

## บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการเตรียมเส้นใยนาโนผสมของไนลอน6/ไคโตซาน พบว่ามีปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อขนาดและรูปร่างของเส้นใย เช่น ผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงฉากรองรับเส้นใย ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้แก่ระบบ และผลของการมีปฏิสัมพันธ์ระหว่างหมู่ฟังก์ชันของเส้นใยผสมไนลอน6/ไคโตซาน ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะทองแดงได้

### 4.1 การติดตั้งชุดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

ในการติดตั้งชุดอุปกรณ์จะต้องจัดให้ปลายเข็มโลหะกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยอยู่ในแนวเดียวกันจะทำให้เส้นใยที่ออกจากปลายเข็มพุ่งไปยังอุปกรณ์รองรับเส้นใยได้ปริมาณมาก และอุปกรณ์รองรับเส้นใยจะต้องเป็นวัสดุที่นำไฟฟ้า เพื่อเป็นตัวนำให้สารละลายสามารถพุ่งออกจากปลายเข็มโลหะได้ ปลายเข็มโลหะก็มีผลต่อรูปร่างของเส้นใยเช่นกัน ปลายเข็มโลหะจะต้องตัดปลายแหลมออกเป็นปลายตัดตรงเพื่อให้เส้นใยที่ฉีดได้มีรูปร่างสม่ำเสมอ





### 4.2 ผลของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเตรียมเส้นใยไนลอน6

ขนาดและรูปร่างของเส้นใยไนลอนที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์ คือเส้นใยที่แห้งมีรูปร่างเป็นทรงกระบอกเรียบสม่ำเสมอ ไม่มีการฉีกขาดเป็นแบบกิ่ง (Branch shape) และเส้นใยที่ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก จะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ต่างๆได้แก่ ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใย และความเข้มข้นของสารละลาย ดังนี้

- ผลของค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

เตรียมสารละลายไนลอน6 ที่ความเข้มข้น 20 wt.% นำมาวางที่แท่นวางกระบอกบรรจุสารละลายปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใย 20 cm ปรับอัตราการป้อนของสารละลายให้สารละลายหยดอย่างต่อเนื่องที่ 0.15 ml/min และค่อยๆปรับค่าความต่างศักย์เพิ่มครั้งละ 5 kV ใช้เวลาในการฉีด 5 นาที/ครั้ง พบว่าที่ 10 kV สารละลายไนลอน6 เริ่มพุ่งออกจากปลายเข็มโลหะไปยังอุปกรณ์รองรับเส้นใยแต่เส้นใยที่อยู่บนอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็นหยดไม่แห้ง จึงต้องปรับค่าความต่างศักย์เพิ่มขึ้นเป็น 15, 20, 25 kV ตามลำดับ ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงลักษณะของเส้นใยที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า ที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ


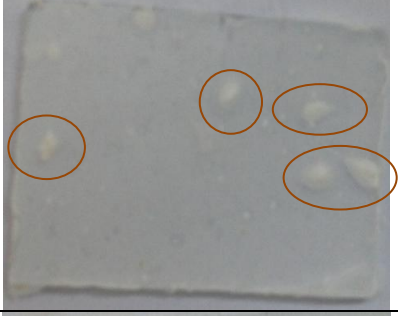
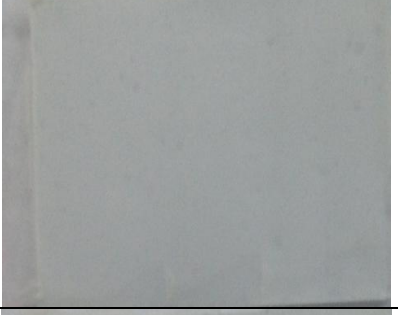
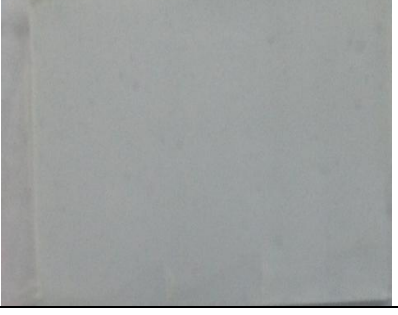
ความต่างศักย์ไฟฟ้า (kV)	ลักษณะและปริมาณของเส้นใยที่ได้	ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า
10	มีฝ้าขาวและหยดของสารละลายกระจายเต็มเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย	
15	เป็นฝ้าขาวแห้งกระจายเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย	
20	เป็นฝ้าขาวแห้งกระจายเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย	
25	เป็นฝ้าขาวแห้งกระจายเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย	
30	ไม่สามารถจัดเป็นเส้นใยได้	-

จากการทดลองพบว่าที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าช่วง 15–25 kV ตอนเริ่มต้นที่อุปกรณ์รองรับเส้นใยเริ่มมีฝ้าสีขาวเกิดขึ้นบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์รองรับเส้นใย เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 นาที เส้นใยจะกระจายเพิ่มมากขึ้นจนกระทั่งบนอุปกรณ์รองรับเส้นใยมีฝ้าขาวกระจายเต็ม เมื่อเพิ่มค่าความต่างศักย์เป็น 30 kV ที่อุปกรณ์รองรับเส้นใยไม่ปรากฏฝ้าขาวเกิดขึ้น ดังนั้นที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่ 20 cm ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 15–25 kV เนื่องจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เหมาะสมกับระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่ 20 cm จากนั้นนำเส้นใยที่ฉีดได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงที่ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 15–25 kV ไปวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

- **ผลของระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใย**

เตรียมสารละลายไนลอน 6 ที่ความเข้มข้น 20 wt.% วางที่แทนวางกระบอกบรรจุสารละลาย ปรับอัตราการป้อนของสารละลายให้สารละลายหยดอย่างต่อเนื่องที่ 0.15 ml/min ปรับค่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยเริ่มต้น 5 cm ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ใช้เวลาในการฉีด 5 นาที/ครั้ง พบว่าสารละลายไนลอน 6 เริ่มพุ่งออกจากปลายเข็มโลหะไปยังอุปกรณ์รองรับเส้นใย แต่เส้นใยที่อยู่บนอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็นหยดไม่แห้ง จึงต้องปรับระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็น 10, 15, 20 และ 25 cm ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงลักษณะของเส้นใยที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะ ถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยตำแหน่งต่างๆ


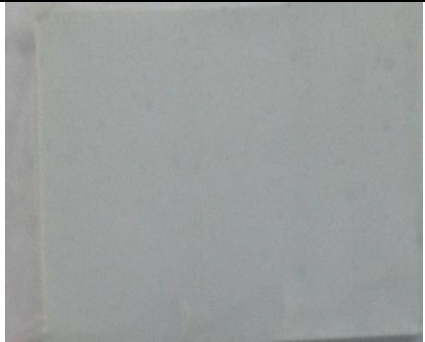

ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับอุปกรณ์รองรับเส้นใย (cm)	ลักษณะและปริมาณของเส้นใยที่ได้	ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า
5	เป็นหยดไม่แห้ง	-
10	เป็นฝ้าขาวไม่ค่อยแห้งและมีหยดของสารละลายบนอุปกรณ์รองรับเส้นใย	
15	เป็นฝ้าขาวค่อนข้างแห้งและมีหยดของสารละลายเล็กน้อยบนอุปกรณ์รองรับเส้นใย	
20	เป็นฝ้าขาวแห้งกระจายเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย	
25	เป็นฝ้าขาวแห้งกระจายเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย	
30	ไม่สามารถนับเป็นเส้นใยได้	-

จากการทดลองพบว่าที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่ระยะ 5 cm ที่อุปกรณ์รองรับเส้นใยจะปรากฏหยดของสารละลายกระจายเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยพบว่าหยดของสารละลายบนพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใยมีจำนวนน้อยลงและมีฝ้าขาวเกิดขึ้น จนถึงระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใย 20 และ 25 cm พบว่าบนอุปกรณ์รองรับเส้นใยปรากฏฝ้าสีขาวแห้งกระจายเต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย เนื่องจากระยะในการยึดของสารละลายเหมาะสมกับค่าความต่างศักย์ 20 kV ทำให้ตัวทำละลายระเหยออกได้พอดีกับระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยได้พอดี ดังนั้นที่อุปกรณ์รองรับเส้นใยจึงปรากฏเป็นฝ้าแห้งไม่มีหยดของสารละลายติดอยู่ เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็น 30 cm ไม่ปรากฏฝ้าขาวบนอุปกรณ์รองรับเส้นใย เนื่องจากระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยมากเกินไปกว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 20 kV จะมีแรงผลัดส่งไปถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยได้ จากนั้นนำเส้นใยที่ผลิตได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่ 10 cm, 15 cm, 20 cm และ 25 cm ไปวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- ผลของความเข้มข้นของสารละลาย

ในการทดลองเตรียมสารละลายไนลอน 6 ที่ความเข้มข้น 10 wt.% พบว่าสารละลายไนลอน 6 มีลักษณะใสไม่มีสี และมีความหนืดน้อยทำให้ไม่สามารถฉีดเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงได้ จึงต้องเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 เป็น 15 wt.%, 20 wt.% และ 25 wt.% พบว่าสารละลายมีความหนืดที่สามารถฉีดเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงได้ เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 เป็น 30 wt.% สารละลายจะมีความหนืดมากทำให้การฉีดเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงเป็นไปได้ค่อนข้างยาก ดังนั้นจึงนำสารละลายไนลอน 6 ที่ความเข้มข้น 15 wt.%, 20 wt.% และ 25 wt.% มาวางที่แท่นวางกระบอกรับสารละลาย ปรับอัตราการป้อนของสารละลายให้สารละลายหยดอย่างต่อเนื่องที่ 0.15 ml/min ปรับค่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยเริ่มต้น 20 cm ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV ใช้เวลาในการฉีด 5 นาที/ครั้ง พบว่าสารละลายไนลอน 6 เริ่มพุ่งออกจากปลายเข็มโลหะไปยังอุปกรณ์รองรับเส้นใยแต่เส้นใยที่อยู่บนอุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็นฝ้าขาวแห้ง ผลที่ได้แสดงในตารางที่ 4.3

