

การศึกษาความเสถียรทางเคมี-กายภาพ และแนวโน้มการตกผลึกของสารละลายใน ACR MRI Phantom

นงนุช พริงเพราะ เกศณี ศรีวรรณ จันทรา โสภาวรรณ และ พีรพงษ์ แสงประดับ

ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 10 อุบลราชธานี กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ อำเภอเมือง อุบลราชธานี 34000

บทคัดย่อ American College of Radiology (ACR) MRI Phantom เป็นอุปกรณ์มาตรฐานที่สำคัญในการสอบเทียบและควบคุมคุณภาพเครื่อง Magnetic Resonance Imaging (MRI) ซึ่งประสิทธิภาพของ ACR MRI Phantom ขึ้นอยู่กับความเสถียรของสารละลายภายใน การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเสถียรของสารละลาย Nickel (II) chloride (NiCl_2) และ Sodium chloride (NaCl) ภายหลังจากใช้งานเป็นเวลา 1 ปี โดยศึกษาคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพผ่านการวัดค่า pH, อุณหภูมิ, UV-Visible Spectroscopy และสังเกตการตกผลึกของสารละลายโดยใช้เทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ผลการศึกษาพบว่าสารละลายมีค่า pH เฉลี่ย 5.29 ± 0.02 และอุณหภูมิเฉลี่ย $24.0 \pm 0.12^\circ\text{C}$ การวิเคราะห์ UV-Visible Spectroscopy ซึ่งมีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ย 0.027 Abs ที่ $\lambda_{\text{max}} 394 \text{ nm}$ บ่งชี้ว่าความเข้มข้นของ Ni^{2+} ไอออนที่ละลายอยู่ยังคงมีความเสถียรทางเคมีใกล้เคียงระดับ 10 mM การวิเคราะห์สารละลายที่ตกผลึกด้วย XRD พบผลึกผสมของ NaCl , $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งให้เห็นว่าการระเหยของสารละลายมีผลเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของ NiCl_2 และ NaCl สรุปได้ว่าแม้ความเข้มข้นของ Ni^{2+} ไอออนจะมีความเสถียรทางเคมี แต่การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารละลายภายหลังการระเหยและตกผลึก บ่งชี้ว่าสารละลายมีความสัมพันธ์กับสภาวะแวดล้อม การเก็บรักษาที่ไม่เหมาะสมอาจส่งผลต่อความสม่ำเสมอ และความเสถียรของสารละลายที่ใช้ใน ACR MRI Phantom ได้ในระยะยาว ซึ่งอาจนำไปสู่ความคลาดเคลื่อนในการประเมินคุณภาพเครื่อง MRI ได้ ดังนั้นการศึกษานี้จึงเป็นข้อมูลสำคัญในการกำหนดแนวทางควบคุมคุณภาพ และสามารถต่อยอดสู่การพัฒนาสารละลายมาตรฐานสำหรับใช้ภายในหน่วยงาน เพื่อลดต้นทุนและสร้างความยั่งยืนในการควบคุมคุณภาพเครื่อง MRI ของประเทศ

คำสำคัญ: นิเกิลคลอไรด์, โซเดียมคลอไรด์, ACR MRI Phantom, ความเป็นเนื้อเดียวกัน, การตกผลึก

Corresponding author E-mail: Nongnuch.p@dmsc.mail.go.th

Received: 2 August 2025

Revised: 4 December 2025

Accepted: 11 December 2025



บทนำ

การสร้างภาพด้วยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Magnetic Resonance Imaging: MRI) เป็นเครื่องมือวินิจฉัยทางการแพทย์ที่สำคัญ ซึ่งสามารถให้ภาพที่มีความละเอียดสูงโดยไม่ต้องอาศัยรังสีไอออน จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในทางคลินิกสำหรับการตรวจวินิจฉัยระบบประสาท กล้ามเนื้อ และอวัยวะภายใน ความแม่นยำของการสร้างภาพ MRI ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องและความถูกต้องในการสอบเทียบระบบอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะการประเมินสมรรถนะของเครื่องในด้านคุณภาพภาพ (image quality) และความสม่ำเสมอของสัญญาณ สำหรับการสอบเทียบเครื่อง MRI อย่างเป็นระบบนิยมใช้อุปกรณ์มาตรฐานที่เรียกว่า ACR MRI Phantom ซึ่งพัฒนาโดย American College of Radiology (ACR) เพื่อใช้เป็นเครื่องมือทดสอบคุณภาพในเชิงกายภาพและสัญญาณภาพ^(1,2) ภายใน ACR MRI Phantom จะบรรจุสารละลายที่จำลองคุณสมบัติการผ่อนคลายของโปรตอนให้ใกล้เคียงกับเนื้อเยื่อของมนุษย์ ประกอบด้วย Nickel (II) chloride (NiCl_2) และ Sodium chloride (NaCl) ซึ่งมีบทบาทในการควบคุมค่า T1 และ T2 relaxation times⁽³⁾ อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปจะใช้ความเข้มข้น NiCl_2 10 mM และ NaCl 75 mM แม้ว่าสารละลายดังกล่าวจะถูกออกแบบให้คงที่และมีความเสถียรภายใต้สภาวะปกติ แต่ข้อมูลด้านความเสถียร (stability) ของสารละลายเหล่านี้ภายใต้การจัดเก็บในระยะยาวยังมีอยู่อย่างจำกัด

รายงานหลายฉบับพบว่า การเปลี่ยนแปลงค่า pH ของสารละลายสามารถส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อสมบัติทางเคมีของไอออนโลหะ เช่น Ni^{2+} ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่ส่งผลต่อค่า T1 และ T2 relaxation times⁽⁴⁾ ประเด็นเรื่องปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ของ Ni^{2+} ในสารละลายน้ำเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาทางเคมี โดยทั่วไปแล้วไอออน Ni^{2+} มีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสก่อให้เกิด $\text{Ni}(\text{OH})^+$ และนำไปสู่การตกตะกอนของนิกเกิลไฮดรอกไซด์ ($\text{Ni}(\text{OH})_2$) ซึ่งเป็นของแข็งสีเขียว เมื่อค่า pH ของสารละลายสูงขึ้น⁽⁵⁾ จากการศึกษาเชิงปฏิบัติพบว่ามีการตกตะกอนของนิกเกิลสูงถึง 99.9% ที่ pH 9 และ 50°C ซึ่งสอดคล้อง

