



เลขที่สิทธิบัตร 105492

สป/200 - ข

สิทธิบัตรการประดิษฐ์

อาศัยอำนาจตามความในพระราชบัญญัติสิทธิบัตร พ.ศ. 2522
อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญาออกสิทธิบัตรฉบับนี้ให้แก่

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

สำหรับการประดิษฐ์ตามรายละเอียดการประดิษฐ์ ข้อถ้อยสิทธิ และรูปเขียน (ถ้ามี) ดังที่ปรากฏในสิทธิบัตรนี้

เลขที่คำขอ 1201001387

วันขอรับสิทธิบัตร 28 มีนาคม 2555

ผู้ประดิษฐ์ นายปกรณ์ โอภาประกาศิต และคณะ

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์ การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารปรัสเซียนบลู
เพื่อการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีซีเอ็ม

105492

ให้ผู้ทรงสิทธิบัตรนี้มีสิทธิและหน้าที่ตามกฎหมายว่าด้วยสิทธิบัตรทุกประการ



ออกให้ ณ วันที่ 13 เดือน ธันวาคม พ.ศ. 2567

หมดอายุ ณ วันที่ 27 เดือน มีนาคม พ.ศ. 2575



รองอธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา ปฏิบัติราชการแทน
อธิบดีกรมทรัพย์สินทางปัญญา
ผู้ออกสิทธิบัตร

พนักงานเจ้าหน้าที่

- หมายเหตุ
- ผู้ทรงสิทธิบัตรต้องชำระค่าธรรมเนียมรายปีเริ่มตั้งแต่ปีที่ 5 ของอายุสิทธิบัตร มิฉะนั้น สิทธิบัตรนี้จะสิ้นสุดอายุ
 - ผู้ทรงสิทธิบัตรจะขอชำระค่าธรรมเนียมรายปีล่วงหน้าโดยชำระทั้งหมดในคราวเดียวได้
 - การอนุญาตให้ใช้สิทธิตามสิทธิบัตรและการโอนสิทธิบัตรต้องทำเป็นหนังสือและจดทะเบียนต่อพนักงานเจ้าหน้าที่



Ref.256701096832571

หน้า 1 ของจำนวน 10 หน้า

รายละเอียดการประดิษฐ์

ชื่อที่แสดงถึงการประดิษฐ์

การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารปรีสเซียนบลูเพื่อการดูดซับสาร
กัมมันตรังสีซีเซียม

5 ลักษณะและความมุ่งหมายของการประดิษฐ์

เป็นกรรมวิธีการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโน และกรรมวิธีการเคลือบผิวอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่
สังเคราะห์ได้ด้วยสารประกอบในกลุ่มปรีสเซียนบลู ซึ่งมีความสามารถในการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีเซียมได้ดี
ทำให้ได้วัสดุดูดซับซีเซียมขนาดนาโนเมตรที่มีพื้นที่ผิวมาก และมีความเป็นแม่เหล็กสูง สามารถใช้ในการแยก
สารกัมมันตรังสีซีเซียมออกจากกากของเสียนิวเคลียร์ หรือสิ่งแวดล้อมที่ถูกปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสีซีเซียม

10 ได้โดยง่าย โดยใช้แนวทางแม่เหล็กซึ่งอาจมาจากแม่เหล็กไฟฟ้าหรือแม่เหล็กถาวร

สาขาวิทยาการที่เกี่ยวข้องกับการประดิษฐ์

วิศวกรรมในส่วนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนและการเคลือบผิวด้วยสาร
ปรีสเซียนบลู เพื่อการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีเซียม

ภูมิหลังของศิลปะหรือวิทยาการที่เกี่ยวข้อง

- 15 ปัจจุบันกระบวนการผลิตพลังงานไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้านิวเคลียร์และเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่มีใช้ทั่วโลก
ส่วนใหญ่เป็นกระบวนการที่อาศัยหลักการแตกตัวของนิวเคลียสของธาตุหนัก เช่น ยูเรเนียม หรือ พลูโตเนียม
ซึ่งผลลัพธ์ของกระบวนการดังกล่าวนอกจากจะได้พลังงานจำนวนมากแล้ว ยังเกิดสารกัมมันตรังสีต่างๆ
ขึ้นจำนวนมาก หนึ่งในสารกัมมันตรังสีสำคัญที่เกิดขึ้น และได้รับความสนใจเป็นพิเศษ เพราะเกิดเป็นปัญหาใน
การจัดการ คือ ซีเซียม-137 เนื่องจากมีค่าครึ่งชีวิตที่ยาวนานถึง 30 ปี และสามารถละลายน้ำได้ดี หากรั่วไหล
20 ออกจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์จะมีความเป็นพิษสูงต่อสิ่งมีชีวิตทั้งคน พืช และสัตว์ ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ใกล้เคียง
ดังตัวอย่าง เช่น การเกิดอุบัติเหตุทางด้านนิวเคลียร์ ในวันที่ 26 เมษายน ค.ศ. 1986 ที่โรงไฟฟ้าเชอร์โนบิล
ประเทศสหภาพโซเวียต ซึ่งถือเป็นอุบัติเหตุที่เกิดกับโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ครั้งร้ายแรงที่สุดใน
ประวัติศาสตร์ โดยมีสาเหตุมาจากการเกิดแรงดันไอน้ำสูงขึ้นอย่างฉับพลัน และระบบตัดการทำงานอัตโนมัติไม่
ทำงาน ส่งผลให้แกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์หลอมละลายและเกิดระเบิดขึ้น ซึ่งจากอุบัติเหตุครั้งนี้ มีผู้ได้รับ
25 ผลกระทบมากถึง 600,000 คน โดยมีผู้เสียชีวิตทันทีหลังการระเบิด 56 คน และผู้ป่วยด้วยโรคมะเร็ง
อันเนื่องมาจากการรับสารกัมมันตรังสีสูงถึง 4,000 คน นอกจากนี้ช่วงต้นปี ค.ศ. 2011 ที่ผ่านมา ได้เกิด
อุบัติเหตุโรงไฟฟ้านิวเคลียร์ที่เมืองฟูกูชิมะ ประเทศญี่ปุ่นระเบิด เนื่องจากการเกิดแผ่นดินไหวและคลื่นยักษ์สึ


นายสุวัจน์ บุญอารี

Signed by DIP-CA

- นามิที่เมืองเซินโด ส่งผลให้เครื่องหล่อเย็นเตาปฏิกรณ์ไม่ทำงาน และแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์หลอมละลาย เป็นเหตุให้เกิดการแพร่กระจายของสารกัมมันตรังสีที่เป็นอันตราย ทั้งทางอากาศและทางน้ำ ลงสู่แหล่งน้ำ ธรรมชาติและทะเลในบริเวณใกล้เคียง มีรายงานว่า พบการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีซีซีเอ็มในระดับที่สูง กว่าค่ามาตรฐานความปลอดภัยในผลิตภัณฑ์การเกษตรหลายชนิดของญี่ปุ่น เช่น ข้าว ใบชา และเนื้อวัว
- 5 ซีซีเอ็มเป็นธาตุโลหะอัลคาไลน์ซึ่งมีสมบัติการละลายน้ำดี จึงยากต่อการจัดการเมื่อสารนี้เกิดรั่วไหล ออกไปสู่สิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีซีซีเอ็มลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ดังนั้น เมื่อแหล่งน้ำเกิดการปนเปื้อน จะต้องดำเนินการบำบัดและดูดซับซีซีเอ็มออกจากสิ่งแวดล้อม ในเวลาอันรวดเร็ว โดยกระบวนการบำบัดนี้ควรเป็นวิธีที่สะดวก ต้นทุนไม่สูงมากนัก และมีความปลอดภัยต่อ สิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อม นอกจากการบำบัดสารกัมมันตรังสีที่รั่วไหลสู่สิ่งแวดล้อมเนื่องจากอุบัติเหตุแล้ว
- 10 ยังต้องคำนึงถึงการปนเปื้อนภายในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์เองด้วย เนื่องจากการใช้น้ำปริมาณมาก ในกระบวนการหล่อเย็นหรือใช้ในการควบคุมความเร็วของนิวตรอนในเตาปฏิกรณ์ ซึ่งจะเกิดการละลายและ ปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ในปริมาณสูงและจำเป็นต้องได้รับการบำบัดด้วย เช่นกัน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อโรงงานไฟฟ้าหมดอายุการใช้งานลง หรือเมื่อต้องการเปลี่ยนรูปของเสีย นิวเคลียร์จากสารกัมมันตรังสีที่ละลายอยู่ในน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง เพื่อให้สะดวกต่อการจัดการกับของเสีย
- 15 นิวเคลียร์ในระยะยาว