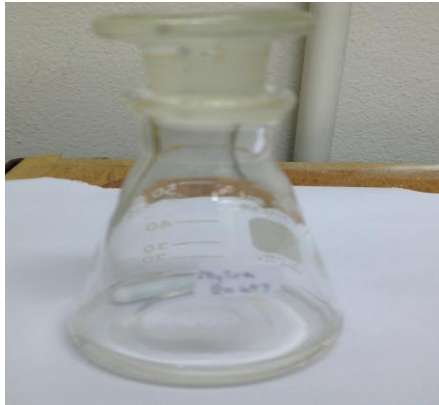
ตารางที่ 4.3 แสดงลักษณะของเส้นใยที่สังเกตได้ด้วยตาเปล่า ที่ความเข้มข้นของสารละลาย  
ในลอน 6 ที่ต่างๆ

ความเข้มข้นของ สารละลาย (wt.%)	ลักษณะและปริมาณของเส้นใยที่ ได้	ลักษณะทางกายภาพที่สังเกตได้ด้วย ตาเปล่า
10	ไม่สามารถฉีกเป็นเส้นใยได้	-
15	เป็นฝ้ายขาวแห้งบนอุปกรณ์รองรับ เส้นใย	
20	เป็นฝ้ายขาวแห้งบนอุปกรณ์รองรับ เส้นใย	
25	เป็นฝ้ายขาวแห้งบนอุปกรณ์รองรับ เส้นใย	
30	ไม่สามารถฉีกเป็นเส้นใยได้	-

จากการทดลองพบว่าที่ค่าความเข้มข้นในช่วง 15–25 wt.% ตอนเริ่มต้นที่อุปกรณ์รองรับเส้นใยเริ่มมีสีขาวเกิดขึ้นบริเวณตรงกลางของอุปกรณ์รองรับเส้นใย เมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 1 นาทีเส้นใยจะกระจายเพิ่มมากขึ้นจนบนอุปกรณ์รองรับเส้นใยมีฝ้าขาวกระจายเต็มพื้นที่ เมื่อเพิ่มค่าความเข้มข้นเป็น 30 wt.% ที่อุปกรณ์รองรับเส้นใยไม่ปรากฏฝ้าขาวเกิดขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายไนลอน 6 มากสารละลายจะมีความหนืดมากขึ้น ทำให้สารละลายไนลอน 6 เกิดการตันอยู่ที่ปลายเข็มโลหะ ดังนั้นที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่ 20 cm ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV จะได้ค่าความเข้มข้นของสารละลายไนลอนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 15–25 wt. % ซึ่งสามารถฉีดเป็นเส้นใยได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงได้ จากนั้นนำเส้นใยที่ฉีดได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงที่ค่าความเข้มข้น 15–25 wt. % ไปวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

#### 4.3 ผลของการเตรียมเส้นใยนาโนผสมไนลอน 6/ไคโตซาน

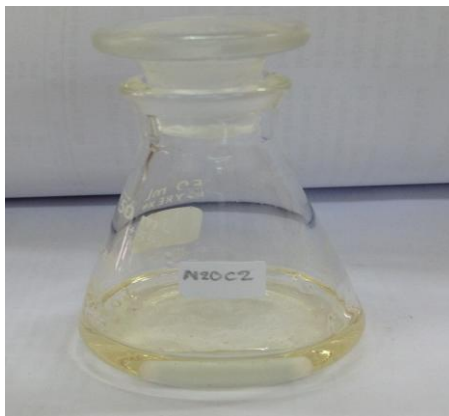
ในการทดลองศึกษาอัตราส่วนผสมระหว่างไนลอน 6/ไคโตซาน โดยการเติมไคโตซานลงไปไนลอน 6 ที่ความเข้มข้น 20 wt.% พบว่าสีของสารละลายไนลอน 6 จะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองใสและมีสีเข้มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.1 ความหนืดของสารละลายผสมไนลอน 6/ไคโตซานเพิ่มมากขึ้นทำให้ไคโตซานละลายได้ช้าลง เมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มขึ้น ที่อัตราส่วนระหว่างไนลอน 6/ไคโตซาน เป็น 20:5 (25 wt.%) พบว่าสารละลายผสมไนลอน 6 มีความหนืดมากจนรวมเป็นก้อน และไคโตซานละลายไม่หมด จึงต้องทำการเพิ่มสารละลายกรดฟอร์มิกเพิ่มเพื่อให้ไคโตซานละลายหมดเป็นเนื้อเดียวกันและมีความหนืดที่เหมาะสมในการฉีดเป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง จากนั้นนำสารละลายที่เตรียมได้ไปฉีดเป็นเส้นใย พบว่าที่อัตราส่วนระหว่างไนลอน 6/ไคโตซานที่ 20:1 (5 wt.% ไคโตซาน), 20:2 (10 wt.% ไคโตซาน) และ 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน) บนอุปกรณ์รองรับเส้นใยจะปรากฏฝ้าขาวแห่งกระจายอยู่เต็มพื้นที่ของอุปกรณ์รองรับเส้นใย แต่ที่อัตราส่วน 20:4 (20 wt.% ไคโตซาน) และ 20:5 (25 wt.% ไคโตซาน) สารละลายผสมไนลอน 6/ไคโตซานมีความหนืดมากทำให้หัวเข็มโลหะตันและฉีดเส้นใยออกมาได้น้อยและใช้เวลาในการฉีดนานมากกว่าที่อัตราส่วน 20:1 (5 wt.% ไคโตซาน), 20:2 (10 wt.% ไคโตซาน) และ 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน) ดังรูปที่ 4.2 จากนั้นนำเส้นใยที่ฉีดได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงที่อัตราส่วน 20:1 (5 wt.% ไคโตซาน), 20:2 (10 wt.% ไคโตซาน), 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน), 20:4 (20 wt.% ไคโตซาน) และ 20:5 (25 wt.% ไคโตซาน) ไปวิเคราะห์ขนาดและรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด



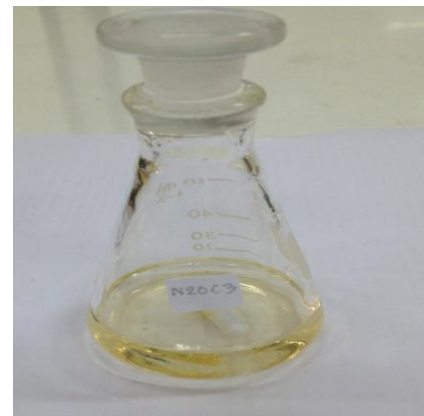
(ก) สารละลายไนลอน6



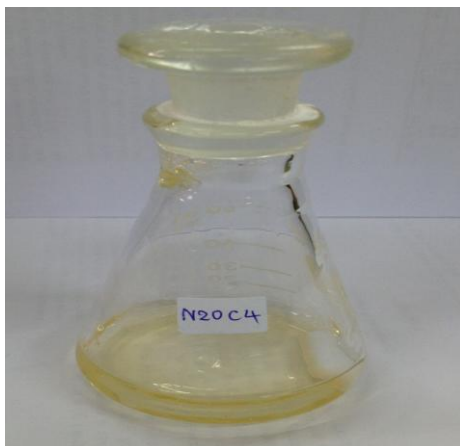
(ข) สารละลายผสมไนลอน6/ไคโตซาน  
20:1 (5%wt. ไคโตซาน)



(ค) สารละลายผสมไนลอน6/ไคโตซาน  
20:2 (10%wt. ไคโตซาน)



(ง) สารละลายผสมไนลอน6/ไคโตซาน  
20:3 (15%wt. ไคโตซาน)

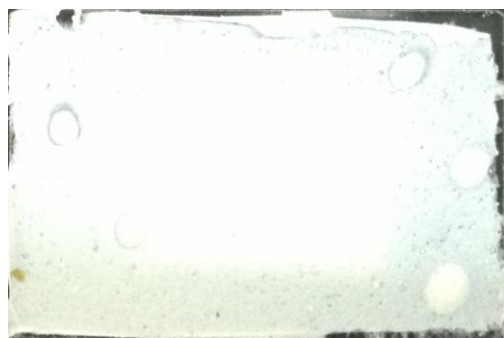


(จ) สารละลายผสมไนลอน6/ไคโตซาน  
20:4 (20%wt. ไคโตซาน)



(ฉ) สารละลายผสมไนลอน6/ไคโตซาน  
20:5 (25%wt. ไคโตซาน)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายของสารละลายผสมไนลอน6/ไคโตซาน ที่อัตราส่วนต่างๆ



(ก) 20:1 (5 wt.% โพลีเอทิลีน)



(ข) 20:2 (10 wt.% โพลีเอทิลีน)



(ค) 20:3 (15 wt.% โพลีเอทิลีน)



(ง) 20:4 (20 wt.% โพลีเอทิลีน)



(จ) 20:5 (25 wt.% โพลีเอทิลีน)

รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของเส้นใยไนลอน6/โพลีเอทิลีน ที่อัตราส่วนต่างๆ

#### 4.4 ผลของการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใย

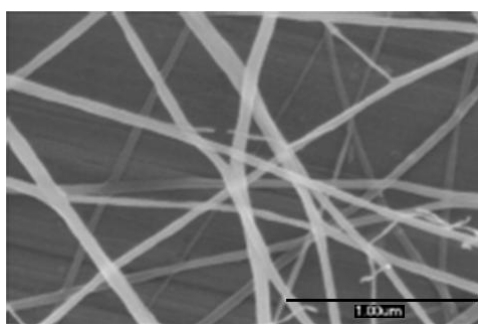
ในการศึกษาคุณลักษณะเฉพาะของเส้นใยไนลอน และเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/โคโตนานที่สังเคราะห์ได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่ง เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Field Emission Scanning Electron Microscope; FESEM), คุณสมบัติในการดูดซึมน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle measurement) และการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างไนลอน6/โคโตนานด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ ดังนี้

- **สัณฐานวิทยาของเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน**

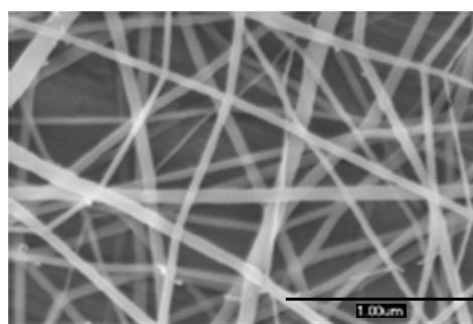
ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของเส้นใยที่ได้จากการฉีดด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิ่งพบว่าเส้นใยที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นที่เรียงพาดกันอย่างไม่เป็นระเบียบ (Nonwoven) และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปร่างของเส้นใยไนลอน6 ดังนี้

