

โอกาสการได้รับสัมปตชีลเวอร์ทางผิวหนังจากผลิตภัณฑ์นาโนที่มีจำหน่ายในประเทศไทย



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

เมษายน 2555

โอกาสการได้รับสัมพัทธ์ซิลเวอร์ทางผิวหนังจากผลิตภัณฑ์นาโนที่มีจำหน่ายในประเทศไทย



ปริญญาานิพนธ์
ของ
นุจรินทร์ วะสุกัน

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

เมษายน 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โอกาสการได้รับสัมพัทธ์ซิลเวอร์ทางผิวหนังจากผลิตภัณฑ์นาโนที่มีจำหน่ายในประเทศไทย



เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

เมษายน 2555

POTENTIAL DERMAL EXPOSURE TO SILVER FROM NANOPRODUCTS SOLD IN THAILAND



Presented in Partial Fulfillment of the Requirement for the
Master of Science Degree in Chemistry
at Srinakharinwirot University
April 2012

Nootcharin Wasukan. (2011). *Potential dermal exposure to silver from nanoproducts sold in Thailand*. Master thesis. M.Sc. (Chemistry). Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee. Dr. Sujitra Srisung, Dr. Rawiwan Maniratanachote

Silver nanoproducts are now widely sold in Thailand, especially cosmetic and household products. However, the products do not label the amount of silver on their containers. Therefore, it is difficult to assess consumer's health risks since there are several reports on the adverse effects of silver on human. This research aims to investigate potential dermal exposure of silver contained in the nanoproducts which have application for the skin or possibility of skin contact. Silver nanoproducts used in this study were purchased from Thailand's market. All of them are labeled as "silver" and "nano" and were divided into three types: liquid, solid and semisolid. The products were determined their concentration of silver before and after the penetration through the skin model using a Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrophotometer. The results showed that the concentration of silver in the products are in the range of 0.0058 - 94 $\mu\text{g/g}$. The morphology of silver was characterized by using scanning electron microscopes equipped with energy-dispersive x-ray spectroscopy showed that silver nanoparticles are spherical-shaped small with a single particle and agglomerate in the range of 1-10 microns in size for liquid form of products. However, the characterization and the particle size of silver nanoproducts are still limited in other form. This may be due to either the blocking of impurities or the sample preparation method. In penetration study using Franz diffusion cell model, the amount of silver from the product and penetrated through artificial membrane depend on the amount of silver concentration and formulation in each product. The penetrated silver concentration is in the range 0.0023 to 50 $\mu\text{g/g}$ and the percent of silver penetration is in the range of 0.12 to 53 percent. The results obtained from this research can be useful information for silver containing nanoproducts and the potential dermal exposure to the skin which might affect consumer health. This study might be carried out as a part of research on risk assessment of nanotechnology products in Thailand.

ปริญญาานิพนธ์

เรื่อง

โอกาสการได้รับสัมผัสซิลเวอร์ทางผิวหนังจากผลิตภัณฑ์นาโนที่มีจำหน่ายในประเทศไทย

ของ

นุจรินทร์ วะสุกัน

ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....คนบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(รองศาสตราจารย์ ดร. สมชาย สันติวัฒนกุล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2555

คณะกรรมการควบคุมปริญญาานิพนธ์

คณะกรรมการสอบปากเปล่าปริญญาานิพนธ์

..... ประธาน

(ดร. สุจิตรา ศรีสังข์)

..... ประธาน

(รศ.ภญ.พ.ต.ท.หญิง ดร. สมทรง ลาวัณย์ประเสริฐ)

..... กรรมการ

(ภญ. ดร. รวีวรรณ มณีรัตน์โชติ)

..... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุนิตย์ สุขสำราญ)

..... กรรมการ

(ภญ. ดร. รวีวรรณ มณีรัตน์โชติ)

..... กรรมการ

(ดร. สุจิตรา ศรีสังข์)



งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุน

จาก

สถาบันบัณฑิตวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีไทย (TGIST)

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ

สัญญา์รับทุนเลขที่ TG-55-17-53-059M

ประจำปี 2553

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก จาก ดร. สุจิตรา ศรีสังข์ ประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ ท่านได้เสียสละเวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษา คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือในการดำเนินการวิจัยทุกขั้นตอน และ ภาญ. ดร. รวิวรรณ มณีรัตนโชติ คณะกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำปรึกษา และชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ ตลอดจนการแก้ปัญหาอันเกิดจากการดำเนินการวิจัยและการเขียนปริญญานิพนธ์นี้แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างดี อีกทั้งทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ ได้เรียนรู้และเห็นคุณค่าของงานวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบพระคุณ รศ. ภาญ. พ.ต.ท. หญิง ดร. สมทรง ลาวณิชย์ประเสริฐ ที่ให้ความกรุณาในการเป็นประธานในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุนิตย์ สุขสำราญ ที่ให้ความกรุณาเป็นกรรมการในการสอบปากเปล่าปริญญานิพนธ์ ตลอดจนให้คำแนะนำและชี้แนะข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และขอขอบพระคุณคณาจารย์ภาควิชาเคมีทุกท่านที่ได้ถ่ายทอดความรู้และให้ความเมตตาเอาใจใส่ ให้ความช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยด้วยดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) อุทยานวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัยในโครงการทุน (TGIST) ประจำปี 2553 และขอขอบคุณห้องปฏิบัติการความปลอดภัยทางนาโนเทคโนโลยี ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ รวมทั้งภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่คอยให้การสนับสนุน ทางด้านอุปกรณ์เครื่องมือ และสถานที่ ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเคมี ที่ให้ความช่วยเหลือ แนะนำ และอำนวยความสะดวกแก่ผู้วิจัยตลอดการศึกษาและทำวิจัย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความกรุณาและขอขอบพระคุณทุกๆ ท่านไว้ ณ โอกาสนี้

คุณค่าและประโยชน์ของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณต่อครอบครัว “วะสุกัน” ที่มอบความรัก คอยเอาใจใส่ และสนับสนุนในทุกๆด้าน ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในครั้งนี้

นุจรินทร์ วะสุกัน

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
ความสำคัญของการวิจัย.....	3
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
หลักการของเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี.....	5
ระบบเมมเบรนของผิวหนัง.....	12
โพลีเอเทอร์ซิลิโคน เมมเบรน.....	13
ซิลเวอร์.....	15
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3 วิธีดำเนินการวิจัย	35
อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	35
การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์.....	36
ศึกษาการซึมผ่านของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ผ่านระบบเมมเบรน ของผิวหนัง.....	47
ศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์.....	48

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการวิจัย.....	49
การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์.....	49
ศึกษาการซึมผ่านของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ผ่านระบบเมมเบรนของ ผิวหนัง.....	53
ศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์.....	60
5 สรุปผล อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	62
บรรณานุกรม.....	64
อภิธานศัพท์.....	71



บัญชีตาราง

ตาราง		หน้า
1	การเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Flame atomization (FA) กับ Graphite furnace atomization (GFA).....	10
2	การกำหนดสภาวะของเครื่อง.....	11
3	การกำหนดโปรแกรมเวลา/อุณหภูมิ (Furnace Time/ Temp. Program) ของเครื่อง.....	11
4	ปริมาณซิลเวอร์ในน้ำทิ้ง.....	26
5	แหล่งที่ได้มา และลักษณะเนื้อสารของผลิตภัณฑ์ประเภทของเหลว (Liquid; L ₁ - L ₇).....	37
6	แหล่งที่ได้มา และลักษณะเนื้อสารของผลิตภัณฑ์ประเภทของแข็ง (Solid; S ₁ - S ₅).....	38
7	แหล่งที่ได้มา และลักษณะเนื้อสารของผลิตภัณฑ์ประเภทกึ่งของแข็ง (Semisolid; G ₁ - G ₇).....	39
8	แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์ประเภทของเหลว (Liquid; L ₁ - L ₇).....	50
9	แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์ประเภทของแข็ง (Solid; S ₁ - S ₅).....	51
10	แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์ประเภทกึ่งของแข็ง (Semisolid; G ₁ - G ₇).....	52
11	แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิดเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรนสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทของเหลว (Liquid; L ₁ - L ₇).....	53
12	แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิดเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรนสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทของแข็ง (Solid; S ₁ - S ₅).....	54
13	แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิดเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรนสำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทกึ่งของแข็ง (Semisolid; G ₁ -G ₇).....	55

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 กระบวนการเกิดอะตอมอิสระในเปลวไฟ.....	6
2 องค์ประกอบของเครื่องกราไฟต์เฟอโรนอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์.....	8
3 ฟรอนต์ดิฟฟิวชันเซลล์.....	12
4 โครงสร้างโพสิทีเทอร์ซิลโฟน.....	13
5 ผงซิลเวอร์ออกไซด์.....	17
6 ผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโน.....	19
7 วัฏจักรของการปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโน.....	20
8 การสะสมของอนุภาคนาโนในระบบทางเดินหายใจ.....	22
9 ผลกระทบของ Trojan horse effect.....	23
10 อาริใจเรีย.....	23
11 วงจรของร่างกายมนุษย์ที่มีวิถีทางของการได้รับสัมผัสกับอนุภาคนาโน.....	25
12 ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM-EDX.....	26
13 ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากสิ่งทอที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM.....	28
14 ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนของน้ำทิ้งจากเครื่องซักผ้าวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM.....	29
15 ลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในสารละลาย Donor phase.....	33
16 อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ซึมผ่านชั้นผิวหนัง Stratum corneum.....	33
17 ขั้นตอนการย่อยแบบวิธีการย่อยด้วยกรด.....	43
18 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเตรตกับค่าการดูดกลืนแสง.....	46
19 กราฟระหว่างปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลวกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน.....	56

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ		หน้า
20	กราฟระหว่างปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็งกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน.....	57
21	กราฟระหว่างปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็งกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน.....	57
22	กราฟระหว่างปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งหมดกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน.....	58
23	กราฟระหว่างรูปแบบของผลิตภัณฑ์กับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน.....	59



บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปัจจุบันความตื่นตัวทางด้านนาโนเทคโนโลยี (Nanotechnology) เกิดขึ้นทั่วโลกรวมทั้งประเทศไทย ทำให้เกิดการพัฒนางานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ ตลอดจนการจดสิทธิบัตร ที่เกี่ยวข้องกับ การพัฒนาวัสดุอุปกรณ์โดยอาศัยนาโนเทคโนโลยีอย่างกว้างขวาง เพื่อให้สามารถใช้งานได้สะดวก รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น สินค้าและผลิตภัณฑ์ในชีวิตประจำวันที่มีการใช้อย่าง แพร่หลาย ได้แก่ เครื่องปรับอากาศ ตู้เย็น เครื่องซักผ้า เสื้อผ้า สิ่งทอ เครื่องสำอาง แผ่นกระเบื้อง เซรามิกปูพื้น/ผนัง แก้ว สีทาบ้าน ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ได้ถูกปรับปรุงคุณสมบัติให้ดีขึ้นโดยการเคลือบหรือ ผสมด้วยอนุภาคนาโนเพื่อวัตถุประสงค์ในการเพิ่มคุณสมบัติการทำความสะอาดหรือฆ่าเชื้อโรคได้ เมื่อ ของเหลวหรืออากาศที่มีมลพิษและจุลินทรีย์ไหลผ่านหรือสัมผัสกับพื้นผิวของส่วนประกอบพิเศษนั้น (สวรค์ จิตไคร์ครวญ. 2552: 21-24)

ในบรรดานาโนเทคโนโลยีที่มีการเติบโตอย่างรวดเร็วด้วยการผลิตและใช้ประโยชน์อย่าง หลากหลายของผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์นั้น อนุภาคซิลเวอร์นาโน (Silver nanoparticles) ได้นำมาใช้ ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เสื้อผ้า อาหาร สี เครื่องสำอางและอุปกรณ์ทางการแพทย์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ ที่ได้จากอุตสาหกรรมเหล่านี้ได้เข้ามามีบทบาทสำคัญต่อชีวิตมนุษย์อย่างกว้างขวาง โดยปัจจุบัน ผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนมีจำนวนมากและมีความหลากหลายในท้องตลาดเมืองไทย โดยเฉพาะ ผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือน เนื่องจากการใช้อนุภาคซิลเวอร์นาโนมี ส่วนช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์ในการกำจัดกลิ่นและยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย อย่างไรก็ตาม ผลิตภัณฑ์ที่ขายตามท้องตลาดมักไม่ระบุปริมาณของซิลเวอร์นาโนจึงเป็นการยากที่จะประเมินการ ได้รับสัมผัส และความเสี่ยงต่อสุขภาพของผู้บริโภคจากการใช้ผลิตภัณฑ์นั้น ๆ การได้รับสัมผัสแม้ใน ปริมาณน้อยแต่เป็นระยะเวลาอันยาวนาน อาจมีผลกระทบต่อสุขภาพได้ ดังนั้นการศึกษาหา ปริมาณอนุภาคนาโนในผลิตภัณฑ์ โดยเฉพาะที่เป็นอนุภาคของโลหะ รวมถึงโอกาสที่ผู้บริโภคจะได้รับ สัมผัสจึงเป็นสิ่งจำเป็น

การผลิตและพัฒนาทางด้านนาโนเทคโนโลยีเพิ่มมากขึ้น มนุษย์เราจึงมีโอกาสได้รับหรือสัมผัส กับอนุภาคนาโน (Nanoparticle) เหล่านี้ทั้งทางตรงและทางอ้อมจึงมากขึ้นตามไปด้วย ผลกระทบของ การปลดปล่อยอนุภาคนาโนจากกระบวนการวิจัย พัฒนา และกระบวนการผลิต ตลอดจนจาก ผลิตภัณฑ์ ซึ่งนำไปสู่การได้รับสัมผัสกับร่างกายมนุษย์และสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้อง

การศึกษาเช่นกัน ในปัจจุบันผู้บริโภคจึงต้องคำนึงถึงผลิตภัณฑ์ใกล้ตัวที่มีวัสดุนาโน (Nanomaterial) เป็นองค์ประกอบและถูกสัมผัสโดยตรง ขณะที่คนส่วนใหญ่อาจยังได้รับข้อมูล ด้านความเสี่ยงต่อสุขภาพของนาโนเทคโนโลยีจำนวนน้อย เนื่องจากการศึกษาผลต่อสุขภาพและผลทางด้านสิ่งแวดล้อม ยังมีไม่มากพอ

ตัวอย่างงานวิจัยด้านพิษวิทยา พบว่าหากอนุภาคนาโนเข้าสู่ร่างกาย เช่น จากการหายใจ การรับประทานหรือผ่านทางผิวหนัง อนุภาคเหล่านั้นก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสัตว์ทดลองได้ไม่ว่าจะเป็นความเป็นพิษต่อดับ ไต และม้าม เนื่องจากอนุภาคนาโนมีขนาดเล็กจึงเคลื่อนตัวไปตามกระแสเลือดสู่อวัยวะต่างๆในร่างกายได้ ประกอบกับมีรายงานว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถเข้าสู่เซลล์และเกิดความเป็นพิษต่อเซลล์หลายชนิดในหลอดทดลอง (Braydich-Stolle; et al. 2005: 412-419) ตามคู่มือขององค์การอนามัยโลก (WHO) รายงานว่าปริมาณซิลเวอร์ในน้ำดื่มที่ปลอดภัยต่อผู้บริโภค คือไม่เกิน 0.1 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ยังไม่มียังมีข้อมูลของซิลเวอร์สำหรับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น จากผลการวิจัยดังกล่าว จึงอาจกล่าวได้ว่าประเทศไทยอาจมีความเสี่ยงอย่างมากในการใช้ผลิตภัณฑ์จากนาโนเทคโนโลยีที่ถูกใช้อย่างแพร่หลาย และยังไม่มียังมีมาตรการในการควบคุมด้านความปลอดภัยให้กับผู้ที่เกี่ยวข้อง ขณะเดียวกันในต่างประเทศได้มีหลายหน่วยงานที่เร่งสร้างมาตรฐานความปลอดภัยของนาโนเทคโนโลยี ดังนั้นเพื่อความปลอดภัยในการใช้นาโนเทคโนโลยี การสร้างมาตรฐานความปลอดภัยในการใช้นาโนเทคโนโลยีในประเทศไทย จึงควรดำเนินไปพร้อมๆ กับการวิจัยด้านนาโนเทคโนโลยี

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนประเภทที่ใช้กับผิวหนังหรือมีโอกาสได้รับสัมผัสทางผิวหนัง โดยการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกราฟิฟเฟอโรนอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรเมตรี (Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry, GFAAS) รวมทั้งศึกษาการซึมผ่านทางผิวหนังของซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ดังกล่าวโดยใช้ระบบเมมเบรนของผิวหนัง เช่น ฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์ (Franz diffusion cell) ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นพื้นฐานของการหาปริมาณโลหะนาโนในผลิตภัณฑ์ต่างๆ และโอกาสเข้าสู่ร่างกายเมื่อได้รับสัมผัสทางผิวหนัง เพื่อนำไปสู่การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสัมผัส และการเกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภค นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางสำหรับการทดสอบด้านความปลอดภัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนของไทยต่อไป

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อหาปริมาณซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนรูปแบบที่ใช้กับผิวหนังหรือมีโอกาสได้รับสัมผัสทางผิวหนังที่มีจำหน่ายในประเทศไทย
2. เพื่อศึกษาโอกาสการซึมผ่านทางผิวหนังของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโน โดยการใช้ระบบเมมเบรนของผิวหนัง เช่น ฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์

ความสำคัญของการวิจัย

1. ได้ข้อมูลเกี่ยวกับปริมาณของโลหะซิลเวอร์ที่เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์นาโนที่ใช้กับผิวหนังหรือมีโอกาสได้รับสัมผัสทางผิวหนังที่มีจำหน่ายในประเทศไทย เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับหน่วยงานภาครัฐ และเอกชนที่สนใจในการนำไปใช้กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ต่อไป
2. กระบวนการในการศึกษานี้จะเป็นแนวทางในการตรวจสอบอนุภาคของโลหะที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์นาโนชนิดอื่น ๆ ได้
3. นำไปสู่การประเมินความเสี่ยงของการได้รับโอกาสสัมผัสทางผิวหนังของอนุภาคนาโนจากผลิตภัณฑ์ รวมทั้งการเกิดผลกระทบต่อสุขภาพของผู้บริโภค

ขอบเขตของการวิจัย

1. เลือกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนรูปแบบที่ใช้กับผิวหนังหรือมีโอกาสได้รับสัมผัสทางผิวหนัง โดยตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนที่นำมาศึกษาจะมาจากแหล่งจำหน่ายตามห้างสรรพสินค้าและทางอินเทอร์เน็ตในประเทศไทย และมีการระบุว่าเป็น “ซิลเวอร์” และ “นาโน” บนฉลาก ซึ่งจำแนกออกได้เป็นทั้งสามรูปแบบคือ ของเหลว (Liquid) มีจำนวน 7 ตัวอย่าง ของแข็ง (Solid) มีจำนวน 5 ตัวอย่าง และกึ่งของแข็ง (Semisolid) มีจำนวน 7 ตัวอย่าง
2. วิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์เริ่มต้นโดยใช้เทคนิคกราไฟต์เฟออร์เนซอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี
3. ศึกษาการซึมผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนังโดยใช้ระบบเมมเบรนของผิวหนัง เช่น ฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์
4. ศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์
2. ศึกษาการซึมผ่านของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง
3. ศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. หลักการของเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี
2. ระบบเมมเบรนของผิวหนัง
3. โพลีอีเทอร์ซัลโฟน เมมเบรน
4. ซิลเวอร์
5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. หลักการของเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี

เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปีเป็นเทคนิคการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุที่ได้รับ ความนิยมและใช้กันมากในปัจจุบัน เพราะเป็นเทคนิคที่ให้ความถูกต้องและความไวในการทดสอบสูง และใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆได้มากกว่า 60 ธาตุ (แมน อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2535: 322)

หลักการของอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี เป็นกระบวนการที่เกิดจากอะตอมอิสระ ของธาตุดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นเฉพาะ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของธาตุ ธาตุแต่ละชนิดจะมีระดับ พลังงานที่แตกต่างกัน จึงมีการดูดกลืนพลังงานที่แตกต่างกันด้วย เช่น อะตอมของซิลเวอร์ดูดกลืน แสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 328.1 นาโนเมตร อะตอมของปรอทดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 253.7 นาโนเมตร แสงที่ความยาวคลื่นดังกล่าวจะมีพลังงานพอดีที่จะทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมซิลเวอร์ และปรอทเกิดการเปลี่ยนสถานะจากสถานะพื้นไปสู่สถานะเร้า ในการทำให้อะตอมของธาตุใน สารประกอบเกิดเป็นอะตอมอิสระนั้นต้องใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานความร้อนจากเปลวไฟ หรือไฟฟ้า เป็นต้น

การวิเคราะห์หาปริมาณธาตุโดยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี จะอาศัย หลักการวัดปริมาณแสงที่ธาตุดูดกลืนเข้าไป เพื่อทำให้อะตอมอิสระที่อยู่ในสถานะพื้นขึ้นไปอยู่ใน สถานะเร้าซึ่งปริมาณแสงที่ดูดกลืนเข้าไปจะแปรตามความเข้มข้นของสาร

1.1 เทคนิคต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์วิธีอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี สามารถทำได้หลายวิธี คือ

1.1.1. Flame atomization technique ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยเปลวไฟ (Flame) ซึ่งกระบวนการเกิดแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน (ดังภาพประกอบ 1)

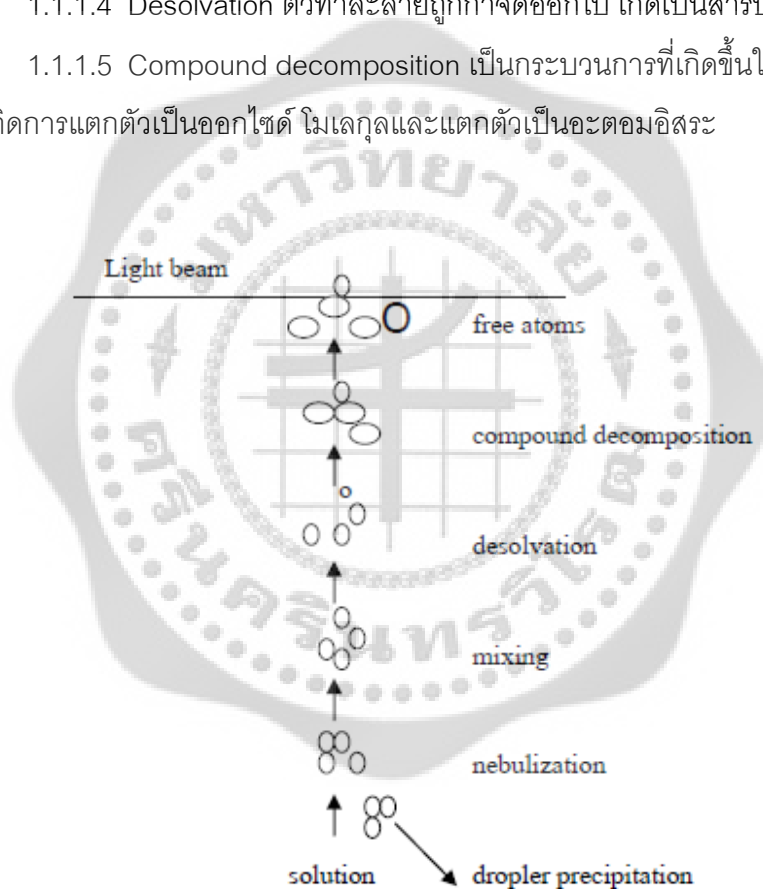
1.1.1.1 Nebulization เป็นการเปลี่ยนของเหลวให้เป็นละอองฝอยเล็กๆ

1.1.1.2 Droplet precipitation เป็นละอองเล็กๆรวมตัวกันแล้วไหลออกทางท่อน้ำทิ้ง

1.1.1.3 Mixing ละอองเล็กๆของสารละลายผสมกับก๊าซเชื้อเพลิง (Fuel) และออกซิแดนต์ (Oxidant) ในสเปรย์แชมเบอร์ (Spray chamber) ของเครื่องเนบิวไลเซอร์ (Nebulizer)