กับงานของ Zhao CP และคณะ⁽⁶⁾ ที่ระบุว่า $\text{Ni}(\text{II})$ ไอออนเริ่มเกิดไฮโดรไลซิสอย่างมีนัยสำคัญที่ค่า pH ประมาณ 6.0–6.5 และการตกตะกอนของ $\text{Ni}(\text{OH})_2$ จะเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์เมื่อค่า pH เพิ่มขึ้นถึงประมาณ 9.0 การเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่สูงขึ้นนี้อาจลดความเข้มข้นของ Ni^{2+} อิสระในสารละลาย ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของ MRI phantom ขณะที่การลดลงของค่า pH จนต่ำเกินไป (ต่ำกว่า 4.0) อาจส่งผลเสียต่อความเสถียรของสารประกอบอื่นๆ ในระบบ เช่น การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของสารอินทรีย์บางชนิดหรือการกัดกร่อนของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบในสารละลายนิกเกิลเชิงอุตสาหกรรม⁽⁷⁾ นอกจากนี้ ค่า pH ยังมีอิทธิพลต่อการปลดปล่อยนิกเกิลไอออนจากวัสดุบางชนิด โดยงานวิจัยชี้ให้เห็นว่า pH กลางมีการปล่อยไอออนน้อยที่สุด⁽⁸⁾ การควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการรักษาเสถียรภาพของสารละลายและประสิทธิภาพของ ACR MRI Phantom หนึ่งในประเด็นสำคัญที่อาจกระทบต่อสมรรถภาพของสารละลายใน ACR MRI Phantom คือ ความเสี่ยงของการตกผลึกจากสารละลายหรือการตกตะกอนที่เกิดจากปัจจัยทางกายภาพ ซึ่งมักเกิดขึ้นภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ไม่เสถียร เช่น การระเหยของตัวทำละลายหรืออุณหภูมิที่สูงขึ้น จากการศึกษาของ King R และ Mahapatra S⁽⁹⁾, Mishra D และคณะ⁽¹⁰⁾ และ Han X และคณะ⁽¹¹⁾ ที่วิเคราะห์การสลายตัวของความร้อนของ Nickel (II) chloride hexahydrate ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งเป็นรูปแบบที่มักใช้ในการเตรียมสารละลาย พบว่าในสภาวะของแข็ง $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ จะเกิดการสูญเสียน้ำผลึกเป็นขั้นๆ เมื่อได้รับความร้อน โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิประมาณ 100–110°C จะเปลี่ยนไปเป็น $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ และที่ประมาณ 150–160°C จะเปลี่ยนเป็น $\text{NiCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ จากนั้นจะกลายเป็นรูปแบบที่ไม่มีน้ำผลึก (anhydrous NiCl_2) ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300°C การเปลี่ยนแปลงรูปแบบของผลึกเหล่านี้บ่งชี้ว่า NiCl_2 มีความไวต่ออุณหภูมิ และแม้ว่าสารละลายใน ACR MRI Phantom จะถูกจัดเก็บที่อุณหภูมิห้องเป็นหลัก แต่การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในสภาวะที่ไม่สามารถควบคุมได้ เช่น การจัดเก็บในอุณหภูมิสูงกว่า 35–40°C เมื่อมีการ

ขนส่งระหว่างการออกพื้นที่ปฏิบัติงานไปตรวจเครื่อง MRI สามารถส่งผลต่อความสามารถในการละลายของ NiCl_2 โดยความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นจากประมาณ 42.1% ที่ 40°C เป็น 45.0% ที่ 60°C ⁽¹²⁾ ซึ่งอาจเร่งให้เกิดการตกผลึกใหม่จากสารละลายที่อิ่มตัวยิ่งยวดเมื่ออุณหภูมิลดลง หรือมีการระเหยของตัวทำละลายร่วมด้วย ตัวอย่างเช่น กระบวนการตกผลึกที่ใช้การควบคุมอุณหภูมิ เช่น $50\text{--}55^\circ\text{C}$ แล้วเย็นลงมาที่ $20\text{--}25^\circ\text{C}$ เพื่อให้เกิดผลึก^(13,14) การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะลดความเข้มข้นของ Ni^{2+} ที่คงตัวในสารละลายและส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการสร้างภาพของเครื่อง MRI⁽¹⁵⁾

การยืนยันลักษณะผลึกและชนิดของโครงสร้างไฮเดรตสามารถทำได้ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการตรวจสอบชนิดของผลึกในระดับผลึกวิทยา (Crystallographic phase) เช่น $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{NiCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ^(10,16) นอกจากนี้ข้อมูลจาก XRD สามารถนำไปใช้เพื่อปรับปรุงสูตรสารละลายและวางแผนทางการจัดเก็บ ACR MRI Phantom เช่น การควบคุมอุณหภูมิและความชื้น การปิดผนึกภาชนะอย่างแน่นหนา และการปรับค่า pH ให้อยู่ในช่วง 6.0–7.0 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการรักษาสมดุลของไอออนในสารละลายและลดโอกาสการตกผลึก⁽¹⁷⁾ ทั้งนี้ Ni^{2+} ในสารละลาย NiCl_2 มีแนวโน้มเปลี่ยนโครงสร้างเมื่อสัมผัสกับแสง UV และอุณหภูมิห้องในช่วงความยาวคลื่น 350–550 nm ซึ่งสอดคล้องกับ d–d electronic transitions ของ Ni^{2+} ตามที่รายงานโดย Nakamoto K⁽¹⁸⁾ และ Lever ABP⁽¹⁹⁾ ซึ่งสัมพันธ์กับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไฮเดรตที่ตรวจสอบได้ผ่าน XRD การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและความเสถียรของสารละลาย Nickel (II) chloride (NiCl_2) และ Sodium chloride (NaCl) ที่ใช้ใน ACR MRI Phantom จึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้สามารถวางมาตรฐานในการเตรียมการจัดเก็บและการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ สำหรับหน่วยงานศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ 15 แห่งทั่วประเทศ และสำนักรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ อีกทั้งยังช่วยยกระดับความแม่นยำของการทดสอบมาตรฐานคุณภาพเครื่อง MRI ในระดับโรงพยาบาลภาครัฐและเอกชน ดังนั้นงานวิจัยนี้

จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl ที่บรรจุอยู่ใน ACR MRI Phantom (JM Specialty Parts, รุ่น ACR-PH1, USA.) เพื่อประเมินความเสถียรและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสารละลายภายใต้สภาวะแวดล้อมควบคุมในห้องปฏิบัติการพื้นที่เขตสุขภาพที่ 10 ของกลุ่มงานรังสีเครื่องมือแพทย์ ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 10 อุบลราชธานี

วัสดุและวิธีการ

การออกแบบการศึกษา

การศึกษานี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ที่ดำเนินการในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 10 อุบลราชธานี โดยออกแบบเป็นการทดลองภายใต้สภาวะควบคุมเพื่อติดตามการเปลี่ยนแปลงของสารละลาย Nickel (II) chloride และ Sodium chloride ภายใน ACR MRI Phantom ตลอดระยะเวลาศึกษา การตรวจวัดใช้เครื่องมือมาตรฐานที่ผ่านการสอบเทียบตามหลัก ISO/IEC 17025:2017

สารเคมีและตัวอย่าง

สารเคมีที่ใช้ในการศึกษา ประกอบด้วย สารละลาย NiCl_2 และ NaCl ที่อยู่ใน ACR MRI Phantom สารละลายมาตรฐานใน ACR MRI Phantom เป็นชนิดเข้มข้น (standard concentration) (บริษัท ทรู เมท จำกัด, นนทบุรี, ประเทศไทย) โดยมีข้อมูลระบุว่าสารละลายเข้มข้นดังกล่าวเมื่อเจือจางด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 3,710 มิลลิลิตร จะให้สารละลายพร้อมใช้งาน (working solution) ที่มีความเข้มข้นของ Nickel (II) chloride (NiCl_2) 10 มิลลิโมลาร์ และ Sodium chloride (NaCl) 75 มิลลิโมลาร์ ตัวอย่างสารละลายสำหรับการศึกษานี้ได้จาก ACR MRI Phantom ที่ผ่านการจัดเก็บภายใต้มาตรฐานการเก็บรักษาของผู้ผลิตและถูกใช้งานในการตรวจสอบคุณภาพเครื่อง MRI เป็นระยะเวลา 1 ปี นับตั้งแต่การจัดซื้อจัดจ้างโดยศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 10 อุบลราชธานี ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ACR MRI Phantom
(ที่มา: ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 10 อุบลราชธานี)

