Thai Journal of Physics Vol. 37 No. 2 (2020) 34-44

บทความวิชาการ (Article)

การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลครั้งที่ 69 ณ เมืองลินเดา

จินดารัศมี พรหมเผ่า

Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Strasse 1, 85748 Garching, Germany

บทคัดย่อ

การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลครั้งที่ 69 ณ เมืองลินเดา จัดขึ้นตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน ถึง 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 โดยมุ่งเน้นสาขาฟิสิกส์ มีผู้ได้รับรางวัลโนเบล 39 ท่านและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์นานาชาติกว่า 580 คน จาก 89 ประเทศ รวมทั้งผู้แทนจากประเทศไทยทั้ง 6 คนเข้าร่วมในการประชุมครั้งนี้ หัวข้อของการประชุมครั้งนี้คือ ฟิสิกส์เลเซอร์ คลื่นความโน้มถ่วง สสารมืด และจักรวาลวิทยา โดยเป้าหมายการประชุมคือเพื่อแลกเปลี่ยนความรู้ ความคิด และวัฒนธรรมระหว่างนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์และผู้ได้รับรางวัลโนเบล ไม่เพียงแค่การจัดกิจกรรมเชิงวิทยาศาสตร์ เช่น การบรรยาย การอภิปราย และชั้นเรียนระดับผู้เชี่ยวชาญ แต่ยังมีการจัดกิจกรรมทางสังคม เช่น International Get-Together, Bavarian Evening และ Grill & Chill ซึ่งการประชุมครั้งนี้ผู้เขียนเป็นหนึ่งในตัวแทนของคนไทยและยินดีที่จะแบ่งปันประสบการณ์ที่น่าจดจำผ่านบทความนี้

คำสำคัญ: การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบล ณ เมืองลินเดา, ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์, ฟิสิกส์เลเซอร์, คลื่นความโน้มถ่วง, สสารมืด, จักรวาลวิทยา

Abstract

The 69th Lindau Nobel Laureate Meeting was held from 30th June to 5th July 2019 by focusing on physics. Thirty nine Nobel Laureates and around 580 international young scientists from 89 countries included 6 Thai representatives participated in the meeting. The themes of the meeting were laser physics, gravitational waves, dark matter and cosmology. The purposes of the meeting are to exchange knowledge, ideas and cultures between young scientists and Nobel laureates. Not only scientific program was arranged such as lectures, panel discussions and master classes, but also the social program took place, i.e. International Get-Together, Bavarian Evening and Grill & Chill. The author is one of the Thai representatives and delighted to share the memorable experience through this article.

Keywords: Lindau Nobel Laureate Meeting, Nobel Laureates in Physics, Laser Physics, Gravitational waves, Dark matter, Cosmology

การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบล ก่อตั้งขึ้นเมื่อปี พ.ศ. 2494 จากการริเริ่มของสองนายแพทย์ชาวเมืองลินเดา (Lindau) คือ ดร. ฟรานซ์ คาร์ล ไฮน์ (Dr. Franz Karl Hein) และ ศาสตราจารย์ ดร. กุสตาฟ วิลเฮล์ม เพอเรด (Professor Dr. Gustav Wilhelm Parade) รวมทั้ง เคานต์ เลนนาร์ต เบอร์นาดอตต์ แห่งวิสบอร์ก (Count Lennart Bernadotte af Wisborg) หนึ่งในสมาชิกราชวงศ์สวีเดน ทั้งสามท่านตระหนักถึงความสำคัญของการประชุมนี้โดยมีจุดมุ่งหมายหลักคือ การแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ระหว่างผู้ได้รับรางวัลโนเบลและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ รวมถึงการสร้างแรงบันดาลใจและเครือข่ายที่ยั่งยืนของนักวิทยาศาสตร์ทั่วโลก โดยการประชุมจะถูกจัดขึ้นที่เกาะลินเดา สาธารณรัฐเยอรมนี เป็นประจำทุกปี ในแต่ละปีจะเน้นสาขาฟิสิกส์ เคมี หรือการแพทย์ หมุนเวียนไป โดยทุกห้าปีจะจัดเป็นการประชุมสหวิทยาการที่รวมทั้งสามสาขา นอกจากนั้นทุกสามปีจะมีการประชุมสำหรับวิทยาศาสตร์เชิงเศรษฐศาสตร์อีกด้วย

ในส่วนของประเทศไทยนั้น สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เมื่อทรงทราบเกี่ยวกับรายละเอียดงานประชุมนี้ และทรงเห็นว่ามีเยาวชนจากนานาประเทศเข้าร่วมเป็นจำนวนมาก รวมทั้งตัวแทนจากเพื่อนบ้าน เช่น มาเลเซีย สิงคโปร์ อินเดีย จีน แต่ไม่เคยมีเยาวชนไทย จึงมีพระราชประสงค์ให้นักศึกษา นักวิจัย และนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ของไทย ได้มีโอกาสเข้าร่วมการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบล ณ เมืองลินเดา เพื่อเปิดโลกทัศน์ทางวิชาการ อีกทั้งได้มีโอกาสเรียนรู้ความก้าวหน้าทางวิทยาการใหม่ ๆ จากประสบการณ์จริงของนักวิจัย และนักวิทยาศาสตร์ผู้ได้รับรางวัลโนเบล เพื่อที่จะได้นำความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับมาถ่ายทอดและจุดประกายให้กับ เด็ก เยาวชน ครู อาจารย์ และนักวิจัยไทยต่อไป ด้วยพระปรีชาสามารถและพระมหากรุณาธิคุณของสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้าฯ ทำให้ในปีพ.ศ. 2551 เป็นปีแรกที่ประเทศไทยส่งนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์จำนวน 3 คนเป็นตัวแทนเข้าร่วมการประชุมในสาขาฟิสิกส์ โดยสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ได้รับสนองพระราชดำริสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้าฯ ภายใต้โครงการการคัดเลือกผู้แทนเข้าร่วมการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบล ณ เมืองลินเดา ดำเนินการประกาศรับสมัครและคัดเลือกนักศึกษา อาจารย์ นักวิจัย และนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์เป็นประจำทุกปี เพื่อเป็นตัวแทนของประเทศไทย เข้าร่วมกิจกรรมการประชุม หลังจากสำนักงานฯ และผู้แทนสมาชิกมูลนิธิการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบล ได้ทำการคัดเลือกผู้ที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในขั้นต้นแล้ว จะนำความขึ้นกราบบังคมทูล สมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้าฯ เพื่อมีพระราชวินิจฉัยคัดเลือกในขั้นตอนสุดท้ายต่อไป ถ้าไม่มีโครงการนี้ซึ่งเกิดได้เพราะพระราชดำริของพระองค์ แทบจะเป็นไปไม่ได้เลยที่คนไทยจะสมัครไปยังงานประชุมนี้โดยตรง แล้วจะได้รับคัดเลือกให้เข้าร่วม ซึ่งเริ่มแรกประเทศไทยได้รับโควตา 3 คน ต่อมา Prof. Dr. Wolfgang Scherer, Chairman of The Foundation Lindau Nobel prize winners Meetings at Lake Constance ได้ทูลเกล้าฯ ถวายโควตาพิเศษ ให้ผู้แทนประเทศไทยเข้าร่วมกิจกรรมเพิ่มจากเดิม เป็นจำนวน 6 คน ทำให้นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ของไทย มีโอกาสได้เข้าร่วมงานประชุมนี้มากขึ้น ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อประเทศไทยต่อไป [1]

ในปีนี้การประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลครั้งที่ 69 ณ เมืองลินเดา จัดขึ้นเพื่อทุ่มเทให้แก่สาขาฟิสิกส์โดยมีหัวข้อหลักคือ ฟิสิกส์เลเซอร์ (laser physics), คลื่นความโน้มถ่วง (gravitational waves), สสารมืด (dark matter) และจักรวาลวิทยา (cosmology) ซึ่งจัดขึ้นเมื่อวันที่ 30 มิถุนายน พ.ศ. 2562 ถึงวันที่ 5 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 โดยมีผู้ได้รับรางวัลโนเบลเข้าร่วมงานทั้งสิ้น 39 ท่าน รวมถึงผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ปีพ.ศ. 2561 คือ ศาสตราจารย์ ดร. ดอนน่า สตริกแลนด์ (Professor Dr. Donna Strickland) และศาสตราจารย์ ดร. จีฮาร์ด มูรู (Professor Dr. Gérard Mourou) และนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์กว่า 580 คนจาก 89 ประเทศ โดยประเทศไทยส่งผู้แทนเข้าร่วมทั้งหมด 6 คน ได้แก่ นายจอมพจน์ วงศ์เพชรอักษร นักศึกษาปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์ดาราศาสตร์ จาก University of Bonn สาธารณรัฐเยอรมนี, ดร. ธิปรัชต์ โชติบุตร อาจารย์สาขาฟิสิกส์ทฤษฎี จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, นายกำพล อัครวราวงศ์ นักศึกษาปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์สสารควบแน่น จาก University of California, Berkeley สหรัฐอเมริกา, ดร. ชญานิษฐ์ อัศวตั้งตระกูลดี อาจารย์สาขาฟิสิกส์อนุภาค จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, นายทวีวัฒน์ สมบูรณ์ปัญญากุล นักศึกษา

ปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์ดาราศาสตร์ จาก Massachusetts institute of Technology (MIT) สหรัฐอเมริกา และนางสาวจินดารัศมี พรหมเผ่า นักศึกษาปริญญาเอก สาขาฟิสิกส์โมเลกุล จาก Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี

รูปที่ 1 *ผู้แทนประเทศไทยเข้าเฝ้าสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ก่อนพิธีเปิดการประชุม*

ในวันแรกของการประชุมเริ่มด้วยพิธีเปิดโดยสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จร่วมพิธีเปิดการประชุมและมีพระราชปฏิสันถารกับผู้แทนประเทศไทยดังรูปที่ 1 ก่อนที่พิธีเปิดจะเริ่มขึ้น ในพิธีเปิดท่าน เคานต์เทส เบททีน่า เบอร์นาดอตต์ (Countess Bettina Bernadotte) ประธานสภาการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบล กล่าวต้อนรับแขกผู้มีเกียรติทั้งหลาย และเปิดโอกาสให้ผู้ได้รับรางวัลโนเบลยืนขึ้นโบกมือเพื่อทักทายกับนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ดังรูปที่ 2 และท่านเผยว่าสาเหตุที่ท่านจัดการประชุมทุกปี เนื่องจากท่านรู้สึกดีเมื่อเห็นสายตาที่เป็นประกายของนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์เมื่อได้พูดคุยกับผู้ได้รับรางวัลโนเบล ต่อมา ศาสตราจารย์ ดร. ไบรอัน พอล ชมิดท์ (Professor Dr. Brian Paul Schmidt) ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปีพ.ศ. 2554 จากการค้นพบการขยายตัวด้วยความเร่งของเอกภพโดยการสังเกตระยะห่างของซุปเปอร์โนวา ได้ให้คำปราศรัยสำคัญในพิธีเปิดด้วยหัวข้อ “Big Questions for Society, Big Question for Research” เขาพูดถึงความไม่มั่นคงทางการเมืองและความไม่แน่นอน ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในระดับที่ไม่เคยมีมาก่อนและการใช้ทรัพยากรของโลกอย่างไม่ยั่งยืน และกล่าวว่า “เราต้องการงานวิจัยที่ขับเคลื่อนด้วยความอยากรู้อยากเห็นเพื่อสำรวจเอกภพของเราในทุกแง่มุม จากความรู้มหาศาลและวิธีแก้ปัญหาแบบใหม่จะนำไปสู่การปฏิวัติที่คาดไม่ถึง ฉันขอให้คุณปกป้องความสำคัญของวิทยาศาสตร์ในประเทศของคุณ ไม่สำคัญว่าจะรวยหรือจะจน สิ่งนี้เป็นรากฐานของระบบนิเวศการวิจัย แต่เรายังต้องการการวิจัยที่แปลความรู้นั้นให้เหมาะกับการแก้ปัญหาในโลกแห่งความจริง ที่ที่ซึ่งการวิจัยเชิงวิชาการและอุตสาหกรรมสามารถร่วมงานกันได้ ขั้นแรกให้สร้างความเข้าใจว่าคุณจะทำสิ่งนั้นได้อย่างไรให้สำเร็จ และในที่สุดคุณก็ส่งมอบความรู้ให้อุตสาหกรรมอย่างเต็มรูปแบบ เพื่อสร้างผลิตภัณฑ์และบริการที่นำความเจริญมาสู่โลก” หลังจากนั้นผู้ร่วมงานทุกคนเดินไปที่ Concert Stadttheater เพื่อรับชมการแสดงดนตรีของวงเวียนนาฟิลฮาร์มอนิก (The Vienna Philharmonic Orchestra) ก่อนที่จะร่วมรับประทานอาหารเย็น เพื่อให้นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ได้พบปะพูดคุยกันเป็นครั้งแรก

รูปที่ 2 *ผู้ได้รับรางวัลโนเบลยืนขึ้นและโบกมือทักทายนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ (รูปจาก [2])*

ในแต่ละวันมีหลากหลายกิจกรรมให้นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์เข้าร่วมซึ่งแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ ประเภทที่หนึ่งคือไม่ต้องลงทะเบียนล่วงหน้า ทุกคนสามารถเข้าร่วมกิจกรรมได้ ได้แก่ Lectures, Agora Talk, Panel Discussions, Open Exchanges, Poster Flashes และ Poster Session และประเภทที่ต้องที่ต้องลงทะเบียนล่วงหน้าเนื่องจากจำกัดจำนวนผู้ร่วมงาน ได้แก่ Master classes, Laureate Lunches, Partner Breakfast/Partner Events, Science Breakfast และ Science Walks ตั้งแต่วันที่ 1-4 กรกฎาคม พ.ศ. 2562 ในช่วงเช้าตรู่เจ็ดโมงเช้าถึงแปดโมงครึ่งของทุกวันจะมีกิจกรรมที่ต้องลงทะเบียนเพื่อเข้าร่วมคือ Partner Breakfast และ Morning Workout หลังจากนั้นจะมีการบรรยาย (Lectures) และ Agora Talk จนหมดช่วงเช้า และช่วงบ่ายจะมีกิจกรรม Panel Discussions, Open Exchanges, Master classes, Science Walks, Poster Flashes และ Poster Session และตอนเย็นจะเป็นกิจกรรมทางสังคม เช่น International Get-Together, Bavarian Evening และ Grill & Chill

สำหรับการบรรยาย (Lectures) ถูกจัดขึ้นในช่วงเช้าของวันที่สองถึงวันที่สี่ของการประชุมโดยผู้ได้รับรางวัลโนเบลเป็นผู้ให้คำบรรยายเป็นเวลา 30 นาทีโดยไม่มีการซักถาม แต่จะมีรายการช่วงบ่ายที่ชื่อว่า Open Exchanges ให้มีการนำหัวข้อการบรรยายในช่วงเช้ามาพูดคุยในช่วงบ่าย การบรรยายมีหัวข้อ เช่น “The Future of Fundamental Physics” บรรยายโดยศาสตราจารย์ ดร. เดวิด กรอส (Professor Dr. David Gross) ผู้ได้รับรางวัลโนเบลประจำปีพ.ศ. 2547 สำหรับการค้นพบ asymptotic freedom ของแรงอย่างเข้ม, “From Nonlinear Optics to High-Intensity Laser Physics” บรรยายโดยศาสตราจารย์ ดร. ดอนน่า สตริกแลนด์ ผู้ได้รับรางวัลโนเบลประจำปีพ.ศ. 2561 สำหรับการคิดค้นวิธีการสร้างห้วงแสงเชิงทัศนศาสตร์ที่สั้นมาก (ultra-short optical pulses) และมีความเข้มสูง และ “New Forms of Matter Near Absolute Zero Temperature” บรรยายโดยศาสตราจารย์ ดร. โวล์ฟกัง แคทเทอเล่ (Professor Dr. Wolfgang Ketterle) ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปีพ.ศ. 2544 สำหรับความสำเร็จในการทำ Bose-Einstein Condensation (BEC) ในอะตอมแอลคาไลในสถานะแก๊สที่เจือจางและสำหรับการศึกษาพื้นฐานเกี่ยวกับคุณสมบัติของการควบแน่น อีกกิจกรรม Agora Talks เป็นกิจกรรมคล้ายกับการบรรยายโดยผู้ได้รับรางวัลโนเบลหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งคนนำเสนอเกี่ยวกับประเด็นหนึ่ง แต่จะเปิดโอกาสให้ทุกคนได้ถามคำถามที่เกี่ยวข้องได้ในขณะเดียวกัน

***รูปที่** 3 การสนทนาระหว่างผู้ได้รับรางวัลโนเบลและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์เกี่ยวกับเรื่องเส้นทางอาชีพของนักวิทยาศาสตร์ (รูปจาก [2])*

ในส่วนของ Panel Discussions เป็นการอภิปรายโดยมีผู้ร่วมอภิปรายทั้งผู้ได้รับรางวัลโนเบลและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ที่ได้รับเชิญให้ขึ้นไปพูดบนเวทีดังรูปที่ 3 และเปิดโอกาสให้ทุกคนสามารถถามคำถามได้ผ่านทางแอพพลิเคชั่น แต่ละการอภิปรายจะพูดคุยเกี่ยวกับหัวข้อหนึ่งๆ อย่างปีนี้มีการอภิปรายสามหัวข้อได้แก่ “The Dark Side of the Universe”, “Student, Postdoc, and Then? – Aiming for a Career in Science” และ “How Can Science Change the World for the Better?” ในบทความนี้จะยกตัวอย่างการอภิปรายในหัวข้อ “Student, Postdoc, and Then Aiming for a Career in Science” โดยมีผู้ร่วมอภิปรายประกอบด้วย ศาสตราจารย์ ดร. โวล์ฟกัง แคทเทอเล่ ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปีพ.ศ. 2544 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้อำนวยการ Research Laboratory of Electronics และ Center for Ultracold Atoms ที่ Massachusetts Institute of Technology (MIT) ณ สหรัฐอเมริกา, ท่านที่สองคือศาสตราจารย์ ดร. วิลเลียม ฟิลลิปส์ (Professor Dr. William Phillips) ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปีพ.ศ. 2540 สำหรับการพัฒนาวิธีการทำความเย็นและกักขังอะตอมด้วยแสงเลเซอร์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งหัวหน้าห้องวิจัย Laser Cooling and Trapping Group ที่ National Institute of Standards and Technology (NIST) ณ สหรัฐอเมริกา, ท่านที่สามคือ ศาสตราจารย์ ดร. ดอนน่า สตริกแลนด์ ผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปีพ.ศ. 2561 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งหัวหน้ากลุ่มวิจัย Ultrafast laser group ที่ Department of Physics and Astronomy, University of Waterloo ณ ประเทศแคนาดา เธอเป็นผู้หญิงคนที่สามที่ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ต่อจากศาสตราจารย์ ดร. มารี กูว์รี (Professor Dr. Marie Curie) และศาสตราจารย์ ดร. มาเรีย โกเอปเพิร์ท-เมเยอร์ (Professor Dr. Maria Goeppert Mayer), ผู้ร่วมอภิปรายท่านที่สี่คือ ดร. มาเรีย ซูเร็ค (Dr. Maria Zurek) นักวิจัยหลังปริญญาเอกสาขานิวเคลียร์ฟิสิกส์ที่ Lawrence Berkeley National Laboratory ณ สหรัฐอเมริกา, ท่านสุดท้ายคือ เนียมห์ คาวาน่า (Niamh Kavanagh) นักศึกษาปริญญาเอกและนักสื่อสารวิทยาศาสตร์ที่ Tyndall National Institute, University College Cork ณ ประเทศไอร์แลนด์ ซึ่งงานวิจัยของเธอมุ่งเน้นไปที่ระบบอินเทอร์เน็ตในอนาคต และมีผู้ดำเนินรายการคือ เอไลน่า เลวิน (Alaina Levine) ดำรงตำแหน่งประธาน Quantum Success Solutions ณ สหรัฐอเมริกา และเธอยังเป็นที่ปรึกษาด้านอาชีพ STEM, นักข่าวสายวิทยาศาสตร์ และนักเขียนหนังสือเรื่อง “Networking for Nerds” (Wiley, 2015) ซึ่งถูกจัดลำดับเป็นหนึ่งในห้าหนังสือชั้นนำโดย Physics Today