1.1.1.4 Desolvation ตัวทำละลายถูกกำจัดออกไป เกิดเป็นสารประกอบเล็กๆ

1.1.1.5 Compound decomposition เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นในเปลวไฟจะทำให้สารประกอบเกิดการแตกตัวเป็นออกไซด์ โมเลกุลและแตกตัวเป็นอะตอมอิสระ



ภาพประกอบ 1 กระบวนการเกิดอะตอมอิสระในเปลวไฟ

ที่มา: แม้น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2535: 333

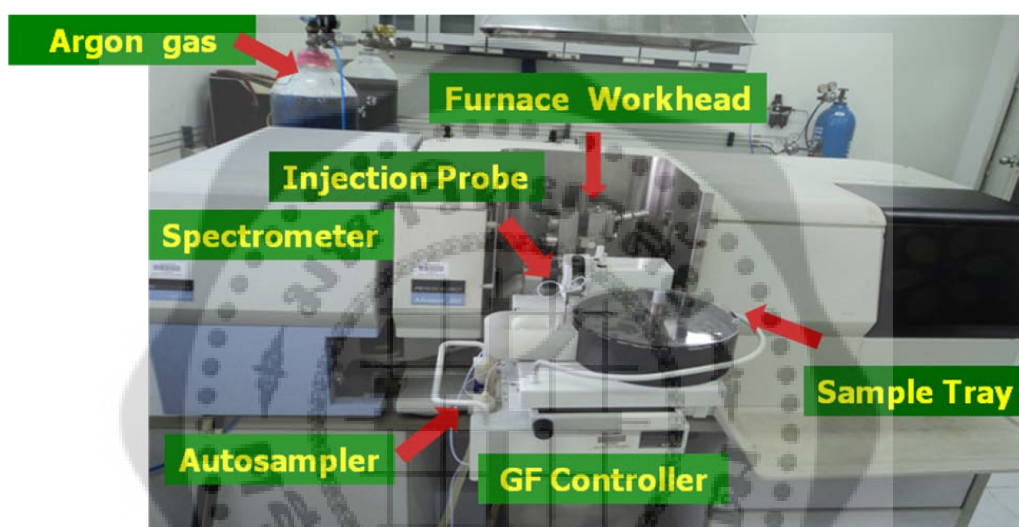
1.1.2. Flameless technique หรือ Non-flame atomization technique ทำให้ธาตุแตกตัวเป็นอะตอมอิสระด้วยความร้อนจากกระแสไฟฟ้า (Electrothermal atomizer หรือ Graphite furnace) โดยจะตั้งโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาของการเผาให้เหมาะสมสำหรับธาตุแต่ละชนิด ท่อกราฟไฟต์ที่ให้ความร้อนเข้าไปจะทำหน้าที่เป็นหน่วยสร้างอะตอมที่วางตัวอยู่ในแนวการเคลื่อนที่ของรังสี หยดละอองของสารตัวอย่างจะถูกบีบเปิดเข้าไปในท่อกราฟไฟต์ ซึ่งจะทำให้สารแห้งโดยการให้ความร้อนด้วยไฟฟ้า และทำให้กากที่เหลือกลายเป็นขี้เถ้า หลังจากขั้นตอนการให้ความร้อนด้วยอุณหภูมิสูงมากจากการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาของการเผาให้เหมาะสมสำหรับธาตุแต่ละชนิด แล้วธาตุที่ปรากฏในกากที่เหลือก็จะถูกทำให้แยกเป็นอะตอม ขณะที่รังสีจากหลอดที่ยังไม่ถูกดูดกลืนด้วยอะตอมในท่อกราฟไฟต์จะถูกวัดด้วยสภาพไวสูง ทำให้มีขอบเขตการตรวจวัดที่ต่ำมาก ส่งผลให้การวิเคราะห์แบบเตาเผากราฟไฟต์เป็นวิธีวิเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อย

สำหรับขั้นตอนการแตกตัวเป็นอะตอมเสรีด้วยความร้อนจากไฟฟ้า มีขั้นตอนหลัก ดังนี้

1. ขั้นตอนการอบแห้งของสารตัวอย่าง (Drying stage) เป็นขั้นตอนที่สารตัวอย่างจะค่อยๆ ถูกให้ความร้อนเพื่อระเหยตัวทำละลาย โดยใช้อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส
2. ขั้นตอนการเผาของสารตัวอย่าง (Ashing stage) เป็นขั้นตอนที่กำจัดสารอินทรีย์ (Organic) และสารอนินทรีย์ (Inorganic) โดยโมเลกุลของสารเหล่านี้จะแตกสลายออกไปเหลือแต่สารอนินทรีย์ที่เสถียรเท่านั้น โดยทั่วไปจะอยู่ในรูปของโลหะออกไซด์ (Metal oxide) อาจใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,500 องศาเซลเซียส
3. ขั้นตอนการเกิดอะตอมอิสระของสารตัวอย่าง (Atomization stage) เป็นขั้นตอนสุดท้ายที่สารที่เหลืออยู่ถูกเผาที่อุณหภูมิสูง อาจถึง 3,000 องศาเซลเซียส เพื่อให้สลายเป็นอะตอมเสรีเกิดขึ้นในช่องทางที่แสงผ่าน ซึ่งสามารถวัดสัญญาณของการดูดกลืนแสงได้ ออกมาเป็นความสูงของพีคโดยเป็นปฏิภาคกับปริมาณของธาตุในสารตัวอย่างนั้น

นอกจากนี้การวัดค่าแอมพลิจูดของธาตุในสารตัวอย่างโดยใช้เทคนิค Flameless atomization โดยมีองค์ประกอบของเครื่องกราฟไฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิคแอมพลิจูดสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (ดังภาพประกอบ 2) เป็นการวัดที่เรียกว่า วัดครั้งเดียว (Single measurement) คือ ใช้สารละลายที่มีปริมาตรแน่นอน (Fixed volume) ซึ่งอาจเป็น 20 μL หรือ 25 μL เป็นต้น ดังนั้นในการเลือกวิธีวิเคราะห์นี้จะต้องคำนึงถึงเรื่องของความถูกต้อง (Accuracy) และความแม่นยำ (Precision หรือ Reproducibility) เป็นอย่างมาก เพราะมีปัจจัยหลายอย่างที่อาจทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาดได้ง่าย เนื่องจากเป็นการวิเคราะห์ธาตุปริมาณน้อยมากๆ เทคนิคก็มีสภาพไวสูง ข้อควรคำนึงถึงมีดังต่อไปนี้

1. การใช้เครื่องจะต้องทำงานด้วยความระมัดระวัง
2. การเตรียมสารตัวอย่างไม่ควรให้สารตัวอย่างเกิดการปนเปื้อนในทุกขั้นตอน
3. รักษาความสะอาดในห้องปฏิบัติการที่ใช้ทำการวิเคราะห์
4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ ต้องรักษาความสะอาดอยู่เสมอ
5. สารเคมีที่ใช้ในขั้นตอนต่างๆ ควรบริสุทธิ์ เพื่อป้องกันความผิดพลาด
6. Read out system หรือการบันทึกข้อมูลจะต้องมีความไวพอที่จะวัดสัญญาณได้



ภาพประกอบ 2 องค์ประกอบของเครื่องกราฟิต์เฟอเรนซ์อะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

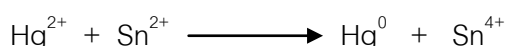
ที่มา: เครื่องกราฟิต์เฟอเรนซ์อะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์. (2554). (ภาพนิ่ง).

กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร.

1.1.3 Hydride generation technique การวิเคราะห์ธาตุบางชนิด เช่น สารหนู (Arsenic; As) และ ซีลีเนียม (Selenium; Se) โดยวิธีดูดกลืนคลื่นแสงแบบเปลวไฟจะมีขีดต่ำสุดที่สามารถตรวจวัดได้ (Detection limit) อยู่ในระดับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร (Parts per million; ppm) ซึ่งยังไม่ต่ำเพียงพอสำหรับการวิเคราะห์ธาตุเหล่านี้ในตัวอย่างสิ่งแวดล้อม เพราะธาตุเหล่านี้เมื่อมีในปริมาณน้อยก็สามารถเกิดพิษได้ ดังนั้นจึงพัฒนาวิธีการตรวจวัดให้มีสภาพไวสูงขึ้นโดยการทำให้สารที่สนใจกลายเป็นโลหะไฮไดรด์ (Hydride) ที่สามารถระเหยได้ ณ อุณหภูมิห้อง แล้วไล่ไอของโลหะไฮไดรด์ที่

เกิดขึ้นเข้าไปในหลอดที่วางอยู่บนเปลวไฟเมื่อให้ความร้อนไอของไฮโดรเจนจะสลายตัวเป็นอะตอมของโลหะ

1.1.4 Cold vapor technique เหมาะกับธาตุที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นไอได้ง่ายๆ เช่นปรอท (Mercury; Hg) หลักการของวิธีนี้คือไอออนของปรอทจะถูกรีดิวซ์ (Reduce) ด้วยสารละลายสแตนนัสคลอไรด์ (Stannous chloride ; SnCl₂) ซึ่ง Hg²⁺ จะถูกรีดิวซ์ให้เป็น Hg⁰ ดังสมการ



ไอปรอทที่เกิดขึ้นจะถูกก๊าซเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน (Nitrogen; N₂) ไต่เข้าไปในเซลล์ (Adsorption cell) แล้วเกิดการดูดกลืนคลื่นแสง การมีไอน้ำในเซลล์จะทำให้เกิดการกระเจิงแสง (Scattering of light) ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไม่ถูกต้อง ซึ่งแก้ไขได้โดยให้ไอปรอทผ่านสารดูดความชื้น ในปัจจุบันมีระบบ Circular mode ทำให้ไอปรอทหมุนเวียนอยู่ในระบบที่ทำการวัด หลังจากวัดเสร็จแล้วจึงไล่ไอปรอทออกไปในขวดที่ดักจับปรอท

1.2 การเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมในการวิเคราะห์

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรสโกปี นั้นอาจทำได้หลายวิธี แต่ละเทคนิคมีข้อดีข้อเสียและการใช้งานแตกต่างกัน ดังนั้นในการวิเคราะห์ต้องเลือกให้เหมาะสมกับความต้องการและวัตถุประสงค์ของการใช้งาน โดยคำนึงถึงองค์ประกอบหลายๆ อย่าง เช่น ความรวดเร็วของการวิเคราะห์ ความยากง่าย ความเข้มข้น สมบัติทางเคมีและทางกายภาพของสารที่จะวิเคราะห์ ตลอดจนทั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ ดังนั้นควรเลือกให้เหมาะสมกับความต้องการในการวิเคราะห์ สำหรับการเปรียบเทียบการวิเคราะห์ของเทคนิค Flame atomization (FA) กับเทคนิค Graphite furnace atomization (GFA) แสดงดังตาราง 1

ตาราง 1 แสดงการเปรียบเทียบเทคนิคการวิเคราะห์ด้วย Flame atomization (FA) กับ Graphite furnace atomization (GFA)

ข้อเปรียบเทียบ	FA	GFA
1. ความสามารถในการวิเคราะห์ธาตุได้	มากกว่า 67 ธาตุ	30 – 40 ธาตุ
2. ความถูกต้อง	สูง	สูง
3. ความแม่นยำ	1 % RSD	2 – 5 % RSD
4. ช่วงความเข้มข้นที่ใช้วิเคราะห์	ppb - %	ppb – 10 ³ ppm
5. การเตรียมสารตัวอย่าง	ค่อนข้างยุ่งยาก	ง่าย
6. วิธีทำการวิเคราะห์	ค่อนข้างยุ่งยาก	ง่าย
7. ความรวดเร็วในการวิเคราะห์	15 ตัวอย่าง/นาที	1 ตัวอย่าง/นาที
8. ความชำนาญของผู้ใช้เครื่อง	ปกติ	สูง
9. อุณหภูมิสูงสุด	2955 °C (N ₂ O/C ₂ H ₂)	ประมาณ 3000 °C
10. ประสิทธิภาพของการ Atomization	ประมาณ 10 %	ประมาณ 90 %
11. ลักษณะของสัญญาณที่วัด	เป็น Plateau	เป็น Peak
12. สภาพไว (sensitivity) หรือ Detection limit	ต่ำกว่า	สูงกว่า
13. Matrix effect	น้อยกว่า	มากกว่า

ที่มา: แม่น อมรสิทธิ์ และ อมร เพชรสม. 2535: 351

นอกจากนี้ยังได้มีผู้ศึกษาคิดค้นและพัฒนาวิธีการอื่นๆ เพื่อใช้ในการตรวจวิเคราะห์การปนเปื้อนของโลหะ อาทิ ปรอท นิกเกิล แคดเมียม ตะกั่วและซิลเวอร์ เป็นต้น สำหรับการวิเคราะห์ควรพิจารณาเลือกใช้เทคนิคที่เหมาะสมกับความต้องการและผลวิเคราะห์ที่ได้ถูกต้อง แม่นยำ ควรเตรียมความพร้อมทั้งทางด้าน การกำหนดสภาวะการใช้งานของเครื่องมือให้เหมาะสมกับธาตุแต่ละชนิด พบว่าวิจัยของ Yang และคณะ (Yang; et al. 2009: 44-49) ศึกษาการสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็งโดยมี MCI GEL CHP 20Y เป็นตัวดูดซับ และการตรวจวิเคราะห์หาปริมาณของโครเมียม, นิกเกิล, ซิลเวอร์, โคบอลต์, ทองแดง, แคดเมียมและตะกั่ว ด้วยเทคนิคกราฟไฟต์เฟอร์เนซอะตอมมิคแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี โดยมีการกำหนดสภาวะในการใช้งานของเครื่องมือให้เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ธาตุแต่ละชนิด จากผลการทดลองจึงพบว่ากระบวนการดังกล่าวนี้ถูกนำไปใช้ในการกำหนดสำหรับวิเคราะห์

ตัวอย่างทางชีวภาพในดินและน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพรวมทั้งสามารถเป็นข้อมูลอ้างอิงตามมาตรฐานได้

จากงานวิจัยของ Yang และคณะ ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ เทคนิคกราฟฟิตเฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี และกำหนดสภาวะของเครื่องโดยการเลือกหรือการตั้งโปรแกรมอุณหภูมิและเวลาของการเผาสำหรับวิเคราะห์ธาตุซิลเวอร์ (ดังตาราง 2 และ ตาราง 3) เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์ในสารตัวอย่าง

ตาราง 2 การกำหนดสภาวะของเครื่อง

Lamp settings wavelength (nm)	328.1 nm
Bandwidth	0.7 nm
Lamp current	15 mA
Sample volume	20 μ l
Measurement mode	Peak area

ตาราง 3 การกำหนดโปรแกรมเวลา/อุณหภูมิ (Furnace Time/ Temp. Program) ของเครื่อง

Step	Temp. ($^{\circ}$ C)	Ramp time (Sec.)	Hold Time (Sec.)
Drying 1	110	1	5
Drying 2	130	5	15
Ashing	500	10	30
Atomization	1700	0	5
Cleaning	2450	1	3

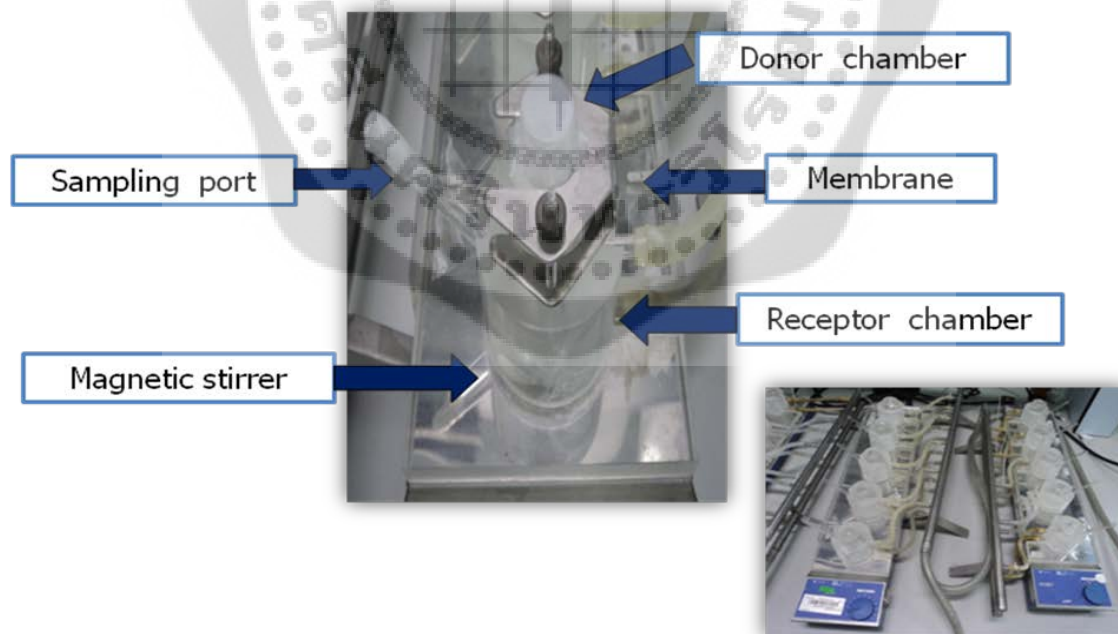
ที่มา: Yang; et al. 2009; 46

2. ระบบเมมเบรนของผิวหนัง เช่น ฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์

เป็นการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านผิวหนังจำลองในฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์ (ภาพประกอบ 3) ซึ่งได้รับความนิยมในระบบนำส่งยา (Drug delivery system) เพื่อควบคุมปริมาณการดูดซึมของยาสู่ผิวหนัง และการได้รับสัมผัสทางผิวหนัง นอกจากนี้ยังใช้สำหรับประเมินการปลดปล่อยตัวยาหรือการซึมผ่านทางผิวหนังที่อาจมีผลกระทบต่อร่างกายของมนุษย์ ซึ่งได้มีการพัฒนาและประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายในรูปแบบการประเมินการซึมผ่านของสารเคมีหรือสารที่ออกฤทธิ์ทั้งลักษณะของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง ผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง เพื่อประเมินความเสี่ยงของการได้รับสัมผัสทางผิวหนังและส่งผลกระทบต่อร่างกายและสิ่งแวดล้อมได้

ส่วนประกอบของเครื่องมีดังนี้

1. Donor chamber คือช่องสำหรับใส่ตัวอย่าง
2. Receptor chamber คือช่องสำหรับใส่สารละลาย receptor
3. Sampling port คือช่องเก็บสารตัวอย่าง
4. เมมเบรน (Membrane)
5. แท่งแม่เหล็กกวนสาร (Magnetic stirrer)

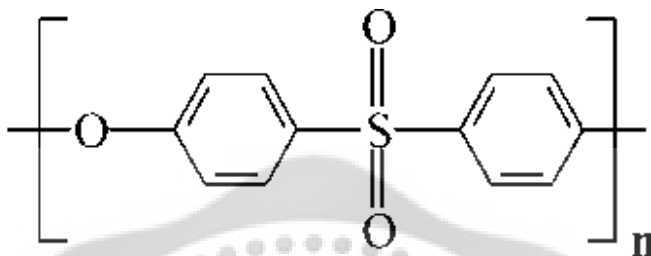


ภาพประกอบ 3 ฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์

ที่มา: เครื่องฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์. (2554). (ภาพนิ่ง). กรุงเทพฯ: ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย.

3. โพลีอีเทอร์ซัลโฟน เมมเบรน (Polyethersulfone; PES)

โพลีอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนเป็นแผ่นเมมเบรนที่มีการสังเคราะห์หรือผลิตขึ้นจากวัสดุพอลิเมอร์ (Polymer) ที่มีความเหนียวและเป็นเรซิน (Resins) แข็งคล้ายกับพลาสติกทางวิศวกรรม (Engineering plastic) ที่มีโครงสร้างโมเลกุล (ดังภาพประกอบ 4)



ภาพประกอบ 4 โครงสร้างโพลีอีเทอร์ซัลโฟน

ที่มา: Shi; et al. 2008: 7939-7946

โพลีอีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรน ที่นิยมใช้กันทั่วไปขึ้นอยู่กับทางเลือกที่เหมาะสมกับลักษณะการนำไปใช้งานประเภทต่างๆ สามารถแบ่งชนิดของเมมเบรนได้ 3 ชนิดดังนี้

1. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อนที่ทำให้สารละลายไหลผ่านแผ่นเมมเบรน และเกิดการแยกอนุภาคขนาดไมครอน (Micron) หรือเล็กกว่าไมครอน เมมเบรนแบบนี้ ยอมให้สารละลายและน้ำผ่านกระบวนการตกตะกอนได้ และสามารถกักอนุภาคแขวนลอย (Suspension) และจุลินทรีย์ (Microorganism) ไว้ได้ มีขนาดรูพรุน (Pore size) ประมาณ 0.03 - 10 ไมครอน ค่าน้ำหนักโมเลกุลของตัวถูกละลาย (Molecular weight cut-off; MWCO) มากกว่า 100,000 ดาลตัน (Dalton) และความดันต่ำประมาณ 100 - 400 กิโลปาสคาล (Kilopascal; kPa)

2. อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration)

โดยทั่วไปอัลตราฟิลเตรชันใช้ในการแยกของแข็งแขวนลอยในระดับไมครอน และสารอนุภาคละเอียด เช่น แบคทีเรีย (Bacteria) และคอลลอยด์ (Colloids) ซึ่งแสดงตามน้ำหนักโมเลกุลในระดับต่ำกว่าไมครอน ตัวถูกละลายที่มีโมเลกุลสูง และไวรัส (Virus) ตามลำดับ นอกจากนี้ สารที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของรูพรุนบนผิวหน้าของเมมเบรน จะถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งเรียกว่า ผลการเลือกเฟ้น (Sieving effect) และปัจจัยเชิงกลของการแยกสารด้วยอัลตราฟิลเตรชัน

3. นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration)

สำหรับนาโนฟิลเตรชันเมมเบรนแต่เดิมเรียกว่า ออสโมซิสผันกลับ แบบ หลวมหรือออสโมซิสผันกลับความดันต่ำ โดยนาโนฟิลเตรชันจะอยู่ในช่วงระหว่างอัลตราฟิลเตรชันและ ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อใช้แยกสารในช่วงมวลโมเลกุล ต่ำกว่า 300 สำหรับสารที่ใช้แรงดันในการแยกต่ำกว่าแรงดันของออสโมซิสผันกลับทั่วไป

นอกจากนี้พบว่ามีการนำเมมเบรนมาประยุกต์ใช้อย่างกว้างขวางทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพ (Biotechnology) เภสัชวิทยา (Pharmacology) และการบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment) อาจ เนื่องมาจากคุณสมบัติที่หลากหลายของเมมเบรนดังกล่าว คือมีประสิทธิภาพในการต้านทานความร้อนที่อุณหภูมิสูงถึง 200 องศาเซลเซียส ทนต่อแรงกระแทกได้ดี มีความเสถียรภาพ (Stability) ทนทานต่อสารเคมีที่มีฤทธิ์รุนแรง และทนต่อสิ่งแวดลอมได้ดี เป็นต้น (Razmjou; Mansouri; & Chen. 2011: 73-84) จากคุณสมบัติดังกล่าว จึงมีงานวิจัยจำนวนมากนำเมมเบรนชนิดนี้เพื่อศึกษาการทดสอบการ ผ่านผิวหนังจำลองในรูปแบบที่หลากหลาย อาทิ งานวิจัยของ (โศรดา กนกพานนท์; และคนอื่นๆ. 2550; 1-6) ได้ศึกษาการทดสอบการผ่านผิวหนังจำลอง คือ โพลีเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนของอนุภาคนาโนแบบไขมันแข็ง (Solid lipid nanoparticles; SLN) ที่กักเก็บเคอร์คูมิน (Curcumin) 5 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตรในฟรานซ์เซลล์ พบว่าเคอร์คูมินสามารถซึมผ่านผิวหนังจำลอง ได้ โดยที่ช่วงเวลาที่ 1-7 นั้น อัตราการปลดปล่อยผ่านผิวหนังมีค่า 0.3375 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตรต่อชั่วโมง หลังจากนั้น การปลดปล่อยจะเริ่มคงที่ จากการทดสอบการเจริญเติบโตของเซลล์แสดงให้เห็นว่าเซลแล็คแว็กซ์ (Shellac wax) ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ แต่เคอร์คูมินมีฤทธิ์ในการยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์