- ทั้งนี้ ได้มีความพยายามอย่างมากในการพัฒนากระบวนการกำจัดหรือการดูดซับสารกัมมันตรังสี ซีซีเอ็มออกจากน้ำหรือของเหลวที่เกิดการปนเปื้อน ตัวอย่างเช่น การกรองโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resins) การตกผลิกร่วมทางเคมี (Chemical co-precipitation) หรือการตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electro-coagulation) เป็นต้น โดยใช้วัสดุที่มีสมบัติในการดูดซับธาตุซีซีเอ็มได้ดี เช่น แอมโมเนียม
- 20 โมลิบโดฟอสเฟต-โพลีอะคริโลไนไทรล์ (Ammonium molybdophosphate - polyacrylonitrile, AMP-PAN), นาโนคริสตัลลีน ซิลิโคไทเทเนต (Nanocrystalline silicotitanate, IONSIV™), ซีโอไลต์ (Zeolite) และสารอนุพันธ์ของสารประกอบโลหะทรานซิชันเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (Hexacyanoferrate) รวมถึงสารประกอบกลุ่มเฟอร์โรไซยาไนด์ (Composite ferrocyanides) ในจำนวนนี้สารในกลุ่มเฟอร์ริกเฮกซะ ไซยาโนเฟอร์เรต หรือปรัสเซียนบลูชนิดไม่ละลายน้ำ (Ferric hexacyanoferrate or insoluble Prussian
- 25 blue, $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$) มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีซีเอ็มสูง และได้รับการยอมรับจาก สำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาของสหรัฐอเมริกา (Food and Drug Administration, FDA) ให้ใช้ในร่างกายมนุษย์ได้ ในกรณีที่ผู้ป่วยประสบอุบัติเหตุได้รับสารกัมมันตรังสีซีซีเอ็มปริมาณมากเข้าสู่ร่างกาย จะใช้สารชนิดนี้ในรูปยาเม็ด เข้าทำหน้าที่ดูดซับซีซีเอ็มจากบริเวณลำไส้ และขับถ่ายออกจากร่างกาย ซึ่งปัจจุบันมีการผลิตจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ภายใต้ชื่อการค้า Radiogardase®



นายสุวัจน์ บุญอารี

Signed by DIP-CA

การใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange resins) โดยทั่วไปแล้ว เป็นวิธีที่ยุ่งยากซับซ้อน โดยต้องใช้หोरองซึ่งบรรจุวัสดุดูดซับซีเซียม ในลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ บรรจุแน่นในหोरอง แล้วจึงทำการส่งของเหลวที่ปนเปื้อนสารกัมมันตรังสีผ่านเข้าไปในหोरอง อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้ส่งผลให้พื้นที่สัมผัสของเรซินตัวดูดซับกับสารกัมมันตรังสีลดลง อีกทั้ง ต้องใช้เวลานานในการให้ของเหลวสัมผัสกับเรซิน เพื่อให้เกิดการแลกเปลี่ยนดูดซับ นอกจากนี้กระบวนการกรองโดยผ่านหोरองยังไม่สะดวกต่อการนำไปใช้ในระบบเปิด เช่น การบำบัดน้ำปนเปื้อนในแหล่งน้ำธรรมชาติ เนื่องจากต้องสูบน้ำปริมาณมากผ่านหोरอง

ต่อมาได้มีการพัฒนาใช้วัสดุผสมของอนุภาคแม่เหล็ก-เรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Magnetic – ion exchange composite resins) เพื่อความสะดวกในการจัดเก็บและแยกสารดูดซับออกจากของเหลวที่ปนเปื้อนได้โดยง่ายหลังการบำบัด โดยการฝังอนุภาคแม่เหล็กในเม็ดเรซิน หรือทำให้อนุภาคแม่เหล็กกระจายตัวอยู่กับเรซิน หลังการบำบัด จึงนำสนามแม่เหล็กมาเหนี่ยวนำทำให้เม็ดเรซินที่ประกอบด้วยอนุภาคแม่เหล็กถูกดูดกลับคืนมา ในปัจจุบันมีการนำเอาเรซินแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับสารประกอบแม่เหล็กไปใช้ในการค้าแล้ว เช่น ผลิตภัณฑ์ MIEX® ของบริษัท Orica Australia Pty Ltd โดยรายละเอียดของผลิตภัณฑ์คือการนำเอาเรซินดูดซับที่มีอนุภาคแม่เหล็กกระจายตัวอยู่ภายใน ไปใช้ในการดูดซับสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ออกจากของเหลว แต่ทั้งนี้ เรซินที่ใช้ในระบบนี้ยังมีขนาดใหญ่ในระดับไมครอนจนถึงมิลลิเมตร ทำให้ไม่สามารถใช้ประโยชน์จุดเด่น ในด้านการเพิ่มพื้นที่ผิวของอนุภาคในระดับนาโนเมตรได้

สิทธิบัตรอังกฤษ เลขที่ GB-A-2170736 เปิดเผยวิธีการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็ก ซึ่งประกอบด้วยสารประกอบกลุ่มซิลไฟด์ที่มีสมบัติดูดซับโลหะหนักได้ดี สิทธิบัตรอังกฤษ เลขที่ GB-A-2206206 แสดงวิธีการแยกอนุภาคขนาดเล็กออกจากสารละลาย โดยใช้แม่เหล็กกับพอลิไอออนิครพอลิเมอร์ สิทธิบัตรยุโรป เลขที่ EP-A-0302293 เปิดเผยวิธีการเตรียมอนุภาคแม่เหล็กและสารดูดซับทั่วไปซึ่งผสมอยู่ด้วยกันในลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ ซึ่งสามารถนำไปใช้แยกสารปนเปื้อนทั้งชนิดของแข็งและของเหลวได้ สิทธิบัตรยุโรป เลขที่ EP-A-0522856 แสดงการทดลองว่าอนุภาคแม่เหล็กที่ถูกเคลือบด้วยพอลิเมอร์ เพื่อใช้เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนนั้น มีความทนทานสูงกว่าการใช้วัสดุที่ผลิตจากการใช้ความดันเชิงกลอัดสัณฐานอนุภาคแม่เหล็กกับเรซินแลกเปลี่ยนไอออนเข้าด้วยกัน สิทธิบัตรญี่ปุ่น เลขที่ JP-A-63175686 อธิบายถึงวิธีการแยกไอออนของโลหะออกจากสารละลาย โดยใช้แท่งแม่เหล็กเคลือบด้วยพอลิเมอร์สังเคราะห์ ซึ่งมีหมู่คีเลตที่จับกันได้ดีกับไอออนโลหะนั้นๆ ได้ดี อย่างไรก็ตาม วิธีการสังเคราะห์พอลิเมอร์และหมู่คีเลตที่มีความจำเพาะกับโลหะหนักมักมีความยุ่งยากและใช้ต้นทุนที่สูง สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา เลขที่ 5,397,476 และ 5,855,790 กล่าวถึงการกำจัดไอออนปนเปื้อน โดยใช้แม่เหล็กซึ่งเคลือบด้วยเส้นใยจากพอลิเมอร์ หรือเรียกว่า เรซินแม่เหล็ก (Magnetic resins) โดยเรซินแม่เหล็กจะทำการดูดซับสิ่งปนเปื้อนในสารละลายแล้วกรองออกโดยแรงแม่เหล็ก ขนาดอนุภาคของแม่เหล็ก ซึ่งถูกใช้ให้เป็นแม่เหล็กเรซินนี้ มีขนาดใหญ่กว่าร้อยละไมครอน จึงเป็นเหตุให้เกิดการ