##### 1. ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า

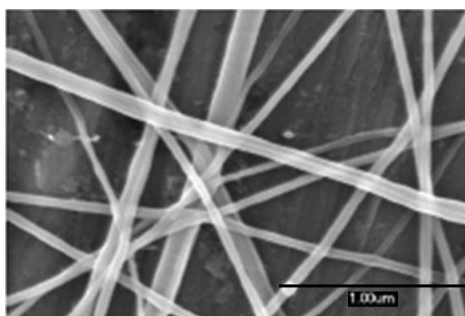
ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่ระบบจะทำให้สารละลายมีประจุล้อมรอบไว้ที่ผิวของสารละลาย เพื่อให้มีแรงทางไฟฟ้ามากกว่าแรงดึงผิวของสารละลายจะทำให้สารละลายเกิดการยืดออกไปยังอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่มีศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า ซึ่งความต่างศักย์ไฟฟ้าจะมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปร่างของเส้นใย แสดงดังรูปที่ 4.3



(ก) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 15 kV



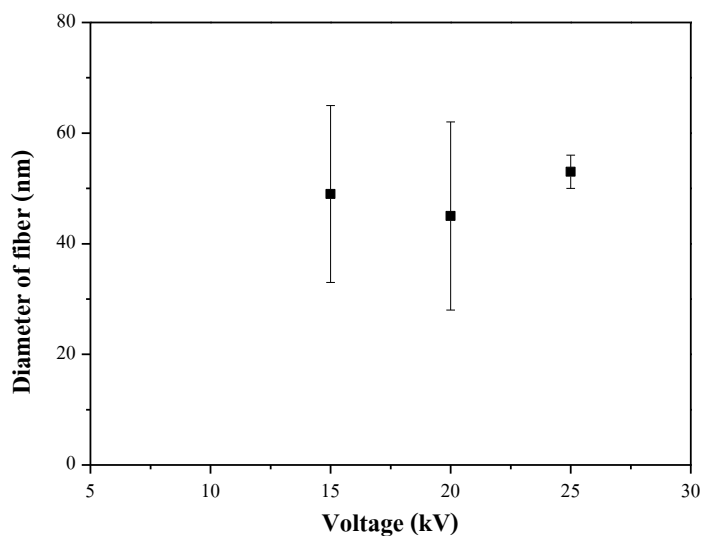
(ข) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 20 kV



(ค) ความต่างศักย์ไฟฟ้า 25 kV

รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย FESEM (สเกล 1  $\mu\text{m}$ ) ของเส้นใยไนลอน6 ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.4 พบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ 15–25 kV เส้นใยไพลอน 6 จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่เรียบและพาดเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งลักษณะของเส้นใยไพลอน 6 จะมีลักษณะไม่แตกต่างกันมาก จากนั้นนำภาพถ่าย FESEM ของเส้นใยไพลอน 6 ที่ได้ไปวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไพลอน 6 ด้วยโปรแกรม Image pro เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดเส้นใยไพลอน 6 ที่ผลิตได้จากกระบวนการอิเล็กทรอนิกส์โทรสปีนนิ่ง ดังรูปที่ 4.4

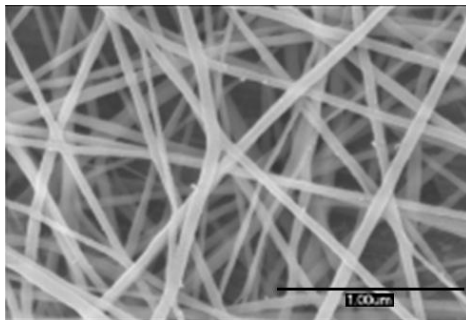


รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต่างศักย์ไฟฟ้ากับค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไพลอน 6

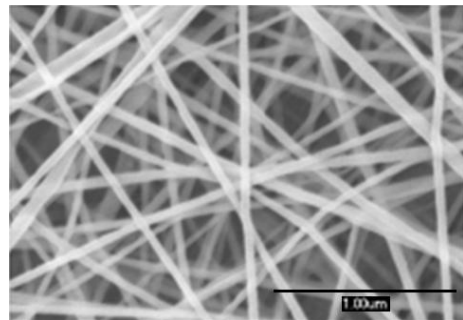
จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไพลอน 6 ผลิตได้จากภาพถ่าย FESEM ด้วยโปรแกรม Image pro พบว่า เมื่อค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีขนาดเล็กลงและมีความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมากขึ้น เนื่องจากค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น จะเกิดประจุไฟฟ้าที่ผิวของสารละลายไพลอน 6 มาก ทำให้เกิดแรงผลักรวมของประจุสูง จึงทำให้สารละลายไพลอน 6 สามารถยืดออกได้ยาวขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลงและสม่ำเสมอมากขึ้น จากการทดลองพบว่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เหมาะสมคือ 20 kV เพราะเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอที่สุด

### ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใย

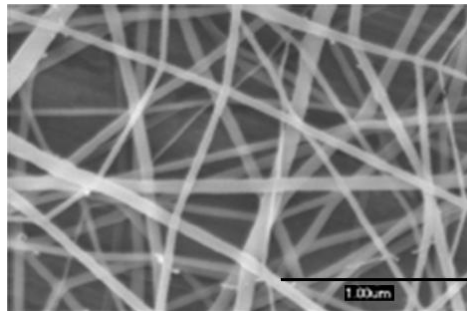
ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยคือระยะที่สารละลายสามารถที่จะยึดออกได้ ซึ่งระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยจะมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปร่างของเส้นใย แสดงดังรูปที่ 4.5



(ก) ระยะห่าง 10 cm



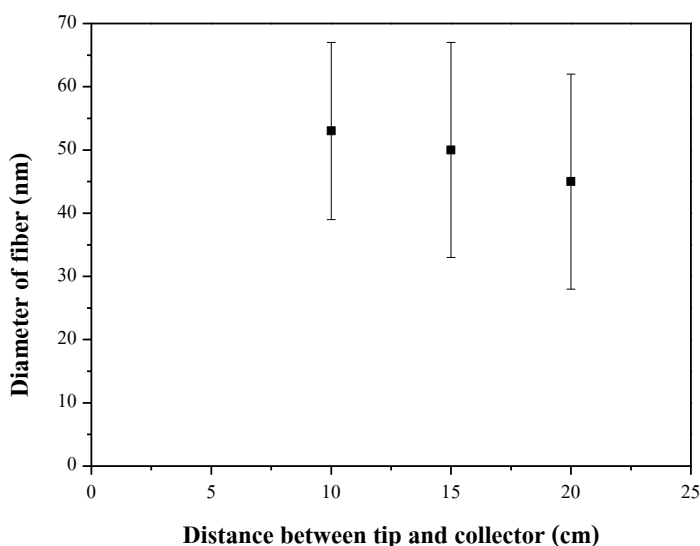
(ข) ระยะห่าง 15 cm



(ค) ระยะห่าง 20 cm

**รูปที่ 4.5** ภาพถ่าย FESEM (สเกล 1  $\mu\text{m}$ ) ของเส้นใยไนลอน6 ที่ระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะกับอุปกรณ์รองรับเส้นใยต่างๆ

จากรูปที่ 4.5 พบว่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับ เส้นใยไนลอน6 จะมีลักษณะเป็นทรงกระบอกที่เรียบและพาดเรียงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ ซึ่งลักษณะของเส้นใยไนลอน6 จะมีลักษณะเล็กลง จากนั้นนำภาพถ่าย FESEM ของเส้นใยไนลอน6 ที่ได้ไปวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน6 ด้วยโปรแกรม Image pro เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดเส้นใยไนลอน6 ที่ฉีดได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ดังรูปที่ 4.6

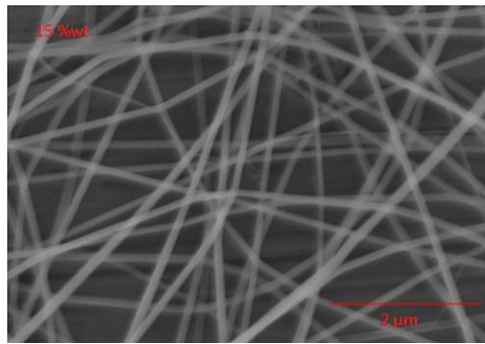


**รูปที่ 4.6** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยกับค่าเฉลี่ยของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6

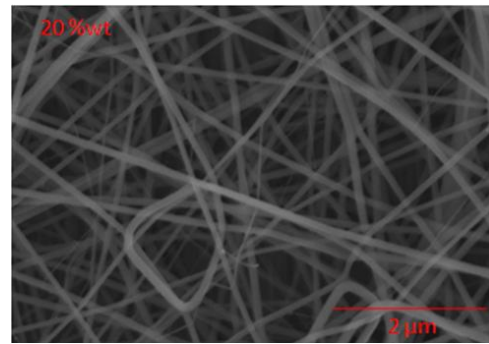
จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน 6 วัดได้จากภาพถ่าย FESEM ด้วยโปรแกรม Image pro พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีขนาดเล็กลงและมีความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมากขึ้น เนื่องจากระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้สารละลายในลอน 6 มีระยะในการยึดตัวออกมากขึ้นและตัวทำละลายจะระเหยออกไปได้มากขึ้น จึงทำให้สารละลายในลอน 6 สามารถยึดออกได้ยาวขึ้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลงและสม่ำเสมอมากขึ้น จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงอุปกรณ์รองรับเส้นใยที่เหมาะสมคือ 20 cm เพราะเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กและสม่ำเสมอที่สุด