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวัดอุณหภูมิ FLUKE 52 II Thermometer (Fluke Corporation, USA), pH indicator paper (Whatman, UK), เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) รุ่น 1780001037086 (Metrohm AG, Switzerland) พร้อมหัววัด Unitrode (Metrohm AG, Switzerland), เครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ รุ่น G9865A (Agilent Technologies, USA.), เครื่องชั่งละเอียด (4 ตำแหน่ง) BSA224S-1S (Sartorius AG, Germany) ความละเอียด 4 ตำแหน่ง และเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) ดำเนินการที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) จังหวัดนครราชสีมา

การเตรียมตัวอย่างสารละลาย

ดูดสารละลาย NiCl_2 และ NaCl จาก ACR MRI Phantom โดยใช้ไซริงค์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร กรองสารละลายผ่านกระดาษกรอง No.1 เทสารละลายที่กรองแล้วลงในขวดรูปชมพู่ที่สะอาด ปิดด้วยพาราฟิล์ม และจัดเก็บในสภาวะอุณหภูมิห้อง ($22-25^\circ\text{C}$) ตลอดระยะเวลาการทดลอง ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับการทดลอง ($n = 3$)

การประเมินความเสถียรของสารละลาย (Stability Assessment)

การวัดอุณหภูมิ (Temperature Measurement)

ใช้เครื่องวัดอุณหภูมิ FLUKE 52 II Thermometer จุ่มโพรบลงในตัวอย่างสารละลายแต่ละชุด บันทึกค่าอุณหภูมิเมื่อเครื่องแสดงผลคงที่ ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

การวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Measurement)

ทำการตรวจสอบเบื้องต้นโดยใช้กระดาษ pH indicator paper เพื่อประเมินช่วงค่าความเป็นกรด-ด่างอย่างคร่าวๆ จากนั้นวัดค่า pH อย่างแม่นยำด้วย pH meter โดยทำการปรับเทียบเครื่องก่อนใช้งานทุกครั้งด้วยสารละลายบัฟเฟอร์มาตรฐานที่มีค่า pH 4.00, 7.00 และ 10.00 ทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง สำหรับแต่ละตัวอย่าง

การวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิล สเปกโทรโฟโตเมตรี (UV-Vis Spectrophotometry)

สารละลาย NiCl_2 ที่ได้จาก ACR MRI Phantom และสารละลายมาตรฐาน การวิเคราะห์โดยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy บรรจุสารละลายลงใน cuvette โดยใช้ น้ำกลั่น (deionized water) เป็น blank

reference จากนั้นทำการสแกนค่าการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350–550 นาโนเมตร ซึ่งครอบคลุมบริเวณที่แสดงลักษณะของ d-d electronic transitions ของ Ni^{2+} ตามรายงานของ Nakamoto K⁽¹⁸⁾ และ Han X⁽¹¹⁾

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl จากการสังเกตการตกผลึกโดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (Analysis of the NiCl_2 and NaCl Solution Transformation through Crystallization Observation using X-ray Diffraction)

การศึกษาการตกผลึกนี้เป็นการทดลองในสภาวะเร่งโดยเทสารละลาย NiCl_2 และ NaCl ลงในจานระเหยที่สะอาด แล้ววางไว้ในตู้ดูดควันที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อมอุณหภูมิห้อง ($22-25^\circ\text{C}$) จนกว่าสารละลายจะระเหยแห้ง ทำการสังเกตการเกิดผลึกด้วยตาเปล่า บันทึกภาพถ่ายของผลึกที่เกิดขึ้นในวันที่ 3, 5, 7, 9 และ 14 วัน หรือจนกว่าสารละลายจะแห้ง นำข้อมูลมาวิเคราะห์เชิงคุณภาพถึงลักษณะของการตกผลึกและความสม่ำเสมอของสารละลาย ตัวอย่างผลึกที่ได้จะถูกชั่งน้ำหนัก จากนั้นส่งวิเคราะห์ชนิด องค์ประกอบ และโครงสร้างผลึก โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffraction: XRD) ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) โดยอาศัย beamline ที่รองรับเทคนิค XRD/GIXRD เพื่อระบุชนิดของผลึก เช่น $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ อย่างแม่นยำ^(10,12) ทดสอบ XRD ในสภาวะมาตรฐานประกอบด้วย แรงดันและกระแสของหลอดรังสีเอกซ์ 40 kV และ 30 mA ชนิดของหลอดรังสีเอกซ์ ใช้ $\text{Cu K}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสี เครื่องตรวจวัดสัญญาณ D/tex Ultra 250 โหมดการสแกน Continuous ความเร็วของการสแกน 2.4225 deg/min ความละเอียดของการสแกน 0.02 deg ช่วงมุมของการวัด (2θ) $10.00-90.00$ องศา ช่องเปิดรังสีเริ่มต้น (Incident Slit) $1/2$ องศา ขอบจำกัดช่องเปิดรังสีเริ่มต้น 10 mm

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลประกอบการประเมินค่าทางกายภาพของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl ที่ได้จาก

ACR MRI Phantom โดยใช้ค่าที่วัดได้จากตัวแปรต่างๆ ได้แก่ pH อุณหภูมิ และค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) มาวิเคราะห์เชิงสถิติเบื้องต้น ได้แก่ ค่าต่ำสุด ค่าสูงสุด ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อตรวจสอบความสม่ำเสมอของข้อมูล การเปรียบเทียบค่า pH และค่า λ_{max} กับข้อมูลอ้างอิงจากรวรรณกรรม^(4,5) ถูกใช้เพื่อยืนยันความถูกต้องของระบบสารละลายที่จำลองพฤติกรรมของไอออน Ni^{2+} และตรวจสอบความเสถียรขององค์ประกอบภายใน การวิเคราะห์เชิงคุณภาพดำเนินการผ่านการสังเกตลักษณะการตกผลึกในแต่ละช่วงเวลา (วันที่ 3, 5, 7, 9 และ 14) โดยบันทึกปริมาณ และตำแหน่งของผลึก พร้อมจัดเก็บตัวอย่างผลึกเพื่อวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เพื่อตรวจสอบชนิดและโครงสร้างของผลึกในระดับผลึกวิทยา ซึ่งข้อมูลทั้งหมดนี้ถูกนำมาสังเคราะห์ร่วมกันเพื่อประเมินความเสถียรภาพของสารละลายที่ใช้ใน ACR MRI Phantom มาตรฐานอย่างครอบคลุม

ผล

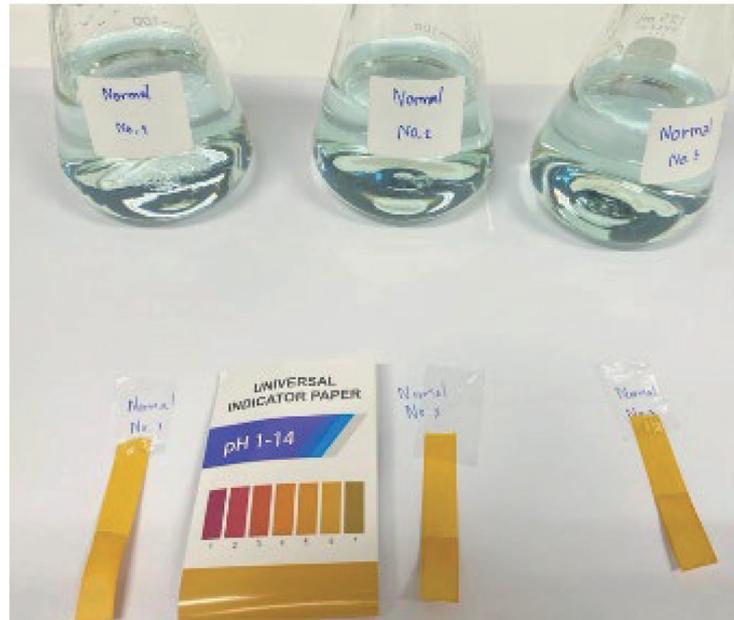
การศึกษานี้ได้นำเสนอผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl ใน ACR MRI Phantom ภายใต้สภาวะแวดล้อมควบคุมในห้องปฏิบัติการ แบ่งผลการศึกษาเป็นประเด็นหลักดังนี้

