



การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ PAMAM dendrimer-like ซึ่งตรึงอยู่บนผิว silica

โดย

นายกิตติพัฒน์ เล่งเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ PAMAM dendrimer-like ซึ่งตรึงอยู่บนผิว silica

โดย

นายกิตติพัฒน์ เล่งเจริญ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

**REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM SOLUTION USING PAMAM DENDRIMER -
LIKE IMMOBILIZED ON SILICA SURFACE**

By

Kittipat Lengcharoen

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree

MASTER OF ENGINEERING

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School

SILPAKORN UNIVERSITY

2007

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร อนุมัติให้วิทยานิพนธ์เรื่อง “ การกำจัดโลหะหนัก
จากสารละลายโดยใช้ PAMAM dendrimer-like ซึ่งตรึงอยู่บนผิว silica ” เสนอโดย นายกิตติพัฒน์
เล่งเจริญ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา
วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริชัย ชินะดังกูร)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน..... พ.ศ.....

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

1. อาจารย์ ดร.อำนาจ สิริหัตถะกุล
2. อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(อาจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ ชัยยุตต์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(ดร.อรุณ โชติพงศ์)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.อำนาจ สิริหัตถะกุล)

...../...../.....

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

...../...../.....

48402202 : สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์

คำสำคัญ : การดูดซับ / ไอออนโลหะหนัก / PAMAM dendrimer / silica gel

กิตติพัฒน์ เล่งเจริญ : การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ PAMAM dendrimer-like ซึ่งตรึงอยู่บนผิว silica. อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : อ.ดร.อำนาจ สิริตตะระกุล และ อ.ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส. 118 หน้า.

งานวิจัยนี้เป็นการเตรียม PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel และทำการปรับปรุงผิวของ PAMAM ที่ตรึงบนผิว silica gel ด้วย phthaloyl chloride โดยขั้นแรก silica gel จะถูกทำปฏิกิริยากับ 3-aminopropyltriethoxysilane จากนั้น PAMAM dendrimer จะถูกสังเคราะห์ขึ้นบนผิว silica gel โดยใช้วิธีการ divergent ซึ่งประกอบด้วย 2 ขั้นตอนที่ต้องทำสลับกัน คือ 1) ปฏิกิริยา Michael addition ระหว่าง methyl acrylate กับ หมู่อะมิโนซึ่งอยู่ที่ผิวของ dendrimer และ 2) ปฏิกิริยา amidation ระหว่างหมู่เอสเทอร์ที่เกิดจากขั้นตอนแรกกับ methyl acrylate ซึ่งจะทำให้เกิดเป็นหมู่อะมิโนขึ้นที่ผิว โดยทำ 2 ขั้นนี้สลับกัน จนได้เป็น PAMAM dendrimer generation ที่ 3 และสุดท้ายเป็นการปรับปรุงผิวนอกของ PAMAM grafted silica gel ที่ได้โดยให้ทำปฏิกิริยากับ phthaloyl chloride จากนั้นจึงทำการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค FT-IR, TGA และการไตเตรดเพื่อหาปริมาณหมู่อะมิโน พบว่าการเติบโตของ dendrimer บนผิว silica gel ไม่เป็นตามทฤษฎี แต่มีลักษณะเป็น dendrimer-like highly branched polymer

ผลการทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะหนัก Cu^{2+} , Ni^{2+} และ Cd^{2+} จากสารละลายโดยใช้ PAMAM (generation 3) grafted silica ซึ่งปรับปรุงผิวด้วย phthaloyl chloride (SG-G3.0-PC) และจากการศึกษาผลของเวลาการดูดซับ, น้ำหนักของตัวดูดซับ, ความเข้มข้นของไอออนโลหะและค่า pH ของสารละลายโลหะพบว่า ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะ Ni^{2+} และ Cd^{2+} จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดสูงสุดภายในเวลา 10 นาที ค่าร้อยละการดูดซับจะเพิ่มขึ้นถ้าเพิ่มปริมาณตัวดูดซับที่ใช้ หรือลดความเข้มข้นของสารละลายโลหะลง โดยค่า pH จะส่งผลกระทบต่อค่าการดูดซับอย่างมากเพราะที่ pH ต่ำ ๆ ไอออนโลหะหนักทุกชนิดจะไม่ถูกดูดซับโดย SG-G3.0-PC จากการทดสอบโดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g. ดูดซับไอออนโลหะในสารละลายที่มีความเข้มข้น 100 ppm. ปริมาตร 10 mL. และมีค่า pH 4 ที่อุณหภูมิ 25°C เวลาการดูดซับ 60 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับมีค่า 78.9%, 50.0% และ 80.4% สำหรับ Cu^{2+} , Ni^{2+} และ Cd^{2+} ตามลำดับ การฟื้นฟูสภาพ SG-G3.0-PC ที่ผ่านการจับโลหะแล้วสามารถทำได้โดยเติมกรดเพื่อลดค่า pH ของสารละลายลงซึ่งไอออนของโลหะหนักจะถูกปล่อยออกมา และเมื่อนำไปใช้จับโลหะใหม่จะพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะของ SG-G3.0-PC จะมีค่าลดลงหลังจากผ่านกระบวนการฟื้นฟูสภาพแล้ว

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ 1. 2.

48402202 : MAJOR : POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING

KEY WORD : ADSORPTION / HEAVY METAL IONS / PAMAM DENDRIMER / SILICA GEL

KITTIPAT LENGCHAROEN : REMOVAL OF HEAVY METAL IONS FROM SOLUTION
USING PAMAM DENDRIMER - LIKE IMMOBILIZED ON SILICA SURFACE. THESIS ADVISORS :
AMNARD SITTATTRAKUL,Ph.D., WANCHAI LERDWIJITJARUD,Ph.D. 118 pp.

In this research, phthaloyl chloride modified polyamidoamine (PAMAM) dendrimer was prepared on silica gel surface. Silica gel was treated with 3-aminopropyltriethoxysilane then PAMAM dendrimer was propagated from silica gel surface with divergent method by repeating two steps: 1) Michael addition of surface amino groups with methyl acrylate and 2) amidation of the resulting surface ester groups with ethylenediamine. Finally, third generation of PAMAM grafted silica gel was modified with phthaloyl chloride. Their structures were characterized by FT-IR spectra, TGA and titration. The results indicated the propagation of dendrimer was not theoretical and 'dendrimer-like' highly branched polymer was grafted onto the surface.

The adsorption properties of phthaloyl chloride modified third generation PAMAM grafted silica gel (SG-G3.0-PC) for Cu^{2+} , Ni^{2+} and Cd^{2+} in aqueous solution was studied and the effects of adsorption time, weight of adsorbent, metal ions concentration and pH were also investigated. Adsorption for Ni^{2+} and Cd^{2+} were reach maximum in 10 minutes. Adsorption efficiency was increased at low metal ion concentrations and high adsorbent weight. pH value was strongly affected to the adsorption character, all types of heavy metal ions were not binding with SG-G3.0-PC at low pH. Adsorption efficiency of 0.1 g. SG-G3.0-PC in metal ions solution of 100 ppm., 10 ml. and pH about 4 at 25°C and adsorption time of 60 minutes was approximated 78.9%, 50.0% and 80.4% for Cu^{2+} , Ni^{2+} and Cd^{2+} respectively. The regeneration of metal load SG-G3.0-PC was achieved by adding acid to reduce the pH of the solution, bounded metal ions to adsorbent were released. Adsorption efficiency of SG-G3.0-PC was decreased after regeneration process.

Department of Materials Science and Engineering

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2007

Student's signature

Thesis Advisors' signature 1. 2.

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ มหาวิทยาลัยศิลปากร ผู้สนับสนุนเงินทุนเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัย ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้รับความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลาย ๆ ท่าน ประกอบด้วย อาจารย์ ดร. อำนาจ สิริธัตตระกุล อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์ทั้งสองท่านเป็นผู้สั่งสอน มอบวิชาความรู้ ให้ความเอาใจใส่ ช่วยแก้ไขปัญหาและให้คำปรึกษาต่างๆ ในการวิจัย ซึ่งเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัยเป็นอย่างมาก ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. นรงค์ นิมพาลี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ ที่กรุณาเสียสละเวลาให้คำปรึกษา และวิเคราะห์สารตัวอย่างต่าง ๆ ด้วยเทคนิค ICP ขอขอบคุณ คุณพนิจ เจียนระลึก และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ที่ช่วยอำนวยความสะดวก ทั้งในด้านการทดสอบต่าง ๆ อุปกรณ์เครื่องมือและสารเคมีที่ใช้ ขอขอบคุณ นายโกสินทร์ หาชะวี เพื่อนที่ดีที่สุด ที่ให้คำแนะนำทุก ๆ เรื่อง ขอขอบคุณพี่ เพื่อนและน้องทุกคน ขอขอบคุณสำหรับทุกความช่วยเหลือ ทุกคำปรึกษา และทุกกำลังใจ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อและคุณแม่ ที่อยู่เคียงข้างตลอดมาจนกระทั่งงานวิจัยนี้ได้สำเร็จลุล่วงในที่สุด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ญ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
บทนำ.....	1
ความเป็นมาของงานวิจัย	1
จุดประสงค์ของงานวิจัย.....	4
ขอบเขตการวิจัย.....	4
ผลที่คาดว่าจะได้รับและการประยุกต์ใช้.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
เดนไดรเมอร์	6
การสังเคราะห์เดนไดรเมอร์.....	7
สมบัติของเดนไดรเมอร์.....	10
การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica.....	13
การแลกเปลี่ยนไอออน	14
วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	15
โลหะหนักและตัวอย่างโลหะหนักในอุตสาหกรรม	19
3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	36
สารเคมี	36
เครื่องมือและอุปกรณ์	37
ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel และ	
การปรับปรุงผิวของ PAMAM dendrimer ที่ถูกตรึงบนผิว silica gel	
เพื่อใช้เป็น Ion exchange resin ในการจับไอออนโลหะหนัก	39

	หน้า
ตอนที่ 2 การศึกษาหาชนิด Ion exchange resin ที่มีประสิทธิภาพในการดูดจับโลหะหนักสูงสุด	45
ตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนัก	46
ตอนที่ 4 การล้างไอออนของโลหะหนักออกจาก Ion exchange resin และการนำ Ion exchange resin ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่	50
4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	52
ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel และการปรับปรุงผิวของ PAMAM dendrimer ที่ถูกตรึงบนผิว silica gel เพื่อใช้เป็น Ion exchange resin ในการจับไอออนโลหะหนัก	52
ตอนที่ 2 การศึกษาหาชนิด Ion exchange resin ที่มีประสิทธิภาพในการดูดจับโลหะหนักสูงสุด	67
ตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลต่างๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนัก	70
ตอนที่ 4 การล้างไอออนของโลหะหนักออกจาก Ion exchange resin และการนำ Ion exchange resin ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่	86
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะสำหรับทำงานวิจัยต่อ	90
สรุปผลการทดลอง	90
ข้อเสนอแนะสำหรับทำงานวิจัยต่อ	91
บรรณานุกรม	92
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก	95
ภาคผนวก ข	104
ภาคผนวก ค	110
ประวัติผู้วิจัย	117

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	สมบัติของพอลิเมอร์ชนิดเส้นตรงเปรียบเทียบกับเดนไดรเมอร์	11
2	ข้อมูลของสารเคมีที่ใช้ในการทำงานวิจัย.....	36
3	ปริมาณหมู่อะมิโนและ %grafting ของ SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0 และ SG-G3.0	63
4	เวลาที่ใช้ ผลผลิตที่ได้และต้นทุนสารเคมีในการเตรียม SG-PAMAM.....	65
5	ผลของชนิดเรซินต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย	68
6	ผลของเวลาการทดสอบต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจาก สารละลาย	71
7	ผลของปริมาณเรซินต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย..	74
8	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะหนักจาก สารละลาย	77
9	ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย.....	80
10	การศึกษาหาความจุไอออนของเรซิน	83
11	Hard and soft acids bases	85
12	ผลการศึกษานำเรซินกลับมาใช้ใหม่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออน โลหะหนักจากสารละลาย.....	87
13	ข้อมูลการศึกษา ผลของชนิดเรซินต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก จากสารละลาย	110
14	ข้อมูลการศึกษา ผลของเวลาการทดสอบต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะ หนักจากสารละลาย	111
15	ข้อมูลการศึกษา ผลของปริมาณเรซินต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก จากสารละลาย	112
16	ข้อมูลการศึกษา ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของ โลหะหนักจากสารละลาย.....	113
17	ข้อมูลการศึกษา ผลของ pH ต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจาก สารละลาย	114
18	ข้อมูลการศึกษาหาความจุไอออนของเรซิน.....	115
19	ข้อมูลการศึกษา การนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของ โลหะหนักจากสารละลาย.....	116

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1	โครงสร้างและส่วนประกอบของ dendrimer.....	6
2	ประเภทหลักของ macromolecule คือ พอลิเมอร์สังเคราะห์ดั้งเดิม: (I) linear, (II) cross-linked (bridged) (III) branched. และ (IV) dendritic	7
3	วิธีการสังเคราะห์แบบ divergent (A) และวิธีการสังเคราะห์แบบ convergent (B)....	8
4	การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ด้วยวิธีการ divergent.....	9
5	โครงสร้าง PAMAM dendrimer (Generation 3) มี core เป็น ethylenediamine	10
6	การเติบโตของ dendrimer ทางคณิตศาสตร์	11
7	ตัวอย่าง dendrimer	12
8	การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica.....	13
9	ระบบกรองแบบ ultrafiltration	19
10	การทำงานของระบบกรองแบบ ultrafiltration แบบเพ.....	20
11	การทำงานของระบบกรองแบบ ultrafiltration แบบไหลต่อเนื่อง	20
12	ระบบออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis).....	21
13	การเปรียบเทียบระหว่างระบบ osmosis กับระบบ reverse osmosis.....	21
14	ระบบออสโมซิสผันกลับแบบต่าง ๆ	22
15	ระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง	23
16	ขั้นตอนการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica gel.....	53
17	ขั้นตอนการสังเคราะห์ SG-G3.0-PC จาก SG-G3.0.....	55
18	ขั้นตอนการสังเคราะห์ SG-G3.5-6ACA จาก SG-G3.5	56
19	FTIR Spectra ของ Silica gel, SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0 และ SG-G3.0	57
20	FTIR Spectra ของ Silica gel, SG-G0.5, SG-G1.5, SG-G2.5 และ SG-G3.5	58
21	FTIR Spectra ของ SG-G3.0 และ SG-G3.0-PC	59
22	โครงสร้างทางทฤษฎีของ a) SG-G3.0 และ b) SG-G3.0-PC	60
23	FTIR Spectra ของ SG-G3.5 และ SG-G3.5-6ACA.....	61
24	TGA curves ของ Silica gel, SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0, SG-G3.0, SG-G3.0-PC .	62
25	ผลของชนิดเรซินต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย	68
26	ผลของเวลาการทดสอบต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย	72
27	ผลของปริมาณเรซินต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย	75

รูปที่		หน้า
28	ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย	78
29	ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย	81
30	ผลการศึกษาหาความจุไอออนของเรซิน	82
31	ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของ SG-G3.0-PC ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว.....	86
32	ผลการศึกษาการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจาก สารละลาย	88
33	แผนผังของ ICP-AES	96
34	การกำเนิดพลาสมาใน ICP-AES	97
35	การปล่อยคลื่นสเปกตรัมออกจากอิเล็กตรอน	97
36	แผนผังภายในของสเปกโตรมิเตอร์ใน ICP-AES.....	99
37	กราฟการวัดสเปกตรัมของตัวอย่าง.....	100
38	เครื่อง ICP และเทคโนโลยีของ ICP	101

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำ

ในปัจจุบันปัญหามลภาวะทางน้ำ โดยเฉพาะในเรื่องน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนสารเคมีจำพวกโลหะหนักซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ทวีความรุนแรงและกำลังได้รับความสนใจเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาและพัฒนาโดยประยุกต์ใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อกำจัดหรือลดปริมาณโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำให้เหลือน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ PAMAM dendrimer ที่ได้สังเคราะห์ขึ้นบนผิวของ silica gel และได้ทำการปรับปรุงผิวนอกของ PAMAM dendrimer ด้วย phthaloyl chloride หรือ 6-Aminocaproic acid เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดจับไอออนของโลหะหนักออกจากสารละลายให้ได้สูงที่สุด

Dendrimer จัดเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ ซึ่งมีกิ่งก้านเป็นจำนวนมาก (highly branched), โมเลกุลมีขนาดใหญ่ แต่ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลเป็นแบบ monodisperse, มีโครงสร้างทางสถาปัตยกรรมเป็น 3 มิติ dendrimer ถูกใช้งานอย่างกว้างขวางในสาขา medicinal chemistry, host-guest chemistry, catalysis และพบว่า dendrimer ได้ถูกใช้งานมากขึ้นในด้าน nanoscience ด้วย

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยศึกษาอิทธิพลของ pH, เวลาที่ใช้, อุณหภูมิ, ความเข้มข้นของโลหะหนักและน้ำหนักของตัวดูดจับว่าส่งผลต่อประสิทธิภาพในการจับไอออนของโลหะหนักอย่างไร นอกจากนี้ได้กล่าวมาแล้วว่างานวิจัยนี้ยังได้ศึกษาการนำเรซินที่ได้ผ่านการใช้งานมาแล้วกลับมาใช้ใหม่ ทั้งนี้เพื่อความเหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง โดยโลหะหนักที่เลือกใช้เพื่อการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ ทองแดง (Cu^{2+}) นิกเกิล (Ni^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+})

1.2 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันนี้ ปัญหาเกี่ยวกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะน้ำเสียที่มีสารเคมีจำพวกโลหะหนักซึ่งเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตกำลังทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น การแยกสารจำพวกโลหะหนักออกจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมและการนำโลหะหนักกลับมาใช้ใหม่จึงกำลังได้รับความสนใจจากภาคอุตสาหกรรมหลายประเภท โดยมีปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ ด้าน

เศรษฐกิจและด้านสิ่งแวดล้อม สาเหตุที่ต้องการกำจัดสารจำพวกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งให้ได้มากที่สุดก่อนปล่อยออกจากโรงงาน คือ สารเหล่านี้สามารถที่จะสะสมอยู่ในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตและเป็นสาเหตุของอาการเจ็บป่วยต่าง ๆ ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะแก้ไขปัญหาดังกล่าวโดยการแยกสารจำพวกโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งนำไปสู่การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคนิคต่าง ๆ ในการดึงโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่สามารถทำได้

วิธีการกำจัดโลหะออกจากสารละลายในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี เช่น การแยกโลหะจากสารละลายด้วยไฟฟ้า (electrodialysis) การใช้เทคนิค Reverse Osmosis (RO) การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange resin) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (liquid-liquid extraction) การระเหยและการตกตะกอน ซึ่งมี ข้อดี-ข้อเสีย ความเหมาะสม และมีค่าใช้จ่ายที่แตกต่างกันไป

เมื่อไม่กี่ปีมานี้ มีความก้าวหน้าทางด้าน polymer chemistry โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสาขาของการสังเคราะห์ dendrimer ซึ่งทำให้มีโอกาสนในการพัฒนาวัสดุใหม่ ๆ และใช้เงินทุนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น dendrimer เป็น polymer ที่มีกิ่งจำนวนมาก (highly branched) มีการควบคุมองค์ประกอบและสถาปัตยกรรม ซึ่งหมู่ complexing functional group อาจรวมอยู่ในส่วนภายในของ macromolecule เหล่านั้น หรือติดอยู่ที่ผิวนอกก็ได้ เมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาอย่างมากโดยมุ่งเน้นไปที่ การเตรียม, การวิเคราะห์สมบัติ และ การนำไปใช้งานต่าง ๆ ของ polyamidoamine (PAMAM) dendrimer ซึ่งสังเคราะห์ขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Tomalia และผู้ร่วมงาน PAMAM dendrimer มีความสามารถในการละลายน้ำที่ยอดเยี่ยม รวมทั้งมีหมู่ amine หรือหมู่ ester ที่มีความว่องไวอยู่ที่ผิวรอบนอก ซึ่งทำให้สามารถเตรียม polychelator ที่มีประสิทธิภาพในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับโลหะได้ [2]

ในปี ค.ศ. 1999 Diallo และคณะ[3] ได้ศึกษาการจับทองแดง(Cu^{2+}) ออกจากสารละลายน้ำโดยใช้ PAMAM dendrimer ซึ่งพบว่า PAMAM dendrimer ที่มี generation 8 สามารถจับกับ Cu(II) ion ได้ถึง 153 ± 20 ions ต่อ 1 โมเลกุลของ dendrimer เปรียบเทียบกับ chelating agent อื่น ๆ (เช่น triethylene tetramine) และ macrocycle (เช่น cyclam) ที่มี nitrogen donor ซึ่งจะจับกับ Cu(II) ion ได้ 1 ion ต่อ 1 โมเลกุลของสารที่ใช้ แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่เหนือกว่าของ PAMAM dendrimer ได้อย่างชัดเจน ซึ่งเกิดเนื่องจากพันธะ covalent ที่เชื่อมต่อระหว่าง nitrogen ligand ทำให้สายโซ่ของ PAMAM มีความยืดหยุ่นในโครงสร้างสูงซึ่งเกิด chelate ภายใน nanoscopic structure ได้จึงทำให้ความจุในการจับกับ Cu(II) ion มีมากขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำ PAMAM ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยการทำเติมกรดลงไป

ในปี ค.ศ. 2003 A. Rether และ M. Schuster [2] ได้ปรับปรุงที่ผิวของ PAMAM dendrimer ทำให้เกิดเป็นหมู่ benzoylthiourea group ขึ้น เกิดเป็น chelating ion-exchange material ที่ละลายน้ำได้ดีเยี่ยมชนิดใหม่ และมีความเลือกสรรที่แตกต่างกันสำหรับไอออนของโลหะหนักที่เป็นพิษแต่ละชนิด จากการศึกษากการเกิด complexation กับโลหะ Co(II), Cu(II), Hg(II), Ni(II), Pb(II) และ Zn(II) พบว่าไอออนของโลหะทุกชนิดจะถูกดูดจับได้ในปริมาณเกือบทั้งหมดที่ pH 9 สำหรับในกรณี Cu(II) และ Hg(II) จะเกิดเป็น complexes ที่เสถียรที่สุด และสามารถแยกออกมาได้อย่างเลือกสรรจากไอออนของโลหะหนักชนิดอื่น ไอออนของโลหะที่ถูกจับไว้สามารถนำกลับออกมาได้โดยการลด pH ของสารละลาย ภายหลังจากการกรองแบบ ultrafiltration เสร็จเรียบร้อยแล้วจะให้ผลเป็นสารละลายที่มีไอออนโลหะเข้มข้น และ dendrimer ที่ผ่านการ regenerate แล้วยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดจับไอออนโลหะหนักยังสามารถทำได้ดีแม้ในสารละลายที่มี complexing agent อื่นแข่งขัน เช่น ammonia, tartrate, triethanolamine หรือแม้ในกรณีที่มี sodium nitrate ที่ความเข้มข้นสูง

ข้อจำกัดหนึ่งของการใช้ dendrimer ในการจับโลหะจากสารละลาย คือ กระบวนการกรองจะต้องเป็นแบบ ultrafiltration เช่น การใช้ polymer-supported ultrafiltration (PSU) technique จากการศึกษาวิจัยของ Bi-feng Pan และคณะ[4],[5] รวมถึงงานวิจัยของ Brandon Yoza และคณะ[6] พบว่า PAMAM dendrimer สามารถสังเคราะห์ขึ้นบนผิวของ magnetite nanoparticle ได้โดยใช้ aminopropyltrimethoxysilane เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลที่ผิวของ magnetite nanoparticle ก่อน จากนั้นจึงสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ลงบนผิวของ magnetite อีกครั้ง ซึ่งทำให้เกิดเป็น PAMAM dendrimer modified magnetite nanoparticle ซึ่งสามารถแยกออกจากสารละลายได้โดยใช้ magnetic separation ซึ่งง่ายกว่าวิธีการกรองแบบ ultrafiltration นอกจากนี้ยังพบว่า เราสามารถสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica และ silica gel ได้[7],[8],[9] โดยวิธีคล้าย ๆ กัน

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษากการกำจัดไอออนโลหะหนัก ซึ่งได้แก่ ทองแดง (Cu^{2+}), นิกเกิล (Ni^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) ออกจากสารละลายโดยใช้ PAMAM dendrimer ที่ตรึงบนผิวของ silica gel และปรับปรุงผิวนอกของ PAMAM dendrimer ด้วย phthaloyl chloride และ 6-Aminocaproic acid เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดจับไอออนของโลหะหนัก รวมทั้งศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยศึกษาอิทธิพลของ pH เวลา อุณหภูมิ ความเข้มข้นของโลหะหนักและน้ำหนักของตัวดูดจับต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย และศึกษากการนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วกลับมาใช้ใหม่

1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel (PAMAM-SG)
2. เพื่อศึกษาวิธีการปรับปรุงผิวภายนอกของ PAMAM-SG ด้วย phthaloyl chloride และ 6-Aminocaproic acid
3. เพื่อศึกษาอิทธิพลของการปรับปรุงผิวภายนอกของ PAMAM-SG ด้วย phthaloyl chloride และ 6-Aminocaproic acid ต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลาย
4. เพื่อศึกษาอิทธิพลของ pH, เวลา, อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอออนโลหะหนัก ต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากสารละลาย
5. เพื่อศึกษาวิธีการนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว กลับมาใช้ใหม่ และศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายของเรซินที่นำกลับมาใช้ใหม่

1.4 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ในการศึกษาครั้งนี้ ชนิดของ dendrimer ที่จะนำมาใช้ศึกษา คือ PAMAM dendrimer โดย PAMAM dendrimer จะถูกสังเคราะห์ขึ้นบนผิวของ silica gel โดยใช้วิธีการแบบ divergent
2. PAMAM dendrimer ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อใช้ศึกษาจะอยู่ใน generation ที่ 3.0 และ 3.5
3. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของ PAMAM dendrimer จะทำโดยใช้เทคนิค FT-IR, TGA และการไตเตรด
4. การปรับปรุงผิวของ PAMAM dendrimer ที่ถูกตรึงอยู่บนผิวของ silica gel จะทำโดยใช้ phthaloyl chloride และ 6-Aminocaproic acid โดยจะเลือกวิธีการปรับปรุงผิวที่ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักสูงที่สุดมาใช้ในการทดสอบการดูดซับโลหะต่อไป
5. ชนิดของไอออนโลหะที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้ คือ ทองแดง (Cu^{2+}), นิกเกิล (Ni^{2+}) และ แคดเมียม (Cd^{2+})
6. ในการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนัก ปัจจัยที่จะทำการศึกษา คือ pH, เวลา, อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอออนโลหะหนักในสารละลาย
7. ศึกษาการนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้ว กลับมาใช้ใหม่

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับและการประยุกต์ใช้

1. สามารถนำ PAMAM dendrimer ที่ถูกตรึงอยู่บนผิวของ silica gel และอนุพันธ์ที่สังเคราะห์ได้มาใช้ในการกำจัดโลหะหนักจากสารละลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ
2. สามารถทราบถึงอิทธิพลของ pH, เวลา, อุณหภูมิและความเข้มข้นของไอออนโลหะหนัก ต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนของโลหะหนักจากสารละลาย
3. สามารถหาวิธีการฟื้นฟูสภาพ PAMAM dendrimer ที่ถูกตรึงอยู่บนผิวของ silica gel และอนุพันธ์ ที่ใช้แล้วกลับไปใช้ใหม่ได้
4. สามารถนำความรู้ที่ได้จากการวิจัยมาช่วยลดมลภาวะทางน้ำ และรักษาสีสิ่งแวดล้อมได้
5. สามารถนำโลหะหนักที่ดูดซับออกมาไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้

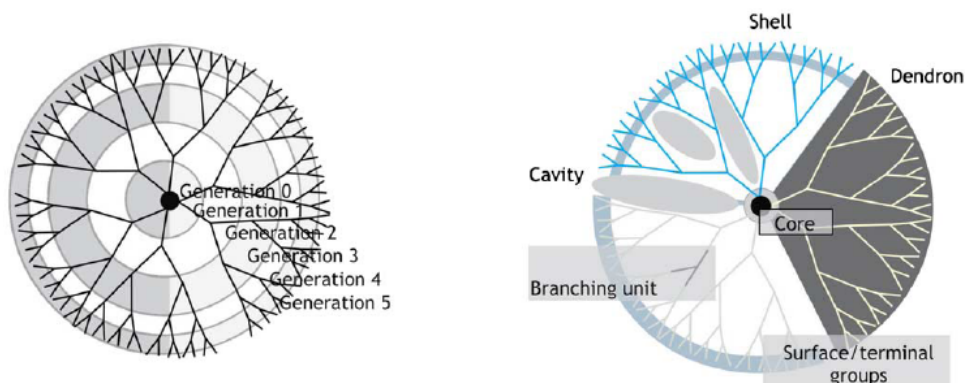
บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เดนไดรเมอร์ (Dendrimer) [10]

เดนไดรเมอร์ (dendrimer) จัดเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชนิดใหม่ลักษณะโครงสร้างประกอบด้วยกิ่งก้านจำนวนมาก (highly branched) เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ (macromolecule) ที่มีการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลแคบ และมีหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเป็นจำนวนมาก มีรูปร่างเป็นทรงกลม 3 มิติ ในขณะที่พอลิเมอร์ทั่วไปจะเป็นเส้นตรงแบบ 2 มิติ สมบัตินี้ทำให้ dendrimer ได้รับความสนใจอย่างมากและถูกนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในหลายสาขา เช่น medicinal chemistry, host-guest chemistry และ catalysis ในอีกทางหนึ่งพบว่า dendrimer ได้ถูกใช้ประโยชน์มากขึ้นในด้าน nanoscience ตัวอย่างการใช้งานของ dendrimer เช่น ใช้เป็นตัวนำส่งยีนในการรักษาด้วยยีน ใช้ในกระบวนการนำส่งยา ใช้เป็น carrier ในการพายาในกระแสเลือด ใช้เป็น catalyst ในปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ได้ หรือใช้ในการตรวจสอบสารเคมีหรือสารชีวภาพต่าง ๆ ที่เป็นอันตรายในสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

คำว่า dendrimer นั้นมาจากคำว่า “dendron” ในภาษากรีกซึ่งหมายถึงต้นไม้เนื่องจากมีลักษณะคล้ายคลึงกับต้นไม้ที่มีกิ่งก้านสาขามากมาย dendrimer อาจมีชื่อเรียกอื่น ๆ อีก เช่น *Arborol*, *Cascade*, *Cauliflower* พอลิเมอร์ชนิดนี้ถูกสังเคราะห์ได้ครั้งแรก โดย Dr. Donald A Tomalia และคณะ(The Dow Chemical Company) ในช่วงต้นของปี ค.ศ.1980



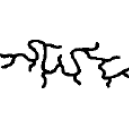
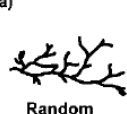
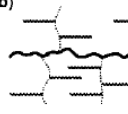
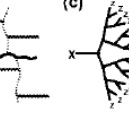
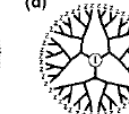
รูปที่ 1. โครงสร้างและส่วนประกอบของ dendrimer [11]

โครงสร้างของ dendrimer ประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญดังนี้

1.) Initiator core หรือ central core เป็นแกนกลางให้สารโมเลกุลอื่นมาต่อ โดยแกนกลางนี้ควรมีแขนอย่างน้อย 3 แขน ซึ่งแต่ละแขนควรมีพันธะชนิดเดียวกัน เพื่อให้โมเลกุลที่ได้มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูปทรงกลม 3 มิติ

2.) Branching unit เป็นส่วนของโครงสร้างที่ต่อออกมาจากแกนกลาง ซึ่งจะต่อออกมาในลักษณะที่สมมาตรเท่ากันในทุก ๆ แขนจากแกนกลาง โดยธรรมชาติแล้วจะมีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลจนได้เป็นรูปทรงกลม และภายในอาจจะมีช่องว่างขนาดใหญ่อยู่ ซึ่งช่องว่างขนาดใหญ่นี้สามารถบรรจุสาร หรือยาต่าง ๆ ได้

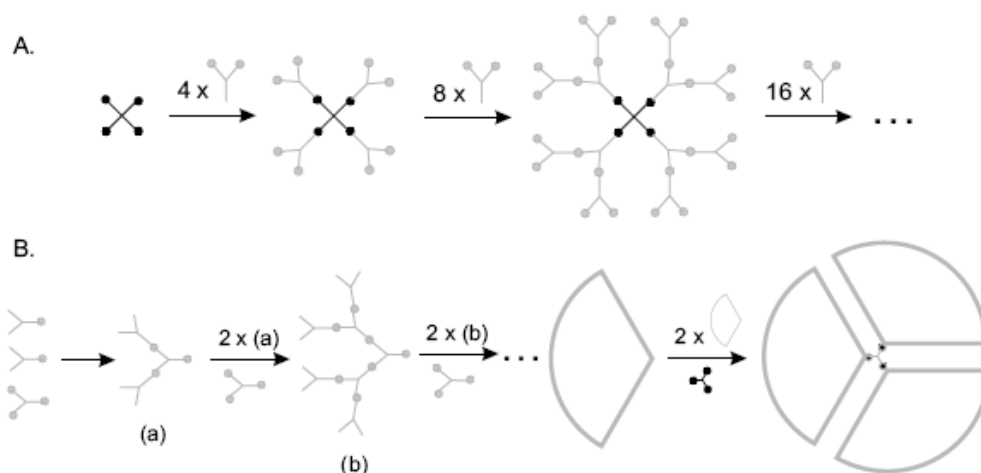
3.) Terminal group เป็น functional group ที่ต่อออกมาจากส่วนของ branching unit โดยที่จำนวนของ terminal group จะขึ้นอยู่กับชนิดของแกนกลางและ generation ซึ่งหน้าที่ของส่วนนี้คือการไปจับหรือเกาะสารต่าง ๆ หรือ membrane ของเซลล์เป้าหมาย

I	II	III	IV			
Linear	Cross-Linked	Branched	Dendritic			
			(a) 	(b) 	(c) 	(d) 
1930's	1940's	1960's	Random Hyperbranched	Dendrigrrafts	Dendrons	Dendrimers
Plexiglass, Nylon	Rubbers, Epoxies	Low Density Polyethylene Metallocene-Based Polyolefins	Present			
			Biomedical	- nano-drugs - gene expression - immuno diagnostics - controlled delivery		
			Electronics	- light harvesting - 3-D conductivity - quantum dots		
			Sensors	- chemical - biological		
			Coatings	- fast cure, low viscosities		

รูปที่ 2. ประเภทหลักของ macromolecule คือ พอลิเมอร์สังเคราะห์ดั้งเดิม: (I) linear (II) cross-linked (bridged) (III) branched และ (IV) dendritic เป็นพอลิเมอร์ที่ควบคุมโครงสร้าง [12]

2.2 การสังเคราะห์ dendrimer

การสังเคราะห์ dendrimer เป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนซึ่งเกี่ยวกับลำดับขั้นของการทำปฏิกิริยา การสังเคราะห์สามารถทำได้ 2 วิธี คือ วิธี divergent ซึ่งเป็นการสังเคราะห์จาก central core ออกไปสู่ terminal group และวิธี convergent ซึ่งเริ่มสังเคราะห์จาก terminal group ไปสู่ polyfunctional core ปัญหาที่เกิดขึ้นกับวิธีการ convergent มีน้อยกว่าแบบ divergent และวิธี divergent จะต้องใช้จำนวนครั้งของการเกิดปฏิกิริยามากกว่ามากในหนึ่งโมเลกุล



รูปที่ 3. วิธีการสังเคราะห์แบบ divergent (A) และวิธีการสังเคราะห์แบบ convergent (B)[13]

ขั้นตอนในการสังเคราะห์ dendrimer จะมีปฏิกิริยาการเติม branching unit ลงไปอีกครั้ง ภายหลังจากปฏิกิริยาแรกเสร็จสิ้นลงซึ่งนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของ dendrimers (หรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่า การเพิ่มขึ้นของ generation) ในช่วง generation ที่ต่ำ (1.0 และ 2.0) โครงสร้างของ dendrimer จะค่อนข้างแบนราบ (plate-like structure) และจะพัฒนาเข้าใกล้ทรงกลม (globular structure) ตาม generation ที่สูงขึ้น (4.0 เป็นต้นไป)

การสังเคราะห์ dendrimer ด้วยวิธี divergent มีข้อจำกัดตาม generation ที่สูงขึ้น (เช่น 7.0 และ 8.0 ในกรณีของ polyamidoamine (PAMAM) dendrimer) เนื่องจากเกิด steric congestion ซึ่งเป็นผลมาจากการอัดตัวกันแน่นขึ้นของ terminal group ที่มีมากขึ้น ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่ไม่สมบูรณ์ครบทุกหมู่ฟังก์ชัน เป็นผลให้เกิดข้อบกพร่องทางโครงสร้างทำให้เกิดการผิดรูปร่างของโมเลกุล dendrimer การทำปฏิกิริยาในขั้นตอนใดถ้าไม่สมบูรณ์จะทำให้ปฏิกิริยาต่อ ๆ มา มีลักษณะไม่สมบูรณ์ด้วย และอาจมีปัญหาความไม่บริสุทธิ์ของ dendrimer ที่ได้เพราะต้องใส่สารตั้งต้นในปริมาณสูง การเกิด steric crowding นี้จะเริ่มมีความสำคัญประมาณ generation ที่ 5 และความสมบูรณ์ในการเกิด generation ที่สูงขึ้นกว่านี้จะลดลง มีรายงานน้อยมากสำหรับ dendrimer ที่มี 10-15 generation ในการสังเคราะห์แบบ divergent ซึ่งทำได้ยาก แต่การเกิด steric crowding ไม่สำคัญนักในการสังเคราะห์แบบ convergent เพราะว่าการสังเคราะห์จะเริ่มจากโมเลกุลรอบนอกและเกิดปฏิกิริยาเข้าไปเป็นแบบขั้น ๆ ซึ่ง dendrimer fragment ที่ได้จะมีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับ dendrimer molecule หลังจากที่ได้จำนวนขั้นปฏิกิริยาที่ต้องการแล้ว จึงนำ dendrimer fragment ที่ได้มาทำปฏิกิริยากับสารที่เป็น core อย่างไรก็ตามถ้าจำนวนของ dendrimer fragment ที่จะต้องมารวมที่ central core เพื่อให้เกิดเป็น dendrimer มีมาก การเกิด steric crowding ก็สามารถบรรเทาได้โดยการเลือกใช้ central core molecule ที่มีขนาดใหญ่ขึ้นและ flexible มากขึ้น ข้อดี

ของวิธีการนี้คือสามารถควบคุมน้ำหนักโมเลกุล, ความเป็นสาขาและจำนวนชั้นของปฏิกิริยาได้จึงทำให้ได้ dendrimer ที่มีสมบัติตามความต้องการ[14]

สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของ dendrimer ขึ้นอยู่กับสารที่ใช้เป็น core, branching unit และ terminal group ซึ่งนำไปสู่การสังเคราะห์ dendrimer ชนิดใหม่ เช่น peptide dendrimer, lipidic peptide dendrimer และ carbohydrate dendrimer เป็นต้น

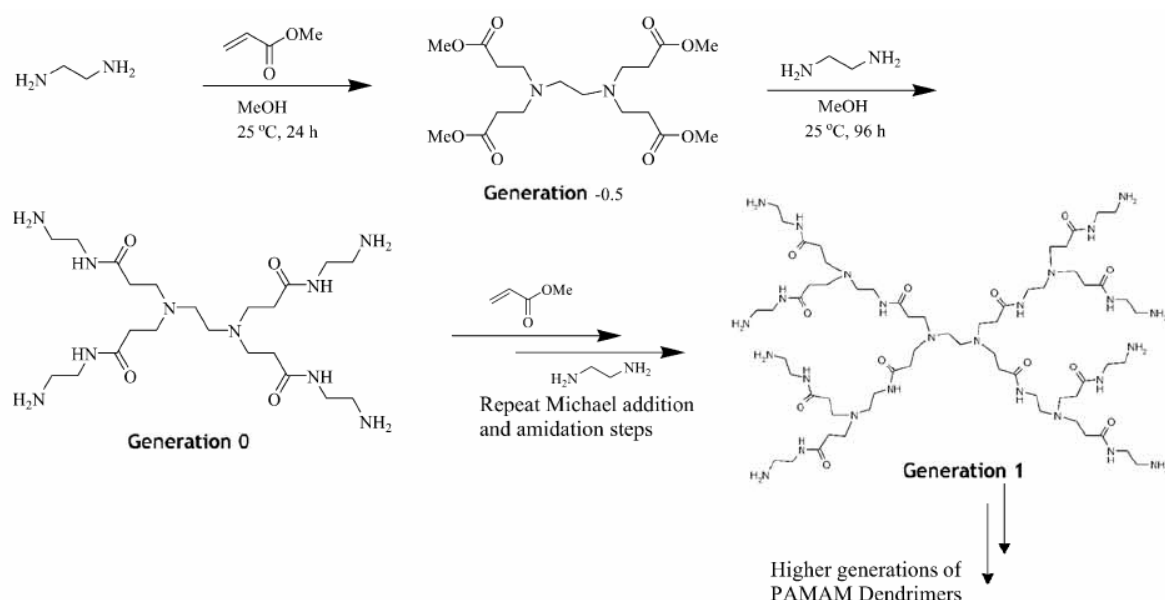
ตัวอย่างการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ด้วยวิธีการ divergent [15]

การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ด้วยวิธีการ divergent นั้นประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ 2 ขั้นตอน ดังแสดงในรูป คือ

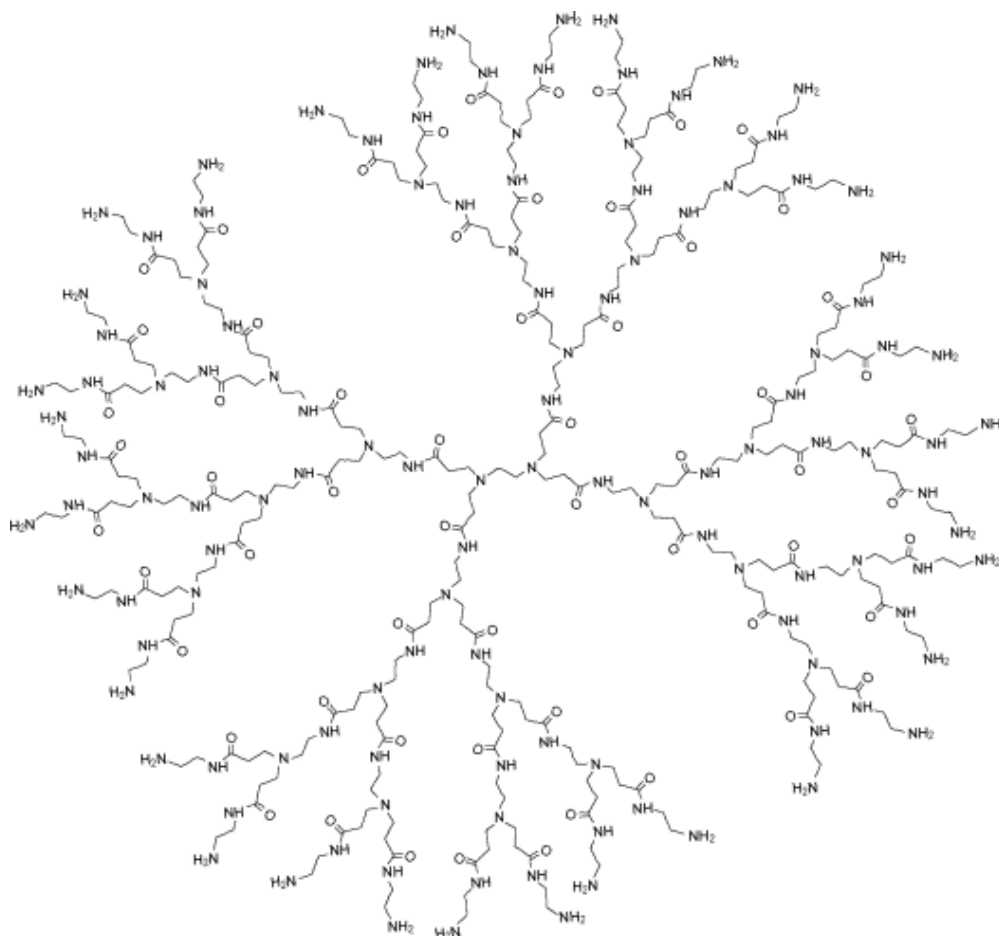
1.) การเกิดปฏิกิริยา Michael addition โดยใช้ methyl acrylate(MA) ในปริมาณ excess เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ amine ที่มีอยู่ให้หมดไป

2.) การเกิดปฏิกิริยา Amidation โดยใช้ ethylenediamine(EDA) ในปริมาณ large excess เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ ester ที่มีอยู่ให้หมดไป

ถ้าต้องการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ที่มี generation สูงขึ้นก็ให้ทำขั้นตอน 2 ขั้น นี้ สลับกัน ต่อไปเรื่อย ๆ จนได้ PAMAM dendrimer ที่ generation ตามที่ต้องการ



รูปที่ 4. การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ด้วยวิธีการ divergent [16]



รูปที่ 5. โครงสร้าง PAMAM dendrimer (Generation 3) มี core เป็น ethylenediamine [17]

ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ dendrimer [15]

- การเติบโตของ dendrimer ไม่ใช่ว่าอย่างอุดมคติ (non-ideal dendrimer growth)
- การกำจัดสารที่เหลือจากปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์ (Incomplete removal of reactant) ในแต่ละขั้นของปฏิกิริยา ทำให้การกระจายน้ำหนักโมเลกุลเปลี่ยนไป เพราะสารที่เหลืออยู่จะเป็นแกนของการสังเคราะห์ใหม่ทำให้มี dendrimer ชนิด generation ต่ำปะปนได้
- เกิดการ cyclization ของ dendrimer ที่อุณหภูมิสูงด้วยปฏิกิริยา intermolecular reaction
- Dendrimer เกิดการเชื่อมโยงกัน (bridging) เนื่องจากปริมาณของมอนอเมอร์ไม่เพียงพอ

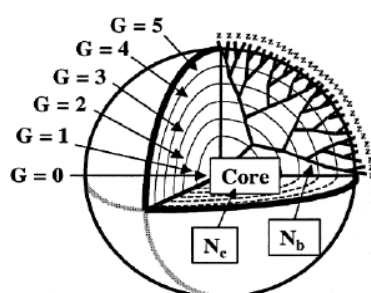
2.3 สมบัติของ dendrimer

เนื่องจากโครงสร้างของ dendrimer เกิดจากการเชื่อมกันจากมอนอเมอร์ที่อยู่ตรงกลางไปสู่ภายนอกด้วยพันธะโคเวเลนต์ และมีแนวโน้มที่รูปทรงจะเข้าใกล้ทรงกลมเมื่อมีจำนวน generation สูงขึ้น รวมทั้งสาขาภายในโครงสร้างมีระเบียบ และมีการพันกันของสาขาจากต่างโมเลกุลในระดับน้อยมากเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์เส้นตรง รวมทั้งจำนวนหมู่ปลายมีมากมาย ทำให้มีสมบัติ