ใน ค.ศ. 2010 Gabbanini และคณะ (Gabbanini; et al. 2010: 461-467) ได้ทำการศึกษาการปลดปล่อยไขมัน (Lipid) และวิตามินที่ละลายน้ำได้จากสูตรเครื่องสำอาง ผ่านทางผิวหนังชั้นนอกของมนุษย์ (Human epidermis; RHE) และผ่านโพลีเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรน (Polyethersulfone membranes) และ โพลีคาร์บอเนตเมมเบรน (Polycarbonate membrane) ในรูปแบบฟรานซ์ ดีฟฟิวชันเซลล์แล้ววิเคราะห์ด้วยเทคนิคไฮเพอร์ฟอแมนซ์ลิควิดโครมาโตกราฟีที่มีไดโอดแอเรย์เป็นตัวตรวจวัด (High Performance Liquid Chromatography equipped with a diode-array detector; HPLC-DAD) ผลการทดลองพบว่าการแพร่กระจายของวิตามินผ่านโพลีเอทีเทอร์ซัลโฟนเมมเบรนได้ดีกว่าผ่านผิวหนังชั้นนอกของมนุษย์ ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นรูปแบบการประเมินการปลดปล่อยของวิตามินและสารประกอบต่างๆ ก่อนนำมาทดสอบกับผิวหนังชั้นนอกของมนุษย์ซึ่งมีความสะดวกและประหยัดมากกว่าการใช้เซลล์ผิวหนังของมนุษย์

จากการศึกษาของ Gabbanini และคณะ จึงได้มีการนำโพลีเอเทอร์ซิลิโคนเมมเบรนมาประยุกต์ใช้สำหรับการทดสอบการปลดปล่อยหรืออัตราการซึมผ่านในรูปแบบที่หลากหลายของการใช้งานเพื่อใช้ศึกษาแทนเซลล์ผิวหนังของมนุษย์ได้

4. ซิลเวอร์ (Silver; Ag)

4.1 แหล่งที่มา และลักษณะของธาตุซิลเวอร์ (Sources and elemental silver characteristics)

ซิลเวอร์เป็นโลหะที่มีมากที่สุดเป็นอันดับที่ 63 ในเปลือกโลก มีเลขอะตอม 47 เป็นธาตุที่ 2 ของหมู่ IB ในตารางธาตุ จัดเป็นโลหะทรานซิชัน (Transition metal) มีสองไอโซโทป (Isotope) คือ ^{107}Ag และ ^{109}Ag เกิดขึ้นในสัดส่วนเท่ากัน (Panyala; Pena-Mendez; & Havel. 2008: 117-129) ซิลเวอร์มีลักษณะสีขาวมันวาวและมีค่าการนำไฟฟ้าสูง ซึ่งสูงกว่าทองแดง (Copper; Cu) และปัจจุบันมีการนำมาใช้งานด้านอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics) จำนวนมาก รวมทั้งมีค่าการนำความร้อนและความต้านทานต่ำที่สุด นอกจากนี้ซิลเวอร์มีสมบัติในการสะท้อนแสงสูงเมื่อเทียบกับโลหะอื่น (Furno; et al. 2004: 1019-1024) ซิลเวอร์เสถียรภาพในอากาศและน้ำบริสุทธิ์ ถ้าซิลเวอร์รวมอยู่ในอากาศชั้นโอโซน (Ozone; O_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์หรือกำมะถัน (Hydrogen sulfide; H_2S) ในอากาศและน้ำที่อาจส่งผลให้เกิดการสะสมของซัลไฟด์ (Sulfide) ทำให้ซิลเวอร์เปลี่ยนอยู่ในรูปของซิลเวอร์ซัลไฟด์ (Silver sulfide; Ag_2S) ซึ่งซิลเวอร์ในรูปของไอออน (Ion) สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนแบบอินทรีย์และอนินทรีย์ (Organic and inorganic complexes) จำนวนมาก อาทิ เฮไลด์ (Halide), ซัลไฟด์ (Sulfide), ไนเตรต (Nitrate), ออกไซด์ (Oxide), อนุพันธ์ไซยาโน (Cyano-derivatives), สารเชิงซ้อนโอลิฟิน (Olefin complexes) ฯลฯ สำหรับสารเชิงซ้อน $\text{Ag}(\text{II})$ จะเสถียรภาพน้อยกว่าของ $\text{Ag}(\text{I})$ และ $\text{Ag}(\text{III})$ เมื่อซิลเวอร์ไอออนจับกับโปรตีนจะเกิดปฏิกิริยากับโลหะในระบบการเผาผลาญของร่างกายมนุษย์

ซิลเวอร์เกิดขึ้นตามธรรมชาติและเป็นโลหะผสมพร้อมด้วยทอง (Gold) และโลหะอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบในแร่ที่มีสารหนู (Arsenic; As), พลวง (Antimony; Sb), กำมะถัน (Sulfur; S) และคลอรีน (Chlorine; Cl) เช่น แร่อาร์เจนไทต์ (Argentite) เป็นต้น ขณะที่ความเข้มข้นเฉลี่ยของซิลเวอร์ในน้ำและในดินประมาณ 0.5 และ 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Part per billion; ppb) ตามลำดับ ส่วนใหญ่ซิลเวอร์จะถูกผลิตโดยการทำให้บริสุทธิ์จากผลิตภัณฑ์ของโลหะทองแดง, ทอง, ตะกั่ว และสังกะสี โดยทั่วไปซิลเวอร์จะถูกสกัดและถูกหลอมเหลวแทนที่ด้วยโลหะ เช่น ปรอท (Ayre; et al. 2002: 66)

4.2 การประยุกต์ใช้ของธาตุและสารประกอบซิลเวอร์ (Applications of elemental silver and silver compounds)

โลหะซิลเวอร์ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวาง ในสมัยโบราณนำซิลเวอร์มาใช้ประโยชน์ในการทำภาชนะและเครื่องประดับ ซิลเวอร์บริสุทธิ์เป็นโลหะซึ่งทำหน้าที่สะท้อนแสงได้ดีที่สุด จึงนิยมใช้ซิลเวอร์ทำกระจก (Mirrors) ประมาณหนึ่งส่วนสามของโลหะซิลเวอร์ถูกนำมาใช้สำหรับอุตสาหกรรมภาพถ่าย (Photography) เนื่องจากซิลเวอร์สามารถนำกระแสไฟได้ดี และใช้ผลิตอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ นอกจากนี้ ยังใช้ประโยชน์ของซิลเวอร์ในอุตสาหกรรมเภสัชภัณฑ์ (Pharmaceutics) และเครื่องมือทางการแพทย์ (Medical tools) (Clement; & Jarrett. 1994: 1712-1720)

4.3 ซิลเวอร์นาโน (Silvernano)

ซิลเวอร์นาโนเป็นอนุภาคเล็ก ๆ ของโลหะซิลเวอร์ที่มีอย่างน้อยหนึ่งมิติขนาดน้อยกว่า 100 นาโนเมตร (Nanometer) ซิลเวอร์นาโนเป็นสารประกอบออกไซด์ของโลหะ อยู่ในรูปของอนุภาคระดับนาโนเมตร ซิลเวอร์ออกไซด์มีสูตรโมเลกุล คือ Ag_2O มีลักษณะเป็นผงสีดำหรือสีน้ำตาลเข้ม (ดังภาพประกอบ 5) ซิลเวอร์นาโนเป็นที่รู้จักกันมานานกว่า 100 ปี ไม่ได้เป็นสิ่งที่เกิดจากการค้นพบใหม่ ก่อนหน้านี้ซิลเวอร์นาโนหรือสารแขวนลอยของซิลเวอร์นาโนถูกอ้างเป็นซิลเวอร์คอลลอยด์ (Colloidal silver) (Sharma; Yngard; & Lin. 2010: 92-96) ขณะที่ซิลเวอร์คอลลอยด์นำมาประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ผ่านแถบซิลเวอร์บริสุทธิ์แขวนลอยอยู่ในน้ำด้วยอนุภาคที่มีขนาด 15-500 นาโนเมตร ก่อนการประดิษฐ์ยาเพนิซิลลิน (Penicillins) ซิลเวอร์คอลลอยด์ได้มีการนำไปใช้เพื่อรักษาโรคติดเชื้อ (Infectious disease) และการเจ็บป่วยจำนวนมาก โดยมีการแปลงซิลเวอร์ขนาดใหญ่ให้มีขนาดอนุภาคระดับนาโนเมตรจำนวนมากเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและไวรัสได้ เมื่อซิลเวอร์นาโนสัมผัสกับเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา (Fungi) ทำให้มีผลกระทบต่อระบบการถ่ายโอนอิเล็กตรอน (Electron transfer systems) เกิดการการเผาผลาญภายในเซลล์ (Morones; et al. 2005: 2346–2353) นอกจากนี้ยังยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและเชื้อราซึ่งเกิดจากการติดเชื้อ อากการคันและเป็นแผลได้ (Wei; et al. 2010: 1-6)



ภาพประกอบ 5 ผงซิลเวอร์ออกไซด์

ที่มา: ผงซิลเวอร์ออกไซด์. (2554). (ภาพนิ่ง). กรุงเทพฯ: ศูนย์นาโนเทคโนโลยีแห่งชาติ
อุทยานวิทยาศาสตร์ประเทศไทย.

4.4 การใช้ประโยชน์จากซิลเวอร์นาโน (Uses of silver nanomaterials)

ความก้าวหน้าในเทคโนโลยีมีการเติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว จึงได้มีการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนในสินค้าอุปโภคบริโภคเกิดขึ้นอย่างแพร่หลาย ดังนั้นการประเมินการปลดปล่อยของอนุภาคซิลเวอร์นาโน และการประเมินความเสี่ยงจากการได้รับสัมผัสจึงเป็นสิ่งสำคัญ ที่ผ่านมามีรายงานเกี่ยวกับการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดของอนุภาค รูปร่างและคุณสมบัติของพื้นผิวแตกต่างกันเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากคุณสมบัติที่โดดเด่นของซิลเวอร์นาโนทำให้นำมาประยุกต์ใช้ในสามประเภทหลัก คือผลิตภัณฑ์ทางวิทยาศาสตร์ ทางอุตสาหกรรมและผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค

4.5 คุณสมบัติของซิลเวอร์นาโน (Properties of silver nano)

คุณสมบัติของอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีสองปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดความแตกต่างกัน คือ ผลกระทบของพื้นผิวและผลกระทบจากควอนตัม (Quantum effects) (Roduner. 2006: 583-592) ปัจจัยเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของวัสดุเช่นเดียวกับคุณสมบัติทางกล, แสง, ไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแม่เหล็ก นอกจากนี้ซิลเวอร์นาโนมีคุณสมบัติทางเคมีและชีวภาพที่มีความน่าสนใจให้กับสินค้าอุปโภคบริโภค เทคโนโลยีอาหาร สิ่งทอ / ผ้าและอุตสาหกรรมการแพทย์ รวมทั้งยังมีคุณสมบัติทางแสงและทางกายภาพที่มีประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานทางการแพทย์อีกด้วย

4.5.1 คุณสมบัติต้านเชื้อแบคทีเรีย (Antibacterial properties)

ซิลเวอร์นาโนมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียแกรมลบ (Gram-negative) ได้แก่ แบคทีเรียจำพวก *Acinetobacter*, *Escherichia*, *Pseudomonas*, *Salmonella* และเชื้อ *Vibrio* และแบคทีเรียแกรมบวก (Gram-positive) ที่รู้จักกันหลายประเภท อาทิ เช่น *Bacillus*, *Clostridium*, *Enterococcus*, *Listeria*, *Staphylococcus*, *Streptococcus* (Burrell; et al. 1999: 64-71) สำหรับ

ความสามารถและประสิทธิภาพในการยับยั้งหรือการต้านเชื้อแบคทีเรียของอนุภาคซิลเวอร์นาโนขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่แตกต่างกัน

4.5.2 คุณสมบัติต้านเชื้อรา (Antifungal properties)

เชื้อราที่พบบ่อย ได้แก่ จำพวกเช่น *Aspergillus*, *Candida*, และ *Saccharomyces* พบว่าซิลเวอร์นาโนมีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อราดังกล่าว ซึ่งมีกลไกคล้ายกับการต้านเชื้อแบคทีเรีย (Wright; et al. 1999: 344-350) จากงานวิจัยของ Kim และคณะ (Kim; et al. 2007: 95-101) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 13.5 ± 2.6 นาโนเมตร มีผลต่อการต้านทานยีสต์ (Yeast) ที่แยกได้จากนมโค

4.5.3 คุณสมบัติการต้านไวรัส (Antiviral properties)

อนุภาคนาโนซิลเวอร์ที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5-20 นาโนเมตรและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 10 นาโนเมตร สามารถยับยั้งเชื้อไวรัสตามแบบการจำลอง (Human immunodeficiency virus type 1; HIV - 1) (Sun; et al. 2005: 5059-5061) จากการศึกษาประสิทธิภาพการต้านเชื้อไวรัสของอนุภาคนาโนจากงานวิจัยของ Elechiguerra และคณะ (Elechiguerra; et al., 2005) โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอนุภาคโกลด์นาโน (Gold nanoparticles) กับอนุภาคซิลเวอร์นาโนพบว่า อนุภาคโกลด์นาโนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 10 นาโนเมตร มีความสามารถในการต้านเชื้อ HIV -1 ค่อนข้างน้อยประมาณ 6-20% เมื่อเทียบกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนประมาณ 98% ดังนั้นความสามารถในการต้านไวรัส HIV-1 ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีประสิทธิภาพดีเฉพาะในช่วง 1-10 นาโนเมตร ดังนั้นความสำคัญของการต้านเชื้อไวรัสจึงขึ้นกับขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโน

4.6 การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial applications)

4.6.1 ใช้สำหรับการเร่งปฏิกิริยา (Catalysis)

พื้นที่ผิวต่ออัตราส่วนของปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีผลต่อปฏิกิริยาการดูดซับและการเร่งปฏิกิริยา ขณะที่ในกระบวนการทางอุตสาหกรรมมีการใช้ซิลเวอร์นาโนเพื่อเร่งปฏิกิริยาอย่างหลากหลาย เช่น การเกิดออกซิเดชันของคาร์บอนมอนอกไซด์ (Carbon monoxide; CO) และอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ตรึงบนซิลิกา (Silica) ทรงกลมถูกใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อลดสีย้อม (Dyes) โดยโซเดียมโบโรไฮไดรด์ (Sodium borohydride; NaBH_4) (Yan; et al. 2006: 81-85)

4.6.2 อิเล็กทรอนิกส์ (Electronics)

ซิลเวอร์นาโนมีสมบัติในการนำไฟฟ้าและความร้อนที่สูง รวมทั้งคุณสมบัติทางแสง จึงทำให้ ซิลเวอร์นาโน ถูกนำมาใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ส่วนใหญ่ใช้สำหรับการเชื่อมต่อกับวงจร สำหรับลวดซิลเวอร์นาโน (Silver nanowires) จะถูกใช้เป็นตัวเชื่อมต่อกับนาโน เพื่อการ

ออกแบบและประดิษฐ์อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นาโน อาทิ เช่น การประยุกต์ใช้สำหรับแผงวงจรพิมพ์ ใยแก้วนำแสง เลนส์ อุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล และแบตเตอรี่ เป็นต้น (Hermanson; et al. 2001: 1082-1086)

4.6.3 การประยุกต์ใช้ในสินค้าอุปโภคบริโภค (Applications in consumer products)

อนุภาคนาโนซิลเวอร์มีคุณสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา จากคุณสมบัติดังกล่าวมีการประยุกต์ใช้อย่างหลากหลายในสินค้าอุปโภคบริโภค อาทิ ผลิตภัณฑ์ในครัวเรือน ผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง สิ่งทอ อุปกรณ์กีฬา เป็นต้น (ดังภาพประกอบ 6)



ภาพประกอบ 6 ผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโน

ที่มา: Kimbrell. 2006: 5

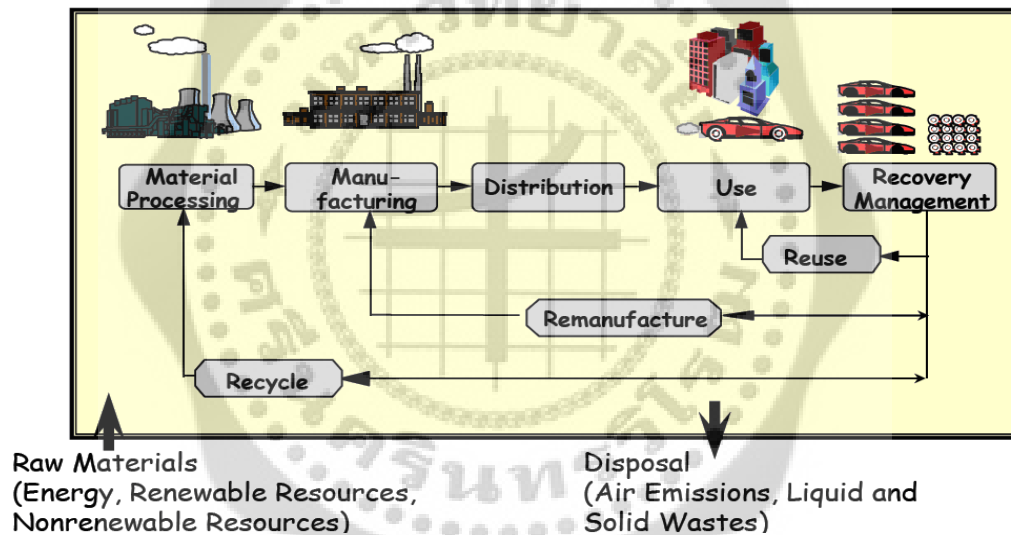
4.6.4 การประยุกต์ทางการแพทย์ (Medical Applications)

ซิลเวอร์นาโน มีการประยุกต์ทางการแพทย์จำนวนมากรวมทั้งการวินิจฉัยโรค การรักษา การเคลือบเครื่องมือและอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น อุปกรณ์คุมกำเนิด ศัลยกรรมกระดูก สารเคลือบของรากฟันเทียม (Tolaymat; et al. 2010: 999-1006) นอกจากนี้ยังใช้ซิลเวอร์นาโนสำหรับการถ่ายภาพของการเกิดเซลล์มะเร็ง (Boxall; et al. 2007: 1-89)

4.7 การประเมินความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้ซิลเวอร์นาโนและการได้รับสัมผัส

4.7.1 การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสัมผัสซิลเวอร์นาโนสู่สิ่งแวดล้อม สำหรับผลิตภัณฑ์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์นาโนก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ขณะที่ผลกระทบหรือได้รับสัมผัสกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนเริ่มตั้งแต่การผลิตวัตถุดิบ

หรือการสกัดกระบวนการผลิต การกระจาย การจัดเก็บข้อมูล การใช้และการกำจัดของเสียในผลิตภัณฑ์ ขั้นตอนต่างๆ เหล่านี้เกิดเป็นวัฏจักรของการปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนสู่สิ่งแวดล้อม ที่อาจเกิดความเป็นมลพิษมากกว่าหนึ่งเส้นทางได้แก่ ทางสิ่งแวดล้อม อากาศ น้ำ ดิน รวมทั้งเส้นทางของห่วงโซ่อาหาร (Food chain) ในระบบนิเวศน์ด้วยเช่นกัน ถ้าในอนาคตกระบวนการวิจัย พัฒนา และกระบวนการผลิตของผลิตภัณฑ์ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณการใช้วัสดุนาโนก็เพิ่มมากขึ้นด้วย ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ในสิ่งแวดล้อม และอาจนำไปสู่การทำลายระบบนิเวศน์ได้ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าผลกระทบของการปลดปล่อยอนุภาคนาโนต่อมนุษย์เกิดขึ้นได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม (ดังภาพประกอบ 7)



ภาพประกอบ 7 วัฏจักรของการปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโน

ที่มา: Gill. 2007: 159

4.7.2 การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสัมผัสซิลเวอร์นาโนสู่มนุษย์

มนุษย์กำลังเผชิญกับซิลเวอร์นาโนผ่านการสัมผัสกับสินค้าอุปโภคบริโภคต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันมากขึ้น เนื่องจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีทำให้มีผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นมนุษย์มีโอกาสดูได้รับสัมผัสหลากหลายเส้นทางทั้งสัมผัสทางตรงและทางอ้อม ดังนี้

4.7.2.1 การได้รับสัมผัสผ่านทางสารอาหาร (Exposure via food)

ซิลเวอร์นาโนที่มีการประยุกต์ใช้ในด้านของการผลิตอาหาร เช่น ผลิตภัณฑ์อาหารเสริม รวมทั้งบรรจุภัณฑ์ เพื่อเพิ่มศักยภาพในด้านคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร รวมทั้งการเก็บรักษาอาหารไว้ในระยะเวลาที่นานมากขึ้น ทำให้การเพิ่มซิลเวอร์นาโนในอาหารส่งผลกระทบต่อความเสี่ยงสำหรับผู้บริโภคโดยตรง ตัวอย่างเช่น การใช้เครื่องกรองน้ำที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโน เป็นต้น

4.7.2.2 การได้รับสัมผัสผ่านทางผลิตภัณฑ์สำหรับผู้บริโภค (Exposure via consumer products)

สำหรับสินค้าอุปโภคบริโภคที่มีความหลากหลายของผลิตภัณฑ์ในโลก มีการใช้อย่างกว้างขวางเนื่องจากคุณสมบัติพิเศษของซิลเวอร์นาโน ส่วนใหญ่พบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของซิลเวอร์นาโนมีความเกี่ยวข้องกับในชีวิตประจำวันของมนุษย์ อาทิ ผลิตภัณฑ์ในครัวเรือน ผลิตภัณฑ์ดูแลสุขภาพและเครื่องสำอาง นอกจากนี้ยังมีผลิตภัณฑ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ สีทาบ้าน เครื่องกรองน้ำ สิ่งทอ เป็นต้น เมื่อมีการใช้ผลิตภัณฑ์เป็นจำนวนมากทำให้มนุษย์มีโอกาสได้รับสัมผัสกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนเพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

4.7.2.3 การได้รับสัมผัสผ่านการประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ (Exposure via Medical Applications)

เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ เช่น การปลูกถ่ายกระดูกและกล้ามเนื้อ (Orthopedic implant), ลิ้นหัวใจ (Heart valve), ผลิตภัณฑ์ดูแลแผลที่ช่วยในการกำจัดเชื้อแบคทีเรีย และการยึดเกาะของไกลโคโปรตีน (Glycoproteins) จากเนื้อเยื่อและเลือดเพื่อให้แผลหายเร็วขึ้น จากประโยชน์ดังกล่าวทำให้มนุษย์ได้รับสัมผัสซิลเวอร์นาโนเข้าสู่ร่างกาย และเกิดการสะสมในร่างกายได้

4.7.2.4 การได้รับสัมผัสจากการทำงาน (Exposure via occupation)

บุคคลที่ประกอบอาชีพทำงานในโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตอนุภาคซิลเวอร์นาโนหรือผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีส่วนผสมของอนุภาคซิลเวอร์นาโน จะทำให้ได้รับสัมผัสอนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยการดูดซึมผ่านเข้าสู่ร่างกายได้ เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีขนาดเล็กมาก ซึ่งอาจทำให้เกิดผลกระทบต่อตับ ไต การระคายเคืองของตา ผิวหนัง ระบบทางเดินหายใจ ระบบลำไส้และส่งผลกระทบต่อระบบกระแสเลือดได้ จากงานวิจัยของ Moss และคณะ (Moss; et al. 1979: 906-908) ศึกษาผลกระทบในการประกอบอาชีพของพนักงานโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตซิลเวอร์นาโนและซิลเวอร์ออกไซด์จำนวนสามสิบคน เมื่อประเมินความเสี่ยงของการได้รับสัมผัสของพนักงานในโรงงานพบว่ามีความผิดปกติที่พบบ่อยที่สุดคือ เกิดการเปลี่ยนแปลงของสีในเยื่อตาอยู่