ในการอภิปรายพูดถึงอาชีพในแวดวงวิทยาศาสตร์ ตำแหน่งงานทางด้านวิชาการคือความฝันส่วนใหญ่ของนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ โดยทั่วไปแล้วนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์เผชิญกับคำถามเกี่ยวกับการที่จะประสบผลความสำเร็จด้านความเป็นเลิศทางวิทยาศาสตร์และการเห็นคุณค่าโดยเพื่อนร่วมงาน รวมทั้งอยู่ในวัยที่สร้างครอบครัว ดังนั้นการตามหาอาชีพด้านวิทยาศาสตร์จึงต้องพยายามอย่างหนักเพื่อความสมดุลของชีวิตและการงานที่ดี ซึ่งเป็นเรื่องที่เคร่งเครียด นอกจากนั้นตำแหน่งทางวิชาการยังมีภาระเกี่ยวกับปัญหาการระดมทุน ภาระการสอน และงานบริหารอย่างหนัก ซึ่งทำให้อาชีพทางด้านวิทยาศาสตร์เชิงวิชาการซับซ้อนและบ่อยครั้งที่มีแนวทางปฏิบัติที่น่าเบื่อหน่าย ศาสตราจารย์ ดร. วิลเลียมได้พูดถึงคำถามที่ว่าความล้มเหลวช่วยสร้างสรรค์ในทางที่เป็นประโยชน์ให้กับอาชีพได้อย่างไร เขากล่าวว่า “บางครั้งการรู้ว่าเมื่อไหร่จะต้องล้มเลิกนั้นมีค่ามาก บางครั้งมันไม่แย่ที่จะเลิกล้มและมุ่งหน้าที่จะทำบางสิ่งบางอย่างที่น่าสนใจเช่นกัน” เขาอธิบายต่อถึงปัญหาเกี่ยวกับ super-molasses [3] ซึ่งคือการจัดแนวแสงเลเซอร์สองลำที่ไม่ทับกันแบบสมบูรณ์ (misalignment) ซึ่งสามารถพัฒนาให้เวลาการจัดเก็บ (storage time) ของอะตอมที่ถูกกักขังใน optical molasses ได้นานขึ้นมากกว่าเดิม เขาและศาสตราจารย์ ดร. สตีเวน ชู (Professor Dr. Steven Chu) ได้พยายามหาคำอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น และสุดท้ายก็ล้มเลิก “ทุกสิ่งที่เกี่ยวกับ super-molasses คือความล้มเหลว แต่สิ่งที่สำคัญคือเราเรียนรู้ที่จะยอมรับว่าคุณล้มเหลว หลังจากนั้นมุ่งหน้าทำสิ่งอื่นต่อนั่นคือสิ่งที่ดี บางคนพูดว่างานของนักวิทยาศาสตร์คือการล้มเหลวอย่างรวดเร็วและบ่อยครั้งที่สุดเท่าที่คุณจะทำได้ เพื่อที่คุณจะได้เรียนรู้มากเท่าๆ กับที่คุณสามารถทำได้” นอกจากนั้นศาสตราจารย์ ดร. โวล์ฟกัง ได้เล่าถึงเส้นทางสายอาชีพของเขาที่เป็นแบบซิกแซก ในตอนแรกเขาอยากจะเป็นนักฟิสิกส์ทฤษฎี หลังจากนั้นเขาอยากทำฟิสิกส์ประยุกต์ และเขายังสมัครทำงานในอุตสาหกรรม เขาเป็นนักวิจัยหลังปริญญาเอกสามครั้งในสามห้องปฏิบัติการที่แตกต่างกันและต่างสาขาอีกด้วย ซึ่งท้ายที่สุดก็นำไปสู่ความสำเร็จในฐานะผู้นำทางวิทยาศาสตร์

ส่วนศาสตราจารย์ ดร. ดอนน่า เธอกล่าวว่าเธอไม่เคยมีกลยุทธ์สำหรับเส้นทางอาชีพเลย หลังจากที่เธอเรียนจบปริญญาเอกเธอได้เป็นนักวิจัยหลังปริญญาเอกกับศาสตราจารย์ ดร. พอล คอร์คัม (Professor Dr. Paul Corkum) ที่ National Research Council of Canada หลังจากที่เธอสำเร็จงานวิจัยนั้นแล้วสามีของเธอก็ได้ตอบรับจากอาชีพในฝันของเขาที่ Bell Labs ใน New Jersey เธอกล่าวว่า “ฉันพยายามหางานใน New Jersey แต่ไม่มีใครต้องการฉันเลย เศร้าจริงๆ หลังจากนั้นฉันได้งานที่ Lawrence Livermore National Lab” แต่ในขณะเดียวกันสหรัฐอเมริกาไม่อนุญาตให้เธอทำงานต่อ และเธอก็พยายามหางานใน New Jersey อีกครั้งซึ่งงานที่รับเธอมีเพียงเจ้าหน้าที่ด้านเทคนิคเท่านั้น “ฉันยอมแพ้ในเส้นทางอาชีพที่จุดนั้นและเป็นสมาชิกของเจ้าหน้าที่ด้านเทคนิค” เธอทำงานนั้นเป็นเวลาสี่ปี และในที่สุดเธอก็ถูกว่าจ้างในตำแหน่งอาจารย์ที่ University of Waterloo ส่วน ดร. มาเรียนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ได้เล่าถึงเส้นทางอาชีพของเธอ เธอจบปริญญาตรีและโทที่ประเทศโปแลนด์ หลังจากที่เธอได้มีโอกาสได้ไปฝึกงานที่ Fermilab ณ สหรัฐอเมริกา เธอก็ตัดสินใจที่จะเรียนต่อปริญญาเอกต่างประเทศเพื่อเพิ่มประสบการณ์ และทำงานกับผู้อื่น เธออยากเห็นการทำงานนอกประเทศของเธอ และหลังจากที่เธอเรียนจบปริญญาเอกที่เยอรมนีเธออยากที่จะไปทำงานที่สหรัฐอเมริกา เธอใช้เวลาปีกว่าในการหางาน เธอถูกปฏิเสธจากการสมัครงานหลายตำแหน่งและหลายที่ ท้ายที่สุดด้วยการมีเครือข่ายและการวางแผนที่ดีเธอจึงได้ทำงานในตำแหน่งนักวิจัยหลังปริญญาเอกที่ Lawrence Berkeley National Laboratory ส่วนเนียมห์นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์อีกคน เธอเล่าว่าเธอเคยทำงานหลากหลายอย่างมาก่อนเช่น งานในอุตสาหกรรมโรงแรม และปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาเอกสาขา photonics เห็นได้ว่าเส้นทางสายอาชีพของแต่ละคนก็จะแตกต่างกันออกไปแต่ในท้ายที่สุดแล้วก็ขึ้นอยู่กับเราว่าจะเปิดโอกาสให้กับตัวเองมากน้อยแค่ไหน

กิจกรรม Master Classes เป็นการแลกเปลี่ยนที่เข้มข้นที่สุดระหว่างผู้ได้รับรางวัลโนเบลและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ โดยนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ที่ถูกคัดเลือกจะนำเสนอเกี่ยวกับงานวิจัยของตนเองให้ทุกคนในกิจกรรมฟังและมีการซักถามจากทุกคนที่เข้าร่วม ซึ่งกิจกรรมนี้แยกออกเป็น 4 หัวข้อคือ Topology & Physics: Topological Materials, Skyrmions, Teaching Physics, Manipulation of

Individual Quantum Systems และ The Transient Universe ผู้เขียนมีโอกาสได้เข้าฟังในหัวข้อ Manipulation of Individual Quantum System โดยมีศาสตราจารย์ ดร. แซร์ฌ อาร็อช (Professor Dr. Serge Haroche) และศาสตราจารย์ ดร. เดวิด ไวน์แลนด์ (Professor Dr. David Wineland) เป็นประธานประจำหัวข้อนี้ ทั้งคู่คือผู้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปีพ.ศ. 2555 สำหรับวิธีการทดลองที่ทำให้สามารถวัดและควบคุมระบบทางควอนตัมเดี่ยวได้ ในกิจกรรมมีนักวิทยาศาสตร์รุ่นใหม่ 4 คนนำเสนอเกี่ยวกับงานที่ตนเองทำอยู่ซึ่งเกี่ยวกับการวัดและควบคุมระบบทางควอนตัมเดี่ยว เช่น การจำลองระบบทางควอนตัมด้วยไอออนเดี่ยว การจำลองระบบทางควอนตัมด้วยอะตอมกลางเดี่ยว เป็นต้น

นอกจากนั้นยังมีกิจกรรม Poster Flashes และ Poster Session นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ 30 คนที่ผ่านการคัดเลือกนำเสนอโปสเตอร์ของพวกเขาเป็นเวลาสองนาที หลังจากนั้นในระหว่างการประชุมมีการแสดงโปสเตอร์และให้ผู้ร่วมงานลงคะแนนให้กับโปสเตอร์ที่เขาชื่นชอบ ส่วนกิจกรรมที่ต้องลงทะเบียนล่วงหน้า ได้แก่ Laureate Lunches คือการรับประทานอาหารกลางวันโดยมีผู้ได้รับรางวัลโนเบลหนึ่งคนและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ไม่เกินสิบคน Partner Breakfast/Partner Events คือกิจกรรมที่ผู้สนับสนุนการประชุมผู้ได้รับรางวัลโนเบลถูกเชิญให้จัดกิจกรรมนี้นอกเหลือจากการประชุมหลัก โดยในงานมีการอภิปรายโดยผู้ได้รับรางวัลโนเบล หรือร่วมรับประทานอาหาร และพูดคุยกัน ในส่วนของ Science Breakfast คือกิจกรรมที่ผู้ได้รับรางวัลโนเบล 2-5 คนจะกล่าวสุนทรพจน์สั้น ๆ หลังจากนั้นมีการสนทนากันระหว่างผู้ฟังบนโต๊ะรับประทานอาหาร และ Science Walks คือกิจกรรมที่ผู้ได้รับรางวัลโนเบลหนึ่งคนและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ไม่เกิน 10 คนเดินเที่ยวชมสถานที่ต่าง ๆ ระหว่างนั้นมีการสนทนากันแบบสบาย ๆ โดยที่กิจกรรม Laureate Lunches, Partner Breakfast/Partner Events และ Science Walks ผู้เข้าร่วมมีสิทธิ์เลือกได้เพียงแค่ 1 กิจกรรมเท่านั้น

ผู้เขียนตั้งใจลงทะเบียนออนไลน์ล่วงหน้าเพื่อเข้าร่วมกิจกรรม Science Walk โดยมีโอกาสได้เดินสนทนาแบบสบาย ๆ กับผู้ได้รับรางวัลโนเบลหนึ่งท่าน ซึ่งผู้เขียนเลือกเข้าร่วมกิจกรรมนี้กับศาสตราจารย์ ดร. วิลเลียม ฟิลลิปส์ เหตุผลที่เลือกท่านเนื่องจากว่าผู้เขียนเองก็เป็นนักทดลองด้านอะตอมเย็นเช่นเดียวกับท่าน และยังเคยใช้เทคนิคการทำความเย็นให้แก่อะตอมที่เป็นกลางที่ท่านได้รับรางวัลโนเบลเมื่อปีพ.ศ. 2540 ร่วมกับศาสตราจารย์ ดร. สตีเวน ชู และ ศาสตราจารย์ ดร. คลูด โคเฮน ทานเนาด์จิ (Professor Dr. Claude Cohen-Tannoudji) สำหรับการพัฒนาวิธีการทำความเย็นและกักขังอะตอมด้วยแสงเลเซอร์ ในกิจกรรมนี้ผู้เขียนและนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์อีก 9 คน รวมทั้งศาสตราจารย์ ดร. วิลเลียม ได้ขึ้นรถบัสเพื่อเดินทางไปที่สวนผลไม้ในเมืองลินเดา เมื่อถึงสถานที่ทุกคนลงเดินไปในสวนโดยไม่รู้ด้วยซ้ำว่าจะไปสิ้นสุดที่ไหนและไม่สนใจกับสิ่งรอบตัวเท่าไหร่นัก และเริ่มพูดคุยถามเรื่องต่าง ๆ กับศาสตราจารย์ ดร. วิลเลียม อย่างสนุกสนานเกี่ยวกับชีวิตการเป็นนักวิจัยและแนวคิดต่าง ๆ ผู้เขียนถามท่านว่า “คุณกระตุ้นให้นักศึกษาปริญญาตรี นักศึกษาปริญญาโท และนักวิจัยหลังปริญญาเอก ทำงานด้วยความหลงใหลอย่างไร” ท่านตอบว่า “ฉันไม่แน่ใจว่าคุณจะปลูกฝังความหลงใหลให้กับคนอื่นได้นอกเหนือจากคุณทำให้ตัวเองหลงใหลด้วยตัวคุณเอง ฉันคิดว่าเมื่อคุณเห็นคนอื่นตื่นเต้นกับบางอย่าง ถ้าคุณมีแนวโน้มที่จะมีความหลงใหลสำหรับสิ่งต่าง ๆ สิ่งนั้นก็จะกระตุ้นคุณในทำนองเดียวกัน ถ้าคุณไม่หลงใหลในฟิสิกส์คุณก็จะถามตัวเองว่าคุณกำลังทำสิ่งที่ถูกต้องอยู่รึป่าว ฟิสิกส์มันไม่ง่ายและแน่นอนว่ามันไม่ทำเงิน ดังนั้นทำไมคุณจะต้องทำมันถ้าคุณไม่หลงใหลเกี่ยวกับสิ่งนั้น” และท่านยังแนะนำถึงการรักษาแรงบันดาลใจในการทำงานด้านฟิสิกส์ซึ่งบางทีสภาพแวดล้อมจะไม่อำนวยด้วยประโยคเด็ดคือ “We have to remind ourselves time to time how cool of physics is.” แปลว่า “เราต้องเตือนตัวเราเองเป็นครั้งคราวว่าฟิสิกส์มันเจ๋งแค่ไหน” ซึ่งก็จริงเพราะทุกคนที่เลือกเรียนฟิสิกส์ก็เพราะว่าความสนุกที่ได้เรียนรู้เกี่ยวกับกลไกของธรรมชาติ แต่พอเรียนหรือทำงานด้วยความยากลำบากและเงื่อนไขบางอย่างทำให้เราท้อแท้ ลืมนึกถึงว่าเมื่อก่อนนี้เราเลือกเรียนฟิสิกส์เพราะอะไรกัน อีกวลีเด็ดที่ท่านฝากไว้คือ “Keep curiosity alive.” คือ “ดำรงไว้ซึ่งความขี้สงสัย” จะดำรงไว้ได้ เราต้องสงสัยแล้วถามจนเกิดการถกเถียงกัน จึงจะเกิดความรู้ใหม่ที่สนุกสนานทำให้เรามีความ

สงสัยสิ่งใหม่ ๆ และเรียนรู้ได้เรื่อย ๆ พอจบกิจกรรมนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ขอถ่ายรูปหมู่เป็นที่ระลึกกับศาสตราจารย์ ดร. วิลเลียม ดังรูปที่ 4

รูปที่ 4 *นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ถ่ายรูปหมู่กับศาสตราจารย์ ดร. วิลเลียม ฟิลลิปส์*

นอกเหนือจากกิจกรรมเชิงวิชาการแล้วยังมีกิจกรรมเข้าสังคมอีกด้วยนั่นคือ International Get-Together โดยทุกปีจะมีเจ้าภาพจากแต่ละประเทศเป็นผู้จัดงาน ส่วนในปีนี้เจ้าภาพคือประเทศแอฟริกาใต้ ซึ่งจัดเตรียมอาหารเครื่องดื่มและการแสดงประจำชาติดังรูปที่ 5 ซึ่งแต่ละโต๊ะรับประทานอาหารมีผู้ได้รับรางวัลโนเบลนั่งอยู่กับครอบครัว ซึ่งนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์สามารถร่วมรับประทานอาหารและพูดคุยกับพวกเขาได้อย่างใกล้ชิด ผู้เขียน ดร. ธิปรัชต์ และ ดร. ชญานิษฐ์ได้มีโอกาสได้นั่งรับประทานอาหารกับศาสตราจารย์ ดร. แซร์ฌ อาร์อช ภรรยา และลูกสาวของท่าน ซึ่งผู้เขียนนั่งข้างภรรยาของศาสตราจารย์ ดร. แซร์ฌ เธอเล่าให้ฟังว่าเธอเป็นนักสังคมศาสตร์ แล้วเธอก็เริ่มเล่าถึงเหตุการณ์บ้านเมืองที่น่าหดหู่ของผู้คนในโลกให้ฟัง ทันทีที่เธอทำหน้าเศร้า ลูกสาวของเธอจะยกมือขึ้นมาแล้วทำท่าฉีกยิ้มส่งสัญญาณให้คุณแม่ยิ้มออกมา ส่วน ดร. ชญานิษฐ์ นั่งข้างลูกสาวของท่านและดูเหมือนว่าเธอสนอกสนใจในฟิสิกส์อนุภาคมากเลยทีเดียว เมื่อ ดร. ชญานิษฐ์ เล่าการทดลองที่เซิร์นให้ฟังเธอก็สงสัยและถามคำถาม หลังจากรับประทานอาหารทางเจ้าภาพได้เชื้อเชิญให้ทุกคนออกมาเต้นรำหน้าเวทีทันใดนั้นทั้งนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ ผู้ได้รับรางวัลโนเบลและครอบครัวก็เต้นรำกันอย่างสนุกสนานครื้นเครง โดยเฉพาะศาสตราจารย์ ดร. จีฮาร์ด มูรูและภรรยาที่เต้นรำได้โดนใจทุกคนยิ่งนัก