แตกต่างจากพอลิเมอร์ทั่ว ๆ ไป ตารางข้างล่างนี้แสดงการเปรียบเทียบสมบัติของพอลิเมอร์ชนิดเส้นตรงและพอลิเมอร์ชนิดที่เป็นสารประเภท dendrimer สิ่งที่ได้รับความสะดวกของ dendrimer ได้แก่ ความหนืด, อุณหภูมิสภาพแก้ว, การไหล และการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน

ตารางที่ 1. สมบัติของพอลิเมอร์ชนิดเส้นตรงเปรียบเทียบกับเดนไดรเมอร์

สมบัติ	พอลิเมอร์เส้นตรง	เดนไดรเมอร์
Shape	Random coil	Spherical
Viscosity	High	Low
Solubility	Low	High
Crystallinity	High	Amorphous
Reactivity	Low	High
Compatibility	Low	High
Compressibility	High	Low
Structure Control	Low	Very high

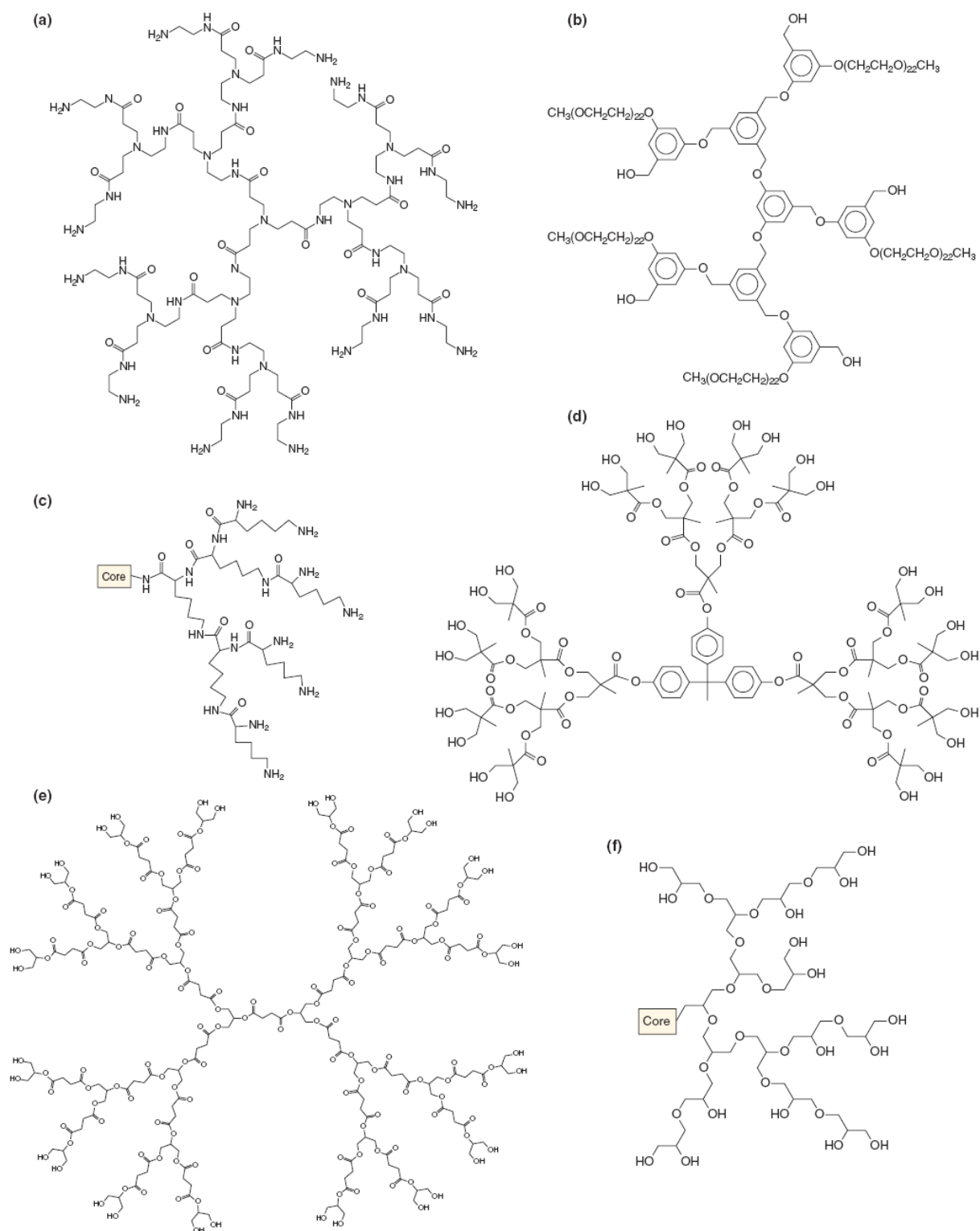


Dendrimer Core-Shell Mathematics

Number of Surface Groups	: $Z = N_c N_b^G$	Tomalia Equations Number of Covalent Bonds Formed/Generation
Number of Branch Cells	: $BC = N_c \left[\frac{N_b^G - 1}{N_b - 1} \right]$	
Molecular Weights	: $MW = M_c + N_c \left[M_{RU} \left(\frac{N_b^G - 1}{N_b - 1} \right) + M_b N_b^G \right]$	

Generation	Surface Groups (Z)	Molecular Formula	MW	Diameter (nm)
0	4	$C_{22}H_{48}N_{10}O_4$	517	1.4
1	8	$C_{62}H_{128}N_{26}O_{12}$	1,430	1.9
2	16	$C_{142}H_{288}N_{68}O_{28}$	3,256	2.6
3	32	$C_{302}H_{608}N_{122}O_{60}$	6,909	3.6
4	64	$C_{622}H_{1248}N_{250}O_{124}$	14,215	4.4
5	128	$C_{1262}H_{2528}N_{506}O_{252}$	28,826	5.7
6	256	$C_{2542}H_{5088}N_{1018}O_{508}$	58,048	7.2
7	512	$C_{5102}H_{10208}N_{2042}O_{1020}$	116,493	8.8
8	1,024	$C_{10222}H_{20448}N_{4090}O_{2044}$	233,383	9.8
9	2,048	$C_{20462}H_{40928}N_{8188}O_{4092}$	467,162	11.4
10	4,096	$C_{40942}H_{81888}N_{16378}O_{8188}$	934,720	~13.0

รูปที่ 6. การเติบโตของ dendrimer ทางคณิตศาสตร์; โดยที่: N_c , N_b = ค่าการทวีคูณของ core และ branch ตามลำดับ, G = generation, จำนวนของ surface groups (Z), สูตรโครงสร้างและน้ำหนักโมเลกุล (MW) โดยเป็นฟังก์ชันกับ generation ค่าที่แสดงเป็นค่าสำหรับตระกูล poly(amidoamine) (PAMAM) dendrimer ที่มี core เป็น ethylenediamine [18]



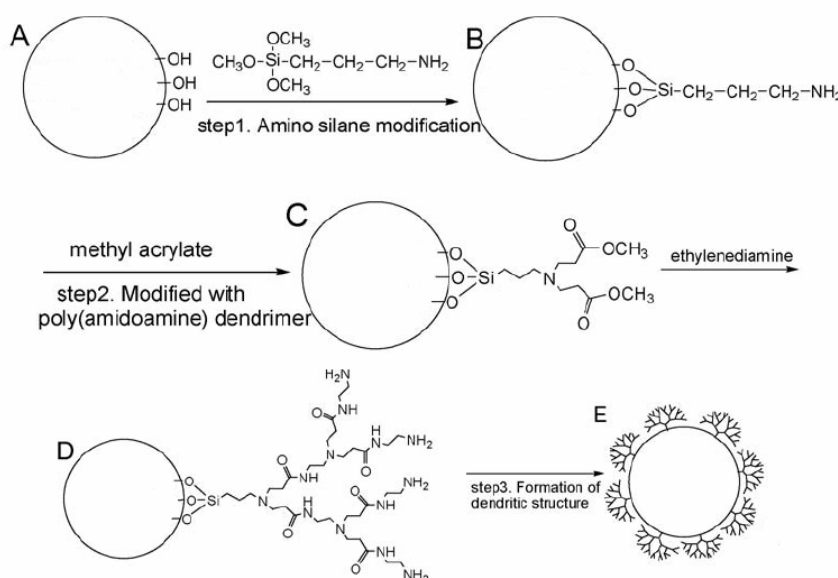
รูปที่ 7. ตัวอย่าง dendrimer (a) PAMAM dendrimer มี core เป็น NH_2 (b) Polyaryl ether dendrimer (c) Polylysine dendron (d) Polyester dendrimer จาก 2,2-bis(hydroxymethyl)propionic acid (e) Polyester dendrimer จาก glycerol และ succinic acid (f) Dendritic polyglycerol [19]

2.4 การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica [7],[8],[9]

วิธีการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica จะคล้ายคลึงกับการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer แบบธรรมดาที่ได้เคยกล่าวไว้ แต่ก่อนการสังเคราะห์จะต้องปรับปรุงผิวของ silica ก่อน แล้วจึงสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ดังนี้

1. ปรับปรุงผิวของ silica เพื่อให้มีหมู่อะมิโนเกิดขึ้นมาก่อน โดยอาจใช้สารบางชนิด เช่น สารในกลุ่ม amino silane ได้แก่ 3-aminopropyltrimethoxysilane ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{-Si}(\text{OCH}_3)_3$) หรือ 3-aminopropyltriethoxysilane ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{-Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_3$) เป็นต้น เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ silanol group ซึ่งอยู่บริเวณผิวของ silica เมื่อมีแล้วหมู่อะมิโนเกิดขึ้นแล้วจึงทำการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ในขั้นต่อไป

2. สังเคราะห์ PAMAM dendrimer generation ที่ 0.5 และ 1.0 โดยใช้ methyl acrylate เข้าทำปฏิกิริยา Michael addition กับหมู่อะมิโนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาในขั้นตอนแรก จากนั้นจึงทำปฏิกิริยา amidation โดยใช้ ethylenediamine โดยในการสังเคราะห์นั้นอาจทำปฏิกิริยา Michael addition และปฏิกิริยา amidation สลับกันอีกครั้งเพื่อสังเคราะห์ generation ที่ 1.5 และ 2.0 และทำสลับกันอีกเรื่อย ๆ จนได้ PAMAM dendrimer ซึ่งมี generation ที่สูงขึ้นตามต้องการ



รูปที่ 8. การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica [5]

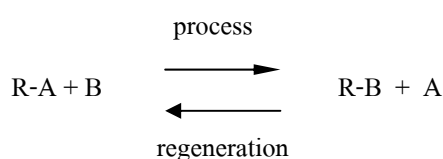
ข้อจำกัดในการสังเคราะห์ dendrimer บนผิว silica

1. เกิดการเชื่อมขวางภายในโมเลกุลเดียวกัน ทำให้โครงสร้างไม่เป็นไปตามอุดมคติ
2. ถ้าการทำปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ในขั้นตอนใดไม่สมบูรณ์ นอกจากจะทำให้โครงสร้างไม่เป็นไปตามอุดมคติแล้ว ยังทำให้ปฏิกิริยาและโครงสร้างในขั้นต่อ ๆ ไปมีลักษณะที่ไม่สมบูรณ์ตามไปด้วย
3. ปัญหาอันเนื่องมาจากการเกิด steric hindrance ทำให้การสังเคราะห์ dendrimer ให้มีโครงสร้างที่สมบูรณ์ ในระดับ generation ที่สูงขึ้น ทำได้ยาก

2.5 การแลกเปลี่ยนไอออน

2.5.1 หลักการของการแลกเปลี่ยนไอออน [20]

การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นการแลกเปลี่ยนระหว่างไอออนที่อยู่ในวัฏภาคของแข็งกับวัฏภาคของเหลว ซึ่งไอออนที่อยู่ในวัฏภาคของแข็งเป็นประจุที่ไม่ติดแน่น สามารถเปลี่ยนกลับไปกลับมาได้ เนื่องจากแรงทางไฟฟ้าสถิต (electrostatic force) บนผิวของเรซิน และเกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่มีประจุเหมือนกับในสารละลายที่ไหลผ่านเรซิน โดยอาศัยหลักการที่ว่าไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินได้ไม่เท่ากัน หรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยที่ไม่เกี่ยวข้องกับอนุโมลในโครงสร้างทางกายภาพของแข็งแต่อย่างใด โดยที่สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งไอออนที่มีประจุลบและไอออนที่มีประจุบวก เมื่อเกิดการแลกเปลี่ยนแล้วสามารถเปลี่ยนกลับมาอยู่ในรูปของไอออนเดิม โดยการผ่านสารละลายที่มีไอออนเช่นเดียวกับไอออนเริ่มต้น เรียกขั้นตอนนี้ว่าการรีเจนเนอเรต (regeneration) และสารที่ใช้เรียกว่ารีเจนเนอเรนต์ (regenerant) และมีการแลกเปลี่ยนไอออนแสดงดังสมการ



สารแลกเปลี่ยนไอออนจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม (counter ion) ซึ่งไอออนที่มีประจุตรงข้ามนี้จะเป็นไอออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนกับไอออนที่อยู่ในสารละลาย ซึ่งเป็นไอออนที่เราต้องการแยกออกมา ดังนั้นการเรียกชนิดของสารแลกเปลี่ยนไอออน จะเรียกตามชนิดของประจุที่เกิดการแลกเปลี่ยน เช่น ถ้ามีการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุบวกจะเรียกว่า ตัวแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchanger) หรือเรซินไอออน

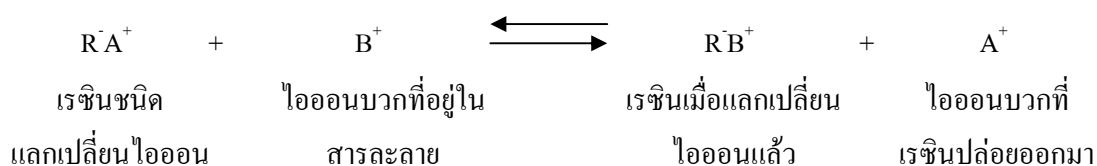
บวก (cation resin) และถ้าเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุลบ จะเรียกว่า ตัวแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anion exchanger) หรือเรซิน ไอออนลบ (anion resin)

โดยส่วนมากในสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์จะมีสมบัติในการแลกเปลี่ยนไอออน เรซินแลกเปลี่ยนไอออนจากสารอินทรีย์เริ่มมีใช้ในปลายปี 1930 โดยเป็นผลิตภัณฑ์ที่มาจาก phenolic ในกลางปี 1940 มี styrenic resin และ acrylic resin ประมาณ 20 ปีที่แล้วตลาด ion exchange ตั้งแต่ต้นปีถึงกลางปี 1990 จะมี styrenic resin เป็นจุดเด่น แต่ก็มี acrylic resin ที่เริ่มจะมีบทบาทสำคัญขึ้นมาบ้าง ส่วน phenolic-based resin ยังไม่มีปรากฏ เรซินชนิดอื่น ๆ ก็หาได้ในตลาดอีกเล็กน้อยแต่ก็ไม่ได้ผลิติดอกมามากนัก styrenic resin และ acrylic resin ถูกผลิตออกมาเป็นเม็ดเล็ก ๆ และเรซินอื่นอาจจะถูกผลิตออกมาเป็นแผ่นกระดาน เส้นใยหรือโฟม

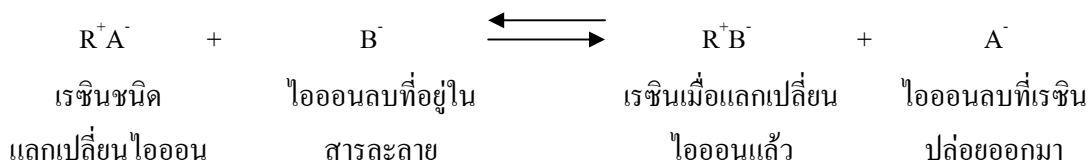
2.5.2 ชนิดของเรซินและสมบัติของเรซิน [20]

ลักษณะทั่วไปของเรซิน คือ ขอมให้ของเหลวซึมผ่านเข้าไปภายในโครงสร้างได้ ทำให้เกิดการบวมตัวของเรซิน โดยเรซินจะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนที่จะเป็นบริเวณซึ่งเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกระจายอยู่ภายในอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นคุณสมบัติที่สำคัญอย่างหนึ่งของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนก็คือ ต้องเข้ากันได้กับตัวกลางของเหลว แต่จะต้องไม่เกิดการละลายเพียงแต่เกิดการบวมตัวเท่านั้น เรซินที่ใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ คือ

1.) เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนบวก (cation exchange resin) เป็นเรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) เช่น -OH, -COOH, -PO(OH)₂ และ -SO₃H เป็นต้น โดยทั่วไปแล้วเรซินจำพวกนี้สามารถทำปฏิกิริยากับไอออนบวกที่อยู่ใกล้เคียงในสารละลายได้ สามารถเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ ดังต่อไปนี้



2.) เรซินชนิดแลกเปลี่ยนไอออนลบ (anion exchange resin) เป็นเรซินที่ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชัน (functional group) เช่น -NH₂ ทั้ง primary, secondary, tertiary และ quaternary ammonium group ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับไอออนลบ จากสารละลายที่อยู่ใกล้เคียงได้ สามารถเขียนปฏิกิริยาทั่วไปได้ดังต่อไปนี้

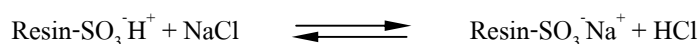


ถ้าแบ่งตามหมู่ฟังก์ชันจะแบ่งได้เป็น 4 ชนิด

1.) เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดแก่ (Strong acid cation exchanger ,SAC)

หมายถึง เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดแก่ เช่น ซัลโฟนิก (SO_3H) ฟอสโฟนิก (H_2PO_4) อยู่ในพอลิเมอร์ เมื่อมีการแลกเปลี่ยนไฮโดรเจนจะหลุดออกจากเฟสของแข็งและเข้าไปในเฟสของเหลว ส่วนไอออนจากเฟสของเหลวก็จะมาติดอยู่ที่เฟสของแข็ง เรซินแบบ SAC สามารถแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออนในเกลือ NaCl ในธรรมชาติได้

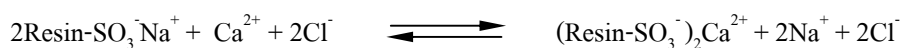
ตัวอย่าง



ความสามารถเช่นนี้เรียกว่า การแยกเกลือ (salt splitting) ซึ่งเป็นคุณสมบัติของ SAC ที่แตกต่างจากเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดอ่อน โดยเรซินแบบ SAC จะมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนสูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดอ่อน แต่การรีเจนเนอเรตก็จะทำได้ยากกว่า

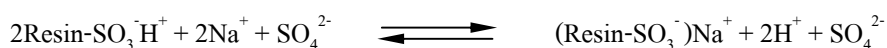
ถ้าในเฟสของเหลวมี Ca^{2+} อิสระอยู่ และที่ functional group เป็น sodium salt ก็จะเกิดความเป็นกลางขึ้นทั้งในเฟสของแข็งและของเหลว ซึ่งไม่จำเป็นที่เรซินจะต้องอยู่ในรูปไฮโดรเจนสำหรับดูดซับไอออนบวก

ตัวอย่างการบำบัดน้ำจากบ้านและโรงงาน



Na^+ จะถูกแลกเปลี่ยนโดย Ca^{2+} ซึ่งเรซินจะเลือกตัวที่จับได้ดีกว่า

ในหลายโรงงาน มีการประยุกต์ใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกของกรดแก่ที่อยู่ในรูปของไฮโดรเจน โดยทำการ process ในของเหลวที่มีพวกเกลือความเข้มข้นต่ำ

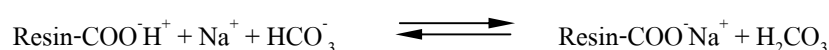


เรซินเลือก Na^+ มากกว่า H^+

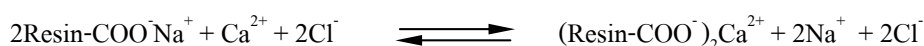
2.) เรซินแลกเปลี่ยนประจุบวกแบบกรดอ่อน (Weak acid cation exchanger ,WAC)

หมายถึง เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นกรดอ่อน เช่น หมู่คาร์บอกซิล (COOH) ติดอยู่กับพอลิเมอร์ แม้ว่าจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ใน process ได้ไม่มากเท่ากรดแก่เนื่องจากมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนที่ต่ำกว่า แต่ก็มียอดคือ สามารถรีเจนเนอเรตได้ง่าย พวกเรซินเหล่านี้ประกอบอยู่ในหลายระบบ ซึ่งมีความจุในการ operate สูงและสามารถใช้ประโยชน์ได้ดี อาจใช้ร่วมกับเรซินแบบ SAC เพื่อลดค่าใช้จ่ายในการรีเจนเนอเรต

การแลกเปลี่ยนไอออนของกรดอ่อน ไม่สามารถจะแตกเกลือที่เป็นกลาง เช่น NaCl ได้ แต่จะมีการแลกเปลี่ยนเมื่อเกลือเป็นเบสแก่และกรดอ่อน เช่น

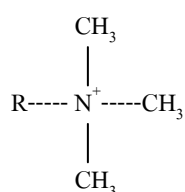


Na^+ ซึ่งอยู่ในเรซินกรดอ่อนจะแลกเปลี่ยนประจุบวกในสารละลายที่เป็นกลาง เบส และกรดอ่อน

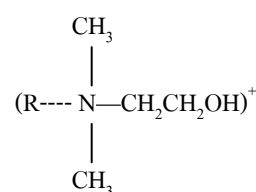


3.) เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบด่างแก่ (Strong basic anion exchanger ,SBA)

หมายถึง เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นเบสแก่ เช่น หมู่เอมีน ซึ่งได้จากการทำปฏิกิริยา methylation ของพอลิเมอร์ กับ tertiary amine เช่น trimethylamine ได้เป็นเรซินแบบ SBA type I หรือถ้าทำปฏิกิริยากับสารไดเมทิลเอทานอลามีน (dimethyl ethanolamine) จะได้เรซินแบบ SBA type II



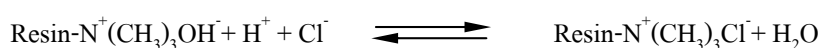
Type I



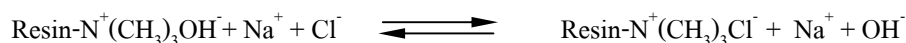
Type II

R: โครงสร้างของเรซิน

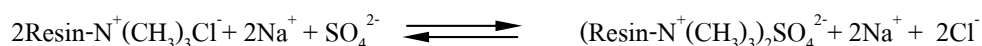
เรซินที่มีการแลกเปลี่ยนเบสแก่จะมี hydroxide ion ที่เกาะอยู่กับ quaternary ammonium group ของเรซินจะถูกใช้ในการลดความเป็นกรด



Hydroxide ion จะถูกปลดปล่อยโดยเรซินที่เป็นไอออนลบสู่เฟสของเหลว ผลของการกำจัดความเป็นกรดในของเหลว คือ ทำให้เรซินเปลี่ยนเป็นเกลือ แต่ถ้าต้องการทำให้เรซินกลับมามี hydroxide ion จะต้องล้างด้วยสารละลาย NaOH นอกจากนี้ hydroxide ion สามารถทำให้เกิดการแตกเกลือได้



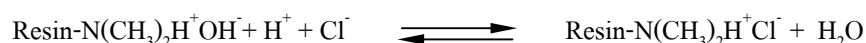
ไอออนลบของเรซินแลกเปลี่ยนไอออนของเบสแก่สามารถใช้แลกเปลี่ยนไอออนลบอื่นได้ ซึ่งเรซินจะเลือกไอออนที่ดีกว่า



4.) เรซินแลกเปลี่ยนประจุลบแบบด่างอ่อน (Weak basic anion exchanger ,WBA)

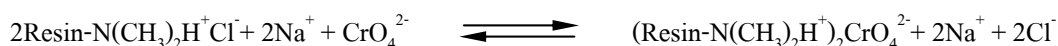
หมายถึง เรซินที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นเบสอ่อนเช่น primary amine ($\text{CH}_2\text{NH}_2(\text{CH}_3)^+$), secondary amine ($\text{CH}_2\text{NH}(\text{CH}_3)_2^+$) และ tertiary amine ($\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_3)_3^+$)

การแลกเปลี่ยนไอออนของเบสอ่อนในเรซินมีทั้ง primary amine, secondary amine และ tertiary amine ซึ่ง tertiary amine จะเป็นชนิดที่มีความสำคัญ เรซินเบสอ่อนจะเลือกจับน้อยกว่าเรซินเบสแก่เมื่อแลกเปลี่ยนกรดแก่



ส่วนมากการแลกเปลี่ยนประจุลบของเบสอ่อน จะดูดซับพวกสารออกแกนิคส์กรดอ่อน เช่น formic acid และ acetic acid แต่ไม่สามารถแลกเปลี่ยนกับพวกกรดอ่อน เช่น carbonic acid หรือ silicic acid ได้

เรซินเบสอ่อนเมื่ออยู่ในรูป free base (hydroxyl) ไม่สามารถแตกเกลือที่เป็นกลางได้ เช่น NaCl แต่รูปเกลือของเรซินเบสอ่อนจะปลดปล่อยไอออนลบไปยังเฟสของเหลวถ้าในสารละลายมีไอออนอื่น ๆ ที่เรซินเลือกจับได้ดีกว่าอยู่ด้วย เช่น



2.6 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย [21],[22]

2.6.1 การกรองแบบ Ultrafiltration

หลักการ

ระบบนี้ คือ ระบบกรองที่ใช้แผ่นเยื่อกรองแบบ porous membrane อัดน้ำเข้าไปด้วยแรงดันพอประมาณ โดยปกติต่ำกว่า $1,034 \text{ kN/mm}^2$ ซึ่งจะทำหน้าที่แยกสารปนเปื้อนทั้งแบบละลายน้ำและตะกอนเล็ก ๆ ได้ โดยปกติเป็นสารปนเปื้อนที่มีขนาดน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 500 ถึง 500,000 และขนาดตั้งแต่ 2×10^{-6} ถึง $1 \times 10^{-2} \text{ mm}$.

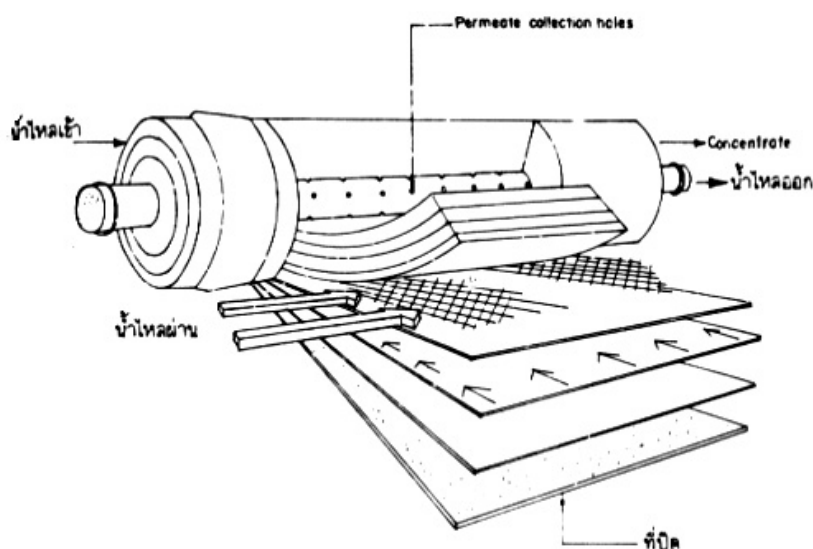
ระบบนี้อาจใช้เป็นระบบกำจัดขั้นต้น ก่อนที่จะให้น้ำทิ้งไหลผ่านระบบออสโมซิสผันกลับ ลักษณะการทำงานของระบบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.1

ทฤษฎี

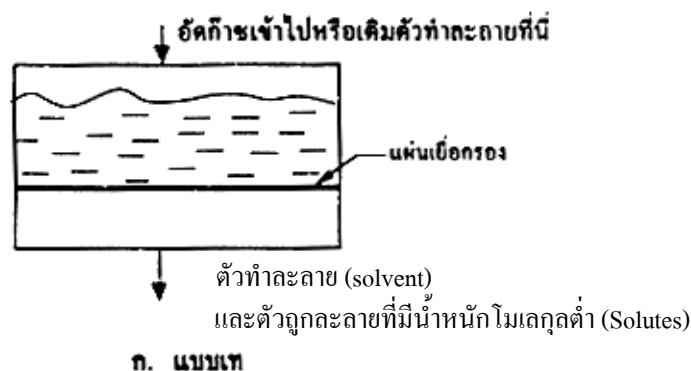
ในการกรองแบบ ultrafiltration เป็นการกรองแบบลักษณะเท และลักษณะการไหลแบบต่อเนื่อง เมื่อพิจารณาหลักการการทำงานของระบบจะได้ค่าอัตราป้อนแปรตามกับแรงดันที่ให้ และแปรผกผันกับความต้านทานของเยื่อกรอง

ชนิดของเยื่อกรอง

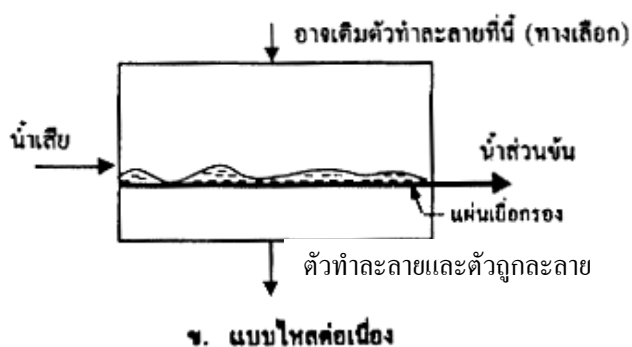
เยื่อกรองในการกรองแบบ ultrafiltration ได้แก่ พวกรวม cellulose acetate และพวกรวมพอลิเมอร์สังเคราะห์ต่าง ๆ พวกรวมเยื่อกรองเหล่านี้มีอัตราการป้อนน้ำเข้า ขนาดแรงดัน 70 ม.น้ำ ตั้งแต่ 0.4 ถึง 150 ลบ.ม./(ตร.ม.วัน) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดเยื่อกรองที่ใช้ ซึ่งสามารถหาข้อมูลได้จากผู้ผลิตเยื่อกรอง



รูปที่ 9. ระบบกรองแบบ ultrafiltration [21]



รูปที่ 10. การทำงานของระบบกรองแบบ ultrafiltration แบบเท[21]



รูปที่ 11. การทำงานของระบบกรองแบบ ultrafiltration แบบไหลต่อเนื่อง[21]

การนำไปใช้งาน

ระบบกรองแบบ ultrafiltration ถูกนำไปใช้ในโรงงานอาหารและโรงงานยา พวกเอนไซม์ ไวรัส และวัคซีนก็สามารถนำระบบกรองแบบนี้มาใช้ในการแยก ส่วนระบบกรองแบบนี้ยังสามารถนำไปใช้ช่วยในการผลิตเบียร์ น้ำตาล สำหรับในระบบน้ำเสียอาจใช้ทดแทนระบบถังทำขึ้น ถึง ตกตะกอนและระบบรวมตะกอน พวกคินเหนียวและจุลชีพต่าง ๆ ก็สามารถถูกแยกออกด้วยวิธีนี้

2.6.2 ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis)

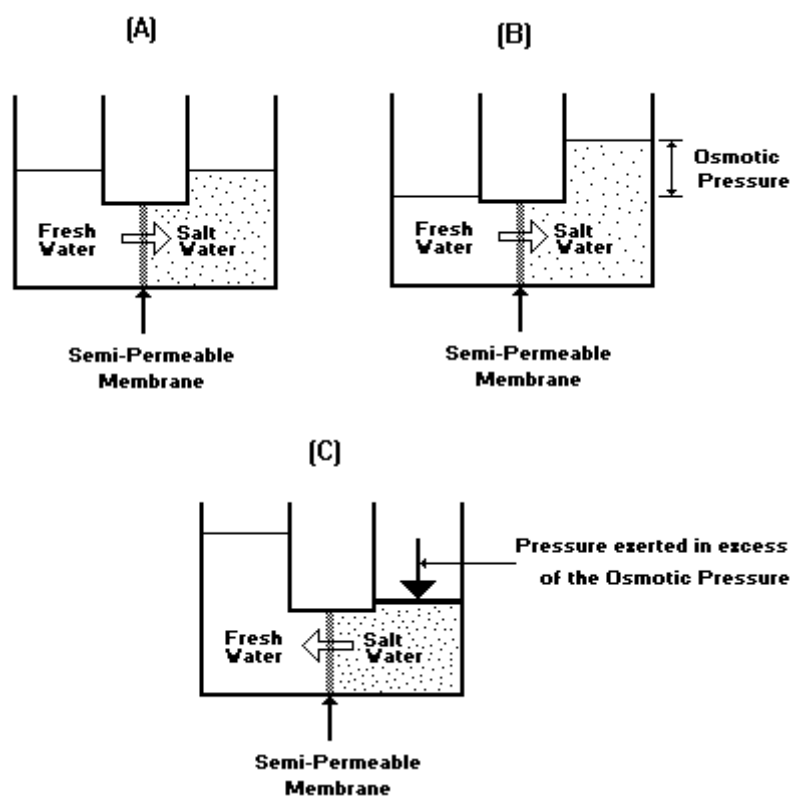
หลักการ

ระบบนี้อาจเรียกว่าระบบ hyperfiltration สามารถแยกสารปนเปื้อนขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 6×10^{-5} มม. นิยมใช้แยกเกลือที่ละลายน้ำด้วยการกรองผ่านเยื่อกรองแบบเยือกแข็งซึมผ่านได้ ความดันสูงกว่าความดันขนาด osmotic pressure โดยปกติจะมีความดันตั้งแต่ขนาดความดันบรรยากาศจนถึง $6,900 \text{ kN/mm}^2$ ระบบนี้ประกอบด้วยแผ่นเยื่อกรอง ตัวถัง และเครื่องสูบน้ำที่ให้

ความดันสูง พวกแผ่นเยื่อกรองที่นิยมใช้กันมาก ได้แก่ cellulose acetate และไนลอน ซึ่งมีลักษณะเป็น spiral wound tubular หรือ hollow fiber โดยจะนำไปใช้บำบัดน้ำทิ้งให้มีคุณภาพน้ำทิ้งได้มาตรฐานสูง หรือต้องการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่อีกสำหรับกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด หรือแม้กระทั่งอาจนำไปใช้เป็นน้ำประปาสำหรับอุปโภคและบริโภคก็ได้



รูปที่ 12. ระบบออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis)

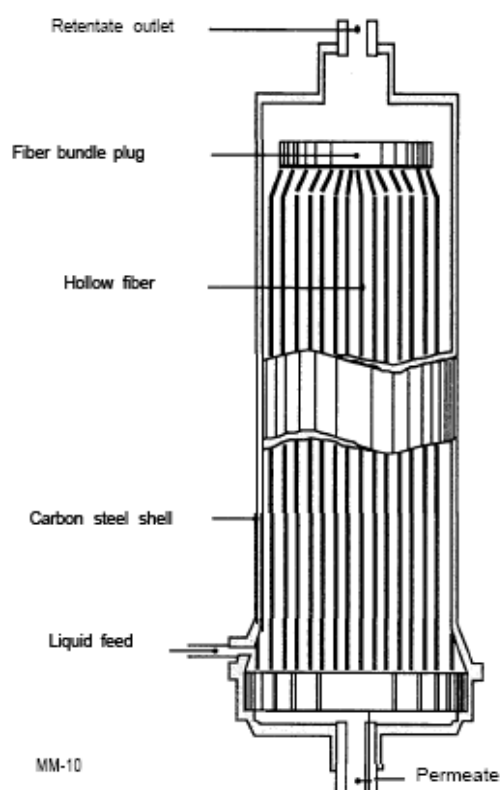
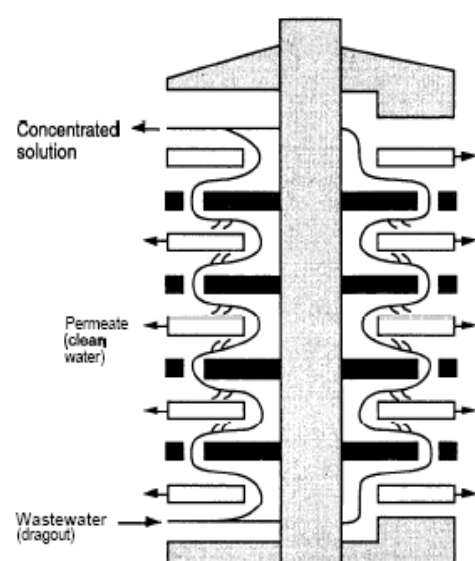


รูปที่ 13. การเปรียบเทียบระหว่างระบบ osmosis กับระบบ reverse osmosis

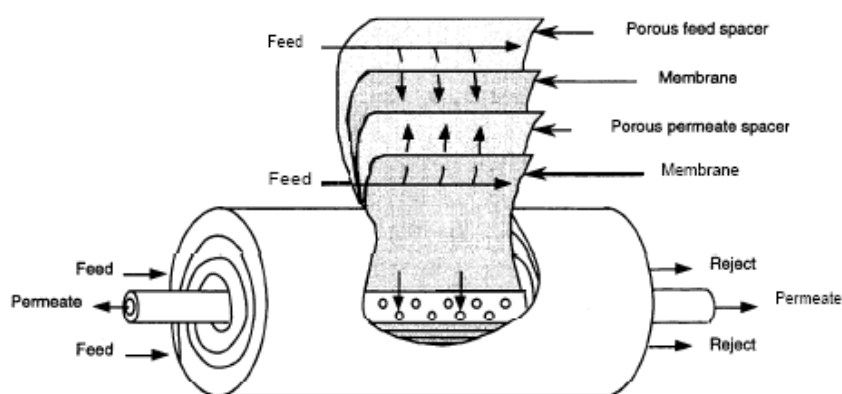
ประเภทของระบบออสโมซิสผันกลับ

ระบบออสโมซิสผันกลับมีหลายประเภท ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับการใช้งานและการออกแบบของผู้ผลิตเครื่องออสโมซิสผันกลับ โดยทั่วไประบบออสโมซิสผันกลับจะเป็นระบบไหลต่อเนื่อง สำหรับประเภทของเครื่องออสโมซิสผันกลับมีด้วยกัน 4 ประเภท คือ

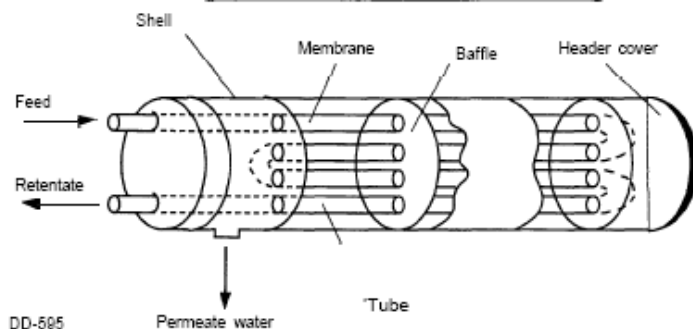
แบบ plate และ frame



แบบ hollow fiber



แบบ spiral wound



แบบหลอด

รูปที่ 14. ระบบออสโมซิสผันกลับแบบต่าง ๆ

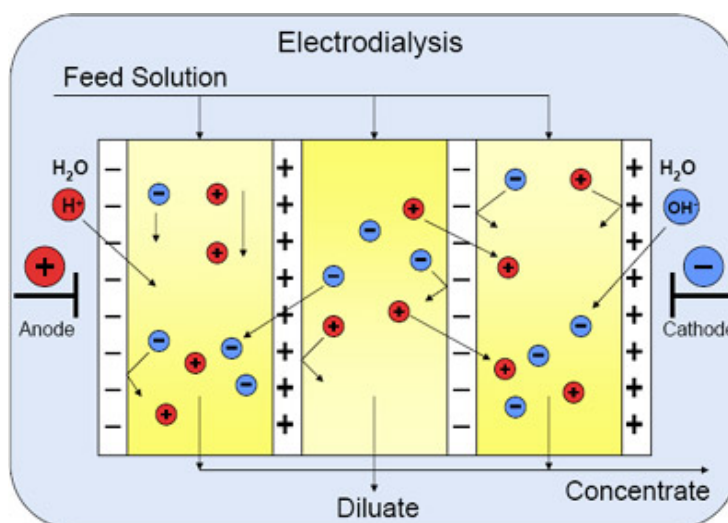
2.6.3 การแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง

หลักการ

Electrodialysis สามารถแยกสารปนเปื้อนขนาดตั้งแต่ 4×10^{-7} ถึง 1×10^{-4} มม. จะนิยมใช้สำหรับการแยกเกลือออกจากน้ำทะเล และเป็นวิธีที่ใช้กำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสียได้ ซึ่งโดยปกติจะใช้ระบบนี้ในโรงงานเพื่อบำบัดน้ำเสีย ระบบนี้ประกอบด้วยขั้วเซลล์ที่มีประจุบวกและลบ และจะมีแผ่นเยื่อกรองแบบ permeable membrane ที่มีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. เยื่อกรองประจุบวก (cation membrane) ซึ่งจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุลบ และปล่อยให้สารที่มีประจุบวกผ่านไป
2. เยื่อกรองประจุลบ (anion membrane) ซึ่งจะจับสารปนเปื้อนที่มีประจุบวก และปล่อยให้สารที่มีประจุลบผ่านไป

ก่อนที่จะใช้ระบบนี้น้ำทิ้งจะต้องผ่านระบบที่สามารถกำจัดหรือแยกสารตะกอนเล็ก ๆ และสารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่ออกจากรน้ำแล้ว



รูปที่ 15. ระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง

ทฤษฎี

ระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรองได้อาศัยกระแสไฟฟ้าโดยมีขั้วบวกและขั้วลบ ในการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำทิ้ง ซึ่งมีทั้งประจุบวกและอีกแผ่นเป็นลบ โดยจัดวางสลับกันไป เมื่อปล่อยกระแสไฟฟ้าตรงเข้าระบบ ทำให้ไอออนบวกถูกจับด้วยเยื่อกรองประจุลบ และพวกไอออนลบถูกจับด้วยเยื่อกรองประจุบวก โดยปกติจะเกิดก๊าซไฮโดรเจนขึ้นที่บริเวณขั้วลบ หรือออกซิเจนขึ้นที่บริเวณขั้วบวก

การนำไปใช้งาน

เครื่องแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรองนิยมใช้กับการทำน้ำกร่อยให้เป็นน้ำจืดได้อย่างเหมาะสม คือ ลดค่า TDS จาก 5000 มก/ล ให้เหลือ 500 มก/ล พบว่าเครื่องนี้ไม่เหมาะกับการทำน้ำทะเลให้เป็นน้ำจืด เนื่องจากมักจะพบปัญหาอุดตันของพวกกากของแข็งเกาะติดบริเวณแผ่นเยื่อกรอง ทำให้สิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างมาก สำหรับในการบำบัดน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสียขั้นที่สองแล้ว ด้วยวิธีนี้จะสามารถใช้ได้เหมาะสมถ้าได้มีระบบสร้างและรวมตะกอน และระบบกรองทรายทำการบำบัดน้ำทิ้งก่อนเข้าสู่ระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง อนึ่งเพื่อป้องกันการเกิดอุดตันบริเวณแผ่นเยื่อกรองอาจใช้กรดผสมกับน้ำทิ้งก่อนเข้าระบบนี้เพื่อลดปัญหาดังกล่าว โดยภาพรวมแล้ว ระบบนี้เมื่อเปรียบเทียบกับระบบออสโมซิสผันกลับ การนำมาใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งระบบแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรองนิยมใช้กันน้อยกว่าของระบบออสโมซิสผันกลับ

2.6.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange, IE)

เป็นกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุ เหมือนกับที่อยู่ในสารละลายกับไอออนที่เกาะอยู่บนผิวของเรซิน (resin) โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบ หรือถูกดูดซับ โดยเรซินไม่เท่ากัน หรือเป็นการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างของแข็งกับของเหลวโดยไม่เกี่ยวข้องกับอนุโมลในโครงสร้างทางกายภาพของของแข็งแต่อย่างใด สามารถแลกเปลี่ยนได้ทั้งไอออนที่มีประจุลบ (anion) และไอออนที่มีประจุบวก (cation) อัตราการแลกเปลี่ยนไอออนควบคุมได้ด้วยอัตราการไหล วิธีนี้มีความเลือกสรร (selectivity) สำหรับไอออนแต่ละชนิด เหมาะสำหรับน้ำเสียที่มีปริมาณของโลหะในน้ำต่ำ หรือมีความเข้มข้นเทียบเท่าปริมาณของแคลเซียมคาร์โบเนตไม่เกิน 2,500 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 0.05 กรัมสมมูลต่อลิตร เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ

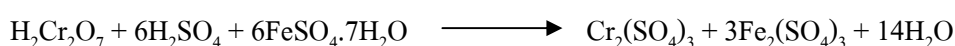
วิธีนี้ใช้เรซินที่มีสมบัติเลือกจับไอออนของโลหะบางชนิด เช่น **LEWAIT TP 207** ของบริษัทไบเออร์เยอรมันนี่เป็นเรซินที่เลือกจับเฉพาะไอออน ทองแดง ในสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) 1.5-2.0, **AMBERLITE XE-318** ของบริษัท ROHM & HASS ชอบจับกับไอออนของโลหะกลุ่มทรานซิชัน ใช้งานได้ในช่วงความเป็นกรด-ด่างที่กว้าง ใช้แยกสังกะสีจากน้ำเสียจากเหมืองซึ่งมีสังกะสี ทองแดง แมกนีเซียม แคลเซียม และแมงกานีสได้

เรซินที่จับโลหะไว้นั้นต้องนำกลับมาใช้งานอีกโดยการกำจัดเอาโลหะหนักออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมแล้วกำจัดอีกครั้งหนึ่ง ด้วยสารละลายกรดจะได้สารละลายที่มีโลหะหนักละลายอยู่มากกว่าในน้ำเสียเดิม แต่จะเป็นปัญหาดอนนำไปทิ้งจึงต้องนำสารละลายที่มีโลหะละลายอยู่มากนี้แยกเอาโลหะออกโดยวิธีอื่นต่อไป

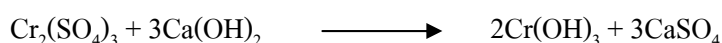
2.6.5 การตกตะกอน (Precipitation)