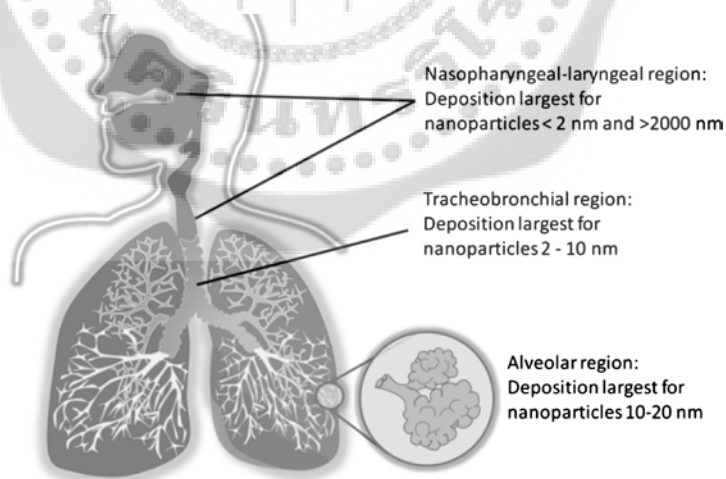
ประมาณ 20 คน โดยขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์โดยตรงระหว่างระยะเวลาของการทำงานกับระดับของสีในเยื่อตาเรียกอาการที่ผิดปกตินี้ว่าอาการ Argyrosis

4.7.3 ความเป็นพิษของซิลเวอร์นาโน (Silvernano Toxicity)

เนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีขนาดเล็กมากมีความสามารถในการเข้าสู่ร่างกาย ซึมผ่านผิวหนังหรือปอดและเข้าสู่ระบบเนื้อเยื่อและ อวัยวะต่างๆ รวมทั้งระบบการไหลเวียนของเลือด ระบบน้ำเหลืองทำให้เกิดความเสียหายต่อร่างกายและอาจขัดขวางการทำงานในกระบวนการของเซลล์ และก่อให้เกิดโรคต่อมนุษย์ได้ นอกจากนี้จะพบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีความเป็นพิษต่อระบบของร่างกายได้แก่

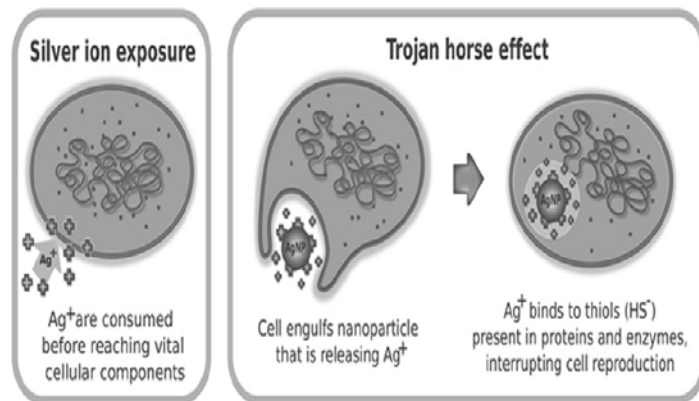
4.7.3.1 ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินหายใจ (Respiratory tract toxicity)

อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สะสมอยู่ในอากาศ เมื่อสูดดมเข้าไปยังปอดอาจเกิดการอุดตันหรือการตกตะกอนบริเวณต่างๆ ภายในระบบทางเดินหายใจ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโน ตำแหน่งโครงร่าง และสภาวะของการไหลเวียนในระบบทางเดินหายใจ สำหรับอนุภาคนาโนมีการสะสมที่แตกต่างกันในองค์ประกอบของระบบทางเดินหายใจ (ภาพประกอบ 8) จะขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคนาโน เมื่ออนุภาคซิลเวอร์นาโนสะสมในปริมาณมากและเป็นระยะเวลานานทำให้เกิดผลกระทบต่อร่างกาย ที่เรียกว่า ไทรจัน เฮาส์ เอฟเฟค (Trojan horse effect) (ภาพประกอบ 9)



ภาพประกอบ 8 การสะสมของอนุภาคนาโนในระบบทางเดินหายใจ

ที่มา: Quadros; & Marr. 2010: 777

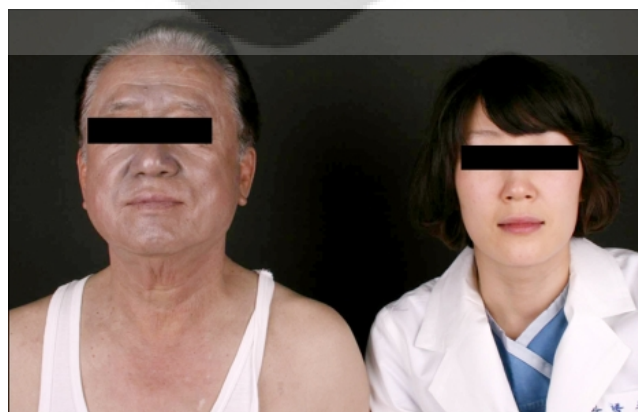


ภาพประกอบ 9 ผลกระทบของ Trojan horse effect

ที่มา: Quadros; & Marr. 2010: 778

4.7.3.2 ความเป็นพิษต่อระบบทางเดินอาหาร (Gastrointestinal tract toxicity)

การรับประทานอนุภาคซิลเวอร์นาโนเข้าไปในร่างกายอาจเกิดจากแรงจูงใจของโฆษณาชวนเชื่อผ่านทางสื่อต่างๆ ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีซิลเวอร์นาโนเป็นองค์ประกอบอยู่ในรูปแบบของผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เรียกว่า “health- maintainers” or “immuno-boosters” (Chen; & Schluesener. 2008: 1-12) เมื่อรับประทานซิลเวอร์นาโนจะทำให้ซิลเวอร์เกิดการไหลเวียนผ่านระบบทางเดินอาหาร และซิลเวอร์นาโนจะเปลี่ยนไปเป็นไอออน เนื่องจากฟิสิกส์ในกระเพาะอาหารมีฤทธิ์เป็นกรด ทำให้ส่งผลกระทบต่อการทำลายเนื้อเยื่อในลำไส้ เมื่อรับประทานในปริมาณมากอาจเกิดลักษณะอาการอาร์ไจเรีย (Argyria) (ดังภาพประกอบ 10)



ภาพประกอบ 10 อาร์ไจเรีย

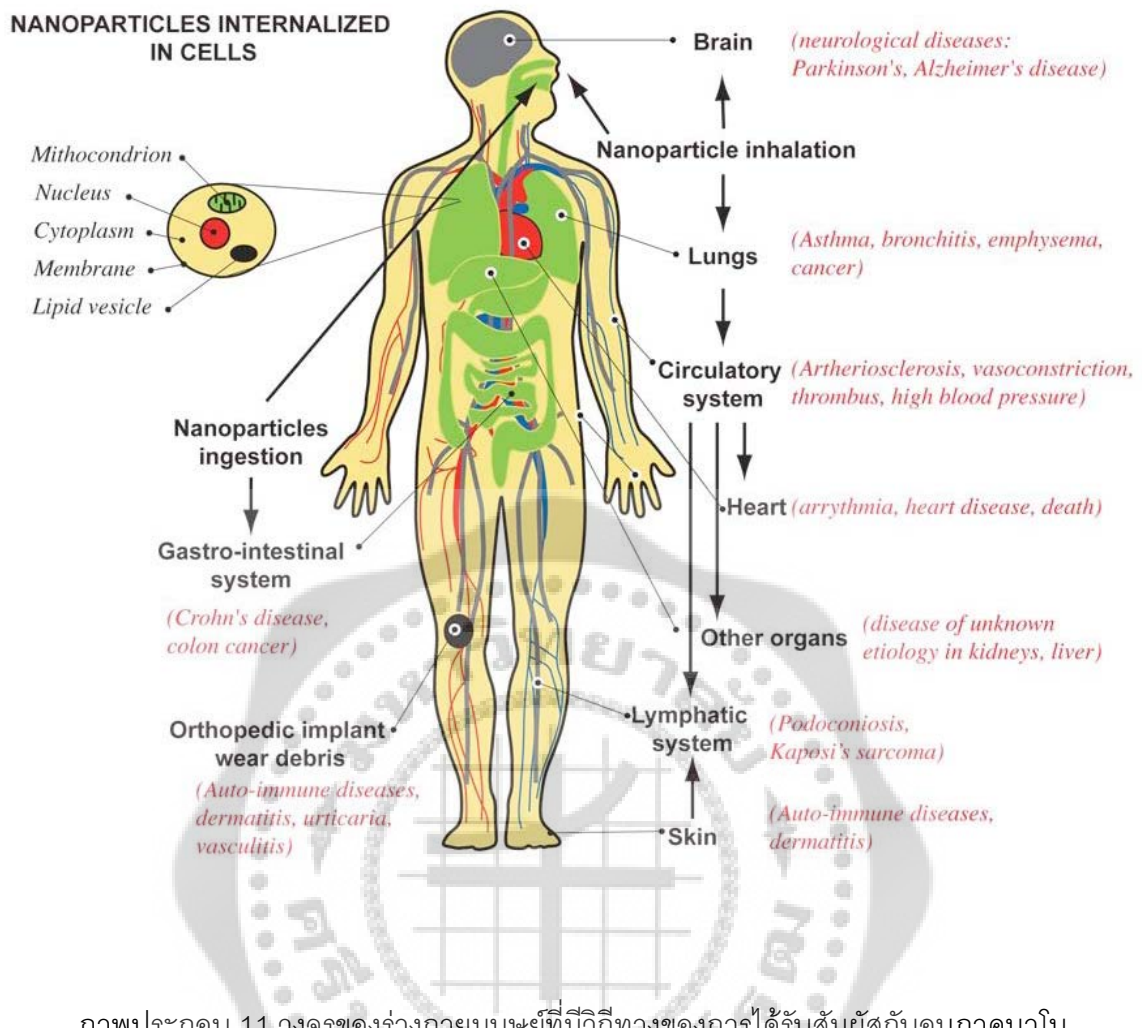
ที่มา: Hyok Bu Kwon. 2009: 308

4.7.3.3 ความเป็นพิษต่อระบบทางผิวหนัง (Dermal toxicity)

เมื่ออนุภาคซิลเวอร์นาโนถูกดูดซับเข้าสู่ร่างกายและสะสมตามเนื้อเยื่อต่างๆ ในปริมาณที่มากเกินไป ขณะที่ร่างกายได้รับแสงอาทิตย์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจะถูกวิธีดิวซ์ทำให้สีของผิวหนังเปลี่ยนเป็นสีเทาหรือสีน้ำเงินเกิดการเปลี่ยนสีของผิวหนังอย่างถาวร ลักษณะแบบนี้เรียกว่า “อาร์ใจเวีย” (Wadhera; & Fung. 2005: 1-12)

4.7.4 การศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์รวมถึงในรูปแบบของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Studies concerning human health including mammalian models)

ความเป็นพิษของอนุภาคนาโนกับมนุษย์และสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่นขนาดขององค์ประกอบ ลักษณะพื้นผิวทางกายภาพและทางเคมี ฯลฯ นอกจากนี้ความเป็นพิษของอนุภาคนาโนยังขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ทางพันธุกรรม (Gene) ระบบภูมิคุ้มกัน (Immune system) ความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับการเปลี่ยนแปลงในสภาพแวดล้อมและการต่อสู้กับสารพิษ เป็นต้น โรคที่เกี่ยวข้องกับการสูดดมอนุภาคซิลเวอร์นาโนอาจรวมถึงโรคหอบหืด (Asthma), หลอดลมอักเสบ (Bronchitis), ถุงลมโป่งพอง (Emphysema) และโรคมะเร็งปอด (Lung cancer) เป็นต้น ถ้าได้รับปริมาณอนุภาคนาโนในเข้าสู่ระบบไหลเวียนเลือด (Circulatory system) อาจส่งผลกระทบต่อเกี่ยวข้องกับภาวะหลอดเลือดอุดตัน (Atherosclerosis) และอาจเกิดโรคหัวใจ (Heart disease) ได้ ซึ่งผลกระทบที่อาจนำไปสู่การเกิดโรคต่างๆ ในอวัยวะของร่างกายจากการได้รับสัมผัสกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีอยู่หลากหลาย (ดังภาพประกอบ 11)



ภาพประกอบ 11 วงจรของร่างกายมนุษย์ที่มีวิถีทางการได้รับสัมผัสกับอนุภาคนาโน
ที่มา: Buzea; Pacheco; & Robbie. 2007: 19

5. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับความเสียหายจากอนุภาคนาโนในผลิตภัณฑ์และผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมจากผลิตภัณฑ์ มีดังนี้

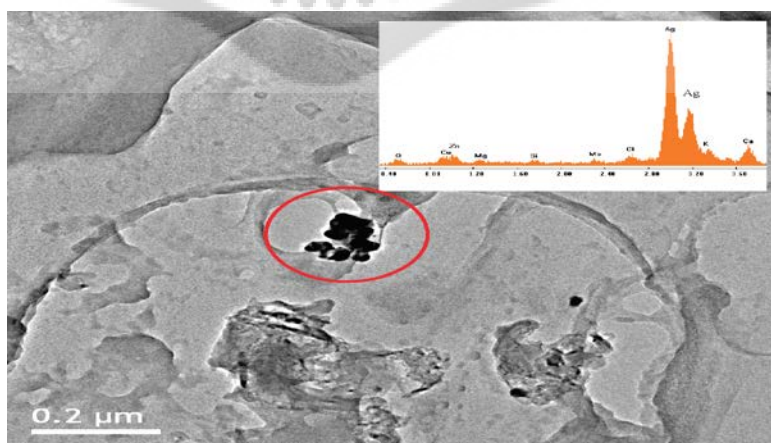
ในปี ค.ศ. 2008 Benn และ Westerhoff (Benn; & Westerhoff. 2008: 4133-4139) ศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนในถุงเท้าเข้าสู่แหล่งน้ำ โดยนำถุงเท้าจากแหล่งผลิตจำนวน 6 แหล่ง ที่ถูกเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโน เพื่อให้มีคุณสมบัติป้องกันแบคทีเรียและกลิ่นอับชื้น ซึ่งผลิตโดยโรงงานต่างๆ และจำหน่ายในสหรัฐอเมริกา หลังจากนั้นนำมาแช่ในน้ำกลั่นพร้อมทั้งเขย่าต่อเนื่องนาน 1 ชั่วโมง และนำน้ำที่แช่ถุงเท้าไปวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์ด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy (ICP-OES) พบว่าถุงเท้าที่มาจากแหล่งผลิต

ต่างกัน จะมีการปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนลงสู่น้ำในปริมาณที่ไม่เท่ากัน (ตาราง 4) นอกจากนี้ ยังพบว่าถุงเท้าบางคู่มีการปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนออกมาหมด ขณะที่บางคู่ก็ไม่ปรากฏ อนุภาคซิลเวอร์นาโนหลุดออกมา อาจเป็นผลมาจากเทคโนโลยีการผลิตในการยัดซิลเวอร์นาโนให้ติด อยู่บนเส้นใยของถุงเท้า และวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในน้ำทิ้งจากการแช่ถุงเท้าด้วย กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน Transmission electron microscopy (TEM) และยืนยันผล การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy dispersive x-ray analysis (EDX) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนมี ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางระหว่าง 100-200 นาโนเมตร (ภาพประกอบ 12) ซึ่งหากน้ำทิ้งที่มาจากซัก ก้างเสื้อผ้านาโนและมีอนุภาคซิลเวอร์นาโนปะปนอยู่ซึมลงสู่ใต้ดิน หรือไหลลงไปรวมกับแหล่งน้ำ ธรรมชาติ อาจก่อให้เกิดอันตรายกับสิ่งมีชีวิตและระบบนิเวศในแหล่งน้ำได้

ตาราง 4 แสดงปริมาณซิลเวอร์ในน้ำทิ้ง

sock ID	total silver in wash water (µg)	percent of total silver			[Ag ⁺] from ISE
		passing 0.4 µm filter	passing 0.1 µm filter	passing 0.02 µm filter	
1b, first 1-hr wash	145	93	93	86	72
1b, second 1-hr wash	275	98	91	85	76
1b, third 1-hr wash	600	83	83	81	86
3, first 1-hr wash	80	7	3	2	5
3, second 1-hr wash	160	53	53	53	25
3, third 1-hr wash	150	97	90	87	69

ที่มา: Benn; & Westerhoff. 2008: 4136



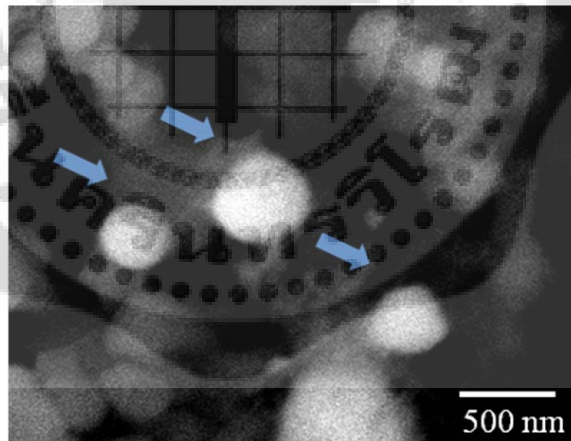
ภาพประกอบ 12 ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM-EDX
ที่มา: Benn; & Westerhoff. 2008: 4137

ในปี ค.ศ. 2008 Blaser และคณะ (Blaser; et al. 2008: 396-409) ศึกษาการได้รับสัมผัสซิลเวอร์ และการประเมินความเสี่ยงเนื่องจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีการกระจายตัวในสิ่งทอและพลาสติก งานวิจัยนี้วิเคราะห์ความเสี่ยงของระบบนิเวศน้ำจืดสำหรับอนุภาคนาโนที่อยู่ในสิ่งทอและพลาสติกเมื่อมีการปลดปล่อยซิลเวอร์ การวิเคราะห์มีทั้งหมดสี่ขั้นตอนดังนี้ (i) การวิเคราะห์การไหลของซิลเวอร์และประเมินการปลดปล่อยผ่านกระบวนการจำลองในรูปแบบแม่น้ำไรน์ (Rhine river) (ii) การประเมินผลในแม่น้ำและทำนายความเข้มข้นของซิลเวอร์ในสิ่งแวดล้อม (Predicted environmental concentrations; PECs) (iii) การประเมินผลความเป็นพิษที่เกี่ยวข้องและการทำนายความเข้มข้นที่ไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม (Predicted no-effect concentrations; PNECs) และ (iv) อธิบายลักษณะความเสี่ยง สำหรับการประเมินผลทั้งหมดจะเป็นการคาดการณ์ประมาณการใช้ซิลเวอร์ในปี ค.ศ. 2010 โดยส่วนใหญ่ซิลเวอร์ที่ปลดปล่อยลงสู่แม่น้ำเสียจะรวมอยู่ในกากตะกอนน้ำเสียและอาจมีการแพร่กระจายในด้านการเกษตรด้วย ปริมาณซิลเวอร์ในแหล่งน้ำธรรมชาติขึ้นอยู่กับสัดส่วนของน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด ส่วนการประเมินผลด้วยรูปแบบ PECs ของแม่น้ำไรน์อยู่ในระดับความพึงพอใจสอดคล้องกับการติดตามข้อมูลจากระบบแม่น้ำอื่นๆ เนื่องจากลักษณะที่สมบูรณ์ของความเป็นพิษจากซิลเวอร์ที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อมขาดเพียงข้อจำกัดของการประเมินความเสี่ยงที่เป็นไปได้ในขณะนี้ อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า อัตราส่วน PEC ต่อ PNEC มากกว่า 1 จึงไม่สามารถควบคุมได้ในระบบนิเวศน้ำจืด โดยเฉพาะไม่สามารถประเมินความเสี่ยงสำหรับกลุ่มจุลินทรีย์ในโรงบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งมีความกังวลเกี่ยวกับกลุ่มพอลิเมอร์ที่เคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนอาจเกิดการย่อยสลายได้อย่างล่าช้า

ในปี ค.ศ. 2010 Kaegi และคณะ (Kaegi; et al. 2010: 2900-2905) ศึกษาการปลดปล่อยซิลเวอร์นาโน จากสิ่งซึ่งใช้สำหรับทาภายนอกอาคาร เมื่อเวลาผ่านไปหนึ่งปีพบว่าผนังด้านนอก ปริมาณน้ำฝนที่ไหลผ่านตัวอย่างนั้นจะถูกวัดหาปริมาณซิลเวอร์และไททาเนียมด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) และทำการเตรียมตัวอย่างบน TEM grids เพื่อวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron microscope) . จากผลการทดลองพบว่าปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโน (Silver nanoparticles; Ag-NP) จะถูกชะออกมาที่ความเข้มข้นมากที่สุดคือ 145 μ Ag/l หลังจากหนึ่งปีพบว่าปริมาณ Ag-NP ที่ปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมมากกว่า 30 % อนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดน้อยกว่า 15 นาโนเมตร และถูกปลดปล่อยออกมาในรูปคอลลอยด์ร่วมกับตัวยึดเหนี่ยวทางอินทรีย์ของสี ผลจากการวัดด้วยจุลทรรศน์อิเล็กตรอนบอกถึง Ag-NP ที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกเปลี่ยนรูปเป็น Ag_2S ซึ่งมีความเป็นพิษน้อย

ในปี ค.ศ. 2010 Kulthong และคณะ (Kulthong; et al. 2010: 1-9) ศึกษาการปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากสิ่งทอในเนื้อเทียม โดยนำตัวอย่างสิ่งทอที่เคลือบด้วยซิลเวอร์นาโนแช่ใน

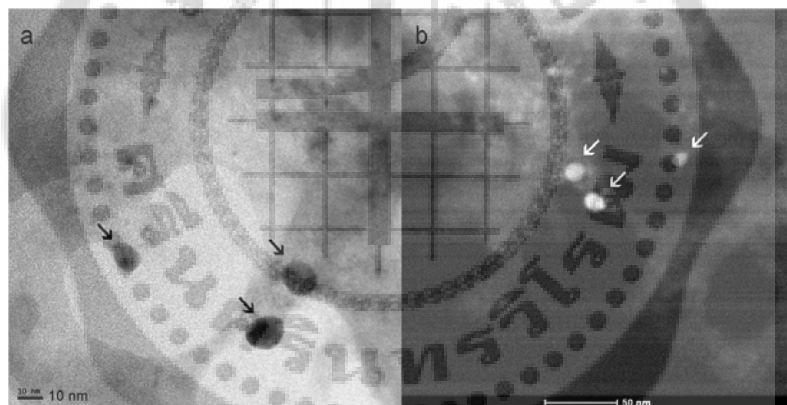
สารละลายเชื้อเหี้ยมที่เตรียมตามมาตรฐานของ AATCC , ISO และ EN เบื้องต้นได้มีการวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์ในตัวอย่างสิ่งทอด้วยเทคนิคกราฟิฟเฟอเรนซ์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตเมตรี รวมทั้งคุณสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียในรูปแบบแบคทีเรียแกรมบวก (*S. aureus*) และแบคทีเรียแกรมลบ (*E. coli*) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนในสิ่งทอสามารถยับยั้งแบคทีเรียได้สูงถึง 98% ของการเจริญเติบโตเมื่อเทียบกับตัวอย่างควบคุม จากนั้นเมื่อทดลองอบตัวอย่างสิ่งทอที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ปลดปล่อยออกจากสิ่งทอแตกต่างกันตั้งแต่ 0 - 322 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมโดยน้ำหนัก เมื่อวิเคราะห์หีซีเถ้าที่ได้จากสิ่งทอด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscopy (SEM) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีลักษณะเป็นทรงกลมและมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 200 นาโนเมตร (ภาพประกอบ 13) การปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโน ออกจากสิ่งทอมีปริมาณที่แตกต่างกันอาจขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลเวอร์นาโนที่เคลือบสิ่งทอและสูตรของเหี้ยมรวมทั้งผลของพีเอช ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการประเมินความเสี่ยงของมนุษย์ที่อาจเกิดขึ้นเกี่ยวกับการใช้สิ่งทอที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโน



ภาพประกอบ 13 ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากสิ่งทอที่ตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM
ที่มา: Kulthong; et al. 2010: 5

ในปี ค.ศ. 2011 Farkas และคณะ (Farkas; et al. 2011: 1-6) ศึกษาการประเมินความเสี่ยงของน้ำทิ้ง (Nanowash water) จากผลิตภัณฑ์เครื่องซักผ้า (Nanosilver washing machine) ที่มีอนุภาคซิลเวอร์นาโน (AgNPs) โดยนำตัวอย่างน้ำทิ้งจากเครื่องซักผ้ามาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Inductive coupled mass spectrometry (ICP-MS) พบว่าการปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนของน้ำ

ทั้งจากเครื่องซักผ้ามีความเข้มข้นเฉลี่ย 11 ไมโครกรัมต่อลิตร และปริมาณการปลดปล่อยของอนุภาคซิลเวอร์นาโนถูกยืนยันโดยเทคนิค Single particle ICP-MS รวมทั้งวิเคราะห์ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไอออนด้วยเทคนิค Ion selective electrode (ISE) และเทคนิคการกรอง สำหรับการวัดขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยกล้องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน และเทคนิค Nanoparticle tracking analysis (NTA) พบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีขนาดเฉลี่ย 10 นาโนเมตร (ภาพประกอบ 14) และ 60-100 นาโนเมตร ตามลำดับ นอกจากนี้การทดสอบกลุ่มของเชื้อแบคทีเรียในธรรมชาติด้วยเทคนิคโฟลไซโตเมตรี (Flow cytometry) พบว่ากลุ่มของเชื้อแบคทีเรียมีการลดลงอย่างชัดเจนเมื่อสัมผัสกับน้ำทิ้ง ดังนั้นถ้าเครื่องซักผ้า กลายเป็นผลิตภัณฑ์ทั่วไปของครัวเรือนในอนาคตจะทำให้เกิด Loadings nanosilver ลงสู่ระบบน้ำเสีย ซึ่งอาจนำไปสู่การปลดปล่อยอนุภาคซิลเวอร์นาโนต่อสิ่งแวดล้อม และจากการศึกษานี้เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานนำไปสู่การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสัมผัสและการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในอนาคต



ภาพประกอบ 14 ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโนของน้ำทิ้งจากเครื่องซักผ้าวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TEM

ที่มา: Farkas; et al. 2011: 5

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบของอนุภาคซิลเวอร์นาโนต่อเซลล์ในร่างกายของมนุษย์ มีดังนี้

ในปี ค.ศ. 2008 Hyun และคณะ (Hyun; et al. 2008: 24-28) ศึกษาผลของการสัมผัสอนุภาคซิลเวอร์นาโนในระบบทางเดินหายใจของเยื่อจมูกในหนู งานวิจัยนี้จะทำการทดลองในหนู Sprague-Dawley (SD) อายุ 6 สัปดาห์ที่ได้รับสัมผัสอนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยมีการควบคุมระดับความเข้มข้นของปริมาณซิลเวอร์ในอากาศ ทั้งปริมาณต่ำ ($1.73 \times 10^4/cm$, $0.5 \mu g/m^3$), ปริมาณกลาง ($1.27 \times$

$10^5/\text{cm}^3$, $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) และปริมาณมาก ($1.32 \times 10^6 \text{ particles}/\text{cm}^3$, $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ซึ่งมีอากาศบริสุทธิ์ที่เป็นตัวควบคุม โดยทดลองให้หนูอยู่ในห้องและมีการสูดดมเป็นเวลา 6 ชั่วโมงต่อวัน จำนวน 5 ครั้งต่อสัปดาห์ เมื่อผ่านการทดลอง 28 วันของระยะเวลาการได้รับสัมผัส แล้วทดสอบด้วยวิธีการย้อมสีฮีสโตเคมี (Histochemical staining) โดยใช้ Periodic acid Schiff (PAS), Alcian blue (AB) ที่พีเอช 2.5 และ High iron diamine-alcian blue (HID-AB) ที่พีเอช 2.5 ซึ่งถูกใช้เพื่อประเมินการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติ Mucosubstance ของเซลล์ในเยื่อทางเดินหายใจ นอกจากนี้ในการศึกษาทางจุลพยาธิวิทยา (Histopathological) โพรงจมูกและปอด (Nasal cavity and lung) จากกลุ่มที่ได้รับสัมผัสพบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม แต่พบว่ามีการเพิ่มขึ้นเล็กน้อยใน Neutral mucins โดยถูกบันทึกไว้สำหรับกลุ่มที่ได้รับสัมผัสอนุภาคซิลเวอร์นาโนเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม แม้จะไม่มีข้อมูลทางสถิติ อย่างไรก็ตามขนาดและจำนวนของ Goblet cells ใน Neutral mucins มีการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญของกลุ่มที่ได้รับสัมผัสกับอนุภาคซิลเวอร์นาโนในปริมาณระดับปานกลางและสูง ($P < 0.05$) ขณะที่ความหนาแน่นของการย้อมสีใน Mucosubstances พบว่าไม่มีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มที่ได้รับสัมผัส แต่ Neutral mucins พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แม้ Acid mucins รวมถึง Sulfomucins และ Sialomucins จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงใดๆ ในกลุ่มที่ได้รับสัมผัส ดังนั้นผลการทดลองพบว่าอนุภาคซิลเวอร์ที่มีผลต่อ Neutral mucins ในเยื่อทางเดินหายใจ

ในปี ค.ศ. 2011 Hackenberg และคณะ (Hackenberg; et al. 2011: 27-33) ศึกษาการประเมินความเสี่ยงของดีเอ็นเอ (Deoxyribonucleic acid; DNA) ความเป็นพิษและการทำงานใน Human mesenchymal stem cells (hMSCs) โดยทำการวิเคราะห์ลักษณะอนุภาคซิลเวอร์นาโน และการกระจายของเซลล์ hMSCs ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission electron microscopy; TEM) ในระยะเวลา 1, 3 และ 24 ชั่วโมง สำหรับความเป็นพิษจะตรวจสอบโดยวิธี Trypan blue และการทดสอบด้วย Fluorescein-diacetate ส่วนความเสี่ยงของดีเอ็นเอถูกประเมินโดยเทคนิค Comet assay และทดสอบความผิดปกติของโครโมโซม (Chromosome) รวมทั้งการปลดปล่อย Cytokine ของ IL - 6, IL - 8 และ VEGF ถูกตรวจวัดโดยใช้เทคนิค ELISA นอกจากนี้ความสามารถในการเคลื่อนย้ายเซลล์ hMSC ได้รับการทดสอบโดยใช้ระบบ Transwell ผลการทดลองพบว่ามีความเป็นพิษของอนุภาคซิลเวอร์นาโน เข้มข้น 10 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งมีการกระจาย ในไซโทพลาสซึม (Cytoplasm) และนิวเคลียส (Nucleus) ในทุกช่วงระยะเวลาของการทดสอบ รวมทั้งการทดสอบด้วยเทคนิค Comet assay และทดสอบความผิดปกติของโครโมโซม พบว่าความเสี่ยงของดีเอ็นเอหลังจากเวลา 1, 3, และ 24 ชั่วโมงมีความเข้มข้นที่ 0.1 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ส่วนการปลดปล่อย IL - 6, IL - 8 และ VEGF พบว่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายในเซลล์สรุปผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงศักยภาพ Cyto- และ Genotoxic ของอนุภาคซิลเวอร์นาโนใน

hMSCs ที่มีความเข้มข้นสูงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับระดับประสิทธิภาพยาต้านจุลชีพ (Antimicrobial)

ในปี ค.ศ. 2011 Piao และคณะ (Piao; et al. 2011: 92-100) ศึกษากลไกระดับโมเลกุลจากผลความเป็นพิษของอนุภาคซิลเวอร์นาโน ซึ่งจะเหนี่ยวนำความเป็นพิษได้สูงกว่าเมื่อเทียบกับความเป็นพิษที่พบเมื่อใช้ซิลเวอร์ไนเตรท (Silver nitrate; AgNO_3) เป็นที่มาของซิลเวอร์ไอออน โดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนเหนี่ยวนำให้เกิดการผลิต Reactive oxygen species (ROS) และการยับยั้งการเกิดกลูตาไธโอน (Glutathione; GSH) ในเซลล์ตับของ Human Chang โดย ROS ที่ถูกผลิตโดยอนุภาคซิลเวอร์นาโนส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อส่วนประกอบต่างๆ ของเซลล์ การรอดชีวิตของเซลล์จะลดลงเนื่องจากเกิดการตายของเซลล์ (Apoptosis) สำหรับการเหนี่ยวนำอนุภาคซิลเวอร์นาโนในไมโทคอนเดรีย (Mitochondria) จะขึ้นอยู่กับกระบวนการของ Apoptotic ซึ่งผ่านการปรับของ Bax และการแสดงออกของ Bcl - 2 จะพบว่ามีการหยุดชะงักของเนื้อเยื่อไมโทคอนเดรีย โดยการสูญเสียจะถูกติดตามด้วยการปลดปล่อยของไซโตโครมซีจากไมโทคอนเดรีย นอกจากนี้ผล Apoptotic ของอนุภาคซิลเวอร์นาโน จะถูกกระตุ้นด้วยการทำงานของ C - Jun NH₂ - terminal kinase (JNK) และถูกยับยั้งโดยตัวยับยั้ง JNK-specific inhibitor , SP600125 และ siRNA ที่เป็นกลุ่มเป้าหมายของ JNK โดยสรุปแล้วผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าความเป็นพิษของอนุภาคซิลเวอร์นาโน ก่อให้เกิด Oxidative stress-induced apoptosis และความเสียหายต่อองค์ประกอบของเซลล์ นอกจากนี้อนุภาคซิลเวอร์นาโนยังนำไปสู่การตายของเซลล์ขึ้นอยู่กับเส้นทางไมโทคอนเดรียและ Caspase โดยมี JNK เป็นตัวกลาง

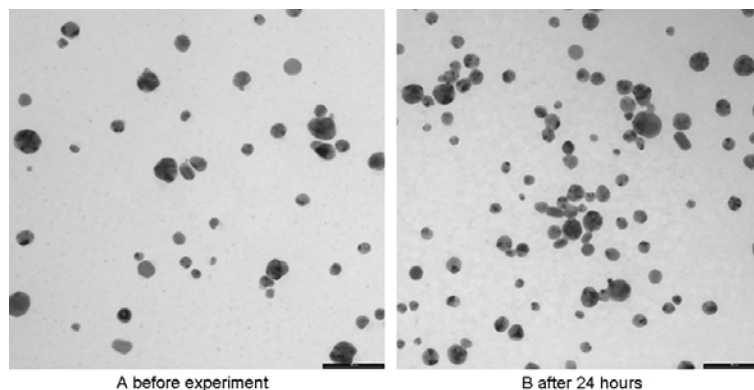
ในปี ค.ศ. 2011 Greulich และคณะ (Greulich; et al. 2011: 347-354) ศึกษาการดูดซึมของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเข้าสู่ Human mesenchymal stem cells (hMSC) โดยมีภาวะวิเคราะห้การกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนภายในเซลล์ หลังจากการได้รับสัมผัส พบว่าไม่มีการกระจายตัวของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากอาหารเลี้ยงเชื้อ เมื่อถูกวิเคราะห้การรวมกันของอนุภาคนาโนใน hMSC ด้วยเทคนิค Scanning electron microscopy focused ion beam (FIB) ขณะที่การรวมตัวกันของซิลเวอร์จะถูกระบุในบริเวณ Perinuclear ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และย้อมสีเฉพาะโครงสร้างของเซลล์ ภายในไลโซโซม (Endo-lysosomes), นิวเคลียส (Nuclei), กอลจี คอมเพล็กซ์ (Golgi complex) และ เอนโดพลาสมิก เรติคูลัม (Endoplasmic reticulum) โดยใช้ Fluorescent probes แสดงให้เห็นว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในโครงสร้าง Endo - lysosomal ไม่ได้อยู่ในเซลล์ นิวเคลียส, เอนโดพลาสมิก เรติคูลัม หรือ กอลจี คอมเพล็กซ์ นอกจากนี้การกำหนดปริมาณของการดูดซึมอนุภาคซิลเวอร์นาโนโดยวิธี Flow cytometry พบว่าปริมาณความเข้มข้นของอนุภาคขึ้นอยู่กับ การดูดซึมของอนุภาคที่ถูกยับยั้งโดย Chlorpromazine และ Wortmannin แต่ Nystatin ถูกระบุให้ขึ้นอยู่กับ Clathrin-dependent endocytosis และ Macropinocytosis เป็นกลไกหลักของการดูดซึม

ผลการทดลองพบว่า อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 นาโนเมตรสามารถเข้าสู่ hMSC และรวมตัวกันภายใน Perinuclear รวมทั้งบริเวณที่เกี่ยวข้องกับเซลล์ Endo-lysosomal

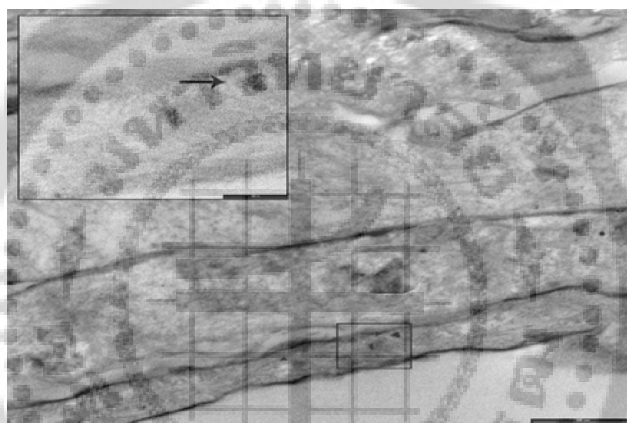
ในปี ค.ศ. 2011 Stebounova และคณะ (Stebounova; et al. 2011: 1-12) ศึกษาผลกระทบของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเมื่อได้รับสัมผัสทางระบบทางเดินหายใจ สำหรับงานวิจัยนี้ได้ตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาดเล็กมากในหนู ซึ่งทำการทดลองโดยให้หนูสูดดมอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีขนาด 5 ± 2 นาโนเมตร ในปริมาณ 3.3 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เป็นเวลา 4 ชั่วโมงต่อวัน เป็นระยะเวลา 10 วัน หลังจากนั้นนำมาตรวจวิเคราะห์หาปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค Inductively coupled plasma - optical emission spectroscopy พบปริมาณอนุภาคซิลเวอร์นาโนเท่ากับ 31 ไมโครกรัมต่อกรัมของน้ำหนักปอด (Dry weight) การได้รับสัมผัสของหนูจากอนุภาคซิลเวอร์นาโนพบว่าการอักเสบในปอดน้อย อย่างไรก็ตามถ้ามีการสะสมในระยะยาวอาจจะมีความเป็นพิษต่อปอดสูงขึ้น รวมทั้งนำไปสู่การประเมินความเสี่ยงต่ออวัยวะอื่นๆ ได้

นอกจากนี้ยังพบว่ามิงงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการซึมผ่านของอนุภาคนาโนและโลหะผ่านแบบจำลองระบบของผิวหนัง ดังนี้

ในปี ค.ศ. 2009 Larese และคณะ (Larese; et al. 2009: 33-37) ศึกษาการซึมผ่านของอนุภาคซิลเวอร์นาโนทางระบบผิวหนังปกติ (Intact skin) และระบบผิวหนังที่ได้รับความเสียหายของมนุษย์ (Damaged skin) โดยใช้ Franz diffusion cell model สำหรับงานวิจัยนี้ทำการทดลองโดยนำอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้น 70 ไมโครกรัมต่อตารางเซนติเมตร เคลือบด้วย Polyvinylpyrrolidone กระจายตัวในเหงื่อเทียมซึ่งอยู่ชั้น Donor phase (ภาพประกอบ 15) และซึมผ่านผิวหนังเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง ขณะที่สารละลาย Receptor จะถูกนำมาวัดปริมาณซิลเวอร์ด้วยเทคนิค Electro thermal atomic absorption spectroscopy (ETAAS) ส่วนผิวหนังมนุษย์จะนำมาตรวจวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (ภาพประกอบ 16) เพื่อตรวจสอบบริเวณการได้รับสัมผัสของอนุภาคซิลเวอร์นาโน จากผลการทดลองพบว่าการซึมผ่านระบบผิวหนังที่ได้รับความเสียหายของมนุษย์ได้ดีกว่าการซึมผ่านระบบผิวหนังปกติของมนุษย์โดยมีความเข้มข้นของซิลเวอร์ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2.32 นาโนกรัมต่อตารางเซนติเมตร นอกจากนี้ยังพบว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนสามารถซึมผ่านระบบผิวหนังที่ได้รับความเสียหายของมนุษย์ในปริมาณที่เพิ่มขึ้น และสามารถตรวจวิเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนในชั้นผิวหนัง stratum corneum และผิวหนังชั้นนอกสุดของหนังกำพวดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนได้



ภาพประกอบ 15 ลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในสารละลาย Donor phase
ที่มา: Francesca. 2011: 35



ภาพประกอบ 16 แสดงอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ซึมผ่านชั้นผิวหนัง Stratum corneum
ที่มา: Francesca. 2011: 36

ในปี ค.ศ. 2009 Larese และคณะ (Larese; et al. 2009: 574-579) ศึกษาการดูดซึมของผงโลหะ (Metal powders) ผ่านทางระบบผิวหนังปกติ (Intact skin) และระบบผิวหนังที่ได้รับความเสียหายของมนุษย์ (Damaged skin) โดยใช้ Franz diffusion cell model งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลการซึมผ่านของผงโลหะ เช่น โคบอลต์ (Cobalt; Co), นิกเกิล (Nickel; Ni) และโครเมียม (Chromium; Cr) และผลกระทบของโรคผิวหนังและการซึมผ่านทางระบบของผิวหนัง ในการทดลองนำผงโลหะ (Co, Ni และ Cr) กระจายตัวในเนื้อเยื่อเทียมที่พีเอช 4.5 อยู่ในชั้น Donor phase และซึมผ่านผิวหนังเป็นเวลานาน 24 ชั่วโมง สำหรับปริมาณของโลหะที่ซึมผ่านทางผิวหนังถูกนำมาวิเคราะห์โดย Electro thermal atomic absorption spectroscopy สารละลายใน Donor phase ถูกวิเคราะห์ในรูปของไอออน จากการทดลองพบว่าโลหะ Co และ Ni มีการซึมผ่านทางระบบผิวหนังปกติ

โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 8.4 และ 31 นาโนกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ สำหรับการซึมผ่านระบบผิวหนังที่ได้รับความเสียหายของมนุษย์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,566 และ 2,631 นาโนกรัมต่อตารางเซนติเมตร ตามลำดับ ขณะที่โลหะ Cr ไม่พบการซึมผ่านทางระบบของผิวหนังซึ่งอาจเกิดจากความแข็งแรงของโปรตีนในชั้นผิวหนัง ดังนั้นเพื่อเป็นการป้องกันการปนเปื้อนของผิวหนังเมื่อมีการใช้สารพิษซึ่งเป็นสาเหตุให้ได้รับบาดเจ็บเพียงเล็กน้อยอาจนำไปสู่การซึมผ่านทางผิวหนังได้

จากงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่านักวิจัยได้สังเกตเห็นความเสี่ยงของอนุภาคซิลเวอร์นาโนจากผลิตภัณฑ์รวมทั้งผลกระทบที่ส่งผลกระทบต่อมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดในประเทศไทย ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวนี้เกี่ยวข้องกับในชีวิตประจำวันของมนุษย์ ด้วยเทคนิคกราฟิฟเฟอเรนซ์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี และทำการศึกษาซึมผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนังโดยใช้ฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์ เพื่อประเมินความเสี่ยงของการได้รับสัมผัสจากผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนทางผิวหนัง และการปลดปล่อยออกมาสู่สิ่งแวดล้อม นำไปสู่ความปลอดภัยในการใช้ผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโน และเป็นข้อมูลการสร้างมาตรฐานความปลอดภัยในการใช้ผลิตภัณฑ์นาโนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็น เพื่อก่อให้เกิดความปลอดภัยกับสุขภาพของผู้บริโภคและไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในน้ำ ดิน และอากาศได้ในอนาคต

บทที่ 3

ระเบียบวิธีดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอน ดังนี้

1. อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย
2. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์
3. ศึกษาการซึมผ่านของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง
4. ศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์

1. อุปกรณ์ เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1.1 อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- เครื่องกราไฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Perkin Elmer รุ่น AAnalyst 300 Auto sampler รุ่น AS-72
- เตาไฟฟ้า (Hot plate) จากบริษัท Fisher scientific
- ตัวกรอง Syringe filters ขนาด 0.45 μm จากบริษัท Scientific
- ฟรานซ์ดีฟิวชันเซลล์ จากบริษัท Neslab
- เครื่องวัดพีเอช (pH meter) รุ่น 827 pH Lab จากบริษัท Metrohm Autolab
- ไมโครปิเปตต์ขนาด 20, 200 และ 1000 ไมโครลิตร จากบริษัท Eppendorf
- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น AB104-S จากบริษัท Mettler toledo
- แท่งแม่เหล็กกวนสาร จากบริษัท Cowie
- โพลีอีเธอร์ซัลโฟเนมเมมเบรน จากบริษัท Millipor
- Scanning electron microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray analysis (EDX) รุ่น SRS-3400N จากบริษัท Hitachi ประเทศญี่ปุ่น
- เครื่องโฮโมจีไนซ์เซอร์ (Homogenizer) รุ่น Pro 200 จากบริษัท Scientific

1.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

- กรดไนตริก (Nitric acid; HNO_3) จากบริษัท Sigma
- สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate; AgNO_3) จากบริษัท Merck
- กรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid; H_2SO_4) จากบริษัท Carlo Erba Reagenti

- กรดเปอร์คลอริก (Perchloric acid; HClO_4) จากบริษัท Merck
- ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Disodium hydrogen phosphate; Na_2HPO_4) จากบริษัท Sigma
- โพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (Potassium dihydrogen phosphate; KH_2PO_4) จากบริษัท Sigma
- โซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl) จากบริษัท Merck
- แอล-ฮิสทีดีน โมโนไฮโดรคลอไรด์ โมโนไฮเดรต (L-histidine Monohydrochloride monohydrate; $\text{C}_6\text{H}_9\text{O}_2\text{N}_3 \cdot \text{HCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Merck
- โซเดียมไดไฮโดรเจน ออร์โธฟอสเฟต ไดไฮเดรต (Sodium dihydrogen orthophosphate dehydrate; $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) จากบริษัท Sigma
- เอทานอล (Ethanol; $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) จากบริษัท Merck
- ผงซิลเวอร์นาโน (Silver nanopowder < 100 nm, 99.5%) จากบริษัท Sigma-Aldrich

1.3 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ (แสดงในตาราง 5, 6 และ 7)








2. การวัดปริมาณโลหะซิลเวอร์เริ่มต้นของผลิตภัณฑ์ด้วยเทคนิคกราฟต์เฟอเรนซ์อะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี

วิธีการทดลอง



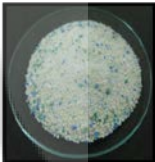

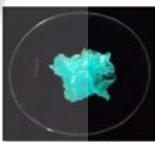
1. การสุ่มตัวอย่าง

ผู้วิจัยทำการสุ่มเลือกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนในรูปแบบที่ใช้กับผิวหนังหรือมีโอกาสได้รับสัมผัสทางผิวหนัง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนที่นำมาศึกษาจะมาจากที่มีจำหน่ายตามห้างสรรพสินค้าและทางอินเทอร์เน็ตที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ซึ่งระบุว่ามีส่วนประกอบ ซึ่งจำแนกออกได้เป็นทั้งสามรูปแบบคือ ของเหลว (Liquid; $L_1 - L_7$) ของแข็ง (Solid; $S_1 - S_5$) และกึ่งของแข็ง (Semisolid; $G_1 - G_7$) สำหรับแหล่งที่มาและลักษณะเนื้อหาของผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางต่อไปนี้