รูปที่ 5 *การแสดงในกิจกรรม International Get-Together (รูปจาก [2])*

ส่วนกิจกรรม Bavarian evening จัดขึ้นโดย the Free State of Bavaria โดยทุกคนจะถูกเชิญให้ใส่ชุดประจำชาติหรือชุดพื้นเมือง แต่บางคนที่พักอยู่ไกลและด้วยเวลาจำกัดจึงไม่สามารถเปลี่ยนชุดได้ ภายในงานมีการแสดงดนตรีบาวาเรียนแบบดั้งเดิมและอาหารบาวาเรียนให้ทุกคนรับประทานและพูดคุยกัน หลังจากนั้นทุกคนก็เดินทักทายพูดคุยถ่ายรูปกันและในช่วงสุดท้ายก็มีการถ่ายรูปหมู่ดังรูปที่ 6

รูปที่ 6 *นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์และผู้ได้รับรางวัลโนเบลใส่ชุดแบบดั้งเดิมในคืนงาน Bavarian Evening (รูปจาก [2])*

อีกกิจกรรมคือ Grill & Chill เป็นกิจกรรมที่ผู้ได้รับรางวัลโนเบล นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ และพลเมืองลินเดาสามารถเข้าร่วมกิจกรรมพบปะพูดกันกันสบาย ๆ ภายในงานมีอาหารปิ้งย่างและเครื่องดื่ม ที่สามารถหยิบไปรับประทานที่โต๊ะได้ ซึ่งโต๊ะที่นั่งมีผู้คนอยู่อย่างหนาแน่นจนไม่มีที่ว่างดังรูปที่ 7 ผู้เขียน และ ดร. ชญานิษฐ์ จึงไปทานอาหารที่โต๊ะยืนริมแม่น้ำ ทันใดนั้น ภรรยาและลูกสาวของ

ศาสตราจารย์ ดร. แซร์ฌเดินเข้ามาทักทาย แล้วตามด้วยศาสตราจารย์ ดร. แซร์ฌ หลังจากรับประทานอาหารเสร็จเรียบร้อยก็เกิดการรวมตัวกันของผู้แทนไทยเดินเล่นรอบเกาะก่อนแยกย้ายเข้าที่พัก

รูปที่ 7 *บรรยากาศในกิจกรรม Grill & Chill*

ทุกปีในวันสุดท้ายของการประชุมทั้งนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์และผู้ได้รับรางวัลโนเบลขึ้นเรือแต่เช้าตรู่ไปเกาะไมเนาที่เป็นของตระกูลเบอร์นาดอตต์ (Bernadotte) ตั้งอยู่ทางตะวันออกเฉียงใต้ของสหพันธรัฐเยอรมนี ซึ่งอยู่ทางชายฝั่งของทะเลสาบคอนสแตนซ์ เพื่อเข้าร่วมพิธีปิด หลังจากนั้นเดินทางออกจากเกาะไมเนาไปลินเดา ทั้งนี้นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ทุกคนถือว่าเป็นสมาชิกศิษย์เก่าของการประชุมนับแต่จากนั้นเป็นต้นมา การประชุมนี้สามารถเข้าร่วมได้ครั้งเดียวในชีวิตในฐานะนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ดังนั้นเพื่อให้ทุกคนสามารถให้ความรู้ สร้างแรงบันดาลใจ และติดต่อสื่อสารซึ่งกันและกันระหว่างนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ จึงมีเครือข่ายศิษย์เก่าลินเดาในโลกออนไลน์

รูปที่ 8 *นักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์และผู้ได้รับรางวัลโนเบลกำลังเดินขึ้นเรือเพื่อกลับจากเกาะไมเนา (รูปจาก [2])*

จากการประชุมครั้งนี้ผู้เขียนรู้สึกประทับใจในความทุ่มเทของผู้ได้รับรางวัลโนเบลทุกท่านที่ตั้งใจเดินทางมาจากทุกแห่งหนบนโลก เพื่อมาพบปะพูดคุยกับนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ ซึ่งหลายท่านเห็นได้ว่ามีอายุมากแล้ว ร่างกายก็ไม่ได้แข็งแรงเหมือนหนุ่มสาว และคาดว่าทุกคนมีงานที่ต้องทำเยอะมาก ผู้ได้รับรางวัลโนเบลหลายท่านมักจะพูดว่าการที่เขาได้รับรางวัลโนเบลไม่ได้หมายความว่าเขาฉลาดแต่เป็นเพราะดวงมากถึง 90% และการที่เราจะทำบางสิ่งบางอย่างให้สำเร็จจะต้องได้มาจากการทุ่มเททั้งกายและใจ แล้วพวกเขายังกล่าวว่าอย่าได้ทำงานเพื่อหวังว่าจะได้รับรางวัลแต่ทำเพราะความอยากรู้อยากเห็น นอกจากการพบปะพูดคุยกับผู้ได้รับรางวัลโนเบลแล้ว ผู้เขียนได้รู้จักกับนักวิทยาศาสตร์รุ่นเยาว์ที่มาจากต่างประเทศมากมาย และคาดว่าจะมีโอกาสร่วมงานกันในอนาคต ข้อความสำคัญที่ผู้เขียนได้รับจากการประชุมนี้คือ ทำงานให้หนักและสนุกไปกับงานที่ทำ

การประชุมครั้งนี้เป็นโอกาสครั้งที่สองที่ผู้เขียนได้รับคัดเลือกเป็นตัวแทนของประเทศไทยภายใต้โครงการของสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ ครั้งแรกผู้เขียนได้รับโอกาสเป็นตัวแทนประเทศไทยเพื่อเข้าร่วม CERN Summer Student Program ประจำปีพ.ศ. 2559 ณ ประเทศสวิตเซอร์แลนด์ จากโอกาสทั้งสองครั้งนี้ ทำให้ผู้เขียนมุ่งมั่นและตั้งใจที่จะเป็นนักวิจัยด้านฟิสิกส์โมเลกุล และคาดว่าจะนำความรู้และประสบการณ์กลับไปประเทศไทยเพื่อสร้างห้องปฏิบัติการฟิสิกส์โมเลกุล และจะเหนี่ยวนำให้สังคมเห็นว่าการเป็นนักฟิสิกส์นั้นสนุกจริง ๆ เพราะมีอะไรให้เรียนรู้หลากหลายอย่างไม่จำเจและไม่น่าเบื่อหน่าย

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งและสำนึกในพระมหากรุณาธิคุณเป็นล้นพ้นอันหาที่สุดมิได้ของสมเด็จพระกนิษฐาธิราชเจ้า กรมสมเด็จพระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี ที่ทรงพระกรุณาริเริ่มให้นักวิทยาศาสตร์ไทยรุ่นเยาว์ได้มีโอกาสเข้าร่วมการประชุมนี้เป็นประจำทุกปี ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) คณะกรรมการคัดเลือกผู้แทนเข้าร่วมประชุม รวมถึงคุณฤทัย จงสฤษดิ์ และคุณปานกมล ศรสุวรรณ ที่ให้โอกาสข้าพเจ้าได้เข้าร่วมและชี้แนะตลอดทั้งงานประชุมนี้ นอกจากนี้ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วรานนท์ อนุกูล ที่สนับสนุนข้าพเจ้าตลอดมารวมถึงการเข้าร่วมโครงการนี้ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชาญกิจ คันฉ่อง ที่แนะนำให้เขียนและช่วยตรวจสอบบทความนี้ให้สำเร็จลุล่วง สุดท้ายขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ตัวแทนประเทศไทยที่ร่วมการประชุมด้วยกันอย่างสนุกสนานและช่วยเหลือกันตลอดมา

เอกสารอ้างอิง

[1] https://www.nstda.or.th/lindau/index.php/introduction

[2] http://www.mediatheque.lindau-nobel.org/

[3] S. Chu, “The manipulation of neutral particles,” Nobel Lecture, (1997).

Thai Journal of Physics Vol. 37 No. 2 (2020) 45-59

บทความวิชาการ (Article)

การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์เพื่อการวินิจฉัยโรคระบาดโควิด-19

พรรณี แสงแก้ว[1], มนัสวี เลาะวิธี[1] และ ทวีป แสงแห่งธรรม[2]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[2] สาขารังสีรักษาและมะเร็งวิทยา ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อ

วิกฤตการณ์โรคระบาดโควิด-19 เริ่มตั้งแต่ปลายปี 2019 จนถึงราวเดือนมิถุนายน 2020 มีผู้ติดเชื้อสะสมทั่วโลกประมาณ 7,600,000 คน และประเทศไทยมีผู้ติดเชื้อมากกว่า 3,100 คน ขณะนี้ยังไม่มีวัคซีนสำหรับการป้องกันโรคนี้ การแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสนี้ทำให้เกิดผลกระทบอย่างใหญ่หลวงหลายด้าน เนื่องจากเป็นโรคที่สามารถแพร่กระจายเชื้อจากคนสู่คนได้ค่อนข้างง่าย คือส่งผ่านได้โดยสารคัดหลั่งของผู้ติดเชื้อที่ฟุ้งกระจายออกมาด้วยการไอหรือการจาม โดยเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่นี้ส่งผลต่อระบบทางเดินหายใจและสามารถเข้าไปทำลายปอดทำให้เกิดโรคปอดอักเสบได้ หากมีการติดเชื้อนี้และสามารถตรวจพบได้ทันที โดยวิธีการวินิจฉัยที่มีความไวและความถูกต้องสูง ทำให้ทราบสถานะของโรคตั้งแต่ช่วงระยะเริ่มต้น เป็นการป้องกันการแพร่เชื้อที่ดีที่สุด และจากผลการศึกษาจากข้อมูลการรักษาผู้ป่วยติดเชื้อโรคโควิด-19 ในสถานพยาบาลหลายแห่งของหลายประเทศทั่วโลกโดยเฉพาะสาธารณรัฐประชาชนจีน ได้ข้อสรุปว่า รอยโรคที่ตรวจพบได้จากการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด (chest CT-scan) สามารถช่วยร่วมเสริมกับผลตรวจที่ได้จากวิธีมาตรฐาน RT-PCR ในการตรวจวินิจฉัยโรคติดเชื้อโควิด-19 ได้ตั้งแต่ช่วงระยะเริ่มต้น โดยพบว่าผลตรวจนั้นค่อนข้างมีอัตลักษณ์เฉพาะของรอยโรคที่เป็นการบ่งชี้ว่าเป็นสาเหตุมาจากการติดเชื้อโควิด-19 คือ การเกิดพื้นที่ฝ้าขาวมัวและ/หรือแถบปื้นสีขาวที่บริเวณรอบริมขอบและปอดกลีบล่างทั้งสองข้าง ดังนั้นจึงแนะนำวิธีนี้มาร่วมด้วยกับวิธีมาตรฐานสำหรับการวินิจฉัยโรคและประเมินโรคติดเชื้อนี้ ยิ่งไปกว่านั้นเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ ถูกนำมาช่วยสร้างระบบคอมพิวเตอร์ผู้ช่วยอัจฉริยะเพื่อช่วยวิเคราะห์และประเมินผลภาพถ่ายรังสีจากการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดอย่างมีประสิทธิภาพและถูกต้องสูง เพื่อช่วยแบ่งเบาภาระของรังสีแพทย์ที่ค่อนข้างขาดแคลน ทำให้สามารถดำเนินการได้รวดเร็วมากขึ้นและแม่นยำมากขึ้น และยังช่วยลดสภาวะกดดันให้กับผู้ป่วยติดเชื้อที่เฝ้ารอการรักษาด้วย

คำสำคัญ: เชื้อโควิด-19, เอกซเรย์, เอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด, ปัญญาประดิษฐ์

Abstract

Since the end of 2019 until June 2020, the number of patients suffering with COVID-19 has been about 7,600,000 around the world and more than 3,100 in Thailand. Currently, there has been not yet vaccine to prevent this disease. This COVID-19 pandemic has caused many great impacts because it is an infectious disease caused by severe acute respiratory syndrome coronavirus 2 (SARS-CoV-2) and its transmission is now primarily human-to-human via contact with droplets of infected individuals' upper respiratory tract secretions, e.g. from sneezing or coughing. This novel coronavirus affects the respiratory system and can damage the lower lung, causing pneumonia. In case that the patient is unfortunately infected, the COVID-19 disease should be immediately diagnosed and confirmed in time for treatment at the initial stage. This is the best prevention of infection. Therefore, the high-sensitivity method of diagnosis will be very useful for recognizing the status of the disease early. According to the conclusions and reviews of many studies, information on treating patients suffering with COVID-19 in many hospitals from many countries around the world, especially China, points out that the chest computed tomography (CT) manifestations can supplement parts of standard RT-PCR assay. It is found that the chest CT-scan findings of the lung lesions are quite unique. The indication of the cause of the COVID-19 infection is the ground-glass and/or consolidative opacities with usually bilateral, peripheral, and basal distributions. Therefore, chest CT-scan is recommended to be combined with the gold standard method for the diagnosis and assessment of COVID-19 disease. Furthermore, artificial intelligence (AI) technology has been applied to create an intelligent assistant system to help for interpreting and evaluating the radiographic images for chest CT-scan manifestations with a very high accuracy and effectiveness. This AI system can solve the lack of radiologists and assist them to perform with faster and more accurate actions. And it also helps the patients, who are waiting to be treated, to release the stress.

Keywords: COVID-19 infection, X-ray, chest CT-scan, artificial intelligence

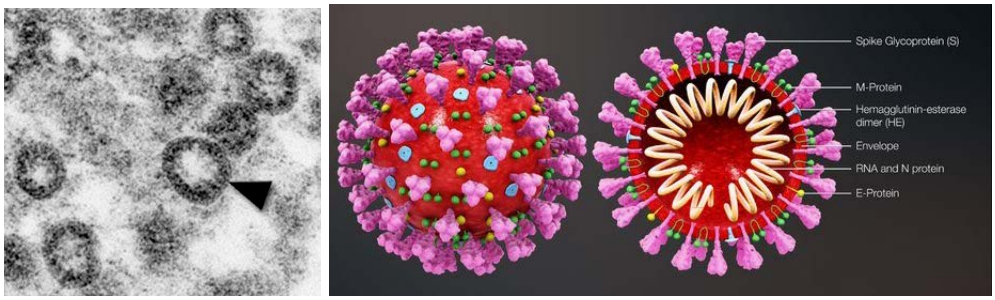
บทนำ

วิกฤตการณ์ของโรคระบาดโควิด-19 ที่แพร่ระบาดในหลายประเทศทั่วโลกขณะนี้ ส่งผลกระทบให้เกิดปัญหาอันใหญ่หลวงหลายประการ ขณะนี้เดือนมิถุนายน ค.ศ. 2020 สถานการณ์ในประเทศไทยค่อนข้างคลี่คลายและไม่มีผู้ติดเชื้อภายในประเทศเป็นเวลาติดต่อกันยี่สิบกว่าวันแล้ว และได้รับการยกย่องให้เป็นประเทศที่มีความสามารถในการจัดการรับมือและฟื้นตัวจากวิกฤตการณ์นี้ได้ดีเป็นอันดับที่ 2 ของโลก [1] แต่ยังคงต้องเฝ้าระมัดระวังป้องกันต่อไปเพราะยังไม่ถือว่าเป็นประเทศปลอดเชื้อไวรัสโควิด-19 ขณะนี้ประเทศไทยมีผู้ป่วยติดเชื้อสะสมราว 3,100 คน และผู้เสียชีวิต 58 คน ในขณะที่ภาพรวมของทั่วโลกนั้นยังคงไม่ค่อยดีขึ้นเท่าไรนัก มีจำนวนผู้ป่วยติดเชื้อสะสมราว 7,600,000 คน และผู้เสียชีวิตราว 430,000 คน ทั้งนี้เพื่อให้สามารถรอดพ้นจากวิกฤตการณ์นี้ไปได้ ความร่วมมือระดมสมองในการบูรณาการศาสตร์ความรู้หลายด้านมาประสานทำงานร่วมกับทางการแพทย์เป็นสิ่งสำคัญยิ่งในการหาวิธีการแก้ไขและป้องกันที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ในการนี้การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ก็มีบทบาทเกี่ยวข้องในการรับมือกับโรคระบาดไวรัสโควิด-19 และมีความก้าวหน้าขึ้นไปอีกระดับคือการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาผนวกร่วมกับข้อมูลจากการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ในการ

ช่วยเสริมประสิทธิภาพและการจัดการข้อมูลอำนวยความสะดวกในการวิเคราะห์วินิจฉัยโรคระบาดโควิด-19 ที่ถือว่าเป็นโรคอุบัติขึ้นใหม่ที่ทั่วโลกยังคงอยู่ในขั้นตอนการศึกษาค้นคว้า

โรคระบาดโควิด-19 (COVID-19 Pandemic)