วิธีการแบบดั้งเดิม (Conventional) ใช้วิธีการตกตะกอนโลหะหนักที่ละลายอยู่ด้วยด่าง เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (Ca(OH)₂) โลหะบางชนิดมีความเป็นพิษสูง และละลายน้ำได้ดี เช่น โครเมต (CrO₄²⁻) ดังนั้นจึงต้องรีดิวซ์ให้อยู่ในรูป Cr³⁺ ที่ไม่มีพิษ และตกตะกอนเป็น Cr(OH)₃ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวรีดิวซ์ เช่น แบเรียมซัลไฟด์ (BaS), เฟอรัสซัลเฟต (FeSO₄·7H₂O) ปฏิกิริยารีดักชันและตกตะกอนจะเกิดขึ้นได้ดีหรือไม่ ขึ้นอยู่กับ pH, ปริมาณและชนิดของสารเคมี, ระยะเวลาสัมผัสสารเคมี และระยะเวลาการตกตะกอนที่ใช้ วิธีนี้มีข้อเสียในกรณีที่มีโลหะหนักหลายชนิดปนอยู่ในน้ำเสีย ต้องตกตะกอนทีละชนิด ใช้เวลานาน และต้องนำกากตะกอนไปกลบฝัง ซึ่งมีโอกาสเป็นไปได้สูงที่กากตะกอนเหล่านี้จะปะปนไปกับขยะชุมชน ประการสำคัญ คือ สูญเสียโลหะที่มีค่าและน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยไม่อาจนำกลับมาใช้ใหม่ได้

- ตัวอย่างสมการรีดิวซ์



- ตัวอย่างสมการตกตะกอน



2.6.6 การระเหย (Evaporation)

ใช้การระเหยนํ้าออก ทำให้สารมีความเข้มข้นสูงขึ้น การระเหยมีทั้งระเหยที่ความดันบรรยากาศธรรมดา (atmospheric evaporation) และระเหยภายใต้สุญญากาศ (vacuum evaporation) น้ำเสียต้องผ่านการบำบัดมาก่อน วิธีนี้เหมาะสำหรับน้ำที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง สามารถนำไปใช้งานร่วมกับวิธีแลกเปลี่ยนไอออน แต่ต้นทุนการดำเนินการสูง

2.6.7 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery, ER)

เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดก๊าซออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะสูง เช่น น้ำทิ้งจากกระบวนการชะล้างโลหะ วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยม เพราะสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก เนื่องจากสารละลายที่เจือจางทำให้ความต้านทานไฟฟ้าสูงขึ้น วิธีนี้เหมาะกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของโลหะระหว่าง 10 ถึง 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.6.8 การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction, SE)

วิธีนี้ใช้สารเคมีที่มีสมบัติเลือกสกัดไอออนของโลหะหนักบางชนิด โดยการละลายสารสกัดในตัวทำละลายที่เหมาะสม เช่น **LIX 64N** ในน้ำมันก๊าดเลือกสกัดเฉพาะไอออนทองแดง **DI-(2-ETHYLHEXYL)** ในน้ำมันก๊าดเลือกสกัดเฉพาะไอออนเหล็กและสังกะสี **XM-200** ใช้สกัดไอออนนิกเกิล และ **TBP** ใช้สกัดไอออนโมลิบดีนัม เป็นต้น

วิธีนี้ใช้แยกโลหะหนักจากแร่เศษโลหะและสารละลายต่าง ๆ ที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบและมีโลหะปนอยู่ เวลาใช้นอกจากจะทำให้เจือจางโดยการละลายในตัวทำละลายเพื่อลดความหนืดแล้วยังต้องเติมสารต่าง ๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพในการสกัด เช่น แอลกอฮอล์ชนิดที่มีโมเลกุลยาว ๆ หรือ **TPB** การขจัดโลหะหนักด้วยวิธีนี้จะประหยัดก็ต่อเมื่อมีการป้องกันการสูญเสียที่เกิดขึ้นของสารที่ใช้ทุกอย่างให้น้อยที่สุด นอกจากนี้สารเหล่านี้ยังเพิ่มค่า BOD และ COD ของน้ำทิ้งขั้นสุดท้ายด้วยและสารสกัดบางชนิดถึงแม้มีปริมาณน้อย ๆ ในน้ำทิ้งก็ทำให้ปลาตายได้

2.6.9 คอนเนน ไดอะไลซิส (Donnan Dialysis, DD)

เป็นการแลกเปลี่ยนไอออนอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เมมเบรนที่ยอมให้ไอออนบวกหรือลบผ่านได้ เมมเบรนมีลักษณะเป็นท่อที่ด้านในให้น้ำเสียไหลผ่าน ในขณะที่ด้านนอกมีสารละลายของสารรีเจนเนอเรนต์ (Regenerant) ไหลผ่านด้านบนและด้านล่างของท่อในทิศทางตรงข้าม โดยความเข้มข้นของตัวรีเจนเนอเรนต์ที่ใช้จะมีความเข้มข้นต่างกัน 2 ความเข้มข้น ในทิศทางตรงข้ามกับการไหลของน้ำเสีย ความเข้มข้นของโลหะในสารละลายจะลดลงตามความยาวของท่อ วิธีนี้ทำให้สารเข้มข้นขึ้น 10-15 เท่า มีประสิทธิภาพถึงร้อยละ 99 เมื่อใช้แยกทองแดง, แคดเมียม, หรือสังกะสี ที่มีความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร วิธีนี้ใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีรีเวิร์สออสโมซิสและอิเล็กโตรไดอะไลซิส แต่วิธีนี้อยู่ระหว่างการพัฒนาในห้องปฏิบัติการ

2.6.10 สตาร์ช แซนเทท ชนิดไม่ละลายน้ำ (Insoluble Starch Xanthate, ISX)

สารนี้เป็น Xanthate ของโซเดียมและแมกนีเซียม ซึ่งจะแลกเปลี่ยนโซเดียมไอออนหรือแมกนีเซียมไอออนกับไอออนของโลหะ และเกิดตะกอนโลหะแซนเทท ซึ่งตกตะกอนอย่างรวดเร็ว แยกโลหะออกโดยการสกัดด้วยกรดไนตริก (HNO_3) หรือเฟา วิธีนี้มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประมาณ 1.1-1.5 มิลลิกรัมสมมูลย์ของไอออนโลหะต่อกรัมของ ISX หรือใช้ ISX จำนวน 10 ปอนด์ จะแยกทองแดงได้ประมาณ 1 ปอนด์ สามารถใช้งานได้ในช่วง pH 3-11 วิธีนี้ไม่เหมาะสม ถ้ามีปริมาณโลหะเริ่มต้นมากกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.6.11 การเติมโอโซน (Ozonation)

เป็นเทคนิคใหม่ที่ใช้กำจัดน้ำเสียทุกชนิด วิธีนี้ใช้กันมานานในการฆ่าเชื้อโรคในน้ำประปา และของโสโครก แก๊สโอโซนสามารถกำจัดโลหะหนักทุกสภาพที่มีอยู่ในน้ำเสียได้ถ้าใช้ร่วมกับ อัลตราไวโอเลต ปฏิกริยาการกำจัดจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและประหยัด โลหะหนักในน้ำเสียจะถูกออกซิไดส์ซึ่งทำให้มีลักษณะเป็นวุ้นจึงกรองแยกออกได้ง่าย ใช้กำจัดน้ำเสียที่มีสภาพเป็นกรด จากเหมืองโดยการเติมโอโซนร่วมกับปูนขาว เพื่อกำจัดเหล็ก แมงกานีส อะลูมินัมได้ และยัง ประหยัดกว่าการออกซิไดส์ด้วยอากาศ

2.6.13 เทคนิคอื่น ๆ

นอกจากวิธีดังกล่าวข้างต้นแล้ว ยังมีอีกหลายวิธีที่จะกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย เช่น การใช้ ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และสารพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่มีคุณสมบัติดูดซับโลหะหนักซึ่ง เหมาะสมในการกำจัดโลหะหนักซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบเชิงซ้อน โดยเฉพาะวิธีอิเล็กโตร ไดอะไลซิส การทำให้เย็นถึงจุดเยือกแข็งเพื่อตกผลึกโลหะหนักและสารมลทินเพื่อแยกตัวออก จากน้ำ การใช้ฟลูอิด-ไดซ์เบด และวัชพืชบางชนิดที่สามารถดูดซับสารมลทินที่เป็นสารอินทรีย์ และอนินทรีย์ได้หลายแสนชนิด เช่นผักตบชวา สามารถดูดซับโลหะหนักหลายชนิดผ่านทางราก เป็นต้น

2.7 โลหะหนักและตัวอย่างโลหะหนักในอุตสาหกรรม [20]

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 กรัม / ลบ.ซม. ตัวอย่างเช่น ตะกั่ว แคดเมียม โปรท โคบอลต์ เป็นต้น ความเป็นพิษของโลหะหนักเกิดจากโลหะหนักที่ร่างกาย ได้รับทางระบบต่าง ๆ ของร่างกายไปรบกวนการทำงานของระบบเอ็นไซม์ของเซลล์ และจับยึดกับ เยื่อหุ้มเซลล์ทำให้การควบคุมการลำเลียงสารต่าง ๆ ของเยื่อหุ้มเซลล์ผิดปกติไป โลหะหนักบาง ชนิดมีผลต่อสมบัติทางด้านโครงสร้าง หรือเคมีไฟฟ้าของเซลล์ ความเป็นพิษของโลหะหนัก ขึ้นอยู่กับรูปแบบทางเคมีของสารประกอบของโลหะหนักแต่ละชนิดและเส้นทางที่ร่างกายได้รับเข้าไป เช่น ทางระบบหายใจ ระบบทางเดินอาหาร ผิวหนัง ผลของความเป็นพิษของโลหะหนักใน สิ่งมีชีวิตเกิดจากกลไกระดับเซลล์ 5 แบบ คือ 1.) ทำให้เซลล์ตาย 2.)เปลี่ยนแปลงโครงสร้างและ การทำงานของเซลล์ 3.) เป็นตัวการชักนำให้เกิดมะเร็ง 4.) เป็นตัวการทำให้เกิดความผิดปกติทาง พันธุกรรม 5.) ทำความเสียหายต่อโครโมโซม ซึ่งเป็นปัจจัยทางพันธุกรรม [1]

มีโลหะหนักหลายชนิดที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตที่ใช้น้ำหรือบริโภคสัตว์น้ำจากแหล่งน้ำที่มีโลหะหนักที่เป็นพิษเจือปนอยู่ ได้แก่ โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะมากกว่าน้ำ 5 เท่าขึ้นไป มีอัตราการขยายตัวค่อนข้างช้า ทำให้สะสมอยู่ในสิ่งแวดล้อมได้นานในรูปของตะกอน อยู่ในตะกอนดิน สิ่งมีชีวิตในน้ำจะได้รับโลหะหนักจากน้ำ พืช น้ำ สัตว์น้ำ จากการกินตามห่วงโซ่อาหาร ดังนั้นจึงเกิดการสะสมโลหะหนักในเนื้อเยื่อสัตว์และพืชโดยสะสมเพิ่มขึ้นตามลำดับขั้นการบริโภค

โลหะหนักที่พบในแหล่งน้ำ ได้แก่ สารหนู ตะกั่วปรอท แคดเมียม สังกะสี โครเมียม นิเกิลแมงกานีส เป็นต้น โลหะหนักที่มีบทบาทต่อภาวะมลพิษทางน้ำมากที่สุดคือ ปรอท ตะกั่ว และแคดเมียม ถ้ามีมากเกินไปจนเกิดอาการแล้วจะทำให้เป็นพิษต่อร่างกาย ดังเช่น พิษของปรอททำให้เกิดโรคมินามาตะในชาวประมงญี่ปุ่นบริเวณอ่าวมินามาตะ พิษของแคดเมียม ทำให้เกิดโรคอิไต-อิไตในประเทศญี่ปุ่น ในประเทศไทย ประชาชนในอำเภอรัตนบุรี จังหวัดนครราชสีมา เป็นโรคไข้ดำ เนื่องจากน้ำดื่มมีสารหนูเจือปนอยู่มาก

1.) โครเมียม (Cr)

โครเมียม (chromium) มีสูตรเคมี คือ Cr โดยที่สารโครเมียมนี้ สามารถนำมาใช้งานด้านอุตสาหกรรมได้อย่างกว้างขวาง โดยนำมาผสมกับโลหะทำให้เกิดความแข็งแรงมีความเหนียวทนทานทำให้โลหะไม่เป็นสนิมทนต่อการผุกร่อน โลหะโครเมียมบริสุทธิ์ใช้มากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า สารประกอบของโครเมต (chromate) ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องปั้นดินเผา อุตสาหกรรมฟอกหนัง การย้อมสีขน

อันตรายของโครเมียม

1. แผลที่เกิดจากโครเมียม(chrome ulcers) เกิดจากสะสมของฝุ่นละอองของโครเมียมซึ่งโดยมากจะเริ่มที่รอยถลอกของผิวหนัง โครเมียมหรือควันของกรดโครมิกอาจตกลงบนหนังตาหรือที่ปลายจมูก อาจทำให้เกิดแผลขึ้นได้เช่นเดียวกัน
2. ผิวหนังอักเสบ (dermatitis) บริเวณมือ แขน ใบหน้า และหน้าอก
3. ผื่นคันในจมูกถูกเจาะทะลุเมื่อสูดหายใจเอาควันของกรดโครมิกหรือฝุ่นของโครเมียมเป็นประจำ อาการที่เกิดขึ้น คือ ลื่นและพินจะเปลี่ยนเป็นสีออกเหลือง ถ้าเป็นมากจะทำให้ผิวหนังคันในจมูก ถูกทำลายจนเป็นรูทะลุ ซึ่งการทะลุของแผ่นกั้นจมูกนี้ จะไม่รู้สึกรำคาญ แต่จะรู้ตัวเมื่อมีเสียงอู้อี้หรือดังจมูกเบนลงแล้วเท่านั้น
4. มะเร็งของปอดมักจะเกิดกับคนที่สูดหายใจเอาโครเมียมเข้าไปทุกวันติดต่อกันเป็นเวลานาน ๆ เป็นอันตรายแก่ชีวิตเพราะไม่มียารักษาให้หายได้

2.) มังกานีส (Mn)

เนื่องจากโรงงานผลิตถ่านไฟฉายนำแร่แมงกานีสมาบดละเอียดเพื่อทำถ่านไฟฉาย จนเป็นผงฝุ่นของแมงกานีสฟุ้งกระจายสู่บรรยากาศ คนงานหรือผู้ใกล้ชิดหายใจเอาฝุ่นแร่แมงกานีสเข้าไปจะทำให้เกิดอันตรายได้ โดยไปทำลายระบบประสาทส่วนกลาง ได้แก่ สมอง เริ่มด้วยมีไข้ ปวดศีรษะ เบื่ออาหาร ไม่สนใจสภาพแวดล้อม ไม่ดีใจเสียใจ พุดจน้อย ความรู้สึกทางเพศเสื่อม ต่อมาก็เป็นตะคริวบ่อยขึ้น ปวดกล้ามเนื้อบ่อย ๆ พุดจไม่ชัดเจน เวลาหัวเราะกล้ามเนื้อเกร็งไปทั่วใบหน้า เวลาเดินเริ่มมีอาการกระตุก ๆ อาการจะรุนแรงมากขึ้นมีการกระตุกมากขึ้น ก้าวขาสั้น ๆ เดินหัวซุนไปข้างหน้า หกล้มบ่อย กลืนน้ำลายลำบากและเป็นอัมพาตไปในที่สุด ส่วนที่เกี่ยวกับปอดทำให้ปอดบวม โดยมีอาการเริ่มต้นด้วยเจ็บคอ เป็นไข้ ไอมีเสมหะ แน่นอึดอัดหายใจไม่ออก

อันตรายของแมงกานีส

เมื่อหายใจเอาฝุ่นละอองของแมงกานีสเข้าไป แมงกานีสจะแทรกซึมไปตามระบบการไหลเวียนของโลหิต ไปสะสมอยู่ในอวัยวะที่มีไมโทคอนเดรีย (mitochondria) เช่น ในตับ ตับอ่อน ไต และ สมอง ส่วนใหญ่จะสะสมในร่างกายทำให้เกิดพิษชนิดเรื้อรัง (chronic manganese poisoning) จะปรากฏอาการหลังจากแมงกานีสเข้าไปในร่างกายแล้ว 6 เดือน อาการสำคัญ ๆ คือ เบื่ออาหาร อ่อนเพลีย ไม่สนใจ ยินดียินร้ายกับสิ่งแวดล้อม ไม่ดีใจไม่โกรธ อาการปรากฏทางประสาท เช่น อยากหัวเราะหรือร้องไห้ก็จะทำและจะมาเป็นพัก ๆ ทั้งนี้เพราะการหดเกร็งของกล้ามเนื้อตาแข็ง นอนไม่หลับ ปวดศีรษะบ่อย ๆ เป็นตะคริวที่ขา หดสมรรถภาพทางเพศ พุดจาตะกุกตะกัก ขาดเป็นห้วง ๆ พุดลำบาก เป็นไข้ เดินงุ่มง่าม เสียการทรงตัว เดินหน้าถอยหลังลำบาก เดินคล้ายไก่ แมงกานีสทำลายเซลล์ประสาท (ganglion cell) ทำให้ผนังหลอดเลือด หลอดน้ำเหลืองเสื่อมลง ทั้งนี้เพราะแมงกานีสจะทำลายศูนย์กลางที่ช่วยบังคับการยืดหดของหลอดเลือด (vasomotor center) ซึ่งอยู่ในสมอง สำหรับผู้ที่เป็นโรคพิษสุราเรื้อรัง ซิฟิลิส มาเลเรีย อาการจะทรุดหนักลงอีก โรคแพ้แมงกานีส ปกติไม่ใช่โรคที่ทำให้ถึงตาย แต่เป็นโรคที่สร้างความพิการของร่างกายอย่างถาวร มาตรฐานของแมงกานีสมีค่าจำกัดที่ยอมให้มีได้เท่ากับ 5 มิลลิกรัมต่ออากาศ 1 ลูกบาศก์เมตร

3.) อาร์เซนิก หรือ สารหนู (As)

การสูดเอาฝุ่นละอองของสารหนูชนิดอินทรีย์ หรือก๊าซซึ่งมีส่วนประกอบของสารหนู ซึ่งมีการใช้สารหนูในทางอุตสาหกรรม เกษตรกรรมและการแพทย์ โดยเฉพาะใช้ในด้านเกษตรกรรม เป็นยาฆ่าแมลงและปราบศัตรูพืช โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้สารหนู ได้แก่ โรงงานย้อมผ้า โรงงานทำสี ทำดอกไม้เพลิง โรงงานพิมพ์ดอกฟ้า โรงงานผลิตแก้ว โรงงานผสมตะกั่วกับสารหนู เพื่อให้เนื้อตะกั่วแข็งขึ้น โรงงานทำผงซักฟอก ถ้าคนงานสูดหายใจเอาก๊าซซึ่งมีส่วนประกอบของสารหนูเข้าไปจะมีอาการ คือ

- อาการทางระบบทางเดินหายใจ ทำให้ระคายเคืองต่อเนื้อเยื่อเมื่อสูดหายใจเข้าไปบ่อย ๆ นาน ๆ ทำให้เยื่อปอดอักเสบ ติดต่อกันได้โดยไม่มีอาการเจ็บปวดแต่อย่างใด น้ำมูกแห้งคอแห้ง เสียงแหบ เกิดมะเร็งที่ปอด
- อาการทางผิวหนัง ฝุ่นปลิวถูกผิวหนังจะไปรวมอยู่ที่รอยพับที่ข้อมือและของผิวหนัง บริเวณรักแร้และขาหนีบ ทำให้เกิดระคายเคือง อักเสบบวมแดงเป็นตุ่มแข็งใสพองหรือผิวหนังแข็งด้าน หรือเป็นจุดซึ่งเป็นสาเหตุของมะเร็งที่ผิวหนังได้
- อาการทางตา จะเกิดอาการตาแดง ตาอักเสบ เพราะถูกรบกวนจนกระทั่งเส้นโลหิตฝอยแตก
- อาการทางระบบประสาท เนื่องจากสารหนูเข้าไปสู่ระบบการไหลเวียนของโลหิต ซึ่งจะมีผลต่อน้ำย่อยที่ช่วยในระบบเผาผลาญของร่างกาย ทำให้การทำงานเสียไป ปลายประสาทอักเสบ แขนขาชาและเป็นอัมพาตในที่สุด
- อาการทางสมอง ทำให้เกิดการระคายเคืองต่อสมอง กระสับกระส่าย ความจำเสื่อม อาการอื่น ๆ เช่น เกิดอาการทางตับ สารประกอบอินทรีย์ นี้สามารถที่จะทำลายตับได้ ในรายที่กินสารประกอบของสารหนูเข้าไปเป็นเวลานาน จะทำให้เกิดตับแข็ง ตับอักเสบ

โรคไข้ดำ เป็นโรคผิวหนังอันเกิดมาจากพิษสารหนูที่มีอยู่เกินขนาดตามแหล่งน้ำ โรคนี้เกิดที่อำเภอรัตนวาปี จังหวัดนครราชสีมา แหล่งน้ำธรรมชาติมีสารหนูถูกชะล้างมาจากเหมืองแร่ในอดีต โรคนี้เป็นที่สนใจเมื่อคนในอำเภอนี้เป็นโรคนี้กันมาก อาการที่ปรากฏ คือ ผิวหนังเริ่มแข็งกระด้าง ตามข้อนิ้วมือ ฝ่ามือ ฝ่าเท้า และบริเวณลำตัว ผิวหนังได้รุ่มฝ่อกลายเป็นจุดดำ ๆ แล้วค่อยขยายวง เป็นจุดสลับขาวนวลเกลียด ซึ่งสามารถวิเคราะห์โรคได้ว่าเป็นโรคที่เกิดจากพิษของสารหนูที่มีอยู่ในแหล่งน้ำ ปรากฏมีบ่อน้ำที่มีปริมาณสารหนูเกินขนาดมาตรฐานที่เป็นอันตรายทุกบ่อ ปริมาณมาตรฐานที่จะใช้น้ำบริโภคได้ คือ 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ผลการสำรวจและวิเคราะห์พบสารหนูอยู่ในแหล่งน้ำโดยเฉลี่ยมีมากกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

4.) ทองแดง(Cu) [23]

ทองแดง (Copper) เป็นโลหะที่มีความหนาแน่น จุดเดือดและจุดหลอมเหลวสูง พบได้ตามธรรมชาติ ทั้งในดิน หิน น้ำและอากาศ อาจอยู่ในรูปธาตุอิสระหรือสารประกอบ เช่น Cu_2O , Cu_2S , CuF , CuSO_4 , CuFeS_2 เป็นต้น ทองแดงเป็นตัวนำความร้อนและไฟฟ้าที่ดีรองจากเงิน ปัจจุบันจึงมีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น ใช้ผลิตลวดสายไฟ ท่อน้ำ นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเคมีทางการเกษตร สารกำจัดศัตรูพืชและสัตว์รบกวนต่าง ๆ การทำสีข้อม เป็นต้น ส่งผลให้มีการแพร่กระจายของทองแดงสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น ซึ่งเราอาจได้รับทองแดงจากการหายใจ การดื่มน้ำ การบริโภคอาหารในชีวิตประจำวัน ทองแดงมีความจำเป็นต่อร่างกายสิ่งมีชีวิตถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสมกับร่างกาย โดยเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในกระดูกและกล้ามเนื้อ

การเกิดพิษขึ้นอยู่กับปริมาณที่ได้รับเข้าไป ช่องทางที่ได้รับและสภาพร่างกายของแต่ละบุคคล ทองแดงถูกดูดซึมได้ดีในกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนบน โดยซึมผ่านเข้าผนังลำไส้ไปที่ตับ จากนั้นจะรวมตัวกับน้ำดี แล้วถูกหลั่งออกมาบริเวณลำไส้ ขับออกไปกับอุจจาระ หรืออาจถูกดูดกลับเข้าสู่ร่างกายได้ 30% โดยไปสะสมที่กระดูก กล้ามเนื้อ ตับ สมอง การสะสมจะมากที่ตับและสมอง เมื่อได้รับทองแดงในปริมาณมากจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อร่างกาย คือ คลื่นเหียนอาเจียน เกิดการอักเสบในช่องท้องและกล้ามเนื้อ ท้องเสีย การทำงานของหัวใจผิดปกติ กระบวนการภูมิคุ้มกันของร่างกายและอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติทางจิต ส่วนอาการเรื้อรังจากการได้รับติดต่อกันเป็นเวลานาน คือ ตับทำหน้าที่บกพร่อง ไม่สามารถขับทองแดงออกจากร่างกายได้ตามปกติ ทำให้สะสมในร่างกายปริมาณมาก ร่างกายเกิดความผิดปกติ หรือกลุ่มอาการ Wilson' Diseases คือ ร่างกายสันเทาอยู่ตลอดเวลา กล้ามเนื้อแข็งเกร็ง มีน้ำมูกน้ำลายไหล พูดลำบาก

การแก้ไขการเกิดพิษและวิธีการป้องกันการเกิดพิษ

ผิวหนัง : ควรสวมเสื้อผ้าที่รัดกุมและมีเครื่องป้องกันร่างกาย ก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสารทุกครั้ง เมื่อสารพิษถูกผิวหนังรีบล้างออกด้วยสบู่และน้ำสะอาด ถ้าสารพิษกระเด็นหรือหกเปื้อนเสื้อผ้า ต้องรีบเปลี่ยนเสื้อผ้าทันที แล้วล้างผิวด้วยสบู่และน้ำสะอาด จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาล

ตา : ควรมีเครื่องป้องกันสายตาที่เหมาะสมก่อนการปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับสาร (ไม่ควรสวม Contact lens ขณะทำงานเกี่ยวข้องกับสารเคมี) เมื่อสารพิษกระเด็นเข้าตา ต้องรีบล้างออกด้วยน้ำสะอาดจำนวนมากสลับกับการค่อย ๆ กระพริบตาขึ้น-ลง จากนั้นรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

การหายใจ : เมื่อหายใจรับเอาสารเข้าไปเป็นจำนวนมาก ต้องรีบเคลื่อนย้ายผู้ได้รับสารออกจากบริเวณนั้น ไปสู่บริเวณที่มีอากาศถ่ายเทสะดวก ถ้าหยุดหายใจให้รีบทำการผายปอด (mouth-to-mouth) แล้วรีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

การกลืนกินสารพิษ : รีบนำส่งโรงพยาบาลทันที

5.) ตะกั่ว(Pb) [24]

ตะกั่วมีอยู่ในสิ่งของที่คนเรานำมาใช้ในชีวิตประจำวันทั่วไป เช่น แบตเตอรี่ พลาสติก กระเจิงน้ำมันเชื้อเพลิง และในอุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ นอกจากนี้คนเรายังอาจได้รับตะกั่วจากอาหารน้ำดื่ม จากฝุ่นละอองในอากาศบริเวณที่มีงานก่อสร้าง และเด็กอาจได้รับจากของเล่นที่มีสีต่าง ๆ การปนเปื้อนของตะกั่วในสิ่งแวดล้อม เกิดจากกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรม และรถยนต์ เนื่องจากการเติมสารตะกั่วเตตระเอทิล (tetraethyl lead) ในน้ำมันที่ใช้กับรถยนต์เพื่อเป็นสารต้านการน็อก และเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันให้สูงขึ้น จึงมีการแพร่กระจายของตะกั่วในอากาศ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าในสิ่งแวดล้อมจะมีการปนเปื้อนของตะกั่วอยู่มาก แต่ปริมาณตะกั่วที่พบในอาหารไม่ได้เพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เพราะตะกั่วที่อยู่ในดินเคลื่อนที่ไม่ได้ ดังนั้นปริมาณตะกั่วที่พบในพืชจะน้อยกว่าที่พบในดิน โดยคนปกติที่มีน้ำหนักตัว 70 กิโลกรัม ไม่ควรได้รับตะกั่วเกินสัปดาห์ละ 3.5 มิลลิกรัม แหล่งของตะกั่วมักได้มาจากอาหาร น้ำประปาที่ใช้ท่อตะกั่ว และการใช้ภาชนะหุงต้มอาหารที่มีตะกั่วเป็นส่วนผสม คาดว่าแต่ละคนจะได้รับตะกั่วจากการบริโภคอาหารวันละ 0.2-0.4 มิลลิกรัม และจากน้ำดื่มวันละ 0.01 มิลลิกรัม

ตะกั่วเป็นสารพิษที่ทำให้เกิดโรคเรื้อรัง เพราะการดูดซึมตะกั่วเป็นไปอย่างช้ามากส่งผลให้การขับถ่ายออกจากร่างกายก็ช้าตามไปด้วย ตะกั่วจะถูกดูดซึมเข้าได้ที่ลำไส้เล็ก และอาจเข้าทางระบบทางเดินหายใจจากการสูดดมควันจากท่อไอเสียรถยนต์ จึงอาจพบตะกั่วอยู่ในของเหลวทั่วร่างกาย ตะกั่วจะถูกสะสมอยู่ตามเนื้อเยื่อต่าง ๆ โดยจะสะสมที่ตับสูงกว่าที่อื่น ๆ และสะสมไว้ที่กระดูกมากที่สุด โดยเฉพาะบริเวณข้อต่อของกระดูก เมื่อสะสมไว้มากพอแล้วจึงจะไปอยู่ที่ส่วนของเนื้อกระดูก การดูดซึมตะกั่วเข้าสู่ร่างกายในระบบทางเดินอาหารจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังนี้

- รูปร่างของสารประกอบตะกั่ว ซึ่งหากอยู่ในรูปของสารอินทรีย์จะดูดซึมได้ดีส่วนใหญ่จะไปสะสมที่กระดูก ส่วนที่เหลือจะไปสะสมที่ตับ ไต กล้ามเนื้อ และระบบประสาทส่วนกลาง ส่วนในรูปสารอนินทรีย์ดูดซึมได้เพียง 5-10% เท่านั้น

- ปัจจัยของอาหาร อาหารที่มีแคลเซียมต่ำจะเพิ่มการดูดซึมตะกั่ว และหากร่างกายได้รับสังกะสีน้อยก็จะเพิ่มการดูดซึมตะกั่วเช่นเดียวกัน ซึ่งอาการพิษของตะกั่วจะเกิดขึ้นเมื่อในเลือดมีระดับตะกั่วสูงประมาณ 0.06-0.10 มิลลิกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร โดยตะกั่วจะไปออกฤทธิ์ที่หมู่ไทออลที่เอนไซม์ โดยเฉพาะที่ไต ระบบประสาทจะถูกทำลาย ส่งผลให้การสังเคราะห์ ATP ที่ไมโทคอนเดรียลดลง การดูดซึมกลับของน้ำตาลที่ไตลดลง เม็ดเลือดแดงแตกมากขึ้น การสร้างฮีโมโกลบินและเฮมาโตคริตลดลงเกิดภาวะโลหิตจาง ซึ่งหากเกิดภาวะโลหิตจางที่รุนแรงขึ้นจะทำให้เกิดความผิดปกติที่ระบบประสาทส่วนกลาง ส่งผลให้ความสามารถในการเรียนรู้ช้าลง ไอคิวต่ำ จำทางไม่ได้ ความจำเสื่อม ควบคุมการทรงตัวไม่ได้ ปวดศีรษะ วิดกกังวล ลูกตุ้กลนไม่อยู่นิ่ง หาก

เกิดความเป็นพิษรุนแรงมาก ไตจะวาย ชัก โคม่าและตายได้ ซึ่งอาการดังกล่าวจะพบในคนที่เกิดอุบัติเหตุในอุตสาหกรรม และดื่มเหล้าเถื่อนมากเกินไป

6.)ปรอท(Hg) [24]

ปรอทเป็นโลหะที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้อง และจะระเหยเป็นไอได้เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้มีไอของปรอทปนเปื้อนอยู่ในอากาศได้ ซึ่งไอปรอทจะเข้าสู่ร่างกายด้วยการสูดดมและ ซึมผ่านเข้าทางผนังของถุงลมปอด เข้าสู่กระแสเลือดและไปยังเนื้อเยื่อ ซึ่งอาการพิษของปรอทที่พบได้ บ่อย ๆ คือ นอนไม่หลับ ขี้ถ่ายไม่กล้าสบตา กระสับกระส่าย วิดกกังวล และเวียนศีรษะ โดยอาการต่าง ๆ เหล่านี้จะพบได้ในคนที่มีปรอทในปัสสาวะ 1.0 มิลลิกรัมต่อลิตร หากได้รับไอปรอทความเข้มข้น 0.1-0.2 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร โดยการสูดดมจากอากาศที่มีไอปรอท จะเกิดอาการตัวสั่นเทาและความไวต่อการตอบสนองต่อสิ่งเร้าผิดปกติ ดังนั้นเมื่อมีเทอร์โมมิเตอร์แตกในบ้าน ควรระมัดระวังอย่าให้ปรอทกระจายออกไป เพราะไอปรอทจะเข้าสู่ร่างกาย ผ่านทางการหายใจ สูดดมเข้าสู่ถุงลมในปอดได้ง่าย

ความเป็นพิษของปรอท

ปรอทมีความเป็นพิษเพียงเล็กน้อยเมื่อได้รับทางปาก เพราะจะถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหารได้น้อย จึงมีอาการเพียงเล็กน้อย เช่น อาจเกิดท้องร่วงได้ ซึ่งเกลือปรอทจะมีพิษมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความสามารถที่จะถูกดูดซึมในระบบทางเดินอาหาร หากมีการนำปรอทมาใช้ในด้านการเกษตร ทำให้มีปรอทตกค้างอยู่ในผลผลิตทางการเกษตร ปนเปื้อนอยู่ในห่วงโซ่อาหาร และอยู่ในแหล่งน้ำต่าง ๆ เช่น อ่าว ลำธาร ลำคลอง และแม่น้ำ และเช่นเดียวกันหากมีการใช้ยาฆ่าเชื้อราที่มีปรอทเป็นส่วนผสม ก็จะทำให้มีปรอทตกค้างอยู่ในอาหารได้ด้วย ความเป็นพิษของปรอทที่พบในเมืองมินามะตะ (Minamata) ประเทศญี่ปุ่น มีสาเหตุมาจากการบริโภคลาปลาที่จับมาจากทะเลที่มีการปนเปื้อนของน้ำทิ้งจากโรงงานที่ใช้สารปรอทมาก จากรายงานเมื่อปี ค.ศ. 1956 ปรอททำให้เกิดโรคมินามะตะ พบว่าผู้หญิงและเด็กในประเทศญี่ปุ่นบริเวณอ่าวมินามะตะเข้าโรงพยาบาลด้วยโรคสมองพิการและเดินไม่ได้เป็นจำนวนมากเกือบหมื่นคน เพราะมีโรงงานอุตสาหกรรมเคมีผลิตพลาสติกตั้งอยู่ในบริเวณอ่าวมินามะตะ แล้วปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานลงสู่ทะเล และต่อมาก็ได้พบว่าอาหารทะเลและปลาทะเลมีปรอทปนเปื้อนมากที่สุด โดยปรอทที่อยู่ในรูปของเมทิลเมอร์คิวรีและเอทิลเมอร์คิวรีจะสะสมอยู่ในเนื้อปลาในรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่มีความเป็นพิษรุนแรงที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่ามีการปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำตามธรรมชาติ โดยได้รับจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรม และในห่วงโซ่อาหารก็พบว่านกที่กินข้าวเปลือกก็มีปรอทสูงเช่นเดียว กับนกที่กินปลาทะเล จึงเป็นข้อเตือนใจว่าได้เป็นอย่างดีว่าคนเรามีโอกาสสัมผัสกับปรอทได้มากกว่าที่คิด ความเป็นพิษของปรอท สาเหตุจะเกิดจากการ

ได้รับโปรตอนทริย์ ซึ่งมีความเป็นพิษมาก เช่น ไคเมทิลเมอร์คิวรี เกลือเมทิลเมอร์คิวรี ซึ่งสารพิษเหล่านี้ละลายได้ในลิพิด เมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดแล้วจะไปสะสมอยู่ในเม็ดเลือดแดงและระบบประสาทส่วนกลาง มีผลต่อระบบประสาททำให้เกิดอาการทรงตัวไม่อยู่ ตัวสั่นเทา และมีอาการชักหึงงอ หากขณะตั้งครรภ์แอลคิลเมอร์คิวรีจะทำลายสมอง เกิดสมองพิการและมีรูปร่างผิดปกติ โดยเฉพาะรูปร่างของสมองส่วนเซรีเบลลัม และเซลล์ประสาทที่อยู่ในส่วนกลางสมองถูกทำลาย โปรทจึงมีฤทธิ์ทำให้ทารกในครรภ์พิการได้ โดยเฉพาะสารประกอบพวกเมทิลเมอร์คิวรี นอกจากนั้นสารประกอบแอลคิลเมอร์คิวรียังสามารถซึมผ่านรกเข้าสู่เด็กทารกในครรภ์ได้ ซึ่งพิษของโปรทที่มีต่อคนมักเกิดขึ้นเนื่องจากได้รับโดยอุบัติเหตุ เช่น บริโภคเมล็ดพืชที่ไชยามาเชื่อว่าที่มีโปรท และมักเป็นปัญหากับคนที่ทำงานในโรงงานที่มีฝุ่นละอองของยาฆ่าเชื้อรา อาการจะเริ่มเกิดขึ้นหลังจาก 1 เดือนไปแล้ว และอาการอาจจะรุนแรงเพิ่มขึ้น อาการที่พบเช่น ชาตามมือตามขา มีอาการเจ็บจี๊ด หรือรู้สึกซู่ซ่าที่ปากและริมฝีปาก พุดลำบาก หรือพุดไม่ชัด หูตึง ได้ยินไม่ชัดและเสียการทรงตัว โดยความเป็นพิษของโปรทจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น รูปของสารโปรท ปริมาณ และช่องทางที่เข้าสู่ร่างกาย ชนิดและเพศของสัตว์ ซึ่งปริมาณโปรทที่ยอมให้มิได้สำหรับคนปกติน้ำหนัก 70 กิโลกรัม คือ 18 มิลลิกรัมต่อคนต่อปี และจะเป็นพวกเมทิลเมอร์คิวรีซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย ประมาณ 10 มิลลิกรัม

การวิเคราะห์หาปริมาณโปรทในอาหาร ทำได้เฉพาะหาปริมาณของโปรททั้งหมดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การวิเคราะห์ด้วย neutron activation หรือวิธี atomic absorption spectrometry และวิธีทางเคมี ซึ่งวิธีเหล่านี้ไม่สามารถแยกโปรทอินทรีย์และอนินทรีย์ออกจากกันได้

7.) แคดเมียม(Cd) [25]

แคดเมียม (Cadmium) เป็นโลหะชนิดหนึ่งที่ถูกค้นพบตั้งแต่ปี ค.ศ. 1817 แต่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานอุตสาหกรรม เมื่อราว 50 ปีก่อนนี้เอง ปัจจุบันโลหะแคดเมียมเป็นโลหะที่ใช้มากเนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ใช้อบเหล็กและเหล็กกล้า เพื่อป้องกันสนิมใช้ผสมทองแดงทำลวดตัวนำไฟฟ้า ผสมอลูมิเนียมใช้ในการหล่อแบบ ผสมกับเงินมิให้ดำง่าย ใช้แทนดินบุกทำโลหะบัดกรี อุตสาหกรรมสร้างฝากรหล่อแบบ การชุบสังกะสี ใช้แคดเมียมผสมกับโลหะอื่น เพื่อเพิ่มความเหนียว และทนทานต่อการสึกกร่อน ใช้ทำแบตเตอรี่อัลคาไลต์ โดยการใช้ร่วมกับนิกเกิล ใช้ทำเม็ดสี พลาสติก ยาง หมึกพิมพ์ ใช้ในเตาปฏิกรณ์ปรมาณู และอื่น ๆ

แคดเมียมเป็นโลหะอ่อนที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ (302 ช.) มีความถ่วงจำเพาะ 8.65 ถ้าเอาแคดเมียมมาเผาจะได้แคดเมียมออกไซด์ซึ่งมีสีน้ำตาล แคดเมียมเป็นโลหะที่มีสมบัติอ่อนนุ่มงอได้เหนียว มีสีขาวเงิน ทนทานต่อกรดสูง

โรคที่เกิดขึ้นจากพิษของแคดเมียมในประเทศของเราเท่าที่ทราบยังมีรายงานน้อย ที่พบมีรายงานที่ประเทศญี่ปุ่นเมื่อครั้งหลังสงครามโลกครั้งที่ 2 เป็นการเกิดพิษแคดเมียมแบบเรื้อรังในชาวญี่ปุ่นซึ่งเรียกโรคนี้ว่า โรคอิไต อิไต (itai itai) แปลว่า โรคโอย-โอย อาการของโรคนี้ในเริ่มแรกจะเจ็บปวดที่กระดูกตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย กระดูกสันหลัง กระดูกซี่โครง กระดูกขา กระดูกแขน ต่อมาจะทำให้กระดูกเสียรูปทรงไปจากเดิม มีอาการปวดเหมือนคนกระดูกหักจึงต้องร้อง โอย-โอย ตลอดเวลา ทำให้เกิดกระดูกแตกและหักได้ง่าย และไตผิดปกติ ทำให้ชาวญี่ปุ่นที่อาศัยอยู่บริเวณใกล้กับแม่น้ำชินสุเสียชีวิตไปกว่า 100 คน สาเหตุการเป็นพิษของแคดเมียมเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรมที่ผลิตทองแดง ตะกั่ว สังกะสี ปล่อยน้ำเสียลงสู่แม่น้ำ แคดเมียมที่เกิดจากการถลุงสังกะสี เจือปนในน้ำ และไหลเข้าไปหล่อเลี้ยงข้าวในนา ทำให้ชาวนาในบริเวณนั้นได้รับแคดเมียมเป็นจำนวนมาก จากการศึกษาพบว่ามีความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของแคดเมียมในข้าวบริเวณนั้นกับการเกิดโรค และมีพบที่เกาะชูชิซึ่งเกิดจากการระบายน้ำของโรงงานผลิตสังกะสีที่มีแคดเมียมเจือปน และพบในผู้ที่ทำงานเหมืองแร่มิดชูชิในญี่ปุ่นด้วย

การเกิดพิษแคดเมียมแบบเฉียบพลันมีค่อนข้างน้อย ส่วนใหญ่เกิดจากการกินแคดเมียมเข้าไปโดยอุบัติเหตุซึ่งจะมีอาการคลื่นไส้ อาเจียนอย่างรุนแรง และมีการอาเจียนเป็นเลือด และเกิดจากการหายใจเอาควันของแคดเมียม ซึ่งจะทำให้ปอดอักเสบอย่างเฉียบพลัน หายใจติดขัด เป็นโรค Metal fume fever หรือโรคไข้ควันโลหะ มีอาการคล้ายไข้หวัดใหญ่ ไอ เบื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ปวดศีรษะ ปวดเมื่อยตามตัว ท้องเสีย เจ็บบริเวณท้องส่วนบน มีปริมาณโปรตีนในปัสสาวะมากเนื่องจากเสียโปรตีน มีเสียงผิดปกติที่ปอดแบบปอดมีน้ำ และมีภาพรังสีทรวงอกเปลี่ยนแปลงซึ่งอาจหายภายใน 1 วัน หรือหลายสัปดาห์ ถ้าปอดบวมน้ำมากอาจเสียชีวิต

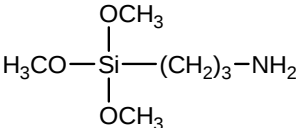
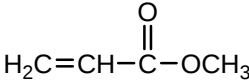
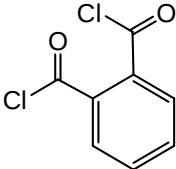
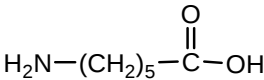
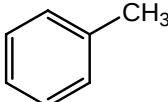
แคดเมียมเข้าสู่ร่างกายโดยการดื่มน้ำปนเปื้อนไปกับมือ หน้า และอวัยวะส่วนต่าง ๆ หรืออาหารและเครื่องดื่ม เข้าสู่ทางเดินอาหาร ซึ่งถ้าในทางเดินอาหารมีแคดเมียมต่ำ จะทำให้มีการดูดซึมแคดเมียมเข้าสู่ร่างกายได้มากขึ้น และโดยการหายใจเอาฝุ่น หรือควันของแคดเมียมเข้าสู่ปอด และดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ แคดเมียมที่ดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้วไม่สามารถถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะได้ง่าย

จากการศึกษาพบว่าการดูดซึมของแคดเมียมในระบบทางเดินอาหารเป็นไปได้น้อยมาก ประมาณร้อยละ 5-10 ของปริมาณแคดเมียมที่กินเข้าไป การดูดซึมแคดเมียมในลำไส้จะดีขึ้นถ้าปริมาณ calcium ในอาหารต่ำ การดูดซึมแคดเมียมในปอดโดยการหายใจสูดดมแคดเมียมจะถูกดูดซึมได้มากขึ้นถึงร้อยละ 10-40

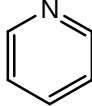
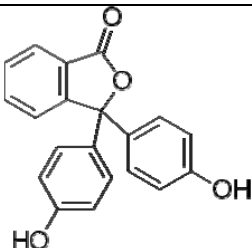
บทที่ 3
วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมี

ตารางที่ 2. ข้อมูลของสารเคมีที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	สูตรโครงสร้าง	ผู้ผลิต	เกรด
1	Silica gel 60 (0.040-0.063 mm)	SiO ₂	Merck	Column Chromatography
2	(3-Aminopropyl)trimethoxysilane		Fluka	Purum; ≥ 97%
3	Ethylenediamine	H ₂ N-CH ₂ -CH ₂ -NH ₂	Panreac Synthesis	99%
4	Methyl acrylate		Fluka	Purum; ≥ 99.0%
5	Phthaloyl chloride		Fluka	Pract.; ≥ 90%
6	6-Aminocaproic acid		Fluka	Puriss; ~ 99%
7	Sodium hydroxide	NaOH	Lab-Scan	≥ 99.0%
8	Hydrochloric acid	HCl	Lab-Scan	≥ 37%
9	Nitric acid	HNO ₃	Merck	≥ 65.0%
10	Methanol	CH ₃ OH	Merck	≥ 99.9%
11	Ethanol	CH ₃ CH ₂ OH	Union Intraco	95%
12	Toluene		Reagent Chemical	99.5%

ตารางที่ 2.(ต่อ) ข้อมูลของสารเคมีที่ใช้ในการทำงานวิจัย

ลำดับ	ชื่อสารเคมี	สูตรโครงสร้าง	ผู้ผลิต	เกรด
13	Pyridine		Lab-Scan	99.5%
14	Dimethylsulphoxide	$\text{H}_3\text{C}-\text{S}(=\text{O})-\text{CH}_3$	Fisher Scientific	99.95%
15	Phenolphthalein		Fluka	Standard Fluka > 99%
16	Copper(II) nitrate hemi(pentahydrate)	$\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$	Ajax Finechem	$\geq 99.0\%$
17	Nickel(II) nitrate hexahydrate	$\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Fluka	Purum; $\geq 98.0\%$
18	Cadmium chloride	CdCl_2	Fluka	Puriss; $\geq 99.0\%$

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

1. Fourier Transform Infrared Spectrophotometer (Burker Optic ; Model Vertex 70)
2. Thermogravimetric Analyzer (Perkin Emer ; Model TGA7)
3. Inductively Coupled Plasma Spectrometer (Varian; Model Liberty 220 ICP)
4. เครื่องชั่งละเอียด (Sartorius; Model BL 210S)
5. เครื่องวัด pH (Eutech; Model Cyberscan pH 1000)
6. เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
7. เครื่องทำความเย็น
8. เครื่องกรองแบบสุญญากาศ
9. เครื่อง centrifuge
10. Vacuum oven
11. Beaker ขนาด 50, 100, 250, 600 และ 1000 mL.

