_6$ $CoSn(OH)_6$ $CuSn(OH)_6$ และ $ZrOSn(OH)_6$ พบว่าการลุกติดไฟจะแตกต่างกันไปดังผลที่แสดง (ตารางที่ 3.6) แต่เมื่อเปลวไฟดับจะเกิดลักษณะเช่นเดียวกันคือ มีการคุไหมของไฟอยู่ภายในเนื้อผ้า ทำให้เกิดการลุกลามไหม้เนื้อผ้าขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งอาจจะกล่าวได้ว่า การใช้สารประกอบทั้ง 4 ชนิดนี้ ในปริมาณที่พอเพียงต่อความสามารถในการหน่วงไฟในผ้าฝ้าย แต่จะไม่สามารถต้านทานการคุไหมของไฟภายในเนื้อผ้าได้ แต่อย่างไรก็ตาม การคุไหมภายในเนื้อผ้า

เกิดขึ้นอย่างช้ามาก ๆ และส่วนใหญ่มักจะดับไฟได้ในที่สุด เมื่อใช้สารานปริมาณสูงกว่าเดิมไม่มากนัก ตัวอย่างที่ได้ทดสอบในกรณีนี้ ได้แก่ การใช้ $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ เข้มข้น 3.5% แทน 3.0% และการใช้ $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ เข้มข้น 2% แทน 1.5% โดยน้ำหนัก/ปริมาตร

ส่วนที่เหลือจากการเผาผ้าเมื่อไม่มีการบำบัด จะได้เป็นแก้วสีเทาปนขาวเหลืออยู่ และกรณีที่ไม่บำบัด ส่วนที่เหลือมี 2 ลักษณะ คือ แก้วและถ่านเกรียม สำหรับแก้วที่เกิดขึ้น มีสีดำหรือสีเทาปนดำในกรณีสารประกอบที่ใช้มีสีขาว และมีสีอื่น ๆ บนอยู่บ้างในกรณีสารประกอบที่ใช้ไม่สีขาว ซึ่งจัดเป็นลักษณะเฉพาะของสารแต่ละชนิด แต่สำหรับถ่านเกรียมที่เกิดขึ้นจะมีสีดำทั้งหมด ซึ่งจัดเป็นสารที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งและจากการเกิดถ่านเกรียมนี้เอง จึงสันนิษฐานว่ากลไกของปฏิกิริยาการหน่วงไฟของสารประกอบ metal hydroxy stannate น่าจะเกิดขึ้นในวัฏภาคควบแน่น แต่ทั้งนี้ได้วิเคราะห์ผลการทดลอง ในเรื่องการตรวจสอบวัฏภาคของกลไกการเกิดปฏิกิริยาการหน่วงไฟในหัวข้อที่ 3.6 เพื่อสนับสนุนข้อสันนิษฐานนี้อีกทางหนึ่ง

ในการสังเกตปริมาณควันที่เกิดขึ้นจากการเผาอาจมีความคลาดเคลื่อนไปบ้าง การแก้ปัญหานี้กระทำได้โดยการใช้เครื่องมือวัดปริมาณควันโดยเฉพาะ ซึ่งสามารถทราบในรูปของปริมาณควันที่เกิดขึ้นหรือเปอร์เซ็นต์การลดลงของปริมาณควัน เมื่อเทียบกับผ้าที่ไม่ได้เติมสารหน่วงไฟ

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการติดไฟ (vertical flame test), ค่า LOI ของผ้าฝ้ายเมื่อตกตะกอนด้วย metal hydroxy stannate และปริมาณดีบุกในผ้าตัวอย่าง

การตกตะกอน 3% $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ + สารละลายโลหะ ไอออน ที่มีเวเลนซ์สอง (M^{2+})		ผ้าฝ้าย-ก่อนการซักล้าง				หลังซักล้าง	
ชนิดสารประกอบ M	ความเข้มข้น W/V	LOI	เวลาการ ไหม้ (วินาที)	ความยาวถ่าน เกรียม (มม.)	ปริมาณดีบุก (%)	LOI	ปริมาณดีบุก (%)
-	-	29	6.0	180	7.0	20	2.1
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1.0	26	ไหม้หมด		5.2	20	3.0
	2.0	28	ไหม้หมด		5.9	20	3.2
	2.5	29	7.0	169	7.1	21	3.9
	3.0	31	5.0	130	7.5	22	4.3
	3.5	31	4.0	126	7.9	22	4.3
CaCl_2	0.5	27	ไหม้หมด		6.2	20	3.1
	1.0	28	ไหม้หมด		6.5	20	3.2
	1.5	29	8.0	174	7.5	22	4.1
	2.0	30	5.0	140	8.3	22	4.2