 นายสุวัจชัย บุญอารี

Signed by DIP-CA

ตกตะกอนที่เร็วเกินไป หรือต้องอาศัยการกวนตัวอยู่ตลอดเวลา รวมถึงมีขนาดที่ใหญ่ทำให้มีพื้นที่ผิว (active area) ในการดูดซับสารที่ลดลงด้วยเช่นกัน ดังนั้น จึงทำให้กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นได้ไม่ดีหรือไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร นอกจากนี้ ยังไม่มีสิทธิบัตรใดแสดงให้เห็นถึงการใช้อนุภาคเรซินหรืออนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโน เพื่อใช้ในการดูดซับซีเซียมออกจากของเสียนิวเคลียร์ที่ต้องการบำบัดหรือจากแหล่งน้ำที่ถูกรบกวน

5 ปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสีซีเซียมในธรรมชาติ

สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา เลขที่ 4,134,831 ได้อธิบายถึงกระบวนการแยกของเสียออกจากแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น ทะเลสาบ แม่น้ำ หรือทะเล โดยใช้วัสดุแลกเปลี่ยนไอออนที่จำเพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (Selective ion exchange) บดผสมเชิงกลกับอนุภาคของแม่เหล็ก โดยให้วัสดุทั้งสองชนิดติดกันในเชิงกายภาพ สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา เลขที่ 4,661,327 อธิบายกระบวนการแยกสารพิษออกจากดินที่ถูกปนเปื้อนโดยการผสมดินเข้ากับอนุภาคแม่เหล็กที่เคลือบด้วยเรซินชนิดไอออนบวก หรือไอออนลบ (Cation/anion resin polymer) ซึ่งมีความจำเพาะกับสารเคมีนั้นๆ จากนั้น จึงใช้แม่เหล็กดูดแยกสารผสมของเรซินและแม่เหล็ก (Resin-magnetic composites) ออกจากดินที่ปนเปื้อน

10

สิทธิบัตรสหรัฐอเมริกา เลขที่ 7,563,939 แสดงการแยกกากกัมมันตรังสีชนิดซีเซียม โดยใช้สมบัติความเป็นแม่เหล็กของสารนิเกิล (Nickel) หรือ โคบอลต์ ซึ่งเตรียมจากกระบวนการตกตะกอนร่วม (co-precipitation) กับสารเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (hexacyanoferrate) เพื่อใช้ดูดซับซีเซียมจากของเสียนิวเคลียร์ จากนั้น จึงแยกอนุภาคนิกเกิลหรือโคบอลต์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตที่ดูดซับซีเซียมไว้ ออกจากแหล่งปนเปื้อนโดยใช้แท่งแม่เหล็ก หรือแม่เหล็กไฟฟ้า ดูดรวบรวมแล้วแยกออกมา อย่างไรก็ตาม สารประกอบเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตชนิดนี้ มีค่าสมบัติความเป็นแม่เหล็กค่อนข้างต่ำ จึงต้องใช้สนามแม่เหล็กที่มีกำลังสูงมากในการแยกวัสดุหลังการดูดซับ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงและยุ่งยากหรือสิ้นเปลืองพลังงานมากขึ้น อีกทั้ง การดูดกลับอาจเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความเป็นแม่เหล็กที่น้อยมากของนิกเกิลหรือโคบอลต์เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตเอง นอกจากนี้ การใช้สารนิกเกิลและโคบอลต์ ยังอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมในธรรมชาติอีกด้วย จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นถึงการนำวัสดุผสมของอนุภาคแม่เหล็กและเรซิน (Magnetic – resin composites) มาใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป เช่น ผลิตภัณฑ์ MEX[®] ของบริษัท Orica Australia Pty Ltd. พบว่า ในขั้นตอนการแยกวัสดุจากสิ่งปนเปื้อนนั้น หากอนุภาคแกนกลางแม่เหล็กถาวร (Magnetic core) ซึ่งมีความเป็นแม่เหล็กถาวรจะช่วยให้อนุภาคของวัสดุผสมแม่เหล็ก-เรซิน สามารถเกาะรวมกันแล้วตกตะกอนได้เร็วขึ้น ซึ่งกลไกนี้ โดยทั่วไปแล้วจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคของวัสดุผสมแม่เหล็ก-เรซินมีขนาดใหญ่ เช่น มากกว่าร้อยละไมครอน ผลอย่างไรก็ตาม ผลเสียของการตกตะกอนที่เร็วเกินไป ทำให้จำเป็นต้องกวนวัสดุดูดซับให้กระจายตัวได้ดีอยู่เสมอในสารละลาย เพื่อให้วัสดุดูดซับสัมผัสกับไอออนหรือสารปนเปื้อนอย่างต่อเนื่อง และดูดซับสารปนเปื้อนจนกว่าจะถึงขีดความสามารถสูงสุด ในการดูดซับของตัวดูดซับ

15

20

25


นายสุวัจชัย บุญอารี

Signed by DIP-CA

- นั้นๆ (Maximum absorption capacity) ดังนั้น การเกาะรวมกันของอนุภาควัสดุผสมแม่เหล็ก-เรซิน ถึงแม้จะมีข้อดี คือ ทำให้ง่ายต่อการแยกเรซินออกจากสารละลายที่กำลังทำการบำบัด แต่มีข้อเสีย คือ ทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลงด้วย เนื่องจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับที่น้อยลงอย่างมาก และยังต้องอาศัยพลังงานในการกวนตลอดเวลา โดยเหตุนี้ จึงมีความต้องการที่จะพัฒนาวัสดุผสมที่มีสมบัติการกระจายตัวได้ดี
- 5 ในของเหลว อีกทั้งยังมีค่าความเป็นแม่เหล็กสูง เพื่อให้มีประสิทธิภาพสูงในการแยกวัสดุออกจากของเหลวปนเปื้อน ในกรณีการใช้สารเรซินที่มีความเฉพาะต่อซีซีเอ็ม และมีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อย เคลือบลงบนอนุภาคแม่เหล็ก เพื่อให้ได้อนุภาคในช่วงขนาดนาโนเมตร จึงเป็นวิธีการที่มีศักยภาพสูงที่สามารถจะนำไปประยุกต์ใช้ในการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีซีเอ็ม ออกจากสิ่งแวดล้อมที่ถูกปนเปื้อนได้

การเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์

- 10 การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนและการเคลือบผิวด้วยสารปรัสเซียนบลู เพื่อการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีซีเอ็ม ตามการประดิษฐ์นี้ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอนหลักๆ คือ การเตรียมแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโน และการเคลือบสารประกอบปรัสเซียนบลูลงบนพื้นผิวของแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโนตามรูปที่ 1 แล้วนำไปวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของอนุภาคที่เตรียมได้ และตรวจสอบความสามารถในการดูดซับสารซีซีเอ็ม รวมถึงประสิทธิภาพในการแยกอนุภาคออกจากสารละลาย โดยอาศัยแรงทางแม่เหล็ก
- 15 หรือกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยปรับค่าความเป็นกรดด่างของสารละลาย

1. การเตรียมแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโน

- สำหรับการเตรียมแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโนนี้ สามารถขึ้นรูปได้จากเหล็กออกไซด์เพียงอย่างเดียว หรือออกไซด์ผสมกับธาตุเหล็ก หรือธาตุโลหะทรานซิชันอื่นๆ ที่ช่วยส่งเสริมคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กได้ เช่น นิกเกิลและโคบอลต์ แต่การใช้เหล็กออกไซด์เพียงอย่างเดียวจะมีผลดี คือ เหล็กออกไซด์
- 20 มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมในระดับต่ำ เนื่องจากแร่เหล็กออกไซด์เป็นสินแร่ที่มีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ ซึ่งเหล็กออกไซด์นี้จะถูกเรียกว่า แมกนีไทท์ (Magnetite) มีสูตรทางเคมีคือ Fe_3O_4 และเหล็กออกไซด์จะมีการตอบสนอง (หรือถูกดึงดูด) ต่อสนามแม่เหล็กสูงและมีความเสถียร ซึ่งเหล็กออกไซด์สามารถอยู่ในรูปอื่นๆ ได้ เช่น Fe_2O_3 ซึ่งสามารถนำมาใช้ได้เช่นกัน โดยแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโนนี้ สามารถอยู่ในสถานะทางแม่เหล็กได้หลายสถานะ เช่น พาราแมกเนติก (Paramagnetic) เฟอร์โรแมกเนติก (Ferromagnetic)
- 25 หรือซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic) ซึ่งในการประดิษฐ์นี้ สามารถใช้ได้ทุกสถานะ แต่สถานะที่เหมาะสมที่สุดในการประดิษฐ์นี้ คือ ซูเปอร์พาราแมกเนติก (Superparamagnetic) เนื่องจากอนุภาคไม่มีความเป็นแม่เหล็กในตัวเอง แต่ถูกดึงดูดด้วยสนามแม่เหล็กภายนอกได้ดี ซึ่งมีข้อดีหลายประการ ได้แก่

1. ช่วยลดโอกาสการรวมตัวกันของอนุภาคเหล็กนาโนเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นแล้วตกตะกอน



นายสุวิชัย บุญอารี

Signed by DIP-CA

เนื่องจากอนุภาคแม่เหล็กแบบซูเปอร์พาราแมกเนติก จะไม่มีความเป็นแม่เหล็กถาวรในตัวของอนุภาคเอง จนกว่าจะมีการใช้สนามแม่เหล็กจากภายนอกเข้ามาเหนี่ยวนำ

2. ทำให้อนุภาคแม่เหล็กนาโนสามารถกระจายตัวในของเหลวที่ต้องการบำบัดได้ดี และมีความเสถียร ซึ่งส่งผลให้สามารถเพิ่มเวลาในการที่อนุภาคแม่เหล็กและตัวดูดซับที่เคลือบอยู่จะสัมผัสและดูดซับสาร
- 5 ซีเซียมจากของเหลวที่ต้องการบำบัดได้นานขึ้น โดยไม่ตกตะกอนเร็วเกินไป หรือหากเป็นการบำบัดในระบบถึงปิด ก็จะสามารถลดการใช้พลังงานในการกวนอนุภาคแม่เหล็กให้ลอยตัวสัมผัสกับของเหลวได้
- สำหรับกรรมวิธีการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนนี้ สามารถกระทำได้โดยการนำไปผ่านกระบวนการตกตะกอนร่วมโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส (alkaline coprecipitation) ในตัวกลางที่เป็นน้ำ โดยการสังเคราะห์แกนกลางอนุภาคแม่เหล็กนาโน สามารถเตรียมได้จาก

10 1.1 การเตรียมสารละลาย

- นำสารละลายน้ำของสารเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) และสารละลายน้ำของเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) มาผสมเข้าด้วยกันในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 โดยช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับสารละลายเฟอร์รัสคลอไรด์และสารละลายเฟอร์ริกคลอไรด์ อยู่ในช่วงได้ตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 1 โมลาร์ ทั้งนี้ สารตั้งต้นที่นำมาใช้ในการสังเคราะห์
- 15 อนุภาคแม่เหล็กนาโนนี้ ไม่จำเป็นต้องเป็นเกลือคลอไรด์ของเหล็กเท่านั้น สามารถใช้เกลือซัลเฟต หรือเกลือไนเตรตของเหล็ก (II) หรือเหล็ก (III) ในการทำปฏิกิริยาได้เช่นกัน รวมถึงเกลือในรูปแบบอื่นๆ ของเหล็ก (II) หรือเหล็ก (III) ที่สามารถละลายในตัวทำละลายน้ำได้ดี ผสมสารละลายของเหล็ก (II) และเหล็ก (III) ให้เข้ากัน

1.2 การเติมสารเร่งปฏิกิริยาเบส (Base catalyst)

- โดยเติมสารเร่งปฏิกิริยาเบสลงไปในสารละลายของเหล็ก (II) และเหล็ก (III) เพื่อให้เกิดอนุภาคแม่เหล็กนาโน โดยสารเร่งปฏิกิริยาเบสที่ใช้ในการสังเคราะห์นี้ คือ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.1-15 โมลาร์ ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ใช้สามารถเลือกได้จากทั้งเบสอินทรีย์หรือเบสอินทรีย์ก็ได้ เช่น สารละลายแอมโมเนีย โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โดยทั่วไปแล้วพบว่า การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารเร่งปฏิกิริยา จะทำให้ได้อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่มีขนาดใหญ่มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้แอมโมเนีย นอกจากนี้ การเติมสารละลายเบสควรกระทำอย่างช้าๆ โดยใช้การกวนอย่างสม่ำเสมอ และอาจใช้คลื่นอัลตราโซนิกร่วมด้วยก็ได้ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่สำคัญ
- 25 ที่จะทำให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็ก อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่ได้นี้จะมีอนุภาคที่มีขนาดใหญ่มากเกินไป เช่น มากกว่า 400 นาโนเมตร จะมีพื้นที่ผิวสัมผัส เพื่อใช้ในการดูดซับซีเซียมจากสารละลายได้น้อยลง อีกทั้งยังทำให้เกิดการตกตะกอนอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับซีเซียมออกจากของเหลวหรือแหล่งน้ำที่ต้องการบำบัดลดลง


นายสุวัจชัย บุญอารี

Signed by DIP-CA

นอกจากนี้การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโน ควรทำภายใต้สภาวะบรรยากาศที่ไม่มีก๊าซออกซิเจน หรือภายใต้บรรยากาศของก๊าซเฉื่อย เช่น ก๊าซไนโตรเจนหรืออาร์กอน ช่วยเพิ่มโอกาสทำให้เกิดอนุภาคแม่เหล็กอยู่ในรูปของแมกนีไทต์ เพื่อลดการเกิดอนุภาคแม่เหล็กในรูปของแมกฮีไมท์ (Maghemite, Fe_2O_3) ซึ่งมีค่าความเป็นแม่เหล็กที่ต่ำกว่า มีผลทำให้ประสิทธิภาพของการดึงดูดในสนามแม่เหล็กลดลง