12. Volumetric flask ขนาด 25, 100 และ 1000 mL.
13. Pipette ขนาด 1,2,5,10 และ 25 mL.
14. Round bottom flask ขนาด 1000 mL.
15. Conical flask ขนาด 100 mL.
16. Erlenmayer flask ขนาด 250 mL.
17. Graduated funnel
18. Buret
19. Cylinder ขนาด 25 และ 100 mL.
20. Stopper
21. Stirring rod
22. Suction flask
23. Glass funnel
24. Sintered glass funnel (เบอร์ 3 และ 4)
25. Dropper
26. Oil Bath
27. Magnetic bar
28. ข้อนตักสาร
29. หลอด centrifuge
30. Vial
31. Thermometer
32. Condenser
33. Magnetic stirrer hot plate

3.3 วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel และการปรับปรุงผิวของ PAMAM dendrimer ที่ถูกตรึงบนผิว silica gel

ในตอนต้นที่ 1 นี้เป็นขั้นตอนในการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer (generation ที่ 3 และ 3.5) บนผิวของ silica gel จากนั้นจึงปรับปรุงผิว dendrimer ที่ได้โดยใช้ acid chloride หรือ amino acid จนได้เป็น Ion exchange resin ได้แก่ SG-G3.0-PC และ SG-G3.5-6ACA

3.3.1 การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica

3.3.1.1 การปรับปรุงผิวของ silica gel ด้วย aminosilane (การเตรียม SG-G0)

ขั้นตอนนี้ เป็นการทำให้มีหมู่เอมีโนเกิดขึ้นบนผิวของ silica gel ซึ่งหมู่เอมีโนที่เกิดขึ้นมานี้จะถูกสังเคราะห์เป็น PAMAM dendrimer ในขั้นต่อไป การปรับปรุงผิวของ silica gel นี้สามารถทำได้โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่ silanol group ที่อยู่บนบริเวณผิวของ silica gel ด้วย 3-aminopropyltrimethoxysilane ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{-Si}(\text{OCH}_3)_3$, APTS) โดยชั่ง silica gel ที่อบไล่ความชื้นแล้ว 25 g และ toluene 500 mL ใส่ลงในขวดก้นกลมขนาด 1 L. โดยควบคุมอุณหภูมิไว้ที่ 70°C หลังจากนั้นจึงหยด APTS 2 mL. ลงไป กวนของผสมให้เกิดปฏิกิริยาเป็นเวลานาน 8 ชั่วโมง จากนั้นจึงกรองของผสมด้วยกระดาษกรองและล้างตะกอนโดยใช้ toluene 4-5 ครั้ง ปล่อยให้แห้งในระยะหนึ่งเพื่อให้ toluene ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วน แล้วจึงนำไปอบต่อให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50°C นาน 48 ชั่วโมง silica gel ที่มีหมู่เอมีโนที่ผิว (SG-G0) ที่ได้จะถูกนำไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค FT-IR ปริมาณ dendrimer ที่ติดบนผิว silica gel จะถูกทำนายโดยเทคนิค TGA และ ปริมาณของหมู่เอมีโนที่เกิดขึ้นจะถูกหาโดยวิธีการไตเตรด

3.3.1.2 การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บน silica ที่ผ่านการปรับปรุงผิว

การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel ในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการแบบ divergent ซึ่งประกอบด้วยปฏิกิริยาในการสังเคราะห์ 2 ขั้นตอนที่จะต้องทำสลับกันไปเรื่อย ๆ คือ (1) ปฏิกิริยา Michael addition ของ methyl acrylate (MA) กับหมู่เอมีโนที่ผิวของ silica และ (2) ปฏิกิริยา amidation ของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นที่ผิวกับ ethylenediamine (EDA) ที่มีปริมาณเกินพอมาก ๆ โดยทำ 2 ขั้นนี้ซ้ำไปเรื่อย ๆ จนกระทั่ง dendrimer เจริญเติบโตไปถึง generation ที่ต้องการ - การเตรียม Silica-PAMAM Generation 0.5 (SG-G0.5)

SG-G0.5 สามารถเตรียมได้โดยปฏิกิริยา Michael addition ของ MA ไปยังหมู่เอมีโนที่ผิวของ SG-G0 โดยนำของผสมระหว่าง SG-G0 25 g. และ methanol 150 mL. ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 500 mL. ที่มี magnetic bar และอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ หยด

MA 10 mL. กวนสารผสมให้เกิดปฏิกิริยาที่ 50°C นาน 48 ชั่วโมง SG-G0.5 ที่เตรียมได้จะถูกตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือใช้เครื่อง centrifuge จากนั้นจึงล้างตะกอนโดยกวนใน methanol และทำให้ตกตะกอนสลับกัน 4-5 ครั้ง ปล่อยให้ methanol ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วน และนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C นาน 48 ชั่วโมง

- การเตรียม Silica-PAMAM Generation 1.0 (SG-G1.0)

SG-G1.0 เตรียมได้โดยปฏิกิริยา amidation ของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดขึ้นที่ผิวของ SG-G0.5 กับ EDA โดยนำของผสมระหว่าง SG-G0.5 25 g. และ methanol 150 mL. ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 500 mL. ที่มี magnetic bar และอยู่ในอ่างน้ำแข็ง หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ เติม EDA 50 mL. ด้วย dropping funnel โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 25°C จากนั้นกวนสารผสมต่อที่ 25°C นาน 2 วัน และ 50°C นาน 2 วันในอ่างควบคุมอุณหภูมิ SG-G1.0 ที่เตรียมได้จะถูกตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือใช้เครื่อง centrifuge จากนั้นจึงล้างตะกอนโดยกวนใน methanol และทำให้ตกตะกอนสลับกัน 4-5 ครั้ง ปล่อยให้ methanol ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วน แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C นาน 48 ชั่วโมง นำ SG-G1.0 ที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค FT-IR ปริมาณ dendrimer ที่ติดบนผิว silica จะถูกทำนายโดยเทคนิค TGA และ ปริมาณของหมู่เอมีโนที่เกิดขึ้นจะหาโดยวิธีการไตเตรด

- การเตรียม Silica-PAMAM Generation 1.5 (SG-G1.5)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและวิธีการเตรียม SG-G1.5 จะคล้ายกับการเตรียม SG-G0.5 โดยนำ SG-G1.0 ที่เตรียมได้มา 25 g. กระจายด้วย methanol 150 mL. ในขวดก้นกลมขนาด 500 mL. ที่มี magnetic bar และอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ หยด MA 20 mL. กวนสารผสมที่ 50°C นาน 48 ชั่วโมง SG-G1.5 ที่เตรียมได้จะถูกตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือใช้เครื่อง centrifuge จากนั้นจึงล้างตะกอนโดยกวนใน methanol และทำให้ตกตะกอนสลับกัน 4-5 ครั้ง แล้วปล่อยให้ methanol ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วน และนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C นาน 48 ชั่วโมง

- การเตรียม Silica-PAMAM Generation 2.0 (SG-G2.0)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นและวิธีการเตรียม SG-G2.0 จะคล้ายกับการเตรียม SG-G1.0 โดยนำ SG-G1.5 ที่เตรียมได้มา 25 g. กระจายด้วย methanol 150 mL. ในขวดก้นกลมขนาด 500 mL. ที่มี magnetic bar และอยู่ในอ่างน้ำแข็ง หลังจากนั้นจึงเติม EDA 100 mL. ด้วย dropping funnel โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 25°C จากนั้นจึงกวนสารผสมต่อที่ 25°C นาน 2 วัน และ 50°C นาน 2 วันในอ่างควบคุมอุณหภูมิ SG-G2.0 ที่เตรียมได้จะถูกตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือใช้เครื่อง centrifuge จากนั้นจึงล้างตะกอนโดยกวนใน methanol และทำให้ตกตะกอนสลับกัน 4-5 ครั้ง ปล่อยให้ methanol ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วน และนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C นาน 48 ชั่วโมง

ระยะหนึ่งเพื่อให้ methanol ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วน และนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C นาน 48 ชั่วโมง นำ SG-G2.0 ที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค FT-IR ปริมาณ dendrimer ที่ติดบนผิว silica จะถูกทำนายโดยเทคนิค TGA และ ปริมาณของหมู่อะมิโนที่เกิดขึ้นจะหาโดยวิธีการไตเตรด

- การเตรียม Silica-PAMAM Generation 2.5 (SG-G2.5)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตอนจะคล้ายกับการเตรียม SG-G0.5 และ SG-G1.5 โดยการนำของผสมระหว่าง SG-G2.0 25 g. และ methanol 150 mL. ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 500 mL. ที่มี magnetic bar และอยู่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิ หลังจากนั้นจึงค่อย ๆ หยด MA 40 mL. ด้วย dropping funnel กวนของผสมให้เกิดปฏิกิริยาที่ 50°C นาน 48 ชั่วโมง SG-G2.5 ที่เตรียมได้จะถูกทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือใช้เครื่อง centrifuge จากนั้นล้างตะกอนโดยกวนใน methanol และทำให้ตกตะกอนสลับกัน 4-5 ครั้ง ปลอยทิ้งไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้ methanol ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วน และนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C นาน 48 ชั่วโมง

- การเตรียม Silica-PAMAM Generation 3.0 (SG-G3.0)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตอนนั้นคล้ายกับการเตรียม SG-G1.0 และ SG-G2.0 โดยการนำ SG-G2.5 ที่เตรียมได้จากขั้นตอนที่แล้วมา 25 g. กระจายด้วย methanol 300 mL. ในขวดก้นกลมขนาด 1 L. ที่มี magnetic bar และอยู่ในอ่างน้ำแข็ง หลังจากนั้นจึงหยด EDA 200 mL. ด้วย dropping funnel โดยควบคุมอุณหภูมิไม่ให้เกิน 25°C จากนั้นจึงกวนสารผสมที่ 25°C นาน 3 วัน และ 50°C นาน 4 วันในอ่างควบคุมอุณหภูมิ SG-G3.0 ที่ได้จะถูกทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือใช้เครื่อง centrifuge จากนั้นล้างตะกอนโดยกวนใน methanol และทำให้ตกตะกอนสลับกัน 4-5 ครั้ง ปลอยทิ้งไว้ระยะหนึ่งเพื่อให้ methanol ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วนและนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C นาน 48 ชั่วโมง นำ SG-G3.0 ที่ได้ไปพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค FT-IR ปริมาณ dendrimer ที่ติดบนผิว silica จะถูกทำนายโดยเทคนิค TGA และ ปริมาณของหมู่อะมิโนที่เกิดขึ้นจะหาโดยวิธีการไตเตรด

- การเตรียม Silica-PAMAM Generation 3.5 (SG-G3.5)

วิธีการเตรียม SG-G3.5 นั้นคล้ายกับการเตรียม SG-G0.5, SG-G1.5 และ SG-G2.5 โดยซัง SG-G3.0หนัก 25 g. และดวง methanol 150 mL. ใส่ในขวดก้นกลมขนาด 1 L. หยด MA 80 mL. ด้วย dropping funnel กวนของผสมให้เกิดปฏิกิริยาที่ 50°C นาน 72 ชั่วโมง SG-G3.5 ที่เตรียมได้จะถูกทิ้งไว้ให้ตกตะกอนหรือใช้เครื่อง centrifuge จากนั้นจึงล้างตะกอนโดยกวนใน methanol และทำให้ตกตะกอนสลับกัน 4-5 ครั้ง ตั้งทิ้งไว้ให้ methanol ที่ยังเหลืออยู่ระเหยออกไปบางส่วน และนำไปอบให้แห้งในตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 40°C นาน 48 ชั่วโมง

การหาปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวของ PAMAM dendrimer ที่อยู่บนผิวของ silica gel

ปริมาณหมู่อะมิโนที่เกิดขึ้นในระหว่างการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel สามารถหาได้โดยใช้วิธีการไตเตรด ก่อนการทดสอบต้องอบตัวอย่างที่ 50°C นาน 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้น ซึ่ง SG-Gn ที่ได้จากการสังเคราะห์ชนิดใดชนิดหนึ่งมา 0.1 g. ใส่ conical flask ขนาด 100 mL. จากนั้นจึงเติมสารละลาย HCl 0.01 mol/L ลงไป 25 mL. (ในกรณีที่ Silica-PAMAM มีปริมาณหมู่อะมิโนมากจะต้องเพิ่มปริมาตร HCl ที่ใช้ให้มากขึ้น) ของผสมจะถูกกวนนาน 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองด้วยกระดาษกรองและนำสารละลายที่ได้ไปไตเตรดกับสารละลาย NaOH 0.01 mol/L โดยใช้ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วจึงคำนวณหาปริมาณหมู่อะมิโนของ PAMAM dendrimer ที่อยู่บนผิวของ silica gel วิธีการไตเตรดนั้นจะต้องทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง ให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เพื่อที่จะนำข้อมูลมาทำการเฉลี่ยและคำนวณต่อไป

การหาปริมาณของ PAMAM dendrimer ที่ติดอยู่บนผิวของ silica gel

การหาน้ำหนักของ PAMAM dendrimer ที่มาติดอยู่บนผิวของ silica gel นั้นสามารถหาได้โดยใช้เทคนิค TGA เนื่องจาก PAMAM dendrimer สามารถเกิดการสลายตัวได้เมื่อได้รับอุณหภูมิสูงพอ ในขณะที่ silica gel จะไม่เกิดการสลายตัว โดยอบตัวอย่างที่ 50°C นาน 24 ชั่วโมงก่อนการทดสอบเพื่อไล่ความชื้น จากนั้นจึงทดสอบโดยใช้เทคนิค TGA ซึ่งทำโดยการให้ความร้อนตั้งแต่ 50°C จนถึง 800°C ที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 5°C/min โดยค่า weight loss ที่ได้จะมีค่าเท่ากับน้ำหนักของ PAMAM dendrimer ที่ติดอยู่บนผิว silica gel ในขณะที่น้ำหนักที่เหลืออยู่จะเท่ากับน้ำหนักของ silica gel ในสารตัวอย่าง ดังนั้น

$$Grafting(\%) = \left(\frac{A}{B} \right) \times 100$$

โดยที่ A คือ น้ำหนักของ PAMAM dendrimer ที่มาติดอยู่บนผิวของ silica gel

B คือ น้ำหนักของ silica gel

3.3.2 การปรับปรุงผิวของ PAMAM dendrimer ซึ่งตรึงอยู่บนผิว silica

3.3.2.1 การปรับปรุงผิวด้วย Acid chloride

การปรับปรุงผิววิธีนี้เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่อะมิโนซึ่งอยู่ที่บริเวณผิวของ PAMAM dendrimer ที่เป็น full generation (ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ SG-G3.0) กับสารในกลุ่ม acid chloride ซึ่งสารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้แก่ phthaloyl chloride(PC) โดยทำตามวิธีการดังต่อไปนี้

1. ใส่ DMSO ที่ปราศจากน้ำ 250 mL. ลงใน conical flask และแช่ลงในอ่างน้ำเย็นที่ควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ 10°C โดยกวนตลอดเวลาเพื่อไม่ให้ DMSO เกิดการแข็งตัว (ค่า m.p. ของ DMSO คือ $16-19^{\circ}\text{C}$)
 2. เติม Pyridine 100 mL. ลงใน flask
 3. จากนั้นจึงค่อย ๆ เติม phthaloyl chloride 50 g. (35.48 mL.) ลงใน flask ที่ละหยด กวนของผสมให้เข้ากันตลอดเวลา
 4. ชั่ง SG-G3.0 ปริมาณ 25 g. ใส่ลงในของผสม และนำ flask ออกมาทำการกวนต่อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
 5. กรองของผสมผ่านกระดาษกรอง และล้างตะกอนโดยการกวนใน ethanol, น้ำกลั่น และ methanol อย่างละ 4 ครั้ง ตามลำดับ โดยกวนของผสมและตั้งทิ้งให้ตกตะกอน
 6. นำ SG-G3.0-PC ที่สังเคราะห์ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 40°C ในตู้อบสูญญากาศให้แห้งเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
 7. นำสารที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาโครงสร้างทางเคมีโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FTIR) และหาปริมาณหมู่อะมิโนที่เหลืออยู่หลังการปรับปรุงผิวโดยการไทเทรต เพื่อนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ในการปรับปรุงผิวต่อไป
- ปฏิกิริยานี้สามารถเปลี่ยนชนิดของ acid chloride ที่ใช้ได้ โดยยังคงทำตามการทดลองตั้งแต่ข้อ 1-7 เหมือนเดิม

การหาปริมาณหมู่อะมิโนที่เหลือของ Silica-PAMAM หลังปรับปรุงผิวด้วย Acid chloride

การคำนวณหาหมู่อะมิโนที่เกิดปฏิกิริยาในการปรับปรุงผิวสามารถทำได้โดย หาปริมาณหมู่อะมิโนของ Silica-PAMAM ที่เหลือหลังการปรับปรุงผิวด้วย acid chloride มาเปรียบเทียบกับปริมาณหมู่อะมิโนตอนเริ่มต้นก่อนการปรับปรุงผิว ซึ่งทำได้โดยอบ SG-G3.0-PC ที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ 50°C นาน 24 ชั่วโมงเพื่อไล่ความชื้นก่อนการทดสอบ จากนั้นจึงชั่ง SG-G3.0-PC (ที่ยังไม่ถูกล้างด้วยสารละลาย NaOH) 0.1 g. ใส่ใน conical flask ขนาด 100 mL. ปิดฝาสารละลาย HCl 0.01 mol/L ลงไป 25 mL. กวนของผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงกรองและนำสารละลายที่ได้ไปไทเทรตด้วยสารละลาย 0.01 mol/L NaOH โดยใช้ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ การหาปริมาณหมู่อะมิโนโดยวิธีการไทเทรตนั้นจะต้องทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง ให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน เพื่อที่จะนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย ปริมาณหมู่อะมิโนที่เหลืออยู่หลังการปรับปรุงผิวจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณหมู่อะมิโนของ SG-G3.0 แล้วจึงนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ในการปรับปรุงผิวต่อไป

การเตรียม Silica-PAMAM-Acid chloride ก่อนการดูดซับไอออนโลหะหนัก

1. นำ SG-G3.0-PC ที่ได้จากการสังเคราะห์ 25 g. กวนในสารละลาย 0.05 mol/L NaOH (ใน MeOH) ปริมาตร 200 mL. จำนวน 4-5 ครั้ง (จนกว่า phenolphthalein จะเป็นสีชมพู) โดยแต่ละครั้งจะกวนนาน 10 นาที
2. นำ SG-G3.0-PC ที่ผ่านการล้างด้วยสารละลาย NaOH มากวนในน้ำกลั่นอย่างน้อย 7 ครั้ง หรือมากกว่านั้น เพื่อล้างเอา NaOH ที่เหลือออกออก แต่ละครั้งจะกวนนาน 10 นาที โดยล้างตะกอนจนกว่าค่า pH ของน้ำหลังการล้างตะกอนครั้งสุดท้ายจะมีค่าประมาณ 9 (การลดค่า pH ลงมากกว่านี้ทำได้ยาก)
3. นำไปอบที่อุณหภูมิ 40°C ในตู้อบสูญญากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ก่อนเข้าตู้อบควรล้างตะกอนด้วย MeOH ก่อน)

3.3.2.2 การปรับปรุงผิวด้วย Amino acid

การปรับปรุงผิวด้วยวิธีนี้เป็นการทำปฏิกิริยาระหว่างหมู่เอสเทอร์ที่อยู่บริเวณผิว PAMAM dendrimer ที่เป็น half generation (ในงานวิจัยนี้ใช้ SG-G3.5) กับหมู่อะมิโนของสารในกลุ่ม amino acid ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ 6-Aminocaproic acid โดยทำตามวิธีการดังต่อไปนี้

1. ชั่ง 6-Aminocaproic acidหนัก 50 g. ใส่ลงใน conical flask ขนาด 250 mL.
2. เติมสารละลาย NaOH ที่มีความเข้มข้น 2 mol/L ปริมาตร 150 mL. ใส่ลงใน flask กวนจนกระทั่ง 6-Aminocaproic acid ละลายหมด และกวนต่อไปอีกประมาณ 15 นาที
3. ชั่ง SG-G3.5 ปริมาณ 25 g. ใส่ลงในของผสมและนำ flask มากวนต่อที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลานาน 48 ชั่วโมง โดยเติมน้ำกลั่นเพิ่มถ้าของผสมแห้งเกินหรือกวนได้ยาก
4. กรองของผสมผ่านกระดาษกรอง ล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่น 5 ครั้ง และจึงล้างด้วย methanol ในครั้งสุดท้าย
5. นำ SG-G3.5-6ACA ที่สังเคราะห์ได้ไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 40°C ในตู้อบสูญญากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง
6. นำสารที่สังเคราะห์ได้มาศึกษาโครงสร้างทางเคมีโดยใช้เทคนิค Fourier Transform Infrared Spectrophotometry (FTIR)

ตอนที่ 2 การศึกษาหาชนิดของ Ion exchange resin ที่มีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักสูงสุด

ในตอนที 2 นี้ เป็นการศึกษาหาความสามารถการดูดซับไอออนโลหะหนักของเรซินแต่ละชนิดที่ได้สังเคราะห์ขึ้น ได้แก่ SG-G3.0, SG-G3.0-PC และ SG-G3.5-6ACA โดยที่ไอออนของโลหะหนักที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ Cu^{2+} เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเรซินแต่ละชนิด โดยคัดเลือกชนิด Ion exchange resin ที่มีความเหมาะสมซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักสูงสุด เพื่อนำไปใช้ในการทดสอบต่อไป

1. เตรียมสารละลายโลหะหนักเข้มข้น 500 ppm. ปริมาตร 500 mL. pH 4 ของไอออนโลหะหนัก Cu^{2+} โดยการชั่ง $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ ปริมาณ 0.9150 g. ปิเปิดสารละลายที่เตรียมได้มาเจือจางให้มีความเข้มข้น 30 ppm. การปรับ pH ของสารละลายให้เป็น 4 ทำโดยการหยดสารละลาย 0.01 mol/L HCl และสารละลาย 0.01 mol/L NaOH ระหว่างขั้นตอนการปรับปริมาตร

2. นำเรซินที่สังเคราะห์ได้มาทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยชั่งเรซินที่แห้งโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด 0.025 g. ใส่หลอด vial ที่มี magnetic bar อยู่ จากนั้นปิเปิดสารละลายไอออนของโลหะหนักเข้มข้น 30 ppm., pH 4 ที่ได้เตรียมไว้แล้ว 100 mL. ใส่ลงไป

3. นำหลอด vial ใส่ในอ่างน้ำโดยมีเครื่องทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งตั้งอุณหภูมิของน้ำที่ 25°C รอไว้ก่อนแล้ว จากนั้นจึงกวนของผสมเป็นเวลานาน 1 ชั่วโมง

4. กรองของผสมผ่านกระดาษกรอง จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 1 mL. แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 100 mL. (กรดไนตริกเข้มข้นที่เติมลงไปคิดเป็น 1% โดยปริมาตรของสารละลายโลหะ เพื่อปรับให้สารละลายมีสถานะเป็นกรดและเหมาะสมสำหรับการทดสอบหาปริมาณโลหะหนัก)

5. นำสารละลายที่ได้สุกถ่ายไปทดสอบหาความเข้มข้นไอออนโลหะหนักที่เหลืออยู่โดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP)

6. ปิเปิดสารละลายไอออนของโลหะหนักเข้มข้น 500 ppm. ที่ได้เตรียมไว้แล้วมา 1 mL. เจือจางและปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 25 mL. โดยเติมกรดไนตริกเข้มข้น 0.25 mL. ลงไปในสารละลายระหว่างการปรับปริมาตรด้วย จากนั้นหาความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นโดยใช้เทคนิค ICP ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาคำนวณย้อนกลับเป็นความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนัก 1 mL. และหาความเข้มข้นเริ่มต้นจริงของสารละลายที่ใช้ทดลอง

7. การทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละครั้ง จะต้องทำการทดลองซ้ำ 3 ชุด เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการทดลอง จากนั้นจึงคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก

8. ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนชนิดของเรซินจนกว่าจะครบทั้งหมด

ตอนที่ 3 ศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนัก

ในตอนที 3 นี้ เป็นการศึกษาผลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดจับไอออนโลหะหนัก โดยใช้ Ion exchange resin ที่คัดเลือกมาจากการทดลองในตอนที 2 ซึ่งเป็นเรซินที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อทดสอบว่าเมื่อเรซินดังกล่าวได้ถูกนำไปใช้งานจริงและต้องอยู่ภายใต้สภาวะต่าง ๆ จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่ เวลาในการดูดจับ, ความเข้มข้นของไอออนโลหะหนัก, อุณหภูมิขณะที่ทดลอง และ ค่า pH ของสารละลายไอออนโลหะหนัก

ก่อนเริ่มการทดลองจะต้องเตรียมสารละลายโลหะหนักเข้มข้น 500 ppm. ปริมาตร 500 mL. pH 4 ของไอออนโลหะหนักแต่ละชนิดดังนี้

- เตรียมสารละลายไอออน Cu^{2+} จาก $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ โดยชั่งมา 0.9150 g.
- เตรียมสารละลายไอออน Ni^{2+} จาก $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ โดยชั่งมา 1.2387 g.
- เตรียมสารละลายไอออน Cd^{2+} จาก CdCl_2 โดยชั่งมา 0.4077 g.

จากนั้นจึงนำสารละลายที่ได้มาเจือจางให้มีความเข้มข้นต่าง ๆ ตามต้องการ การปรับค่า pH ของสารละลายทำได้โดยหยดสารละลาย 0.01 mol/L HCl และสารละลาย 0.01 mol/L NaOH ลงไประหว่างขั้นตอนการปรับปริมาตร

1.) ศึกษาอิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีผลต่อร้อยละของการดูดจับโลหะหนักจากสารละลาย

1.1 เตรียมสารละลายไอออนของโลหะหนัก 100 ppm. pH 4 ของโลหะหนักแต่ละชนิด

1.2 นำ Ion exchange resin ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจากการทดลองในตอนที 2 มาทดสอบการดูดจับไอออนโลหะหนัก โดยชั่งเรซินที่แห้งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 0.1 g. ใส่หลอด vial ที่มี magnetic bar อยู่ จากนั้นเปิดสารละลายไอออนของโลหะหนักเข้มข้น 100 ppm. pH 4 ที่ได้เตรียมไว้แล้ว 10 mL. ใส่ลงไป นำหลอด vial ไปใส่ในอ่างน้ำโดยมีเครื่องทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งได้ตั้งอุณหภูมิของน้ำที่ 25°C รอไว้ก่อนแล้ว จากนั้นจึงกวนของผสม และจับเริ่มเวลา

1.3 เวลาที่ใช้ในการศึกษา คือ 10 นาที, 30 นาที และ 60 นาที ตามลำดับ

1.4 เมื่อเวลาครบกำหนด นำของผสมมากรองผ่านกระดาษกรองและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมเกือบ 25 mL. จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 0.25 mL. แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 25 mL.

1.5 ทดสอบสารละลายโดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP) เพื่อวัดความเข้มข้นไอออนโลหะหนักหลังการทดลอง ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาคำนวณย้อนกลับไปเป็นความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 10 mL.

1.6 ในการทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละครั้ง จะต้องทำการทดลองซ้ำ 3 ชุด เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการทดลอง

1.7 คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก

หมายเหตุ ในการทดสอบได้วัดความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นเหมือนกับตอนที่ 2 ทุกครั้ง

2.) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณเรซิน ต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด

2.1 เตรียมสารละลายไอออนโลหะหนักเข้มข้น 100 ppm, pH 4 ของโลหะหนักแต่ละชนิด

2.2 นำ Ion exchange resin ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจากการทดลองในตอนที่ 2 มาทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยชั่งเรซินที่แห้งโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด 0.02, 0.05 และ 0.1 g. ใส่หลอด vial ที่มี magnetic bar อยู่ จากนั้นเปิดสารละลายไอออนของโลหะหนัก ที่ได้เตรียมไว้แล้ว 10 mL. ใส่ลงไป นำหลอด vial ไปใส่ในอ่างน้ำโดยมีเครื่องทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งตั้งอุณหภูมิ 25°C รอไว้ก่อนแล้ว จากนั้นจึงเริ่มกวนของผสม และจับเวลา 60 นาที

2.3 เมื่อเวลาครบกำหนด นำของผสมมากรองผ่านกระดาษกรองและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรรวมเกือบ 25 mL. จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 0.25 mL. แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 25 mL.

2.4 นำสารละลายสุดท้ายที่ได้ไปทดสอบหาความเข้มข้นไอออนโลหะหนักโดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP) ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาคำนวณย้อนกลับไปเป็นความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 10 mL.

2.5 การทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละครั้ง จะต้องทำการทดลองซ้ำ 3 ชุด เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการทดลอง

2.6 คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก

หมายเหตุ ในการทดสอบได้วัดความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นเหมือนกับตอนที่ 2 ทุกครั้ง

3.) ศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นไอออนโลหะหนักในสารละลาย ต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะหนักแต่ละชนิด

3.1 เตรียมสารละลายไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดให้มีความเข้มข้น 20, 50 และ 100 ppm. และมีค่าความเป็นกรดต่างที่ pH 4

3.2 นำ Ion exchange resin ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจากการทดลองในตอนที่ 2 มาทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยชั่งเรซินที่แห้งโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด 0.1 g. ใส่หลอด vial ที่มี magnetic bar อยู่ จากนั้นเปิดสารละลายไอออนของโลหะหนัก ที่ได้เตรียมไว้แล้ว 10 mL. ใส่ลงไป นำหลอด vial ไปใส่ในอ่างน้ำโดยมีเครื่องทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งตั้งอุณหภูมิ 25°C รอไว้ก่อนแล้ว จากนั้นจึงเริ่มกวนของผสม และจับเวลา 60 นาที

3.3 เมื่อเวลาครบกำหนด นำของผสมมากรองผ่านกระดาษกรองและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรรวมเกือบ 25 mL. จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 0.25 mL. แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 25 mL.

3.4 ทดสอบหาความเข้มข้นไอออนโลหะหนักในสารละลายหลังการทดลองโดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP) ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาคำนวณย้อนกลับไปเป็นความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 10 mL.

3.5 ในการทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละครั้ง จะต้องทำการทดลองซ้ำ 3 ชุด เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการทดลอง

3.6 คำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก

หมายเหตุ ในการทดสอบได้วัดความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นเหมือนกับตอนที่ 2 ทุกครั้ง

4.) ศึกษาอิทธิพลของค่า pH ในสารละลายที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด

4.1 เตรียมสารละลายไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดเข้มข้น 100 ppm.

4.2 ปรับค่า pH ของสารละลายไอออนโลหะหนักแต่ละชนิด โดยนำสารละลายไอออนของโลหะมาปรับค่า pH โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.01 mol/L และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.01 mol/L เพื่อให้ได้ค่า pH ที่ต้องการ โดยค่า pH ที่ใช้ในการศึกษาคือ pH 2 , pH 3, pH 4 และ pH 5 (ค่า pH ที่สูงอาจจะทำให้ไอออนของโลหะหนักที่อยู่ในสารละลายเกิดการตกตะกอนขณะทำการทดลองการดูดซับ ซึ่งจะทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการทดลอง)

4.3 นำ Ion exchange resin ที่ได้คัดเลือกมาจากการทดลองในตอนที่ 2 มาทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยชั่งเรซินที่แห้งโดยใช้เครื่องชั่งละเอียด 0.1 g. ใส่หลอด vial ที่มี magnetic bar อยู่ จากนั้นเปิดสารละลายไอออนของโลหะหนักเข้มข้น 100 ppm. ที่ได้เตรียมไว้แล้ว 10 mL. ใส่ลงไป นำหลอด vial ไปใส่ในอ่างโดยมีเครื่องทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งตั้งที่อุณหภูมิ 25°C รอไว้ก่อนแล้ว จากนั้นจึงเริ่มกวนของผสม และจับเวลา 60 นาที

4.4 เมื่อเวลาครบกำหนด นำของผสมมากรองผ่านกระดาษกรองและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรรวมเกือบ 25 mL. จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 0.25 mL. แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 25 mL.

4.5 นำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาความเข้มข้นไอออนโลหะหนักโดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP) ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาคำนวณย้อนกลับไปเป็นความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 10 mL.

4.6 ในการทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละครั้ง จะต้องทำการทดลองซ้ำ 3 ชุด เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการทดลอง จากนั้นจึงคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ

หมายเหตุ ในการทดสอบได้วัดความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นเหมือนกับตอนที่ 2 ทุกครั้ง

5.) การศึกษาหาปริมาณความจุไอออนของ Ion exchange resin

5.1 เตรียมสารละลายไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 30, 100, 300 และ 500 ppm. และมีค่าความเป็นกรดดังที่ pH 4

5.2 นำ Ion exchange resin ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจากการทดลองในตอนที่ 2 มาทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนัก โดยชั่งเรซินที่แห้งโดยใช้เครื่องชั่งละเอียดหนัก 0.1 g. ใส่หลอด vial ที่มี magnetic bar อยู่ จากนั้นเปิดสารละลายไอออนของโลหะหนักที่ได้เตรียมไว้แล้ว 30 mL. ใส่ลงไป นำหลอด vial ไปใส่ในอ่างน้ำโดยมีเครื่องทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 25°C รอไว้ก่อนแล้ว จากนั้นจึงเริ่มกวนของผสม และจับเวลา 60 นาที

5.3 เมื่อเวลาครบกำหนด นำของผสมมากรองผ่านกระดาษกรองและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมเกือบ 50 mL. จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 0.5 mL. แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 50 mL.

5.4 นำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาความเข้มข้นไอออนโลหะหนักโดยใช้เทคนิค

Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP) ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องคำนวณย้อนกลับไปเป็นความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 30 mL.

หมายเหตุ ในการทดสอบได้วัดความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นเหมือนกับตอนที่ 2 ทุกครั้ง

ตอนที่ 4 การล้างไอออนของโลหะหนักออกจาก Ion exchange resin และการนำ Ion exchange resin ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

การฟื้นฟูสภาพ (regenerate) ของเรซินที่เคยผ่านการใช้งานซึ่งมีไอออนโลหะหนักที่ดูดซับอยู่สามารถทำได้โดยการลดค่า pH โดยการเติมกรดลงในสารละลาย ไอออนโลหะที่ดูดซับไว้โดยเรซินก็จะถูกปลดปล่อยออกมา เพราะโปรตอนจะเข้าไปแทนที่และกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) จากนั้นจึงกวนต่อในสารละลายเบส (NaOH) หมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) ก็จะถูกเปลี่ยนเป็นหมู่คาร์บอกซิเลต (-COONa) ซึ่งเป็นหมู่ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนเหมือนดังเดิม เรซินที่สังเคราะห์ขึ้นและผ่านการใช้งานแล้วก็จะอยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานอีกครั้ง

การล้างไอออนของโลหะหนักออกจาก Ion exchange resin (การ regenerate)

1. นำ Ion exchange resin ที่ผ่านการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละชนิดหนัก 1 g. มาล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.5 mol/L ปริมาตร 50 mL. โดยกวนของผสมเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นจึงกรองออก โดยทำเช่นนี้ซ้ำอีกครั้งแล้วจึงล้างด้วยด้วยน้ำกลั่นเพื่อล้างกรดที่เหลือออกบางส่วน
2. นำ Ion exchange resin ที่ได้ผ่านการล้างด้วยสารละลาย HCl เรียบร้อยแล้ว มาล้างด้วยสารละลาย 0.05 mol/L NaOH (ในเมทานอล) ปริมาตร 50 mL. โดยกวนของผสมนาน 30 นาที
3. นำ Ion exchange resin ที่ผ่านการล้างด้วยสารละลาย NaOH มาล้างด้วยน้ำกลั่นหลาย ๆ ครั้ง แต่ละครั้งจะกวนนาน 10 นาที โดยค่า pH ของของผสมในการล้างจะกวนด้วยน้ำกลั่นครั้งสุดท้ายควรมีค่าประมาณ 8
4. นำไปอบที่อุณหภูมิ 40°C ในตู้อบสูญญากาศเป็นเวลา 48 ชั่วโมง (ควรล้างตะกอนด้วย MeOH ก่อนนำเข้าตู้อบ จะทำให้แห้งง่ายขึ้น)

การนำ Ion exchange resin ที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่

1. นำ Ion exchange resin ที่ผ่านการ regenerate ครั้งที่ 1 มาทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะหนัก โดยใช้เรซินที่แห้งโดยใช้เครื่องชั่งละเอียดหนัก 0.1 g. ใส่หลอด vial ที่มี magnetic bar อยู่ จากนั้นเปิดสารละลายไอออนของโลหะหนักเข้มข้น 100 ppm. pH 4 ที่ได้เตรียมไว้แล้ว 10 mL. ใส่ลงไป นำหลอด vial ไปใส่ในอ่างน้ำโดยมีเครื่องทำความเย็นเพื่อควบคุมอุณหภูมิซึ่งตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 25°C รอไว้ก่อนแล้ว จากนั้นจึงเริ่มกวนของผสมและจับเวลา 60 นาที
2. เมื่อเวลาครบกำหนด นำของผสมมากรองผ่านกระดาษกรองและล้างตะกอนด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรรวมเกือบ 25 mL. จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 0.25 mL. แล้วจึงปรับปริมาตรของสารละลายเป็น 25 mL
3. นำสารละลายที่ได้ไปทดสอบหาความเข้มข้นไอออนโลหะหนักโดยใช้เทคนิค Inductively Coupled Plasma Spectrometry (ICP) ค่าที่ได้จากการทดสอบจะต้องนำมาคำนวณย้อนกลับไปเป็นความเข้มข้นของสารละลายไอออนโลหะหนัก 10 mL.
4. นำ Ion exchange resin ที่ผ่านการ regenerate ครั้งที่ 1 ซึ่งทดสอบการดูดซับโลหะแล้ว มาทำการ regenerate อีกเป็นครั้งที่ 2 และนำไปทดสอบการดูดซับโลหะหนักอีกครั้ง
5. ในการทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนักแต่ละครั้ง ได้ทำการทดลองซ้ำ 3 ชุด เพื่อนำมาหาค่าเฉลี่ย และเป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการทดลอง จากนั้นจึงคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับ

หมายเหตุ ในการทดสอบได้วัดความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นเหมือนกับตอนที่ 2 ทุกครั้ง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ตอนที่ 1 การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel และการปรับปรุงผิวของ PAMAM dendrimer ที่ถูกตรึงบนผิว silica gel

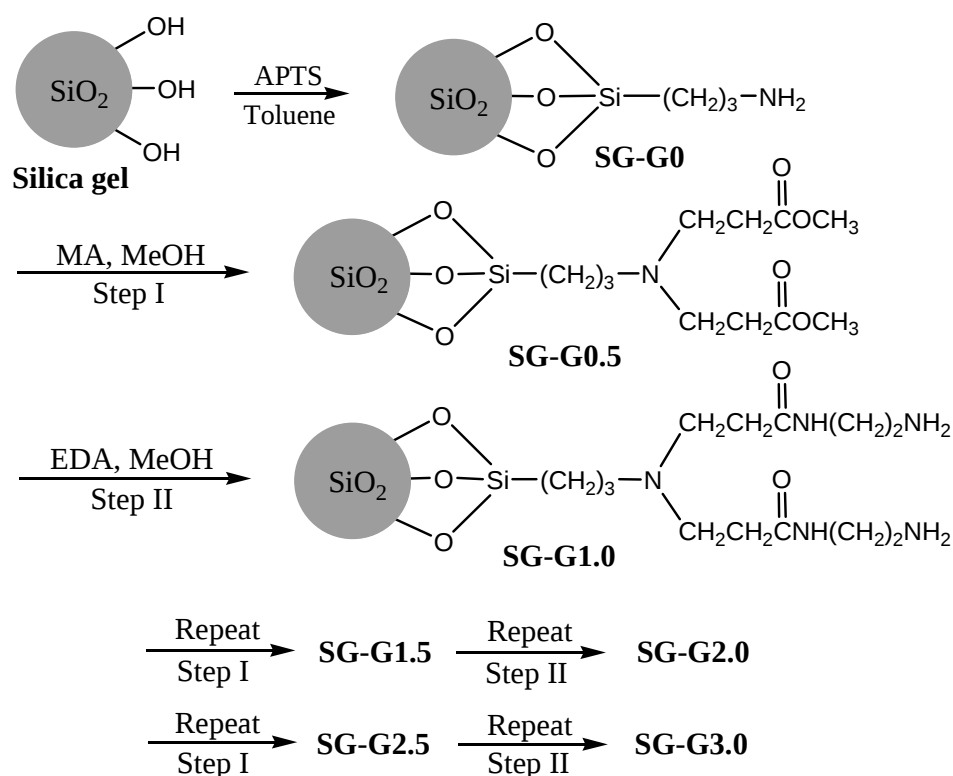
การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ลงบนผิว silica gel นั้นจะต้องเริ่มต้นจากการปรับปรุงผิวของ silica gel ซึ่งมีหมู่ silanol group (Si-OH) จนเกิดเป็นหมู่อะมิโนที่มีความว่องไวขึ้นมาก่อน โดยใช้สารในกลุ่ม amino silane ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ 3-aminopropyltriethoxysilane ($\text{NH}_2(\text{CH}_2)_3\text{-Si}(\text{OCH}_2\text{CH}_3)_3$, APTS) เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ silanol group ที่อยู่บริเวณผิวของ silica ซึ่งหมู่อะมิโนที่เกิดขึ้นมานี้จะถูกใช้เป็น initiator site ในการสังเคราะห์เป็น PAMAM dendrimer ในขั้นต่อไป

สิ่งที่สำคัญที่สุดในขั้นตอนนี้ คือ การควบคุมปริมาณของหมู่อะมิโนที่จะเกิดขึ้น ซึ่งทำได้โดยตรงโดยการควบคุมปริมาณ APTS ที่ใส่ลงไป ถ้าใส่ APTS มากเกินไป initiating site ที่เกิดขึ้นจะมีมาก ถึงแม้ว่าจะช่วยให้สามารถสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ขึ้นได้มาก แต่ dendrimer ที่เกิดขึ้นนั้นจะไม่สมบูรณ์ เนื่องจากการเติบโตของ PAMAM dendrimer เป็นไปได้ยากเพราะผลของ steric hindrance หรือความเกะกะซึ่งจะมากขึ้นถ้ามี PAMAM dendrimer เกิดขึ้นมากเกินไป ทำให้การแตกกิ่งก้านของ dendrimer ให้เป็นไปตามทฤษฎีทำได้ยากและ dendrimer ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็น highly branched polymer หรือ ‘dendrimer-like’ ซึ่งเป็น dendrimer ที่ไม่สมบูรณ์ตามทฤษฎี ซึ่งสังเกตได้จากการไตเตรตเพื่อหาปริมาณหมู่อะมิโนของ PAMAM dendrimer ที่จะอธิบายในหัวข้อต่อ ๆ ไป เมื่อได้ silica gel ที่มีหมู่อะมิโนที่ผิว (SG-G0) โดยควบคุมปริมาณหมู่อะมิโนตามที่ต้องการได้แล้ว จึงทำการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ต่อไป

สิ่งสำคัญอีกประการหนึ่ง คือ APTS ซึ่งเป็นสารที่ใช้ปรับปรุงผิวของ silica gel นั้นเป็นสารที่ว่องไวต่อความชื้นอย่างมาก ดังนั้น จึงควรนำ silica gel ที่ใช้ในการทดลองไปอบไล่ความชื้นจนแห้งก่อนเริ่มการสังเคราะห์

การสังเคราะห์ PAMAM dendrimer generation ที่ 0.5 (SG-G0.5) บนผิว silica gel นั้นทำได้โดยใช้ methyl acrylate เข้าทำปฏิกิริยา Michael addition กับหมู่อะมิโนที่ผิว silica gel ที่เกิดจากปฏิกิริยาในขั้นตอนแรกตามที่ได้อธิบายไปแล้วซึ่งจะเกิดเป็นหมู่เอสเทอร์ขึ้นที่ผิวนอก จากนั้นจึงทำ

การสังเคราะห์ต่อไปเป็น generation ที่ 1.0 (SG-G1.0) โดยใช้ ethylenediamine เข้าปฏิกิริยา amidation กับหมู่เอสเทอร์ที่ผิวของ SG-G0.5 และเกิดเป็นหมู่อะมิโนขึ้นที่ผิวนอก



รูปที่ 16. ขั้นตอนการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica gel

หลังการสังเคราะห์ SG-G1.0 อาจทำปฏิกิริยา Michael addition และปฏิกิริยา amidation สลับกันไปเพื่อสังเคราะห์ PAMAM dendrimer generation ที่ 1.5 และ 2.0 (SG-G1.5 และ SG-G2.0) บนผิว silica gel และทำปฏิกิริยาขั้นนี้สลับกันต่อไปเรื่อยๆ จนได้ generation ที่สูงขึ้นตามต้องการ หรือกล่าวได้ว่าการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ที่เป็น full generation (SG-G1.0, SG-G2.0, SG-G3.0,) ทำได้โดยใช้ ethylenediamine เข้าปฏิกิริยา amidation กับหมู่เอสเทอร์ที่ผิวของ half generation (SG-G0.5, SG-G1.5, SG-G2.5,) และการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ที่เป็น half generation ทำได้โดยใช้ methyl acrylate เข้าทำปฏิกิริยา Michael addition กับหมู่อะมิโนที่อยู่ผิวของ full generation ซึ่งในงานวิจัยนี้จะสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ลงบนผิว silica gel โดยทำปฏิกิริยา Michael addition และปฏิกิริยา amidation สลับกันไปเรื่อย ๆ เช่นนี้จนถึง generation ที่ 3.0 และ 3.5 (SG-G3.0 และ SG-G3.5)