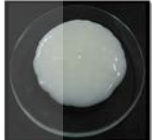


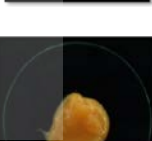
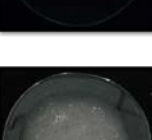
ตาราง 5 แหล่งที่ได้มา และลักษณะเนื้อสารของผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว (Liquid; L₁- L₇)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว			
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ภาพประกอบ
อินเทอร์เน็ต	L ₁	สเปรย์ดับกลิ่น ภายในบ้าน	
อินเทอร์เน็ต	L ₂	สเปรย์ฉีดกำจัดและ ป้องกันเชื้อโรค	
อินเทอร์เน็ต	L ₃	สเปรย์ฉีดกลิ่นอับ บริเวณเท้า	
อินเทอร์เน็ต	L ₄	สเปรย์รักษาแผล	
ห้างสรรพสินค้า	L ₅	สเปรย์ฉีดกลิ่นรองเท้า	
ห้างสรรพสินค้า	L ₆	สเปรย์ระงับกลิ่นกาย	
ห้างสรรพสินค้า	L ₇	สเปรย์ปรับอากาศ	

ตาราง 6 แหล่งที่ได้มา และลักษณะเนื้อสารของผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง (Solid; S₁- S₅)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง			
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ภาพประกอบ
อินเทอร์เนต	S ₁	แป้งฟัพผสมรองพื้น	
ห้างสรรพสินค้า	S ₂	แป้งฝุ่นโรยตัว	
ห้างสรรพสินค้า	S ₃	ผงซักฟอก	
ห้างสรรพสินค้า	S ₄	ผงซักฟอก	
อินเทอร์เนต	S ₅	สบู	

ตาราง 7 แหล่งที่ได้มา และลักษณะเนื้อสารของผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง (Semisolid; G₁- G₇)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง			
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ภาพประกอบ
ห้างสรรพสินค้า	G ₁	โรลออน	
ห้างสรรพสินค้า	G ₂	โรลออน	
อินเทอร์เน็ต	G ₃	โรลออน	
อินเทอร์เน็ต	G ₄	ครีมทารักแร้	
ห้างสรรพสินค้า	G ₅	ครีมทาหน้า	
ห้างสรรพสินค้า	G ₆	ยาสีฟัน	
อินเทอร์เน็ต	G ₇	แชมพู	

2. การกำหนดสภาวะที่เหมาะสมของเครื่องมือ

เครื่องกราไฟต์เฟอ์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ โดยตั้งค่าสภาวะของเครื่องที่เวลา/อุณหภูมิ (Furnace Time/ Temp. Program) ดังนี้

ตาราง 7 การกำหนดสภาวะของเครื่อง

Lamp settings wavelength (nm)	328.1 nm
Bandwidth	0.7 nm
Lamp current	15 mA
Sample volume	20 μ l
Measurement mode	Peak area

ตาราง 8 การกำหนดโปรแกรมเวลา/อุณหภูมิ (Furnace Time/ Temp. Program) ของเครื่อง

Step	Temp. ($^{\circ}$ C)	Ramp time (Sec.)	Hold Time (Sec.)
Drying 1	110	1	5
Drying 2	130	5	15
Ashing	500	10	30
Atomization	1700	0	5
Cleaning	2450	1	3

ที่มา: Yang. 2009; 44-49

3. การเตรียมสารละลายมาตรฐาน

3.1 สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ใน 5% HNO_3

3.2 สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 32 ไมโครกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 1000 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 1.6 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย 5% HNO_3

3.3 สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 16 ไมโครกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 32 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วย 5% HNO_3

3.4 สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 8 ไมโครกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 16 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วย 5% HNO_3

3.5 สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 4 ไมโครกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 8 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วย 5% HNO_3

3.6 สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 2 ไมโครกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 4 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วย 5% HNO_3

3.7 สารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 1 ไมโครกรัมต่อลิตร

ปิเปตสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 2 ไมโครกรัมต่อลิตร ปริมาตร 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 50 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วย 5% HNO_3

4. การเตรียมตัวอย่าง

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนทั้งสามรูปแบบคือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง นำมาผ่านกระบวนการย่อยแบบวิธีการต้มด้วยกรด (Wet acid digestion) มีวิธีการดังนี้ (ภาพประกอบ 17)

1. การย่อยแบบวิธีการต้มด้วยกรด

1.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 1 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ 125 มิลลิลิตร

1.2 เติมกรดเข้มข้นผสมระหว่างกรดไนตริก /กรดเปอร์คลอริก /กรดซัลฟิวริก

(อัตราส่วน 24+24+1, v/v/v) ปริมาตร 10 มิลลิลิตร แล้วปิดด้วยกระจกนาฬิกา ทิ้งไว้ตลอดคืน

1.3 ให้ความร้อนด้วยเตาไฟฟ้า (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้เพื่อทำการย่อยจนกว่าไอสีขาวจะจางหายหมด แล้วการย่อยจะสมบูรณ์เมื่อตัวอย่างใหม่เหลือเป็นตะกอนสีขาวขุ่น จากนั้นยกลงตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง

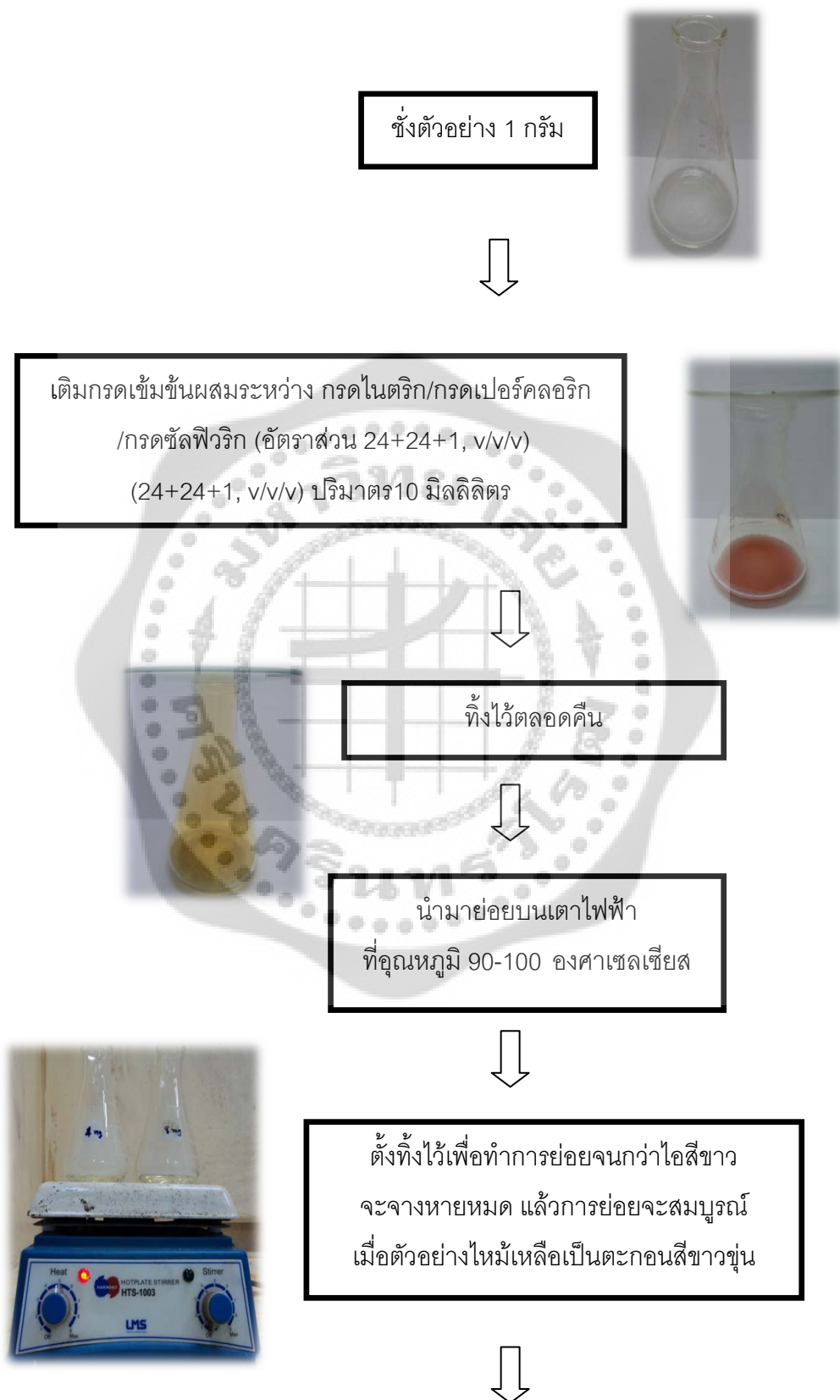
1.4 เติมกรดเข้มข้นผสม 3 มิลลิลิตร แล้วทำการย่อยอีกครั้งด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายไม่มีสี จากนั้นตั้งทิ้งไว้จนกว่าสารละลายจะระเหยแห้ง

1.5 ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำส่วนที่เหลือเจือจางด้วย 25 มิลลิลิตรของ 5% HNO_3

1.6 กรองด้วย syringe filter 0.45 ไมครอน แล้วนำตัวอย่างมาตรวจวัดด้วยเทคนิคกราฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโทรเมตรี



ขั้นตอนการย่อยแบบวิธีการย่อยด้วยกรด





ภาพประกอบ 17 ขั้นตอนการย่อยแบบวิธีการย่อยด้วยกรด

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก: Ciaralli. 1996; 381-385

5. การทดสอบความถูกต้องของวิธีทดสอบ

ทดสอบโดยนำครีมเบส (Cream base) ผสมกับซิลเวอร์นาโนที่ความเข้มข้นแตกต่างกัน แล้วนำไป formulate ให้เป็นเนื้อเดียวกัน โดยปรับระดับความแรงของเครื่องที่ระดับ 3 ใช้เวลานาน 10 นาที จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการย่อยแบบวิธีการย่อยด้วยกรด และตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกราฟิฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี

6. การควบคุมคุณภาพผลวิเคราะห์

6.1 Internal quality control

ศึกษา Detection limit ของเครื่อง GFAAS ตามข้อมูลของ URACHEM Guide-1998 โดยวิเคราะห์จากตัวอย่าง 5% HNO_3 ซ้ำ (Duplicate analysis) ทุก 10 ตัวอย่าง แล้วนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของตัวอย่าง บวกกับสามคูณด้วยค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) พบว่าเครื่อง มี Detection limit เท่ากับ 0.092 ไมโครกรัมต่อลิตร และมีช่วง % Recovery ระหว่าง 80-110 ซึ่งแสดงว่าวิธีมีความแม่นยำที่ยอมรับได้ และมีค่า Relative Percent Difference; RPD) ที่ยอมรับได้ไม่เกิน 10 %

7. การวิเคราะห์ปริมาณโลหะซิลเวอร์เริ่มต้นในตัวอย่าง

เมื่อตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนสามรูปแบบผ่านกระบวนการย่อยแล้ว จากนั้นนำมาวัดปริมาณโลหะซิลเวอร์ด้วยเทคนิคกราฟิฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี มีขั้นตอนดังนี้

7.1 นำตัวอย่างและสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตความเข้มข้น 1, 2, 4, 8, 16 และ 32 ไมโครกรัมต่อลิตร ที่เตรียมไว้เพื่อวิเคราะห์

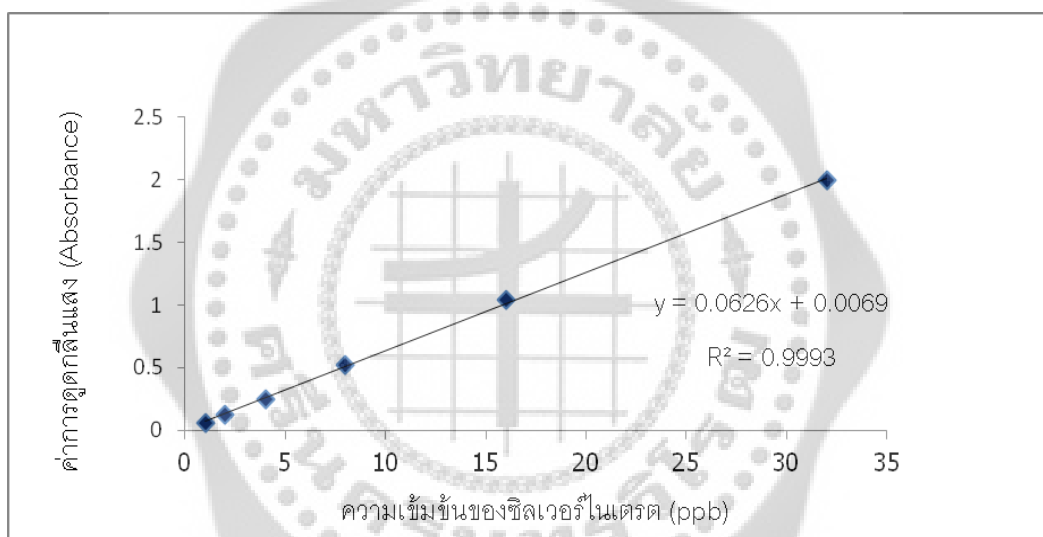
7.2 เปิดเครื่องกราฟิฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และคอมพิวเตอรืควบคุม

7.3 ป้อนข้อมูลธาตุที่จะวิเคราะห์ เช่น ซิลเวอร์ และตั้งสภาวะของเครื่องที่ใช้ในการวิเคราะห์ให้เรียบร้อย

7.4 วิเคราะห์แบลนด์ (5% HNO_3) ของสารมาตรฐานก่อน แล้วค่อยนำสารละลายมาตรฐานซิลเวอร์ในเตรตที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกราฟิฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน เนื่องจากการทำกราฟมาตรฐานของสารละลายซิลเวอร์ในเตรต เพื่อทดสอบความเชื่อมั่นของเครื่องมือและสภาวะที่ใช้ในการทดลองให้อยู่ในช่วงที่สามารถยอมรับได้ ตั้งแต่ 0.9500 ขึ้นไป ซึ่งสามารถทำการทดลองต่อไปกับสารตัวอย่างได้

7.5 วิเคราะห์แบลงค์ของตัวอย่างก่อนแล้วค่อยนำตัวอย่างมาวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกราไฟต์เฟออร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี บันทึกผลค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างโดยลบออกด้วยค่าการดูดกลืนแสงของแบลงค์ของตัวอย่าง

7.6 การหาความเข้มข้นของซิลเวอร์ในตัวอย่างสามารถคำนวณได้จากการสร้างกราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเตรต (แกน X) กับค่าการดูดกลืนแสง (แกน Y) (ดังภาพประกอบ 18) โดยมีตัวอย่างสมการความสัมพันธ์คือ $Y = 0.0626X + 0.0069$ และมีค่า Coefficient of determination เท่ากับ 0.9993 (Y คือ ค่าการดูดกลืนแสง, X คือ ความเข้มข้น) จากนั้นแทนค่าการดูดกลืนแสง เพื่อหาความเข้มข้นของซิลเวอร์ (ppb)



ภาพประกอบ 18 กราฟมาตรฐานระหว่างความเข้มข้นของซิลเวอร์ในเตรตกับค่าการดูดกลืนแสง

3. ศึกษาการซึมผ่านของโลหะซัลเฟอร์จากผลิตภัณฑ์ผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง เช่น ฟรานซ์ดีฟิวชันเซลล์

สำหรับการทดลองนี้เลือกระบบเมมเบรนของผิวหนัง คือ โพลีเอทีเธอร์ซัลโฟนเมมเบรน ปริมาณโลหะซัลเฟอร์ที่ซึมผ่านผิวหนังจำลองถูกนำมาตรวจวัดด้วยเทคนิคกราไฟต์เฟอโรเนสอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี

วิธีการทดลอง

1. การเตรียมสารละลาย

1.1 Receptor fluid เตรียมจาก 2.38 g Na_2HPO_4 , 0.19 g KH_2PO_4 และ 9 g NaCl ละลายด้วยน้ำ DI ปรับปริมาตร 1 ลิตร และปรับ pH 7.35

1.2 Donor fluid ที่ใช้คือ ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งสามรูปแบบคือ ของเหลวของแข็ง และกึ่งของแข็ง

2. วิธีการทดสอบความสามารถในการซึมผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง

2.1 ก่อนการทดลองทำความสะอาดฟรานซ์ดีฟิวชันเซลล์โดยการเช็ดด้วยสารละลายเอทานอลเจือจาง 70 %

2.2 นำแผ่นเมมเบรนลงในสารละลาย receptor ประมาณ 2 ชั่วโมงเพื่อให้เมมเบรนอิ่มตัว

2.3 เปิดสารละลาย receptor ลงใน receptor chamber ปริมาตร 13.5 มิลลิลิตร

2.4 ตัวอย่างจะถูกกระจายลงไปที่พื้นผิวของเมมเบรน ในบริเวณ donor chamber โดยศึกษาในสภาวะที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเปิด magnetic stirrer ระดับ 5

2.5 Donor top และ receptor arm ถูกปิดด้วยพาราฟิล์ม (parafilm) เพื่อป้องกันการระเหย

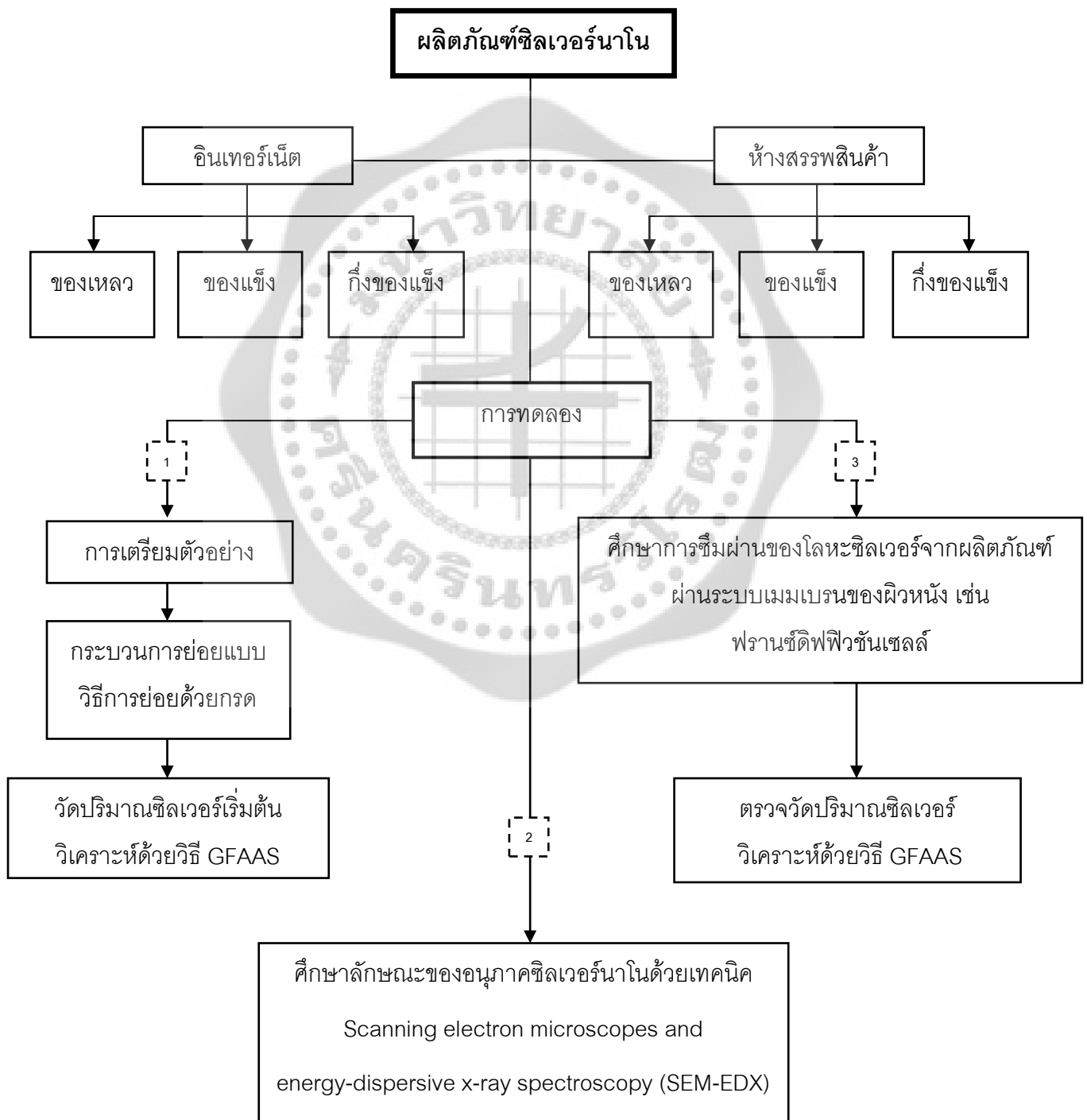
2.6 Sampling ตัวอย่างในชั้น receptor chamber ตัวอย่างหลังจากครบ 24 ชั่วโมง แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณของซัลเฟอร์ด้วยเทคนิคกราไฟต์เฟอโรเนสอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี

ที่มา: ดัดแปลงมาจาก: Larese. 2009; 33-37

4. ศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนทั้งสามรูปแบบคือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง จะถูกนำมาตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray analysis (EDX) ตามลำดับ

ภาพรวมขั้นตอนการทดลอง



บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในงานวิจัยครั้งนี้เกี่ยวข้องกับโอกาสการได้รับสัมผัสซิลเวอร์ทางผิวหนังจากผลิตภัณฑ์นาโนที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ผู้วิจัยได้แสดงผลการทดลองดังนี้

1. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์
2. ศึกษาการซึมผ่านของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง
3. ศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์

1. การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์

การวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์เริ่มต้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์ จากการทดลองผู้วิจัยได้เลือกตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนรูปแบบที่ใช้กับผิวหนังหรือมีโอกาสได้รับสัมผัสทางผิวหนัง ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนที่นำมาศึกษาจะมาจากที่มีจำหน่ายในประเทศไทยได้แก่ ห้างสรรพสินค้าและทางอินเทอร์เน็ต โดยมีการระบุว่าเป็น “ซิลเวอร์” และ “นาโน” บนฉลาก จากนั้นนำมาจัดกลุ่มจำแนกตามรูปแบบผลิตภัณฑ์ได้เป็นสามรูปแบบคือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง จากนั้นนำตัวอย่างไปผ่านกระบวนการย่อยด้วยกรด และตรวจวิเคราะห์ด้วยเทคนิคกราฟิฟิต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี ผลการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์เริ่มต้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์แสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 8 แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว (Liquid; L₁- L₇)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว			
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้นของซิลเวอร์ (ไมโครกรัมต่อกรัม)
อินเทอร์เน็ต	L ₁	สเปรย์ดับกลิ่น ภายในบ้าน	90 ± 2.0
อินเทอร์เน็ต	L ₂	สเปรย์ฉีดกำจัดและ ป้องกันเชื้อโรค	94 ± 5.3
อินเทอร์เน็ต	L ₃	สเปรย์ขจัดกลิ่นอับ บริเวณเท้า	46 ± 0.78
อินเทอร์เน็ต	L ₄	สเปรย์รักษาแผล	0.094 ± 0.0076
ห้างสรรพสินค้า	L ₅	สเปรย์ขจัดกลิ่นรองเท้า	0.028 ± 0.0018
ห้างสรรพสินค้า	L ₆	สเปรย์ระงับกลิ่นกาย	9.0 ± 0.58
ห้างสรรพสินค้า	L ₇	สเปรย์ปรับอากาศ	0.040 ± 0.0031