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการติดไฟ (vertical flame test), ค่า LOI ของผ้าฝ้ายเมื่อตกตะกอนด้วย metal hydroxy stannate และปริมาณดีบุกในผ้าตัวอย่าง (ต่อ)

การตกตะกอน 3% Na ₂ Sn(OH) ₆ + สารละลายโลหะ ไอออน ที่มีเวเลนซ์สอง (M ²⁺)		ผ้าฝ้าย-ก่อนการซักล้าง				หลังซักล้าง	
ชนิดสารประกอบ M	ความเข้มข้น W/V	LOI	เวลาการไหม้ (วินาที)	ความยาวถ่าน เกรียม (มม.)	ปริมาณดีบุก (%)	LOI	ปริมาณดีบุก (%)
BaCl ₂ ·2H ₂ O	3.0	25	ไหม้หมด		5.1	20	2.8
	5.0	26	ไหม้หมด		5.8	20	3.2
	8.0	29	12.0	188	8.6	21	4.4
	10.0	29	10.0	165	9.0	21	4.4
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.5	26	ไหม้หมด		3.4	20	2.0
	1.0	27	14.0	287	4.2	20	2.3
	1.5	29	6.0	166	5.2	22	3.8
	2.0	31	4.0	127	6.0	23	4.3
NiCl ₂ ·6H ₂ O	1.5	26	ไหม้หมด		4.6	20	2.7
	2.0	27	ไหม้หมด		5.1	20	2.9

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการติดไฟ (vertical flame test), ค่า LOI ของผ้าฝ้ายเมื่อตกตะกอนด้วย metal hydroxy stannate และปริมาณดีบุกในผ้าตัวอย่าง (ต่อ)

การตกตะกอน 3% $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ + สารละลายโลหะ ไอออน ที่มีเวเลนซ์สอง (M^{2+})		ผ้าฝ้าย-ก่อนการซักล้าง				หลัง ซักล้าง	
ชนิดสารประกอบ M	ความเข้มข้น W/V	LOI	เวลาการ ไหม้(วินาที)	ความยาวถ่าน เกรียม(มม.)	ปริมาณดีบุก (%)	LOI	ปริมาณดีบุก (%)
	2.5	29	9.0	176	6.4	21	2.9
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	3.0	30	5.0	145	7.2	22	3.9
	3.0	26	ไหม้หมด		6.0	20	3.3
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	5.0	27	ไหม้หมด		7.1	20	4.1
	8.0	29	12.0	179	7.8	20	3.7
	1.0	27	ไหม้หมด		3.4	20	2.1
ZnCl_2	1.5	28	17.0	263	4.0	20	2.3
	2.0	29	10.0	175	4.6	21	2.9
	2.5	30	6.0	138	5.4	22	3.9
	3.0	30	5.0	132	6.1	23	4.2

ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการติดไฟ (vertical flame test), ค่า LOI ของผ้าฝ้ายเมื่อตกตะกอนด้วย metal hydroxy stannate และปริมาณดีบุกในผ้าตัวอย่าง (ต่อ)