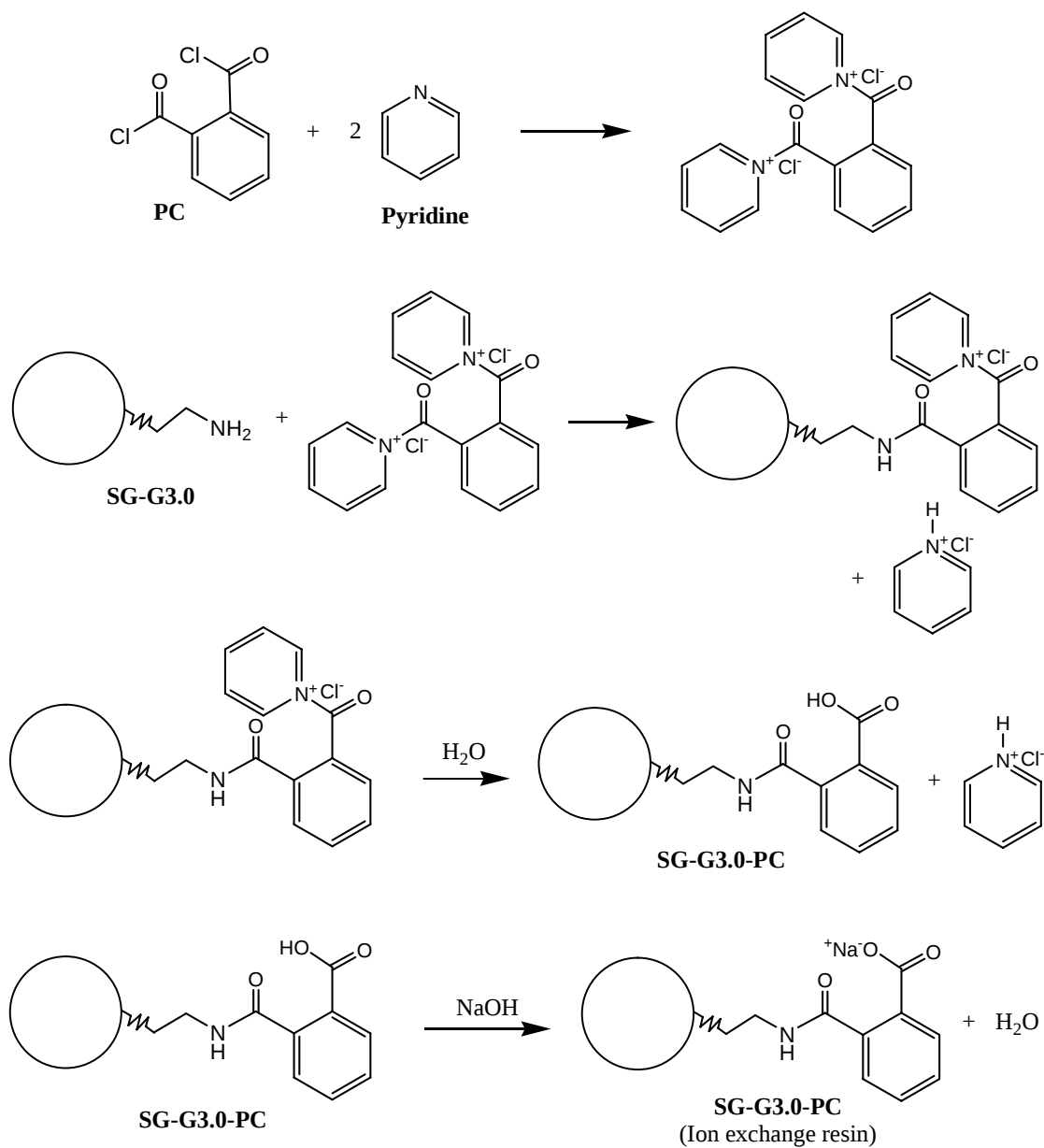
เนื่องจากปฏิกิริยา Michael addition นั้นค่อนข้างมีความว่องไว จึงเกิดปฏิกิริยาได้ง่ายกว่า ส่วนปฏิกิริยา amidation นั้นเกิดได้ช้ากว่า ดังนั้นในการสังเคราะห์จึงต้องใช้ ethylenediamine ในปริมาณที่ excess มาก ๆ และใช้เวลาทำปฏิกิริยานาน ๆ เพื่อทำปฏิกิริยา amidation แต่การสังเคราะห์ไม่ควรใช้อุณหภูมิสูงเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพราะอาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงจนเกิดเป็นโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น

ในแต่ละขั้นของการสังเคราะห์นั้นควรจะต้องกำจัด ethylenediamine และ methyl acrylate ที่เหลืออยู่ออกให้หมด เพราะสารเหล่านี้สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ในการสังเคราะห์ขั้นต่อไป ซึ่งอาจเกิดเป็นจุดบกพร่องทำให้โครงสร้าง dendrimer ไม่สมบูรณ์ และนอกจากนี้ยังทำให้การไทเทรตเพื่อหาปริมาณหมู่อะมิโนของ PAMAM dendrimer ในแต่ละ generation นั้นผิดพลาดได้ ดังนั้นหลังการสังเคราะห์จึงควรล้างตะกอนหลาย ๆ ครั้ง จนแน่ใจว่าไม่มีสารเคมีที่ใช้ทำปฏิกิริยาเหลืออยู่ และนำไปอบต่อในตู้อบสูญญากาศเพื่อกำจัดสารที่อาจหลงเหลืออยู่ออกให้หมด

ในการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica gel นั้น จะต้องใช้สารเคมีในปริมาณที่เกินพอมาก ๆ ซึ่งทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีเป็นจำนวนมาก ต้นทุนในการดำเนินการสูง นอกจากนี้ยังส่งผลเสียต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นในกระบวนการผลิตจริงจึงควรมีระบบการกลั่นแยกเพื่อนำสารเคมีที่เหลือกลับมาใช้ใหม่

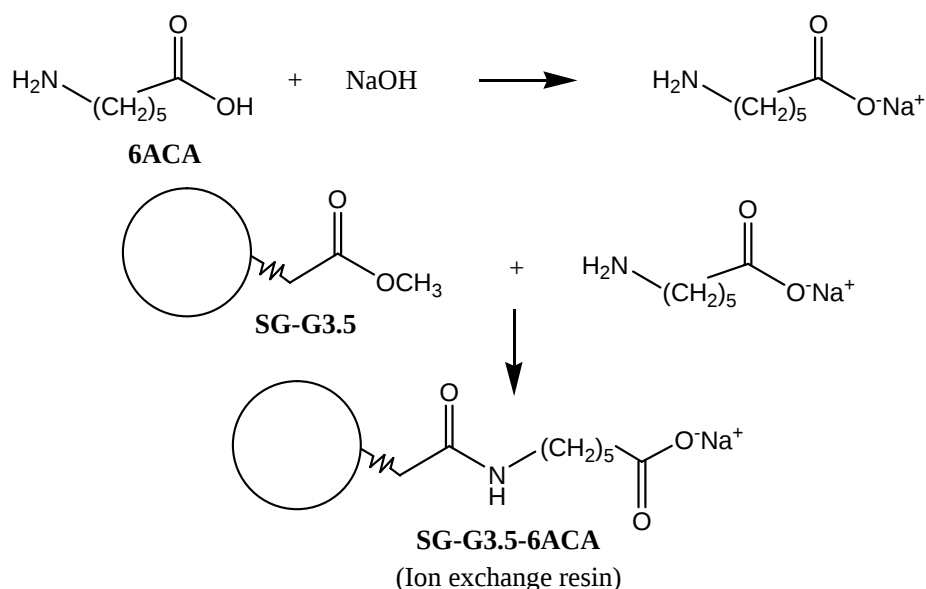
หลังการสังเคราะห์ SG-G3.0 และ SG-G3.5 เสร็จสิ้นแล้ว จึงเริ่มการสังเคราะห์ ion exchange resin เพื่อนำไปใช้ทดสอบการดูดซับโลหะต่อไป ในกรณี SG-G3.0 หมู่อะมิโนที่ผิวจะถูกทำปฏิกิริยาเพื่อปรับปรุงผิวด้วยสารเคมีในกลุ่มของ acid dichloride เช่น phthaloyl chloride(PC), terephthaloyl chloride(TC) หรือ isophthaloyl chloride(IC) เป็นต้น ซึ่งจะได้เป็น SG-G3.0-PC, SG-G3.0-TC และ SG-G3.0-IC โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นไปที่การสังเคราะห์ SG-G3.0-PC เป็นหลัก ปฏิกิริยาระหว่าง acid chloride ทุกชนิดกับหมู่อะมิโนจะมี HCl เกิดขึ้น ซึ่งอาจไปเกิดปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนที่ผิวของ SG-G3.0 ทำให้สูญเสียความว่องไวและไม่สามารถเกิดปฏิกิริยากับ acid dichloride โมเลกุลอื่นได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีสารที่ทำหน้าที่เป็นเบส ซึ่งได้เลือกใช้ pyridine เพื่อขจัดกรดที่เกิดขึ้น หลังการล้างตะกอนที่ได้ด้วยน้ำกลั่นแล้วจะได้ SG-G3.0-PC ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิลิก (-COOH) อยู่ที่ผิว ขั้นตอนการสังเคราะห์ SG-G3.0-PC ได้แสดงในรูปที่ 17.

เรซินทุกชนิดที่ได้มาจากการทำปฏิกิริยาด้วยสารเคมีในกลุ่ม acid dichloride ก่อนการทดสอบการดูดซับโลหะหนักจะต้องนำมาล้างด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งหมู่คาร์บอกซิลิกที่ผิว (-COOH) จะถูกเปลี่ยนเป็นเกลือคาร์บอกซิเลต (-COONa) ซึ่งจะเป็น ion exchange resin ที่มีความว่องไวและมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่า เพราะ Na^+ มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนกับโลหะชนิดอื่นได้ง่ายกว่า H^+ ของหมู่ carboxylic acid (กรดอ่อน)



รูปที่ 17. ขั้นตอนการสังเคราะห์ SG-G3.0-PC จาก SG-G3.0

ส่วนกรณีของการสังเคราะห์ ion exchange resin โดยใช้ SG-G3.5 นั้น ทำได้โดยการทำปฏิกิริยา amidation ระหว่างหมู่เอสเตอร์ที่ผิวของ SG-G3.5 กับหมู่อะมิโนของสารเคมีที่อยู่ในกลุ่มของ amino acid เช่น 6-aminocaproic acid (6ACA) เป็นต้น โดยให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นในสารละลาย NaOH หลังการสังเคราะห์เสร็จสิ้น SG-G3.5-6ACA ที่ได้จะเป็น ion exchange resin ซึ่งมีหมู่คาร์บอกซิเลต (-COONa) อยู่ที่ผิว ดังแสดงในรูปที่ 18.



รูปที่ 18. ขั้นตอนการสังเคราะห์ SG-G3.5-6ACA จาก SG-G3.5

การสังเคราะห์ดังในรูปที่ 18. จำนวนโมลของ NaOH และโมลของหมู่คาร์บอกซิลิกจาก amino acid ควรจะเท่ากันเพื่อให้เกิดปฏิกิริยากันพอดี เพราะถ้าหากไม่ใช้ NaOH หรือใช้น้อยเกินไป H^+ จากหมู่คาร์บอกซิลิกจะไป protonate ที่หมู่อะมิโนซึ่งอยู่ในโมเลกุลของ amino acid ทำให้โมเลกุลของ amino acid สูญเสียความว่องไวในการทำปฏิกิริยา และถ้าใช้ NaOH มากเกินไปก็จะทำให้มี NaOH เหลืออยู่ซึ่งถ้ามีมากพอก็อาจเกิดปฏิกิริยา hydrolysis กับหมู่เอสเตอร์ที่ผิวของ SG-G3.5 ได้

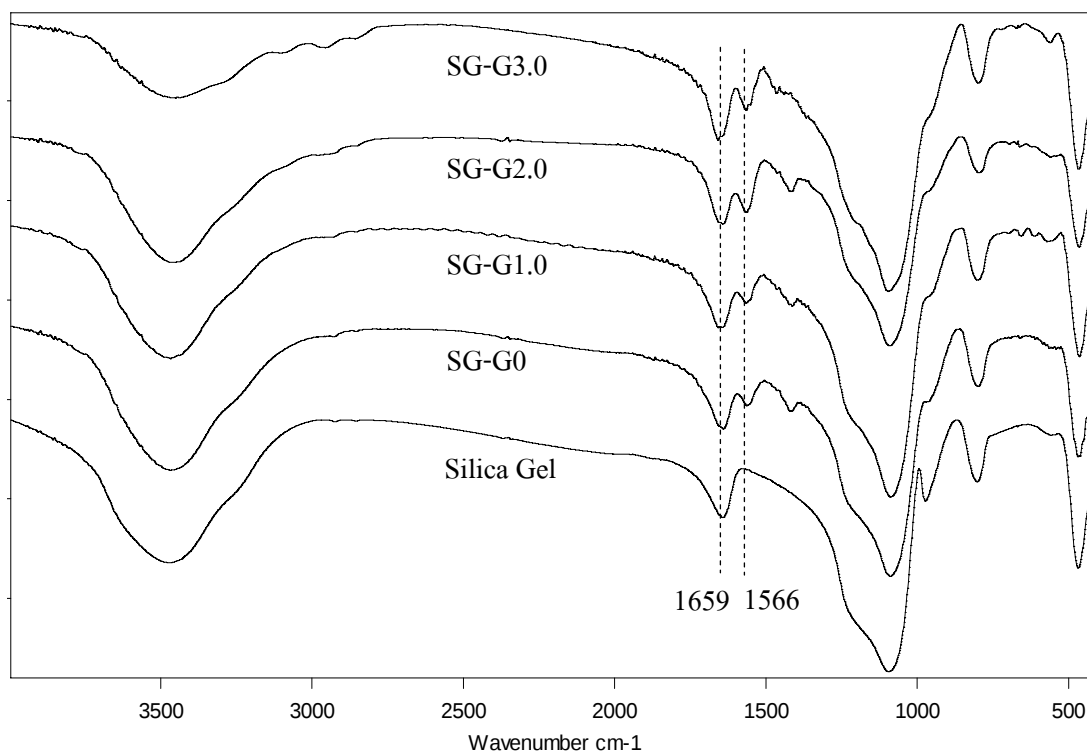
สารเคมีซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มของ acid dichloride หรือ amino acid นั้นมีอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้เรามีโอกาสและทางเลือกที่หลากหลายในการสังเคราะห์ ion exchange resin ให้มีโครงสร้างที่แตกต่างกันไป โดยเปลี่ยนแปลงสารในกลุ่ม acid dichloride หรือ amino acid ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

นอกจากนี้ dendrimer ซึ่งตรึงอยู่บนผิว silica gel ที่เกิดขึ้นจากการสังเคราะห์นั้น อาจเปลี่ยน dendrimer เป็นชนิดอื่นหรือ generation อื่น ไม่จำเป็นจะต้องใช้ PAMAM dendrimer เฉพาะ SG-G3.0 หรือ SG-G3.5 เท่านั้น โดยในการปรับปรุงผิวด้วย acid dichloride อาจจะใช้ PAMAM dendrimer ที่ generation อื่น ๆ ซึ่งเป็น full generation หรืออาจใช้ dendrimer ชนิดอื่นที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนเป็นหมู่ฟังก์ชันที่ผิว ส่วนการปรับปรุงผิวด้วย amino acid ก็อาจจะใช้ PAMAM dendrimer ที่เป็น half generation อื่น ๆ ได้

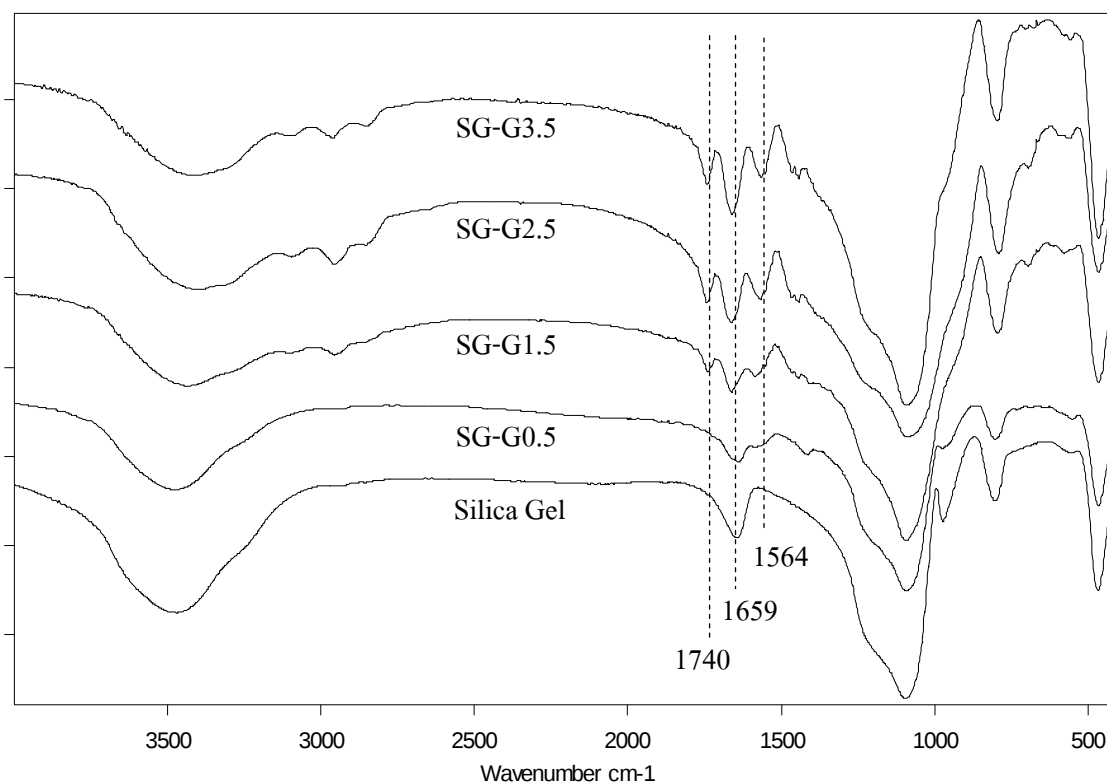
การพิสูจน์เอกลักษณ์โดยใช้เทคนิค FTIR

การพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อตรวจสอบถึงการเกิดขึ้นของ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel สามารถทำได้โดยใช้เทคนิค FTIR รูปที่ 19. แสดง FTIR spectra ของ SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0 และ SG-G3.0 ซึ่งเป็น PAMAM dendrimer ที่ตรึงอยู่บนผิวของ silica gel ที่เป็น full generation เทียบกับ silica gel ที่ไม่ถูกทำปฏิกิริยา พบว่าหลังการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิวของ silica gel มีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นใหม่ที่ตำแหน่ง 1659 cm^{-1} และ 1566 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่อะไมด์ (ที่ 1659 cm^{-1} เป็นการดูดกลืนใหม่ที่เกิดบริเวณตำแหน่งเดิม) แสดงถึงการเกิดขึ้นของ PAMAM dendrimer ที่เป็น full generation บนผิวของ silica gel

สำหรับ FTIR spectra ของ SG-G3.0 จะมีความแตกต่างจาก SG-G0, SG-G1.0 และ SG-G2.0 เล็กน้อย ในบางครั้งหลังจากการสังเคราะห์ SG-G3.0 จะพบการดูดกลืนเล็ก ๆ เกิดขึ้นที่ 1740 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่อะสเตอร์ แสดงให้เห็นว่าอาจมีหมู่อะสเตอร์บางส่วนเหลือจากปฏิกิริยา amidation ในระหว่างขั้นตอนการสังเคราะห์จาก SG-G2.5 เป็น SG-G3.0 สาเหตุของการเกิดปฏิกิริยาไม่สมบูรณ์นั้นน่าจะมาจากปริมาณของหมู่อะไมด์ที่ผิวมีมากเกินไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งใน generation ที่สูงกว่านี้ก็จะยิ่งเกิดชัดเจนขึ้น จนเกิด steric hindrance หรือมีความเกะกะเกิดขึ้น การเกิดปฏิกิริยาจึงเกิดไม่สมบูรณ์



รูปที่ 19. FTIR Spectra ของ Silica gel, SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0 และ SG-G3.0

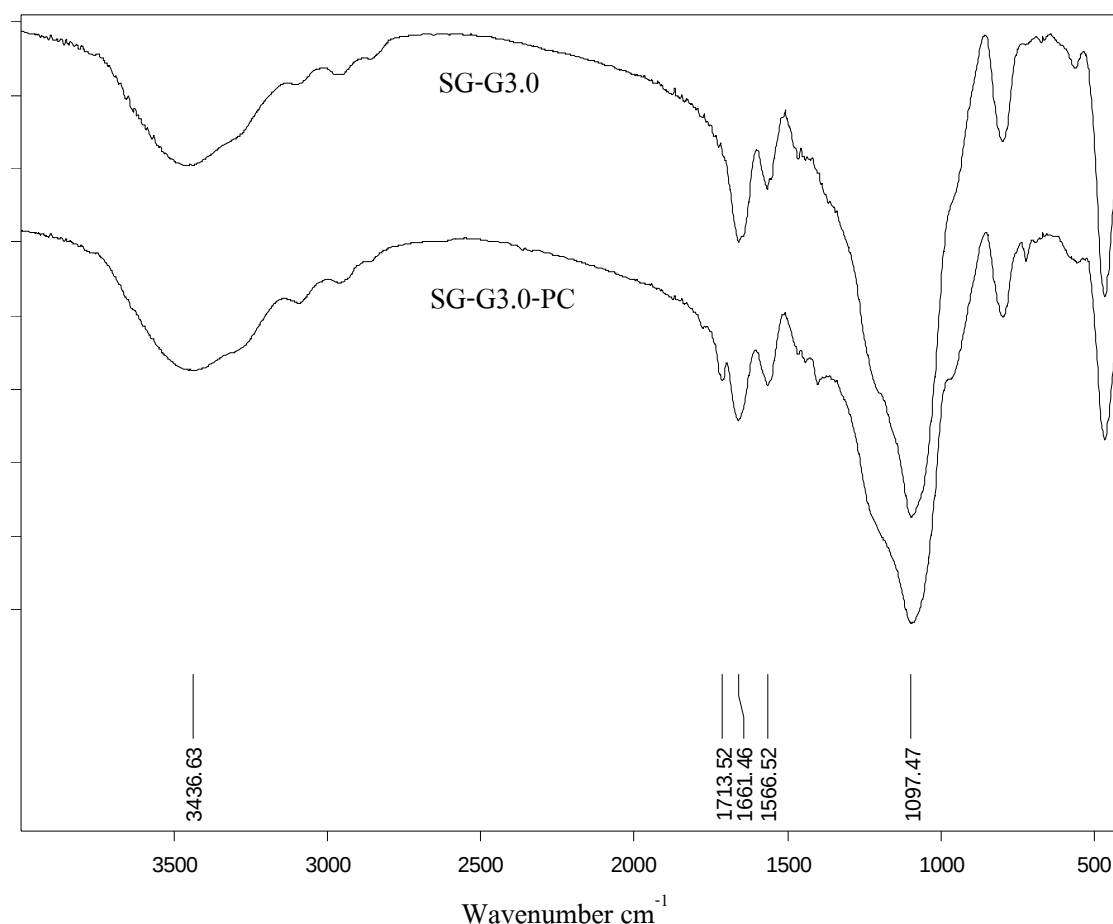


รูปที่ 20. FTIR Spectra ของ Silica gel, SG-G0.5, SG-G1.5, SG-G2.5 และ SG-G3.5

รูปที่ 20. แสดง FTIR spectra ของ SG-G0.5, SG-G1.5, SG-G2.5 และ SG-G3.5 ซึ่งเป็น PAMAM dendrimer ที่ตรึงอยู่บนผิวของ silica gel ที่เป็น half generation พบว่ามีการดูดกลืนแสงเกิดขึ้นที่ 1659 cm^{-1} , 1564 cm^{-1} ซึ่งเป็นตำแหน่งของหมู่เอไมด์ และ 1740 cm^{-1} เป็นตำแหน่งของหมู่เอสเทอร์ แสดงถึงการเกิดขึ้นของ PAMAM dendrimer ที่เป็น half generation บนผิว silica gel

เนื่องจาก PAMAM dendrimer ในแต่ละ full generation นั้นจะมีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกัน (และในแต่ละ half generation ก็มีหมู่ฟังก์ชันเหมือนกัน) จึงทำให้เกิดการดูดกลืนที่ตำแหน่งที่ใกล้เคียงกัน เทคนิค FTIR จึงไม่สามารถบ่งบอกถึงความแตกต่างของ PAMAM dendrimer ในแต่ละ full generation (SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0 และ SG-G3.0) หรือความแตกต่างในแต่ละ half generation (SG-G0.5, SG-G1.5, SG-G2.5 และ SG-G3.5) ได้อย่างชัดเจนเพราะ FTIR นั้นเป็นเทคนิคที่ใช้บ่งบอกถึงชนิดของหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่าง อย่างไรก็ตาม FTIR สามารถบอกถึงความแตกต่างระหว่าง PAMAM dendrimer ที่เป็น full generation และ half generation ได้เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ลงบนผิวของ silica gel ซึ่งจะต้องทำการสังเคราะห์ full generation และ half generation สลับกันไปเรื่อย ๆ เทคนิค FTIR จึงสามารถช่วยอธิบายผลสำเร็จที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้นของการสังเคราะห์ได้เป็นอย่างดี

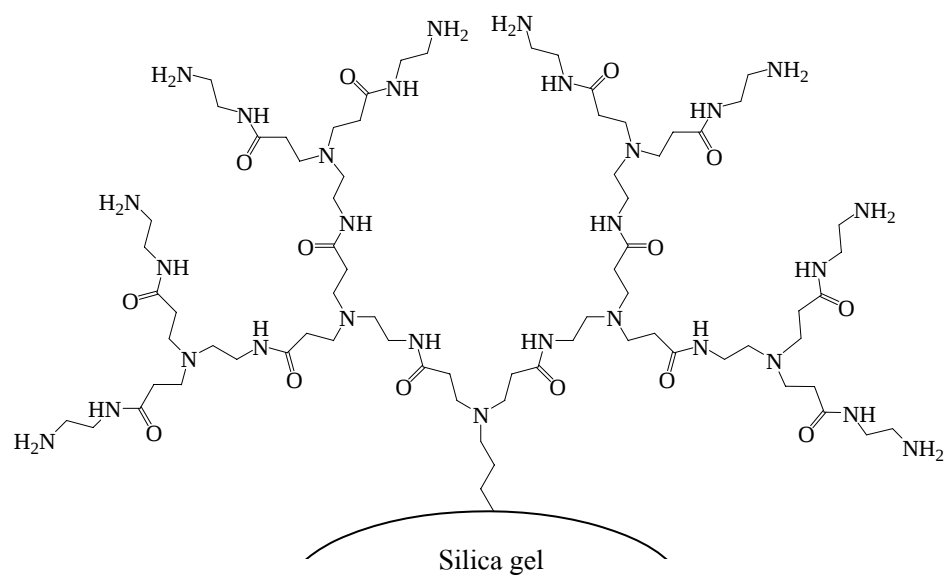
จาก FTIR spectrum จะพบว่าเมื่อ generation ของ PAMAM dendrimer สูงขึ้น จะสามารถสังเกตเห็นการดูดกลืนแสงได้ชัดเจนขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับ PAMAM dendrimer ที่มี generation ที่ต่ำกว่า ซึ่งอาจบ่งบอกถึงการเกิดขึ้นของ PAMAM dendrimer ที่มีมากขึ้นเมื่อทำการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ใน generation ที่สูงขึ้น ปริมาณของหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่างจึงมากขึ้น และสามารถสังเกตเห็นการดูดกลืนได้ชัดเจนขึ้น



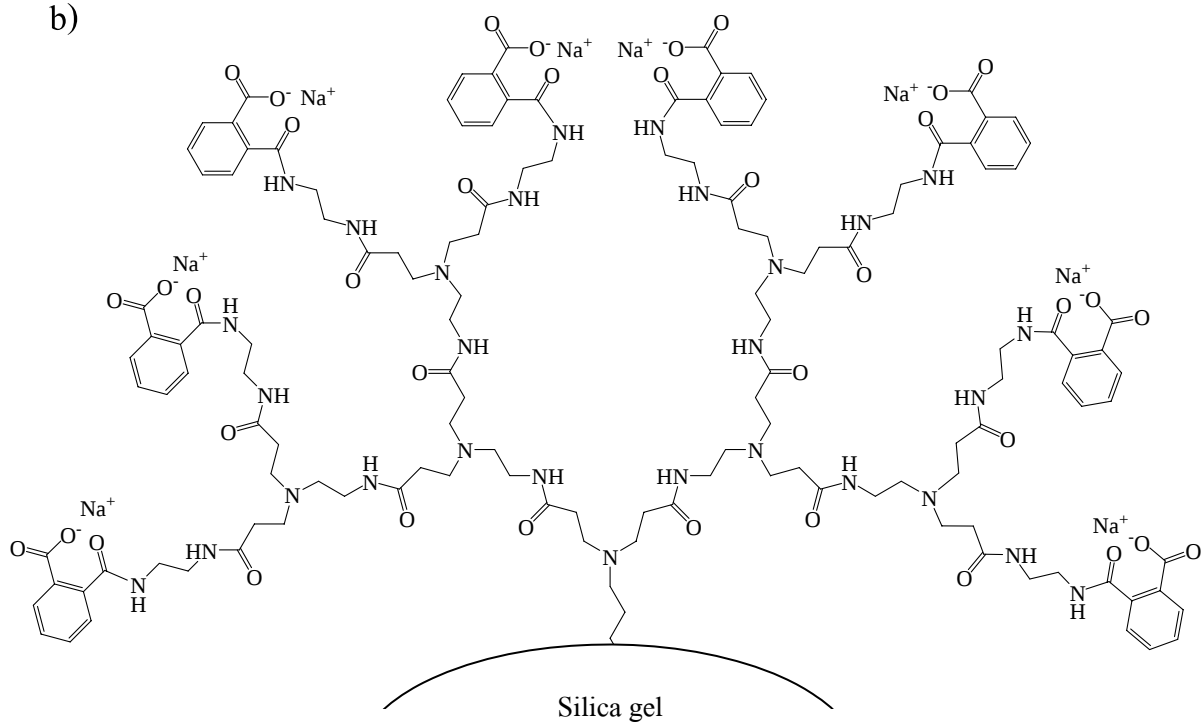
รูปที่ 21. FTIR Spectra ของ SG-G3.0 และ SG-G3-PC.0

รูปที่ 21. แสดง FTIR Spectra ของ SG-G3.0-PC เปรียบเทียบกับ SG-G3.0 พบว่าหลังการนำ SG-G3.0 มาทำปฏิกิริยาเพื่อปรับปรุงผิวด้วย phthaloyl chloride จนเกิดเป็น SG-G3.0-PC จะเกิดการดูดกลืนใหม่ที่ตำแหน่ง 1713 cm^{-1} ซึ่งแสดงถึงการเกิดขึ้นของหมู่คาร์บอกซิลิกซึ่งอยู่ที่บริเวณผิวของ SG-G3.0-PC การพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค FTIR นี้จึงสามารถช่วยอธิบายถึงผลสำเร็จในการสังเคราะห์ SG-G3.0-PC ได้อย่างดี จากนั้นจึงทำการทดสอบโดยเทคนิค TGA และการไตรเดรดเพื่อยืนยันผลการสังเคราะห์อีกครั้งซึ่งจะกล่าวต่อไป

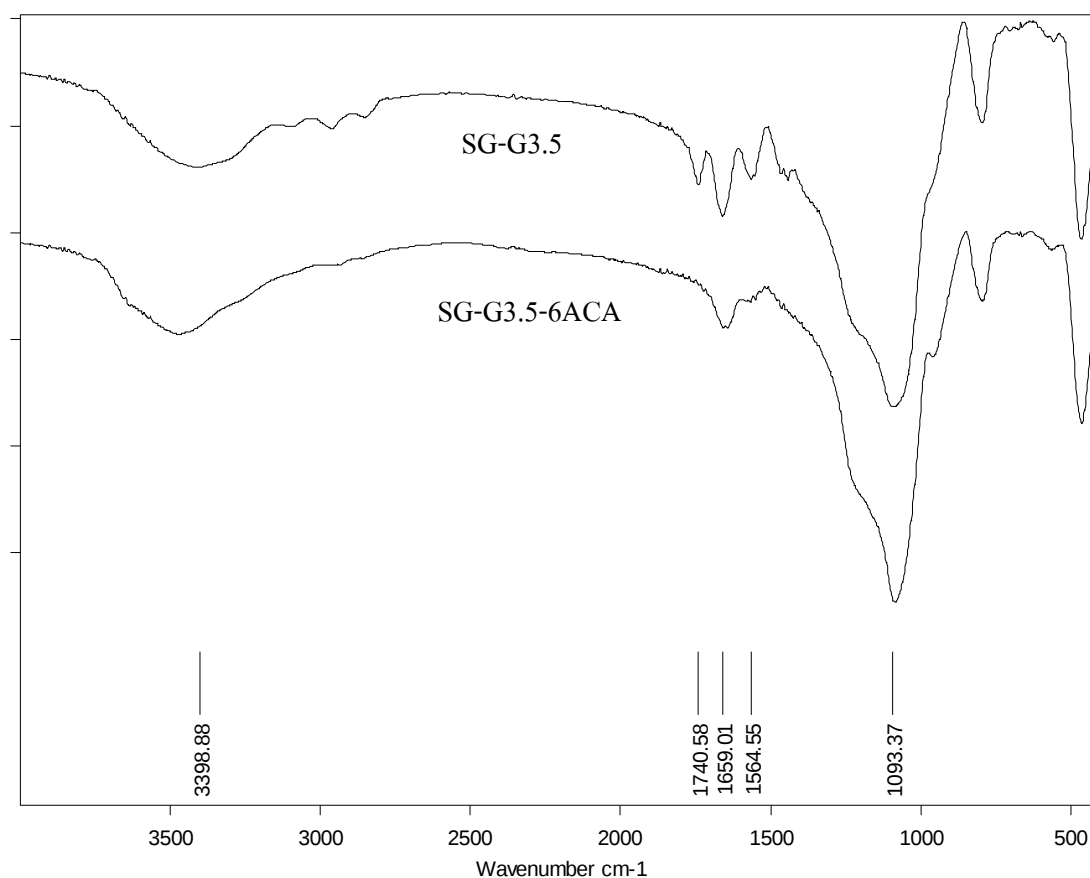
a)



b)



รูปที่ 22. โครงสร้างทางทฤษฎีของ a) SG-G3.0 และ b) SG-G3.0-PC



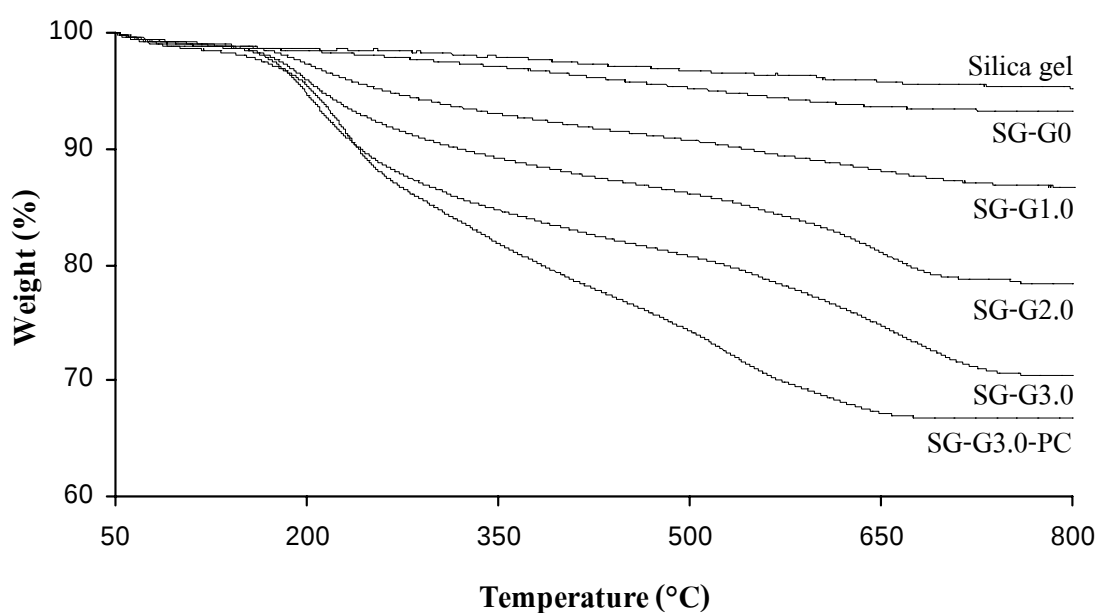
รูปที่ 23. FTIR Spectra ของ SG-G3.5 และ SG-G3.5-6ACA

รูปที่ 23. แสดง FTIR Spectra ของ SG-G3.5-6ACA เปรียบเทียบกับ SG-G3.5 พบว่า หลังการนำ SG-G3.5 มาทำปฏิกิริยาเพื่อปรับปรุงผิวด้วย 6-aminocaproic acid จนเกิดเป็น SG-G3.5-6ACA แล้วจะทำให้การดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1740 cm^{-1} หายไป แสดงให้เห็นว่าหมู่เอสเตอร์ ซึ่งอยู่ที่บริเวณผิวของ SG-G3.5 ได้ทำปฏิกิริยา amidation กับหมู่อะมิโนของ 6-aminocaproic acid ไปจนหมด ดังนั้นวิธีการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค FTIR นี้จึงสามารถช่วยอธิบายถึงผลสำเร็จ ในการสังเคราะห์ SG-G3.5-6ACA ได้เป็นอย่างดี

เปอร์เซ็นต์ของ PAMAM dendrimer ที่ติดอยู่บนผิวของ silica

โดยหลักการแล้ว silica gel จะไม่เกิดการสลายตัวเมื่อได้รับความร้อน ในขณะที่ PAMAM dendrimer สามารถสลายตัวเมื่อได้รับความร้อนที่อุณหภูมิสูงพอ ซึ่งการสลายตัวจะส่งผลให้มีการสูญเสียน้ำหนัก (weight loss) เกิดขึ้น ดังนั้นปริมาณของ PAMAM dendrimer ที่ติดอยู่บนผิวของ silica gel จึงสามารถหาได้โดยการใช้เทคนิค TGA ซึ่งเป็นเทคนิคที่ตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารตัวอย่างโดยเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิหรือเวลา โดยค่า weight loss ที่ได้จะเท่ากับ น้ำหนักของ PAMAM dendrimer ที่ติดอยู่บนผิวของ silica gel ในขณะที่น้ำหนักที่เหลือจะเท่ากับน้ำหนักของ silica gel

จากผลการทดลองโดยเทคนิค TGA ซึ่งแสดงในรูปที่ 24. พบว่า เมื่อ generation ของ PAMAM dendrimer สูงขึ้นจะสามารถสังเกตเห็นการสลายตัวได้ชัดเจนและมากยิ่งขึ้น และค่า %weight loss ก็มีแนวโน้มสูงขึ้นตาม generation ที่เพิ่มขึ้นจาก Silica gel จนถึง SG-G3.0 โดยพบว่ามีค่า 4.74, 6.84, 13.27, 21.70 และ 29.61 ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงปริมาณของ PAMAM dendrimer ที่ติดอยู่บนผิวของ silica gel ได้มีมากขึ้นตามจำนวนรอบของการสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบ SG-G3.0 และ SG-G3.0-PC โดยดูค่า %weight loss ก่อนและหลังการปรับปรุงผิวจะพบว่า หลังการปรับปรุงผิว SG-G3.0 เป็น SG-G3.0-PC ค่า %weight loss ได้เพิ่มขึ้นจาก 29.61 เป็น 33.32 แสดงถึงการติดผิวที่มากขึ้น



รูปที่ 24. TGA curves ของ Silica gel, SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0, SG-G3.0 และ SG-G3.0-PC

เนื่องจากการสังเคราะห์ SG-G3.0-PC นั้น จะต้องนำ SG-G3.0 มาทำปฏิกิริยากับ phthaloyl chloride ซึ่งเป็นสารที่มีวงแหวนเบนซีนที่สลายตัวได้ยากเมื่อได้รับความร้อนอยู่ในโครงสร้าง ดังนั้นในระหว่างการทดสอบโดยเทคนิค TGA จะพบว่า SG-G3.0-PC เกิดการสลายตัวมากกว่า SG-G3.0 ไม่มากนัก เพราะส่วนที่เกิดขึ้นระหว่างการสังเคราะห์จาก SG-G3.0 ไปเป็น SG-G3.0-PC นั้นเป็นส่วนของวงแหวนเบนซีนที่สลายตัวได้ยาก

ค่า %weight loss ที่ได้จากการทดลองโดยเทคนิค TGA จะถูกนำมาคำนวณเป็น %grafting ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$Grafting(\%) = \left(\frac{A}{B} \right) \times 100$$

โดยที่ A คือ น้ำหนักของ PAMAM dendrimer ที่อยู่บนผิวของ silica gel

B คือ น้ำหนักของ silica gel

ตารางที่ 1 แสดง %grafting ของ SG-G0 ถึง SG-G3.0 พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้นตาม generation ที่เพิ่มขึ้นจาก SG-G0 จนถึง SG-G3.0 และเพิ่มขึ้นอีกหลังการปรับปรุงผิวเป็น SG-G3.0-PC โดยมีค่าเท่ากับ 2.26%, 9.83%, 21.66%, 35.33% และ 42.86% ตามลำดับ ซึ่งแสดงถึงปริมาณของ PAMAM dendrimer ที่ติดอยู่บนผิวของ silica gel นั้นมากขึ้นตามจำนวนรอบของการสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น และหลังปรับปรุงผิวแล้วพบว่า %grafting มากขึ้นแสดงถึงการติดผิวที่มากขึ้น

ปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวของ PAMAM dendrimer ที่อยู่บนผิวของ silica gel

จากการวิเคราะห์หาปริมาณหมู่อะมิโนของ PAMAM dendrimer บนผิว silica gel ที่ generation ต่าง ๆ ที่เป็น full generation และหลังการปรับปรุงผิวด้วย phthaloyl chloride ผลที่ได้จากการทดลองได้แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 3. หมู่อะมิโนและ %grafting ของ SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0, SG-G3.0 และ SG-G3.0-PC

SG-PAMAM	Grafting (%)	Amino group (mmol/g)	
		Observed	Theoretical
SG-G0	2.26	0.55	-
SG-G1.0	9.83	0.97	1.10
SG-G2.0	21.66	1.31	2.20
SG-G3.0	35.33	1.67	4.40
SG-G3.0-PC	42.86	0.38	-

จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่อ generation ของ PAMAM dendrimer สูงขึ้นจาก SG-G0 จนถึง SG-G3.0 ปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวหน้านั้นจะมากขึ้นตามด้วย โดยมีค่าเท่ากับ 0.55, 0.97, 1.31 และ 1.67 mmol/g ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของหมู่ฟังก์ชันในสารตัวอย่างที่มากขึ้นนี้บ่งบอกถึงการเจริญเติบโตและการแตกกิ่งของ PAMAM dendrimer ที่มีมากขึ้นเมื่อทำการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ใน generation ที่สูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบปริมาณหมู่อะมิโนก่อนและหลังการปรับปรุงผิวด้วย phthaloyl chloride พบว่าก่อนปรับปรุงผิว SG-G3.0 มีปริมาณหมู่อะมิโน 1.67 mmol/g หลังการปรับปรุงผิวเป็น SG-G3.0-PC แล้วปริมาณหมู่อะมิโนลดลงเหลือ 0.38 mmol/g ซึ่งแสดงว่าได้มีหมู่อะมิโนบางส่วนเกิดปฏิกิริยากับ phthaloyl chloride

ปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวหน้านั้นยังช่วยบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของ PAMAM dendrimer ที่ได้สังเคราะห์ขึ้นซึ่งตามทฤษฎีแล้วปริมาณหมู่อะมิโนจะเพิ่มเป็น 2 เท่าในทุก ๆ generation จากตารางที่ 1 พบว่าปริมาณหมู่อะมิโนที่ได้จากการทดลองจริงของ SG-G0 จนถึง SG-G3.0 มีค่าแตกต่างไปจากทฤษฎีมากโดยเฉพาะใน generation ที่สูงขึ้น แสดงให้เห็นว่า PAMAM dendrimer ที่ได้จากการสังเคราะห์นั้นไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากปริมาณหมู่อะมิโนที่บริเวณผิวของ SG-G0 ซึ่งเกิดมาจากปฏิกิริยาระหว่างหมู่ silanol group ที่ผิวของ silica gel และ 3APTS นั้นมีมากเกินไป เมื่อมีหมู่อะมิโนมากจึงทำให้ปริมาณของ dendrimer ซึ่งจะเริ่มเติบโตขึ้นที่หมู่อะมิโนที่บริเวณผิวของ SG-G0 นั้นมีปริมาณมากและเมื่อเติบโตต่อไปจึงเกิด steric hindrance หรือมีความเกะกะเกิดขึ้น ยิ่งใน generation ที่สูงขึ้นการเติบโตและการแตกกิ่งก้านของ PAMAM dendrimer ให้เป็นไปตามทฤษฎีจึงทำได้ยาก ทำให้ PAMAM dendrimer ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็น highly branched polymer หรือ ‘dendrimer-like’ ซึ่งเป็น dendrimer ที่ไม่สมบูรณ์ตามทฤษฎีสังเกตได้จากปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวของ PAMAM dendrimer ซึ่งทราบโดยวิธีการไตเตรต ความไม่สมบูรณ์จุดใดจุดหนึ่งที่เกิดขึ้นนั้นจะยังคงอยู่ต่อไปและส่งผลต่อการเจริญเติบโตของ PAMAM dendrimer ใน generation ต่อ ๆ ไป เพราะจะต้องเติบโตขึ้นต่อจาก generation เดิมจนกระทั่งสิ้นสุดการสังเคราะห์ นั่นคือหากเกิดโครงสร้างที่ไม่สมบูรณ์ในขั้นตอนใดก็จะทำให้เกิดเป็น dendrimer ที่มีโครงสร้างไม่สมบูรณ์ไปด้วย นอกจากนี้หากสังเคราะห์ต่อไปยัง generation ที่สูงขึ้นหมู่อะมิโนที่บริเวณผิวยิ่งแน่นมากขึ้นหรือแน่นจนเต็มที่แล้วทำให้ยากต่อการเติบโต ปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวจึงค่อนข้างจะคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย อีกทั้งระบบที่เกิดปฏิกิริยาก็ยังเป็นแบบ heterogeneous คือ การเกิดปฏิกิริยาบนผิว silica gel ที่เป็นของแข็งในสารละลายของสารตั้งต้นที่เป็นของเหลว ซึ่งการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์นั้นจึงเป็นไปได้ยากเมื่อเปรียบเทียบกับปฏิกิริยาในระบบที่เป็นของเหลวที่เป็นเนื้อเดียวกัน

ต้นทุนสารเคมีในการเตรียมและการปรับปรุงผิว PAMAM dendrimer บนผิว silica gel

ในการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ลงบนผิวของ silica gel และขั้นตอนการปรับปรุงผิวนั้น จำเป็นต้องใช้เวลาและเงินทุนเพื่อการดำเนินงานต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อต้นทุนในการสังเคราะห์ ดังนั้นในการเตรียมสารเพื่อนำไปใช้งานจริงจะต้องคำนึงถึงทั้งเรื่องความเหมาะสมกับงานและความคุ้มค่าในด้านประสิทธิภาพการใช้งานเทียบกับต้นทุนในการผลิตด้วย โดยผลิตภัณฑ์ที่เหมาะสมในการผลิตเพื่อใช้งานนั้นจะต้องมีขั้นตอนการผลิตไม่ซับซ้อน มีต้นทุนการผลิตต่ำและใช้เวลาการผลิตน้อยแต่ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพดี มี % yield สูง สามารถผลิตได้คราวละมาก ๆ และเป็นกระบวนการที่ไม่เป็นพิษต่อทั้งมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ตารางที่ 4. เวลาที่ใช้ ผลผลิตที่ได้และต้นทุนสารเคมีในการเตรียม SG-PAMAM