การประเมินความเสถียรของสารละลาย (Stability Assessment)

ผลการวัดอุณหภูมิของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl ที่จัดเก็บในอุณหภูมิห้อง ($22-25^\circ\text{C}$) ตลอดระยะเวลาการศึกษามีค่าเฉลี่ย $24.0 \pm 0.12^\circ\text{C}$ ผลการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย NiCl_2 มีค่าเฉลี่ย 5.29 ± 0.02 โดยมีค่าต่ำสุดที่ 5.28 และสูงสุดที่ 5.31 ดังแสดงในตารางที่ 1 และการตรวจสอบเบื้องต้นด้วย pH indicator paper แสดงช่วงค่า pH ที่สอดคล้องกัน ดังแสดงในภาพที่ 2

ตารางที่ 1 ค่า pH และอุณหภูมิของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl ใน ACR MRI Phantom

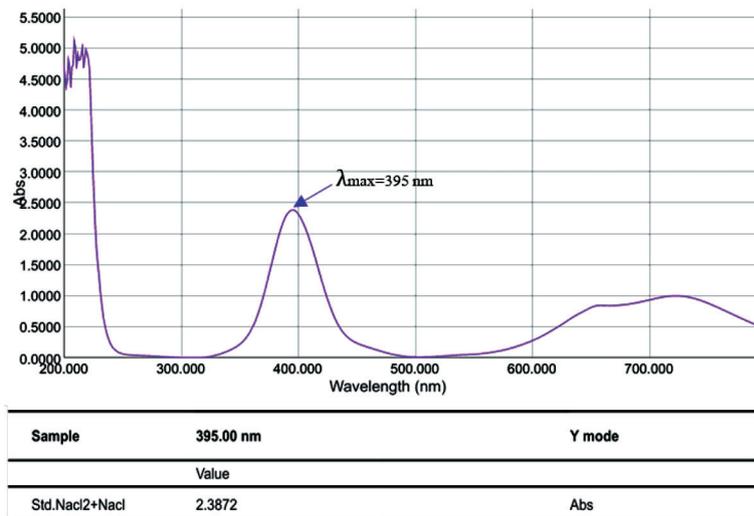
รายการทดสอบ	จำนวนครั้งที่ทำการทดสอบ			Mean±SD
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
pH indicator paper	5	5	5	5±0.0
pH meter	5.31	5.28	5.29	5.29±0.02
Temp °C	23.9	24.1	24.1	24.0±0.1



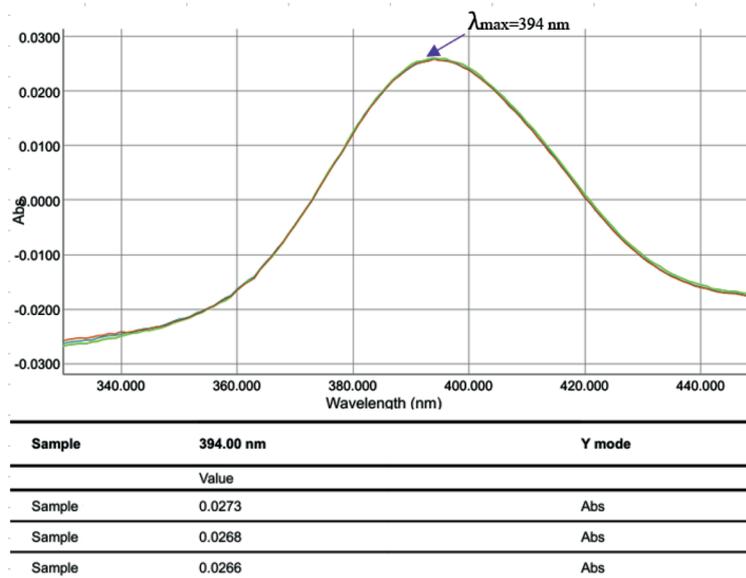
ภาพที่ 2 ตรวจสอบความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl เบื้องต้นด้วยกระดาษ pH indicator paper (ผู้บันทึกภาพ: นางสาวนนุช พริ้งเพระ ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 10 อุบลราชธานี)

ผลการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 350–550 นาโนเมตร ซึ่งครอบคลุมบริเวณที่แสดงลักษณะของ d-d electronic transitions ของ Ni^{2+} สำหรับสารละลายมาตรฐานเตรียมโดย บริษัท ทริท เมต จำกัด ดังแสดงในภาพที่ 3 พบแถบการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ที่ 395 nm โดยมีค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) สูงสุดประมาณ 2.45 Abs รูปแบบสเปกตรัมแสดงการดูดกลืนแสงที่สูงมากในช่วง UV (ต่ำกว่า 250 nm) และมีแถบการดูดกลืนแสงกว้างในบริเวณที่มองเห็นได้ ขณะที่สารละลาย NiCl_2 และ NaCl

ที่ได้จาก ACR MRI Phantom ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งทำการวัดซ้ำ 3 ครั้ง พบแถบการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) ที่ 394 nm โดยมีค่าการดูดกลืนแสงเฉลี่ยสูงสุดประมาณ 0.0273 Abs รูปแบบสเปกตรัมที่สังเกตได้ในสารละลายทั้งสองประเภท ดังแสดงในภาพที่ 3 และ 4 แสดงลักษณะโค้งของ d-d electronic transitions ของ Ni^{2+} ไอออนที่คล้ายคลึงกัน โดยมี peak กว้างในช่วงความยาวคลื่นประมาณ 350–550 nm สรุปค่า λ_{max} และ Absorbance สูงสุดที่ได้จากการวิเคราะห์ UV-Vis Spectroscopy ของสารละลายทั้งสองประเภท ดังแสดงในตารางที่ 2



ภาพที่ 3 สเปกตรัม UV-Visible ของสารละลายมาตรฐาน NiCl₂ + NaCl เตรียมโดย บริษัท ทรีท เมด จำกัด



ภาพที่ 4 สเปกตรัม UV-Visible ของสารละลาย NiCl₂ + NaCl (n = 3) ที่ได้จากตัวอย่าง ACR MRI Phantom

ตารางที่ 2 ผลการวัดการดูดกลืนแสงของสารละลาย NiCl₂ + NaCl จากตัวอย่าง ACR MRI Phantom

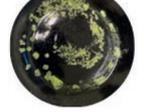
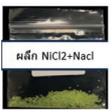
สารละลาย	Wavelength (nm)	จำนวนครั้งที่ทำการวัดค่า			Abs. Max Value	หมายเหตุ
		Absorbance				
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3		
NiCl ₂ + NaCl (Std.) เตรียมโดย บริษัท ทรีท เมด จำกัด	395	-	-	-	2.3827	
NiCl ₂ + NaCl (Sample) ใน ACR MRI Phantom ของศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 10 อุบลราชธานี	393	0.0257	0.0259	0.0256	0.0259	
	394	0.0273	0.0268	0.0266	0.0273	λmax
	395	0.0258	0.0260	0.0257	0.0260	
	396	0.0256	0.0260	0.0257	0.0260	
	397	0.0255	0.0256	0.0254	0.0256	