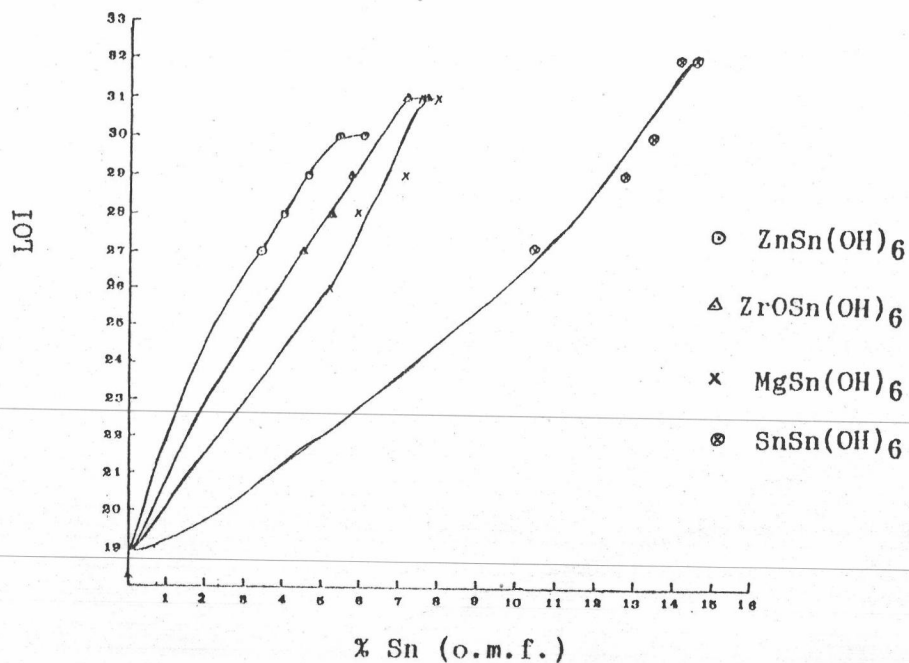
การตกตะกอน 3% Na ₂ Sn(OH) ₆ แล้วตามด้วยสารละลายโลหะ ไอออน ที่มีเวเลนซ์สอง (M)		ผ้าฝ้าย-ก่อนการซักล้าง				หลัง ซักล้าง	
ชนิดสารประกอบ M	ความเข้มข้น W/V	LOI	เวลาการ ไหม้(วินาที)	ความยาวถ่าน เกรียม(มม.)	ปริมาณดีบุก %	LOI	ปริมาณดีบุก %
SnCl ₂	1.0	27	ไหม้หมด		10.5	21	4.9
	1.3	29	4.0	130	12.7	23	5.2
	1.5	30	3.0	108	13.4	23	5.3
	2.0	32	3.0	102	14.1	23	5.4
	3.0	32	3.0	98.	14.5	23	5.4
ZrOCl ₂ .8H ₂ O	2.5	27	ไหม้หมด		4.5	20	2.9
	3.0	28	ไหม้หมด		5.2	20	3.1
	3.5	29	10.0	184	5.7	22	3.7
	4.0	31	5.0	107	6.4	22	4.1
	5.0	31	4.0	104	7.1	23	4.9

หมายเหตุ ผ้าฝ้ายที่ไม่ได้บำบัดมีผลทาง vertical flame test คือ ไหม้หมดใน

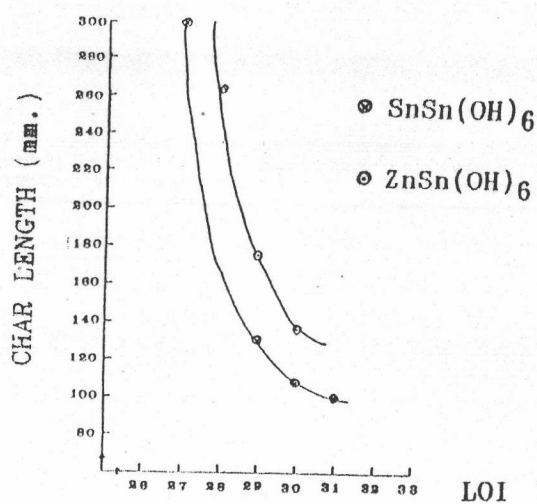
11 วินาที และค่า LOI = 19

เมื่อทำการบำบัดน้ำที่ปริมาณ M^{2+} ต่าง ๆ กัน (ตารางที่ 3.6) พบว่าการตกตะกอนสารประกอบ metal hydroxy stannate ในปริมาณสูงจะแสดงความสามารถในการหน่วงไฟได้ดีกว่าการใช้ปริมาณต่ำ ในทุก ๆ กรณีพบว่าภายหลังการชั่งล้าง สมบัติในการหน่วงไฟลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในตัวอย่างที่ใช้สารละลายโลหะ เวเลนซีสองที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ สามารถสังเกตการสูญหายของ $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ จากการชั่งล้างได้อย่างชัดเจนในรูปที่ ๗.7, ๗.8 เมื่อลองนำผลการทดลองส่วนหนึ่ง ไปพล็อตกราฟ เพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของดีบุกกับค่า LOI ได้กราฟแสดงในรูปที่ 3.1 จะเห็นว่า ในระยะแรกค่า LOI สูงขึ้นตามปริมาณดีบุกที่เพิ่มขึ้นและต่อมามีค่า LOI จะเริ่มคงที่ เมื่อปริมาณดีบุกมีมากเกินไป ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การทำการตกตะกอนสารประกอบ metal hydroxy stannate ในผ้าฝ้าย ด้วยปริมาณที่สามารถแสดงคุณสมบัติในการหน่วงไฟได้อย่างพอเพียงไม่มากเกินไป จึงจะเป็นการใช้สารหน่วงไฟอย่างเหมาะสมและคุ้มค่า จากกราฟในรูปที่ 3.1 สามารถสรุปได้ว่าปริมาณดีบุกมีผลต่อประสิทธิภาพในการหน่วงไฟ