SG-PAMAM	รวมเวลา สังเคราะห์ (ชั่วโมง)	% Yield*	รวมต้นทุน/g.resin (บาท/g.)	
			การสังเคราะห์ เพียงครั้งเดียว	นำสารตั้งต้น กลับมาใช้ใหม่
Silica gel	-	-	6.88	6.88
SG-G0	8	109.50	9.86	-
SG-G0.5	56	101.79	13.29	-
SG-G1.0	152	101.65	17.16	-
SG-G1.5	200	100.34	21.18	-
SG-G2.0	296	100.17	27.37	-
SG-G2.5	344	99.93	33.38	-
SG-G3.0	512	99.25	45.18	-
SG-G3.5	584	105.36	52.26	-
SG-G3-PC	536	97.17	81.25	36.07
SG-G3.5-6ACA	632	47.88	138.08	85.82

* % Yield ของ SG-Gn = (นน.ของ SG-Gn ที่ได้)/(นน.ของ SG-G(n-0.5) ที่ใช้ตั้งต้น)×100

ถ้าพิจารณาเฉพาะต้นทุนด้านสารเคมี จากตารางที่ 4 จะแบ่งต้นทุนได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ลงบนผิว silica gel (ตั้งแต่ SG-G0. จนถึง SG-G3.0 และ SG-G3.5) และอีกส่วนคือการปรับปรุงผิว dendrimer ที่ได้สังเคราะห์ขึ้น (SG-G3.0-PC และ SG-G3.5-6ACA) ซึ่งจะพบว่าต้นทุนในการสังเคราะห์นั้นส่วนใหญ่จะมาจากขั้นตอนการเตรียม

PAMAM dendrimer ลงบนผิวของ silica gel เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่จะต้องใส่สารเคมีจำนวนมาก เพราะต้องใส่สารเคมีในปริมาณที่มากเกินไปซึ่งจะมีสารตั้งต้นเหลืออยู่จำนวนมาก ดังนั้นถ้าสามารถนำสารเหล่านั้น เช่น toluene จากการเตรียม SG-G0 สารละลายของ MA (ใน MeOH) และ สารละลายของ EDA (ใน MeOH) เป็นต้น มาเก็บไว้เพื่อนำมาใช้ซ้ำในการสังเคราะห์ครั้งต่อ ๆ ไป ได้หรืออาจนำมากลั่นให้บริสุทธิ์ก่อน ต้นทุนด้านสารเคมีในการสังเคราะห์ dendrimer ในครั้งต่อ ๆ ไปจะเหลือเพียงต้นทุนของ silica gel เท่านั้น และต้นทุนสารเคมีเฉลี่ยต่อการสังเคราะห์ 1 ครั้ง ก็จะลดลงด้วย สิ่งที่สำคัญ คือ ควรจะศึกษาเพิ่มเติมเรื่องคุณภาพผลผลิตที่ได้ด้วย

การลดเวลาในการสังเคราะห์แต่ละขั้นตอนก็สามารถช่วยประหยัดเวลาลงได้ โดยจะต้องศึกษาในเรื่องคุณภาพผลผลิตเพิ่มเติมด้วย โดยในงานวิจัยนี้อาจใช้เวลาสังเคราะห์นานเพราะมีจุดประสงค์ให้ปฏิกิริยาเกิดได้เต็มที่ ถ้าใช้เวลาสังเคราะห์นานแต่คุณภาพผลผลิตที่ได้ดีขึ้นเพียงเล็กน้อยก็อาจลดระยะเวลาในการสังเคราะห์ลงได้ ซึ่งเป็นสิ่งที่สมควรศึกษาต่อไป สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นเกรด analytical ถ้าเปลี่ยนมาเป็นเกรด commercial ก็จะช่วยลดต้นทุนได้นอกจากนี้การสังเคราะห์ dendrimer ใน generation ที่ต่ำลงจะทำให้ใช้เวลาและสารเคมีในการสังเคราะห์น้อยกว่าซึ่งช่วยลดเวลาที่ใช้และต้นทุนลงได้ (ควบคุมปริมาณหมู่อะมิโนให้มากดังเดิมได้โดยการเพิ่มปริมาณ APTS ในขั้นตอนการเตรียม SG-G0)

ในการปรับปรุงผิวนั้น การเตรียม SG-G3.0-PC จะใช้เงินทุนเพิ่มขึ้นจาก SG-G3.0 ไม่มากนัก ในขณะที่การเตรียม SG-G3.5-6ACA จะมีต้นทุนสูงกว่า SG-G3.5 อย่างชัดเจน เนื่องจากในการสังเคราะห์ SG-G3.5-6ACA จะได้ %yield น้อยมาก คือ 47.88 % จึงทำให้ราคาต้นทุนต่อกรัมของสารสูงขึ้นถึงเท่าตัว โดยเปรียบเทียบต้นทุนสารเคมีในการสังเคราะห์ SG-G3.5-6ACA จะสูงกว่า SG-G3.0-PC ถึงเกือบ 2 เท่า และสูงกว่า SG-G3.0 ถึงกว่า 3 เท่า จึงควรศึกษาหาวิธีการเพิ่มผลผลิตในการสังเคราะห์ SG-G3.5-6ACA ต่อไป

ตอนที่ 2 การศึกษาหาชนิด Ion exchange resin ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักสูงสุด

การศึกษานี้ทำเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักของเรซินแต่ละชนิด คือ SG-G3.0, SG-G3.0-PC และ SG-G3.5-6ACA ซึ่งสามารถทำได้โดยการนำเรซินแต่ละชนิดมาทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะหนักในสารละลาย โดยเลือกใช้ไอออน Cu^{2+} เป็นตัวแทนในการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของเรซินแต่ละชนิด

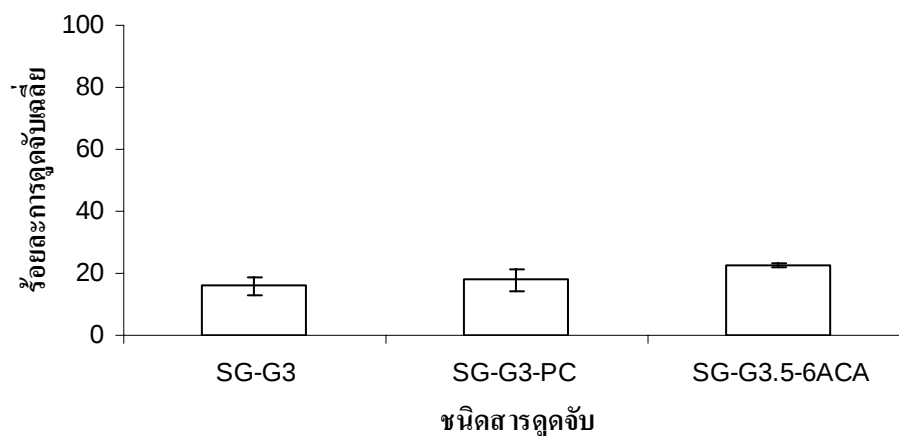
เนื่องจากเรซินที่ใช้ทดสอบนั้นค่อนข้างจะมีฤทธิ์เป็นเบส และหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของเรซินนั้นอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำทำให้ pH ของสารละลายสูงขึ้น ส่งผลให้โลหะหนักในสารละลายเกิดการตกตะกอน ซึ่งความเป็นเบสของเรซินแต่ละชนิดนั้นไม่เท่ากัน ในการศึกษาจึงทำการทดสอบโดยใช้น้ำหนักของเรซินแต่ละชนิดน้อย ๆ และใช้ปริมาตรสารละลายไอออนของโลหะหนักมาก ๆ เพื่อควบคุม pH ของสารละลายไม่ให้สูงเกินไป ซึ่งสามารถตรวจสอบโดยใช้อุปกรณ์วัด pH จึงทำให้มั่นใจได้ว่าจะไม่มีการตกตะกอนของโลหะหนักเกิดขึ้นในระหว่างการทดสอบ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงปริมาณไอออนของโลหะหนักที่ถูกดูดซับโดยเรซินอย่างแท้จริงซึ่งจะช่วยทำให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับของเรซินได้อย่างถูกต้อง (การวัดความเข้มข้นของสารละลายโลหะก่อนและหลังการทดสอบจะทำให้ทราบปริมาณไอออนโลหะหนักในสารละลายที่เปลี่ยนไป แต่จะไม่สามารถระบุได้ว่าเกิดมาจากการดูดซับของเรซินหรือเกิดจากการตกตะกอน จึงต้องป้องกันไม่ให้เกิดการตกตะกอนโดยควบคุม pH ของสารละลายไม่ให้สูงเกินไป)

จากรูปที่ 25. แสดงความสามารถการดูดซับของเรซินทั้ง 3 ชนิด คือ SG-G3.0, SG-G3.0-PC และ SG-G3.5-6ACA พบว่าปริมาณการดูดซับไอออน Cu^{2+} ต่อ 1 กรัมของเรซินมีค่า 19.43, 21.70 และ 27.57 $\text{mg.M}^{++}/\text{g.resin}$ ตามลำดับ โดยในการดูดซับโลหะด้วย SG-G3.0-PC และ SG-G3.5-6ACA จะมีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไอออนของโซเดียมเกิดขึ้นที่หมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COONa}$) ในขณะที่การดูดซับโลหะด้วย SG-G3.0 จะไม่สามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนเช่นนี้เนื่องจากมีหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเป็นหมู่อะมิโน ($-\text{NH}_2$)

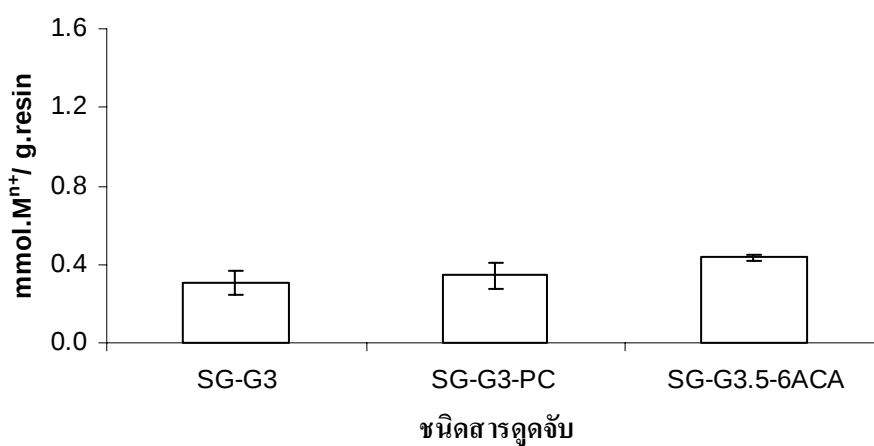
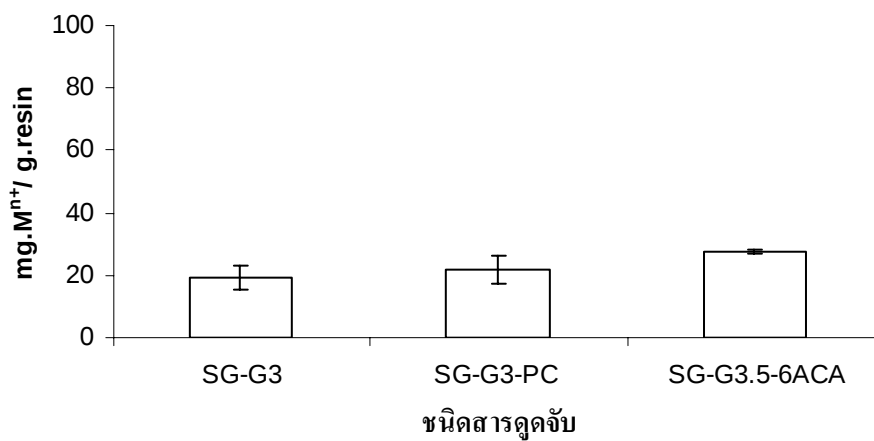
โครงสร้างที่ผิวนอกของ SG-G3.0-PC มีลักษณะเป็นวงแหวนเบนซีนซึ่งมีความเกาะกะและไม่ยืดหยุ่นแตกต่างจาก SG-G3.5-6ACA ซึ่งผิวนอกมีโครงสร้างเป็นเส้นตรงที่มีความยืดหยุ่นกว่าจึงมีประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักค่าสูงกว่า นอกจากนี้ SG-G3.0-PC ถูกสังเคราะห์มาจาก SG-G3.0 ในขณะที่ SG-G3.5-6ACA สังเคราะห์มาจาก SG-G3.5 จึงทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับไม่เท่ากันเนื่องใช้สารตั้งต้นแตกต่างกันตั้งแต่แรก แม้ว่า SG-G3.5-6ACA มีประสิทธิภาพสูงที่สุดแต่ก็มีต้นทุนในการสังเคราะห์สูงและได้ผลผลิตเพียง 47.88 % ในขณะที่การสังเคราะห์ SG-G3.0-PC ประหยัดต้นทุนและได้ผลผลิตถึง 97.17 % ดังนั้น SG-G3.0-PC จึงมีความเหมาะสมในด้านการสังเคราะห์มากกว่า ดังนั้นจึงได้นำ SG-G3.0-PC ไปทดสอบการดูดซับต่อไป

ตารางที่ 5. ผลของชนิดเรซินต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยใช้เรซินหนัก 0.025 g., สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm. ปริมาตร 100 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	ชนิดเรซิน	$[M^{n+}]$ เริ่มต้น (ppm)	$[M^{n+}]$ สุดท้าย (ppm)	ประสิทธิภาพ		
				ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	mg. M^{n+} / g.resin	mmol. M^{n+} / g.resin
Cu(NO ₃) ₂	SG-G3	30.5	25.7 (±0.9)	15.9 (±3.1)	19.4 (±3.73)	0.306 (±0.059)
	SG-G3-PC	30.5	25.1 (±1.1)	17.8 (±3.6)	21.7 (±4.40)	0.341 (±0.069)
	SG-G3.5-6ACA	30.5	23.6 (±0.2)	22.6 (±0.8)	27.6 (±0.93)	0.434 (±0.015)



รูปที่ 25. ผลของเรซินชนิดต่าง ๆ ในการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้เรซินหนัก 0.025 g., สารละลายโลหะเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm. ปริมาตร 100 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C



รูปที่ 25.(ต่อ) ผลของเรซินชนิดต่าง ๆ ในการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้เรซินหนัก 0.025 g., สารละลายโลหะเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm. ปริมาตร 100 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

ตอนที่ 3 การทดสอบการดูดซับโลหะหนักจากสารละลาย และการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดจากสารละลายเกลือโลหะหนัก

1. อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนต่อประสิทธิภาพการดึงโลหะหนักจากสารละลาย

ในการทดสอบการดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลาย เวลาที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไอออนของโซเดียม (Na^+) ที่อยู่บนเรซิน ซึ่งเวลาที่ใช้ดูดซับจะมากหรือน้อยนั้นอาจขึ้นอยู่กับชนิดเรซิน, ชนิดของโลหะหนัก และสภาวะต่าง ๆ ในระหว่างการทดลอง โดยเรซินที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ SG-G3.0-PC

จากการทดลองพบว่าการแลกเปลี่ยนไอออนนั้นเกิดง่ายและรวดเร็วมาก ที่เวลาการดูดซับ 10 นาที ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออน Ni^{2+} และ Cd^{2+} นั้นมีค่าสูงและมีค่าใกล้เคียงกับการดูดซับที่เวลานาน ๆ อาจกล่าวได้ว่า เรซินมีอัตราการดูดซับสูงและได้ดูดซับไอออนโลหะหนักจนเข้าสู่สมดุลตั้งแต่ในช่วงเริ่มต้นการทดสอบ นั่นคือใช้เวลาเพียงเล็กน้อยก็สามารถทำให้การดูดซับเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ ส่วนไอออน Cu^{2+} ยังถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอีกเล็กน้อยหลังจากผ่านไป 10 นาที

โดยหลักการแล้วในช่วงแรกของการทดลองอัตราในการดูดซับจะมีค่าสูง การแลกเปลี่ยนไอออนนั้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินและไอออนของโลหะหนักในสารละลายมีอยู่มากทำให้โอกาสในการพบกันนั้นมีสูง ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงควรเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการดูดซับ และเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นไอออนสามารถแพร่เข้าไปภายในโครงสร้างของเรซินได้มากขึ้นและเกิดการดูดซับไอออนของโลหะหนัก ในที่สุดปริมาณหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินและไอออนของโลหะหนักในสารละลายนั้นจะมีเหลืออยู่น้อยและลดลงเรื่อย ๆ ไอออนของโลหะหนักมีโอกาสในการเจอกับหมู่แลกเปลี่ยนไอออนของเรซินน้อยลง ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงมีค่าคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยจนกระทั่งระบบเข้าสู่ภาวะสมดุล

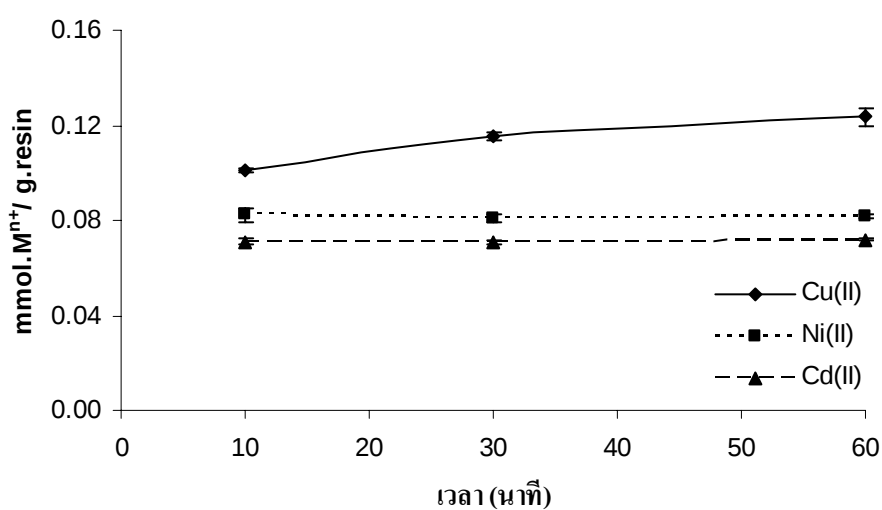
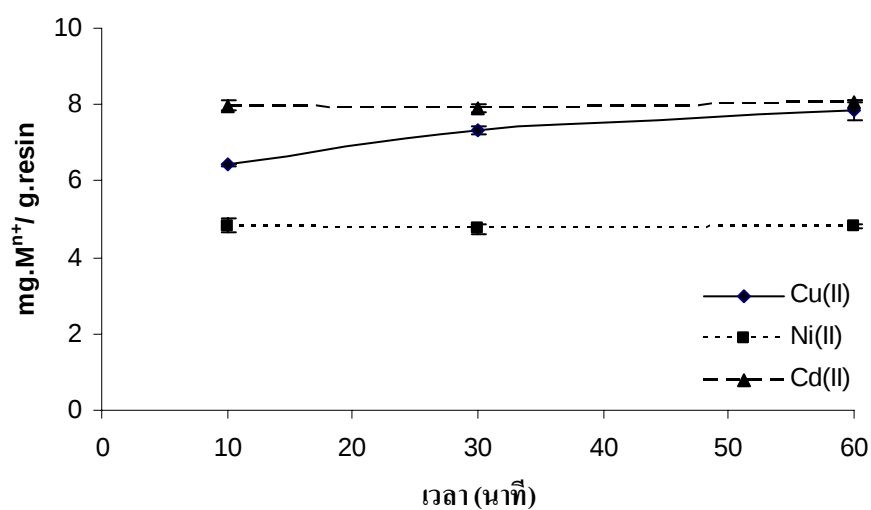
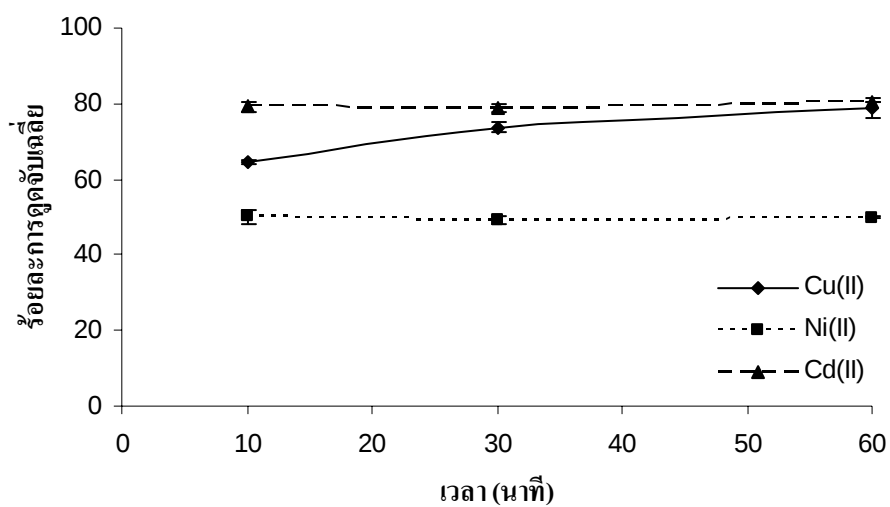
นอกจากนี้ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไอออนยังเป็นอีกปัจจัยอีกชนิดหนึ่งที่สัมพันธ์กับเวลาในการแลกเปลี่ยนไอออน อัตราการแพร่ของไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดเข้าไปในเรซิน และเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนโลหะหนักกับไอออนของโซเดียม (Na^+) ที่อยู่บนเรซิน จะขึ้นอยู่กับความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของไอออนที่ไม่เท่ากันและความแตกต่างในด้านความหนาแน่นของประจุ (charge density) รวมทั้งหมู่ข้างเคียงที่มีส่วนช่วยในการเกิด complex ของโลหะจึงส่งผลให้การแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะแต่ละชนิดไม่เท่ากัน

การศึกษาผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการจับโลหะทำให้เราทราบระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักของเรซินซึ่งมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง กล่าวคือถ้าใช้เวลา

ในการดูดซับน้อยไปจะทำให้มีไอออนโลหะหนักเหลืออยู่ในสารละลายจำนวนมาก แต่ถ้าใช้เวลามากไปก็จะเป็นการสิ้นเปลืองเวลาการปฏิบัติงานโดยไม่เกิดประโยชน์ใด ๆ และยังสิ้นเปลืองงบประมาณในการดำเนินการด้วย

ตารางที่ 6. ผลของเวลาการทดสอบต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm. ปริมาตร 10 mL., pH เริ่มต้น = 4, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	เวลา (นาที)	$[M^{n+}]$ เริ่มต้น (ppm)	$[M^{n+}]$ สุดท้าย (ppm)	ประสิทธิภาพ		
				ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	mg. M^{n+} / g.resin	mmol. M^{n+} / g.resin
Cu(NO ₃) ₂	10	99.5	35.3 (±0.4)	64.5 (±0.4)	6.42 (±0.04)	0.101 (±0.001)
	30	99.5	26.1 (±1.2)	73.8 (±1.2)	7.34 (±0.12)	0.116 (±0.002)
	60	99.5	21.0 (±2.5)	78.9 (±2.5)	7.85 (±0.25)	0.124 (±0.004)
Ni(NO ₃) ₂	10	96.3	48.0 (±1.8)	50.1 (±1.8)	4.83 (±0.18)	0.082 (±0.003)
	30	96.3	48.8 (±1.2)	49.3 (±1.2)	4.74 (±0.12)	0.081 (±0.002)
	60	96.3	48.2 (±0.4)	50.0 (±0.4)	4.81 (±0.04)	0.082 (±0.001)
CdCl ₂	10	100.5	20.8 (±1.3)	79.3 (±1.3)	7.97 (±0.13)	0.071 (±0.001)
	30	100.5	21.3 (±1.0)	78.9 (±1.0)	7.93 (±0.10)	0.071 (±0.001)
	60	100.5	19.7 (±0.2)	80.4 (±0.2)	8.08 (±0.02)	0.072 (±0.0001)



รูปที่. 26 ผลของเวลาการทดสอบต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g. สารละลายโลหะ 10 mL. ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm, pH เริ่มต้น= 4, อุณหภูมิ 25 °C

2. อิทธิพลของปริมาณเรซินต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด ออกจากสารละลาย

ในการทดสอบการดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลาย ปริมาณของเรซินเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างไอออนของโลหะหนักกับไอออนของโซเดียม (Na^+) ที่อยู่บนเรซิน เนื่องจากปริมาณเรซินนั้นจะสัมพันธ์กับปริมาณและความเข้มข้นของหมู่แลกเปลี่ยนไอออนของเรซินที่อยู่ในสารละลาย เรซินที่ใช้ในการทดลอง คือ SG-G3.0-PC

การศึกษาผลของปริมาณเรซินต่อประสิทธิภาพการจับโลหะยังทำให้ทราบถึงปริมาณเรซินที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการดูดซับโลหะหนักจากสารละลาย ซึ่งมีประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง กล่าวคือถ้าใช้ปริมาณเรซินในการดูดซับน้อยไปจะทำให้มีไอออนโลหะหนักเหลืออยู่ในสารละลายจำนวนมาก แต่ถ้าใช้ปริมาณเรซินมากไปก็จะเป็นการสิ้นเปลืองเรซินโดยไม่เกิดประโยชน์ใด ๆ และยังต้องใช้งบประมาณเพื่อดำเนินการมากขึ้นด้วย

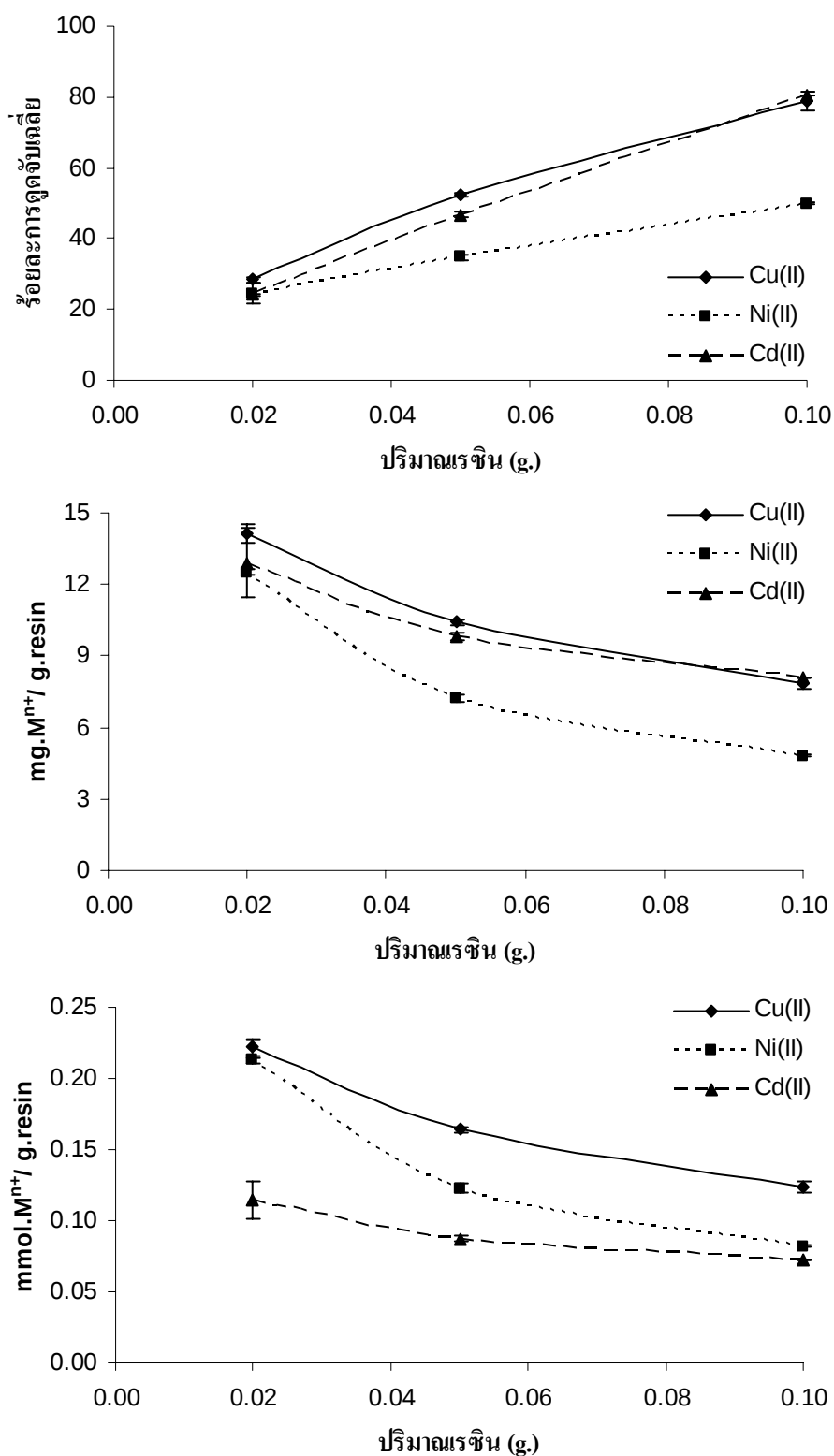
จากกราฟในรูปที่ 27. เป็นกราฟที่แสดงถึงอิทธิพลของปริมาณเรซินที่ใช้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด โดยควบคุมสภาวะอื่น ๆ ให้คงที่ พบว่าเมื่อปริมาณเรซินมากขึ้นจะทำให้ปริมาณการดูดซับต่อ 1 กรัมของเรซินจะลดลง แต่ค่าร้อยละการดูดซับไอออนโลหะหนักออกจากสารละลายนั้นมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเรซินนั้นจะเป็นการเพิ่มปริมาณและความเข้มข้นของหมู่คาร์บอกซิเลตซึ่งเป็นหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินกับไอออนของโลหะหนักในสารละลาย ปริมาณเรซินที่มากขึ้นและโอกาสในการพบกันของไอออนโลหะหนักและหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนมากขึ้นทำให้ค่าร้อยละการดูดซับโลหะหนักเพิ่มขึ้น

ในการทดลองนี้ถ้าเพิ่มปริมาณเรซินขึ้นเรื่อย ๆ ประสิทธิภาพการดูดซับก็ควรจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย จนในที่สุดร้อยละการดูดซับไอออนของโลหะหนักจะเริ่มคงที่หรือเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แม้จะเพิ่มปริมาณเรซินมากขึ้นก็ตาม เนื่องจากมีปริมาณของไอออนของโลหะหนักเหลืออยู่ในสารละลายน้อยมาก เพราะในการทดลองจะใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากันคือ 100 ppm และใช้เวลาในการดูดซับเท่ากัน คือ 1 ชั่วโมง การเพิ่มปริมาณเรซินมากขึ้นอีกจึงไม่มีประโยชน์เพราะแม้จะทำให้มีหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้นก็จะไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนนั้นเพิ่มขึ้นเพราะร้อยละการดูดซับไอออนของโลหะหนักเข้าใกล้ 100 % แล้ว แต่ในการทดลองจริงนั้นไม่ควรเพิ่มปริมาณเรซินในการดูดซับมากกว่านี้ เนื่องจากปริมาณเรซินที่ใช้นั้นจะส่งผลต่อค่า pH ของสารละลายโลหะหนัก หมู่คาร์บอกซิเลตบนเรซินอาจเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับน้ำทำให้ pH ของสารละลายสูงขึ้น และส่งผลให้โลหะหนักในสารละลายเกิดการตกตะกอน ทำให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่วัดได้จะสูงเกินจริง การทดลองจึงผิดพลาดเพราะไอออนโลหะหนักเกิดการตกตะกอนไม่ได้ถูกดูดซับโดยเรซิน

จากการทดลองจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดไม่เท่ากัน ทั้งนี้เนื่องจากผลของความเสถียรและความสามารถในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่แลกเปลี่ยนไอออนของเรซินนั่นเอง

ตารางที่ 7. ผลของปริมาณเรซินต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้เรซินคือ SG-G3.0-PC, สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm, ปริมาตร 10 mL., ค่า pH เริ่มต้น = 4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	ปริมาณเรซิน (g.)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ประสิทธิภาพ		
				ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	mg.M ⁿ⁺ / g.resin	mmol.M ⁿ⁺ / g.resin
Cu(NO ₃) ₂	0.02	99.5	71.3 (±0.8)	28.4 (±0.8)	14.13 (±0.37)	0.222 (±0.006)
	0.05	99.5	47.4 (±0.6)	52.3 (±0.6)	10.42 (±0.12)	0.164 (±0.002)
	0.10	99.5	21.0 (±2.5)	78.9 (±2.5)	7.85 (±0.25)	0.124 (±0.004)
Ni(NO ₃) ₂	0.02	103.8	78.8 (±0.3)	24.1 (±0.2)	12.50 (±0.13)	0.213 (±0.002)
	0.05	103.8	67.7 (±0.8)	34.8 (±0.8)	7.22 (±0.17)	0.123 (±0.003)
	0.10	96.3	48.2 (±0.4)	50.0 (±0.4)	4.81 (±0.04)	0.082 (±0.001)
CdCl ₂	0.02	105.0	79.2 (±2.9)	24.6 (±2.8)	12.92 (±1.46)	0.115 (±0.013)
	0.05	105.0	55.9 (±0.9)	46.7 (±0.9)	9.82 (±0.18)	0.087 (±0.002)
	0.10	100.5	19.7 (±0.2)	80.4 (±0.2)	8.08 (±0.02)	0.072 (±0.0001)



รูปที่ 27. ผลของปริมาณเรซินต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้เรซินคือ SG-G3.0-PC, สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm. ปริมาตร 10 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

3. อิทธิพลของความเข้มข้นไอออนโลหะหนักในสารละลายต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด

ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนไอออนจะมีค่าสูงหรือต่ำ นั้นมีผลมาจากปริมาณไอออนของโลหะหนักในสารละลายกับปริมาณหมู่ฟังก์ชันในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินที่ต้องสัมพันธ์กัน โดยเรซินที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ SG-G3.0-PC

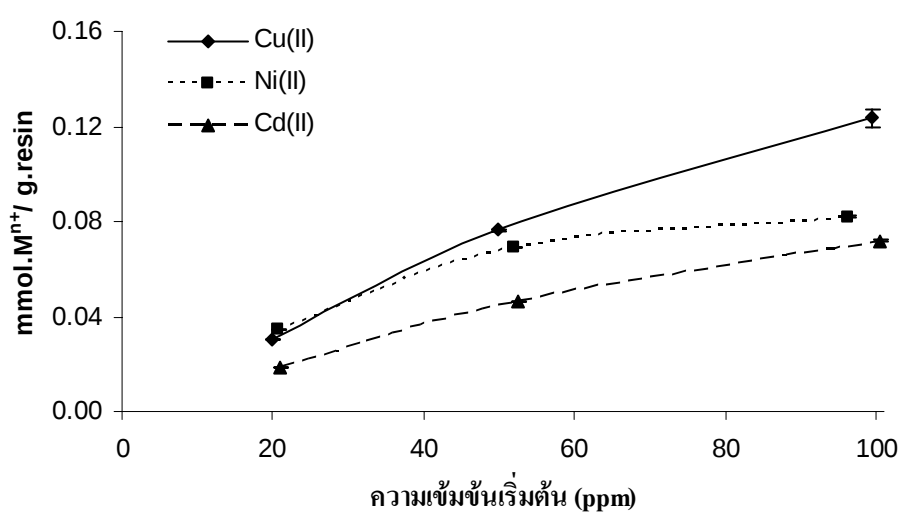
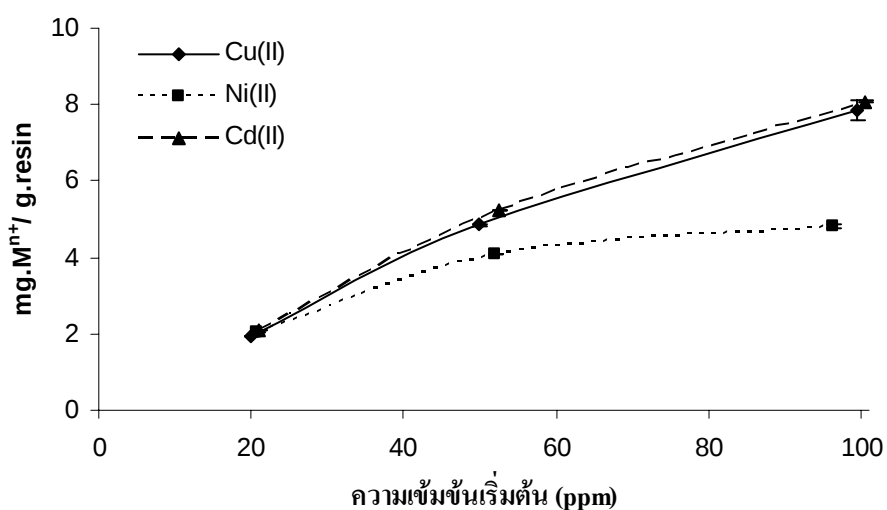
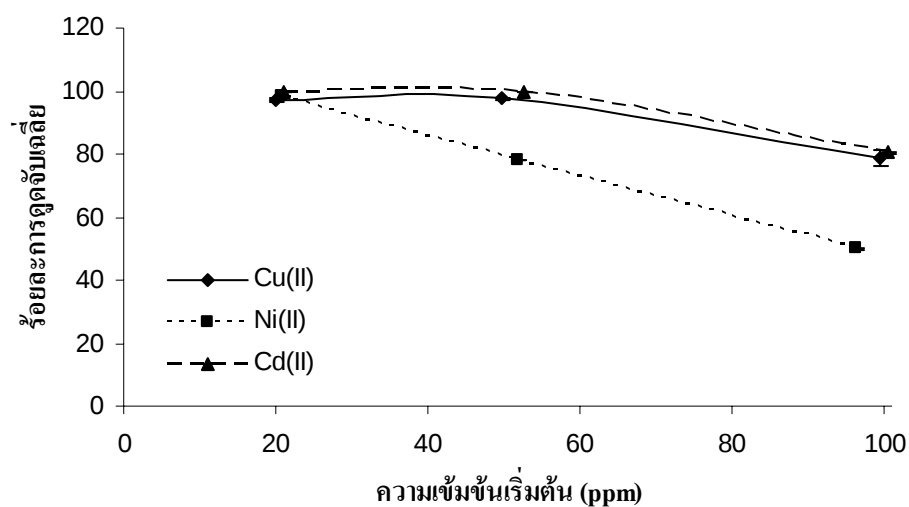
กราฟในรูปที่ 28. แสดงถึงอิทธิพลของปริมาณไอออนของโลหะหนักในสารละลายที่มีต่อร้อยละการดูดซับไอออนของโลหะหนัก พบว่าเมื่อใช้ปริมาณเรซินเท่าเดิมคือ 0.1 กรัม และเวลาในการทดสอบ 60 นาที สำหรับการดูดซับไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด โดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นในการทดลองโดยควบคุมสภาวะอื่น ๆ ให้คงเดิม พบว่าร้อยละการดูดซับไอออนโลหะหนักของเรซินจะลดลงมากเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโลหะมากขึ้น เนื่องจากเรซินที่ปริมาณหนึ่ง ๆ จะมีหมู่ในแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักที่จำกัดอยู่จำนวนหนึ่งเท่านั้น จึงทำให้มีไอออนของโลหะหนักเหลืออยู่ในสารละลายจำนวนมาก จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณเรซินเท่ากับ 0.1 กรัม จะมีร้อยละในการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายที่มีความเข้มข้นไอออนโลหะหนักเริ่มต้นเท่ากับ 20 ppm. สูงที่สุด ถ้าใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นไอออนสูงขึ้นค่าร้อยละการดูดซับไอออนจะลดลงสำหรับไอออนทุกชนิด

จากกราฟ ถ้าพิจารณาถึงปริมาณการดูดซับโลหะหนักต่อ 1 กรัมของเรซิน พบว่าถ้าใช้สารละลายโลหะหนักที่มีความเข้มข้นไอออนเริ่มต้นสูง ปริมาณการดูดซับโลหะหนักต่อ 1 กรัมของเรซินจะมากขึ้น เป็นเพราะโอกาสในการพบกันของไอออนโลหะหนักและหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนจะมากขึ้นเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นไอออนสูง แต่จะส่งผลมีไอออนโลหะหนักเหลือในสารละลายจำนวนมากซึ่งส่งผลให้ร้อยละการดูดซับไอออนลดลงเพราะในการทดลองทุกครั้งจะใช้เรซิน 0.1 กรัม เท่ากัน ปริมาณเรซินและหมู่ในแลกเปลี่ยนไอออนจึงมีอยู่เท่าเดิม

นั่นคือ ในการควบคุมสภาวะการทดลองอื่น ๆ ให้คงที่ ถ้าใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นไอออนของโลหะหนักเริ่มต้นต่ำ ๆ ค่าร้อยละการดูดซับจะสูง กล่าวคือสามารถดูดซับโลหะหนักออกจากสารละลายได้จนเกือบหมด แต่ปริมาณการดูดซับโลหะหนักต่อ 1 กรัมของเรซินจะต่ำ และถ้าใช้สารละลายที่มีความเข้มข้นไอออนของโลหะหนักเริ่มต้นสูง ค่าร้อยละการดูดซับจะต่ำคือจะมีไอออนของโลหะหนักเหลืออยู่ในสารละลายจำนวนมาก แต่ปริมาณการดูดซับโลหะหนักต่อ 1 กรัมของเรซินจะมีค่าสูง

ตารางที่ 8. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะปริมาตร 10 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ประสิทธิภาพ		
				ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	mg.M ⁿ⁺ / g.resin	mmol.M ⁿ⁺ / g.resin
Cu(NO ₃) ₂	20	19.9	0.61 (±0.12)	96.9 (±0.6)	1.93 (±0.01)	0.030 (±0.0002)
	50	49.8	1.22 (±0.11)	97.6 (±0.2)	4.85 (±0.01)	0.076 (±0.0002)
	100	99.5	21.0 (±2.5)	78.9 (±2.5)	7.85 (±0.25)	0.124 (±0.0039)
Ni(NO ₃) ₂	20	20.8	0.32 (±0.02)	98.5 (±0.1)	2.04 (±0.00)	0.035 (±0.0000)
	50	51.9	11.3 (±0.00)	78.3 (±0.0)	4.06 (±0.00)	0.069 (±0.0000)
	100	96.3	48.2 (±0.4)	50.0 (±0.4)	4.81 (±0.04)	0.082 (±0.0007)
CdCl ₂	20	21.0	0.0 (±0.0)	100.0 (±0.0)	2.10 (±0.00)	0.019 (±0.0000)
	50	52.5	0.0 (±0.0)	100.0 (±0.0)	5.25 (±0.00)	0.047 (±0.0000)
	100	100.5	19.7 (±0.2)	80.4 (±0.2)	8.08 (±0.02)	0.072 (±0.0001)



รูปที่ 28. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะ 10 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

4. อิทธิพลของ pH ที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด

ค่า pH หรือสถานะความเป็นกรดต่างนั้น เป็นปัจจัยที่สำคัญมากในการทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะหนัก เนื่องจากเรซินที่ใช้จะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนได้ดีก็ต่อเมื่อมีค่า pH ที่เหมาะสม โดยเรซินที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ SG-G3.0-PC

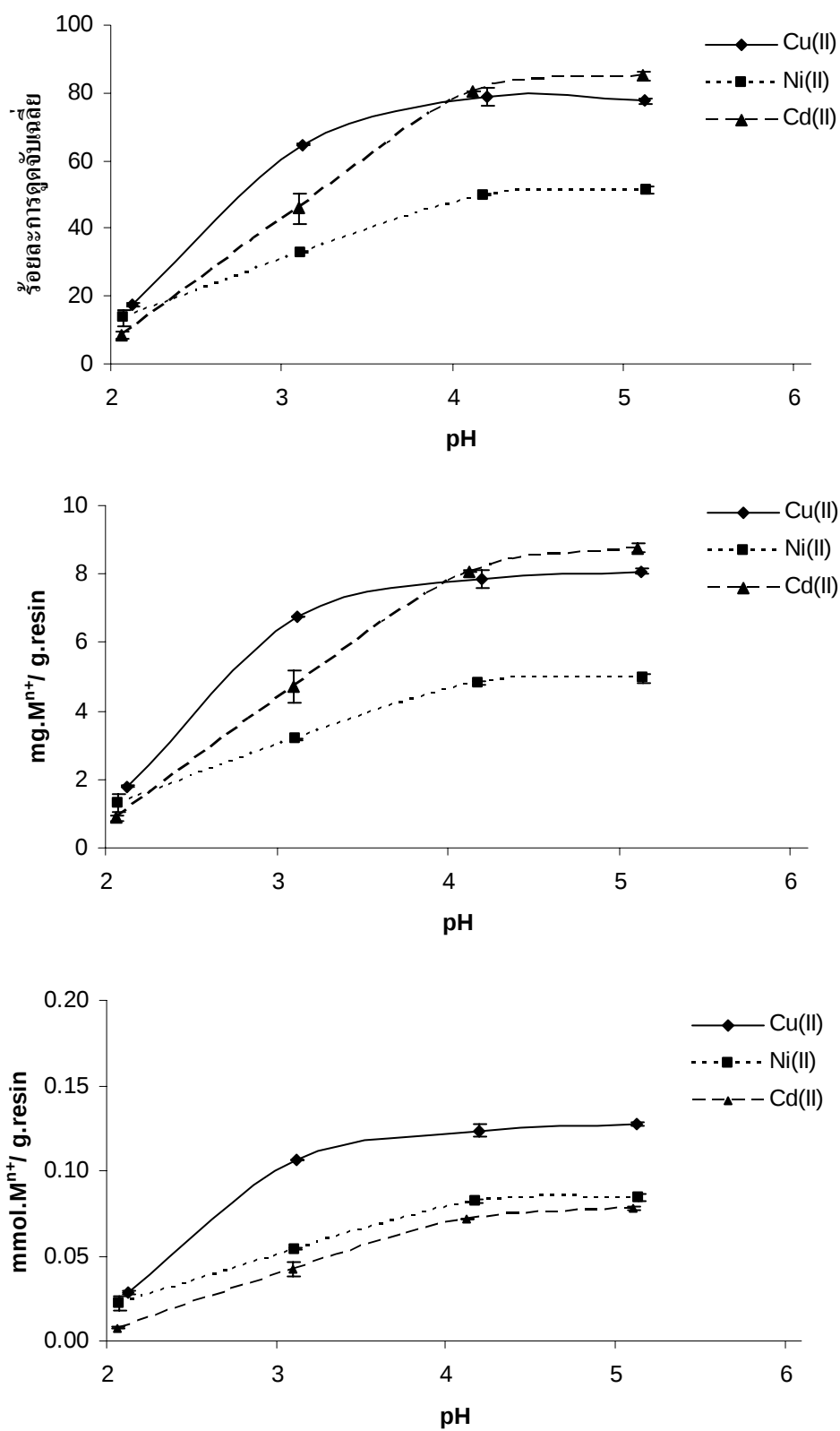
จากกราฟในรูปที่ 29 เป็นกราฟที่แสดงอิทธิพลของค่า pH ที่มีต่อประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิด พบว่าที่ค่า pH ต่ำ ๆ การดูดซับไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดจะมีประสิทธิภาพต่ำ เนื่องจากที่สถานะ pH ต่ำ (เนื่องจากการเติมกรดไฮโดรคลอริก) ภายในสารละลายจะมีโปรตอน (H^+) อยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งโปรตอนเหล่านี้จะสามารถไปแทนที่ Na^+ ในหมู่คาร์บอกซิเลตอิสระและกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) โดยหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิก ($-COOH$) จะมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักได้ต่ำกว่าหมู่คาร์บอกซิเลตอิสระ ($-COO^-Na^+$) ที่มี Na^+ แทนที่โปรตอน นอกจากนี้การดูดซับโลหะหนักโดยเรซินที่สถานะ pH ต่ำ ๆ ความเข้มข้น H^+ สูง ๆ นั้น เหมือนกับเป็นการดูดซับในสถานะที่ทำการฟื้นฟูสภาพเรซิน (regenerate) ไอออนโลหะหนักที่ดูดซับไว้แล้วโดยเรซิน ($-COO^-M^+$) ก็จะถูกปลดปล่อยออกมาเพราะโปรตอนจะเข้าไปแทนที่และกลายเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก ($-COOH$) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของโลหะได้ต่ำ ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของเรซินในสถานะที่เป็นกรดหรือสถานะที่มีค่า pH ต่ำ ๆ จึงมีค่าน้อย และปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักต่อ 1 กรัมของเรซินก็จะมีค่าต่ำ