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของสารละลาย NiCl₂ และ NaCl จากการสังเกตการตกผลึก

ผลการสังเกตการตกผลึก (Crystallization Observation) จากการเฝ้าสังเกตสารละลาย NiCl₂ และ NaCl ที่ระเหยในจานระเหยภายใต้ตู้ดูดควัน พบการเริ่มเกิดผลึกในวันที่ 9 โดยในช่วงแรกพบผลึกขนาดเล็กและมีปริมาณน้อย มีลักษณะเป็นเกล็ดสีเขียวอ่อน ปริมาณผลึกเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเมื่อเวลาผ่านไปและเมื่อสารละลายระเหยแห้งสนิท โดยมีระยะเวลาประมาณ 14 วัน พบว่ามีผลึกจำนวนมาก ปกคลุมทั่วจานระเหย ดังแสดงในตารางที่ 3 ภาพถ่ายภาพการเกิดผลึกของสารละลาย NiCl₂ และ NaCl ในจานระเหยภายใต้การระเหยแห้ง ณ ช่วงเวลาต่างๆ ผลึกที่ได้มีน้ำหนักรวมเฉลี่ย 2.7584 กรัม และตัวอย่างผลึกที่เกิดจากการตกผลึกของสารละลาย NiCl₂ และ NaCl ภายใน ACR MRI Phantom ถูกส่งตรวจวิเคราะห์ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เพื่อระบุชนิดและโครงสร้างของผลึกโดยใช้เทคนิค XRD ภายใต้สภาวะมาตรฐานของเครื่องมือ พบว่าผลึกที่เกิดขึ้นจากการตกผลึกของสารละลาย NiCl₂ และ NaCl มี

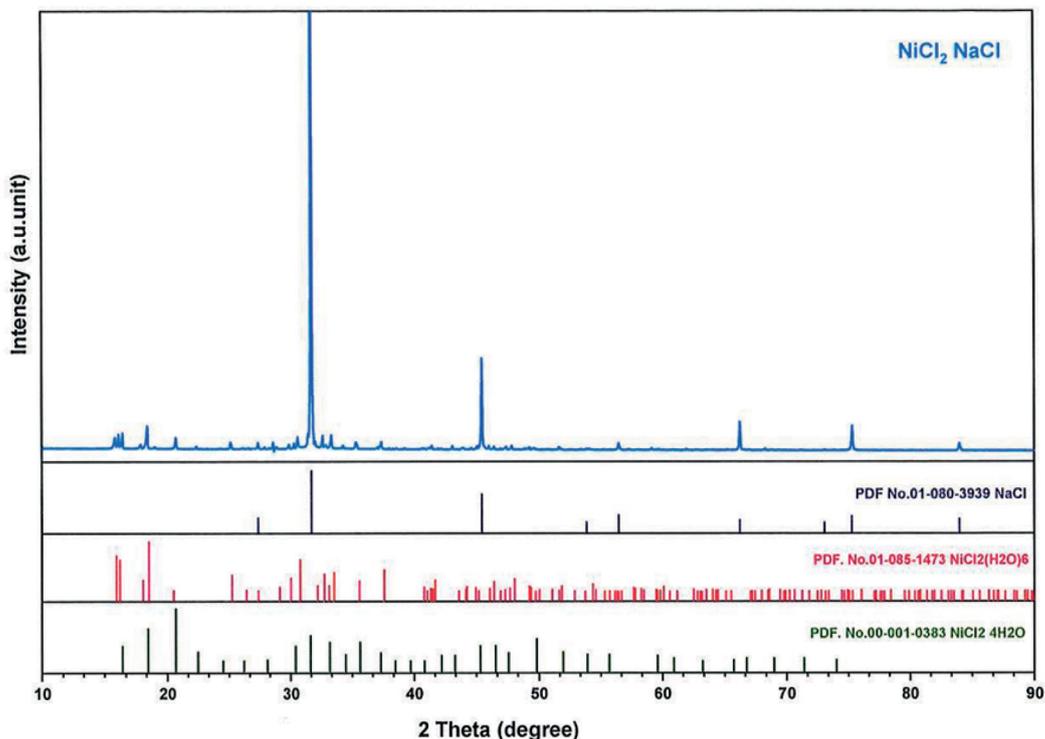
ลักษณะเป็นผลึกผสม (Mixed Crystals) ตรวจพบค่าสัญญาณการเลี้ยวเบน (Diffraction Peaks) ที่สอดคล้องกับโครงสร้างผลึกของโซเดียมคลอไรด์และนิกเกิล (II) คลอไรด์ในรูปไฮเดรต ได้แก่ NiCl₂·6H₂O และ NiCl₂·4H₂O ผลแสดงให้เห็นว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารละลายภายหลังการระเหย และตกผลึก โดยเฉพาะในบริเวณที่ความเข้มข้นของไอออนเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสถานะของ Ni²⁺ และการเกิดผลึกในรูปแบบไฮเดรตที่แตกต่างกัน การตรวจพบผลึก NiCl₂·6H₂O และ NiCl₂·4H₂O ยืนยันว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสัมพันธ์กับสภาวะแวดล้อม เช่น ความชื้นและอุณหภูมิ ซึ่งอาจมีผลต่อความสม่ำเสมอและความเสถียรของสารละลายที่ใช้ใน ACR MRI Phantom ได้ในระยะยาว การทดสอบนี้จึงเป็นข้อมูลสำคัญที่แสดงให้เห็นถึงพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงเชิงโครงสร้างของสารละลาย NiCl₂ และ NaCl เมื่ออยู่ในสภาวะแวดล้อมปกติ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบทางฟิสิกส์และเคมีอื่นๆ เช่น ค่า pH และการดูดกลืนแสงที่บ่งชี้แนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบสารละลาย ดังแสดงในภาพที่ 5 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 สังเกตการตกผลึกของสารละลาย NiCl₂ และ NaCl

วันที่สังเกต	สถานะของสารละลาย	สีของผลึก	หมายเหตุ	ภาพประกอบ
3	ของเหลวใสสีเขียว ไม่มีผลึก	-	ยังไม่เกิดการตกผลึก	
5	เกิดผลึกบริเวณขอบจานระเหย และสารละลายยังมีสีของเหลวมากกว่า 80% ในจานระเหย	สีขาวใส	เริ่มเกิดผลึกอย่างช้าๆ	
9	สารละลายเริ่มปรากฏผลึก เห็นชัดเจนทั่วจานระเหย แต่ยังมีสีของเหลวที่ระเหยไม่หมด	สีเขียวอ่อน	เกิดผลึกเริ่มมีลักษณะเป็นเกล็ดละเอียด	
12	สารละลายเริ่มปรากฏผลึก เห็นชัดเจนทั่วจานระเหย	สีเขียว	ผลึกเป็นก้อนเล็กๆ กระจายในจานระเหย เป็นเกล็ด	
14	สายละลายแห้งสนิท เห็นเป็นผลึกทั่วจานระเหย	สีเขียวอ่อน	ชุดผลึกส่งตรวจวิเคราะห์ XRD	

จากการสังเกตการตกผลึกของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl ภายใต้สภาวะควบคุมอุณหภูมิห้อง ($22-25^\circ\text{C}$) พบว่าการตกผลึกเริ่มปรากฏในวันที่ 5 โดยมีผลึกสีขาวใส เกาะอยู่ที่บริเวณขอบจานระเหย ในขณะที่สารละลาย ยังคงอยู่ในรูปของเหลวมากกว่า 80% ของปริมาตร ทั้งหมด จากนั้นในวันที่ 9 พบผลึกกระจายทั่วจานระเหย มีลักษณะเป็นเกล็ดสีเขียวอ่อน และปรากฏชัดเจนยิ่งขึ้น ในวันที่ 12 โดยผลึกมีลักษณะเป็นก้อนขนาดเล็ก สีเขียวเข้ม กระจายทั่วพื้นผิวจาน เมื่อเข้าสู่วันที่ 14 สารละลายระเหย แห้งหมด พบผลึกสีเขียวอ่อนปกคลุมทั่วจาน สามารถ ชูดเก็บเป็นผลึกของแข็งเพื่อนำไปวิเคราะห์โครงสร้าง ผลึก สารละลาย NiCl_2 และ NaCl ที่ใช้ในการทดลอง มีปริมาตรรวม 300 ml ($n = 3$) และสามารถเก็บรวบรวม ผลึกที่ได้หลังการระเหยเป็นเวลา 14 วัน ได้ปริมาณ 2.7584 กรัม ซึ่งมากกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดไว้สำหรับการส่ง วิเคราะห์ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction ซึ่งกำหนด ขั้นต่ำไว้ที่ 2.0000 กรัม โดยตัวอย่างผลึกถูกส่งตรวจ ณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เพื่อระบุ

ชนิดและโครงสร้างผลึก⁽⁸⁾ ผลการตกผลึกที่พบเป็นการ ยืนยันถึงศักยภาพในการเกิดความไม่แน่นอนเดียวกัน หากสภาวะการจัดเก็บไม่เหมาะสมจนเกิดการระเหย ของน้ำ แต่ไม่ใช่สิ่งที่เกิดขึ้นภายใต้การใช้งานปกติของ ACR MRI Phantom ที่ปิดสนิท และผลการวิเคราะห์ ด้วยเทคนิค X-ray Diffraction พบว่าผลึกที่ได้จาก การตกผลึกของสารละลาย NiCl_2 และ NaCl มีลักษณะ เป็นผลึกผสม โดยตรวจพบค่าสัญญาณ (2θ) ที่ตรงกับ โครงสร้างผลึกของโซเดียมคลอไรด์และนิกเกิล (II) คลอไรด์ในรูปไฮเดรต ได้แก่ $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของ สารละลายภายหลังการระเหยและตกผลึก โดยเฉพาะ ในบริเวณที่ความเข้มข้นของไอออนเพิ่มขึ้นสูง การระบุ ชนิดของผลึกเหล่านี้ยืนยันว่าการเปลี่ยนแปลงสถานะของ Ni^{2+} ในสารละลายมีความสัมพันธ์กับสภาวะแวดล้อม และอาจ ส่งผลต่อความสม่ำเสมอและความเสถียรของสารละลายที่ ใช้ใน ACR MRI Phantom ได้ในระยะยาว ดังแสดงใน ภาพที่ 5 และตารางที่ 4



ภาพที่ 5 การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD pattern) ของผลึกที่ได้จากสารละลายใน ACR MRI Phantom

ตารางที่ 4 องค์ประกอบที่เป็นผลึกของตัวอย่างจาก ACR MRI Phantom ที่ตรวจพบด้วยเทคนิค XRD

องค์ประกอบเคมีที่เป็นผลึกที่ตรวจพบในตัวอย่าง	สูตรโมเลกุล	PDF No.
โซเดียมคลอไรด์	NaCl	01-080-3939
นิกเกิล (II) คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต	NiCl ₂ ·6H ₂ O	01-085-1473
นิกเกิล (II) คลอไรด์เตตระไฮเดรต	NiCl ₂ ·4H ₂ O	00-001-0383

จากตารางที่ 4 พบว่าโซเดียมคลอไรด์เป็นหนึ่งในองค์ประกอบผลึกที่ตรวจพบในตัวอย่างสารละลาย NiCl₂ และ NaCl ที่ใช้ใน ACR MRI Phantom ซึ่งยืนยันได้จากค่าสัญญาณการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ที่สอดคล้องกับ PDF No. 01-080-3939 การตรวจพบ NaCl ในรูปผลึกบ่งชี้ว่าโซเดียมไอออน (Na⁺) และคลอไรด์ไอออน (Cl⁻) จากสารละลายสามารถตกผลึกออกมาได้ภายหลังจากการระเหยของตัวทำละลาย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเข้มข้นและสมดุลของสารละลายที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา และอาจมีผลต่อความสม่ำเสมอของ ACR MRI phantom หากไม่ได้ควบคุมสภาพการจัดเก็บอย่างเหมาะสม

วิจารณ์

การศึกษาครั้งนี้มุ่งเน้นการประเมินคุณสมบัติทางเคมี-กายภาพของสารละลาย Nickel(II) chloride (NiCl₂) และ Sodium chloride (NaCl) ใน ACR MRI Phantom ภายหลังจากการใช้งานเป็นเวลา 1 ปี โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ความเสถียรและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสารละลาย ซึ่งเป็นข้อมูลสำคัญต่อการประเมินคุณภาพการสอบเทียบเครื่อง MRI การศึกษานี้ได้เลือกใช้ตัวบ่งชี้หลายประการ ได้แก่ ค่า pH อุณหภูมิ ค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) และลักษณะโครงสร้างผลึกเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุม โดยค่า pH และอุณหภูมิเป็นปัจจัยพื้นฐานที่ส่งผลต่อสมดุลไอออนและความสามารถในการละลาย ขณะที่ค่าการดูดกลืนแสงใช้ติดตามความเสถียรของสารละลายผ่านการเปลี่ยนแปลงของ λ_{max} และค่า Absorbance เป็นสิ่งสำคัญที่บ่งบอกถึงความเสถียรทางเคมีของ Ni²⁺ ไอออน ซึ่งกำหนดค่า T1 และ T2 relaxation times และการสังเกตการตกผลึกร่วมกับการวิเคราะห์ด้วย XRD ใช้เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลงสถานะทางกายภาพที่ส่งผล

ต่อความเป็นเนื้อเดียวกันของสารละลาย การผนวกเทคนิควิเคราะห์หลายแขนงนี้ทำให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือและสามารถให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับกลไกการเปลี่ยนแปลงของสารละลายได้ครบถ้วนกว่าการศึกษาเพียงปัจจัยเดียว การเปรียบเทียบผลกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง โดยมีผลการศึกษาพบว่าค่า λ_{max} ของ Ni²⁺ ไอออนที่ 394-395 nm ทั้งในสารละลายตัวอย่างและสารละลายมาตรฐาน สอดคล้องกับลักษณะการดูดกลืนแสงของ Ni²⁺ aqua complex ที่ถูกอ้างอิงในวรรณกรรม การเปลี่ยนแปลงค่า pH และการตกผลึกที่ตรวจพบมีความคล้ายคลึงกับรายงานของ Mishra D และคณะ⁽¹⁰⁾ ที่ระบุถึงความไม่เสถียรของ Ni²⁺ ภายใต้อุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงและสอดคล้องกับ Martin E และคณะ⁽¹²⁾ ที่เน้นความสำคัญของการควบคุมองค์ประกอบสารละลายต่อค่าการผ่อนคลายทางแม่เหล็กใน ACR MRI phantom