เมื่อสังเกตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า LOI กับค่าความยาวของถ่านเกรียม (char length) ที่เกิดขึ้น จากการตกตะกอนของ $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$ และ $\text{SnSn}(\text{OH})_6$ ในผ้าฝ้าย ดังแสดงในรูปที่ 3.2 พบว่า ค่าความยาวของถ่านเกรียมจะลดน้อยลง เมื่อค่า LOI สูงขึ้น นั่นคือระยะการไหม้ของผ้าลดลง เมื่อใช้สารหน่วงไฟที่มีปริมาณสูงขึ้นและจะค่อย ๆ คงที่ เมื่อค่า LOI สูงกว่า 29 ซึ่งลักษณะดังกล่าวนี้มีพฤติกรรมที่ค่อนข้างสอดคล้องกับกราฟที่แสดงในรูปที่ 3.1 และหากทดลองพล็อตกราฟทั้งสองรูปแบบด้วยสารประกอบ metal hydroxy stannate ตัวอื่น ๆ นอกเหนือจากที่แสดงนี้ก็ให้ผลในทางนองเดียวกัน



รูปที่ 3.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซนต์ดีบุกจากการตกตะกอนของ ZnSn(OH)_6 , ZrOSn(OH)_6 , MgSn(OH)_6 และ SnSn(OH)_6 ในผ้าฝ้ายกับค่า LOI



รูปที่ 3.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า LOI กับ char length จากการตกตะกอนของ ZnSn(OH)_6 และ SnSn(OH)_6 ในผ้าฝ้าย

การตกตะกอนโดย $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ แล้วตามด้วยสารละลายโลหะไอออนที่มีเวเลนซ์สอง จะได้ตะกอนของสารประกอบ $\text{MSn}(\text{OH})_6$ เกิดขึ้นในผ้าฝ้าย เมื่อ M ขึ้นอยู่กับโลหะไอออน แต่ละชนิด เมื่อพิจารณาเฉพาะกรณีที่ทำให้ผลการทดสอบในลักษณะที่เพียงพอต่อการทอผ้า กกล่าวคือ ผ่านเกณฑ์การทดสอบการติดไฟแบบแนวตั้ง และให้ค่า LOI = 29 โดยหากนำข้อมูลมาแสดงในรูปของความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโลหะไอออนที่ใช้ตกตะกอนดังกล่าว ค่าเปอร์เซ็นต์ของดีบุกและเปอร์เซ็นต์ของ $\text{MSn}(\text{OH})_6$ (หาจากเปอร์เซ็นต์ดีบุก) ที่ตกตะกอนในผ้าฝ้าย ซึ่งเทียบเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของสารเป็นกรัมต่อน้ำหนักของผ้า 100 กรัม จะได้ผลแสดงดังตารางที่ 3.7

ตารางที่ 3.7 แสดงความเข้มข้นของโลหะไอออนที่ใช้ตกตะกอน ปริมาณของดีบุก และ $\text{MSn}(\text{OH})_6$ ที่ตกตะกอนในผ้าฝ้ายที่ทำให้ผลเพียงพอต่อการทอผ้า

โลหะไอออนเวเลนซ์สอง		% สารเมื่อเทียบกับ 100 กรัมผ้า	
ชนิดโลหะ	ความเข้มข้น (พ/ว)	Sn	$\text{MSn}(\text{OH})_6$
Mg	2.5	7.1	14.7
Ca	1.5	7.5	16.5
Ba	8.0	8.6	25.9
Co	1.5	5.2	12.3
Ni	2.5	6.4	15.1
Cu	8.0	7.8	18.7
Zn	2.0	4.6	11.1
Sn	1.3	12.7	18.2
ZrO	3.5	5.7	15.7