ในกรณีการทดสอบการดูดซับในสถานะที่เป็นเบสหรือสถานะที่มีค่า pH สูง ๆ ไอออนของโลหะหนักจะเกิดการตกตะกอนในรูปของแข็งไฮดรอกไซด์และไม่ถูกดูดซับโดยเรซิน ซึ่งจะทำให้ค่าประสิทธิภาพการดูดซับที่ได้จากการทดลองคลาดเคลื่อนไป โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเกินกว่าความเป็นจริง เพราะการตกตะกอนจะทำให้ความเข้มข้นไอออนโลหะในสารละลายลดลง ซึ่งอาจดูเหมือนว่าไอออนโลหะหนักสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับเรซินได้มากขึ้น ดังนั้นในการทดลองจึงใช้สถานะในการดูดซับไอออนที่เป็นกรดไม่มากถึงสถานะที่เป็นกลางเท่านั้น

จากการทดลองพบว่าเรซินสามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้ดีจากสารละลายในน้ำที่มีค่า pH ประมาณ 4 โดยประสิทธิภาพการดูดซับไอออนของทองแดง (Cu^{2+}) ไอออนของนิกเกิล (Ni^{2+}) และไอออนของแคดเมียม (Cd^{2+}) มีค่า 78.9%, 50.0% และ 80.4% ตามลำดับ

ตารางที่ 9. ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะความเข้มข้น 100 ppm. ปริมาตร 10 mL., เวลาดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	pH เริ่มต้น	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ประสิทธิภาพ		
				ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	mg.M ⁿ⁺ / g.resin	mmol.M ⁿ⁺ / g.resin
Cu(NO ₃) ₂	2	104.3	86.3 (±0.5)	17.3 (±0.5)	1.80 (±0.05)	0.028 (±0.001)
	3	104.3	36.8 (±0.3)	64.8 (±0.2)	6.75 (±0.03)	0.106 (±0.0004)
	4	99.5	21.0 (±2.5)	78.9 (±2.5)	7.85 (±0.25)	0.124 (±0.004)
	5	104.3	23.4 (±0.7)	77.5 (±0.6)	8.08 (±0.07)	0.127 (±0.001)
Ni(NO ₃) ₂	2	96.5	83.4 (±2.4)	13.6 (±2.5)	1.31 (±0.24)	0.022 (±0.004)
	3	96.5	64.8 (±0.3)	32.9 (±0.3)	3.17 (±0.03)	0.054 (±0.0005)
	4	96.3	48.2 (±0.4)	50.0 (±0.4)	4.81 (±0.04)	0.082 (±0.001)
	5	96.5	46.9 (±1.2)	51.4 (±1.2)	4.96 (±0.11)	0.084 (±0.002)
CdCl ₂	2	103.0	94.3 (±0.9)	8.4 (±0.9)	0.86 (±0.09)	0.008 (±0.0008)
	3	103.0	55.8 (±4.8)	45.8 (±4.7)	4.72 (±0.48)	0.042 (±0.004)
	4	100.5	19.7 (±0.2)	80.4 (±0.2)	8.08 (±0.02)	0.072 (±0.0002)
	5	103.0	15.5 (±1.3)	85.0 (±1.2)	8.75 (±0.13)	0.078 (±0.001)



รูปที่ 29. ผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะความเข้มข้น 100 ppm. ปริมาตร 10 mL., เวลาดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

5. การศึกษาหาปริมาณความจุไอออนของ ion exchange resin

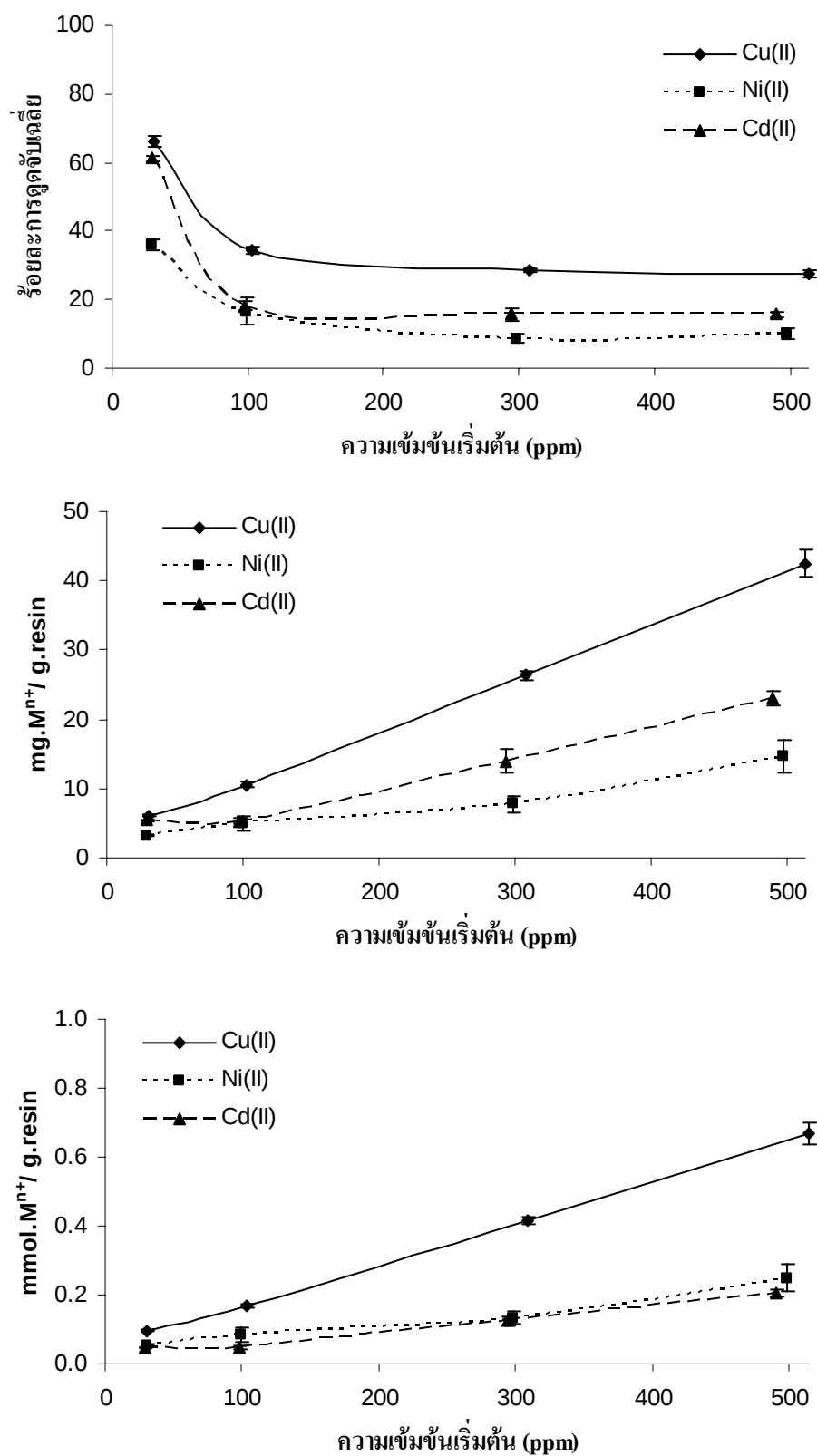
ความจุไอออนของเรซิน เป็นค่าที่บอกถึงปริมาณไอออนที่มากที่สุดที่เรซินจะสามารถดูดจับเอาไว้ได้ต่อ 1 หน่วยน้ำหนักของเรซิน ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงความสามารถของเรซินในการดูดจับโลหะหนัก การทดสอบหาความจุสูงสุดของเรซินนั้นสามารถทำได้โดยการนำเรซินมาทดสอบการดูดจับในสารละลายที่มีไอออนของโลหะหนักในปริมาณที่มากเกินไป คือ สารละลายโลหะจะต้องมีความเข้มข้นสูงและปริมาตรสารละลายโลหะที่ใช้ทดสอบแต่ละครั้งจะต้องมาก เพื่อให้เรซินได้มีโอกาสในการดูดจับไอออนของโลหะหนักได้จนอิ่มตัวเต็มที่ โดยเรซินที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ SG-G3.0-PC

จากรูปที่ 30 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักมากขึ้น ค่าร้อยละการดูดจับโลหะของเรซินจะมีค่าลดลงและคงที่ในที่สุดซึ่งเหมือนว่าเรซินเกิดการอิ่มตัวแล้ว แต่ข้อมูลจากกราฟดังกล่าวไม่สามารถใช้สรุปได้ว่าเรซินอิ่มตัวเต็มที่และไม่สามารถที่จะดูดจับไอออนได้อีก เพราะกราฟดังกล่าวแสดงการดูดจับในหน่วยร้อยละ (เช่น ที่ตำแหน่ง 20 % เหมือนกัน แต่ค่า 20 % ของ 100, 300 กับ 500 ppm. จะมีค่าไม่เท่ากัน) ดังนั้นจึงควรพิจารณาในหน่วยอื่น ซึ่งถ้าหากเรซินได้ดูดจับโลหะจนอิ่มตัวเต็มที่แล้วควรจะพบว่าน้ำหนักของไอออนโลหะหนักที่ดูดจับได้ต่อ 1 กรัมของเรซินจะต้องคงที่ และไม่เพิ่มขึ้นอีกถึงแม้ว่าจะเพิ่มความเข้มข้นสารละลายไอออนของโลหะหนักให้มากขึ้นอีกก็ตาม

จากการทดลองจะพบว่า แม้จะเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักขึ้นเท่าใด ปริมาณการดูดจับโลหะหนักต่อ 1 กรัมของเรซินจะเพิ่มขึ้นตาม แสดงว่าเรซินยังไม่อิ่มตัวเต็มที่ และสามารถที่จะดูดจับไอออนได้อีก ปริมาณไอออนที่ถูกดูดจับจึงยังคงเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่ถ้าพิจารณาถึงร้อยละการดูดจับไอออนโลหะหนักจะมีค่าลดลงจนต่ำมากและคงที่ แสดงว่ายังคงมีไอออนโลหะหนักเหลืออยู่ในสารละลายอีกเป็นจำนวนมากแต่กลับไม่ถูกดูดจับทั้งที่เรซินยังไม่อิ่มตัว ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากปริมาณหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของเรซินที่ยังไม่ได้ดูดจับไอออนโลหะหนักมีเหลือน้อยลง เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโลหะหนักให้มากขึ้นอีกจึงทำให้โอกาสในการเจอกันระหว่างหมู่ฟังก์ชันที่ผิวของเรซินกับไอออนในสารละลายมากขึ้นจึงสามารถดูดจับโลหะหนักได้มากขึ้นอีก

ตารางที่ 10. ผลการศึกษาหาความจุไอออนของเรซิน โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g. สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 30-500 ppm. ปริมาตร 30 mL. pH เริ่มต้น= 4, เวลาดูดซับ 60 นาที, ที่ 25 °C

สารละลายโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ประสิทธิภาพ		
				ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	mg.M ⁿ⁺ / g.resin	mmol.M ⁿ⁺ / g.resin
Cu(NO ₃) ₂	30	30.8	10.4 (±0.6)	66.1 (±1.8)	6.11 (±0.17)	0.096 (±0.003)
	100	102.8	67.5 (±1.2)	34.3 (±1.1)	10.58 (±0.35)	0.166 (±0.006)
	300	308.3	220.2 (±2.2)	28.6 (±0.7)	26.43 (±0.65)	0.416 (±0.010)
	500	513.8	372.2 (±6.3)	27.6 (±1.2)	42.48 (±1.90)	0.668 (±0.030)
Ni(NO ₃) ₂	30	29.9	19.1 (±0.4)	36.0 (±1.5)	3.22 (±0.13)	0.055 (±0.002)
	100	99.5	82.9 (±3.7)	16.6 (±3.7)	4.97 (±1.12)	0.085 (±0.019)
	300	298.5	272.6 (±3.8)	8.69 (±1.3)	7.78 (±1.13)	0.133 (±0.019)
	500	497.5	448.7 (±7.9)	9.80 (±1.6)	14.63 (±2.37)	0.249 (±0.040)
CdCl ₂	30	29.4	11.4 (±0.2)	61.3 (±0.8)	5.40 (±0.07)	0.048 (±0.0006)
	100	98.0	80.2 (±1.2)	18.2 (±1.2)	5.35 (±0.35)	0.048 (±0.003)
	300	294.0	247.4 (±5.4)	15.8 (±1.9)	13.97 (±1.63)	0.124 (±0.015)
	500	490.0	413.3 (±3.5)	15.6 (±0.7)	23.00 (±1.05)	0.205 (±0.009)



รูปที่ 30. ผลการศึกษาความจุไออนของเรซินโดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 30-500 ppm., ปริมาตร 30 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาดูดซับ 60 นาที, ที่ 25 °C

จากผลการทดสอบการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย จะพบได้เสมอว่าปริมาณการดูดซับโลหะหนักในหน่วย $\text{mmol.M}^{n+}/\text{g.resin}$ ของไอออน $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Cd}^{2+}$ ทั้งนี้เนื่องจากผลของความเสถียรในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับหมู่แลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ดังนี้

1.ตามหลัก Irving–Williams stability order ความเสถียรในการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของไอออน $\text{Mn}^{2+} < \text{Fe}^{2+} < \text{Co}^{2+} < \text{Ni}^{2+} < \text{Cu}^{2+} > \text{Zn}^{2+}$ ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณการดูดซับโลหะหนักของไอออน $\text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$

2.ค่า ionic radius ของ $\text{Cd}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Ni}^{2+}$ โดยมีค่า 0.95, 0.75 และ 0.69 pm ตามลำดับจึงทำให้ปริมาณการดูดซับโลหะหนักของไอออน Cd^{2+} น้อยที่สุด เพราะ ionic radius มากทำให้ระยะห่างระหว่างอะตอมมาก และมีelectrostatic interaction น้อย ส่วนในกรณีของ Cu^{2+} , Ni^{2+} ให้พิจารณาตามข้อ 1

3.ประจุของไอออนทั้ง 3 ชนิดมีเท่ากัน คือ $2+$

4.พิจารณาตามหลัก Hard and soft acids bases (HSAB) พบว่า Cu^{2+} และ Ni^{2+} จัดเป็นกรดในกลุ่ม borderline สามารถเกิด complex กับ RNH_2 และ CH_3CO_2^- ซึ่งเป็นเบสในกลุ่ม hard ได้ดี และสามารถเกิด complex กับเป็นเบสในกลุ่ม soft ได้ดีเช่นกัน ส่วน Cd^{2+} อยู่ในกลุ่ม soft ควรจะเกิด complex กับเบสในกลุ่ม soft ดังนั้นปริมาณการดูดซับโลหะหนักของไอออน Cd^{2+} จึงน้อยที่สุดเนื่องจาก RNH_2 และ CH_3CO_2^- ซึ่งเป็นเบสในกลุ่ม hard

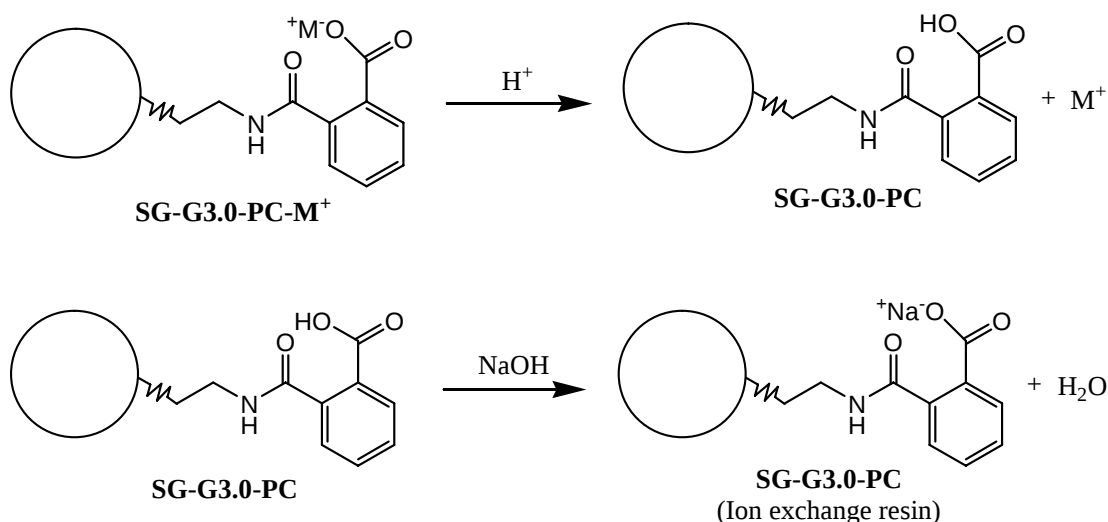
หากพิจารณาปริมาณการดูดซับโลหะหนักในหน่วย $\text{mg.M}^{n+}/\text{g.resin}$ จะพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับ Cd^{2+} จะมีค่าสูงขึ้นกว่าโลหะชนิดอื่นเนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า

ตารางที่ 11 . Hard and soft acids bases

Hard (class (a))	Borderline	Soft (class (b))
Acids		
H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+ , Be^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , BF_3 , BCl_3 , B(OR)_3 , Al^{3+} , AlCl_3 , $\text{Al(CH}_3)_3$, Sc^{3+} , Ti^{4+} , VO^{2+} , Cr^{3+} , Fe^{3+} , Co^{3+}	Fe^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Rh^{3+} , $\text{B(CH}_3)_3$, R_3C^+ , Pb^{2+} , Sn^{2+}	Cu^+ , Ag^+ , Au^+ , Cd^{2+} , Hg^{2+} , Pt^{2+} , Pt^{4+} , MoO_4^{2-} , Pd^{2+}
Bases		
NH_3 , RNH_2 , N_2H_4 , H_2O , OH^- , O^{2-} , ROH , RO^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , ClO_4^- , F^-	$\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$, N_3^- , N_2 , Br^- , Cl^-	H^- , R^- , C_2H_4 , C_6H_6 , CN^- , CO , SCN^- , R_3P , R_2S , RSH , RS^- , I^-

ตอนที่ 4 การล้างไอออนของโลหะหนักออกจาก ion exchange resin และการนำ ion exchange resin ที่ผ่านการ regenerate แล้วกลับมาใช้ใหม่

การฟื้นฟูสภาพ (regenerate) เป็นกระบวนการนำเรซินที่สังเคราะห์ขึ้นและผ่านการใช้งานแล้วมาให้อยู่ในสภาพที่พร้อมใช้งานอีกครั้ง การฟื้นฟูสภาพจึงเป็นกระบวนการสำคัญที่จะทำให้สามารถนำเรซินไปใช้งานได้หลายครั้ง ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินในการใช้งานแต่ละครั้ง โดยเรซินที่เลือกใช้ในการทดลองนี้ คือ SG-G3.0-PC

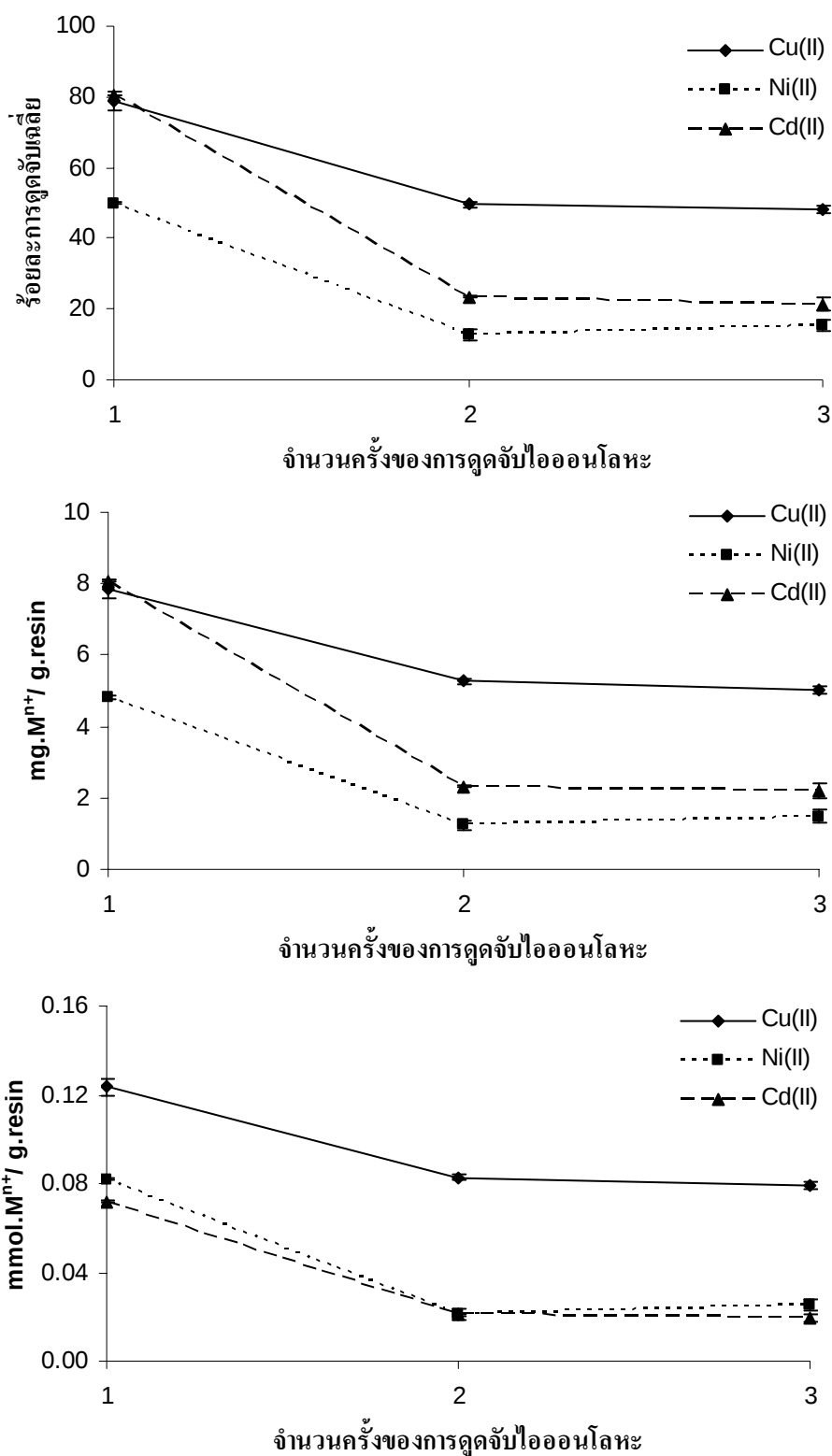


รูปที่ 31. ขั้นตอนการฟื้นฟูสภาพของ SG-G3.0-PC ที่ผ่านการใช้งานมาแล้ว

วิธีการฟื้นฟูสภาพนั้น โดยทั่วไปสามารถทำได้โดยการนำเรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วมาทำการล้างไอออนของโลหะหนักออกโดยการนำเรซินมาทอในสารละลายกรด (H^+) เพื่อให้กรดเข้าแทนที่ไอออนของโลหะหนักที่ถูกยึดจับโดยหมู่ที่แลกเปลี่ยนไอออนของเรซิน ไอออนของโลหะหนักจึงหลุดออกจากเรซินและมาอยู่ในสารละลายแทน ขั้นตอนนี้จะทำให้หมู่แลกเปลี่ยนไอออนของเรซินจากเดิมที่เคยยึดจับไอออนของโลหะหนักไว้กลายเป็นหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) หลังจากนั้นจึงทอเรซินในสารละลายเบส (NaOH) เพื่อเปลี่ยนหมู่คาร์บอกซิลิก ($-\text{COOH}$) ให้กลายเป็นหมู่คาร์บอกซิเลต ($-\text{COONa}$) ซึ่งเป็นหมู่ที่ทำหน้าที่แลกเปลี่ยนไอออนเหมือนดังเดิม และเป็นหมู่ที่มีความว่องไวและมีประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนมากกว่าหมู่คาร์บอกซิลิก

ตารางที่ 12. ผลการศึกษาการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้เรซินหนัก 0.1 g., สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm. ปริมาตร 10 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	การใช้งานในครั้งที่	[M ⁺⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁺⁺] สุดท้าย (ppm)	ประสิทธิภาพ		
				ร้อยละการดูดซับเฉลี่ย	mg.M ⁺⁺ / g.resin	mmol.M ⁺⁺ / g.resin
Cu(NO ₃) ₂	1	99.5	21.0 (±2.5)	78.9 (±2.5)	7.85 (±0.25)	0.124 (±0.004)
	2	106.3	53.7 (±0.8)	49.5 (±0.8)	5.26 (±0.08)	0.083 (±0.001)
	3	104.3	53.9 (±1.1)	48.3 (±1.1)	5.04 (±0.11)	0.079 (±0.002)
Ni(NO ₃) ₂	1	96.3	48.2 (±0.4)	50.0 (±0.4)	4.81 (±0.04)	0.082 (±0.001)
	2	98.3	85.9 (±1.4)	12.6 (±1.4)	1.24 (±0.14)	0.021 (±0.002)
	3	96.5	81.6 (±1.6)	15.5 (±1.6)	1.49 (±0.16)	0.025 (±0.003)
CdCl ₂	1	100.5	19.7 (±0.2)	80.4 (±0.2)	8.08 (±0.02)	0.072 (±0.0001)
	2	99.3	76.1 (±0.2)	23.4 (±0.2)	2.32 (±0.02)	0.021 (±0.0001)
	3	103.0	81.0 (±2.0)	21.4 (±1.9)	2.20 (±0.20)	0.020 (±0.0018)



รูปที่ 32. ผลการศึกษาการนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ในการดูดซับไอออนโลหะจากสารละลาย โดยใช้เรซินหนัก 0.1 g., สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm., ปริมาตร 10 mL., pH เริ่มต้น=4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

จากกราฟในภาพที่ 32 เป็นกราฟที่แสดงร้อยละการดูดซับไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดของเรซินที่ถูกใช้งานเป็นครั้งแรกเปรียบเทียบกับเรซินที่ใช้งานมาแล้วและถูกนำมาฟื้นฟูสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ดูดซับโลหะหนักใหม่ พบว่าการใช้งานในครั้งแรกจะมีประสิทธิภาพสูงสุดและเมื่อนำเรซินที่ผ่านการใช้งานในครั้งแรกกลับมาใช้ใหม่อีกเป็นครั้งที่ 2 และ 3 จะทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนมีค่าลดลง ซึ่งสาเหตุอาจเป็นเพราะยังคงมีไอออนโลหะหนักบางส่วนที่ถูกดูดซับโดยเรซินหลงเหลืออยู่ ไม่ได้ถูกล้างออกไปจนหมดในระหว่างขั้นตอนการ regenerate ดังนั้นจึงทำให้ในการดูดซับไอออนของโลหะหนักในครั้งต่อไปเรซินมีหมู่ที่ใช้ในการแลกเปลี่ยนไอออนเหลืออยู่น้อยลงเมื่อเทียบกับการใช้งานในครั้งแรกจึงทำให้ประสิทธิภาพลดลง นอกจากนี้ยังพบว่าน้ำหนักของเรซินที่เหลือหลังจากทำการ regenerate ในแต่ละครั้งจะลดลงด้วย โดยน้ำหนักของเรซินจะเหลือประมาณ 70.2% ถึง 83.9% หลังจากการ regenerate ซึ่งควรจะทำการศึกษาเพื่อแก้ไขปัญหาทั้งหมดที่เกิดขึ้นต่อไป

จุดมุ่งหมายสำคัญในการศึกษาเรื่องการ regenerate หรือการฟื้นฟูสภาพก็คือ เพื่อให้สามารถนำ ion exchange resin กลับมาใช้งานใหม่ได้หลายครั้ง โดยที่ประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนของโลหะหนักแต่ละชนิดและน้ำหนักของเรซินนั้นจะไม่แตกต่างไปจากเดิมหรือครั้งก่อน ๆ มากนัก และยังเป็นทางเลือกต้นทุนได้อีกด้วยเพราะไม่ต้องซื้อเรซินใหม่หลายครั้งซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียหรือน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่มีโลหะหนักปะปนอยู่ได้ โดยหลังจากที่นำ ion exchange resin ไปใช้งานแล้วก็จะทำการล้างเอาไอออนของโลหะหนักนั้นออกโดยใช้กรดก่อนแล้วจึงล้างด้วยเบส จากนั้นจึงนำเรซินกลับมาใช้งานใหม่อีกครั้ง

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่จะทำต่อไป

สรุปผลการทดลอง

1. ขั้นตอนในการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer ลงบนผิว silica gel จะต้องเริ่มต้นจากการปรับปรุงผิวของ silica gel ซึ่งมีหมู่ silanol group (Si-OH) ให้เกิดเป็นหมู่อะมิโนที่มีความว่องไวขึ้นมาก่อน โดยใช้ 3-aminopropyltriethoxysilane เข้าทำปฏิกิริยากับหมู่ silanol group ที่บริเวณผิวของ silica ซึ่งหมู่อะมิโนที่เกิดขึ้นมาจะถูกทำปฏิกิริยา Michael addition ด้วย methyl acrylate และปฏิกิริยา amidation ด้วย ethylenediamine ในปริมาณที่มากเกินไป โดยทำปฏิกิริยาขั้นนี้สลับกันไปเรื่อย ๆ จนได้ PAMAM dendrimer ซึ่งตรึงอยู่บนผิว silica gel ที่มี generation ตามที่ต้องการ จากนั้นจึงทำการพิสูจน์เอกลักษณ์ต่อไป

2. จากการพิสูจน์เอกลักษณ์โดยเทคนิค FTIR, TGA และการไตเตรดพบว่า เราสามารถสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica gel ได้จริง แต่โครงสร้างของ PAMAM dendrimer ที่ได้ยังมีบางส่วนที่ไม่สมบูรณ์แบบตามอุดมคติ ซึ่งสังเกตได้จากปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวของ PAMAM dendrimer ในแต่ละ generation ที่เพิ่มขึ้นแต่ยังไม่มากเท่าที่ควร ซึ่งมีสาเหตุมาจาก steric hindrance หรือความเกะกะทางโครงสร้าง ทำให้การเติบโตและการแตกกิ่งก้านของ dendrimer จึงทำได้ยาก PAMAM dendrimer ที่เกิดขึ้นนั้นจะมีลักษณะเป็น highly branched polymer หรือ ‘dendrimer-like’ ซึ่งเป็น dendrimer ที่ยังไม่สมบูรณ์ตามทฤษฎี

3. การสังเคราะห์ ion exchange resin นั้นสามารถทำได้โดย นำ PAMAM dendrimer ที่เป็น full generation มาทำปฏิกิริยาเพื่อปรับปรุงผิวด้วยสารในกลุ่ม acid dichloride เช่น phthaloyl chloride เป็นต้น หรือนำ PAMAM dendrimer ที่เป็น half generation มาทำปฏิกิริยา Michael addition กับสารในกลุ่ม amino acid เช่น 6-aminocaproic acid เป็นต้น ซึ่งสามารถพิสูจน์เอกลักษณ์ได้โดยเทคนิค FTIR

4. จากการทดสอบการดูดซับไอออนของโลหะหนักจากสารละลายพบว่า เรซินที่สังเคราะห์ขึ้นสามารถดูดซับโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย SG-G3-PC ปริมาณ 0.1 g. สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนัก Cu^{2+} , Ni^{2+} และ Cd^{2+} ในสารละลายโลหะที่มีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm., ปริมาตร 10 mL. และ pH ของสารละลายโลหะก่อนทดลอง = 4, ใช้เวลาในการดูดซับนาน 60 นาที, ที่อุณหภูมิ 25 °C ได้ร้อยละ 78.9, 50.0 และ 80.4 ตามลำดับ

ข้อเสนอแนะสำหรับทำงานวิจัยต่อ

1. ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของเรซิน โดยใช้สารละลายไอออนของโลหะชนิดอื่น ๆ หรือทดสอบในสารละลายที่มีไอออนของโลหะหนักหลาย ๆ ชนิดผสมกัน ตลอดจนศึกษาการดูดซับไอออนโลหะหนักของเรซินในน้ำเสียจริง เนื่องจากในน้ำเสียนั้นอาจมีองค์ประกอบอื่น ๆ ที่อาจส่งผลให้เรซินมีประสิทธิภาพแตกต่างไปจากการดูดซับโลหะหนักในน้ำกลั่นบริสุทธิ์ ซึ่งจะช่วยให้ทราบข้อมูลในการใช้งานของเรซินกว้างขึ้น และสามารถนำข้อมูลที่ได้ไปประยุกต์ใช้งานจริงในอุตสาหกรรมได้เหมาะสมยิ่งขึ้น

2. ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียที่ใช้จริงในโรงงาน กับการกำจัดโลหะหนักที่ได้ทำการศึกษาวิจัย เพื่อให้ทราบถึงความแตกต่าง ข้อดี-ข้อเสีย ซึ่งจะช่วยให้ทราบข้อมูลเพื่อทำการศึกษาพัฒนาและปรับปรุงต่อไป

3. ในการสังเคราะห์ PAMAM dendrimer บนผิว silica gel นั้นต้องใช้สารเคมีในปริมาณที่มากเกินไปมาก ๆ ทำให้สิ้นเปลืองสารเคมีเป็นจำนวนมาก ต้นทุนในการดำเนินการสูง นอกจากนี้ยังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นจึงควรหาวิธีการลดปริมาณสารเคมีที่ใช้เตรียม dendrimer ลงหรือนำสารเคมีที่ใช้แล้วกลับมาใช้ในการสังเคราะห์ใหม่ เพื่อลดต้นทุนในกระบวนการผลิตจริง

4. ศึกษาการสังเคราะห์ dendrimer ด้วยวิธีการ convergent เพื่อให้ได้ dendrimer ที่มีความสมบูรณ์ตามทฤษฎีและอาจทำให้มีประสิทธิภาพการดูดซับโลหะมากยิ่งขึ้น โดยในงานวิจัยนี้พบว่า dendrimer ที่สังเคราะห์ด้วยวิธี divergent นั้นจะมีลักษณะเป็น highly branched polymer หรือ 'dendrimer-like' ซึ่งเป็น dendrimer ที่ยังไม่สมบูรณ์ตามทฤษฎี

5. ศึกษาวิธีการปรับปรุงเรซินให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักมากยิ่งขึ้น เช่น ปรับปรุงผิวของเรซินโดยใช้สารเคมีต่าง ๆ ในกลุ่มของ acid chloride หรือ amino acid ตลอดจนสารเคมีชนิดอื่น ๆ การใช้ dendrimer ชนิดอื่น ๆ หรือพอลิเมอร์แบบต่าง ๆ เพื่อให้ได้เรซินที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น การใช้ silica gel หรืออนุภาคอื่นที่มีขนาดเล็กลงเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวให้มากขึ้น โดยควรคำนึงถึงความเหมาะสมในเรื่องของต้นทุนการผลิตและประสิทธิภาพของเรซินที่สังเคราะห์ได้ด้วย ทั้งนี้เพื่อให้สามารถนำความรู้ที่ได้จากการศึกษาไปใช้ในภาคอุตสาหกรรมได้จริง นอกจากนี้ควรส่งเสริมและผลักดันงานวิจัยที่ประสบความสำเร็จให้มีการนำไปใช้จริง

6. ศึกษาวิธีการฟื้นฟูสภาพเรซิน เพื่อทำให้เรซินที่ผ่านการใช้งานแล้วยังคงมีประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะเหมือนกับการใช้งานครั้งแรก และสามารถนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้งโดยยังมีประสิทธิภาพคงเดิม

บรรณานุกรม

1. ศุภวรรณ เกตุคุ้ม. พิษภัยของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อม [online]. Accessed 2 May 2006.
Available from <http://www.siamglobe.com/rescenter/ecommerce.php?id=1211&rid=0011>
2. A. Rether and M. Schuster. "Selective separation and recovery of heavy metal ions using water-soluble N-benzoylthiourea modified PAMAM polymers." Reactive & Functional Polymers 57 (2003) : 13–21.
3. Mamadou S. Diallo, et al. "Poly(amidoamine) Dendrimers: A New Class of High Capacity Chelating Agents for Cu(II) Ions." Environmental Science & Technology 33 (1999) : 820-824.
4. Feng Gao, Bi-Feng Pan, Wei-Ming Zheng, Li-Mei Ao and Hong-Chen Gu. "Study of streptavidin coated onto PAMAM dendrimer modified magnetite nanoparticles." Journal of Magnetism and Magnetic Materials 293 (2005) : 48–54.
5. Bi-feng Pan, Feng Gao, Hong-chen Gu. "Dendrimer modified magnetite nanoparticles for protein immobilization." Journal of Colloid and Interface Science 284 (2005) : 1–6.
6. Brandon Yoza, Atsushi Arakaki and Tadashi Matsunaga. "DNA extraction using bacterial magnetic particles modified with hyperbranched polyamidoamine dendrimer" Journal of Biotechnology 101 (2003) : 219-228.
7. Norio Tsubokawa, Hajime Ichioka, Toshiya Satoh, Shinji Hayashi and Kazuhiro Fujiki. "Grafting of 'dendrimer-like' highly branched polymer onto ultrafine silica surface" Reactive & Functional Polymers 37 (1998) : 75-82.
8. Young-Min Chung and Hyun-Ku Rhee. "Silica-supported dendritic chiral auxiliaries for enantioselective addition of diethylzinc to benzaldehyde" C.R. Chimie 6 (2003) : 695–705.
9. X.Z. Wu, P. Liu, Q.S. Pu, Q.Y. Sun and Z.X. Su. "Preparation of dendrimer-like polyamidoamine immobilized silica gel and its application to online preconcentration and separation palladium prior to FAAS determination" Talanta 62 (2004) : 918–923.

10. กษมา สติติ และ พชรินทร์ ขลิบเงิน. New Polymer : Dendrimer คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2542, หน้า 1-11.
11. Christine Dufès, Ijeoma F. Uchegbu, and Andreas G. Schätzlein. “Dendrimers in gene delivery” Advanced Drug Delivery Reviews 57 (2005) : 2177– 2202.
12. Roseita Esfand and Donald A. Tomalia. “Poly(amidoamine) (PAMAM) dendrimers: from biomimicry to drug delivery and biomedical applications” Drug Discovery Today 6 (2001) : 427-436.
13. Barbara Klajnert and Maria Bryszewska. “Dendrimers: properties and applications” Acta Biochimica Polonica 48 (2001) : 199-208.
14. George Odian. Principles of polymerization. New Jersey : Wiley-Interscience, 2004, 177-180.
15. Tomalia, D.A., Baker, H., Dewald, J.R., Hall, M., Kallos, G., Martin, S., Roeck, J., Ryder, J. and Smith, P. “A new class of polymers: Starburst- dendritic macromolecules” Polymer Journal 17, (1985) : 117-132.
16. Bharathi Devarakonda, Ronald A. Hill and Melgardt M. de Villiers. “The effect of PAMAM dendrimer generation size and surface functional group on the aqueous solubility of nifedipine” International Journal of Pharmaceutics 284 (2004) : 133–140.
17. Antony D'Emanuele, David Attwood and Ragheb Abu-Rmaileh. “Dendrimers” Encyclopedia of Pharmaceutical Technology. March 2003.
18. Donald A. Tomalia, Srinivas Uppuluri, Douglas R. Swanson, and Jing Li. “Dendrimers as reactive modules for the synthesis of new structure-controlled, higher-complexity megamers” Pure and Applied Chemistry 72 (2000) : 2343-2358.
19. Elizabeth R. Gillies and Jean M. J. Fréchet. “Dendrimers and dendritic polymers in drug delivery” Drug Discovery Today 10 (2005) : 35-43.
20. คุณากร โกศลทัย, รุ่งกาญจน์ ศิลปธรรม และอาษาไนย บัวศรี. การกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนบวกที่สังเคราะห์จากไฮดรอกซีเอทิลเซลลูโลส, ปริญญานิพนธ์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2544.
21. เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์. การบำบัดน้ำเสีย, พิมพ์ครั้งที่ 1, สำนักพิมพ์มิตรนราการพิมพ์, กรุงเทพฯ, 2539

22. พอตา ประสานนาม และอำนาจ สิทธิตระกูล. การกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สารแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตจาก HYDROXYETHYL CELLULOSE, ปรินูญานิพนธ์ ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยศิลปากร, 2547.
23. ศูนย์ข้อมูลพิษวิทยา. ความเป็นพิษของทองแดง [online]. Accessed 15 January 2008. Available from http://webdb.dmsc.moph.go.th/ifc_toxic/a_tx_1_001c.asp?info_id=296
24. สุภาวดี ศิริวัฒนานนท์ และสุจรรยา หมวดารักษ์. สารพิษจากโลหะหนัก [online]. Accessed 15 January 2008. Available from http://www.firstbuddha.com/heavy_metal.pdf
25. อรพรรณ เมธาติลกกุล. โรคพิษแคดเมียม [online]. Accessed 15 January 2008. Available from http://www.wept.org/html/old/log_cadmium.htm
26. เอกฉนัย กอกิมพงษ์. ICP เครื่องมือวิเคราะห์ธาตุโดยพลาสมา [online]. Accessed 29 March 2008. Available from http://www.thaiscience.com/lab_vol/p36/LC-ICP-MS.asp

ภาคผนวก ก

เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

1. เทคนิคการวิเคราะห์แบบ Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometer (ICP-AES หรือ ICP) [26]

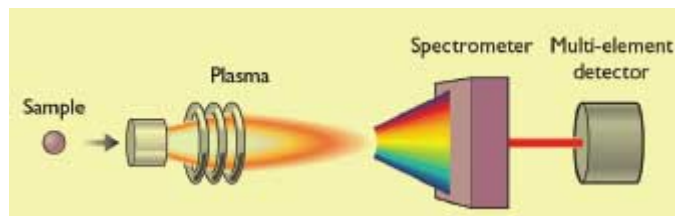
ICP เป็นเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุ โดยการใช้พลาสมาเผาตัวอย่างให้แตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออน ซึ่งจะปล่อยแสงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวออกมา แล้ววัดความเข้มของแสงและคำนวณเป็นความเข้มข้นของปริมาณธาตุในสารตัวอย่าง ICP นิยมใช้ในการวิเคราะห์ธาตุในสิ่งแวดล้อมและวิเคราะห์สารพิษหรือธาตุอาหารในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร

ICP-AES มักจะเรียกเทคนิคกันอย่างสั้น ๆ ว่า ICP โดยเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายธาตุพร้อมกัน (multi-element) โดยใช้พลาสมาที่มีอุณหภูมิสูงถึง 10,000 องศาเซลเซียส เผาตัวอย่างให้แตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออน ซึ่งจะปล่อยแสงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะตัวออกมา แล้ววัดความเข้มแสงและคำนวณเป็นความเข้มข้นของธาตุในตัวอย่าง เทคนิคนี้สามารถวัดได้ในระดับ ppb และวิเคราะห์ธาตุประเภท refractory element ได้ทุกตัว

ICP มี 2 แบบคือ แบบ radial และ แบบ axial โดยแบบ radial จะมีแหล่งกำเนิดพลาสมาอยู่ทางด้านข้างปล่อยผ่านช่องแคบ ที่อยู่ตรงกลางของพลาสมา ส่วนแบบ axial จะวางช่องนี้ในแนวนอน ซึ่งจะทำให้เพิ่ม pathlength และลดสัญญาณรบกวนได้ ผลก็คือ จะได้ detection limit ต่ำกว่าแบบ radial ถึง 5-10 เท่า ปัจจุบันมี ICP ชนิด simultaneous ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุได้พร้อมกันถึง 70 ธาตุ (ในทางทฤษฎี) ได้ในตัวอย่างเดียวกัน โดยใช้เวลาเพียงไม่ถึง 1 นาที และไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับค่าความแม่นยำ หรือ detection limit ในขณะที่ ICP แบบ Sequential จะสามารถวิเคราะห์ตัวอย่างได้ 5 ธาตุต่อนาที

หลักการของ ICP-AES

รูปที่ 37 แสดงแผนผังของ ICP-AES โดยในรูปได้แสดงถึงแหล่งกำเนิดพลาสมาที่ใช้เพื่อทำให้ธาตุชนิดต่าง ๆ ปล่อยแสงสเปกตรัมออกมา ซึ่งจะมีสเปกโตรมิเตอร์ ทำการแยกแสงเหล่านี้ที่ความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุเหล่านั้น