## 2. ความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6

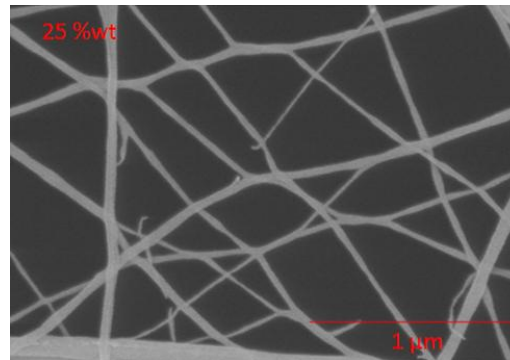
ความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 จะมีผลต่อความหนืดของสารละลายในลอน 6 ทำให้การยึดออกของเส้นใยได้เนื่องจากค่าความหนืดจะทำให้เกิดแรงดึงผิวของสารละลายเปลี่ยนไป ซึ่งความเข้มข้นของสารละลายในลอน 6 จะมีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและรูปร่างของเส้นใย แสดงดังรูปที่ 4.7



(ก) ความเข้มข้น 15 wt.%



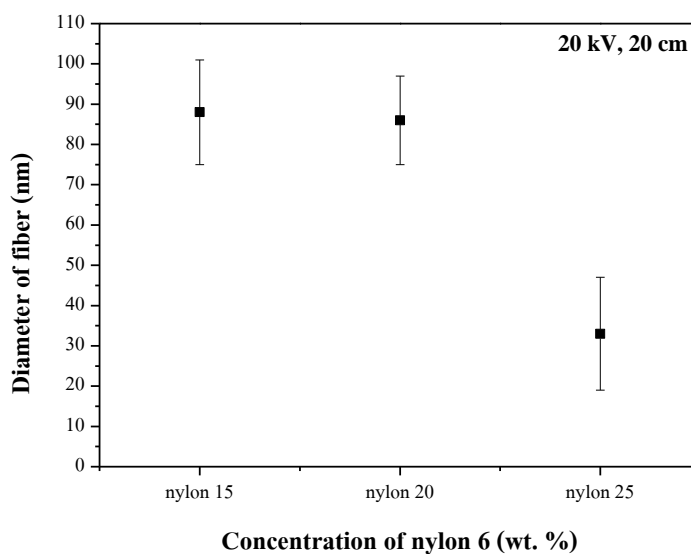
(ข) ความเข้มข้น 20 wt.%



(ค) ความเข้มข้น 25 wt.%

รูปที่ 4.7 ภาพถ่าย FESEM ของเส้นใยโพลอน 6 ที่ความเข้มข้นของสารละลาย

จากรูปที่ 4.7 พบว่าเส้นใยโพลอน 6 ที่สังเคราะห์ได้มีการเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายทั่วทั้งแผ่นตัวอย่าง และรูปร่างของเส้นใยจะมีลักษณะกลมเป็นทรงกระบอก ซึ่งจะมีลักษณะต่างกันเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเปลี่ยนไป เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นสารละลายจะมีความหนืดเพิ่มทำให้แรงตึงผิวของสารละลายมีมากด้วยเช่นกัน ดังนั้นเส้นใยที่ได้จะเกิดการบิดงอทำให้รูปร่างของเส้นใยเปลี่ยนจากทรงกระบอกเป็นแบบกึ่งได้ จากนั้นนำภาพถ่าย FESEM ของเส้นใยโพลอน 6 ที่ได้ไปวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยโพลอน 6 ด้วยโปรแกรม Image pro เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดเส้นใยโพลอน 6 ที่ผลิตได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ดังรูปที่ 4.8

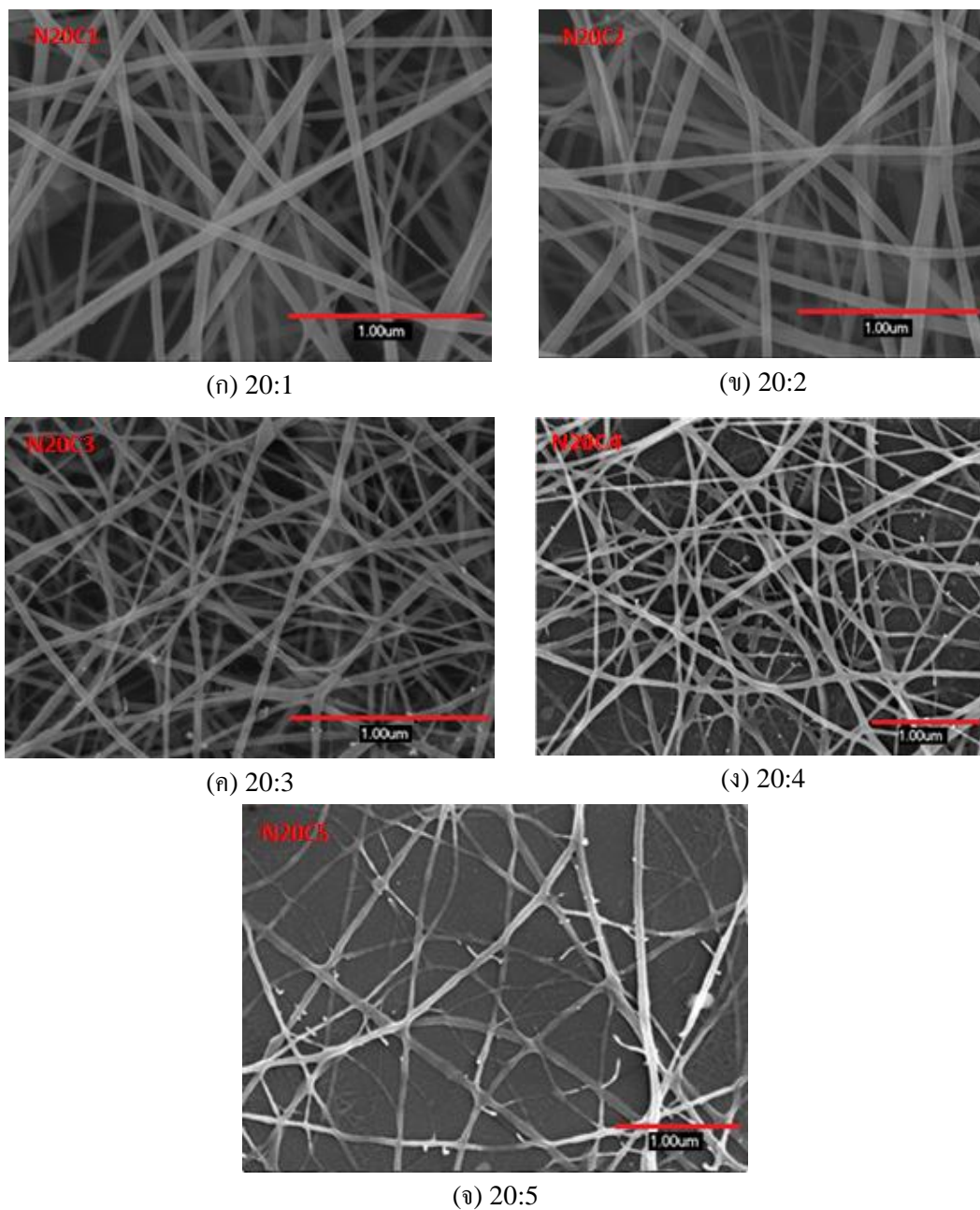


**รูปที่ 4.8** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายไนลอน6 กับค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน6 โดยเฉลี่ยที่สังเคราะห์ได้

จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยไนลอน6 วัดได้จากภาพถ่าย FESEM ด้วยโปรแกรม Image pro พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารละลายไนลอน6 เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีขนาดเล็กลงและมีความสม่ำเสมอของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเส้นใยมากขึ้น เนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายไนลอน6 ที่เพิ่มมากขึ้น ที่ปลายเข็มโลหะเกิดการอุดตันเนื่องจากสารละลายมีแรงตึงผิวมากกว่าแรงดึงทางไฟฟ้า ทำให้สารละลายเกิดการยืดออกได้น้อย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กลง จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นของสารละลายไนลอน6 ที่เหมาะสมคือ 20 wt.% เพราะเส้นใยที่ได้มีขนาดเล็กสม่ำเสมอและมีปริมาณเส้นใยมากที่สุด

### 3. อัตราส่วนระหว่างไนลอน6/ไคโตซาน

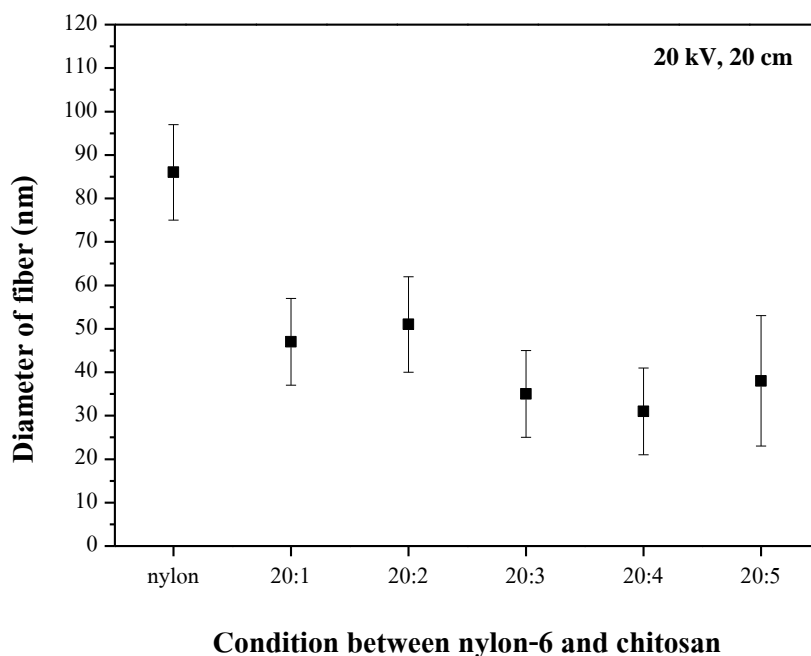
จากการทดลองปรับอัตราส่วนระหว่างไนลอน6/ไคโตซาน คือ 20:1 (5 wt.% ไคโตซาน), 20:2 (10 wt.% ไคโตซาน), 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน), 20:4 (20 wt.% ไคโตซาน) และ 20:5 (25 wt.% ไคโตซาน) ตามลำดับ ที่ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็น 20 kV และระยะห่างระหว่างปลายเข็มโลหะถึงฉากรองรับเส้นใยเป็น 20 cm เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการฉีดเส้นใยผสมของไนลอน6/ไคโตซานในการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับได้ ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย FESEM ของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานที่อัตราส่วนต่างๆ