หมายเหตุ - กรณีตกตะกอนเฉพาะ $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ ใช้ความเข้มข้น 3%
- มีดีบุก 7.0% หรือ $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ 15.8% ในผ้าฝ้าย

หากเปรียบเทียบระหว่างผลการทดลองจากตารางที่ 3.7 กับผลการทดลองจากงานวิจัยของ P.A. Cusack และคณะ (ตารางที่ 1.2) พบว่าให้ผลในทางองเดียวกันและได้ค่าปริมาณดีบุกที่เหมาะสมต่อการหน่วงไฟของสารประกอบ $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ ($M = \text{Na}_2, \text{Mg}, \text{Ca}, \text{Ba}$ และ Zn) ที่ใกล้เคียงกัน สารประกอบใหม่ทั้ง 2 ตัวที่ทำการศึกษานในงานวิจัยนี้คือ $\text{SnSn}(\text{OH})_6$ และ $\text{ZrOSn}(\text{OH})_6$ แสดงประสิทธิภาพในการเป็นสารหน่วงไฟที่ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่ง $\text{SnSn}(\text{OH})_6$ แสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่า $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ อื่น ๆ ทั้งหมด โดยอาจกล่าวได้ว่า ปริมาณของโลหะไอออนเวเลนซ์สองน้อยที่สุด (1.3%) และแสดงผล vertical flametest ที่ดีกว่า คือ เวลาการไหม้ที่ 4.0 วินาที ความยาวถ่านเกรียม 130 มม. ส่วน $\text{ZrOSn}(\text{OH})_6$ ให้ประสิทธิภาพในการหน่วงไฟประมาณใกล้เคียงกับ $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$ ที่ใช้กันอยู่ในทางการค้า แต่ราคาถูกกว่า $\text{ZrOSn}(\text{OH})_6$

3.5 ผลการตรวจสอบปฏิบัติการสลายตัว เนื่องจากความร้อนด้วยเครื่อง TGA

กราฟ TGA ของ $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ และผ้าฝ้ายที่บำบัดด้วย $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ ทั้งหมดแสดงในภาคผนวก ช และ ซ ผลการอ่านค่าอุณหภูมิของการสลายตัวและน้ำหนักที่หายไปแสดงในตารางที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.8 ผล TGA ของสารประกอบ metal hydroxy stannate

สารประกอบ	Tmax(°C)	น้ำหนักที่หายไปทั้งหมด (%)		รูปที่
		ทดลอง	คำนวณ	
Na ₂ Sn(OH) ₆	294	20.0	20.3	ช.1
MgSn(OH) ₆	334	22.0	22.0	ช.2
CaSn(OH) ₆	362	21.1	20.7	ช.3
BaSn(OH) ₆	275	14.0	15.0	ช.4
CoSn(OH) ₆	324	19.0	19.3	ช.5
NiSn(OH) ₆	341	19.1	19.3	ช.6
CuSn(OH) ₆	272	17.9	19.0	ช.7
ZnSn(OH) ₆	277	19.0	18.9	ช.8
SnSn(OH) ₆	105	9.5	10.6	ช.9
ZrOSn(OH) ₆	136	15.8	16.5	ช.10

Tmax = อุณหภูมิสูงสุดที่สารประกอบสลายตัว

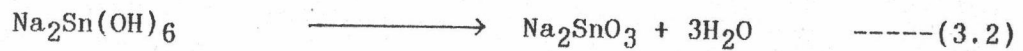
ตารางที่ 3.9 ผล TGA ของผ้าฝ้ายตัวอย่างที่ตกตะกอนด้วยสารประกอบ $M\text{Sn}(\text{OH})_6$

ชนิดสารประกอบ	ความเข้มข้นสารละลายโลหะ ไอออน (W/V)	Tmax (°C)	น้ำหนักที่หายไปทั้งหมด (%)	รูปที่
untreated	—	331	77.8	ช.1
		328		
$\text{SnSn}(\text{OH})_6$	1.0	318	64.3	ช.2
	1.3	295	62.0	ช.3
$\text{NiSn}(\text{OH})_6$	2.0	298	68.2	ช.4
	2.5	292	67.2	ช.5
$\text{CaSn}(\text{OH})_6$	1.0	300	65.8	ช.6
	1.5	295	62.3	ช.7
$\text{ZnSn}(\text{OH})_6$	1.0	279	66.2	ช.8
	2.0	247	63.5	ช.9