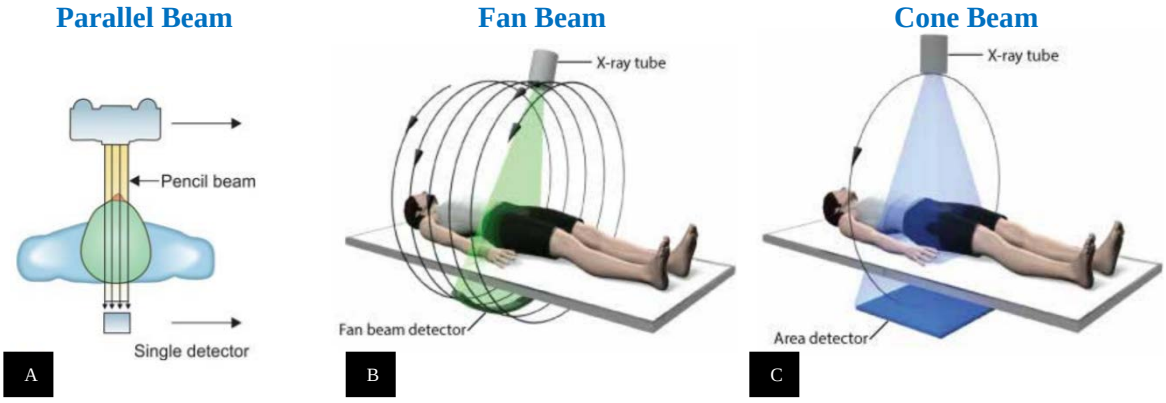
โรคระบาดโควิด-19 มีสาเหตุมาจากเชื้อไวรัสโคโรนา (corona virus) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นไวรัสที่ถูกค้นพบครั้งแรกในปี ค.ศ. 1960 [2] สามารถติดเชื้อได้ทั้งในมนุษย์และสัตว์ ปัจจุบันมีการค้นพบไวรัสนี้มาแล้วทั้งหมด 6 สายพันธุ์ อย่างไรก็ตามสายพันธุ์ที่กำลังแพร่ระบาดอยู่ในขณะนี้เป็นสายพันธุ์ที่ยังไม่มีการค้นพบมาก่อน จึงเรียกสายพันธุ์ที่ 7 นี้ว่า ไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ และเนื่องจากมีการค้นพบในปลายปี ค.ศ. 2019 ทางองค์การอนามัยโลก (WHO) มีการตั้งชื่ออย่างเป็นทางการว่า โควิด-19 (corona virus disease 2019: COVID-19) ไวรัสนี้สามารถทำให้เกิดการอักเสบในระบบทางเดินหายใจได้ โรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์นี้เป็นตระกูลเดียวกันกับไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ก่อนหน้านี้คือ โรคซาร์สและโรคเมิร์สซึ่งได้เคยเกิดเป็นภาวะโรคระบาดในหลายประเทศมาก่อนหน้าเช่นกันแต่ไม่รุนแรงเท่าครั้งนี้ เชื้อไวรัสนี้มีการแพร่กระจายจากคนสู่คนได้โดยส่งผ่านสารคัดหลั่งของผู้ติดเชื้อที่ฟุ้งกระจายออกมาด้วยการไอหรือการจาม จึงเป็นโรคที่ติดต่อง่ายมากและแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว [2] โดยผู้ติดเชื้อนี้มักมีอาการไข้สูง หายใจเหนื่อยหอบ มีน้ำมูก ไอแห้งและเจ็บคอ อาจจะดูคล้ายอาการไข้หวัดใหญ่ ถึงแม้ว่าอาการหลายอย่างจะคล้ายคลึง แต่เนื่องจากเกิดจากเชื้อไวรัสที่แตกต่างกันทำให้ยาที่ใช้ในการรักษาก็ต่างกัน จึงเป็นเรื่องยากที่จะสามารถระบุโรคตามอาการเพียงอย่างเดียว จึงต้องอาศัยการทดสอบทางห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันเชื้อที่เป็นต้นเหตุ และด้วยว่าไวรัสนี้ค่อนข้างแข็งแกร่งสามารถเข้าไปซ่อนตัวอยู่ในระบบทางเดินหายใจได้ลึกถึงส่วนล่างคือแถวหลอดลมลงจนไปถึงขั้วปอดได้ หรืออาจจะเข้าไปในส่วนที่ลึกจนถึงถุงลมปอด จึงทำให้ไม่ง่ายนักที่จะตรวจยืนยันการติดเชื้อไวรัสโคโรนานี้ เพราะการเก็บตัวอย่างตรวจทำได้จากระบบทางเดินหายใจส่วนบนเท่านั้น จึงมีโอกาสที่ตรวจไม่พบในระยะแรก นอกจากนี้ในช่วงเริ่มแรกของการติดเชื้อผู้ป่วยอาจไม่แสดงอาการเจ็บป่วยใด ๆ ทำให้ขาดความระมัดระวังในการป้องกันการแพร่กระจายเชื้อ ยิ่งเพิ่มโอกาสในการช่วยให้เกิดการแพร่กระจายเชื้อของผู้ป่วย อีกทั้งถ้าหากว่ามีการติดเชื้อส่วนนี้จะทำให้มีอาการปอดอักเสบ ด้วยว่าระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายจะส่งเม็ดเลือดขาวมาที่เซลล์ปอดเพื่อทำลายเชื้อโรค ทำให้เกิดปฏิกิริยาการอักเสบ มีหนองหรือของเหลวขังอยู่ภายในถุงลมปอด ส่งผลทำให้เซลล์ปอดบวมใหญ่ขึ้น หรือที่เรียกว่าปอดบวมนั่นเอง จากการที่มีของเหลวปริมาณมากและเซลล์ตายแล้วอุดตันจนไม่สามารถขับออก ถุงลมปอดถูกปิดกั้นจึงทำให้ปอดไม่สามารถถ่ายเทแลกเปลี่ยนนำออกซิเจนเข้าสู่ร่างกายและไม่สามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ จึงทำให้ผู้ป่วยจำเป็นต้องใช้เครื่องช่วยหายใจและมีความเสี่ยงที่จะเสียชีวิตจากระบบทางเดินหายใจล้มเหลวเฉียบพลัน (Acute respiratory distress syndrome: ARDS) ซึ่งอาการความรุนแรงนั้นยังอาจจะแตกต่างกันไปตามกลุ่มอายุ โรคร่วม และระดับภูมิคุ้มกันของตัวผู้ป่วย ดังนั้นการวินิจฉัยโรคและทำการรักษาตั้งแต่เนิ่น ๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่ง วิธีหนึ่งที่จะช่วยให้ทราบถึงสภาพปอดว่าได้รับความเสียหายไปเพียงใดตั้งแต่ระยะเริ่มต้นถ้าหากมีการติดเชื้อ คือ การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (X-ray Computed Tomography) หรือการตรวจ CT-scan เพื่อสังเกตติดตามดูลักษณะรอยโรคของปอดที่เปลี่ยนแปลงไปในช่วงเวลาค่อนข้างรวดเร็วได้



รูปที่ 1 *ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ซ้ายมือ) และภาพแบบจำลองแสดงรายละเอียดทางกายภาพ (ขวามือ) ของไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ [3]*

รังสีเอกซ์ (X-ray)

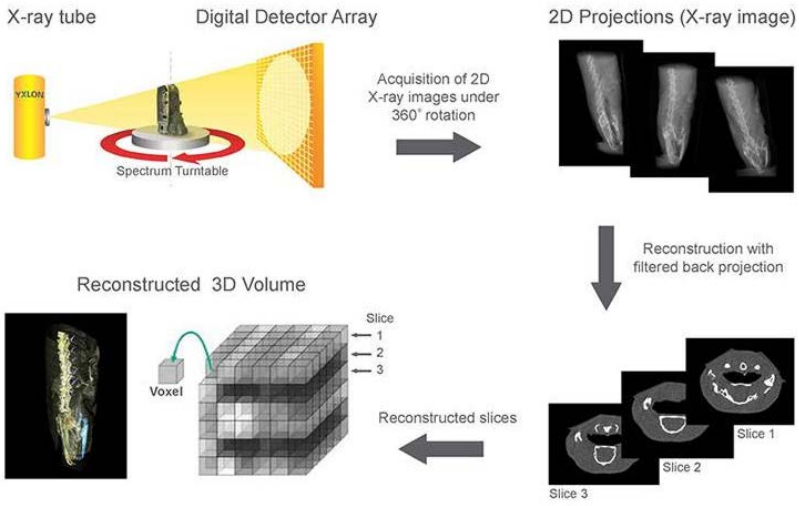
รังสีเอกซ์ [4] สำหรับใช้ในการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์นี้ คือ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานอยู่ในช่วงระดับประมาณ 10 ถึง 100 keV มีความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 0.01 ถึง 0.1 nm แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์สำหรับใช้งานกับเครื่องสแกนของการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ส่วนใหญ่เป็นหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์และในรุ่นใหม่ล่าสุดจะเป็นเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอน โดยทั่วไปรังสีเอกซ์ทำอันตรกิริยากับร่างกายส่วนที่เคลื่อนที่ผ่านได้สองรูปแบบ คือ การชนแบบโฟโตอิเล็กทริกและการชนแบบคอมพ์ตัน โดยสามารถที่จะเคลื่อนทะลุผ่านร่างกายไปยังระบบตรวจวัดได้ ระดับพลังงานและความเข้มของรังสีเอกซ์ควรเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน โดยการปรับความต่างศักย์และกระแสไฟฟ้าของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ เพื่อให้ได้ภาพถ่ายที่คมชัดเห็นถึงบริเวณส่วนที่ต้องการศึกษา แต่จะคำนึงถึงความปลอดภัยทางรังสีและขีดจำกัดปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับเป็นสำคัญ นอกจากนี้รูปแบบลักษณะลำรังสีเอกซ์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดก็มีบทบาทสำคัญต่อคุณภาพและกระบวนการในการสร้างภาพสามมิติ มี 3 แบบ คือ ลำรังสีแบบขนาน (จุดตำแหน่ง) ลำรังสีบานปลายแบบรูปพัด (เส้นโค้ง) และ ลำรังสีแบบโคนบีม (พื้นที่ส่วนโค้ง) ดังแสดงในรูปที่ 2



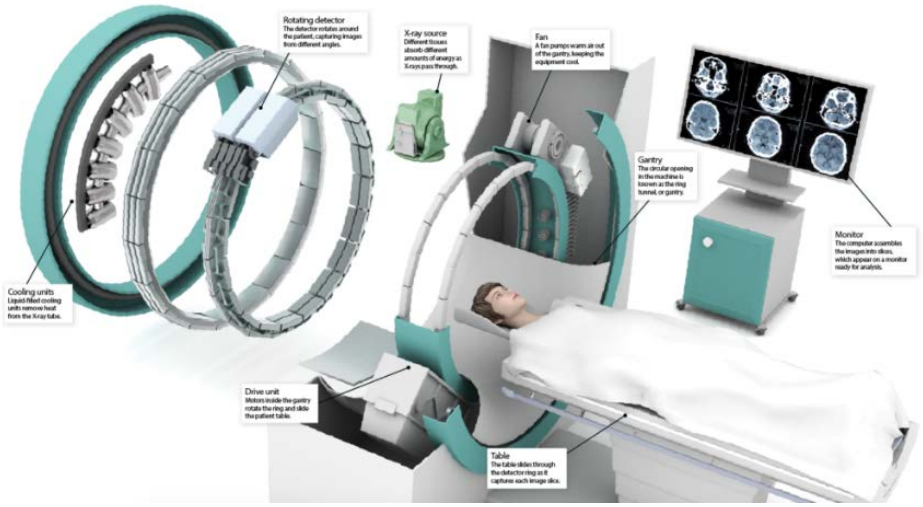
รูปที่ 2 *ลักษณะลำรังสีเอกซ์ (A) แบบขนาน, (B) แบบพัด และ (C) แบบโคนบีม [5,6]*

การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (X-ray computed tomography) หรือ CT-Scan

การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ใช้ภาพฉายของรังสีเอกซ์หลายภาพจากมุมฉายที่แตกต่างกันมารวบรวมประมวลผลใหม่เพื่อสร้างภาพภาคตัดขวางโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ทำให้ได้เป็นรูปร่างในแนวมิติที่สามขึ้นมา (คล้ายกับนำก้อนชิ้นงานมา “หั่นออกเป็นชิ้นสไลด์บางๆ” ให้มองเห็นภาพภาคตัดขวางภายใน) ชุดภาพฉายแต่ละชุดของแต่ละแผ่นสไลด์ของการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ ได้มาจากการหมุนถ่ายภาพรอบชิ้นงานหรือตัวผู้ป่วย 360° หรือเพียงแค่ 180° ในรุ่นใหม่กว่า ดังแสดงในรูปที่ 3 เมื่อฉายภาพที่มุมฉายต่างกันทำให้ได้ภาพฉายที่ได้จากมุมฉายแต่ละมุมก็จะต่างกัน จึงได้รับข้อมูลของวัตถุที่แตกต่างกัน คือถ้ายิ่งมีจำนวนมุมถ่ายเยอะยิ่งจะได้ข้อมูลเกี่ยวกับวัตถุมากขึ้นเท่านั้น ดังนั้นการสแกนการถ่ายภาพสามมิติแบบซีทีสแกนหรือการสร้างภาพแบบตัดขวางด้วยคอมพิวเตอร์ จึงมีบทบาทสำคัญในกระบวนการประมวลผลเพื่อการสร้างภาพจำลอง



รูปที่ 3 *ขั้นตอนการเก็บชุดข้อมูลภาพฉายรังสีในมุมต่างๆทั้ง 360 องศา และกระบวนการประมวลผลเพื่อสร้างภาพใหม่สำหรับการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์[7]*



รูปที่ 4 *เครื่องถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ (CT-scan) ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดรังสี หัววัดรังสี ระบบขับเคลื่อน ระบบระบายความร้อน ระบบการหล่อเย็น [8]*

จากหลักการส่องผ่านรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิดทะลุผ่านตัวผู้ป่วยไปยังหัววัดรังสีที่อยู่ฝั่งตรงกันข้าม และตรวจวัดความเข้มรังสีที่ทะลุผ่าน ผลที่ได้สัมพันธ์กับความหนาแน่นของอวัยวะส่วนที่ส่องผ่าน และสัญญาณวัดที่ได้จะส่งต่อไปยังอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและเป็นข้อมูลเพื่อสร้างเป็นภาพดิจิตอลสามมิติ อุปกรณ์ส่วนประกอบต่าง ๆ เหล่านี้จะรวมกันอยู่ในแกนทรี (Gantry) ที่เป็นส่วนโครงสร้างของการหมุนของเครื่องซีทีสแกน ดังแสดงในรูปที่ 4

การตรวจวัดปริมาณความเข้มรังสีเอกซ์ที่แตกต่างกันที่ เรียกว่า **“การลดทอนรังสี” (radiation attenuation)** ปริมาณการลดทอนรังสีเอกซ์ของอวัยวะแต่ละส่วนนั้นจะแปรผันไปตามความหนาแน่นของเนื้อเยื่อของแต่ละอวัยวะนั้น ค่าเหล่านี้ถูกตรวจวัดเป็นปริมาณโดยมาตรวัดฮอนส์ฟิลด์ (Hounsfield Unit: HU) หรือค่าความหนาแน่นทางรังสี (radiodensity) หรือหมายเลข CT ของแต่ละรายการอวัยวะ อวัยวะที่มีความหนาแน่นสูงหรือมีการลดทอนสูงนั้นคือมีการดูดกลืนรังสีได้ดี ปริมาณรังสีที่ทะลุผ่านที่ถูกตรวจวัดได้มีค่าความเข้มน้อยกว่าจะปรากฏเป็นพื้นที่สีขาวสว่างกว่าบนภาพทางรังสี เช่น กระดูก เมื่อเทียบกับอวัยวะที่เนื้อเยื่อมีความหนาแน่นต่ำกว่า มีการลดทอนต่ำจะมีการดูดกลืนรังสีได้น้อยกว่า จึงตรวจวัดรังสีที่ส่งผ่านออกมาได้ความเข้มสูงมากกว่าจึงแสดงผลเป็นพื้นที่สีดำกว่า เช่น เนื้อเยื่อกล้ามเนื้อ ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างกันของความมืด-ความสว่างและความเปรียบต่างของแต่ละจุดของภาพรังสี ซึ่งค่าเลข HU เป็นการแสดงเฉดระดับความเข้มสีเทาเพื่อสำหรับการสร้างภาพ [9]

ในการถ่ายภาพด้วยรังสีอาศัยการทำอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์กับเนื้อเยื่อเป็นหลัก และสำหรับวิธีการสร้างความเปรียบต่างในภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์โดยผ่านวิธีการคำนวณการลดทอนรังสี อธิบายได้โดยใช้ กฎของเบียร์-แลมเบิร์ต (Beer-Lambert Law) ถ้ามีการแบ่งวัตถุที่หนา X ให้เป็นชิ้นย่อยที่มีขนาดความหนาเท่ากันคือ w_i ดังแสดงในรูปที่ 5 ทำให้วิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉพาะส่วนคือ μ_i ของแต่ละชิ้นย่อยนั้นได้ โดยที่สัมพันธ์กันกับค่าโดยรวมของความแตกต่างระหว่างปริมาณความเข้มรังสีตกกระทบ (I_0) กับความเข้มรังสีเอกซ์ที่ตรวจวัดได้ (I_x) ของเนื้อเยื่อที่มีความหนารวม (X) ตามสมการที่ 1

$$I_x = I_0 e^{-\sum_{i=0}^{n} \mu_i \cdot w_i} \quad (1)$$

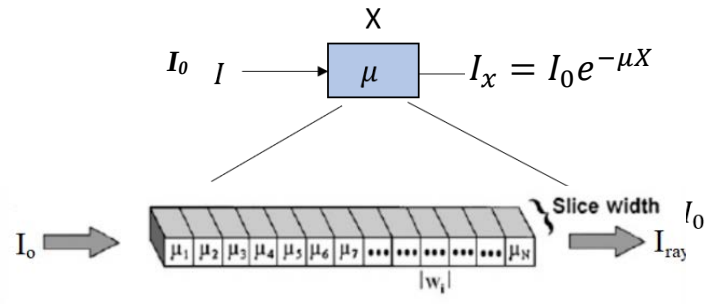
เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์จากแหล่งกำเนิด

I_x คือ ความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ส่องทะลุผ่านวัตถุที่ตรวจวัดได้

X คือ ความหนาของวัตถุ และ

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมของวัตถุ

การแบ่งก้อนวัตถุเป็นก้อนย่อย โดยมีขนาดความหนาคือ ‘‘w_i’’ ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของพื้นที่ที่ได้รับการตรวจวัดรังสีเอกซ์ หรือวงรอบการสแกน (a scan circle) สัมพันธ์ถึงขนาดเมทริกซ์ คือจำนวนแถวและคอลัมน์ของชิ้นสไลด์สร้างภาพของการแบ่งส่วนย่อย



รูปที่ 5 *แผนภาพแสดงความหมายของสมการ Beer-Lambert Law ในกรณีที่มองวัตถุเป็นองค์ประกอบรวมและแสดงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมของวัตถุ และกรณีที่แยกวัตถุเป็นชิ้นย่อย ๆ ที่มีสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉพาะส่วนแตกต่างกัน [10,11]*

เมทริกซ์การประมวลผลใหม่ (reconstruction matrix) [11] เพื่อทำการประเมินปริมาณการลดทอนของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นในแต่ละวอกเซล (Volume element, voxel) ของเมทริกซ์การประมวลผลใหม่ ค่าปริมาณการลดทอนที่คำนวณได้เหล่านี้จะแสดงเป็นระดับสีเทาในภาพสองมิติของวอกเซลที่จัดวางตามในระนาบ X-Y หรือมักเรียกว่า “พิกเซล (Picture element, pixel)” และขนาดรวมของพิกเซลของรูปภาพที่แสดงจะเรียกว่า “เมทริกซ์ของภาพ” (image matrix) ในการดำเนินการประมวลผลใหม่ให้พิจารณาแถวของวอกเซลล์ที่มีลำรังสี (ray) ผ่านในการรวบรวมเก็บข้อมูล แสดงในรูปที่ 5 โดยที่