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานที่สังเคราะห์ที่อัตราส่วนระหว่างไนลอน6/ไคโตซาน คือ 20:1 (5 wt.% ไคโตซาน), 20:2 (10 wt.% ไคโตซาน) และ 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน) ตามลำดับ มีการเรียงตัวกันอย่างไม่เป็นระเบียบกระจายทั่วทั้งแผ่นตัวอย่าง และรูปร่างของเส้นใยจะมีลักษณะกลมเป็นทรงกระบอก ซึ่งจะมีลักษณะต่างกันเมื่ออัตราส่วนของสารละลายเปลี่ยนไป เมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มมากขึ้นเป็น ) 20:4 (20 wt.% ไคโตซาน) และ 20:5 (25 wt.% ไคโตซาน) จะทำให้ความหนืดของสารละลายเพิ่มขึ้นทำให้แรงตึงผิวของสารละลายมีมาก

ด้วยเช่นกัน ดังนั้นเส้นใยที่ได้จะเกิดการฉีกขาด ทำให้รูปร่างของเส้นใยเปลี่ยนจากทรงกระบอกเป็นแบบกึ่งได้ จากนั้นนำภาพถ่าย FESEM ของเส้นใยในลอน6/ไคโตซาน ที่ได้ไปวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยในลอน6/ไคโตซาน ด้วยโปรแกรม Image pro เพื่อศึกษาการกระจายตัวของขนาดเส้นใยในลอน6/ไคโตซาน ที่ผลิตได้จากกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิง ดังรูปที่ 4.10

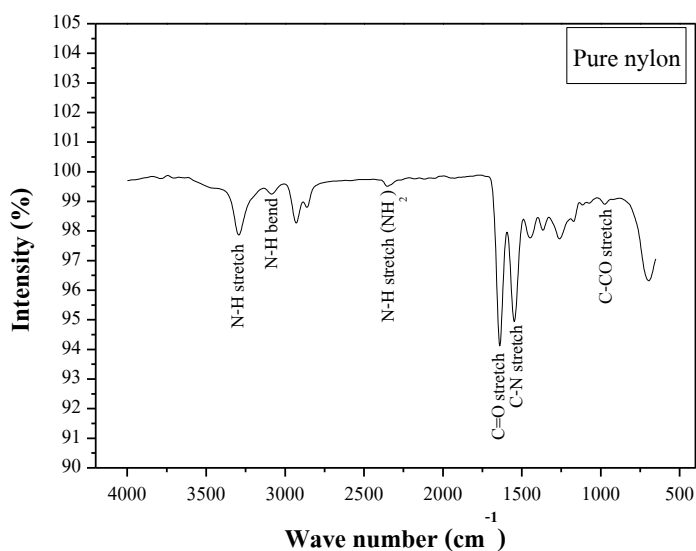


**รูปที่ 4.10** กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนผสมของสารละลายไนลอน6/ไคโตซานกับค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซาน โดยเฉลี่ยที่สังเคราะห์ได้

จากการวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซาน วัตถุประสงค์จากการถ่ายภาพ FESEM พบว่า เมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีขนาดเล็กลง เนื่องจากความหนืดของสารละลายที่เพิ่มมากขึ้นทำให้มีแรงดึงผิวของสารละลายมาก นอกจากนั้นแล้วไคโตซานมีความเป็นประจุ เมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มสารละลายจึงมีประจุที่ผิวของสารละลายมาก ทำให้สารละลายพุ่งและยึดออกไปยังอุปกรณ์รองรับเส้นใยอย่างรวดเร็ว ดังนั้นขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโดยเฉลี่ยของเส้นใยมีขนาดเล็กลง จากการทดลองพบว่าอัตราส่วนระหว่างไนลอน6/ไคโตซานที่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป คือ 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน) เพราะเส้นใยที่ได้นอกจากจะมีขนาดเล็กสม่ำเสมอแล้วยังมีปริมาณเส้นใยที่ผลิตออกมาได้มากที่สุด

- การมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างไนลอน6/ไคโตซานด้วยเครื่องอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์

ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของไคโตซานทำให้สามารถจับกับอะตอมของโลหะหนักได้ดี เนื่องจากไคโตซานและไนลอน6 จะมีสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของหมู่ฟังก์ชันองค์ประกอบอย่างชัดเจนเฉพาะตัว ไนลอน6 เป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากการหน่วยซ้ำๆของพอลิเอไมด์ (Poly amide) ซึ่งประกอบด้วยสายโซ่คาร์บอน (C) ที่มีจำนวนคาร์บอน 6 ตัว ดังนั้นสเปกตรัมการดูดกลืนที่จะพบคือหมู่ฟังก์ชันของเอไมด์ (Amide) ในการเตรียมเส้นใยไนลอน6 บนกระจกสไลด์ พบว่าจะลักษณะเป็นฝ้าขาวขุ่นบนเต็มพื้นที่ของกระจกจากนั้นนำไปทดสอบด้วยเครื่อง ATR-FTIR จะปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสง ดังรูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมที่แสดงคุณสมบัติของความเป็นไนลอน6 คือ การสั่นแบบยืดของพันธะไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H stretch) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $3290\text{ cm}^{-1}$  เอไมด์ I (Amide I) ซึ่งเป็นการสั่นแบบงอของพันธะไนโตรเจนกับไฮโดรเจน (N-H bend) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1640\text{ cm}^{-1}$  และเอไมด์ II (Amide II) ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของพันธะคาร์บอนกับไนโตรเจน (C-N stretch) ที่ตำแหน่งเลขคลื่น  $1540\text{ cm}^{-1}$  ข้อมูลในตารางที่ 4.4 แสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่ดูดกลืนคลื่นแสงของไนลอน6 [15]

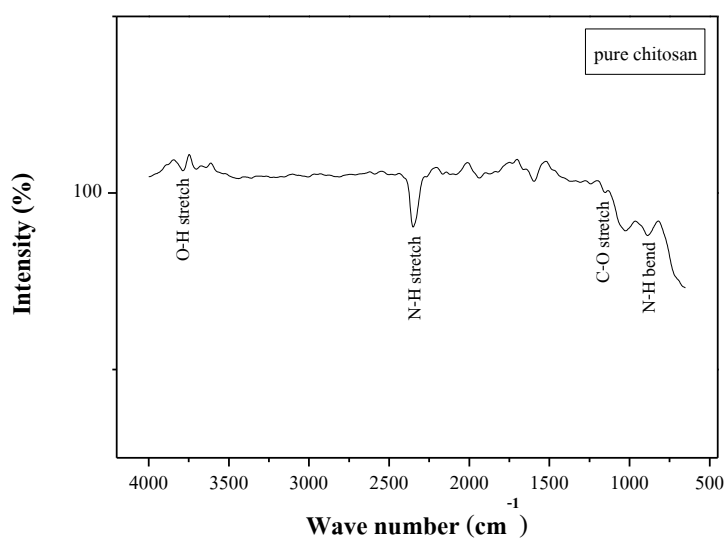


รูปที่ 4.11 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของเส้นใยไนลอน6

ตารางที่ 4.4 แสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่ดูดกลืนคลื่นแสงของไคโตซาน [21]

Wave number ( $\text{cm}^{-1}$ )	Tentative assignment
3300	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ N-H (N-H stretch)
3080	แสดงระนาบการสั่นแบบงอของพันธะ N-H (N-H bend)
1640	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ N-H (N-H bend) ของ amide I
1540	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-N (C-N stretch) ของ amide II
940	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-CO (C-CO stretch) ของ amide IV

ไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ประกอบด้วยหมู่อะมิโนหรือหมู่เอมีน ( $-\text{NH}_2$ ) และหมู่ไฮดรอกซิล ( $-\text{OH}$ ) ดังรูปที่ 4.12 สเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสงจึงปรากฏพีกของหมู่ฟังก์ชันเอมีนที่เลขคลื่น  $2350 \text{ cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นการสั่นแบบยืดของพันธะไนโตรเจนและไฮโดรเจน ที่เลขคลื่นประมาณ  $600 \text{ cm}^{-1}$  ปรากฏพีกการสั่นแบบงอของพันธะไนโตรเจนและพันธะไฮโดรเจน ซึ่งข้อมูลในตารางที่ 4.5 แสดงข้อมูลทั่วไปของเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่ดูดกลืนคลื่นแสงของไคโตซาน [11] พบว่าข้อมูลจากสเปกตรัมที่ได้สอดคล้องกับข้อมูลในตารางซึ่งแสดงหมู่เอมีนอย่างชัดเจน ส่วนหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลที่เลขคลื่น  $3440 \text{ cm}^{-1}$  ไม่เด่นชัดนัก

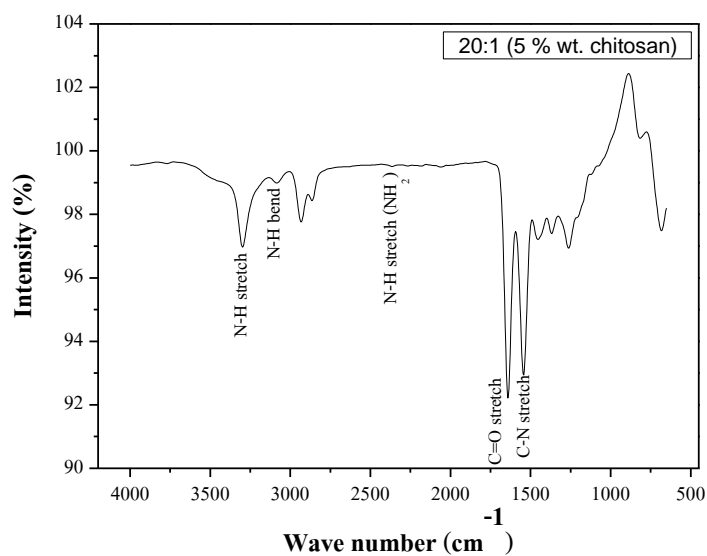


รูปที่ 4.12 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของไคโตซาน

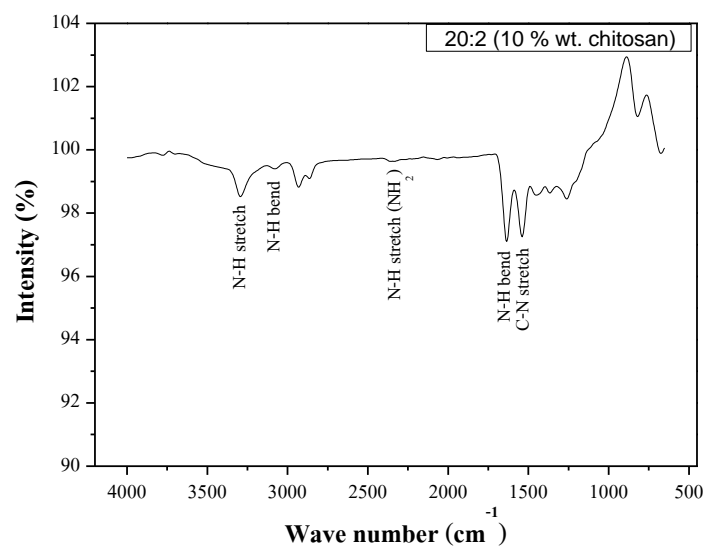
ตารางที่ 4.5 แสดงเลขคลื่นของหมู่ฟังก์ชันที่ดูดกลืนที่แสดงคุณสมบัติของไคโตซาน [21]