นอกจากนี้ได้แสดงผล DTA ของผ้าฝ้ายตัวอย่างที่ตกตะกอนด้วยสารประกอบ $M\text{Sn}(\text{OH})_6$

ดังรูปในภาคผนวก ฅ

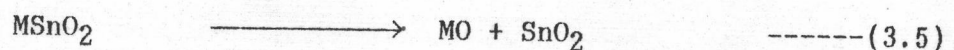
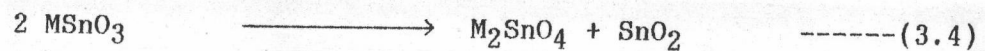
ผลจากการหาเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป เมื่อทำการวิเคราะห์สารประกอบ metal hydroxy stannate โดยเทคนิค TGA (ตารางที่ 3.8) พบว่าที่ T_{max} ให้ผลที่สอดคล้องกับการสลายตัวของสารเนื่องจากความร้อน โดยเกิดปฏิกิริยา dehydration แบบดูดความร้อน มีการสูญเสีย H_2O 3 โมเลกุลไป ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เป็นสารประกอบ metastannate ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงดังสมการที่ (3.2) และ (3.3)



เมื่อ $M = Mg, Ca, Ba, Co, Ni, Cu, Zn, Sn$ และ ZrO

สำหรับสารประกอบ $SnSn(OH)_6$ จากเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไป สันนิษฐานว่ามีการสูญเสียน้ำเพียง 2 โมเลกุล จะค่อย ๆ ใช้น้ำอีกโมเลกุล เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นกว่า $400^\circ C$ (รูปที่ ช.1)

นอกจากนี้ โดยทั่วไปสารประกอบ metastannate จะสามารถเกิดการสลายตัวต่อไปได้ เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงขึ้นในช่วงประมาณ $600-800^\circ C$ โดยจะเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวแบบคายความร้อน แสดงดังสมการที่ (3.4) หรือ (3.5)



จะเห็นว่าการสลายตัวตามนี้ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมวลของสาร แต่การเกิด SnO_2 มีผลหน่วงไฟได้

กราฟ TGA ของผ้าที่ผ่านการบำบัดด้วย $MSn(OH)_6$ อื่น ๆ (รูปที่ ช.2-ช.9) แสดงลักษณะคล้ายคลึงกับกราฟ TGA ของผ้าฝ้าย โดยค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่หายไปจากการเผาไหม้ต่ำกว่า 77.8% ในทุก ๆ กรณี แสดงให้เห็นถึงผลของการหน่วงไฟของสารประกอบ $MSn(OH)_6$

การที่ T_{max} ของผ้าที่ผ่านการบำบัดด้วย $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ มีค่าต่ำกว่า T_{max} ของผ้าฝ้ายบริสุทธิ์ สันนิษฐานว่าสารประกอบ $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ ไปลดอุณหภูมิการเผาไหม้เพื่อเร่งการเกิดถ่านเกรียมและ SnO_2 ได้เร็วขึ้น ซึ่ง SnO_2 มีบทบาทในการหน่วงไฟได้ (46) และกรณีที่มีปริมาณ SnO_2 สูง ๆ เช่น $\text{SnSn}(\text{OH})_6$ ก็อาจเกิดเป็นฟิล์มบาง เคลือบที่ผิวหน้าของพอลิเมอร์ ทาที่หน่วงไฟได้ดีขึ้น

กราฟ DTA (รูปที่ ๗.1-๗.4) แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงขั้นแรกที่มีประมาณ 100°C เป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน ส่วนการเปลี่ยนแปลงในช่วง $200-300^\circ\text{C}$ เป็นแบบคายความร้อน เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟ TGA แสดงให้เห็นว่าการสูญเสียน้ำไปดีถ่านเกรียม และเส้นใยเซลลูโลสจะถูกออกซิไดซ์ต่อไป