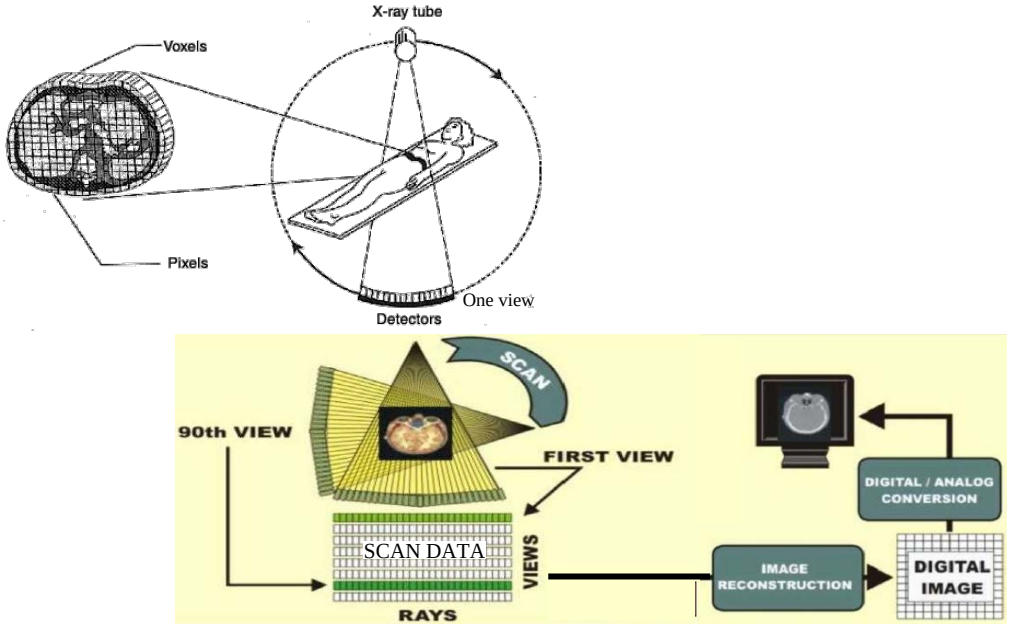
I_{ray} คือความเข้มรังสีเอกซ์ที่ส่องทะลุผ่านชิ้นวัตถุและตรวจวัดได้โดยหัววัดรังสี

I_0 คือความเข้มของรังสีเอกซ์เริ่มต้น

U_{ray} คือ ผลรวมของค่าการลดทอนของวอกเซลทั้งหมดตลอดเส้นทางการผ่านของลำรังสีเอกซ์หนึ่งลำ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ ค่า μ ที่ได้กล่าวมาแล้วในสมการที่ 1 ข้างบน และสามารถเขียนเป็นสมการที่ 2

$$U_{ray} = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + \ldots + u_n \quad (2)$$

เมื่อ $U_{ray} = -ln\left(\frac{I_{ray}}{I_0}\right)$ และ $u_i = \mu_i \cdot w_i$ คือ การลดทอนของแต่ละวอกเซล i นั้น ๆ ซึ่งเป็นค่าผลคูณของ μ_i ที่เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเฉพาะส่วนกับค่าความหนาของชิ้นย่อย w_i ของแต่ละวอกเซล ดังนั้นเมื่อหมุนไปองศาถัดไป ทำเช่นเดียวกันคือทำการตรวจวัดทีละแถวของวอกเซล เมื่อหมุนครบรอบ สามารถนำมาแสดงเป็นผลรวมของค่าการลดทอนทั้งหมดในแต่ละวอกเซลนั้น ๆ ที่ได้มาจากตลอดเส้นทางผ่านของแต่ละลำรังสีนั้น



รูปที่ 6 *กระบวนการสร้างภาพถ่ายเอกซเรย์ด้วยคอมพิวเตอร์สามมิติชนิดลำรังสีแบบรูปพัด [12,13]*

สำหรับการบันทึกข้อมูลที่ได้จากการดำเนินการตรวจวัดทางรังสีแต่ละครั้ง ที่ฉายภาพวัตถุสองมิติในระนาบ x-y ที่เรียกว่า การฉาย (projection) ผ่านวัตถุของแต่ละมุมองศา และข้อมูลที่วิเคราะห์ได้จะถูกบันทึกในมิติของระบบพิกัดทรงกระบอกคือ ระยะห่างจากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางตามแนวระนาบหัววัดรังสี (ระยะ r) และมุมองศาของการฉาย (θ) หรือ “การแปลงแบบเรดอน” (Radon transform) เมื่อตรวจวัดและบันทึกผลต่อไปจนกระทั่งครบรอบการสแกน จะได้ข้อมูลแสดงในรูปแบบไซน์โนแกรมของระยะ r กับ ตำแหน่งมุม θโดยภาพไซน์โนแกรมจะบ่งบอกวิถีการโคจรเป็นกราฟรูปไซน์ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในวัตถุที่จะมีลักษณะเฉพาะและแตกต่างกันไปในแต่ละองศาตลอดการสแกน อย่างไรก็ตามข้อมูลรูปแบบไซน์โนแกรมยังถือว่าเป็นข้อมูลดิบยังไม่เพียงพอสำหรับการสื่อความหมายให้เข้าใจได้ง่าย ข้อมูลไซน์โนแกรมจึงยังต้องผ่านกระบวนการประมวลผลเพื่อสร้างภาพใหม่เพื่อสร้างภาพดิจิตอลสามมิติ ดังแสดงในรูปที่ 6 โดย

การประมวลผลข้อมูลจำนวนมากมายของแต่ละลำรังสีนั้นต้องอาศัยอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์มาช่วย ซึ่งมีหลายเทคนิค อาทิเช่น การแปลงข้อมูลแบบลาปลาซ (Laplace transform), การฉายภาพย้อนกลับอย่างง่าย (simple back-projection), การฉายภาพย้อนกลับแบบกรอง (Filtered Back-projection: FBP) และ การวนซ้ำ (iterative algorithm) ซึ่งอัลกอริทึมทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้ในการประมวลผลหรือซ้อนทับข้อมูลภาพนั้น ๆ ได้มีการปรับปรุงพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยแต่ละวิธีการมีข้อดีและข้อจำกัดแตกต่างกันไป

เทคนิค FBP [14] เป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเนื่องจากเป็นเทคนิคที่สามารถดำเนินการได้ง่ายและได้ผลลัพธ์ที่ดีในเวลาที่รวดเร็ว แต่ข้อเสียของเทคนิคนี้คือต้องมีข้อมูลที่เก็บรวบรวมมาได้จำนวนมากและครบทุกมุมมอง แต่ถ้าหากข้อมูลมีจำนวนน้อยหรือจำกัดแล้วเทคนิควิธีการวนซ้ำทางคณิตศาสตร์ [15] น่าจะมีประสิทธิภาพดีกว่า จะเป็นวิธีการทำซ้ำเป็นรอบ ๆ (iteration) อาศัยหลักการทางพีชคณิตเชิงเส้น (linear algebra) มาจำลองภาพฉายจากมุมมองต่าง ๆ (projection data) โดยภาพจำลองนี้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับภาพฉายรังสีจากการตรวจวัดจริง กระบวนการเช่นนี้จะถูกทำซ้ำ ๆ จนกระทั่งได้ภาพที่สร้างขึ้นที่ใกล้เคียงภาพจริง แต่วิธีการนี้มีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนกว่าเทคนิค FBP รวมทั้งใช้เวลาในการประมวลผลนานกว่า อีกทั้งยังต้องอาศัยทรัพยากรคอมพิวเตอร์ในแง่ของหน่วยความจำและการประมวลผลสูงกว่า ซึ่งก็ทำให้เทคนิคนี้ไม่เป็นที่แพร่หลายในวงกว้างมากนัก แต่เทคนิคนี้มีประเด็นที่น่าสนใจคือในแง่ของการลดปริมาณรังสีที่มีต่อผู้ป่วยได้

นอกจากการพัฒนาโปรแกรมทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยในการประมวลผลข้อมูล ตัวเครื่องสแกนมีพัฒนาการอย่างต่อเนื่องด้วยเช่นกันทั้งทางด้านแหล่งกำเนิดรังสีและระบบตรวจวัดรังสี [16.17] ซึ่งการปรับปรุงพัฒนานั้นทำเพื่อให้ได้ชุดข้อมูลเกี่ยวกับการฉายภาพจำนวนมากเพียงพอ ซึ่งชุดข้อมูลของแต่ละการตรวจวัดของเครื่องรุ่นใหม่ที่ได้รับในแต่ละครั้ง เป็นข้อมูลจำนวนมากและซับซ้อนขึ้น ดังนั้นการประมวลผลข้อมูลก็ต้องมีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้นตามกันอย่างเหมาะสม ที่ส่งผลถึงคุณภาพ และความละเอียดคมชัดของภาพถ่ายที่ได้ในลำดับสุดท้ายนั้นเอง และมีความรวดเร็วในการถ่ายมากขึ้นทำให้ผู้ป่วยได้ปริมาณรังสีในการฉายภาพลดน้อยลง

การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์นี้ มีประโยชน์ในการสร้างภาพโครงสร้างร่างกายและอวัยวะภายในที่หลากหลาย เนื่องจากภาพถ่ายรังสีด้วยคอมพิวเตอร์นั้นมีความคมชัด แสดงเป็นภาพสามมิติ และสามารถสร้างความเปรียบต่างกันของเนื้อเยื่อต่างประเภทได้ดีกว่าการถ่ายภาพรังสีเอกซ์แบบสองมิติทั่วไป สำหรับการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดนั้นของกรณีทั่วไปก็ค่อนข้างมีประโยชน์มากอยู่แล้วในการจำแนกเนื้องอกที่ปอดและรายละเอียดการสะสมของของเหลวจากการติดเชื้อที่ปอดได้ และสามารถถ่ายภาพดูโครงสร้างภายในปอดที่อาจมีความผิดปกติที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปในลักษณะเฉพาะของบางโรคร้ายที่ซับซ้อนสังเกตเห็นได้ยากในบางบริเวณ [11]

การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดกับโรคติดเชื้อโควิด-19 (Chest CT-Scan for COVID-19)

ในขณะนี้มาตรฐานสำหรับการตรวจหาเชื้อไวรัสโคโรนาที่ถือว่าเป็น Gold standard คือ เทคนิคการเรืองแสงของการทำปฏิกิริยาลูกโซ่ต่อเนื่องพอลิเมอเรสของการถอดรหัสพันธุกรรมแบบย้อนกลับตามเวลาจริง (fluorescence-based realtime reverse transcription-polymerase chain reaction: rRT-PCR) หรือเรียกแบบย่อว่า วิธีการตรวจแบบ RT-PCR แต่มีรายงานที่เกิดขึ้นในสาธารณรัฐประชาชนจีนพบว่าการตรวจแบบ RT-PCR มีการรายงานผลการตรวจแสดงผลลบเทียม (false negative) คือแสดงผลว่าไม่ติดเชื้อในช่วงระยะเวลาการเริ่มต้นของโรค แต่เมื่อมีการตรวจซ้ำกลับพบการติดเชื้อในภายหลังขึ้น ดังนั้นจึงมีข้อเสนอแนะในการคัดกรองโรคนี้โดยอาศัยการตรวจสอบในหลายรูปแบบวิธีมาประกอบผลร่วมกันเพื่อให้ได้ผลที่ถูกต้องที่สุด วิธีที่นิยมนำมาเป็นตัวช่วยให้การคัดกรองที่มี

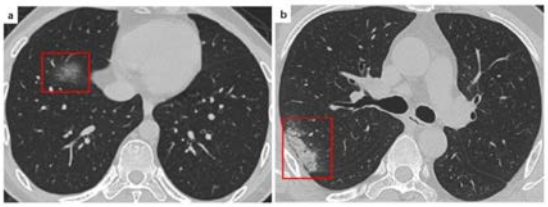
ประสิทธิภาพและให้ผลรวดเร็วในเวลาอันสั้นอีกวิธีหนึ่งคือ การคัดกรองขั้นแรกด้วยการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ทรวงอก (chest CT-scan) แต่ก็ยังคงต้องตรวจคัดกรองร่วมกับวิธีการตรวจแบบ RT-PCR เพื่อยืนยันโรค [18]

จากผลการศึกษาจากผู้ป่วยติดเชื้อไวรัสโควิด-19 ของโรงพยาบาลแห่งหนึ่งในสาธารณรัฐประชาชนจีน มีการเก็บตัวอย่างจากระบบทางเดินหายใจและเก็บตัวอย่างเลือดจากผู้ป่วยเหล่านี้ และทุกรายได้รับการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดแบบภาคตัดขวางแผ่นสไลด์บาง (chest thin-section CT) ได้ข้อสรุปว่า โรคปอดอักเสบจากการติดเชื้อโควิด-19 มีอาการโรคที่ตรวจพบได้บ่อยที่สุด คือการตรวจพบพื้นที่ฝ้าขาว-GGO (ground glass opacity: GGO) และแถบปื้นขาวจากการรวมกัน (consolidation) ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยเกิดกระจายไปตามพื้นที่ใต้เยื่อหุ้มปอด (subpleural) อย่างชัดเจน ซึ่งการเกิดพื้นที่ฝ้าขาวฝ้า-GGO ที่มักมีทั้งรูปแบบวงกลม (round GGO) หรือรูปแบบซ้อนทับที่ยุ่งเหยิง (crazy-paving pattern) ดังแสดงในรูปที่ 8 สำหรับภาวะหลอดลมเต็มด้วยอากาศ (air bronchograms) ดังแสดงในรูปที่ 9 อีกทั้งยังสามารถตรวจพบโพรงช่องว่าง (cavities) ต่อมน้ำเหลืองเมดิแอสตินัมขยายโตขึ้น (enlarged mediastinal lymph nodes) หรือภาวะน้ำในช่องเยื่อหุ้มปอด (pleural effusions) โดยอาการโรคเหล่านี้ไม่สามารถตรวจพบได้จากการตรวจประเมินด้วยการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดในเบื้องต้น แต่ในการติดตามระยะสั้นสามารถเห็นได้ว่าผู้ป่วยจำนวนมากมักมีความก้าวหน้าและมีการเปลี่ยนแปลงของอาการโรค ดังนั้นการสังเกตรูปแบบลักษณะโดยการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดของโรคปอดอักเสบติดเชื้อโควิด-19 สามารถช่วยในการวินิจฉัยและรักษาโรคได้อย่างรวดเร็ว ทันการในช่วงระยะเริ่มต้นได้ [19]

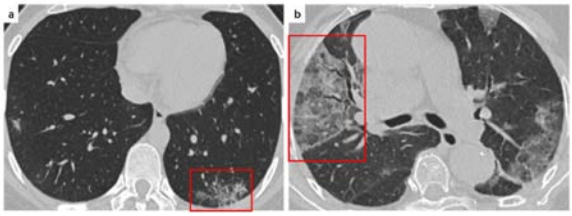
จากการศึกษาเปรียบเทียบความไวในการวินิจฉัยคัดกรองโรคปอดอักเสบจากการติดเชื้อโควิด-19 ของการตรวจด้วยวิธีการแบบ RT-PCR กับวิธีการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด พบว่า ความไวของการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด ในระยะเริ่มแรกมีค่า 97.2% ในขณะที่ความไวของวิธีการแบบ RT-PCR ในระยะเริ่มแรกเพียง 83.3% โดยที่มีผลการตรวจที่ผิดพลาด 6 กรณีของการตรวจครั้งแรก [20]

งานวิจัยต่อมาเป็นการศึกษา ทบทวนและรวบรวมผลการศึกษาอย่างเป็นระบบ รวมถึงวิเคราะห์ถึงการสรุปผลเชิงปริมาณจากผลการศึกษางานวิจัยที่ได้เผยแพร่ในปัจจุบัน สำหรับการเตรียมข้อมูลและหาหลักฐานของการตรวจสอบโรคโควิด-19 โดยวิธีการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด รวมไปถึงความคาดการณ์ภาพที่ปรากฏจากการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด [21] พบว่าอัตราสัดส่วนของผลตรวจที่เป็นผลบวกที่ได้ตรวจร่วมกับการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดสูงถึง 89.76% และเพิ่มขึ้นเป็น 90.35% สำหรับการตรวจคัดกรองร่วมกันเฉพาะวิธีการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดแบบบาง ดังนั้นการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดนี้มีบทบาทสำคัญในการวินิจฉัยโรคโควิด-19 ในช่วงระยะเริ่มต้นได้ดี ผลตรวจแบบทั่วไปที่พบได้จากการตรวจโดยการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด คือ พื้นที่ฝ้าขาว-GGO จำนวน 83.31% และสำหรับพื้นที่ฝ้าขาว-GGO ที่พร้อมกันกับแถบปื้นขาวจากการรวมกันของหลากหลายรูปแบบจำนวน 58.42% โดยที่พื้นที่การกระจายการเกิดรอยโรคมากที่สุดในลักษณะเกิดที่ปอดทั้งสองข้างจำนวน 78.2% และการกระจายแบบรอบ ๆ บริเวณขอบของปอดจำนวน 76.95% และพบว่า รอยโรคที่พบบ่อยที่สุดจากการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดคือพื้นที่ฝ้าขาว-GGO และแถบปื้นขาวจากการรวมตัวกัน ที่มักเกิดขึ้นกับปอดทั้งสองข้างโดยมีการกระจายแบบรอบ ๆ บริเวณขอบของปอด ลักษณะรอยโรคที่พบเหล่านี้ยังสามารถปรากฏในโรคปอดอักเสบจากโรคติดเชื้อไวรัสโคโรนาสายพันธุ์อื่น ๆ ที่รวมถึงโรคซาร์สและเมิร์สที่ถูกจัดให้อยู่ในตระกูลโคโรนาไวรัสนี้ที่เคยเกิดการระบาดมาก่อนหน้า ดังนั้นลักษณะรอยโรคที่ตรวจพบด้วยการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดนั้นจึง