Wave number ( $\text{cm}^{-1}$ )	Tentative assignment
3440	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ O-H (O-H stretch) ของพันธะไฮโดรเจน (H bond)
2350	แสดงระนาบการสั่นแบบยืดของพันธะ N-H (N-H stretch) ของ amine II
1150	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O (C-O stretch) ของ carbinol
1025	แสดงการสั่นแบบยืดของพันธะ C-O (C-O stretch)
900-650	แสดงการสั่นแบบงอของพันธะ N-H (N-H bend) ของ $\text{NH}_2$

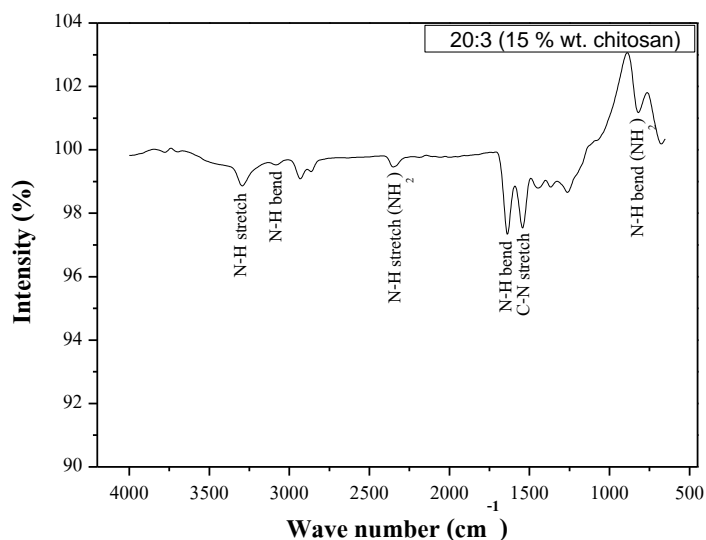
เนื่องจากความสามารถในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับหมู่อะมิโน ( $\text{NH}_2$ ) ซึ่งเกิดจากอัตราส่วนของไคโตซานที่เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซาน โดยอัตราส่วนระหว่างไนลอน6 กับไคโตซาน คือ 20:1 (5 wt.% ไคโตซาน), 20:2 (10 wt.% ไคโตซาน), 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน), 20:4 (20 wt.% ไคโตซาน) และ 20:5 (25 wt.% ไคโตซาน) ตามลำดับ จากนั้นนำเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR spectrometry เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ระหว่างไนลอน6/ไคโตซาน รูปที่ 4.13-4.15 แสดงสเปกตรัมของเส้นใยไนลอน6/ไคโตซาน สังเคราะห์ที่อัตราส่วนต่างๆกัน ซึ่งจะพบว่าเมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มขึ้นจาก 5 wt.%, 10 wt.% และ 15 wt.% ตามลำดับ ความเข้มของสเปกตรัมที่ตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR spectrometry พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงตรงกับที่พบในไนลอน6 คือที่เลขคลื่น 1545, 1643 และ  $3300 \text{ cm}^{-1}$  ตามลำดับ และปรากฏสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงตรงกับที่พบในไคโตซาน คือที่เลขคลื่น  $2350 \text{ cm}^{-1}$  จะพบว่ามีแนวโน้มของพีคสูงขึ้น เมื่อสัดส่วนของไคโตซานในเส้นใยผสมมีปริมาณมากขึ้น ส่วนที่เลขคลื่น  $650-900 \text{ cm}^{-1}$  พบสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงมีทิศทางตรงกันข้าม คาดว่าน่าจะเกิดจากความผิดพลาดของการวัด



รูปที่ 4.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานที่อัตราส่วนระหว่างไนลอน6 ต่อไคโตซาน คือ 20:1 (5 wt.% ของไคโตซาน)

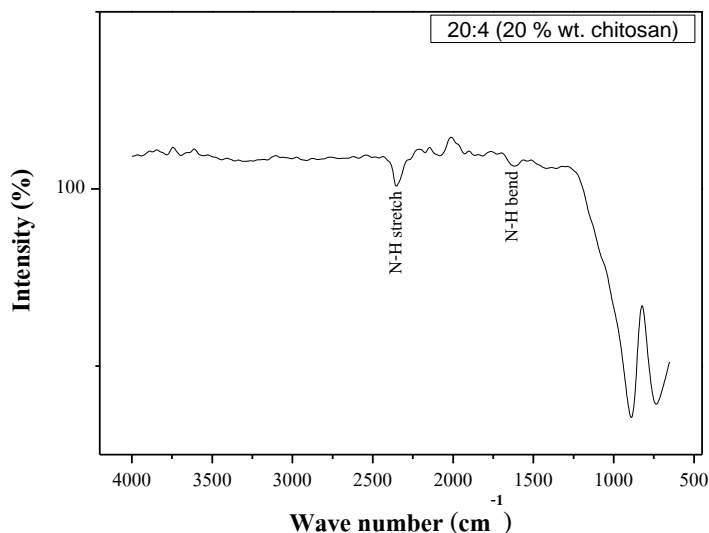


รูปที่ 4.14 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนคลื่นแสงของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานที่อัตราส่วนระหว่างไนลอน6 ต่อไคโตซาน คือ 20:2 (10 wt.% ของไคโตซาน)



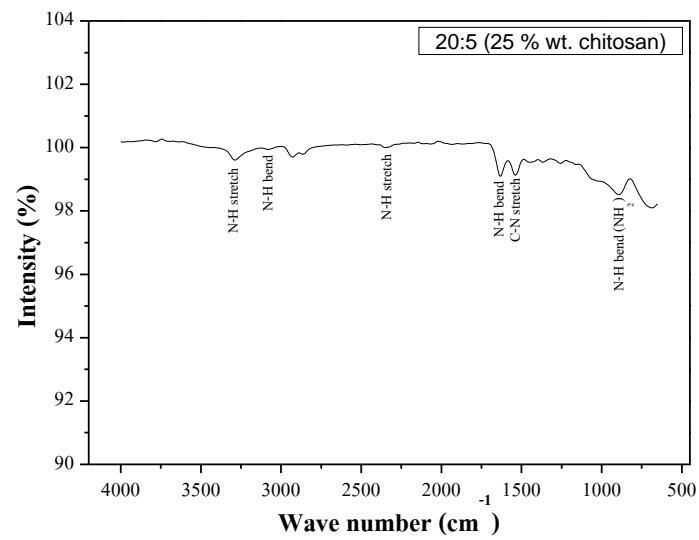
รูปที่ 4.15 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเส้นใยนาโนผสมไพลอน6/ไคโตซานที่อัตราส่วนระหว่างไพลอน6 ต่อไคโตซาน คือ 20:3 (15 wt.% ของไคโตซาน)

เมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเพิ่มขึ้นเป็น 20 wt.% โดยปริมาณของตัวทำละลายเท่าเดิม พบว่าสารละลายมีความหนืดมากแต่ยังสามารถสังเคราะห์เป็นเส้นใยได้ จากนั้นนำเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR spectrometry เพื่อตรวจสอบความเข้ากันได้ระหว่างไพลอน6/ไคโตซาน พบว่าสเปกตรัมที่ได้มีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของไคโตซาน เนื่องจากอัตราส่วนของไคโตซานที่เพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดของสารละลายมากขึ้น แต่สารละลายผสมของไพลอน6/ไคโตซานที่เตรียมได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ดังนั้นในขั้นตอนการสังเคราะห์เป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโตรสปินนิงจะทำให้สารละลายของไคโตซานซึ่งมีความเป็นประจุบวกยิ่งมากจะพุ่งไปยังอุปกรณ์รองรับเส้นใย เมื่อนำเส้นใยที่สังเคราะห์ได้ไปตรวจสอบด้วยเทคนิค FT-IR spectrometry จึงพบสเปกตรัมมีลักษณะคล้ายกับสเปกตรัมของไคโตซาน ดังรูปที่ 4.16



**รูปที่ 4.16** แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานที่อัตราส่วนระหว่างไนลอน6 ต่อไคโตซาน คือ 20:4 (20 wt.% ของไคโตซาน)