จากตาราง 8 แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์เริ่มต้นที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว (L₁- L₇) พบว่าสามารถเรียงลำดับจากผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลวจากผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณซิลเวอร์มากไปน้อยได้ดังนี้ L₂ > L₁ > L₃ > L₆ > L₄ > L₇ > L₅ ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์สเปรย์ฉีดกำจัดและป้องกันเชื้อโรค L₂ มีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุดและมีปริมาณเท่ากับ 94 ไมโครกรัมต่อกรัม และผลิตภัณฑ์สเปรย์ขจัดกลิ่นรองเท้า L₅ มีปริมาณซิลเวอร์น้อยที่สุดและมีปริมาณเท่ากับ 0.028 ไมโครกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์ที่มีโอกาสสัมผัสกับผิวหนังโดยตรงได้แก่ผลิตภัณฑ์ L₄ และ L₆ ซึ่งมีปริมาณซิลเวอร์ 0.094 และ 9.0 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ตาราง 9 แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง (Solid; S₁- S₅)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง			
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้นของซิลเวอร์ (ไมโครกรัมต่อกรัม)
อินเทอร์เน็ต	S ₁	แป้งพัฟผสมรองพื้น	3.9 ± 0.27
ห้างสรรพสินค้า	S ₂	แป้งฝุ่นโรยตัว	21 ± 2.1
ห้างสรรพสินค้า	S ₃	ผงซักฟอก	27 ± 2.3
ห้างสรรพสินค้า	S ₄	ผงซักฟอก	0.055 ± 0.0048
อินเทอร์เน็ต	S ₅	สบู่	0.036 ± 0.0005

จากตาราง 9 แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์เริ่มต้นในผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง (S₁- S₅) พบว่าสามารถเรียงลำดับผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็งจากผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณซิลเวอร์มากไปน้อยได้ดังนี้ S₃ > S₂ > S₁ > S₄ > S₅ ตามลำดับ ซึ่งผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก S₃ มีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุดและมีปริมาณเท่ากับ 27 ไมโครกรัมต่อกรัม และผลิตภัณฑ์สบู่ S₅ มีปริมาณซิลเวอร์น้อยที่สุดและมีปริมาณเท่ากับ 0.036 ไมโครกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็งได้แก่ S₁, S₂ และ S₅ มีโอกาสสัมผัสกับผิวหนังได้โดยตรง ซึ่งมีปริมาณซิลเวอร์ 3.9, 21 และ 0.036 ไมโครกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

ตาราง 10 แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง (Semisolid; G₁- G₇)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง			
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้นของซิลเวอร์ (ไมโครกรัมต่อกรัม)
ห้างสรรพสินค้า	G ₁	โรลออน	6.4 ± 0.76
ห้างสรรพสินค้า	G ₂	โรลออน	3.4 ± 0.28
อินเทอร์เน็ต	G ₃	โรลออน	0.086 ± 0.0076
อินเทอร์เน็ต	G ₄	ครีมทารักแร้	0.0058 ± 0.0004
ห้างสรรพสินค้า	G ₅	ครีมทาหน้า	0.016 ± 0.0014
ห้างสรรพสินค้า	G ₆	ยาสีฟัน	0.044 ± 0.0004
อินเทอร์เน็ต	G ₇	แชมพู	0.27 ± 0.037

จากตาราง 10 แสดงผลความเข้มข้นซิลเวอร์เริ่มต้นในผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง (G₁- G₇) พบว่าสามารถเรียงลำดับผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็งจากผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณซิลเวอร์มากไปน้อยได้ ดังนี้ G₁ > G₂ > G₃ > G₅ > G₄ ตามลำดับ โดยที่ผลิตภัณฑ์โรลออน G₁ มีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุด และมีปริมาณเท่ากับ 6.4 ไมโครกรัมต่อกรัม และผลิตภัณฑ์ครีมทารักแร้ G₄ มีปริมาณซิลเวอร์น้อยที่สุดและมีปริมาณเท่ากับ 0.0058 ไมโครกรัมต่อกรัม นอกจากนี้ผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็งทั้งหมดที่นำมาศึกษา (G₁-G₇) มีโอกาสสัมผัสกับผิวหนังโดยตรง ซึ่งมีปริมาณซิลเวอร์อยู่ในช่วง 0.0058 - 6.4 ไมโครกรัมต่อกรัม

จากผลการทดลองเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ทั้งสามรูปแบบ คือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง พบว่าผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว ได้แก่ ผลิตภัณฑ์สเปรย์ฉีดกำจัดและป้องกันเชื้อโรค L₂ มีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุดและมีปริมาณเท่ากับ 94 ไมโครกรัมต่อกรัม ขณะที่ผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ครีมทารักแร้ G₄ มีปริมาณซิลเวอร์น้อยที่สุดและมีปริมาณเท่ากับ 0.0058 ไมโครกรัมต่อกรัม

2. ศึกษาการซึมผ่านของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง

การซึมผ่านของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ทั้งสามรูปแบบคือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง ผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง เช่น ฟรอนซ์ดีฟิวชันเซลล์ โดยศึกษาในสภาวะที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สำหรับการทดลองนี้เลือกระบบเมมเบรนของผิวหนัง คือ โพลีเอทีเทอร์ซิลโฟเนมเมมเบรน ปริมาณโลหะซิลเวอร์ที่ซึมผ่านผิวหนังจำลอง ถูกนำมาตรวจวัดด้วยเทคนิคกราฟิฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี และสามารถคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของซิลเวอร์ในตัวอย่างได้จากสมการดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน} = \frac{\text{ปริมาณของ Ag ใน Receptor chamber (ไมโครกรัมต่อกรัม)}}{\text{ปริมาณของ Ag ใน Donor chamber (ไมโครกรัมต่อกรัม)}} \times 100$$

สำหรับผลการทดลองแสดงดังตารางต่อไปนี้

ตาราง 11 แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิดเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรนสำหรับผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว (Liquid; L₁- L₇)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว				
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้นของ Ag (ไมโครกรัมต่อกรัม)	การซึมผ่าน (%)
อินเทอร์เน็ต	L ₁	สเปรย์ดับกลิ่น ภายในบ้าน	39 ± 0.097	44 ± 0.11
อินเทอร์เน็ต	L ₂	สเปรย์ฉีดกำจัดและ ป้องกันเชื้อโรค	50 ± 0.053	53 ± 0.057
อินเทอร์เน็ต	L ₃	สเปรย์กำจัดกลิ่นอับ บริเวณเท้า	18 ± 0.017	38 ± 0.038
อินเทอร์เน็ต	L ₄	สเปรย์รักษาแผล	0.021 ± 0.0003	23 ± 0.38
ห้างสรรพสินค้า	L ₅	สเปรย์ขจัดกลิ่น รองเท้า	n.d.	-
ห้างสรรพสินค้า	L ₆	สเปรย์ระงับกลิ่นกาย	n.d.	-
ห้างสรรพสินค้า	L ₇	สเปรย์ปรับอากาศ	n.d.	-

จากตาราง 11 แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิตเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรนที่ใช้แทนระบบผิวหนังจำลอง สำหรับผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลวพบว่าสามารถเรียงลำดับจากผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของซิลเวอร์จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $L_2 > L_1 > L_3 > L_4$ ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์สเปรย์ฉีดกำจัดและป้องกันเชื้อโรค L_2 มีความเข้มข้นของซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านมากที่สุด ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 50 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเท่ากับ 53 % สำหรับผลิตภัณฑ์สเปรย์รักษาแผล L_4 มีความเข้มข้นของซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านน้อยที่สุด ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 0.021 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเท่ากับ 23 % นอกจากนี้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ L_5, L_6 และ L_7 ไม่พบการซึมผ่านของซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

ตาราง 12 แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิตเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรนสำหรับผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง (Solid; $S_1 - S_5$)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง				
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้นของ Ag (ไมโครกรัมต่อกรัม)	การซึมผ่าน (%)
อินเทอร์เนต	S_1	แป้งพัฟผสมรองพื้น	0.0084 ± 0.0002	0.22 ± 0.0051
ห้างสรรพสินค้า	S_2	แป้งฝุ่นโรยตัว	0.026 ± 0.0006	0.12 ± 0.0029
ห้างสรรพสินค้า	S_3	ผงซักฟอก	0.22 ± 0.0014	0.81 ± 0.0052
ห้างสรรพสินค้า	S_4	ผงซักฟอก	n.d.	-
อินเทอร์เนต	S_5	สบู่	n.d.	-

จากตาราง 12 แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิตเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรนที่ใช้แทนระบบผิวหนังจำลอง สำหรับผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็งพบว่าสามารถเรียงลำดับจากผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของซิลเวอร์จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $S_3 > S_2 > S_1$ ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์ผงซักฟอก S_3 มีความเข้มข้นซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านมากที่สุด ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 0.22 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเท่ากับ 0.81 % สำหรับผลิตภัณฑ์แป้งพัฟผสมรองพื้น S_1 มีความเข้มข้นซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านน้อยที่สุด ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 0.0084 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเท่ากับ 0.12 % นอกจากนี้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ S_4 และ S_5 ไม่พบการซึมผ่านของซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

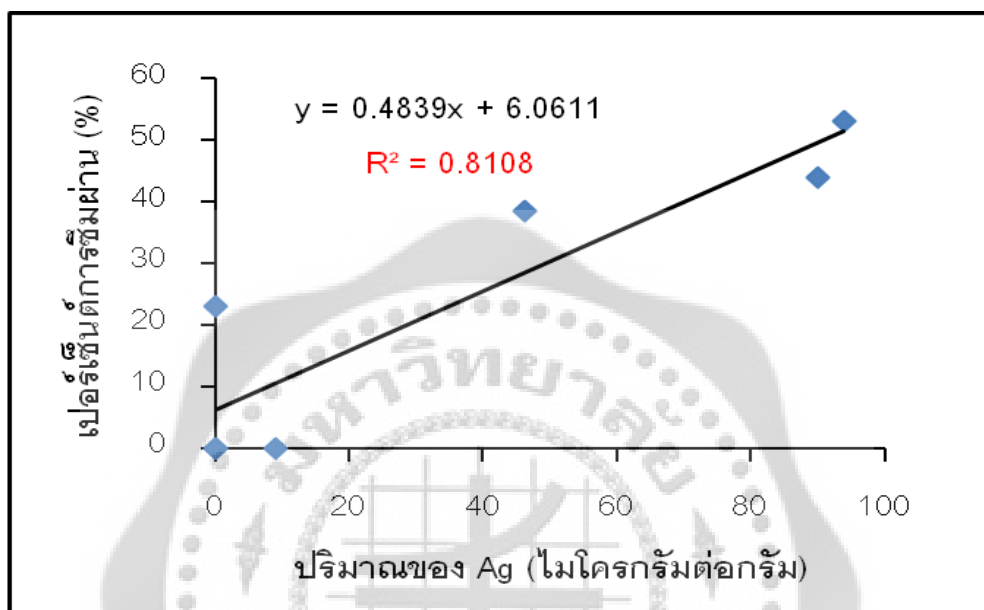
ตาราง 13 แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิตเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรน สำหรับผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง (Semisolid; G_1 - G_7)

ผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง				
แหล่งที่ได้มา	CODE	ผลิตภัณฑ์	ความเข้มข้นของ Ag (ไมโครกรัมต่อกรัม)	การซึมผ่าน (%)
ห้างสรรพสินค้า	G_1	โรลออน	0.30 ± 0.0009	4.8 ± 0.015
ห้างสรรพสินค้า	G_2	โรลออน	0.31 ± 0.011	9.1 ± 0.33
อินเทอร์เน็ต	G_3	โรลออน	n.d.	-
อินเทอร์เน็ต	G_4	ครีมทาผิว	n.d.	-
ห้างสรรพสินค้า	G_5	ครีมทาหน้า	n.d.	-
ห้างสรรพสินค้า	G_6	ยาสีฟัน	n.d.	-
อินเทอร์เน็ต	G_7	แชมพู	0.0023 ± 0.0001	0.86 ± 0.021

จากตาราง 13 แสดงผลปริมาณของซิลเวอร์คิตเป็นความเข้มข้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเมมเบรนที่ใช้แทนระบบผิวหนังจำลองในผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง พบว่าสามารถเรียงลำดับจากผลิตภัณฑ์ที่มีความเข้มข้นซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของซิลเวอร์จากมากไปน้อยได้ดังนี้ $G_2 > G_1 > G_7$ ตามลำดับ โดยผลิตภัณฑ์โรลออน G_2 มีความเข้มข้นของซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านมากที่สุด ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 0.31 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเท่ากับ 9.1 % สำหรับผลิตภัณฑ์แชมพู G_7 มีความเข้มข้นของซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านน้อยที่สุด ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 0.0023 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเท่ากับ 0.86 % นอกจากนี้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ G_3 , G_4 , G_5 และ G_6 ไม่พบการซึมผ่านของซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ดังกล่าว

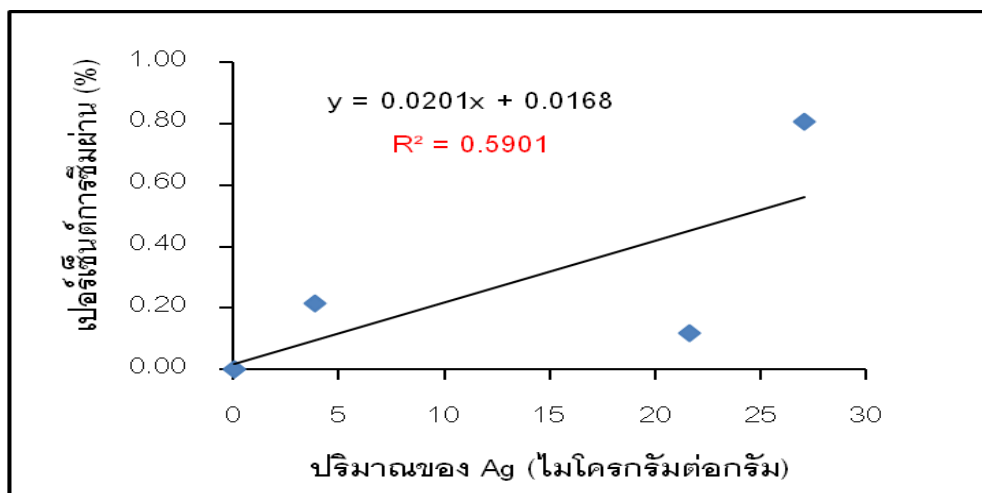
จากผลการทดลองเบื้องต้นของผลิตภัณฑ์ทั้งสามรูปแบบ คือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง พบว่าผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว ได้แก่ ผลิตภัณฑ์สเปรย์ฉีดกำจัดและป้องกันเชื้อโรค L_2 มีความเข้มข้นซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านมากที่สุด ซึ่งมีปริมาณเท่ากับ 50 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเท่ากับ 53 % ขณะที่ผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง ได้แก่ ผลิตภัณฑ์แชมพู G_7 มีความเข้มข้นซิลเวอร์และเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านน้อยที่สุด โดยมีปริมาณเท่ากับ 0.0023 ไมโครกรัมต่อกรัม และมีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านเท่ากับ 0.86 %

จากผลการทดลองการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะซิลเวอร์ที่มีอยู่ในผลิตภัณฑ์และศึกษาการซึมผ่านของโลหะซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ผ่านระบบเมมเบรนของผิวหนัง จึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ของปริมาณซิลเวอร์เริ่มต้นและเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของซิลเวอร์ในแต่ละผลิตภัณฑ์ แสดงดังภาพประกอบต่อไปนี้



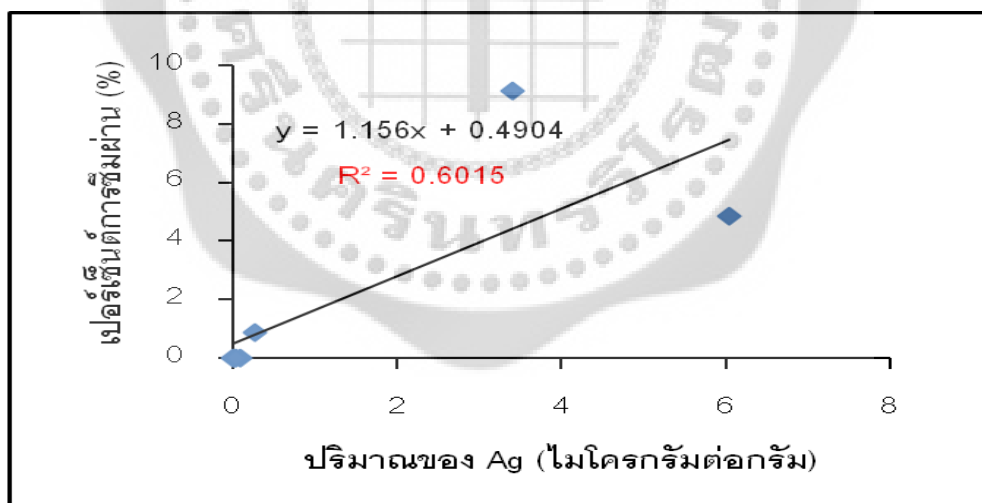
ภาพประกอบ 19 กราฟระหว่างปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลวกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน

จากภาพประกอบ 19 เมื่อนำปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลวกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านมาพลอตกราฟ พบว่าจะได้กราฟเส้นตรง ที่มีสมการ คือ $y = 0.4839x + 6.0611$ และมีค่า Coefficient of determination เท่ากับ 0.8108



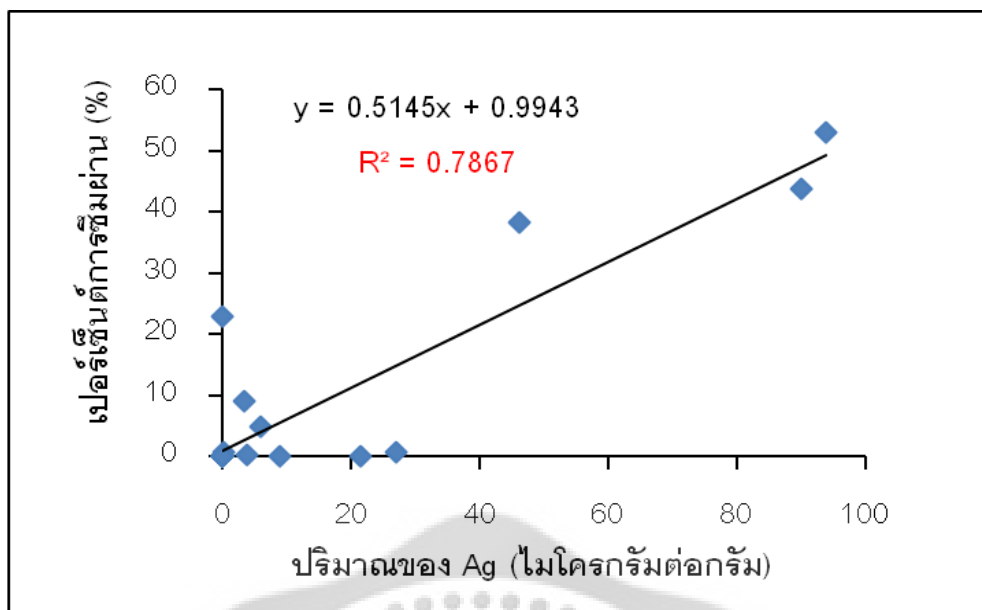
ภาพประกอบ 20 กราฟระหว่างปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรตในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็งกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน

จากภาพประกอบ 20 เมื่อนำปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรตในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็งกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านมาพลอตกราฟ พบว่าจะได้กราฟเส้นตรง ที่มีสมการ คือ $y = 0.0201x + 0.0168$ และมีค่า Coefficient of determination เท่ากับ 0.5901



ภาพประกอบ 21 กราฟระหว่างปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรตในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็งกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน

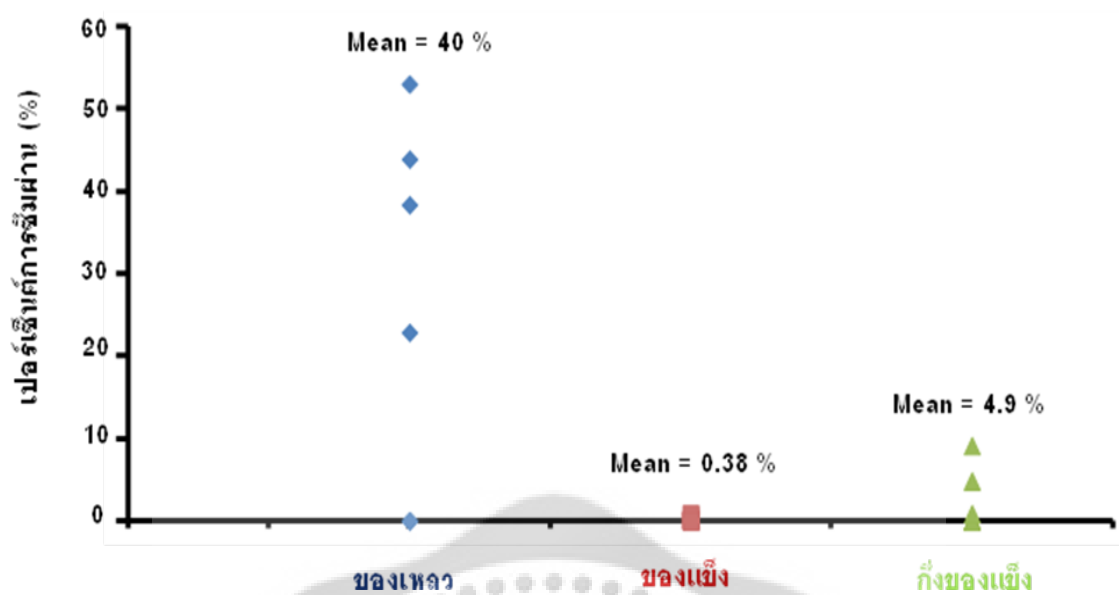
จากภาพประกอบ 21 เมื่อนำปริมาณของซิลเวอร์ไนเตรตในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็งกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านมาพลอตกราฟ พบว่าจะได้กราฟเส้นตรง ที่มีสมการคือ $y = 1.156x + 0.4904$ และมีค่า Coefficient of determination เท่ากับ 0.6015



ภาพประกอบ 22 กราฟระหว่างปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งหมด กับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน

จากภาพประกอบ 22 เมื่อนำปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทั้งหมดกับเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านมาพลอตกราฟ พบว่า จะได้กราฟเส้นตรงที่มีสมการ คือ $y = 0.5145x + 0.9943$ และมีค่า Coefficient of determination เท่ากับ 0.7867

จากการทดลองพบว่า จากภาพประกอบ 22 แสดงถึงสมการเส้นตรง ที่มีค่า Coefficient of determination เท่ากับ 0.7867 ซึ่งมีค่าเข้าใกล้หนึ่ง ดังนั้นเปอร์เซ็นต์การซึมผ่าน (ไมโครกรัมต่อกรัม) จึงขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลเวอร์ (ไมโครกรัมต่อกรัม) ในแต่ละผลิตภัณฑ์ และจากภาพประกอบ 19-21 มีแนวโน้มเช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงถึงปริมาณของซิลเวอร์ในตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว กึ่งของแข็ง และของแข็งตามลำดับ โดยพบว่าการซึมผ่านของตัวอย่างผลิตภัณฑ์ของเหลวขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลเวอร์ในของเหลว > ผลิตภัณฑ์กึ่งของแข็ง > ผลิตภัณฑ์ของแข็ง ตามลำดับ



ภาพประกอบ 23 กราฟระหว่างรูปแบบของผลิตภัณฑ์กับเปอร์เซ็นต์การอิ่มผ่าน

จากภาพประกอบ 23 เมื่อพลอตกราฟระหว่างรูปแบบของผลิตภัณฑ์กับเปอร์เซ็นต์การอิ่มผ่านพบว่า ตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลวมีเปอร์เซ็นต์การอิ่มผ่านมากที่สุดคือมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 40 % รองลงมาคือผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็งเท่ากับ 4.9 % และผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็งมีเปอร์เซ็นต์การอิ่มผ่านน้อยที่สุดคือ 0.38 % และมีค่าความแตกต่างทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) จึงสามารถสรุปได้ว่า รูปแบบของผลิตภัณฑ์มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การอิ่มผ่าน โดย ผลิตภัณฑ์ของเหลว > กึ่งของแข็ง > ของแข็ง ตามลำดับ

3. ศึกษาลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนทั้งสามรูปแบบคือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง จะถูกนำมาตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray analysis (EDX) ตามลำดับ สำหรับขั้นตอนการเตรียมชิ้นงานมีดังนี้

1. ทำความสะอาดแท่นทองเหลือง (Stub) โดยเช็ดด้วยสารละลายเอทานอล 70 %
2. ติดเทปทองแดง (Carbon tab) บนแท่นทองเหลือง
3. เตรียมตัวอย่างผลิตภัณฑ์ลงบนแท่นทองเหลือง มีวิธีการเตรียม 2 วิธี ดังนี้
 - 3.1 นำตัวอย่างหยดลงบนเทปทองแดง (Carbon tab) ที่ติดไว้ แล้วนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น
 - 3.2 นำตัวอย่างมาเจือจางในน้ำกลั่นและหยดลงบนเทปทองแดงที่ติดไว้ แล้วนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น
4. จากนั้นทำการเคลือบผิวของชิ้นงานด้วยทองคำ
5. ทำการตรวจสอบชิ้นงานด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
6. เมื่อถ่ายภาพ SEM แล้ว จึงเลือกจุดหรือพื้นที่ในการตรวจสอบชนิดและปริมาณธาตุด้วยเทคนิคการกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy dispersive x-ray analysis; EDX)

ผลการทดลอง

1. การตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค SEM-EDX ของตัวอย่างรูปแบบของเหลว (L_1 - L_7)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จะถูกเตรียมโดยนำตัวอย่างหยดลงบนเทปทองแดงที่ติดไว้บนแท่นทองเหลือง แล้วนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์ตามลำดับ สำหรับผลการทดลองมีดังนี้

เมื่อตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค SEM-EDX ของผลิตภัณฑ์ L_1 และ L_2 พบว่าลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีขนาดเล็กเป็นทรงกลม รวมทั้งอนุภาคซิลเวอร์นาโนมีขนาดเดียว และอนุภาคที่เกิดการรวมกลุ่มกัน ทำให้ขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่ในช่วง 1-10 ไมครอน สำหรับสเปคตรัมที่ได้พบว่ามีธาตุ Ag เป็นองค์ประกอบ

อย่างไรก็ตามพบว่าผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลวได้แก่ ผลิตภัณฑ์ L_3 , L_4 , L_5 , L_6 และ L_7 ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ อีกทั้งสเปคตรัมที่ได้ไม่พบธาตุ Ag เป็นองค์ประกอบ

2. การตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยเทคนิค SEM-EDX ของตัวอย่างรูปแบบของแข็ง (S₁- S₅)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จะถูกเตรียมโดยนำมาเจือจางในน้ำกลั่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม และหยดลงบนเทปทองแดงที่ติดไว้บนแท่นทองเหลือง แล้วนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค SEM-EDX ของผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง (S₁- S₅) ตามลำดับ

สำหรับผลการทดลอง พบว่าไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ อีกทั้งสเปกตรัมที่ได้ไม่พบธาตุ Ag เป็นองค์ประกอบ

3. การตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโน ด้วยเทคนิค SEM-EDX ของตัวอย่างรูปแบบกึ่งของแข็ง (G₁- G₇)

ตัวอย่างผลิตภัณฑ์จะถูกเตรียมโดยนำมาเจือจางในน้ำกลั่นในอัตราส่วนที่เหมาะสม และหยดลงบนเทปทองแดงที่ติดไว้บนแท่นทองเหลือง แล้วนำไปเก็บในตู้ดูดความชื้น จากนั้นนำไปวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค SEM-EDX ของผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง (G₁- G₇) ตามลำดับ

สำหรับผลการทดลอง พบว่าไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ อีกทั้งสเปกตรัมที่ได้ไม่พบธาตุ Ag เป็นองค์ประกอบเช่นเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาโอกาสการได้รับสัมผัสซิลเวอร์ทางผิวหนังจากผลิตภัณฑ์นาโนที่มีจำหน่ายในประเทศไทย ซึ่งได้สรุปผล อภิปรายผลการวิจัย และให้ข้อเสนอแนะดังนี้

จากการศึกษาการวิเคราะห์หาปริมาณซิลเวอร์เริ่มต้นโดยใช้เทคนิคกราฟต์เฟอร์เนชอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโทรเมตรี เมื่อพิจารณาแบ่งตามรูปแบบของผลิตภัณฑ์ซึ่งจำแนกออกได้เป็นสามรูปแบบคือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง พบว่าผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว L_2 มีปริมาณซิลเวอร์มากที่สุด รองลงมาคือผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง และผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง G_4 มีปริมาณซิลเวอร์น้อยที่สุด ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากแหล่งที่ได้มาของผลิตภัณฑ์โดยแบ่งออกเป็น 2 แหล่ง คือผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายตามห้างสรรพสินค้าและผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายทางอินเทอร์เน็ต จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายทางอินเทอร์เน็ตมีปริมาณซิลเวอร์มากกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีจำหน่ายตามห้างสรรพสินค้า อย่างไรก็ตามแหล่งที่ได้มาอาจไม่ใช่ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อปริมาณซิลเวอร์ในผลิตภัณฑ์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนที่มีจำหน่ายทางอินเทอร์เน็ตมีจำนวนมากและมีความหลากหลายในท้องตลาดเมืองไทย จึงเป็นการยากในการสรุปความเป็นไปได้ดังกล่าว โดยพบว่าการใช้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์ หากปริมาณการใช้ผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนเพิ่มมากขึ้น ในอนาคตอาจเกิดผลกระทบต่อผู้บริโภคและส่งผลกระทบต่อระบบนิเวศนี้ได้

อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือนและผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องสำอาง จากการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้ในครัวเรือนมีปริมาณซิลเวอร์มากกว่าผลิตภัณฑ์ประเภทเครื่องสำอาง เนื่องจากการใช้อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีส่วนช่วยเพิ่มคุณสมบัติที่ดีของผลิตภัณฑ์ในการกำจัดกลิ่นและยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ในผลิตภัณฑ์ดังกล่าวจึงอาจจำเป็นต้องมีปริมาณซิลเวอร์เพิ่มมากขึ้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของผลิตภัณฑ์

โดยส่วนใหญ่ผลิตภัณฑ์ที่ขายตามท้องตลาดมักไม่ระบุปริมาณของซิลเวอร์บนฉลากจึงเป็นการยากที่จะประเมินการได้รับสัมผัส จากการทดลองนี้พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ใช้กับผิวหนังโดยตรงมีปริมาณซิลเวอร์น้อยกว่าผลิตภัณฑ์ที่มีโอกาสได้รับสัมผัสผิวหนังทางอ้อม ขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่สัมผัสกับผิวหนังโดยตรงมีจำนวนมากทั้งในผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว (L_4 และ L_6) ผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง (S_1 , S_2 และ S_5) และผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง (G_1 - G_7) ผลิตภัณฑ์เหล่านี้ล้วนเกี่ยวข้องกับชีวิตประจำวันของมนุษย์ ซึ่งมีโอกาสได้รับสัมผัสทางผิวหนังโดยตรงอยู่เป็นประจำ เมื่อร่างกายได้รับ

ปริมาณซิลเวอร์ถึงแม้ในปริมาณที่น้อยแต่สะสมเป็นระยะเวลานานก็อาจส่งผลกระทบต่อร่างกายได้เช่นเดียวกัน

จากการศึกษาโอกาสการซึมของซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์สูผิวหนังโดยใช้ระบบเมมเบรนของผิวหนัง ฟรานซ์ดีฟฟิวชันเซลล์ พบว่าผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว L_2 มีปริมาณซิลเวอร์ที่ซึมผ่านมากที่สุด และผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง G_7 มีปริมาณซิลเวอร์ที่ซึมผ่านน้อยที่สุด สำหรับผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว L_2 มีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของซิลเวอร์มากที่สุด และผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง S_2 มีเปอร์เซ็นต์การซึมผ่านของซิลเวอร์น้อยที่สุด นอกจากนี้ตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว (L_5 , L_6 และ L_7) ผลิตภัณฑ์รูปแบบของแข็ง (S_4 และ S_5) และผลิตภัณฑ์รูปแบบกึ่งของแข็ง (G_3 , G_4 , G_5 และ G_6) ที่ไม่พบปริมาณของซิลเวอร์และการซึมผ่านของซิลเวอร์จากผลิตภัณฑ์ดังกล่าว อาจเนื่องมาจากการซึมผ่านของซิลเวอร์ขึ้นอยู่กับปริมาณของซิลเวอร์เริ่มต้นที่มีอยู่ในแต่ละผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณน้อยรวมทั้งรูปแบบของผลิตภัณฑ์

จากการตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิค Scanning electron microscope (SEM) และ Energy Dispersive X-Ray analysis (EDX) ตามลำดับ สำหรับตัวอย่างผลิตภัณฑ์ซิลเวอร์นาโนทั้งสามรูปแบบคือ ของเหลว ของแข็ง และกึ่งของแข็ง จากผลการทดลอง พบว่ามีเพียงตัวอย่างผลิตภัณฑ์รูปแบบเพียง 2 ชนิด คือ ผลิตภัณฑ์ L_1 และ L_2 ที่สามารถตรวจวิเคราะห์ลักษณะของอนุภาคซิลเวอร์นาโนด้วยเทคนิคดังกล่าวได้ และยืนยันได้ว่าอนุภาคซิลเวอร์นาโนในผลิตภัณฑ์ L_1 และ L_2 มีขนาดเล็กเป็นทรงกลม มีทั้งอนุภาคขนาดเดี่ยว และที่เกิดการรวมกลุ่ม ทำให้ขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนอยู่ในช่วง 1-10 ไมครอน อีกทั้งสำหรับสเปคตรัมที่ได้ยืนยันการพบธาตุ Ag เป็นองค์ประกอบ ขณะที่ผลิตภัณฑ์รูปแบบของเหลว (L_3 - L_7) รูปแบบของแข็ง (S_1 - S_5) และรูปแบบกึ่งของแข็ง (G_1 - G_7) ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนได้ อาจเนื่องมาจากในองค์ประกอบของผลิตภัณฑ์อาจมีสารอินทรีย์จำนวนมากบดบังไว้ในระหว่างการตรวจวิเคราะห์ หรือซิลเวอร์ที่อยู่ในผลิตภัณฑ์อาจเป็นซิลเวอร์รูปแบบอื่นที่ไม่ใช่ลักษณะของอนุภาครวมทั้งวิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบอาจยังไม่เหมาะสมกับแต่ละผลิตภัณฑ์ จึงทำให้ไม่สามารถตรวจวิเคราะห์ได้ ดังนั้นการศึกษาวิธีเตรียมตัวอย่างให้เหมาะสมกับแต่ละผลิตภัณฑ์เพื่อตรวจวิเคราะห์ลักษณะและขนาดของอนุภาคซิลเวอร์นาโนภาคจึงเป็นสิ่งจำเป็น

ข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะเป็นพื้นฐานของวิธีการหาปริมาณโลหะนาโนในผลิตภัณฑ์ต่างๆ และโอกาสเข้าสู่ร่างกายเมื่อได้รับสัมผัสทางผิวหนัง เพื่อนำไปสู่การประเมินความเสี่ยงของการได้รับสัมผัส และการเกิดผลกระทบต่อสุขภาพของบริโภค นอกจากนี้ยังเป็นแนวทางสำหรับการทดสอบด้านความปลอดภัยเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์นาโนของไทยต่อไป



บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- แม่น อมรสิทธิ์; และ อมร เพชรสม. (2535). *หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์.
- โศรดา กนกพานนท์; และคนอื่นๆ. (2550). *อนุภาคนาโนจากเวกซ์ของเซลล์เพื่อการนำส่งสารสกัดจากธรรมชาติ*. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ. กรุงเทพฯ: 1-6.
- สรศักดิ์ ใจใคร่ครวญ. (2552, มกราคม). การทำความสะอาดโดยตัวเร่งปฏิกิริยาทางแสงไททาเนียมออกไซด์. *วารสารวิทยาศาสตร์บริการ*. 52(179): 21-24.
- Ayres, R. U.; et al. (2002). The Life cycle of copper, its co-products and by-products mining. Minerals and sustainable development. France.
- Benn, T. M.; & Westerhoff, P. (2008). Nanoparticle silver released into water from commercially available sock fabrics. *Environ. Sci. Technol.* 42: 4133-4139.
- Blaser, S. A.; et al. (2008). Estimation of cumulative aquatic exposure and risk due to silver: Contribution of nano-functionalized plastics and textiles. *Sci. Total Environ.* 390: 396-409.
- Boxall, A.; et al. (2007). Current and future predicted environmental exposure to engineered nanoparticles. *Central Science Laboratory*. Sand Hutton.
- Braydich-Stolle L.; et al. (2005). In vitro cytotoxicity of nanoparticles in mammalian germline stem cells. *Tox. Sci.* 88: 412-419.
- Burrell, R. E.; et al. (1999). Efficacy of silver-coated dressings as bacterial barriers in a rodent burn sepsis model. *Wounds*. 11: 64-71.
- Buzea, C.; Pacheco I.; & Robbie, K. (2007). Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases*. 2(4): MR17-MR172.
- Chen, X.; & Schluesener, H. J. (2008). Nanosilver: A nanoparticle in medical application. *Toxicol. Lett.* 176: 1-12.

- Ciaralli L.; et al. (1996). Determination of chromium and nickel in commercial foam bath products by ETA-AAS. *Istituto Superiore di Sanita*. 32: 381-385.
- Clement, J. L.; & Jarrett, P. S. (1994). Antibacterial silver metal based drugs. *Appl. Environ. Microbiol.* 73: 1712-1720.
- Elechiguerra, J. L.; et al. (2005). Interaction of silver nanoparticles with HIV-1. *BioMed. Central.* 3: 1-10.
- Farkas, J.; et al. (2011). Characterization of the effluent from a nanosilver producing washing machine. *Environ. Int.* 1-6.
- Furno, F.; et al. (2004). Silver nanoparticles and polymeric medical devices: A new approach to prevention of infection?. *J. Antimicrob. Chemother.* 54: 1019-1024.
- Gabbanini, S.; et al. (2010). Analysis of in vitro release through reconstructed human epidermis and synthetic membranes of multi-vitamins from cosmetic formulations. *J. Pharmaceut. Biomed. Anal.* 52: 461-467.
- Gill, M. (2007). Nanotechnology: what is it? geology 2007 symposium, *CalEPA HQ Sacramento*. 9-10.
- Greulich, C.; et al. (2011). Uptake and intracellular distribution of silver nanoparticles in human mesenchymal stem cells. *Acta. Biomaterialia.* 7: 347-354.
- Hackenberg, S.; et al. (2011). Silver nanoparticles: Evaluation of DNA damage, toxicity and functional impairment in human mesenchymal stem cells. *Toxicol. Lett.* 201: 27-33.
- Hermanson, K. D.; et al. (2001). Dielectrophoretic assembly of electrically functional microwires from nanoparticle suspensions. *Science.* 294: 1082-1086.

- Hussain SM.; et al. (2005). In vitro toxicity of nanoparticles in BRL3A rat liver cells. *Toxicol. in Vitro*. 19: 975-983.
- Hyun, J.; et al. (2008). Effects of repeated silver nanoparticles exposure on the histological structure and mucins of nasal respiratory mucosa in rats. *Toxicol. Lett.* 182: 24-28.
- International Standards Organization; ISO/TS 27687. (2008). Technical specification. 1st ed. Switzerland.
- Kaegi, R.; et al. (2010). Release of silver nanoparticles from outdoor facades. *Environ. Pollut.* 158: 2900-2905.
- Kim, J. S.; et al. (2007). Antimicrobial effects of silver nanoparticles. *Nanomedicine*. 3: 95-101.
- Kimbrell, G. A. (2006). Nanomaterials in consumer products and FDA regulation. *The International center for technology assessment.*: 1-24.
- Kulthong, K.; et al. (2010). Determination of silver nanoparticle release from antibacterial fabrics into artificial sweat. *BioMed. Central*. 7: 1-9.
- Kwon, H. B. (2009). A case of argyria following colloidal silver ingestion. *Ann. Dermatol.* : 308-310.
- Larese, F.; et al. (2009a). Human skin penetration of silver nanoparticles through intact and damaged skin. *Toxicol.* 255: 33-37.
- (2009b). In vitro absorption of metal powders through intact and damaged human skin. *Toxicol. in Vitro*. 23: 574-579.

- Morones, J. R.; et al. (2005). The bactericidal effect of silver nanoparticles. *Nanotechnology*. 16: 2346-2353.
- Moss, A. P.; et al. (1979). The ocular manifestations and functional effects of occupational argyrosis. *Arch. Ophthalmol.* 97: 906-908.
- Panyala, N. R.; Pena-Mendez, E. M.; & Havel, J. (2008). Silver or silver nanoparticles: A hazardous threat to the environment and human health?. *Appl. Biomed.* 6: 117-129.
- Piao, M. J.; et al. (2011). Silver nanoparticles induce oxidative cell damage in human liver cells through inhibition of reduced glutathione and induction of mitochondria-involved apoptosis. *Toxicol. Lett.* 201: 92-100.
- Quadros, M. E.; & Marr, L. C. (2010). Environmental and human health risks of aerosolized silver nanoparticles. *J. Air Waste Manag. Assoc.*: 770-78.
- Razmjou, A.; Mansouri, J.; & Chen, V. (2011). The effects of mechanical and chemical modification of TiO₂ nanoparticles on the surface chemistry, structure and fouling performance of PES ultrafiltration membranes. *J. Membr. Sci.* 378: 73-84.
- Roduner, E. (2006). Size matters: why nanomaterials are different. *Chem. Soc. Rev.* 35: 583-592.
- Sharma, V. K.; Yngard, R. A.; & Lin, Y. (2010). Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities. *Chem. Phys. Lett.* 487: 92-96.
- Shi, Q.; et al. (2008). Probing molecular-level surface structures of polyethersulfone/pluronic F127 blends using sum-frequency generation vibrational spectroscopy. *Langmuir.* 24: 7939-7946.

- Stebounova, L. V.; et al. (2011). Nanosilver induces minimal lung toxicity or inflammation in a subacute murine inhalation model. *BioMed. Central.* 8: 1-12.
- Sun, R. W.; et al. (2005). Silver nanoparticles fabricated in HEPES buffer exhibit cytoprotective activities toward HIV-1 infected cells. *Chem. Commun. (Camb.)*. : 5059-5061.
- Tolaymat, T.; et al. (2010). An evidence-based environmental perspective of manufactured silver nanoparticle in syntheses and applications: A systematic review and critical appraisal of peer-reviewed scientific papers. *Sci. Total Environ.* 5: 999-1006.
- Wadhera, A.; & Fung, M. (2005). Systemic argyria associated with ingestion of colloidal silver. *Dermatol. Online J.* 11: 1-12.
- Wei, L.; et al. (2010). Investigation of the cytotoxicity mechanism of silver nanoparticles in vitro. *Biomed. Mater.* 5: 1-6.
- Wright, J. B.; et al. (1999). Efficacy of topical silver against fungal burn wound pathogens. *Am. J. Infect. Contr.* 27: 344-350.
- Yan, W.; et al. (2006). A novel, practical and green synthesis of Ag nanoparticles catalyst and its application in three-component coupling of aldehyde, alkyne, and amine. *J. Mol. Catal. Chem.* 255: 81-85.
- Yang, G.; et al. (2009). Study on solid phase extraction and graphite furnace atomic absorption spectrometry for the determination of nickel, silver, cobalt, copper, cadmium and lead with MCI GEL CHP 20Y as sorbent. *J. Hazard. Mater.* 162: 44-49.



ภาคผนวก

อภิธานศัพท์

μL

Microlite

$\mu\text{g/g}$

Microgram per gram

AB

Alcian blue

Ag

Silver

AgNO_3

Silver nitrate

Ag-NP

Silver nanoparticles

AgS

Silver sulfide

As

Arsenic

Cl

Chlorine

Cu

Copper

DNA

Deoxyribonucleic acid

EDX

Energy dispersive x-ray analysis

FIB

Scanning electron microscopy focused ion beam

GFAAS

Graphite Furnace Atomic Absorption Spectrometry

H_2S

Hydrogen sulfide



อภิธานศัพท์ (ต่อ)**Hg**

Mercury

HID-AB

High iron diamine-alcian blue

HIV - 1

Human immunodeficiency virus type 1

hMSCs

Human mesenchymal stem cells

HPLC-DAD

High Performance Liquid Chromatography equipped with a diode-array detector

ICP-MS

Inductively coupled plasma mass spectrometry

ICP-OES

Inductively coupled plasma optical emission spectroscopy

ISE

Ion selective electrode

kPa

Kilopascal

MWCO

Molecular weight cut-off

nm

Nanometer

NTA

Nanoparticle tracking analysis

O₃

Ozone

PAS

Periodic acid Schiff

อภิธานศัพท์ (ต่อ)

PECs

Predicted environmental concentrations

PES

Polyethersulfone

PNECs

Predicted no-effect concentrations

ppb

Part per billion

ppm

Parts per million

RHE

Human epidermis

Sb

Antimony

Se

Selenium

Sec.

Section

SEM

Scanning electron microscopy

SLN

Solid lipid nanoparticles

SnCl_2

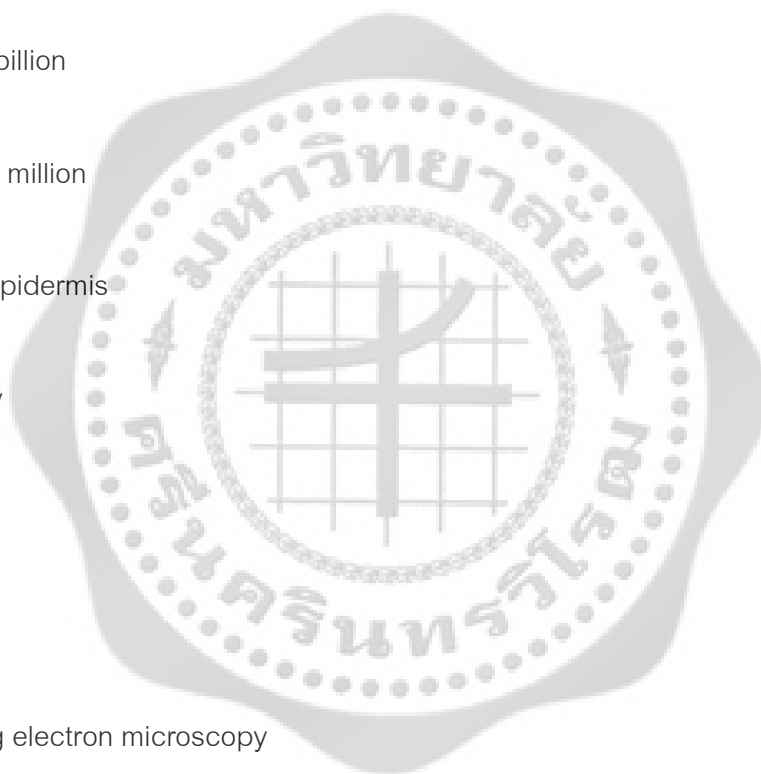
Stannous chloride

TEM

Transmission electron microscopy

Temp.

Temperature





ประวัติย่อของผู้วิจัย

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อสกุล นางสาวนุจรินทร์ วะสุกัน
 วันเดือนปีเกิด 1 ตุลาคม พ.ศ. 2530
 สถานที่เกิด จังหวัดอำนาจเจริญ
 สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 19 หมู่ 11 ตำบลแมต อำเภอสิ้ออำนาจ
 จังหวัดอำนาจเจริญ 37000

ตำแหน่งหน้าที่การงานในปัจจุบัน -

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2549 มัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนอำนาจเจริญ
 อำเภอเมือง จังหวัดอำนาจเจริญ
 พ.ศ. 2553 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเคมี
 จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดกรุงเทพมหานคร
 พ.ศ. 2555 วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเคมี
 จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จังหวัดกรุงเทพมหานคร