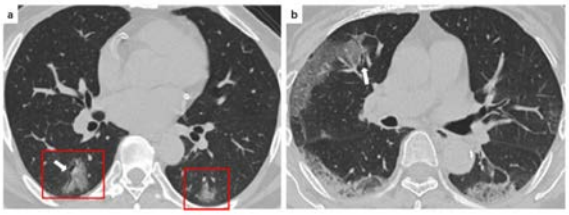
มีความคล้ายคลึงกันมาก อย่างไรก็ตาม ภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดในผู้ป่วยติดเชื้อโควิด-19 มีลักษณะเฉพาะบางอย่าง เช่นมักพบในปอดทั้ง 2 ข้างพร้อมกัน ขณะที่โรคซาร์สและเมิร์สมักพบรอยโรคในปอดเพียงข้างเดียว [22] สำหรับตัวอย่างภาพถ่ายรังสีของแต่ละรูปแบบลักษณะรอยโรคแบบต่าง ๆ ที่อาจจะตรวจพบได้บ่อยครั้งจากการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดได้ถูกรวบรวมแสดงไว้ในบทความวิชาการเรื่อง Chest CT manifestations of new coronavirus disease 2019 (COVID-19): A pictorial review ที่เผยแพร่ในวารสาร European Radiology ในเดือนมีนาคม ค.ศ. 2020 [21]



รูปที่ 7 *ภาพในกรอบสีแดงคือ (a) พื้นที่ฝ้าขาว (ground glass opacity: GGO) และ (b) แถบปื้นขาวจากการรวมกัน (consolidation) [21]*



รูปที่ 8 *ภาพในกรอบสีแดงคือ (a) กลุ่มฝ้าขาวแบบร่างแห (reticular pattern) และ (b) กลุ่มฝ้าขาวแบบซ้อนทับที่ยุ่งเหยิง (crazy paving stones) [21]*

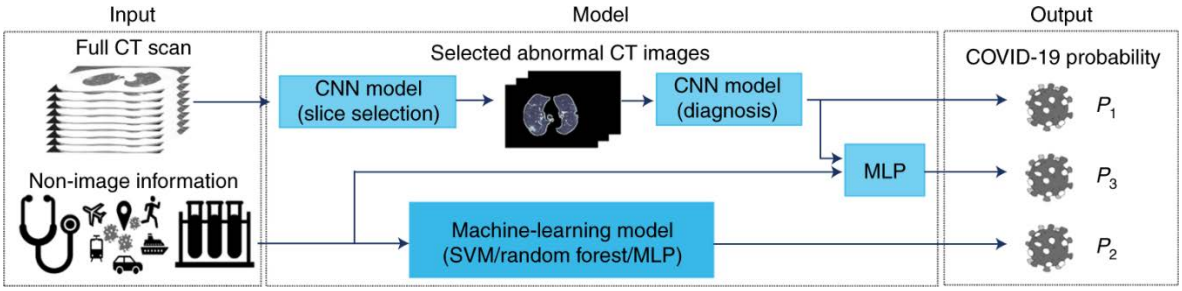


รูปที่ 9 *ภาพในกรอบสีแดงคือ (a) พื้นที่ฝ้าขาว-GGO ร่วมกับภาวะหลอดลมเต็มด้วยอากาศ ที่เกิดทั้งสองข้าง (bilateral GGO and air bronchogram) (b) กลุ่มฝ้าขาวแบบร่างแหที่เกิดบริเวณพื้นที่ใต้เยื่อหุ้มปอด (reticular pattern in the subpleural areas) [21]*

เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์กับโรคระบาดโควิด-19 (AI Technology and COVID-19)

จากงานวิจัยที่ได้กล่าวถึงข้างต้น เห็นได้ว่าการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดมีบทบาทสำคัญและมีประโยชน์อย่างยิ่งต่อการตรวจคัดกรองโรคปอดอักเสบจากการติดเชื้อโควิด-19 ซึ่งเป็นวิธีการที่ช่วยให้การวินิจฉัยโรคและการประมวลผลได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากรอยโรคที่เกิดขึ้นที่ปอดมีหลากหลายรูปแบบและสามารถเกิดความเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว จึงต้องทำการตรวจซ้ำและอ่านภาพซ้ำหลายครั้งภายในเวลาสั้น ๆ ภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด มีการแสดงข้อมูลที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ทำให้มีการพัฒนาสร้างระบบเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence: AI) ในการช่วยวิเคราะห์ภาพถ่ายทางรังสีสำหรับโรคโควิด-19 โดยการใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์และการวิเคราะห์รูปภาพทางรังสีเพื่อแยกแยะระหว่างพื้นที่ฝ้าขาว-GGO กับแถบปื้นขาวจากการรวมกัน ที่ค่อนข้างถือว่าเป็นอัตลักษณ์ของรอยโรคที่ปอด ที่มักสังเกตพบกับกรณีผู้ป่วยที่ติดเชื้อโควิด-19 และวิเคราะห์ผลเชิงจำนวนจากผลการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด ช่วยคัดกรองและป้องกันควบคุมโรคได้ในเบื้องต้น ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพในการหาเชื้อไวรัสผ่านการตรวจจับแบบอัตโนมัติและการวิเคราะห์เชิงจำนวนในระยะเวลาเพียงไม่กี่วินาที โดยมีอัตราความถูกต้องของการวินิจฉัยสูงถึง 96% และระบบนี้สามารถรายงานผลการตรวจให้แก่รังสีแพทย์และอายุรแพทย์ได้แบบอัตโนมัติในเวลาอันรวดเร็ว ขณะปัจจุบันนี้ระบบนี้ถูกนำไปใช้งานในสถาบันการแพทย์กว่า 100 แห่ง ในกว่า 25 มณฑล ของสาธารณรัฐประชาชนจีน [23] สำหรับประเทศไทย กระทรวงดิจิทัลเพื่อเศรษฐกิจและสังคมได้ร่วมมือกับบริษัท Huawei นำเทคโนโลยีนี้มามอบให้แก่โรงพยาบาลรามาธิบดีเพื่อศึกษาเรียนรู้ในการใช้งานเสริมการทำงานในการต่อสู้กับวิกฤตการณ์ครั้งนี้ด้วย [24] และขณะนี้มีแนวโน้มการพัฒนาระบบเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์ภาพถ่ายเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดในการวินิจฉัยโรคติดเชื้อโควิด-19 เพิ่มมากขึ้น [25-28] บทความวิจัยหนึ่งที่ค่อนข้างน่าสนใจจากคณะนักวิจัยในประเทศสหรัฐอเมริการ่วมกับคณะนักวิจัยในสาธารณรัฐประชาชนจีน นำเสนอผลงานของการพัฒนาเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในวารสาร Nature Medicine ในเดือนพฤษภาคม ค.ศ. 2020 [25] โดยเริ่มต้นจากการพัฒนาโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันเชิงลึก (a deep convolutional neural network: CNN) เพื่อเรียนรู้ลักษณะภาพถ่ายรังสีจากการสแกน CT ทรวงอกของผู้ป่วยติดเชื้อไวรัสโควิด-19 ในระยะเริ่มต้น จากนั้นจึงใช้วิธีแบบเครื่องเวกเตอร์ค้ำยันหรือซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (support vector machine: SVM), วิธีการแบบใช้หลักการสุ่มหรือป่าการตัดสินใจแบบสุ่ม (random forest) และวิธีการแบบเพอร์เซปตรอนหลายชั้น (multilayer perceptron: MLP) ในการจำแนกประเภทผู้ป่วยติดเชื้อไวรัสโควิด-19 ตามข้อมูลทางคลินิก และพบว่าวิธีการแบบ MLP แสดงประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในจัดระบบความสอดคล้อง สุดท้ายมีการพัฒนาแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมที่ร่วมกันของข้อมูลการถ่ายภาพรังสีจากการ CT-scan และข้อมูลทางคลินิก เพื่อทำนายวิเคราะห์สถานะโรคติดเชื้อไวรัสโควิด-19 โดยขั้นตอนการพัฒนาดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งมีแบบจำลองของระบบปัญญาประดิษฐ์ที่ให้ผลลัพธ์การวิเคราะห์สามแบบ คือ P_1 P_2 และ P_3 คือโอกาสความน่าจะเป็นของผู้ป่วยติดเชื้อโรคโควิด-19 โดยผลตรวจเป็นบวก คือเริ่มต้นจากข้อมูลการสแกน CT ทรวงอก และต่อด้วยข้อมูลทางคลินิก และลำดับที่สามคือการรวมกันของข้อมูลทั้งสองในส่วนของการประเมินผลการสแกน CT ทรวงอก เริ่มต้นจากการจัดอันดับแต่ละภาพแผ่นสไลด์ตามโอกาสความน่าจะเป็นของระดับความผิดปกติของเนื้อเยื่อพื้นฐาน (parenchymal abnormality) เป็นการทำนายสถานะโรคติดเชื้อโควิด-19 โดยแบบจำลอง CNN (โครงข่าย CNN ของการคัดเลือกแผ่นสไลด์ – slide selection) จากนั้น ภาพถ่ายการสแกน CT ของความผิดปกติสิบอันดับแรกสำหรับผู้ป่วยหนึ่งคน

จะถูกป้อนข้อมูลใส่ในแบบจำลอง CNN ที่สอง (คือ โครงข่าย CNN ของการวินิจฉัย- diagnosis CNN) เพื่อทำนายความคล้ายคลึงหรือความน่าจะเป็นของการเป็นโรคติดเชื้อโควิด-19 ซึ่งคือวิธีการของการได้ผลลัพธ์เป็น P_1 ต่อมาอีกคือข้อมูลทางประชากรศาสตร์และทางคลินิก เช่น อายุและเพศของผู้ป่วย ประวัติการสัมผัส อาการ และผลการทดสอบจากห้องปฏิบัติการ ถูกนำป้อนในแบบการเรียนรู้ของเครื่อง (machine-learning model) เพื่อจำแนกถึงโอกาสความน่าจะเป็นโรคติดเชื้อโควิด-19 หรือเป็นผลลัพธ์แบบที่ 2 คือ P_2 โดยใช้ข้อมูลทางคลินิกอย่างเดียวเท่านั้น และสุดท้ายแบบจำลองที่ได้จากวิธี CNN แบบวินิจฉัย (the diagnosis CNN model) ซึ่งเป็นแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องของข้อมูลทางคลินิกที่ไม่ใช่ข้อมูลภาพถ่ายรังสีที่ถูกนำมารวมเข้ากันกับโครงข่ายแบบ MLP เพื่อสร้างผลลัพธ์สุดท้ายของแบบจำลองร่วมคือ P_3 โดยที่มีการทดสอบโดยวิธีการ RT-PCR เป็นข้อมูลอ้างอิงในการฝึกอบรมแบบจำลองที่สร้างขึ้น และได้ผลว่า ระบบปัญญาประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมานี้มีความไวในการตรวจคัดกรองเทียบเท่ากันกับนักรังสีวิทยาทรวงอกระดับอาวุโส และสามารถระบุวินิจฉัยว่าเป็นโรคได้จำนวน 17 รายจากผู้ป่วยจำนวน 25 ราย ที่นักรังสีวิทยาจำแนกผู้ป่วยเหล่านี้ว่าไม่เป็นผู้ติดเชื้อโควิด-19 งานวิจัยนี้ได้สรุปว่าถ้ามีผลการสแกน CT ทรวงอกร่วมกับข้อมูลทางคลินิกที่เกี่ยวข้อง ระบบปัญญาประดิษฐ์ที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถช่วยวินิจฉัยผู้ป่วยติดเชื้อโรคโควิด-19 ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพค่อนข้างดี



รูปที่ 10 ตัวอย่างของกระบวนการสร้างแบบจำลองของระบบปัญญาประดิษฐ์ในการวิเคราะห์การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดเพื่อช่วยในการวินิจฉัยโรคโควิด-19 [25]

สรุป

การตรวจแบบเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด ถือเป็นวิธีการวินิจฉัยโรคโควิด-19 วิธีหนึ่ง ที่ให้ความถูกต้องในการประเมินผลการติดเชื้อสูง และด้วยการนำเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์มาช่วยสร้างระบบคอมพิวเตอร์ผู้ช่วยอัจฉริยะเพื่อช่วยวิเคราะห์และประเมินผลภาพถ่ายรังสีจากการถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด สามารถดำเนินการได้รวดเร็วมากขึ้น อย่างไรก็ตามการตรวจด้วยวิธีเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอดนี้ไม่ถือเป็นการตรวจที่มาทดแทนการตรวจสอบด้วยชุดตรวจปกติแต่อย่างใด แต่การตรวจด้วยวิธีดังกล่าว แนะนำให้มีการทำซ้ำและอ่านภาพที่เกิดขึ้นหลายรอบ เพื่อหารอยโรคในปอดที่มีจำนวนมากและมีความเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

เอกสารอ้างอิง

[1] https://covid19.pemandu.org/?fbclid=IwAR0CkJ1i2Sn67K-QmWaFXaMMcLKBZd1cJNCyeBWOWYG7XBigMBWwlEiunWo

[2] https://www.cdc.gov/coronavirus/types.html

[3] https://reference.medscape.com/slideshow/2019-novel-coronavirus-6012559#2

[4] Paolo Russo, "Handbook of X-ray Imaging: Physics and Technology", CRC Press (2018)

[5] https://www.medicalradiation.com/types-of-medical-imaging/imaging-using-x-rays/radiography-plain-x-rays/

[6] https://pdfs.semanticscholar.org/2a35/f3fa51c06d6c4d87989e06a7ee8b80fdf126.pdf?_ga=2.146714035.640071967.1588236416-1504402380.1573296407

[7] https://www.qualitymag.com/articles/94885-ct-inspection-an-inside-look-at-ct-based-nondestructive-testing

[8] https://www.howitworksdaily.com/how-does-a-ct-scanner-work/

[9] https://teachmeanatomy.info/the-basics/imaging/computed-tomography-ct-scans/

[10] http://199.116.233.101/index.php/CT_Image_Formation

[11] L. Goldman, "Principles of CT and CT technology", Journal of Nuclear Medicine Technology, 35, 115 (2007).

[12] https://www.slideshare.net/drpramodkrishnan/ct-basics

[13] https://www.physicscentral.com/explore/action/scans.cfm

[14] https://radiologykey.com/tomographic-reconstruction-in-nuclear-medicine/

[15] https://www.cockcroft.ac.uk/wp-content/uploads/2016/04/CT-Iterative_Reconstruction_Techniques.pdf

[16] https://radiologykey.com/computed-tomography-3/

[17] T. Flohr, "CT Systems", Current Radiology Reports, 1, 52 (2013).

[18] D.-S. Li, D.-W. Wang, J.-P. Dong, N.-N. Wang, H. Huang, H.-W. Xu and C. Xia, "False-negative results of real-time reverse-transcriptase polymerase chain reaction for severe acute respiratory syndrome Coronavirus 2: Role of deep-learning-based CT diagnosis and insights from two cases", Korea Journal Radiology (2020). https://doi.org/10.3348/kjr.2020.0146

[19] C.-S. Guan, Z.-B. Lv, S. Yan, Y.-N. Du, H. Chen, L.-G. Wei, R.-M. Xie and B.-D. Chen, "Imaging features of Coronavirus disease 2019 (COVID-19): Evaluation on thin-section CT", Academic Radiology (2020). https://doi.org/10.1016/j.acra.2020.03.002

[20] C.-Q. Long, H.-X. Xu, Q.-L. Shen, X.-H. Zhang, B. Fan, C.-H. Wang, B.L. Zeng, Z.-C. Li, X.-F. Li and H.-L. Li, "Diagnosis of the Coronavirus disease (COVID-19): RT-PCR or CT?", European Journal of Radiology, 126, 108961 (2020).

[21] Z. Ye, Y. Zhang, Y. Wang, Z.-X. Huang and B. Song, "Chest CT manifestations of new coronavirus disease 2019 (COVID-19): A pictorial review", European Society of Radiology (2020). https://doi.org/10.1007/s00330-020-06801-0

[22] C.-P. Bao, X.-H. Liu, H. Zhang, Y.-M. Li and J. Liu, "COVID-19 Computed Tomography findings: A systematic review and meta-analysis", Journal of the American College of Radiology (2020). https://doi.org/10.1016/j.jacr.2020.03.006

[23] https://www.ryt9.com/s/anpi/3106449

[24] https://droidsans.com/huawei-covid-การถ่ายภาพเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ปอด-ai-thailand/

[25] X. Mei, H. Lee, K. Diao, et al., "Artificial intelligence–enabled rapid diagnosis of patients with COVID-19", Nature Medicine (2020). https://doi.org/10.1038/s41591-020-0931-3

[26] https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.03.19.20039354v1.full.pdf

[27] https://www.fujifilm.com/news/n200519.html

[28] https://www.thelancet.com/pdfs/journals/landig/PIIS2589-7500(20)30054-6.pdf

Thai Journal of Physics Vol. 37 No. 2 (2020) 60-73

บทความวิชาการ (Article)

ความก้าวหน้าของแม่เหล็กถาวรปราศจากธาตุหายาก: แมงกานีส–บิสมัท

ประยูร ส่งสิริฤทธิกุล

สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอความก้าวหน้าของงานวิจัยและพัฒนาวัสดุแม่เหล็ก ที่มีส่วนผสมระหว่างแมงกานีสและบิสมัท โดยวัสดุดังกล่าวเป็นหนึ่งในวัสดุแม่เหล็กที่ได้รับความสนใจในการผลิตแม่เหล็กถาวรที่ปราศจากธาตุหายากซึ่งมีราคาสูง คุณสมบัติที่น่าสนใจยิ่งสำหรับวัสดุดังกล่าวคือ ค่าสนามลบล้างความเป็นแม่เหล็ก (coercivity) มีขนาดเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ~275 °C ซึ่งตรงกันข้ามกับวัสดุแม่เหล็กที่ใช้งานอยู่ทั่วไปในปัจจุบัน คุณสมบัติดังกล่าวทำให้วัสดุแม่เหล็กแมงกานีส-บิสมัทนี้เหมาะกับอุปกรณ์ที่มีการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิขณะใช้งาน งานวิจัยที่ผ่านมายังเน้นการพัฒนาเพื่อเพิ่มค่าสนามลบล้างความเป็นแม่เหล็ก และค่าสนามแม่เหล็กที่คงสภาพได้หลังถูกเหนี่ยวนำ (remanence) ซึ่งจะนำไปสู่การเพิ่มค่าผลผลิตพลังงานสูงสุด (maximum energy product) ของวัสดุแม่เหล็กดังกล่าว นอกจากนั้น มีการนำเสนอผลการศึกษาเกี่ยวกับการปรับแต่งคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กแมงกานีส-บิสมัท โดยการเจือธาตุที่สาม ตลอดจนผลการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตวัสดุผสมแม่เหล็กโดยนำวัสดุแม่เหล็กแมงกานีส-บิสมัท ผสมกับธาตุที่มีความเป็นแม่เหล็กชนิดอื่น เพื่อเพิ่มค่าผลผลิตพลังงานสูงสุด

คำสำคัญ: แม่เหล็กถาวร, แม่เหล็กถาวรปราศจากธาตุหายาก, แมงกานีส-บิสมัท

Abstract

This article provides a short summary on the recent development of rare-earth-free permanent magnetic materials based on a low-temperature phase manganese bismuth compound (LTP-MnBi). LTP-MnBi exhibits an interesting and unique magnetic property, i.e. the positive temperature coefficient of coercivity (below ~275 °C). This is opposite to all current permanent magnetic materials. At high temperature, the coercivity of LTP-MnBi is comparable to that of Nd-Fe-B magnets. Hence, LTP-MnBi is a potential candidate for high-temperature applications. Recent research activities on MnBi focused on materials synthesis techniques to enhance the coercivity

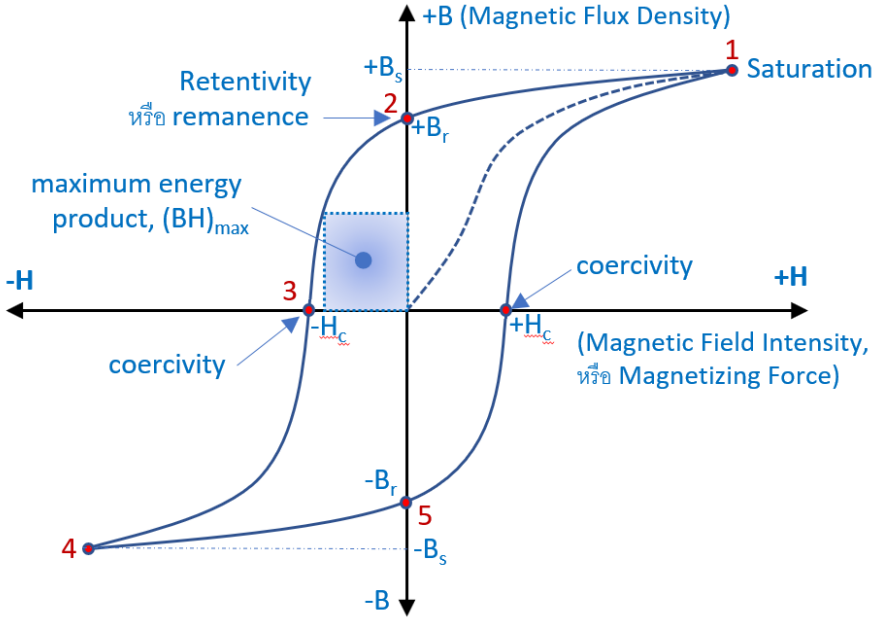
and remanence, and thus, larger maximum energy product. Interesting studies of the effects of the third element addition in MnBi are mentioned. Reports on the possibility to produce magnetic composite of LTP-MnBi and soft magnetic materials are also covered.