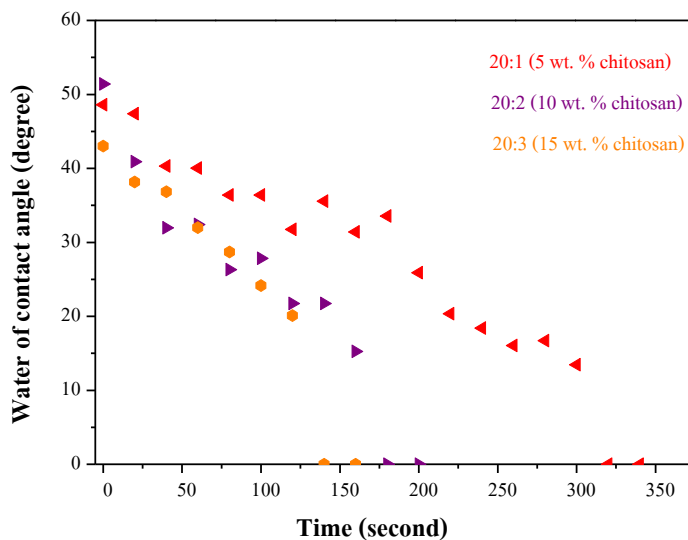
เมื่ออัตราส่วนของไคโตซานเป็น 25 wt.% พบว่าไคโตซานละลายไม่หมดในตัวทำละลาย 100 wt.% จึงทดลองทำการเพิ่มปริมาณของตัวทำละลายเป็น 14 wt.% เพื่อให้ไคโตซานละลายหมดและรวมเป็นเนื้อเดียวกับสารละลายไนลอน6 ที่มีความหนืดที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์เป็นเส้นใย โดยคาดว่า การเติมตัวทำละลายลงไปน่าจะมีผลต่อการสังเคราะห์เป็นเส้นใยไม่มากนัก เพราะคาดว่าเมื่อความหนืดพอเหมาะที่สามารถฉีดเป็นเส้นใยได้ ในขณะที่ฉีดเป็นเส้นใยตัวทำละลายน่าจะระเหยออกไปคงเหลือแต่ปริมาณของไนลอน6/ไคโตซาน (25 wt.%) คงเดิม จากผลการทดลอง พบว่ามีสเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสง ที่เลขคลื่น 1635 และ 1538  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่ปรากฏในไนลอน6 และ ที่เลขคลื่น 2350  $\text{cm}^{-1}$  ซึ่งเป็นสเปกตรัมที่ปรากฏในไคโตซาน แต่มีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงน้อย ดังรูปที่ 4.17 คาดว่าจะเกิดจากมีปริมาณของไนลอน6/ไคโตซานอยู่น้อย เนื่องจากในการฉีดเป็นเส้นใยไม่ได้ฉีดสารละลายผสมไนลอน6/ไคโตซานทั้งหมดที่เตรียม



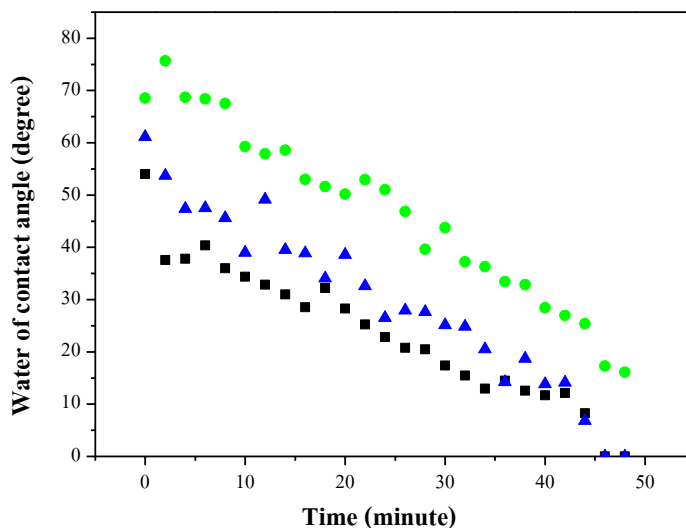
รูปที่ 4.17 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานที่อัตราส่วนระหว่างไนลอน6 ต่อไคโตซาน คือ 20:5 (25 wt.% ของไคโตซาน)

- คุณสมบัติในการดูดซึมน้ำด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle measurement)

เนื่องจากไคโตซานมีคุณสมบัติที่ไม่ละลายน้ำแต่ดูดซึมน้ำได้ดีและไนลอน 6 มีคุณสมบัติในการดูดซึมน้ำต่ำและต้านทานน้ำได้ดี จึงนำเส้นใยผสมที่สังเคราะห์ได้ทดสอบมุมสัมผัสของน้ำแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องวัดมุมสัมผัสของน้ำ จากการทดลองพบว่า เมื่อเริ่มหยดน้ำลงบนผิวของเส้นใยนาโนผสมไนลอน 6/ไคโตซาน มุมสัมผัสน้ำเริ่มต้นของที่อัตราส่วนผสมระหว่างไนลอน 6 กับไคโตซานที่ 5 wt.% - 15 wt.% ไคโตซาน จะมีมุมสัมผัสน้ำไม่ต่างกัน (มุมสัมผัสน้ำประมาณ  $45^{\circ}$ ) และลดลงอย่างต่อเนื่องเช่นกัน เมื่อเวลาผ่านไป 150 วินาที มุมสัมผัสน้ำแบนราบไปกับพื้นผิวของเส้นใยผสมไนลอน 6/ไคโตซาน (มุมสัมผัสน้ำเป็น  $0^{\circ}$ ) และพบว่าอัตราส่วนผสมของไคโตซานมาก (15 wt.% ไคโตซาน) สามารถดูดซึมน้ำได้เร็วกว่า ดังรูปที่ 4.18 เมื่ออัตราส่วนผสมของไคโตซานเป็น 20 wt. % - 25 wt.%. ไคโตซาน พบว่ามุมสัมผัสของน้ำเริ่มต้นไม่ต่างจากของอัตราส่วนผสม 5 wt.% - 15 wt.% ไคโตซาน (มุมสัมผัสน้ำประมาณ  $50^{\circ}$ ) และลดลงอย่างต่อเนื่องจนมุมสัมผัสน้ำแบนราบ (มุมสัมผัสน้ำเป็น  $0^{\circ}$ ) เมื่อเวลาผ่านไป 48 นาที ซึ่งไม่ต่างจากจากเส้นใยของไนลอน 6 (0 wt. % ไคโตซาน) ดังรูปที่ 4.19 จากการทดลองคาดว่าอัตราส่วนของไคโตซานที่เพิ่มมากขึ้นในขั้นตอนการเตรียมเส้นใยนาโนผสมไนลอน 6/ไคโตซานสารละลายจะมีความหนืดมากขึ้นสารละลายที่ได้ไม่เป็นเนื้อเดียวกันในการสังเคราะห์เป็นเส้นใยด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิงจึงได้ปริมาณเส้นใยน้อยทำให้มุมสัมผัสน้ำที่วัดได้มีค่ามาก



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสน้ำที่เวลาต่างๆของเส้นใยนาโนผสมของ ไนลอน6/ไคโตซาน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างไนลอน6 และไคโตซาน ดังนี้ (◀) 20:1 (5 wt.% ไคโตซาน), (▶) 20:2 (10 wt.% ไคโตซาน) และ (●) 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน) ตามลำดับ



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมสัมผัสน้ำที่เวลาต่างๆของเส้นใยนาโนผสมของ ไนลอน6/ไคโตซาน ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างไนลอน6 และไคโตซาน ดังนี้ (●) 20:0 (0 wt.% ไคโตซาน), (▲) 20:4 (20 wt.% ไคโตซาน) และ (■) 20:5 (25 wt.% ไคโตซาน) ตามลำดับ

#### 4.5 การศึกษาการดูดซับไอออนของโลหะทองแดง

การศึกษาการดูดซับของไอออนของโลหะทองแดง โดยใช้เส้นใยนาโนผสมของไนลอน6/ไคโตซาน ที่อัตราส่วนระหว่างไนลอน6/ไคโตซาน คือ 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน) ที่เตรียมได้ด้วยกระบวนการอิเล็กโทรสปินนิง โดยที่อุปกรณ์รองรับเส้นใยเป็นตาข่ายอะลูมิเนียมเพื่อง่ายต่อการขูดลอกเส้นใยออกจากอุปกรณ์รองรับหนัก 0.01xx g มาใช้เป็นตัวดูดซับ ดังรูปที่ 4.20 ใส่ในสารละลายไอออนของโลหะทองแดงที่เตรียมได้จากการปรับความเข้มข้นให้เหมาะสมกับเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าปริมาณของไอออนของโลหะทองแดง ที่ ปริมาตร 25 ml ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer และเครื่อง Atomic Absorption spectrometer



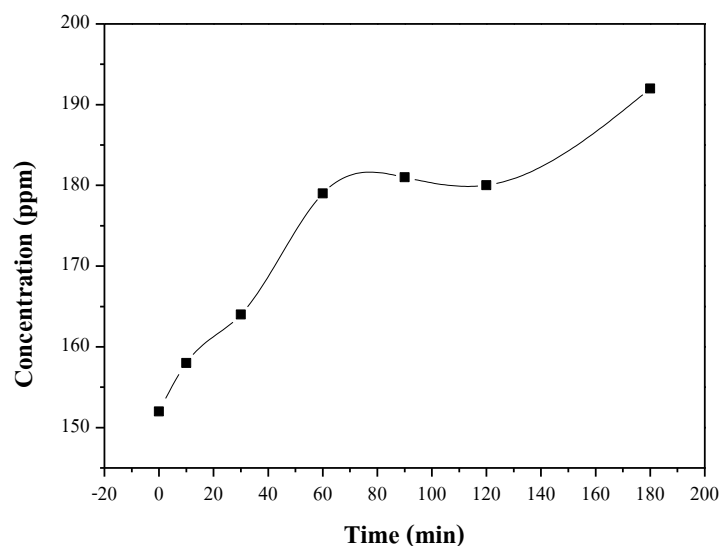
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซาน ที่อัตราส่วน 20:3 (15wt. ไคโตซาน) สำหรับเป็นวัสดุดูดซับ

- **UV-VIS spectrometer**

จากทดลองศึกษาข้อจำกัดของ UV-VIS spectrometer ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงมาตรฐาน ดังภาคผนวก ก โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายกับค่าการดูดกลืนแสง เพื่อใช้เป็นค่ามาตรฐานในการเปรียบเทียบค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปได้ จากการทดลองพบว่าค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงมาตรฐานที่ UV-VIS spectrometer สามารถวัดได้น้อยที่สุดคือ 100 ppm ดังนั้นในการทดลองจึงเลือกช่วงของความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงมาตรฐานที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 200 ppm

ในการทดลองการดูดซับของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซาน โดยเตรียมสารละลายไอออนของโลหะทองแดงที่ความเข้มข้น 200 ppm ปริมาตร 25 ml ซึ่งกวนด้วยเครื่องกวนสารแม่เหล็ก