5 1.3 การล้างอนุภาคแม่เหล็กนาโน

ใช้แท่งแม่เหล็กในการดูดแยกอนุภาคแม่เหล็กนาโนออกจากสารละลายแล้วล้างอนุภาคแม่เหล็กนาโน ที่ได้ด้วยน้ำ DI (Deionized Water) หรือเอทานอล 3-4 ครั้ง อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่ได้ จะมีขนาดอนุภาค เฉลี่ยในช่วง 10 - 400 นาโนเมตร ซึ่งสามารถวัดขนาดของอนุภาคได้โดยการใช้เทคนิคการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ตามรูปที่ 2 หรือการวัดขนาดอนุภาคด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง (Dynamic Light Scattering, DLS) หรือเทคนิคทางเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction)

2. การเคลือบสารประกอบปรัสเซียนบลูลงบนพื้นผิวของแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโน

สารประกอบในกลุ่มปรัสเซียนบลูมีสูตรทั่วไปทางเคมีคือ $\text{M}_x\text{Fe}_y[\text{Fe}(\text{CN})_6]_z$ โดย M สามารถเป็นได้ทั้ง โลหะแอลคาไลน์ เช่น โซเดียมหรือโพแทสเซียม หรือโลหะทรานซิชัน เช่น โคบอลต์ หรือ นิกเกิล x,y และ z เป็นจำนวนเต็มที่ทำให้สารประกอบมีประจุลัพท์เป็นกลาง ในการนี้จะหลีกเลี่ยงการใช้โลหะทรานซิชัน เช่น โคบอลต์หรือนิกเกิล เนื่องจากต้องการให้สารดูดซับที่ได้มีความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด จึงเลือกใช้สารตั้งต้น เพื่อให้ได้ M ที่เป็นธาตุโพแทสเซียมหรือเหล็ก จึงทำให้ได้ปรัสเซียนบลูที่มีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ หรือ $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ สำหรับขั้นตอนการเคลือบสารประกอบปรัสเซียนบลู มีขั้นตอนดังนี้

2.1 การทำปฏิกิริยาของสารประกอบปรัสเซียนบลูกับแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโน
20 สำหรับกรรมวิธีการเคลือบสารประกอบปรัสเซียนบลูลงบนพื้นผิวของแกนกลางอนุภาคแม่เหล็กนาโน สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายของเกลือเฟอร์ริก (เช่น FeCl_3 , $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$,) ที่ความเข้มข้น 10^{-3} - 1 โมลาร์ เข้ากับอนุภาคแม่เหล็กนาโน (1-10 mg/mL) ที่อยู่ในสารละลายของเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (เช่น $\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$ หรือ $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$) ที่ความเข้มข้น 10^{-3} - 1 โมลาร์ โดยใช้อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีถึง 24 ชั่วโมง โดยในกระบวนการนี้อนุภาคแม่เหล็กนาโนจะทำหน้าที่เป็นตัวเริ่มต้น การเกิดนิวเคลียสหลักของปรัสเซียนบลู (Nucleation site) เพื่อให้ปรัสเซียนบลูมาเกาะเรียงตัวบนอนุภาคแม่เหล็กดังกล่าว โดยควรเติมสารละลายของเกลือ เฟอร์ริกอย่างช้าๆ เพื่อให้เกิดการเพิ่มขนาดผลึกของปรัสเซียนบลูรอบๆ อนุภาคอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้ อาจนำคลื่นอัลตราโซนิกมาใช้กับกระบวนการสังเคราะห์นี้ เพื่อให้อนุภาคที่

- ได้มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอและป้องกันไม่ให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาคนาโนเป็นอนุภาคที่ใหญ่เกินไป โดยสารที่นำมาใช้ ไม่จำเป็นต้องเป็นเกลือเฟอร์ริกหรือเฟอร์ริกคลอไรด์เท่านั้น อาจใช้เกลือไนเตรต หรือสารละลายของเกลือที่ให้เหล็ก (III) หรือ Fe^{3+} ต่อปฏิกิริยาดังกล่าว และอาจทดแทนเกลือโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (II) ได้ด้วยโซเดียม แอมโมเนียม หรือสารละลายต่างๆ ของเกลือเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต $[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ เป็นต้น โดยอัตราส่วนความเข้มข้นของเฟอร์ริกไอออนต่อเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (II) ไอออนในสารตั้งต้นปฏิกิริยาสามารถปรับเปลี่ยนได้ตั้งแต่ 1.33 ถึง 1 ซึ่งค่าที่เหมาะสมที่สุด สำหรับการเคลือบปรัสเซียนบลูลงบนอนุภาคแม่เหล็กนาโน คือ 1.33 ตามอัตราส่วนปริมาณสัมพันธ์ของสาร (Stoichiometric ratio) ในสูตรโครงสร้างของปรัสเซียนบลู ($\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ หรือ $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$) ซึ่งในกระบวนการเคลือบนี้ จะได้ปรัสเซียนบลูทั้งสองโครงสร้าง คือ ทั้งแบบ $\text{KFe}[\text{Fe}(\text{CN})_6]$ และ $\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$ ผสมกันอยู่บนอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่สังเคราะห์ได้

- การทำปฏิกิริยาระหว่างสารละลายของเกลือเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (II) ที่ความเข้มข้นระหว่าง 10^{-3} ถึง 1 โมลาร์ ผสมกับสารละลายของเหล็กออกไซด์ (ปริมาณ 1-10 mg/mL) โดยใช้อุณหภูมิ 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีถึง 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับให้สารละลายมีค่า pH ในช่วง 2-5 ด้วยกรด เช่น กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลฟิวริก หรือกรดไนตริก โดยค่า pH ที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการนี้ คือ pH 3 ซึ่งหากสารละลายมีความเป็นกรดมากเกินไปจะทำให้อนุภาคแม่เหล็กนาโนถูกออกซิไดซ์ แล้วแปรสภาพจากแมกนีไทท์ (Magnetite, Fe_3O_4) เป็นแมกฮีไมท์ (Maghemite, Fe_2O_3) ส่งผลให้อนุภาคแม่เหล็กนาโนมีค่าความเป็นแม่เหล็กลดลง ทั้งนี้การปรับค่า pH ของสารละลายให้เป็นกรด จะทำให้ผิวหน้าของอนุภาคแม่เหล็กมีประจุเกิดขึ้น จากนั้นไอออนของเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต (II) ในสารละลาย จะเข้าทำปฏิกิริยากับไอออนของเหล็ก (III) บนผิวของอนุภาคแม่เหล็ก เกิดเป็นชั้นของปรัสเซียนบลูเคลือบบนผิวของอนุภาคแม่เหล็กดังกล่าว อย่างไรก็ตาม การเคลือบปรัสเซียนบลูด้วยกระบวนการนี้ มีข้อจำกัดในเรื่องความหนาของชั้นปรัสเซียนบลูที่ได้ แต่มีข้อดี คือเกิดการตกผลึกเกิดได้เร็วและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งอาจเพิ่มความหนาของชั้นปรัสเซียนบลูหลังจากขั้นตอนนี้ โดยการเติมไอออนของเฟอร์ริก ($10^{-3} - 1$ โมลาร์) เพิ่มเข้าไปในสารละลาย เพื่อให้เฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ที่เหลือเข้าทำปฏิกิริยาเพิ่มในระบบ แล้วเกิดการเพิ่มความหนาของชั้นปรัสเซียนบลูบนอนุภาคเหล็กออกไซด์ได้ ทั้งนี้ สามารถปรับแต่งความหนาของชั้นปรัสเซียนบลูที่เคลือบบนผิวอนุภาคแม่เหล็กนาโนได้ โดยควบคุมเวลาที่ใช้ในการเคลือบ (0-24 ชั่วโมง) หรือควบคุมความเข้มข้นของไอออนเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรตหรือไอออนเฟอร์ริกที่ใช้ในกระบวนการเคลือบดังกล่าวมาแล้ว