เนื่องจากอุณหภูมิของการสลายตัว (T_{max}) ของสารประกอบ $M\text{Sn}(\text{OH})_6$ (ตารางที่ 3.8) ไม่แสดงความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพของการหน่วงไฟ จึงแสดงให้เห็นว่ากลไกของการหน่วงไฟไม่ได้ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการสูญเสียน้ำในขั้นตอนแรกอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับขั้นตอนของการเกิด SnO_2 ด้วย

3.6 การตรวจสอบวิฤภาคของกลไกการเกิดปฏิกิริยาของสารหน่วงไฟ

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 แสดงปริมาณดีบุกในตัวอย่างผ้าที่ตกตะกอนโดย $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ และ $\text{ZnSn}(\text{OH})_6$ ทั้งกรณีก่อนเผาและหลังเผา

องค์ประกอบทางเคมี ของสารละลาย	ปริมาณดีบุก (%)		
	ก่อนเผา	หลังเผา	ความแตกต่าง
3% $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$	7.23	7.07	0.16
3% $\text{Na}_2\text{Sn}(\text{OH})_6$ 2% ZnCl_2	4.61	4.48	0.13

หมายเหตุ ผลการทดลองได้จากค่าเฉลี่ยการทดลอง 3 ครั้ง

การหน่วงไฟของสารประกอบ metal hydroxy stannate คาดว่าเกิดในวิฤภาคควบแน่น ทั้งนี้เมื่อพิจารณาการเกิดถ่านเกรียมและผลการทดลองตามตารางที่ 3.10 แสดงว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาณดีบุกในวิฤภาคของแข็ง เมื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังเผา

กลไกการหน่วงไฟสันนิษฐานได้ว่า เกิดจากปฏิกิริยาการสลายตัวเองโดยการดูดกลืนความร้อนที่ได้รับจากเปลวไฟเข้าไป ทำให้เกิดการสูญเสียโมเลกุลของน้ำไป ได้เป็นสารประกอบ metastannate น้ำเมื่อเข้าสู่บรรยากาศจะมีบทบาทในการลดอุณหภูมิของ เปลวไฟและบริเวณผิวหน้าของเส้นใยผ้า พร้อมทั้งกระทำตัวเป็นเสมือนสารเชื่อมต่อการเผาไหม้ และช่วยเจือจางแก๊สเชื้อเพลิงในบรรยากาศด้วย ส่วน metastannate อาจสลายตัวต่อให้ SnO_2 ซึ่งอาจช่วยให้เกิดถ่านเกรียมได้ดีขึ้น ทำให้การเผาไหม้ถูกขัดขวางและอาจทำตัวเป็นฉนวนกันความร้อนที่บริเวณผิวหน้าของเส้นใยผ้าได้ $\text{SnSn}(\text{OH})_6$ แสดงสมบัติในการเป็นสารหน่วงไฟที่ดีที่สุด

บรรดาสารประกอบ metal hydroxy stannate ที่ศึกษา ทั้งนี้อาจเนื่องจากประกอบด้วยตุ๊ก
ในปริมาณสูงสุด ทำให้เกิด metastannate หรือ SnO_2 ในปริมาณที่มากกว่าสารตัวอื่น ๆ
เมื่อถูกเผาไหม้ จึงสามารถยับยั้งการติดไฟได้ดีกว่าสารอื่น ๆ

3.7 การตรวจสอบลักษณะ โครงสร้างของ เส้นใยฝ้ายก่อนและหลัง เติมสารหน่วงไฟ

ผลการตรวจสอบเฉพาะบางส่วนแสดงดังรูปในภาคผนวก ๗ แสดงให้เห็นถึงโครงสร้าง
ภายในของผ้าฝ้ายเมื่อมีสารตกตะกอนอยู่ ในปริมาณแตกต่างกันไป จะเห็นการกระจายของสารใน
เส้นใย มีความแตกต่างกัน ไม่สม่ำเสมอในทุก ๆ จุด ซึ่งมีผลต่อการแสดงความแตกต่างในการ
แสดงสมบัติการหน่วงไฟด้วย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบภาพขยายเส้นใยของผ้าที่ได้รับการบำบัด
ก่อนและหลัง ซักล้าง จะเห็นการสูญเสียของอนุภาค สารประกอบ metal hydroxy stannate
ภายหลังการล้างอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งมีผลทำให้สมบัติการหน่วงไฟลดลงด้วย