Keywords: Permanent magnet, Rare-earth-free permanent magnet, LTP-MnBi

บทนำ

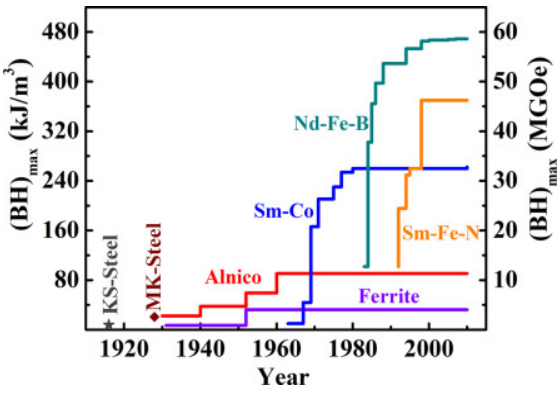
แม่เหล็กถาวรมีความสามารถในการรักษาฟลักซ์แม่เหล็กในกรณีที่ไม่มีสนามแม่เหล็กจากภายนอก นั่นคือแม่เหล็กถาวรมีศักยภาพที่จะสร้างพลังงานกับสารแม่เหล็ก แม่เหล็กถาวรมีบทบาทสำคัญในเทคโนโลยีสมัยใหม่ที่เกี่ยวข้องกับการแปลงพลังงาน [1] ในชีวิตประจำวันมีการใช้งานแม่เหล็กถาวรอยู่ทั่วไป เช่น แม่เหล็กติดตู้เย็น มอเตอร์ ไดนาโม เซนเซอร์และทรานส์ดิวเซอร์ ตลอดจนอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูล และที่สำคัญคือโลกปัจจุบันที่ให้ความสำคัญต่อสิ่งแวดล้อมนั้น ความต้องการที่จะใช้งานแม่เหล็กถาวรประสิทธิภาพสูงในเทคโนโลยีที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมีมากเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างต่อเนื่อง เช่น มอเตอร์แม่เหล็กถาวรประสิทธิภาพสูงสำหรับการขับเคลื่อนรถยนต์ไฮบริดและยานพาหนะไฟฟ้า ไดนาโมประสิทธิภาพสูงสำหรับการผลิตกระแสไฟฟ้าจากพลังงานลม นอกเหนือจากนั้น แม่เหล็กถาวรประสิทธิภาพสูงมีความจำเป็นต่อการพัฒนาระบบทำความเย็นที่อาศัยสนามแม่เหล็กที่ปราศจากสารเคมี ซึ่งจะนำไปสู่ตู้เย็นแม่เหล็กและเครื่องปรับอากาศแม่เหล็กในอนาคต

คุณสมบัติเชิงแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็กโดยทั่วไป อธิบายโดยกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก (magnetic flux density, B) กับความเข้มสนามแม่เหล็ก (magnetic field intensity, H) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นที่รู้จักในชื่อของ induction hysteresis loop หรือ B-H curve โดยกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลง โดยเริ่มจากจุดเริ่มต้นที่วัสดุไม่มีค่าฟลักซ์แม่เหล็ก (B เป็นศูนย์) และสนามแม่เหล็ก H มีค่าเป็นศูนย์ เมื่อมีการทำ magnetize วัสดุแม่เหล็กโดยสนามแม่เหล็ก H มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก B จะเพิ่มขึ้นตามเส้นประ จนกระทั่ง H มีค่าสูงถึงค่าหนึ่งแล้ว ค่า B จะไม่มีการเพิ่มขึ้นอีก นั่นคือการ magnetization ถึงจุดอิ่มตัวหรือ saturation (ตำแหน่งที่ 1 ในรูป) เมื่อมีการลดขนาดของสนามแม่เหล็ก H จนมีค่าเป็นศูนย์ ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก B มีการเปลี่ยนแปลงลดลงตามเส้นทางจากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 จะเห็นได้ว่าค่า B มีค่า ๆ หนึ่งที่ไม่เป็นศูนย์ ซึ่งเรียกว่าค่า retentivity หรือ remanence (B_r) เมื่อมีการเปลี่ยนทิศของสนาม H และค่อย ๆ เพิ่มขนาดของสนาม H พบว่าค่าฟลักซ์แม่เหล็ก B ลดลงตามเส้นทางจากตำแหน่งที่ 2 ไปยังตำแหน่งที่ 3 ณ ตำแหน่งที่ 3 นั้น ขนาดของสนามแม่เหล็ก H มีค่าเท่ากับ H_c หรือเรียกว่าค่า coercivity ซึ่งเป็นค่าสนามแม่เหล็กที่ลบล้างความเป็นแม่เหล็กของวัสดุแม่เหล็ก โดยทำให้ค่าฟลักซ์แม่เหล็ก B มีค่าเป็นศูนย์ หากค่าสนาม H มีค่าเพิ่มต่อเนื่องขึ้นอีก จะทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทางของฟลักซ์แม่เหล็ก B ในทิศตรงกันข้ามและจะมีขนาดเพิ่มขึ้นตามเส้นทางจากจุดที่ 3 ไปยังตำแหน่งที่ 4 ซึ่งเป็นจุดที่เกิดการอิ่มตัว นั่นคือค่าฟลักซ์แม่เหล็ก B จะไม่เพิ่มขึ้นอีกถึงแม้ว่าขนาดของสนาม H จะเพิ่มขึ้นอีกก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของค่าฟลักซ์แม่เหล็ก B อันเนื่องจากการเปลี่ยนค่าสนามแม่เหล็ก H จากตำแหน่งที่ 4 กลับไปยังตำแหน่งที่ 1 เป็นไปตามลักษณะเช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนแปลงจากตำแหน่งที่ 1 มายังตำแหน่งที่ 4



รูปที่ 1 *แสดง induction hysteresis loop หรือ B-H curve เป็นแผนภาพที่แสดงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของวัสดุ เป็นการแสดงค่า magnetic flux (B) ของวัสดุที่อยู่ในสนามแม่เหล็ก (H) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของ magnetic flux ขึ้นอยู่กับ B ที่มีอยู่เดิมและทิศทางของ H (บ่อยครั้งที่การแสดงคุณสมบัติในรูปของ magnetization hysteresis loop หรือ M-H curve ซึ่งค่า B และ M มีความสัมพันธ์ตามสมการ B=μ(H+M) โดยที่ μ คือค่า permeability ของวัสดุ)*

แม่เหล็กถาวรที่มีประสิทธิภาพสูงมีค่าสนามแม่เหล็กสูง (มีค่า retentivity หรือ remanence ที่สูง) และทนต่อการถูกลบล้างความเป็นแม่เหล็กที่สูง (มีค่า coercivity, H_c, ที่สูง) ส่งผลให้ค่าผลผลิตพลังงานสูงสุด (maximum energy product, $(BH)_{max}$) มีค่าที่สูง ค่า $(BH)_{max}$ ดังกล่าวเป็นผลคูณระหว่างค่า B และ H ที่ทำให้ได้ค่ามากที่สุด ดังแสดงเป็นพื้นที่ใน hysteresis loop ในรูปที่ 1 ค่า $(BH)_{max}$ เป็นตัวชี้วัดประสิทธิภาพแม่เหล็กถาวร [2] ในช่วงที่ผ่านมา ได้มีการวิจัยและพัฒนาวัสดุแม่เหล็กเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพหรือค่า $(BH)_{max}$ ของแม่เหล็กถาวร ดังแสดงในรูปที่ 2 เป็นที่ปรากฏว่าในช่วงหลายปีที่ผ่านมาแม่เหล็กถาวรที่มีประสิทธิภาพสูงผลิตจากวัสดุที่มีธาตุหายาก (rare earth) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยแม่เหล็กดังกล่าวได้แก่ แม่เหล็กที่ได้จากผสมระหว่าง Samarium (Sm) และ Cobalt (Co) และ แม่เหล็ก Nd-Fe-B (NIB) ซึ่งเตรียมได้จากการผสมของนีโอดิเมียม (neodymium, Nd) เหล็ก (iron, Fe) และโบรอน (boron, B) แล้วอบร้อนเพื่อทำให้เกิดสารประกอบ $Nd_2Fe_{14}B$ โดยสารดังกล่าวมีค่า $(BH)_{max}$ สูงเกือบ 60 MGOe [1] เป็นแม่เหล็กถาวรใช้กันอย่างแพร่หลาย และมีค่า $(BH)_{max}$ สูงสุดในบรรดาแม่เหล็กที่มีจำหน่ายในปัจจุบัน



รูปที่ 2 *พัฒนาการของสารแม่เหล็กที่ใช้ทำแม่เหล็กถาวร ในช่วง 100 ปีที่ผ่านมา [1]*

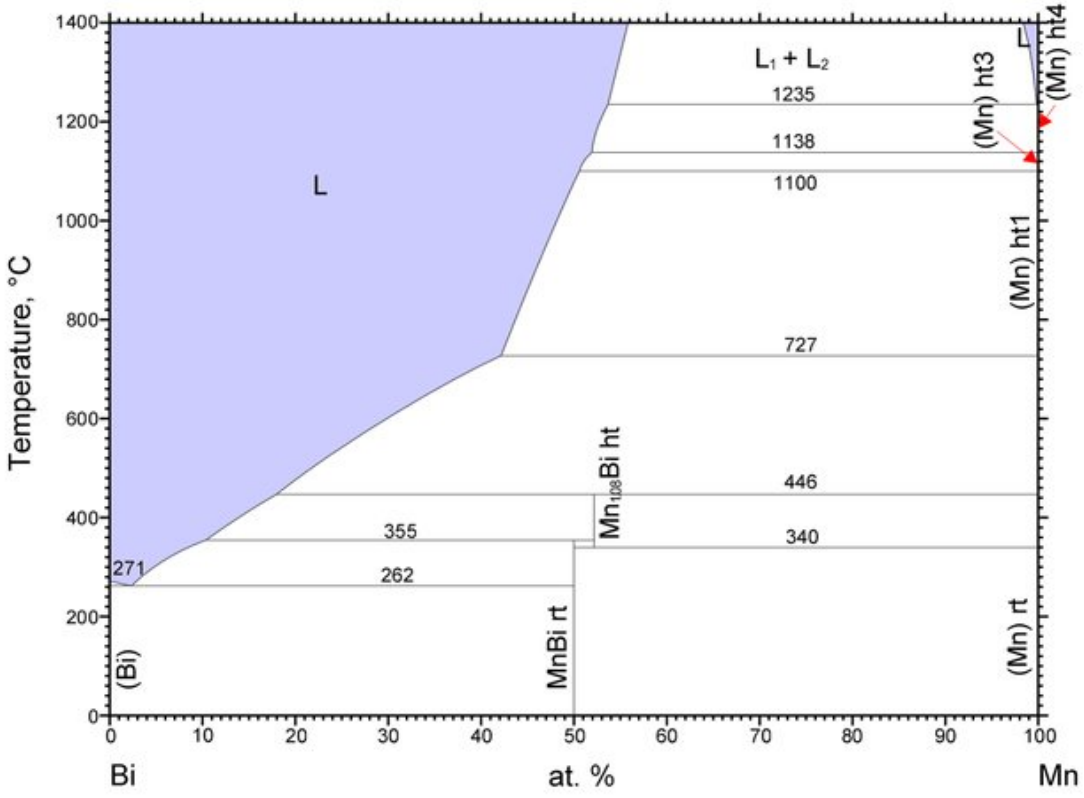
วัสดุแม่เหล็ก Nd-Fe-B และ Sm-Co ได้รับความนิยมในช่วงเวลาที่ผ่านมาในอุตสาหกรรมแม่เหล็กถาวร เนื่องจากคุณสมบัติที่เหนือกว่าสารอื่น ๆ เช่น ค่า $(BH)_{max}$ ที่สูง และมีราคาต่ำ อย่างไรก็ตามวัสดุที่ประกอบด้วยธาตุหายากเหล่านี้มีข้อเสียที่เห็นได้ชัด เช่น ความต้านทานการกัดกร่อนไม่ดี การสูญเสียคุณสมบัติแม่เหล็กเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น [3] นอกจากนี้ตามรายงานของกระทรวงพลังงานสหรัฐปี ค.ศ. 2011 [4] องค์ประกอบธาตุหายากโดยเฉพาะ Nd และ Sm ซึ่งเป็นธาตุที่อยู่ในวิกฤตด้านอุปทานและการระดมทำเหมืองเพื่อที่จะนำธาตุเหล่านี้มาใช้จะนำไปสู่ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เพื่อเลี่ยงปัญหาดังกล่าว แม่เหล็กถาวรที่ปราศจากธาตุหายากจึงถือเป็นทางเลือก แม้ว่าค่า $(BH)_{max}$ ที่คาดการณ์ในทางทฤษฎีสำหรับวัสดุแม่เหล็กที่ปราศจากธาตุหายากนั้น มีค่าน้อยกว่าของวัสดุแม่เหล็กที่ทำจากธาตุหายาก แต่ข้อเสียของแม่เหล็กที่ทำจากธาตุหายากดังกล่าวข้างต้นทำให้เกิดแรงจูงใจเพิ่มมากขึ้นในการวิจัยและพัฒนาแม่เหล็กถาวรที่ปราศจากธาตุหายาก [5]

แม่เหล็กถาวรในยุคแรก ๆ ผลิตจากวัสดุที่ปราศจากธาตุหายาก เช่น แม่เหล็ก Alnico และ Ferrite แม่เหล็กดังกล่าวมีค่า $(BH)_{max}$ ค่อนข้างต่ำสำหรับการใช้งานที่ต้องการแม่เหล็กถาวรที่มีประสิทธิภาพสูง [6] ตามหลักทฤษฎี วัสดุที่มีศักยภาพเป็นแม่เหล็กที่ปราศจากธาตุหายากนั้นควรจะมี Mn เป็นองค์ประกอบ เนื่องจากว่าการที่วาเลนซ์อิเล็กตรอนทั้งห้าของ Mn นั้นไม่มีการจับคู่ ส่งผลให้เกิดพลังงาน magneto-crystalline anisotropy energy ที่มีค่าสูง [5] เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนของวัสดุแล้ว MnAl นับเป็นสารแม่เหล็กที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก แต่อย่างไรก็ตาม ได้มีการทดลองพิสูจน์แล้วว่าสารแม่เหล็ก LTP-MnBi (LTP ย่อมาจาก low-temperature phase) มีค่า $(BH)_{max}$ ที่สูงกว่า MnAl และ MnGa [5] และที่สำคัญ ความเสถียรของ τ-phase MnAl นั้นเป็นปัญหาเมื่อมีการอบร้อนเป็นเวลานาน [2] ได้มีรายงานว่าสารแม่เหล็ก MnAl บริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องมีค่า M_s (saturation magnetization) เท่ากับ 125 emu/g ค่า coercivity เท่ากับ 5 kOe และค่า $(BH)_{max}$ เท่ากับ 3.1 MGOe ส่วนสารแม่เหล็ก $Mn_{1.2}Ga$ มีค่า M_s เท่ากับ 80 emu/g ค่า coercivity เท่ากับ 3.5 kOe และมีค่า $(BH)_{max}$ เท่ากับ 2.5 MGOe

LTP-MnBi เป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติ ferromagnetic มีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของอะตอมเช่นเดียวกันกับโครงสร้างของ Nickel Arsenide (NiAs) โดยมีค่า lattice parameters a=4.29 Å และ c=6.13 Å มีการรายงานว่าสารแม่เหล็ก LTP-MnBi (95 wt.%) นั้นมีค่า $(BH)_{max}$ สูงถึง 8.9 MGOe [7, 8] และที่สำคัญคือ LTP-MnBi มีคุณสมบัติที่เป็นเอกลักษณ์นั่นคือการที่ LTP-MnBi เป็นสารแม่เหล็กที่มีค่าสัมประสิทธิ์อุณหภูมิเชิงบวกที่มีค่าสูง นั่นหมายความว่าค่า coercivity มีค่าเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ จึงเหมาะสำหรับการใช้งานแม่เหล็กถาวรที่