2.2 การแยกและล้างอนุภาคแม่เหล็กนาโน

สามารถแยกอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบสารปรัสเซียนบลูที่สังเคราะห์ได้ออกจากสารละลายตั้งต้นด้วยแม่เหล็ก (magnetic decantation) แล้วล้างซ้ำด้วยน้ำ DI (Deionized Water) 3-4 ครั้ง อนุภาคแม่เหล็ก

นาโนเคลือบปรัสเซียนบลูที่สังเคราะห์ได้นี้ มีลักษณะสีโทนน้ำเงิน อันเป็นลักษณะเฉพาะของปรัสเซียนบลูที่สามารถสังเกตได้อย่างชัดเจน และสามารถดูดซับได้โดยใช้แม่เหล็กถาวร ต่างจากผงปรัสเซียนบลูบริสุทธิ์ที่ไม่มีแกนของอนุภาคแม่เหล็ก ซึ่งจะไม่สามารถดูดซับได้โดยใช้แม่เหล็กถาวรทั่วไป

- การใช้โดยการนำอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบปรัสเซียนบลูเติมลงในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของสาร
- 5 ซีซีเอ็มให้ทั่วเป็นเวลาอย่างน้อย 4 ชั่วโมง เพื่อให้อนุภาคตัวดูดซับได้ดูดซับซีซีเอ็มได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นจึงทำการแยกอนุภาคแม่เหล็กมาโนออกจากแหล่งน้ำที่ถูกปนเปื้อน โดยการใช้แม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งอาจติดอยู่กับอุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ได้ เช่น เรือ เพื่อทำการแยกอนุภาคที่ได้ดูดซับซีซีเอ็มไว้แล้วออกจากแหล่งน้ำนั้น เพื่อนำไปกำจัดอย่างปลอดภัยต่อไป

- การวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบด้วยสารปรัสเซียนบลูที่สังเคราะห์
- 10 ได้นี้ สามารถทำได้โดยเทคนิค ดังนี้ คือ

1. เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-ray diffraction) (ดังรูปที่ 4) สามารถยืนยันเอกลักษณ์ของแกนอนุภาคแม่เหล็กออกไซด์และชั้นเคลือบผิวปรัสเซียนบลูในอนุภาคที่สังเคราะห์ได้อย่างชัดเจน โดยรูปแบบเอกลักษณ์ทางเอ็กซ์เรย์ (X-ray pattern) ของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบปรัสเซียนบลูที่ได้ เกิดจากการรวมกันเชิงเส้นของรูปแบบเอกลักษณ์ทางเอ็กซ์เรย์ของอนุภาคเหล็กออกไซด์และปรัสเซียนบลู ทำให้สามารถ
- 15 คำนวณอัตราส่วนปริมาณของอนุภาคเหล็กออกไซด์และปรัสเซียนบลูในอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบปรัสเซียนบลูที่สังเคราะห์ได้

2. การวัดค่าศักย์ซีต้า (Zeta potential) ของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบด้วยสารปรัสเซียนบลูที่สังเคราะห์ได้ บ่งบอกถึงความสามารถในการกระจายตัว (dispersion stability) ของอนุภาคในของเหลว (ในที่นี้คือน้ำ) ซึ่งอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีค่าศักย์ซีต้าในช่วงระหว่าง -10 ถึง -70 mV ขึ้นอยู่กับค่า PH ของน้ำ
- 20 ที่ใช้ โดยหากวิเคราะห์ที่ค่า pH เป็นกลาง (pH 7) จะได้ค่าศักย์ซีต้า -30 mV ซึ่งแสดงว่าการกระจายตัวของอนุภาคนาโนในน้ำมีความเสถียรเพียงพอ สอดคล้องกับการสังเกตด้วยตาเปล่าที่พบว่า อนุภาคที่สังเคราะห์ได้นี้สามารถกระจายตัวในน้ำได้นานเป็นเวลาหลายสัปดาห์โดยไม่ตกตะกอน แต่ในขณะเดียวกัน ก็สามารถดูดแยกออกจากน้ำได้อย่างรวดเร็วโดยแนวทางแม่เหล็ก หรือการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วงกรด (pH 3) ซึ่งทำให้อนุภาคตกตะกอนอย่างรวดเร็ว

- 25 3. การวัดสถานะความเป็นแม่เหล็กของอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ พบว่า อนุภาคเหล็กมีค่าความอิ่มตัว (Saturated magnetization) 20 emu/g ตามรูปที่ 3 และอยู่ในสถานะซูเปอร์พาราแมกเนติก (ไม่มีความเป็นแม่เหล็กหลงเหลืออยู่ เมื่อไม่มีสนามแม่เหล็กภายนอก) จุดเด่นของสมบัตินี้ คือ ช่วยลดการรวมตัว (aggregation) และการตกตะกอนที่เร็วเกินไปของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบปรัสเซียนบลูในระบบ

ได้ ขณะทำการบำบัดดูดซับของเสีย แต่ยังคงความสามารถในการถูกดึงดูดด้วยแม่เหล็กที่ดี จึงง่ายต่อการแยกออกจากของเหลวที่ต้องการบำบัดเมื่ออยู่ใช้สนามแม่เหล็ก

4. การวัดความสามารถในการดูดซับซีเซียมออกจากสารละลายน้ำ พบว่าอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบปรัสเซียนบลูที่สังเคราะห์ได้ มีความสามารถในการดูดซับปรัสเซียนบลูที่ดีมาก เช่น สามารถลดความเข้มข้นของซีเซียม (Cs) เริ่มต้นที่มีความเข้มข้น 500 ppm ให้เหลือเพียง 200 ppm เมื่อใช้อนุภาคในปริมาณ 0.4 g/L ที่ค่า pH7 อุณหภูมิห้อง (27 องศาเซลเซียส) ในเวลา 4 ชั่วโมง ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์จากกราฟของแลงเมียร์ (ดังรูปที่ 5) พบว่าอนุภาคที่สังเคราะห์ได้มีค่าความสามารถการดูดซับซีเซียมสูงสุด (maximum absorption capacity) ที่ 100 มิลลิกรัมรมซีเซียมต่อน้ำหนัก 1 กรัมของอนุภาค

10 คำอธิบายรูปเขียนโดยย่อ

รูปที่ 1 แสดงแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโน (ก) และชั้นของปรัสเซียนบลูที่เคลือบบนผิวของอนุภาคแม่เหล็กนาโน (ข)

- รูปที่ 2 แสดงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscope, TEM) ของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบผิวด้วยสารดูดซับปรัสเซียนบลู (กำลังขยาย 100 นาโนเมตร)

รูปที่ 3 แสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของแกนอนุภาคแม่เหล็ก (ก) อนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบผิวด้วยปรัสเซียนบลู (ข) และผงปรัสเซียนบลูบริสุทธิ์ (ค)

รูปที่ 4 แสดงแถบสัญญาณเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชัน (X-Ray Diffraction spectra) ของแกนอนุภาคแม่เหล็ก (ก) ผงปรัสเซียนบลูบริสุทธิ์ (ข) และอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบผิวด้วยปรัสเซียนบลู (ค)

- รูปที่ 5 แสดงกราฟแลงเมียร์ (Langmuir plot) ของการกำจัดซีเซียมออกจากสารละลายด้วยอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบผิวด้วยปรัสเซียนบลู โดยแกนตั้ง (y) คือ ค่าความเข้มข้นของซีเซียมในสารละลายที่สภาวะสมดุล (Equilibrium concentration) ต่อปริมาณของซีเซียมบนตัวดูดซับที่สภาวะสมดุล (Equilibrium amount of Cs absorption) และแกนนอน (x) คือ ค่าความเข้มข้นของซีเซียมในสารละลายที่สภาวะสมดุล (Equilibrium concentration) ซึ่งสามารถคำนวณค่าการดูดซับซีเซียมสูงสุดเท่ากับ 95 มิลลิกรัมซีเซียมต่อหนึ่งกรัมของอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบปรัสเซียนบลู

วิธีการในการประดิษฐ์ที่ดีที่สุด

ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อการเปิดเผยการประดิษฐ์โดยสมบูรณ์


นายสุวิชัย บุญอารี

Signed by DIP-CA

ข้อถ้อยสิทธิ

1. กรรมวิธีการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารประกอบประสานเพื่อการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีเซียม ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน ดังนี้

ก. ขั้นตอนการเตรียมแกนกลางอนุภาคแม่เหล็กนาโน

- 5 - เตรียมสารละลายผสมระหว่างเฟอร์ริกคลอไรด์ (FeCl_3) และเฟอร์รัสคลอไรด์ (FeCl_2) ในอัตราส่วน 2 ต่อ 1 โดยโมล โดยสารละลายสามารถมีความเข้มข้นของเฟอร์ริกคลอไรด์ได้ตั้งแต่ 10^{-3} ถึง 1 โมลาร์
- 10 - กระบวนการตกตะกอนร่วม โดยการเติมตัวเร่งปฏิกิริยาเบส (alkaline coprecipitation) ลงในสารละลายผสมระหว่างเฟอร์ริกคลอไรด์และเฟอร์รัสคลอไรด์ข้างต้น โดยตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่เหมาะสม คือ สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH_4OH) ที่ความเข้มข้นระหว่าง 0.1-15 โมลาร์ เพื่อเหนี่ยวนำให้เกิดอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 10-400 นาโนเมตร
- 15 - ใช้แท่งแม่เหล็กในการดูดแยกอนุภาคแม่เหล็กนาโนออกจากสารละลายแล้วล้างอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่ได้ด้วยน้ำ DI (Deionized Water) หรือเอธานอล
- 20 ข. ขั้นตอนการเคลือบสารประกอบประสานบนพื้นผิวของแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโน
 - การทำปฏิกิริยาของสารประกอบประสานบนพื้นผิวของแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโน โดยการเตรียมสารละลายของเกลือโพแทสเซียมเฮกซะไซยาโนเฟอร์เรต ($\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$) ในน้ำที่มีความเข้มข้นระหว่าง 10^{-3} ถึง 1 โมลาร์ ผสมกับแกนกลางของอนุภาคแม่เหล็กนาโน (ปริมาณ 1-10 mg/mL) จากขั้นตอน ก. โดยใช้อุณหภูมิในช่วง 25-30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีถึง 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับสารละลาย ให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในช่วง 2-5 โดยค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสม คือ pH 3
 - การแยกและล้างอนุภาคแม่เหล็กนาโน โดยการใช้แท่งแม่เหล็กในการดูดแยกอนุภาคแม่เหล็กนาโนเคลือบสารประกอบประสานบนพื้นผิวออกจากสารละลายแล้วล้างด้วยน้ำ DI (Deionized Water)

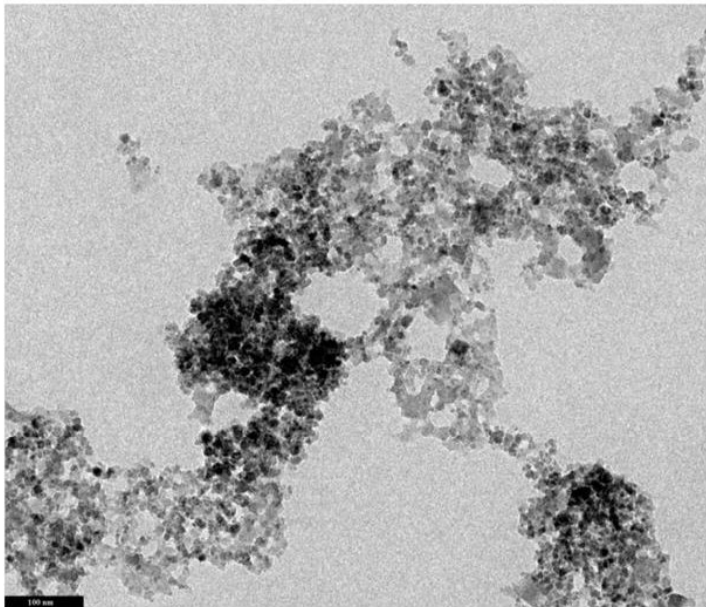
- 25 2. การใช้อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่ได้จากกรรมวิธีการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารประกอบประสานตามข้อถ้อยสิทธิ 1 สำหรับการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีเซียมในแหล่งน้ำที่มีการปนเปื้อนของสารซีเซียม