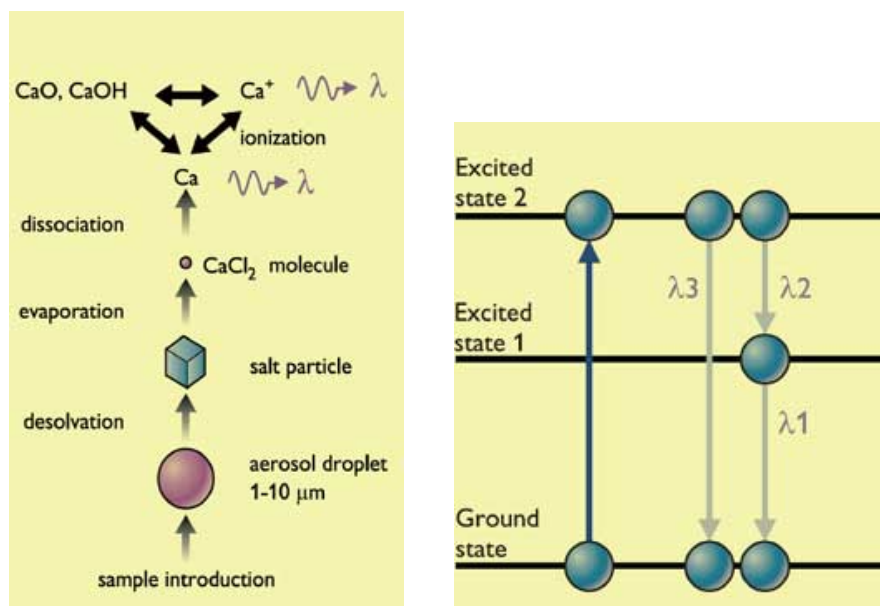
รูปที่ 33. แผนผังของ ICP-AES

การเตรียมตัวอย่าง

ICP-AES สามารถตรวจสอบได้เพียงตัวอย่างที่เป็นของเหลวเท่านั้น ดังนั้นหากตัวอย่างเป็นของแข็งจำเป็นต้องนำไปละลายก่อน จากนั้นเมื่อนำตัวอย่างเข้าสู่การวิเคราะห์โดยเครื่อง ICP ตัวอย่างซึ่งเป็นสารละลายจะถูกเปลี่ยนสภาพไปเป็นละอองของเหลว (aerosol) โดย nebuliser ซึ่งละอองขนาดใหญ่จะถูกแยกออกจากละอองขนาดเล็กใน spray-chamber โดยที่ละอองขนาดเล็ก (ประมาณ 1-10 ไมครอน) จะถูกเคลื่อนย้ายโดยก๊าซอาร์กอนและไหลเวียนเข้าสู่ใจกลางของ ICP-AES (เป็นอาร์กอนพลาสมา) ส่วนละอองขนาดใหญ่กว่า 90% จะถูกปั๊มออกไปเป็นของเสีย

พลาสมา

การจะสร้างให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานอะตอมออกมาจากราตุแต่ละชนิดนั้น จำเป็นจะต้องใช้อุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิของเปลวไฟโดยปกติทั่วไป โดยอุณหภูมิที่เกิดการปลดปล่อยอะตอมที่สูงที่สุดอยู่ในช่วงประมาณ 7,000-10,000 เคลวิน โดยวิธีการที่จะทำให้สามารถกำเนิดอุณหภูมิได้สูงขนาดนี้ทำได้โดยการให้กำเนิดพลาสมาของก๊าซเฉื่อย ซึ่งพลาสมาก็คือก๊าซที่มีความเข้มข้นของอิเล็กตรอนอิสระ และมีไอออนที่มีประจุบวก และถือเป็นตัวกลางที่มีประสิทธิภาพมากสำหรับการระเหยกลายเป็นไอและการแตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออนของละอองของเหลว และเมื่อละอองของเหลวเข้าไปสู่พื้นที่ร้อนของพลาสมาพวกมันจะถูกปกคลุมด้วยอนุภาคเกลือโดยกระบวนการ desolvation ซึ่งอนุภาคเกลือเหล่านี้จะถูกแยกออกเป็นโมเลกุลเดี่ยว ๆ ซึ่งจะเกิดภายหลังจากการแยกเป็นอะตอมหรือไอออนแล้ว ราชูส่วนใหญ่จะถูกไอออไนซ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (กว่า 90%) โดยแทบจะไม่มีโมเลกุลที่อยู่ในสถานะพื้นปรากฏในพลาสมาเลย



รูปที่ 34. การกำเนิดพลาสมาใน ICP-AES รูปที่ 35. การปล่อยคลื่นสเปกตรัมออกจากอิเล็กตรอน

ในพลาสมา จะมีพลังงานที่ถูกถ่ายเทเข้าสู่อะตอมและไอออนจำนวนมาก ซึ่งเป็นการช่วยให้เกิดการกระตุ้นอิเล็กตรอนให้สามารถเข้าสู่ช่วงระดับพลังงานสูงได้ และเมื่ออะตอมและไอออนที่ถูกกระตุ้นเหล่านี้กลับเข้าสู่สถานะพื้น (ground state) หรือกลับเข้าสู่สถานะพลังงานกระตุ้นระดับต่ำกว่า ก็จะปลดปล่อยรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงสเปกตรัมของรังสีเหนือม่วงดังรูปที่ 39 ธาตุที่ถูกกระตุ้นแต่ละชนิดจะปล่อยสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นเฉพาะของแต่ละธาตุออกมา ความเข้มของการแผ่รังสีจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของธาตุ ทำให้สามารถวัดความเข้มข้นของธาตุนั้นได้ ปัจจุบันมีธาตุมาตรฐานที่ใช้กับ ICP-AES ซึ่งช่วยให้สามารถวิเคราะห์ธาตุในปริมาณมากได้ และช่วยให้การวิเคราะห์มีความแม่นยำมากขึ้น

สเปกโตรมิเตอร์และตัวตรวจวัด

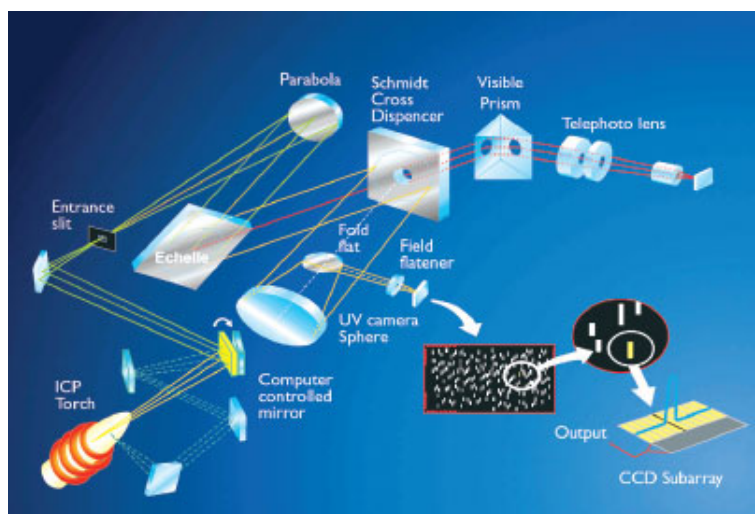
สเปกโตรมิเตอร์ เป็นเครื่องมือที่มีองค์ประกอบหลายอย่างดังรูปที่ 4 โดยจะประกอบไปด้วยส่วนกระจกหรือปริซึมและ ตัวตรวจวัด โดยกระจกหรือปริซึมจะใช้เพื่อแยกสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่นที่สนใจออกมา และเพราะทิศทางการแผ่รังสีของอะตอมนั้นจะเป็นเส้นที่แคบมาก จึงจำเป็นต้องมีตัวตรวจวัด (detector) ที่มีความละเอียดสูงเพื่อให้สามารถตรวจวัดได้อย่างแม่นยำ นอกจากนี้ ยังต้องทำการตรวจวัดหลาย ๆ คลื่น เพื่อให้สามารถวัดปริมาณธาตุทุกชนิดที่สนใจในเวลาเดียวกันได้ โดยตัวตรวจวัดที่นิยมใช้ในเครื่อง ICP-AES ในปัจจุบันคือตัวตรวจวัดชนิด CCD เพราะมีคุณสมบัติที่สามารถทำได้ทั้ง 2 อย่าง (ทั้งมีความละเอียดสูงและตรวจวัดได้พร้อมกัน)

การปลดปล่อยสเปกตรัมการปลดปล่อยสเปกตรัม

สามารถนำมาเขียนกราฟของความเข้มของการแผ่รังสี (แกน y) กับ ความยาวคลื่น (แกน x) ได้ดังรูปที่ 5 โดยจะสังเกตได้ว่า แม้สัญญาณจากพลาสมาไอออนที่ถูกสร้างขึ้นจะมีมากกว่า แต่ก็ยังคงมีอะตอมอิสระปรากฏอยู่บ้าง ซึ่งทั้งคู่จะถูกกระตุ้นและปล่อยรังสีออกมา และเพราะว่าการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างกันมากมายเกิดขึ้นระหว่างสถานะกระตุ้นทั้งหลาย เช่น โซเดียมมี สถานะกระตุ้น 6 ชั้นซึ่งจะสามารถให้กำเนิดคลื่นสเปกตรัมได้ถึง 15 ช่วงคลื่น จึงทำให้ยากในการจะตรวจวัดสเปกตรัมที่ถูกปล่อยออกมาว่าเป็นของธาตุชนิดใดและสเปกตรัมที่ถูกปล่อยออกมานี้ ยังอาจมีความยาวคลื่นซ้อนทับกับสเปกตรัมที่ปล่อยออกมาจากธาตุอื่นได้ แต่สำหรับในธรรมชาติแล้ว สเปกตรัมที่ถูกปล่อยออกมาของธาตุแต่ละชนิดจะมีลักษณะค่อนข้างคงที่ ดังนั้นการซ้อนทับกันของสเปกตรัมที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ จากธาตุที่แตกต่างกันจึงสามารถคาดเดาได้และใช้เก็บเป็นข้อมูลในการวิเคราะห์ผลได้

การเชื่อมต่อ ICP กับ MS

ICP-MS นิยมใช้ในการวิเคราะห์แบบหลายธาตุ (multi-element) โดยใช้พลาสมาเผาตัวอย่างให้แตกตัวเป็นอะตอมหรือไอออนเช่นเดียวกับ ICP แต่แตกต่างกันที่ตัวตรวจวัดไม่ใช่สเปกโตรมิเตอร์จึงไม่ได้ตรวจวัดด้วยปริมาณแสงหรือสเปกตรัม แต่จะตรวจวัดด้วยปริมาณไอออน โดยเมื่อเกิดไอออนของธาตุที่นำมาวิเคราะห์แล้วจะนำกลุ่มของไอออนเหล่านั้นผ่านออกมาจากช่องตรงกลางของพลาสมาแล้วเข้าไปยัง mass spectrometer จากนั้นจึงแยกไอออนออกเป็นส่วน ๆ โดยอาศัยความแตกต่างของสัดส่วน มวลต่อประจุ ของไอออนแต่ละชนิด โดยใช้ quadrupole หรือ magnetic sector analyzer โดยไอออนที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะมีค่า background ต่ำมาก จึงมี detection limit ที่ดีมากกว่าทุก ๆ ธาตุ ซึ่งโดยปกติแล้วจะสามารถวัดได้ถึงระดับ ppt ภายใต้การควบคุมสภาพแวดล้อมที่ดี



รูปที่ 36. แผนผังภายในของสเปกโตรมิเตอร์ใน ICP-AES

ข้อดีและข้อจำกัดของ ICP-AES

ข้อดีของ ICP-AES

1. ตรวจวัดธาตุได้มากถึง 70 ชนิด (ตามทฤษฎี) ได้ภายในการวิเคราะห์เพียงครั้งเดียว
2. เครื่องมือทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ทำให้สามารถปรับปรุงความแม่นยำ ความถูกต้อง และทำงานได้มากในเวลาอันรวดเร็ว
3. ให้ผลผลิตสูงและใช้ค่าใช้จ่ายในการวิเคราะห์ที่คุ้มค่างกับผลที่ได้รับ
4. สามารถส่งข้อมูลเข้าสู่ระบบ LIMS ได้ทันที โดยที่ไม่ต้องกังวลถึงความผิดพลาดระหว่างการใส่ข้อมูลใหม่ด้วยตัวเอง (manual)
5. ICP มีช่วงการทำงานที่กว้าง ทำให้สามารถวิเคราะห์ธาตุได้หลายชนิด

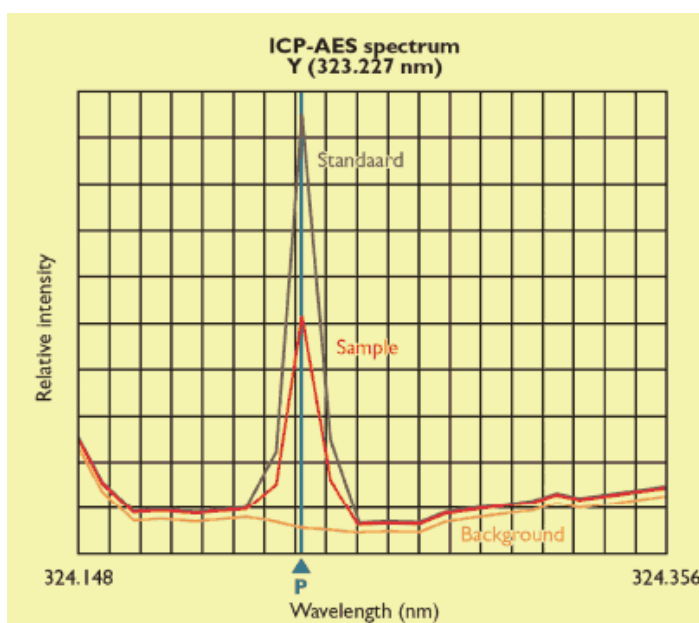
ข้อจำกัดของ ICP-AES

1. เครื่องมือมีความซับซ้อนทำให้ต้องการผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมเครื่องมือ
2. ช่วงความยาวคลื่นของสเปกตรัมแต่ละธาตุมีความใกล้เคียงกันมากและมีความซับซ้อน จึงอาจเกิดสัญญาณรบกวนในการตรวจวัดได้
3. เมื่อเปรียบเทียบกับเครื่อง AA แล้วตัวอย่างที่จะใช้กับ ICP จะต้องผ่านการย่อยและทำให้เป็นสารละลายก่อนจึงจะนำมาวิเคราะห์ได้
4. ต้องควบคุมอุณหภูมิและความชื้นอย่างเข้มงวดเพื่อให้การทำงานสามารถทำได้โดยไม่ผิดพลาด

เทคโนโลยีของ ICP ในปัจจุบัน

iCAP ICP-MS

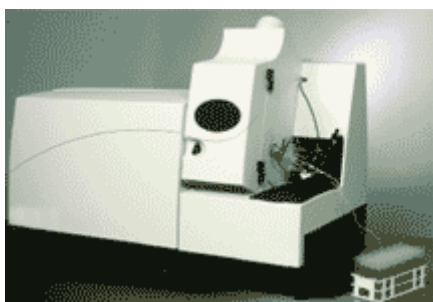
เทคโนโลยีนี้เป็นเทคโนโลยีของ Thermo Electron Cooperation โดย iCAP ICP-MS เป็นเครื่อง ICP ที่มีการขึ้นรูปโครงสร้างหลักด้วยอลูมิเนียมหล่อและออกแบบตามหลักการ Ergonomic ทำให้เครื่อง ICP ซึ่งแต่เดิมจะมีลักษณะเป็นกล่องเหลี่ยมกลายเป็นเครื่องที่มีลักษณะโค้งมน โดยมีความสูงที่สามารถเปิดออกได้กว้างถึง 270 องศา และมีพื้นที่ภายในค่อนข้างกว้างจึงทำให้สามารถติดตั้งอุปกรณ์เสริมต่าง ๆ ได้ง่ายขึ้น และยังออกแบบให้เป็นแบบ “plug and play” โดยมีคัปลาสมาเป็นชนิดที่ถอดออกเป็นชิ้น ๆ ได้ ทำให้การเชื่อมต่อบริเวณก๊าซ และการปรับแนวเส้นตรงของระบบทางเดินแสงได้อย่างอัตโนมัติ เพียงแค่ทำการใส่คัปดังกล่าวนี้เข้าไปในช่องสำหรับบรรจุเท่านั้น ส่วนอุปกรณ์ที่ช่วยให้เกิดพลาสมาเป็นแบบ Solid State, Free Running มีความถี่ที่ 27.12 เมกะเฮิร์ต ซึ่งจะส่งผลให้มีระดับของการกระตุ้นที่สูงกว่า มีการรบกวนที่น้อยลง มีสภาพไวสูง และมี detection limit ที่ดีกว่า นอกจากนี้ตัวตรวจวัด (Detector) ยังเป็นแบบ CID (Charge Injection Device) ซึ่งมีลักษณะเด่นหลายอย่าง เช่น สามารถแสดงผลแบบไม่มีการทำลาย (Non-destructive Readout) โดยจะปล่อยสัญญาณความเข้มของแสงที่สูงออกมาอย่างรวดเร็วในขณะที่สัญญาณความเข้มที่ต่ำกว่าจะถูกสะสมด้วยระยะเวลาที่ยาวนานกว่า จึงสามารถมั่นใจได้ว่าจะได้ค่าสัญญาณความเข้มของแสงต่อสัญญาณรบกวน (signal-to-noise) ที่เหมาะสม นอกจากนี้ยังสามารถประมวลผลโดยการเข้าถึงแบบสุ่มอย่างแท้จริง (True Random Access Integration) ได้ด้วย



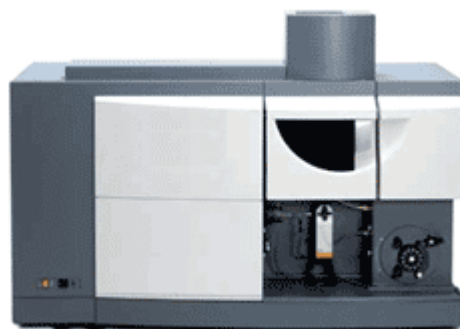
รูปที่ 37. กราฟการวัดสเปกตรัมของตัวอย่าง

Adaptive Integration Technology (AIT) & Image Mapping Technology (I-MAPTTM)

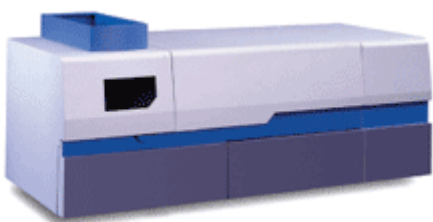
เทคโนโลยีทั้ง 2 ชนิดนี้เป็นของ VARIAN, INC. โดยเป็นเทคโนโลยีที่เกิดจากการออกแบบตัวตรวจวัดที่เป็น CCD ทำให้การตรวจวัดสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมาก โดย AIT คือ เทคโนโลยีที่ช่วยให้สามารถทำการวัดตัวอย่างได้พร้อมกันเพื่อให้ได้ผลการตรวจสอบที่สูงที่สุดและถูกต้อง และสามารถทำซ้ำได้ภายในระยะเวลาเพียง 10 วินาที โดย AIT จะใช้เวลาในการเก็บและอ่านผลสั้นในตัวอย่างที่มีความเข้มข้นสูง และใช้เวลานานในการอ่านผลตัวอย่างที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งจะทำให้ได้อัตราสัญญาณความเข้มของแสงต่อสัญญาณรบกวนต่ำ ส่วน I-MAPTTM จะช่วยให้ความยาวคลื่นที่เกิดขึ้นทั้งหมดสามารถจะตรวจวัดได้ในการอ่านเพียงครั้งเดียวโดยไม่จำเป็นต้องทำการวิเคราะห์หลายครั้ง ทำให้มีอัตราการส่งถ่ายตัวอย่างสูงขึ้น นอกจากนี้เทคโนโลยีของตัวตรวจวัดชนิดนี้ยังช่วยควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ทำให้สามารถทำการวิเคราะห์ได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย



ICP-MS



เครื่อง ICP ที่ใช้เทคโนโลยี AIT และ I-MAPTM



เครื่อง ICP ที่มีเทคโนโลยี Unique sheath gas



รูปที่ 38. เครื่อง ICP และเทคโนโลยีของ ICP

Unique sheath gas

เทคโนโลยีนี้เป็นของ HORIBAJOBIN YVON โดย unique sheath gas จะช่วยให้การวิเคราะห์ตัวอย่างทำได้อย่างต่อเนื่องด้วยการใช้เกลือปริมาณสูงที่ระดับถึง 30 % โดยไม่เกิดการอุดตันภายในหัวฉีด โดย sheath gas จะผลิตสถานะพลาสมาโดยตรงในตัวอย่าง ขณะที่สามารถปรับปรุง detection limit สำหรับธาตุจำพวกโลหะอัลคาไลน์ได้ร่วมกัน กับหลอดชนิดที่มีขนาด 3 มิลลิเมตร sheath gas จะสามารถพาตัวอย่างให้กำเนิดเป็นพลาสมาที่เป็นสถานะกระตุ้นได้มากกว่า ส่วนการพาท้ายอาร์กอนจะทำโดย sheath gas pocket ตัวอย่างจึงไม่ถูกสัมผัสกับผนังของ nebuliser เลย ดังนั้นจึงลดการอุดตันของ nebuliser ได้

การใช้ประโยชน์ของ ICP

การวิเคราะห์ด้านสิ่งแวดล้อม

ICP มีประโยชน์อย่างมากในงานวิเคราะห์ทางด้านสิ่งแวดล้อม โดยมักจะใช้ใช้ ICP-MS หรือ LC-ICP-MS ในการวิเคราะห์ โดยเฉพาะในการจำแนกและวิเคราะห์ชนิดของธาตุต่าง ๆ ในสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ ไม่ว่าจะเป็น ดิน น้ำ หิน แร่ หรือพืช แม้ว่าตัวอย่างเหล่านี้จะมีองค์ประกอบของธาตุในปริมาณที่แตกต่างกันแต่ก็สามารถตรวจวิเคราะห์ด้วย ICP ได้ เพราะ ICP มี detection limit ต่ำและมีความไวสูงสามารถตรวจสอบผลที่เกิดจากการรบกวนของอะตอมได้ในระดับต่ำและสามารถระบุความเข้มข้นของธาตุได้ในระดับถึง ppb หรือ ppt นอกจากนี้ ICP ยังไม่ได้เพียงแค่วิเคราะห์เฉพาะธาตุคนละชนิดกันเท่านั้น แต่ยังสามารถวิเคราะห์ธาตุชนิดเดียวกันที่มีไอโซโทปต่างกันได้อีก

การวิเคราะห์อาหาร

เนื่องจาก ICP นิยมใช้ในการตรวจสอบสารอนินทรีย์ จึงสามารถนำมาใช้ในการหาสารพิษในตัวอย่างอาหารรวมทั้งสามารถนำไปตรวจสอบหาโลหะที่ปนเปื้อนอยู่ในอาหารได้ด้วย นอกจากนี้ ในอุตสาหกรรมอาหารและการเกษตร ยังสามารถใช้ ICP ในการตรวจสอบสารพิษ และสารอาหารที่จำเป็นใน ดิน ปุ๋ยเนื้อเยื่อพืช และเนื้อเยื่อสัตว์ได้ และยังมีความแม่นยำสูงในการตรวจหาปริมาณโซเดียม เหล็ก และแคลเซียมในอาหารอีกด้วย

สรุป

ICP เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์มากในการวิเคราะห์ธาตุเพราะสามารถวิเคราะห์ธาตุได้เป็นจำนวนมากได้ในเวลาเดียวกันและยังสามารถวิเคราะห์ไอโซโทปแต่ละชนิดของธาตุชนิดเดียวกันได้ด้วย และด้วยเทคโนโลยีในปัจจุบัน ทำให้ ICP เป็นเครื่องมือที่มีความไวมากขึ้น และแม่นยำขึ้น ทำให้การใช้งานเครื่องมือมีประสิทธิภาพของผลการวิเคราะห์ได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถนำ ICP ไปเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น เช่น ICP-MS ทำให้ขอบเขตการใช้งานของเครื่องมือมากขึ้นซึ่งก็จะทำให้เครื่อง ICP สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นตามไปด้วย

ภาคผนวก ข
ตัวอย่างการคำนวณ

การหาปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวของ PAMAM dendrimer ที่ตรึงอยู่บนผิว silica gel

สารเคมี

1. HCl
2. NaOH
3. Potassium hydrogen phthalate (KHP)
4. Phenolphthalein

อุปกรณ์

1. Volumetric flask 1000 ml.
2. Volumetric flask 100 ml.
3. Burette 50 ml.
4. Erlenmeyer flask 250 ml.
5. Conical flask 100 ml.
6. Filter funnel

วิธีการทดลอง

1. เตรียมสารละลาย 0.01 M ของ KHP, NaOH และ HCl

- เตรียมสารละลาย KHP 0.01 M ปริมาตร 100 ml.

น้ำหนักโมเลกุลของ KHP ($C_8H_5KO_4$) คือ 204 g./mol

ในสารละลาย KHP	1000	ml.	จะมี KHP อยู่	0.01	mol
----------------	------	-----	---------------	------	-----

ดังนั้นสารละลาย KHP	100	ml.	จะมี KHP อยู่	0.001	mol
---------------------	-----	-----	---------------	-------	-----

KHP	1	mol.	หนัก	204	g.
-----	---	------	------	-----	----

KHP	0.001	mol.	หนัก	0.204	g.
-----	-------	------	------	-------	----

ดังนั้น สามารถเตรียมสารละลาย KHP 0.01 M ปริมาตร 100 ml. ได้โดยชั่ง KHP (อบไล่ความชื้นแล้ว) 0.2040 g. พอดี มาละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตร จนครบ 100 ml. ใน volumetric flask

- เตรียมสารละลาย NaOH 0.01 M ปริมาตร 1000 ml.

น้ำหนักโมเลกุลของ NaOH คือ 40 g./mol

ในสารละลาย NaOH 1000 ml. จะมี NaOH อยู่ 0.01 mol

NaOH 1 mol.หนัก 40 g.

NaOH 0.01 mol.หนัก 0.40 g.

ดังนั้น สามารถเตรียมสารละลาย NaOH 0.01 M ปริมาตร 1000 ml. ได้โดยชั่ง NaOH 0.40 g. ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรจนครบ 1000 ml. ใน volumetric flask

- เตรียมสารละลาย HCl 0.01 M ปริมาตร 1000 ml.

เตรียมสารละลาย HCl 0.01 M จาก conc.HCl เข้มข้น 37 %w/w ความหนาแน่น 1.19 g/ml.

น้ำหนักโมเลกุลของ HCl คือ 36.46 g./mol

ในสารละลาย conc.HCl 100 g. จะมี HCl อยู่ 37 g.

ในสารละลาย conc.HCl 100/1.19 ml. จะมี HCl อยู่ 37/36.46 g.

ในสารละลาย conc.HCl 84.034 ml. จะมี HCl อยู่ 1.015 mol.

ในสารละลาย conc.HCl 1000 ml. จะมี HCl อยู่ $(1.015 \times 1000)/84.034$ mol.
= 12.078 mol

ดังนั้น สารละลาย conc.HCl มีความเข้มข้น 12.078 M

เนื่องจาก ต้องการเตรียม HCl 0.01 M จาก HCl 12.078 M

จากสมการ

$$\begin{aligned} C_1 V_1 &= C_2 V_2 \\ 12.078 V_1 &= (0.01)(1000) \\ V_1 &= 0.828 \text{ ml.} \end{aligned}$$

ดังนั้น สามารถเตรียมสารละลาย HCl 0.01 M ปริมาตร 1000 ml. ได้โดยเปิด conc.HCl เข้มข้น 37 % มา 0.828 ml. เจือจางในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรจนครบ 1000 ml. ใน volumetric flask

2. เทียบมาตรฐานสารละลาย NaOH และ HCl ด้วยสารละลาย KHP ที่เตรียมขึ้น

เนื่องจาก NaOH เป็นสารที่สามารถดูดความชื้นได้ง่าย และ HCl ก็สามารถระเหยได้ง่าย ดังนั้น จึงจำเป็นต้องเทียบมาตรฐานเพื่อให้ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายที่เตรียมขึ้น โดยการไตเตรดสารละลาย NaOH ด้วยสารละลาย KHP ซึ่งเป็นสารละลายมาตรฐานอันดับหนึ่ง เพื่อให้ทราบความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ที่แน่นอน จากนั้นจึงไตเตรดสารละลาย HCl ด้วยสารละลาย NaOH ทำให้ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลาย HCl

-เทียบมาตรฐานสารละลาย NaOH โดยการไตเตรดด้วยสารละลาย KHP

ปีเปตสารละลาย KHP 0.01 M ปริมาตร 25 ml. ลงใน erlenmeyer flask ขนาด 250 ml. แล้วจึงไตเตรดด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งถูกบรรจุไว้ในบิวเรต โดยใช้ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ การไตเตรดเพื่อเทียบมาตรฐานควรทำอย่างน้อย 3 ครั้ง พร้อมทั้งบันทึกปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ แล้วจึงนำผลที่ได้มาคำนวณ

ตารางแสดงผลการไตเตรดสารละลาย NaOH ด้วยสารละลาย KHP

ครั้งที่	ระดับ NaOH ในบิวเรต (ml.)		ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (ml.)
	ตอนสุดท้าย	ตอนเริ่มต้น	
1	28.9	5.6	23.3
2	23.4	0.2	23.2
3	46.4	23.4	23.0
		เฉลี่ย	23.17

ปฏิกิริยาระหว่าง NaOH กับ KHP เป็นแบบ 1:1

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้น } \text{mol NaOH} &= \text{mol KHP} \\ C_{\text{NaOH}} V_{\text{NaOH}} &= C_{\text{KHP}} V_{\text{KHP}} \\ C_{\text{NaOH}} &= (0.01 \times 25)/23.17 \\ C_{\text{NaOH}} &= 0.0108 \end{aligned}$$

ดังนั้น สารละลาย NaOH ที่เตรียมขึ้นมีความเข้มข้นจริง 0.0108 M

-เทียบมาตรฐานสารละลาย HCl โดยการไตเตรดด้วยสารละลาย NaOH (ซึ่งทราบความเข้มข้นที่แน่นอนแล้วจากการไตเตรดด้วยสารละลาย KHP)

ปีเปตสารละลาย HCl 0.01 M ปริมาตร 25 ml. ลงใน erlenmeyer flask ขนาด 250 ml. แล้วจึงไตเตรดด้วยสารละลาย NaOH ซึ่งถูกบรรจุไว้ในบิวเรต โดยใช้ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ การไตเตรดเพื่อเทียบมาตรฐานควรทำอย่างน้อย 3 ครั้ง พร้อมทั้งบันทึกปริมาตรสารละลาย NaOH ที่ใช้ แล้วจึงนำผลที่ได้มาคำนวณ

ตารางแสดงผลการไทเทรตสารละลาย HCl ด้วยสารละลาย NaOH

ครั้งที่	ระดับ NaOH ในบิวเรต (ml.)		ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (ml.)
	ตอนสุดท้าย	ตอนเริ่มต้น	
1	22.6	0.5	22.1
2	44.8	22.6	22.2
3	47.1	24.8	22.3
		เฉลี่ย	22.2

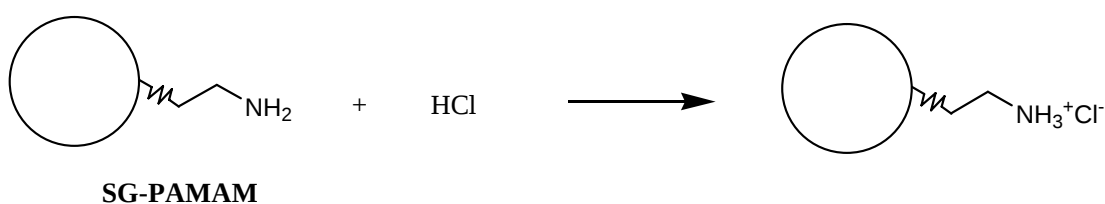
ปฏิกิริยาระหว่าง NaOH กับ HCl เป็นแบบ 1:1

$$\begin{aligned}
 \text{ดังนั้น } \text{mol NaOH} &= \text{mol HCl} \\
 C_{\text{NaOH}} V_{\text{NaOH}} &= C_{\text{HCl}} V_{\text{HCl}} \\
 C_{\text{HCl}} &= (0.0108 \times 22.2)/25 \\
 C_{\text{HCl}} &= 0.0096
 \end{aligned}$$

ดังนั้น สารละลาย HCl ที่เตรียมขึ้นมีความเข้มข้นจริง 0.0096 M

3. การหาปริมาณหมู่อะมิโนที่ผิวของ PAMAM dendrimer ที่อยู่บนผิวของ silica gel

ซึ่ง SG-G0, SG-G1.0, SG-G2.0, SG-G3.0 หรือ SG-G3.0-PC (ยังไม่ถูกล้างด้วยสารละลาย NaOH) ที่ได้จากการสังเคราะห์ชนิดใดชนิดหนึ่งมา 0.1 g. ใส่ conical flask ขนาด 100 mL. หลังจากนั้นจึงเปิดสารละลาย HCl 0.01 M ใสลงไป 25 mL. (ในกรณีที่หมู่อะมิโนมาก อาจเพิ่มปริมาตร HCl ที่ใช้ให้มากขึ้นได้) กวนของผสมนาน 2 ชั่วโมง จากนั้นจึงกรองด้วยกระดาษกรอง เพื่อนำสารละลายซึ่งมี HCl เหลืออยู่ไปไทเทรตกับสารละลายของ NaOH 0.01 M โดยใช้ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ วิธีการไทเทรตนั้นจะต้องทำการทดสอบซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง ให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกัน และนำค่าที่ได้มาทำการเฉลี่ย แล้วจึงคำนวณหาปริมาณหมู่อะมิโนของ PAMAM dendrimer ที่อยู่บนผิวของ silica gel



ตัวอย่างผลการทดลองและการคำนวณหาปริมาณหมู่อะมิโนของ SG-G3 เป็นดังนี้

ตารางแสดงผลการไตเตรดเพื่อหาปริมาณหมู่อะมิโนของ SG-G3

ครั้งที่	น้ำหนัก (g.) SG-G3	ระดับ NaOH ในบิวเรต (ml.)		ปริมาตร NaOH ที่ใช้ (ml.)
		ตอนสุดท้าย	ตอนเริ่มต้น	
1	0.1025	7.8	1.5	6.3
2	0.1030	14.2	7.8	6.4
3	0.1007	20.5	14.2	6.3
เฉลี่ย	0.1021			6.33

ปฏิกิริยาระหว่าง NaOH กับ HCl เป็นแบบ 1:1

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลาย NaOH} = 0.0108 \text{ M}$$

$$\begin{aligned} \text{mol NaOH ที่ใช้ในการไตเตรด} &= (0.0108 \times 6.33)/1000 = \text{mol HCl ที่เหลืออยู่ในสารละลาย} \\ &= 6.83 \times 10^{-5} \text{ mol} \end{aligned}$$

$$\text{ความเข้มข้นของสารละลาย HCl} = 0.0096 \text{ M}$$

$$\text{ปริมาตรของสารละลาย HCl ที่ใส่ในตอนต้น} = 25 \text{ ml.}$$

$$\text{mol HCl ที่อยู่ในสารละลายตอนเริ่มต้น} = (0.0096 \times 25)/1000 = 23.96 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

ปฏิกิริยาระหว่าง HCl กับหมู่อะมิโนของ SG-G3 เป็นแบบ 1:1

$$\begin{aligned} \text{mol HCl ที่ทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโน} &= \text{mol HCl ตอนเริ่มต้น} - \text{mol HCl ที่เหลือ} \\ &= 23.96 \times 10^{-5} - 6.83 \times 10^{-5} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาณหมู่อะมิโนของ SG-G3 มีค่า} = 17.12 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

$$\text{SG-G3 น้ำหนัก } 0.1021 \text{ g. มีหมู่อะมิโน } 17.12 \times 10^{-5} \text{ mol}$$

$$\text{SG-G3 น้ำหนัก } 1 \text{ g. มีหมู่อะมิโน } 17.12 \times 10^{-5} / 0.1021 \text{ mol/g.}$$

$$= 1.67 \text{ mmol/g.}$$

ดังนั้น ปริมาณหมู่อะมิโนของ SG-G3 มีค่า 1.67 mmol/g.

ทำการทดลองในข้อ 3 ซ้ำ โดยเปลี่ยนจาก SG-G3 เป็นสารตัวอื่น ๆ ที่ต้องการหาปริมาณหมู่อะมิโน

การเตรียมสารละลายของไอออนโลหะ M^{n+} ในน้ำกลั่น ในหน่วย ppm

$$\text{จากสมการ} \quad \text{ppm} = \frac{\text{weight of solute}}{\text{weight of solvent}} \times 1000000$$

$$\text{weight of solute (M}^{2+}\text{)} = [\text{ppm} \times \text{weight of solvent(H}_2\text{O)}] / 1000000$$

ตัวอย่างการเตรียมสารละลายไอออน Cu^{2+} 500 ppm. ปริมาตร 1000 ml. จาก $\text{Cu(NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$

$$\begin{aligned} \text{weight of solute (Cu}^{2+}\text{)} &= [\text{ppm} \times \text{weight of solvent(H}_2\text{O)}] / 1000000 \\ &= (500 \times 1000) / 1000000 \quad (\text{เมื่อ } d_{\text{H}_2\text{O}} = 1) \end{aligned}$$

$$\text{weight of solute (Cu}^{2+}\text{)} = 0.5 \text{ g.}$$

เนื่องจากน้ำหนักอะตอมของ Cu มีค่าเท่ากับ 63.546 และน้ำหนักโมเลกุลของ $\text{Cu(NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ มีค่าเท่ากับ 232.59

ดังนั้น ถ้าต้องการ Cu^{2+} 63.546 g. จะต้องชั่ง $\text{Cu(NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ หนัก 232.59 g.

$$\begin{aligned} \text{ถ้าต้องการ Cu}^{2+} 0.125 \text{ g.} &\text{ จะต้องชั่ง } \text{Cu(NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O} \text{ หนัก } (232.59 \times 0.5) / 63.546 \\ &= 1.83 \text{ g.} \end{aligned}$$

ดังนั้น สามารถเตรียมสารละลาย Cu^{2+} 500 ppm. ปริมาตร 1000 ml. ได้โดยชั่ง $\text{Cu(NO}_3)_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ หนัก 1.83 g. ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรจนครบ 1000 ml. ใน volumetric flask

การคำนวณหาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักของเรซิน

$$\text{การดูดซับ (\%)} = \left(\frac{C_0 - C_1}{C_0} \right) \times 100$$

$$\text{ปริมาณการดูดซับ (mg.M}^{n+}\text{ / g.resin)} = \frac{(C_0 - C_1) \times V}{1000W}$$

$$\text{ปริมาณการดูดซับ (mmol.M}^{n+}\text{ / g.resin)} = \frac{(C_0 - C_1) \times V}{1000WM}$$

เมื่อ C_0 = ความเข้มข้นสารละลายโลหะเริ่มต้น (ppm.)

C_1 = ความเข้มข้นสารละลายโลหะสุดท้าย (ppm.)

V = ปริมาตรสารละลายโลหะ (ml.)

W = น้ำหนักของเรซิน (g.)

M = น้ำหนักอะตอมของ M^{n+}

ภาคผนวก ก
ผลการทดสอบการดูดซับโลหะ

ตารางที่ 13. ข้อมูลการศึกษา ผลของชนิดเรซินต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยใช้เรซินหนัก 0.025 g., สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 30 ppm. ปริมาตร 100 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	ชนิดเรซิน	ทดลอง (ครั้ง)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ร้อยละการดูดซับ
Cu(NO ₃) ₂	SG-G3	3	30.5	26.6	12.9
				25.2	17.4
				25.2	17.4
	SG-G3-PC	3	30.5	26.2	14.2
				24.9	18.4
				24.2	20.7
	SG-G3.5-6ACA	3	30.5	23.8	22.0
				23.7	22.4
				23.4	23.3

ตารางที่ 14. ข้อมูลการศึกษา ผลของเวลาการทดสอบต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนัก
จากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm.
ปริมาตร 10 mL., pH เริ่มต้น = 4, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลาย โลหะ	เวลา (นาที)	ทดลอง (ครั้ง)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ร้อยละ การดูดซับ
Cu(NO ₃) ₂	10	3	99.5	35.8	64.1
				35.0	64.8
				35.3	64.6
	30	3	99.5	25.3	74.6
				25.8	74.1
				27.3	72.6
	60	3	99.5	21.5	78.4
				18.5	81.4
				23.0	76.9
Ni(NO ₃) ₂	10	3	96.3	46.3	51.9
				49.8	48.3
				48.0	50.1
	30	3	96.3	48.0	50.1
				48.5	49.6
				50.0	48.1
	60	3	96.3	48.5	49.6
				48.3	49.9
				47.8	50.4
CdCl ₂	10	3	100.5	19.5	80.6
				21.8	78.4
				21.3	78.9
	30	3	100.5	20.8	79.4
				20.8	79.4
				22.3	77.9
	60	3	100.5	19.8	80.3
				19.5	80.6
				19.8	80.3

ตารางที่ 15. ข้อมูลการศึกษา ผลของปริมาณเรซินต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ เรซินคือ SG-G3.0-PC, สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm.

ปริมาตร 10 mL., ค่า pH เริ่มต้น = 4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	ปริมาณเรซิน (g.)	ทดลอง (ครั้ง)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ร้อยละการดูดซับ
Cu(NO ₃) ₂	0.02	3	99.5	72.0	27.6
				71.3	28.4
				70.5	29.1
	0.05	3	99.5	48.0	51.8
				47.0	52.8
				47.3	52.5
	0.10	3	99.5	21.5	78.4
				18.5	81.4
				23.0	76.9
Ni(NO ₃) ₂	0.02	3	103.8	78.5	24.3
				79.0	23.9
				78.8	24.1
	0.05	3	103.8	68.5	34.0
				67.3	35.2
				67.3	35.2
	0.10	3	96.3	48.5	49.6
				48.3	49.9
				47.8	50.4
CdCl ₂	0.02	3	105.0	79.8	24.0
				81.5	22.4
				76.3	27.4
	0.05	3	105.0	56.5	46.2
				55.0	47.6
				56.3	46.4
	0.10	3	100.5	19.8	80.3
				19.5	80.6
				19.8	80.3

ตารางที่ 16. ข้อมูลการศึกษา ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะปริมาตร 10 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ทดลอง (ครั้ง)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ร้อยละการดูดซับ
Cu(NO ₃) ₂	20	3	19.9	0.73	96.4
				0.55	97.2
				0.55	97.2
	50	3	49.8	1.33	97.3
				1.13	97.7
				1.20	97.6
	100	3	99.5	21.5	78.4
				18.5	81.4
				23.0	76.9
Ni(NO ₃) ₂	20	3	20.8	0.33	98.4
				0.30	98.6
				0.33	98.4
	50	3	51.9	11.3	78.3
				11.3	78.3
				11.3	78.3
	100	3	96.3	48.5	49.6
				48.3	49.9
				47.8	50.4
CdCl ₂	20	3	21.0	0.0	100.0
				0.0	100.0
				0.0	100.0
	50	3	52.5	0.0	100.0
				0.0	100.0
				0.0	100.0
	100	3	100.5	19.8	80.3
				19.5	80.6
				19.8	80.3

ตารางที่ 17. ข้อมูลการศึกษาผลของ pH ต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g., สารละลายโลหะความเข้มข้น 100 ppm. ปริมาตร 10 mL., เวลา 60 นาที, 25 °C

สารละลายโลหะ	pH เริ่มต้น	ทดลอง (ครั้ง)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ร้อยละการดูดซับ
Cu(NO ₃) ₂	2	3	104.3	86.3	17.3
				85.8	17.7
				86.8	16.8
	3	3	104.3	37.0	64.5
				36.8	64.7
				36.5	65.0
	4	3	99.5	21.5	78.4
				18.5	81.4
				23.0	76.9
	5	3	104.3	22.8	78.2
				23.8	77.2
				23.8	77.2
Ni(NO ₃) ₂	2	3	96.5	84.3	12.7
				85.0	11.9
				81.0	16.1
	3	3	96.5	64.8	32.9
				65.0	32.6
				64.5	33.2
	4	3	96.3	48.5	49.6
				48.3	49.9
				47.8	50.4
	5	3	96.5	47.5	50.8
				47.5	50.8
				45.8	52.6
CdCl ₂	2	3	103.0	93.8	9.0
				95.3	7.5
				94.0	8.7
	3	3	103.0	58.5	43.2
				51.0	50.5
				58.0	43.7
	4	3	100.5	19.8	80.3
				19.5	80.6
				19.8	80.3
	5	3	103.0	14.5	85.9
				16.8	83.7
				15.3	85.2

ตารางที่ 18. ข้อมูลการศึกษาหาความจุไอออนของเรซิน โดยใช้ SG-G3.0-PC 0.1 g. สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 30-500 ppm. ปริมาตร 30 mL. pH เริ่มต้น= 4, เวลา 60 นาที, ที่ 25 °C

สารละลายโลหะ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ทดลอง (ครั้ง)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ร้อยละการดูดซับ
Cu(NO ₃) ₂	30	3	30.8	10.3	66.5
				10.0	67.6
				11.0	64.3
	100	3	102.8	66.8	35.0
				67.0	34.8
				68.7	33.2
	300	3	308.3	221.3	28.2
				218.0	29.3
				221.2	28.3
	500	3	513.8	378.5	26.3
				366.7	28.6
				371.3	27.7
Ni(NO ₃) ₂	30	3	29.9	18.7	37.5
				19.5	34.7
				19.2	35.8
	100	3	99.5	82.5	17.1
				79.7	19.9
				86.7	12.9
	300	3	298.5	269.3	9.8
				272.0	8.9
				276.3	7.4
	500	3	497.5	440.8	11.4
				449.7	9.6
				455.7	8.4
CdCl ₂	30	3	29.4	11.2	62.0
				11.5	60.9
				11.5	60.9
	100	3	98.0	81.3	17.0
				79.2	19.2
				80.0	18.4
	300	3	294.0	248.3	15.5
				252.0	14.3
				242.0	17.7
	500	3	490.0	415.7	15.2
				414.5	15.4
				409.8	16.4

ตารางที่ 19. ข้อมูลการศึกษา การนำเรซินกลับมาใช้ใหม่ต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลาย โดยใช้ เรซินหนัก 0.1 g., สารละลายโลหะมีความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm. ปริมาตร 10 mL., pH เริ่มต้น = 4, เวลาในการดูดซับ 60 นาที, อุณหภูมิ 25 °C

สารละลายโลหะ	การใช้งานในครั้งที่	ทดลอง (ครั้ง)	[M ⁿ⁺] เริ่มต้น (ppm)	[M ⁿ⁺] สุดท้าย (ppm)	ร้อยละการดูดซับ
Cu(NO ₃) ₂	1	3	99.5	21.5	78.4
				18.5	81.4
				23.0	76.9
	2	3	106.3	53.0	50.1
				53.5	49.6
				54.5	48.7
	3	3	104.3	53.0	49.2
				55.0	47.2
				53.6	48.6
Ni(NO ₃) ₂	1	3	96.3	48.5	49.6
				48.3	49.9
				47.8	50.4
	2	3	98.3	84.5	14.0
				87.0	11.5
				86.3	12.2
	3	3	96.5	81.8	15.3
				80.0	17.1
				83.0	14.0
CdCl ₂	1	3	100.5	19.8	80.3
				19.5	80.6
				19.8	80.3
	2	3	99.3	76.0	23.4
				76.3	23.2
				76.0	23.4
	3	3	103.0	79.0	23.3
				82.5	19.9
				81.5	20.9

ประวัติผู้ทำการศึกษา

ชื่อ-สกุล นาย กิตติพัฒน์ เล่งเจริญ
 ที่อยู่ 98 ถ.พญาพาน ต.พระปฐมเจดีย์ อ.เมือง จ.นครปฐม 73000
 โทรศัพท์ 08-6621-7833
 E-mail address the_book3000@yahoo.com

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2547 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
 สาขาวิชาปิโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์ จากมหาวิทยาลัยศิลปากร
 พระราชวังสนามจันทร์ นครปฐม
 พ.ศ. 2548 ศึกษาต่อระดับปริญญาโท สาขาวิทยาการและวิศวกรรม
 พอลิเมอร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ประวัติการทำงาน

พ.ศ.2548-2549 ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และ
 เทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร พระราชวังสนามจันทร์
 นครปฐม ตำแหน่งผู้ช่วยอาจารย์ (teacher assistant)