การศึกษานี้จึงเสริมสร้างความเข้าใจว่าปัจจัยเหล่านี้มีผลกระทบต่อสารละลาย NiCl₂ ในบริบทของ ACR MRI phantom การประเมินความเสถียร ค่า pH และผลกระทบต่อสมดุลไอออน ผลการวัดค่า pH ของสารละลายจาก ACR MRI Phantom มีค่าเฉลี่ย 5.2-5.3 ซึ่งต่ำกว่าช่วงที่เหมาะสม (6.0-7.0) ต่อการรักษาสมดุลของ Ni²⁺ ไอออน แม้ค่า pH ในช่วงนี้อาจยังไม่สูงพอที่จะกระตุ้นการตกตะกอนของ Ni(OH)₂ อย่างมีนัยสำคัญ แต่ค่า pH ที่ต่ำลงนี้อาจส่งผลต่อความเสถียรของ Ni²⁺ aqua complex ตามที่ Baes CF และ Mesmer RE⁽⁴⁾ ได้รายงานไว้และอาจเร่งให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างไฮเดรตหรือส่งผลต่ออัตราการละลาย/ตกผลึกเมื่อรวมกับปัจจัยอื่น ความเสถียรทางเคมีและความเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ จากการวิเคราะห์ด้วย UV-Vis Spectroscopy พบว่าค่า λ_{max} ของสารละลายตัวอย่าง (394 nm) และสารละลาย

มาตรฐาน (395 nm) มีความใกล้เคียงกันมาก บ่งชี้ว่า Ni^{2+} ไอออนยังคงอยู่ในรูปแบบทางเคมีเดิม การคำนวณความเข้มข้นจากการดูดกลืนแสงยืนยันว่าความเข้มข้นของ Ni^{2+} ที่ละลายอยู่ยังคงอยู่ในระดับใกล้เคียง 10 mM หลังจากใช้งานมา 1 ปี แสดงถึงความเสถียรทางเคมี แม้ความเข้มข้นทางเคมีจะคงที่แต่ผลการสังเกตการตกผลึกโดยการวิเคราะห์ด้วย XRD ที่ระบุชนิดของผลึกผสม (NaCl , $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ยืนยันว่ามีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพที่สำคัญซึ่งเกิดจากการระเหยของตัวทำละลาย แม้ว่าการเปลี่ยนแปลงเป็น $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ มักเกิดที่อุณหภูมิสูงกว่า 100–110°C⁽¹⁰⁻¹²⁾ แต่การตรวจพบในที่นี้บ่งชี้ว่าอาจเกิดจากสภาวะ microenvironment ที่เอื้อต่อการสูญเสียน้ำผลึกแม้ในอุณหภูมิห้อง ซึ่งหากพบการมีอยู่ของผลึกเหล่านี้ย่อมทำให้สารละลายไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทัวทั้ง ACR MRI phantom ส่งผลให้คุณสมบัติการผ่อนคลาย (T_1 , T_2 relaxation times) ไม่สม่ำเสมอในแต่ละบริเวณ และอาจลดความแม่นยำของการสอบเทียบเครื่อง MRI ได้

ผลกระทบและข้อเสนอแนะจากผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่าสารละลายใน ACR MRI Phantom แม้จะยังคงความเข้มข้นของ Ni^{2+} ที่ละลายอยู่ได้ แต่อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ส่งผลกระทบต่อความเป็นเนื้อเดียวกันในระยะยาว การศึกษาครั้งนี้จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนเพื่อปรับปรุงมาตรฐานการเตรียม การจัดเก็บ และการใช้งาน ACR MRI Phantom โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้ การควบคุมสภาวะการจัดเก็บควรควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในห้องจัดเก็บอย่างเคร่งครัดเพื่อลดอัตราการระเหยของน้ำ การปิดผนึกภาชนะควรตรวจสอบและปรับปรุงการปิดผนึกภาชนะของ ACR MRI phantom ให้แน่นหนาเพื่อป้องกันการระเหยของน้ำและการปนเปื้อน การควบคุมค่า pH ควรพิจารณาปรับและควบคุมค่า pH ของสารละลายให้อยู่ในช่วง 6.0–7.0 เพื่อรักษาเสถียรภาพของ Ni^{2+} ไอออน การเฝ้าระวังและการเปลี่ยนสารละลายควรจัดทำโปรแกรมการตรวจสอบคุณภาพสารละลายเป็นระยะ (เช่น ทุก 6 เดือน หรือ 1 ปี) อาจรวมถึงการวัด pH การดูดกลืนแสง และการสังเกตการตกผลึก เพื่อ

ประเมินความเสื่อมสภาพและกำหนดอายุการใช้งานที่เหมาะสม

งานวิจัยนี้มีข้อจำกัด ได้แก่ การทดสอบที่ดำเนินการภายใต้สภาวะห้องปฏิบัติการ ซึ่งไม่ครอบคลุมความหลากหลายของสภาวะแวดล้อมจริงในโรงพยาบาล นอกจากนี้ยังไม่มีเปรียบเทียบกับ ACR MRI Phantom ที่ใช้งานนานกว่า 5 ปี และยังไม่มีการวัดค่าการผ่อนคลาย (T_1 , T_2) โดยตรง ซึ่งถือเป็นช่องว่างการวิจัยที่ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมต่อไป ดังนั้นงานวิจัยในอนาคตควรดำเนินการในหลายมิติ ได้แก่ การศึกษาเปรียบเทียบสารละลายที่เตรียมใหม่กับสารละลายที่มีอายุการใช้งานนานภายใต้สภาวะแวดล้อมจริง การทดสอบความทนต่อสภาวะแวดล้อมที่หลากหลาย temperature cycling, humidity exposure, UV irradiation การวัดผลต่อค่าการผ่อนคลายจริงของ ACR MRI Phantom ผ่าน MRI system โดยตรงการจัดทำฐานข้อมูลค่าพารามิเตอร์มาตรฐาน เช่น pH, Absorbance, XRD peak และ T_1/T_2 เพื่อใช้เป็นเกณฑ์อ้างอิงในการตรวจสอบความเสื่อมของ ACR MRI Phantom ในระยะยาว

สรุป

การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพของสารละลาย Nickel (II) chloride (NiCl_2) และ Sodium chloride (NaCl) ที่ใช้ใน ACR MRI Phantom มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความเสถียรและลักษณะการเปลี่ยนแปลงของสารละลายภายหลังการใช้งานเป็นเวลา 1 ปี ผลการวิเคราะห์ค่า Absorbance บ่งชี้ว่า Ni^{2+} ไอออนในสารละลายยังคงรักษาระดับความเข้มข้นที่ละลายอยู่ได้ใกล้เคียงกับค่าเตรียม 10 mM แสดงถึงความเสถียรทางเคมี อย่างไรก็ตามผลการสังเกตการตกผลึกและการวิเคราะห์ X-ray Diffraction (XRD) ได้ยืนยันการมีอยู่ของผลึกผสม (NaCl , $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ และ $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ซึ่งบ่งชี้ว่าอาจมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของสารละลายได้หากเก็บรักษาในสภาวะที่ไม่เหมาะสมจนเกิดการระเหย และสารละลายมีค่า pH ที่ค่อนข้างต่ำ (5.2–5.3) ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจส่งเสริมการเปลี่ยนแปลงนี้ การเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่ทำให้