นายสุวัจชัย บุญอารี

Signed by DIP-CA

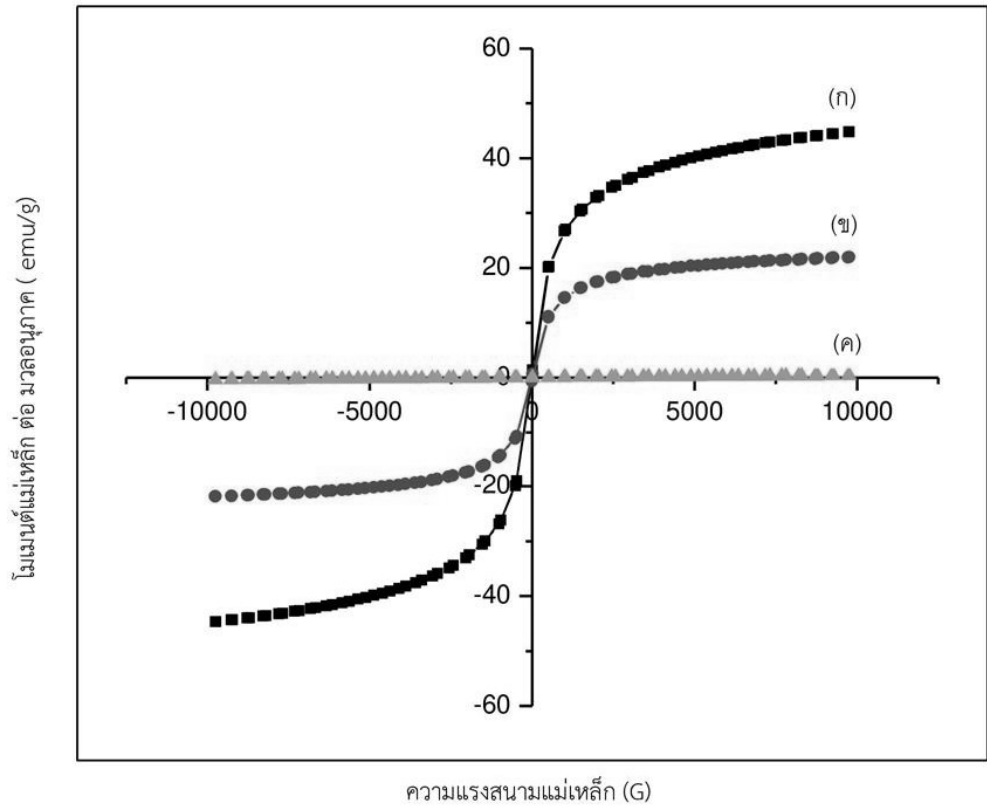


รูปที่ 1



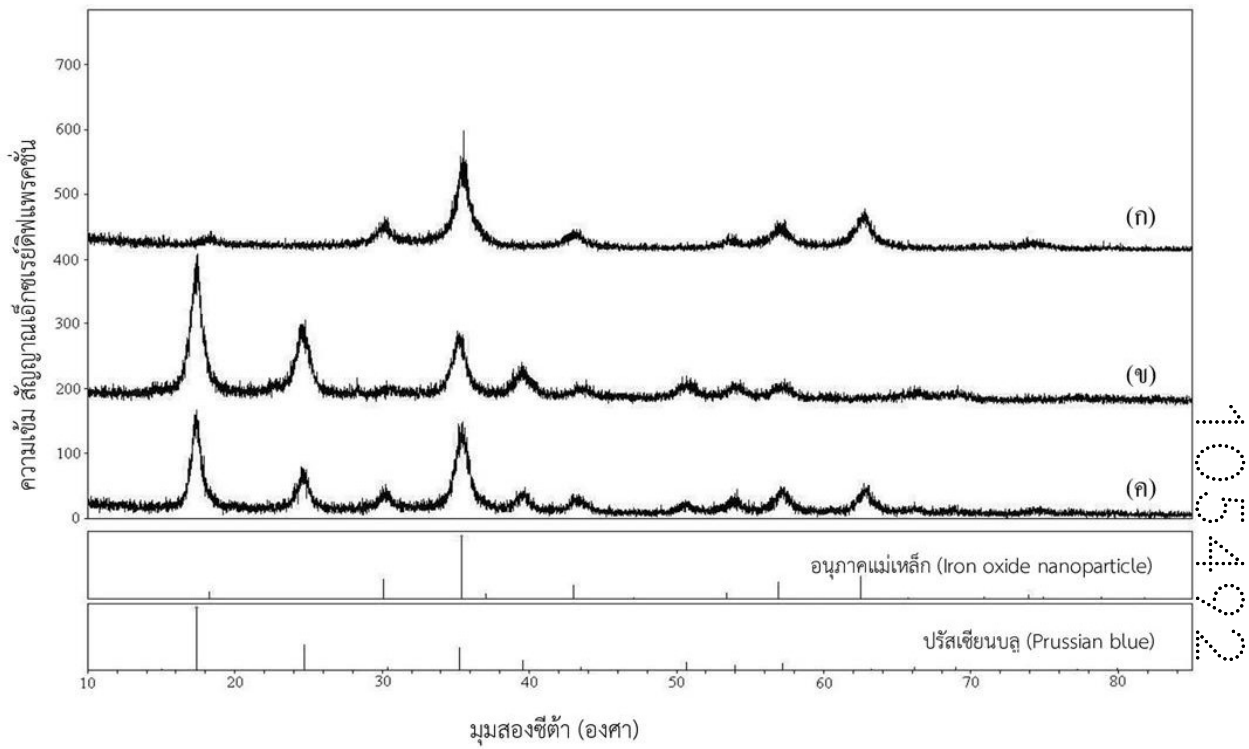
รูปที่ 2

105492

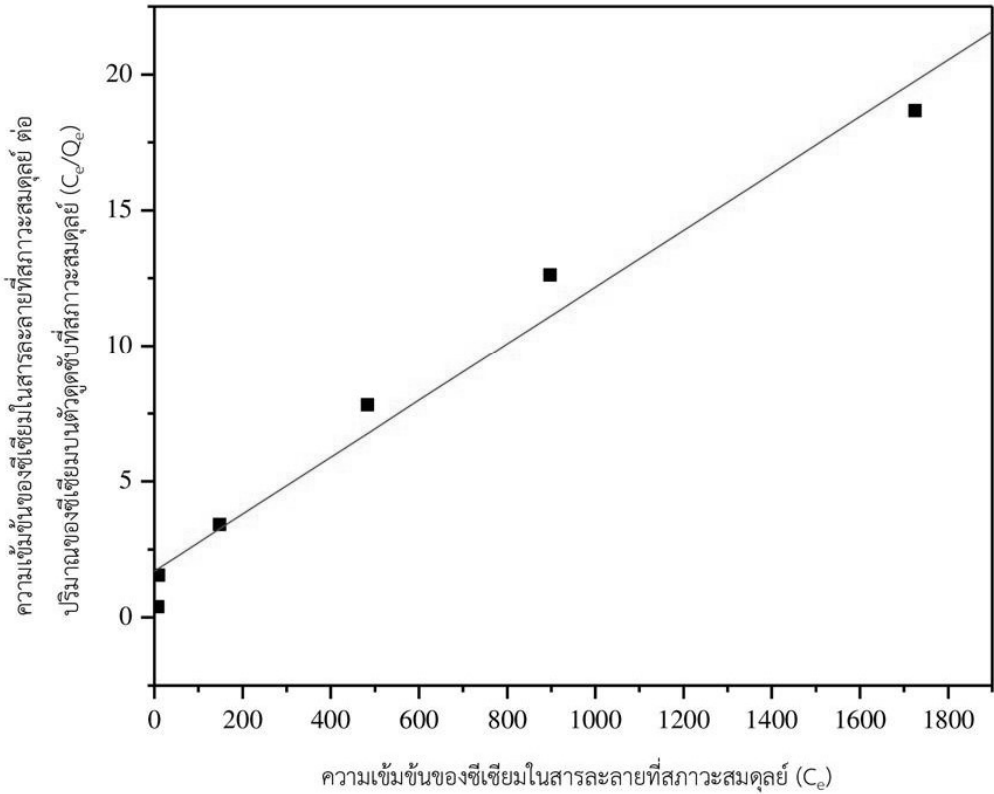


รูปที่ 3

105492



รูปที่ 4



รูปที่ 5

105492

หน้า 1 ของจำนวน 1 หน้า

บทสรุปการประดิษฐ์

- การสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็กนาโนที่มีการเคลือบผิวด้วยสารปรีสเซียนบลู เพื่อการดูดซับสารกัมมันตรังสีซีเซียม เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับสารกัมมันตรังสีซีเซียม ในการบำบัดของเสียจากโรงงานนิวเคลียร์ หรือในการบำบัดสิ่งแวดล้อมหรือแหล่งน้ำในธรรมชาติซึ่งถูกปนเปื้อนด้วยสารกัมมันตรังสีซีเซียม
- 5 โดยอนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนเมตรที่เตรียมได้ มีพื้นที่ผิวสูง มีความสามารถในการกระจายตัวในน้ำได้ดี ไม่รวมตัวหรือตกตะกอนอย่างรวดเร็ว และสามารถแยกออกจากสารละลายที่ได้รับการบำบัดแล้วได้อย่างรวดเร็วและสะดวก โดยใช้แรงทางแม่เหล็กจากแม่เหล็กถาวรหรือแม่เหล็กไฟฟ้า นอกจากนี้ ยังสามารถแยกอนุภาคแม่เหล็กนาโนที่ดูดซับซีเซียมไว้แล้ว ออกจากของเหลวที่บำบัด โดยการปรับค่าความเป็นกรดต่างของสารละลายให้อยู่ในช่วงกรด ซึ่งจะทำให้อนุภาคตกตะกอนออกมาอย่างรวดเร็ว โดยสามารถใช้ควบคู่กับแรง
- 10 ทางแม่เหล็กในการแยกอนุภาคได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น อนุภาคแม่เหล็กขนาดนาโนเมตรเคลือบปรีสเซียนบลู ที่พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับซีเซียมสูง ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ และสามารถแยกออกจากของเหลวหรือแหล่งน้ำธรรมชาติที่ได้รับการบำบัดแล้วได้อย่างรวดเร็วและสะดวกกว่าเทคโนโลยีการใช้ตัวดูดอย่างเดี่ยวซึ่งไม่มีสมบัติทางแม่เหล็ก หรือมีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ตัวดูดซับซีเซียมขนาดใหญ่ที่ใช้กับอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งให้ความสะดวกในการกรองแยกแต่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับต่ำ

.....
 ๐
 ๐
 ๐
 ๐
 ๐
 ๐



นายสุวิทย์ บุญอารี

Signed by DIP-CA