และนำเส้นใยผสมไนลอน6/โคโตะซาน หนัก 0.01xx g ที่อยู่บนแผ่นกระจกสไลด์ ปิดภาชนะให้สนิท จากนั้นวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงหลังการดูดซับด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer โดยการดูดสารละลายไอออนของโลหะทองแดงขึ้นมาใส่อุปกรณ์บรรจุสารละลาย (Cuvette) ที่เวลา 10, 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ จะได้สเปกตรัมของการดูดกลืนคลื่นแสงหลังการดูดซับ ดังรูป ค.1 พบว่าเมื่อเวลาผ่านไปเพิ่มขึ้นแต่ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่ควรจะเป็นคือหลังการดูดซับที่เวลาเพิ่มขึ้นค่าการดูดกลืนคลื่นแสงควรที่จะลด เมื่อนำค่าการดูดกลืนคลื่นแสงไปเทียบกับกราฟมาตรฐานของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงมาตรฐานด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer เพื่อหาค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงที่เปลี่ยนไป จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงกับเวลานั้นๆ ดังรูปที่ 4.21 จากการทดลองพบว่าปริมาณของไอออนของโลหะทองแดงมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก คาดว่าน่าจะเกิดจากในการทดสอบไอออนของโลหะทองแดงมีปริมาณมากกว่าเส้นใยผสมไนลอน6/โคโตะซานที่ใช้ในการทดสอบ นอกจากนี้ยังพบว่าหลังการดูดซับค่าความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ซึ่งค่าที่ควรจะเป็นคือเมื่อเวลาผ่านไปหลังการดูดซับค่าความเข้มข้นจะต้องลดลง คาดว่าจากการทดลองอาจจะเกิดจากการระเหยของสารละลายในขณะที่เปิดภาชนะแล้วดูดสารละลายไปวัดด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer



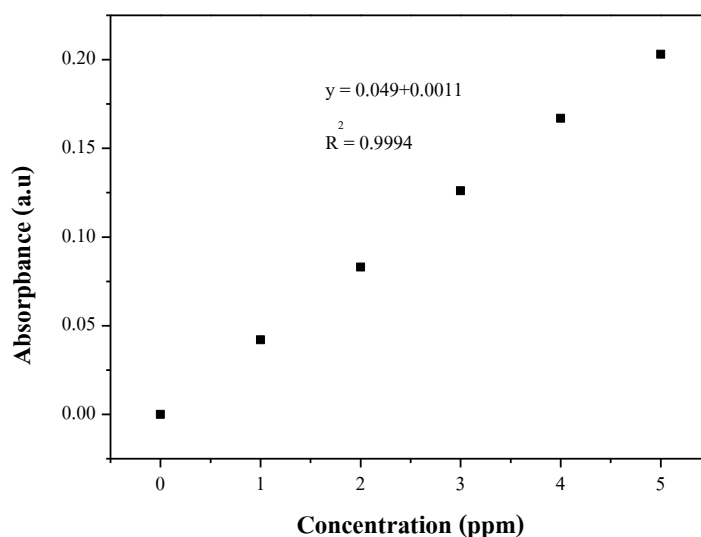
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหลังการดูดซับกับเวลา ด้วยเครื่อง UV-VIS spectrometer

- **Atomic Absorption spectrometer**

Atomic Absorption spectrometer เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ธาตุที่อาศัยการดูดกลืนคลื่นแสงเฉพาะ ในสารละลายไอออนของโลหะทองแดงจะมีค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ 324.8 nm โดยการปรับความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงเป็น 5, 4, 3, 2 และ 1 ppm วัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงจะได้ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง ดังตารางที่ 4.6 จากนั้นนำมาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนคลื่นแสงกับความเข้มข้นเพื่อใช้เป็นกราฟมาตรฐานในการทดลองหาค่าความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงไป ดังรูปที่ 4.22

**ตารางที่ 4.6** แสดงค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของไอออนโลหะทองแดงมาตรฐานกับความเข้มข้นที่วัดได้ด้วยเครื่อง Atomic Absorption spectrometer

ค่าความเข้มข้นของสารละลาย (ppm)	ค่าการดูดกลืนคลื่นแสง
0	0.000
1	0.042
2	0.083
3	0.126
4	0.167
5	0.203

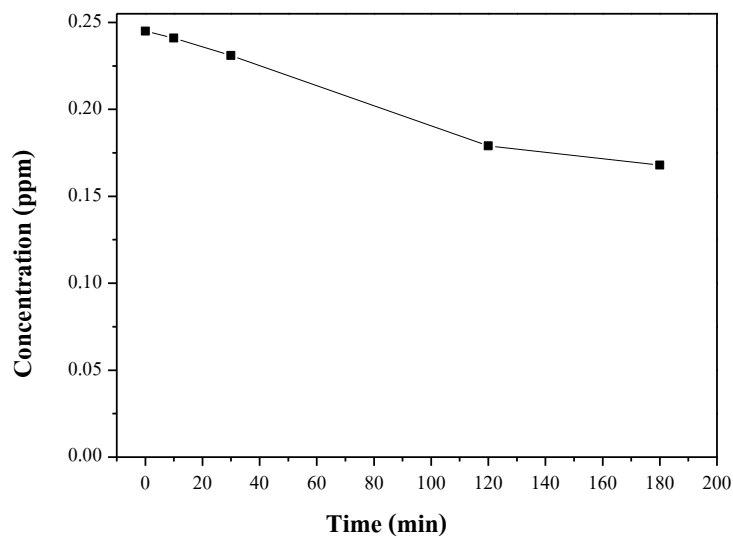


**รูปที่ 4.22** แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงกับค่าการดูดกลืนคลื่นแสงด้วย Atomic Absorption spectrometer

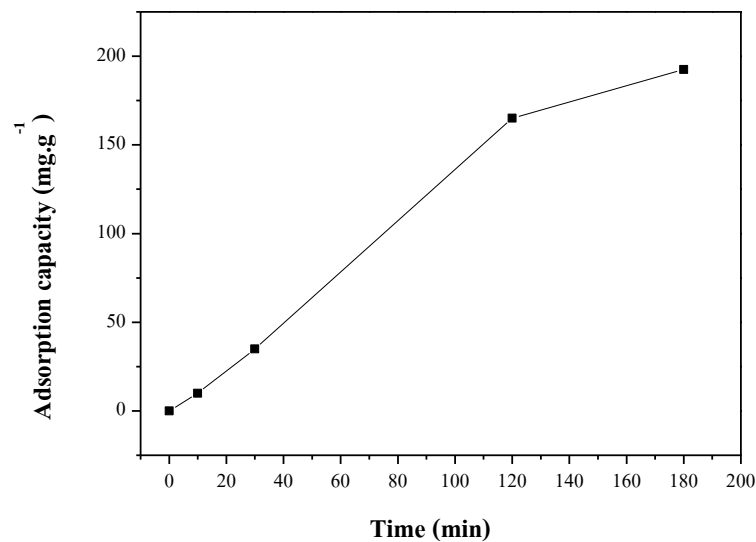
จากการทดลองในการดูดซับของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซาน ที่อัตราส่วน 20:3 (15 wt.% ไคโตซาน) ในสารละลายไอออนของโลหะทองแดงมาตรฐานที่เตรียมได้จากการปรับความเข้มข้นเป็น 4 ppm ค่า pH เท่ากับ 7.12 อุณหภูมิ 31.3 °C จำนวน 6 ใบ จากนั้นนำเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานหนัก 0.01xx g ใส่ไปในแต่ละบีกเกอร์ปิดภาชนะให้สนิท แล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารแม่เหล็กเป็นเวลา ที่เวลา 10, 30, 60, 120 และ 180 นาที ตามลำดับ จากนั้นใช้กระดาษกรองกรองเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานออก แล้วเก็บสารละลายตัวอย่างเพื่อนำไปวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงด้วยเครื่อง Atomic Absorption spectrometer จากการทดลองพบว่าที่หลังการทดสอบการดูดซับสีของเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานจะมีสีเป็นสีฟ้าและสีเข้มขึ้นเมื่อเวลาในการทดสอบการดูดซับเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสีติดอยู่บนเส้นใยนาโนผสมไนลอน6/ไคโตซานได้มาจากการสารละลายไอออนของโลหะทองแดงที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นนำค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงหลังการดูดซับที่ได้ไปคำนวณหาความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะทองแดงได้ ดังสมการที่ 2.1 จะได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7 จากนั้นนำค่าความเข้มข้นหลังการดูดซับมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นหลังการดูดซับกับเวลา ดังรูป 4.23

ตารางที่ 4.7 แสดงค่าความเข้มข้นของไอออนโลหะทองแดงมาตรฐานหลังการดูดซับที่วัดได้ด้วย  
เครื่อง Atomic Absorption spectrometer

เวลา (min)	ค่าความเข้มข้นที่เหลือ (ppm)	ค่าความสามารถในการดูดซับ ไอออนของโลหะทองแดง (mg/g)
0	0.245	0.000
10	0.241	10.00
30	0.231	35.00
120	0.179	165.0
180	0.168	192.5



รูปที่ 4.23 แสดงความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงที่เวลาต่างๆ ด้วย  
Atomic Absorption spectrometer



**รูปที่ 4.24** แสดงการเปลี่ยนแปลงค่าความสามารถในการดูดซับของสารละลายไอออนของ โลหะทองแดง ที่เวลาต่างๆด้วย Atomic Absorption spectrometer

จากรูปที่ 4.23 พบว่า ค่าการดูดกลืนคลื่นแสงของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงหลังการดูดซับลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นซึ่งค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงก็จะลดลงเนื่องจากเส้นใยนาผสมไนลอน6/โคซาน มีลักษณะโตพื้นผิวเป็นรูพรุนเกิดจากการพาดกันอย่างไม่มีระเบียบของเส้นใยเล็กๆจำนวนมาก ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเวลาในการดูดซับเพิ่มมากขึ้นค่าความเข้มข้นของสารละลายไอออนของโลหะทองแดงจึงลดลง ในช่วงเวลา 0-120 นาที และมีแนวโน้มจะเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ค่าความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะทองแดงมีค่าความจุเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเริ่มช้าลงซึ่งมีแนวโน้มเข้าสู่สมดุลเนื่องจากเส้นใยนาผสมไนลอน6/โคโคซานมีลักษณะเป็นโพรงทำให้ไอออนของโลหะทองแดงเคลื่อนที่เข้าหาเส้นใยนาผสมไนลอน6/โคโคซานซึ่งใช้วัสดุดูดซับ ซึ่งมีค่าความสามารถในการดูดซับ  $192.5 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$  และเริ่มเข้าสู่สมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที ดังรูปที่ 4.24