สูญเสียความเป็นเนื้อเดียวกันดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติการผ่อนคลาย (T1, T2 relaxation times) และลดความแม่นยำของการสอบเทียบเครื่อง MRI ในระยะยาว การศึกษานี้จึงเป็นข้อมูลสนับสนุนที่สำคัญในการกำหนดแนวทางมาตรฐานสำหรับการเตรียมการจัดเก็บ และการใช้งานสารละลาย โดยเน้นการควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม การป้องกันการระเหยของน้ำ และการแผ่รังสีคุณภาพสารละลายอย่างสม่ำเสมอ เพื่อให้ ACR MRI Phantom สามารถรักษาประสิทธิภาพ และความน่าเชื่อถือได้อย่างต่อเนื่อง การปฏิบัติตามแนวทางที่ได้จากการศึกษานี้จะช่วยให้ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ทั้ง 15 แห่งทั่วประเทศสามารถยืดอายุการใช้งานที่นำเชื่อถือของ ACR MRI Phantom ลดความเสี่ยงในการสอบเทียบเครื่อง MRI ที่ผิดพลาด ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการวินิจฉัยโรคของผู้ป่วย และอาจช่วยลดต้นทุนที่เกิดจากการจัดซื้ออุปกรณ์ใหม่ก่อนเวลาอันควร

การเปิดเผยการใช้ปัญญาประดิษฐ์

บทความฉบับนี้มีการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence; AI) เพื่อช่วยในการปรับปรุงภาษา และแก้ไขไวยากรณ์ของต้นฉบับบทความที่ผู้นิพนธ์เขียนขึ้นเอง ทั้งนี้ผู้นิพนธ์ได้ตรวจสอบความถูกต้อง ความครบถ้วน และความสอดคล้องของเนื้อหาทางวิชาการทั้งหมดด้วยตนเอง รวมทั้งเป็นผู้รับผิดชอบ ต่อเนื้อหาและข้อผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นทั้งหมดในบทความนี้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์การแพทย์ที่ 10 อุบลราชธานี กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ สำหรับการสนับสนุนเครื่องมือวิทยาศาสตร์ สถานที่ดำเนินการทดลอง และการให้คำปรึกษาเชิงวิชาการตลอดระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย ขอขอบคุณ สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) เป็นอย่างยิ่ง สำหรับการให้บริการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค X-ray Diffraction (XRD) ซึ่งมีส่วนสำคัญอย่างยิ่ง

ต่อความถูกต้องและสมบูรณ์ของข้อมูลการวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณ คณะอาจารย์ที่ปรึกษาทุกท่าน เพื่อนร่วมงาน และผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกภาคส่วน ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ ให้ความช่วยเหลือด้านเทคนิค และสนับสนุนในทุกขั้นตอนของการวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Huston J, Johnson K, Mah E, Viger M. ACR MRI accreditation program phantom imaging tips. *J Am Coll Radiol* 2012; 9(2): 127-30.
- American College of Radiology. ACR MRI quality control manual. Reston, VA: American College of Radiology. [online]. 2018 [cited 2025 Apr 12]. Available from: URL: <https://www.acr.org/-/media/ACR/Files/Accreditation-Manuals/MRI-Manual.pdf>.
- Lerski RA, de Certaines JD. Performance assessment and quality control in MRI by EUROSPIN test objects and protocols. *Magn Reson Imaging* 1993; 11(6): 817-33.
- Baes CF, Mesmer RE. The hydrolysis of cations. New York: Wiley; 1976. p. 241-246.
- Li Y, Zhao MS, Zhou ZY. Effect of pH on the electrochemical properties of Ni(OH)₂. *J Power Sources*. 2002; 110(1): 230-2.
- Zhao CP, Ma YL, Wang LJ, Wu YJ, Ma XJ. Effect of pH on the hydrolysis and precipitation of nickel in sulfate solutions. *Hydrometallurgy* 2013; 131-132: 101-7.
- Pourbaix M. Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions. Oxford: Pergamon Press; 1966. p. 320-330.
- Smith D, Jones B. Release of nickel ions from various alloys at different pH values. *J Mater Sci* 2005; 40(12): 3211-7.
- King R, Mahapatra S. Thermal decomposition of metal chloride hydrates. *Thermochim Acta* 1989; 140: 175-81.

10. Mishra D, Kim D, Kim KH, Lee YS, Kim MS. Thermal decomposition kinetics of $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. *J Therm Anal Calorim* 2009; 98: 137-43.
11. Han X, Zhang L, Liu W. Thermal decomposition mechanism and kinetics of nickel chloride hexahydrate. *Chin J Process Eng* 2011; 11(2): 333-8.
12. Martin E, Davis L, Adams R. Temperature dependence of nickel chloride solubility in aqueous solutions. *Ind Eng Chem Res* 2000; 39(8): 2876-81.
13. Johnson A, Williams S. Controlled crystallization of metal salts from aqueous solutions. *Cryst Growth Des.* 2008; 8(5): 1678-85.
14. Chen Y, Li J, Wang H. Effects of cooling rate on the crystallization behavior of nickel chloride. *Sep Purif Technol* 2012; 95: 234-40.
15. Keenan KE, Stupic KF, Boss MA, Russek SE, Chenevert TL, Prasad PV, et al. Multi-site, multi-platform comparison of MRI systems for diffusion-weighted imaging with the NIST digital and physical phantoms. *Magn Reson Med.* 2015;73(4):1620-8.
16. Suryanarayana C, Norton MG. X-ray diffraction: a practical approach. New York: Plenum Press; 1998. p. 110-25.
17. Cui Y, Li H, Fan C, inventors; Jinchuan Group Co Ltd, assignee. A crystallization method of nickel chloride solution. China patent CN 101126126A. [online]. 2008; [cited 2024 May 20]. Available from: URL: <https://patents.google.com/patent/CN101126126A/en>.
18. Nakamoto K. Infrared and Raman spectra of inorganic and coordination compounds. Part B: Applications in coordination, organometallic, and bioinorganic chemistry. 6th ed. New York: John Wiley & Sons; 2009. p. 180-185.
19. Lever ABP. Inorganic electronic spectroscopy. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier; 1984. p. 450-460.

Physicochemical Stability and Crystallization Tendency of the ACR MRI Phantom Solution

Nongnuch Pringprao, Kesanee Sriwan, Jantra Sopawan, and Peerapong Sangpradub
Regional Medical Sciences Center 10 Ubon Ratchathani, Department of Medical Sciences, Muang District, Ubon Ratchathani 43000, Thailand

ABSTRACT The American College of Radiology (ACR) MRI Phantom is an essential standard device for the calibration and quality control of Magnetic Resonance Imaging (MRI) systems, and its performance depends significantly on the stability of the internal solution. This study aimed to evaluate the stability of the Nickel (II) chloride (NiCl_2) and Sodium chloride (NaCl) solution after one year of use by examining its physicochemical properties, including pH, temperature, UV-Visible spectroscopy, and crystallization behavior using X-ray Diffraction (XRD). The results showed that the solution had an average pH of 5.29 ± 0.02 and an average temperature of $24.0 \pm 0.12^\circ\text{C}$. UV-Visible spectroscopic analysis revealed an average absorbance of 0.027 at λ_{max} 394 nm, indicating that the dissolved Ni^{2+} ion concentration remained chemically stable near the expected 10 mM level. XRD analysis of the crystallized residues identified mixed crystals consisting of NaCl , $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, and $\text{NiCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, suggesting that solution evaporation induced physical changes in both NiCl_2 and NaCl . In conclusion, although the dissolved Ni^{2+} ions retained chemical stability, the structural transformation observed after evaporation and crystallization indicates sensitivity to environmental conditions. Improper storage may affect the long-term homogeneity and stability of the ACR MRI Phantom solution, potentially leading to inaccuracies in MRI quality assessment. Therefore, the findings of this study provide important insights for establishing quality control guidelines and support future development of in-house standard solutions to reduce costs and enhance the sustainability of MRI quality control in Thailand.

Keywords: Nickel chloride, Sodium chloride, ACR MRI Phantom, Homogeneity, Crystallization