อุณหภูมิสูง อีกประเด็นที่สำคัญคือว่าค่า coercivity ของ LTP-MnBi ที่เพิ่มตามอุณหภูมิสูงเมื่อถึงจุดหนึ่งแล้วนั้นจะมีค่าสูงกว่าค่า coercivity ของแม่เหล็ก Nd-Fe-B [9] เป็นที่ทราบในวงการว่าสารแม่เหล็ก LTP-MnBi จะเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 340°C [10] ได้มีการคาดการณ์ทางทฤษฎีด้วยการคำนวณพบว่า LTP-MnBi ที่บริสุทธิ์มีค่า $(BH)_{max}$ ประมาณ 17.7 MGOe ที่อุณหภูมิห้อง [1] และเมื่อไม่นานมานี้ ได้มีการรายงานผลการทดลองค่าผลผลิตพลังงานสูงถึง 16.3 MGOe สำหรับฟิล์มบางหลายชั้นของ LTP-MnBi [11]

การสังเคราะห์สารแม่เหล็ก MnBi

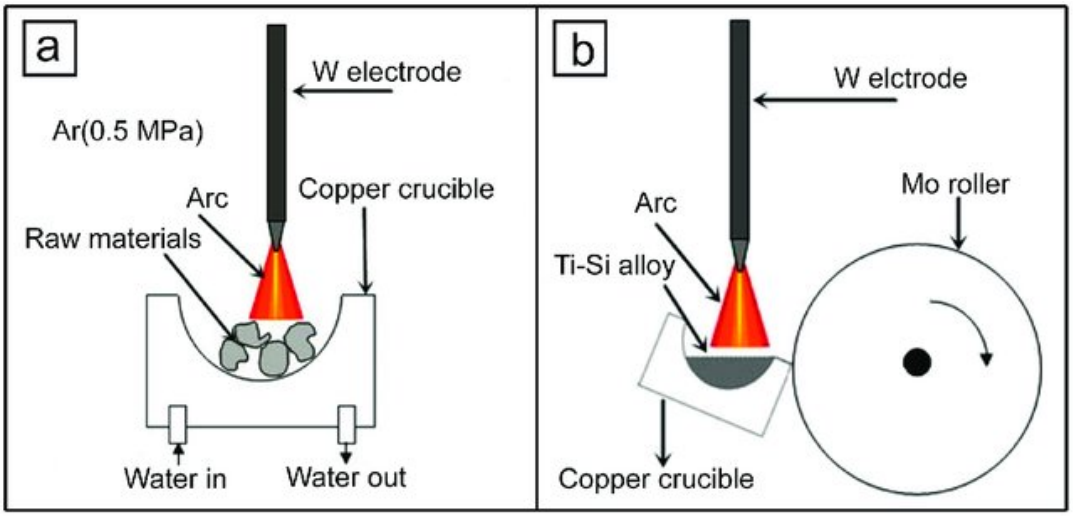


รูปที่ 3 แผนภาพเฟส ของ Mn-Bi [12]

การสังเคราะห์เพื่อที่จะได้ LTP-MnBi เฟสเดียวนั้นยากมากในทางปฏิบัติ เนื่องจากความแตกต่างอย่างมากของจุดหลอมเหลวของ Mn (1246°C) และ Bi (271°C) ปัญหาหลักคือการแยกตัวของ Mn อันเนื่องมาจากผลของปฏิกิริยา peritectic ระหว่าง Mn และ Bi จากแผนภาพเฟส (phase diagram) ระหว่าง Mn-Bi ดังแสดงในรูปที่ 3 การเกิดปฏิกิริยาแบบ peritectic ส่งผลทำให้เกิด LTP-MnBi โดยมี Bi เป็นส่วนเกินเสมอ [10] ความท้าทายดังกล่าวจึงนำไปสู่การพัฒนาเทคนิคต่าง ๆ สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคแม่เหล็ก LTP-MnBi ที่มีความบริสุทธิ์สูงเพื่อเพิ่มคุณสมบัติทางแม่เหล็ก เทคนิคที่นิยมใช้ทั่วไปสรุปได้ดังนี้

Arc-melting

Arc-melting เป็นเทคนิคโลหะวิทยาแบบดั้งเดิมที่นิยมใช้ในการเตรียมสารผสม MnBi [13] โดยองค์ประกอบคือ Mn และ Bi เป็นวัตถุดิบถูกทำให้เป็นของเหลวโดยใช้อาร์คไฟฟ้าในเตาหลอมอาร์คภายใต้บรรยากาศก๊าซเฉื่อยอาร์กอนหรือสุญญากาศ ดังแสดงในแผนภาพในรูปที่ 4a ในช่วงเวลาที่ผ่านมา ได้มีรายงานความสำเร็จในการผลิต LTP-MnBi ที่มีความบริสุทธิ์สูงถึง 98 wt.% โดยกระบวนการอาร์ค และตามด้วยขั้นตอนการบดและอบร้อนในสุญญากาศ [14] ผง MnBi ที่เตรียมโดยการหลอมอาร์คตามด้วยการบด การอบร้อนและการโม่ให้เล็กลงประมาณ 1-7 ไมครอนด้วยวิธีการ low-energy ball milling นั้น มีค่า coercivity สูงถึง 12 kOe และเมื่อมีการขึ้นรูปแท่งแม่เหล็กด้วยวิธีการที่เหมาะสมแล้วทำให้ได้ค่า remanence (B_r) เท่ากับ 6.0 KG ค่า $(BH)_{max}$ เท่ากับ 8.4 MGOe และค่า coercivity เท่ากับ 6.2 kOe ที่อุณหภูมิห้อง ค่า coercivity ของแม่เหล็กเพิ่มขึ้นเป็น 16.2 kOe ที่อุณหภูมิ 127 °C ส่วน B_r และ $(BH)_{max}$ มีค่าลดลงที่อุณหภูมิดังกล่าวเป็น 5.3 kG และ 6.8 MGOe ตามลำดับ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า LTP-MnBi มีความเสถียรทางความร้อนในสภาพแวดล้อมความดันบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิสูงถึง 200 °C [15] แต่อย่างไรก็ตาม ได้มีรายงานว่าการโม่ให้เล็กลงด้วยวิธีการ ball milling อาจจะทำให้เกิดความร้อนที่ส่งผลต่อการลดลงของค่า Ms สภาพแม่เหล็กที่ลดลงสามารถกู้คืนได้ด้วยการอบร้อนที่ 290 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง [16]



รูปที่ 4 *แผนภาพของเครื่องมือสำหรับ (a) electric arc melting device สำหรับการหลอมวัสดุและ (b) melt-spinning device สำหรับการหลอมและการทำวัสดุเป็นของแข็งอย่างรวดเร็ว [17]*

Melt-spinning

Melt-spinning เป็นการหลอม Mn และ Bi เข้าด้วยกันแล้วนำมาทำให้แข็งตัวอย่างรวดเร็วบนล้อหมุนโลหะที่มีการหล่อเย็น ดังแสดงในรูปที่ 4b เทคนิค melt-spinning สามารถลดหรือกำจัดการแยกตัวของ Mn [18] ทำให้สามารถผลิต LTP-MnBi ที่มีความบริสุทธิ์สูงกว่า 95 wt.% และยิ่งไปกว่านั้นพบว่าเมื่อทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของผง LTP-MnBi มีขนาดเล็กประมาณ 20-30 nm ทำให้ค่า coercivity

สูงถึง 10 KOe ค่า Ms เท่ากับ 75 emu/g และค่า $(BH)_{max}$ เท่ากับ 7.1 MGOe ที่อุณหภูมิห้อง และที่อุณหภูมิ 273 ˚C ค่า coercivity มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 25 kOe [19] นอกจากนั้น ได้มีรายงานว่าหากมีการทำกระบวนผลิตให้สมบูรณ์มากขึ้นก็สามารถทำให้ได้ LTP-MnBi ที่มีความบริสุทธิ์ถึง 98 wt.% และค่า $(BH)_{max}$ สูงถึง 7.3 MGOe [20] ความสำเร็จที่สามารถสังเคราะห์ LTP-MnBi ได้โดยแทบจะปราศจากการหลงเหลือของธาตุ Mn เกิดจากความสามารถในควบคุมอัตราการทำให้สารเย็นลงให้มีค่าที่เหมาะสม การควบคุมอัตราดังกล่าวสามารถทำได้สำหรับการผลิต LTP-MnBi ในปริมาณไม่มากนัก แต่สำหรับการผลิตในปริมาณมากในระดับอุตสาหกรรมแล้วเป็นเรื่องที่ยากมาก [21]

Chemical method

Chemical method เป็นวิธีการสังเคราะห์สารที่มีความยืดหยุ่นและหลากหลายในการจัดการรูปร่าง ขนาดอนุภาค และการกระจายของขนาดสารแม่เหล็ก [22] ได้มีรายงานหนึ่งที่ใช้ปฏิกิริยาเคมีในการสังเคราะห์อนุภาคนาโน Mn และ Bi และจากนั้นผสมใน hexane แล้วนำไปอบร้อนที่อุณหภูมิ 250 ˚C ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน พบว่ายิ่งเวลาในการอบร้อนนานขึ้นการเกิดปฏิกิริยาเพื่อทำให้เกิด LTP-MnBi มีเพิ่มขึ้น รวมถึงคุณสมบัติทางแม่เหล็กก็ดียิ่งขึ้น แต่อย่างไรก็ตาม หากเทียบกับเทคนิค arc-melting กระบวนการทางเคมีที่ใช้มีประสิทธิภาพมากขึ้นในประเด็นของเวลาและพลังงาน ด้วยเหตุผลที่ว่าเพียงแค่เวลาการอบร้อนสั้น ๆ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับความเป็นเนื้อเดียวกันของสาร [23] ได้มีรายงานการใช้วิธีการทาง hydrothermal เพื่อที่จะทำให้สารผสมระหว่าง manganese acetate tetrahydrate, bismuth nitrate pentahydrate, hydrazine hydrate และ poly-vinylpyrrolidone ตกผลึกได้ LTP-MnBi ที่มีค่า M_s เท่ากับ 2.37 emu/g และค่า H_c เท่ากับ 8 kOe ที่อุณหภูมิ 5K [24] อีกกระบวนการทางเคมีหนึ่งคือ metal-redox synthesis ซึ่งสามารถสร้างอนุภาค MnBi ที่มีความเสถียรและมีขนาดในเรือนนาโนเมตร มีค่า M_s และ H_c สูงถึง 49 emu/g และ 15 kOe ตามลำดับ [25] นอกเหนือจากที่กล่าวมา ได้มีการนำเอาขบวนการ mechanochemical process ผลิต LTP-MnBi ที่มีค่า H_c สูงถึง 16.3 kOe [26] อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้มีข้อจำกัดเนื่องจากความยากที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชันของ Mn และ Bi ไปพร้อม ๆ กัน เพราะว่าค่าศักย์ของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันทั้งสองธาตุมีค่าเป็นลบอย่างมาก [24]

Sintering

Sintering เป็นวิธีให้ความร้อนเพื่อที่จะทำให้เกิดการยึดติดกันของสารและการแพร่เข้าไปในเนื้อสาร เทคนิค sintering แบ่งย่อยได้เป็น (1) solid state sintering (2) liquid phase sintering (3) viscous flow sintering และ (4) transient-liquid phase sintering ในกรณีแรก สารจะอยู่สถานะของแข็งตลอดกระบวน ส่วน liquid phase sintering นั้น สารอยู่ในสถานะของเหลวระหว่างการ sintering โดยที่เปอร์เซ็นต์ของเหลวจะน้อยกว่าส่วนผสมที่เป็นของแข็ง ในกรณี viscous sintering นั้นสัดส่วนของของเหลวจะสูงพอสมควรและการเพิ่มความหนาแน่นจะเกิดขึ้นภายใต้อิทธิพลของแรงตึงผิวโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของอนุภาค ส่วน sintering แบบสุดท้ายนั้น ขั้นตอนแรกของกระบวนการเริ่มต้นด้วยสถานะของเหลวแต่เสร็จสมบูรณ์ในรูปของของแข็ง [27] นอกเหนือจากรูปแบบทั้งสี่ ยังมีวิธีการที่นำเอาเทคนิคอื่นมาใช้ในขณะ sintering เช่น การเพิ่มแรงดัน หรือการใช้พลาสมาเสริม เป็นต้น ได้มีรายงานการสังเคราะห์ LTP-MnBi ที่มีความบริสุทธิ์ถึง 90 wt.% โดยเทคนิค sintering ตามด้วยการคัดแยกสารแม่เหล็ก (magnetic separation) เมื่อทำการขึ้นรูปแม่เหล็กถาวรพบว่าที่อุณหภูมิ 127 °C แม่เหล็กดังกล่าวมีค่า $(BH)_{max}$ เท่ากับ 4.6 MGOe โดยมีค่า H_c สูงถึง 20 kOe ณ ที่อุณหภูมิห้องแม่เหล็กดังกล่าว มีค่า $(BH)_{max}$ เท่ากับ 7.7 MGOe และค่า H_c เท่า 14 kOe [28] ส่วนอีกรายงานหนึ่งที่สังเคราะห์ LTP-MnBi โดยการ sintering ที่อุณหภูมิ 700 °C ภายใต้บรรยากาศของก๊าซฮีเลียมแล้วมีการควบคุมอัตราการเย็นตัวลงไปถึง 320 °C สุดท้ายมีการบดเพื่อให้ได้ผง MnBi แล้วทำการขึ้นรูป

แม่เหล็ก พบว่าแม่เหล็กดังกล่าวมีค่า $(BH)_{max}$ เท่ากับ 4.3 MGOe และค่า H_c เท่ากับ 3.4 kOe [29] นอกเหนือจากนั้น ได้มีรายงานการใช้เทคนิค spark plasma sintering ในการเตรียมแม่เหล็ก MnBi ประสิทธิภาพสูงโดยรายงานว่าค่า H_c มีค่าสูงถึง 7.11 kOe ค่า M_s เท่ากับ 26 emu/g และค่า $(BH)_{max}$ เท่ากับ 1.53 MGOe ที่อุณหภูมิห้อง [30] ในช่วงเริ่มต้นของงานวิจัยวัสดุ LTP-MnBi นั้นเป็นไปได้ยากมากที่จะได้สัดส่วนที่สูงของ LTP-MnBi ในสารที่สังเคราะห์ได้ จึงต้องใช้ขั้นตอนที่จะเพิ่มความบริสุทธิ์ของ LTP-MnBi โดยการคัดแยกสารแม่เหล็กซึ่งมีการรายงานว่า LTP-MnBi ที่เตรียมโดยเทคนิค sintering สามารถทำให้บริสุทธิ์ได้ง่ายกว่า LTP-MnBi ที่เตรียมโดยเทคนิค mechanical alloying และ induction melting [31]

แม้ว่าจะมีการนำเทคนิคการสังเคราะห์ต่าง ๆ มาใช้ในการเตรียม LTP-MnBi ที่มีความบริสุทธิ์สูง แต่ไม่มีรายงานใดที่แสดง $(BH)_{max}$ เทียบได้กับค่าทางทฤษฎี เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติทางแม่เหล็กของ LTP-MnBi จำเป็นต้องมีการพัฒนากระบวนการบางอย่าง เช่น การโม่ให้ขนาดอนุภาคแม่เหล็กเล็กลงโดยใช้การ ball milling และการทำให้บริสุทธิ์ด้วยการคัดแยกสารแม่เหล็กโดยสนามแม่เหล็ก การทำ ball milling นำไปสู่การเพิ่มค่าสนาม H_c ของสารแม่เหล็ก MnBi โดย ball milling จะทำให้ขนาดของผลึกลดลงและความเครียดในโครงสร้างผลึกเพิ่มขึ้น [32] ส่งผลให้ค่า H_c มีค่าเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามการเกิดออกซิเดชันของพื้นผิวรวมถึงการสลายตัวของ Bi อาจเกิดขึ้นหากเวลาการทำ ball milling นานเกินไปซึ่งก็จะส่งผลให้คุณสมบัติทางแม่เหล็กลดลง [14,33]

สารผสม LTP-MnBi ที่เตรียมด้วยเทคนิคที่ผ่านขบวนการทางความร้อนนั้นหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะมี Bi เป็นส่วนเกินเสมอ [10] ดังนั้นจึงมีความพยายามที่จะคัดแยก Bi ส่วนเกินนี้ออกมาโดยอาศัยสนามแม่เหล็ก เนื่องจากธาตุ Bi บริสุทธิ์เป็นสาร diamagnetic มีรายงานว่าหลังจากการแยกแม่สารเหล็ก ทำให้ปริมาณของ Bi ลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งช่วยเพิ่มสัดส่วนของ LTP-MnBi จาก 50 wt.% เป็น 90 wt. % สำหรับ LTP-MnBi ที่เตรียมโดยการ sintering และจาก 30 wt.% ถึง 60 wt.% สำหรับสารที่เตรียมโดยการการหลอมเหนี่ยวนำ และ 20 wt.% ถึง 25 wt.% สำหรับการผสมเชิงกล [31] เพื่อที่จะได้เห็นภาพของการพัฒนาวัสดุ LTP-MnBi โดยรวม ค่าแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของ LTP-MnBi ที่เตรียมโดยวิธีการต่าง ๆ เทียบกับ MnAl และ MnGa สรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าแสดงคุณสมบัติความเป็นแม่เหล็กของ LTP-MnBi ที่เตรียมโดยวิธีการต่าง ๆ เทียบกับ MnAl และ MnGa

สารแม่เหล็ก/ วิธีการเตรียมสาร	Coercivity, H_c (kOe)	Saturation Magnetization, M_s (emu/g)	Maximum Energy Product, $(BH)_{max}$ (MGOe)	หมายเหตุ
MnAl	5	125	3.1	@RT, *Refs 7, 8*
$Mn_{1.2}Ga$	3.5	80	2.5	@RT, *Refs 7, 8*
MnBi	-	-	17.7	@RT, ค่าทางทฤษฎี, *Ref.1*
MnBi (multilayer films)	-	-	16.3	@RT, *Ref. 11*
MnBi (arc-melting,	2-3	-	-	@RT, powder, size 20-75 μm, *Ref. 14*
98wt.% pure)	12	-	-	@RT, powder, size 1-7 μm, *Ref. 14*
	6.2	B_r = 6.0 KG	8.4	@RT, warm compaction bulk magnet (1-7 μm), *Ref. 14*
	16.2	B_r = 5.3 KG	6.8	@127 °C, warm compaction bulk magnet (1-7 μm), *Ref. 14*
MnBi (melt-spinning)	10	75	7.1	@RT, size: 20-30 nm in epoxy resin, *Ref. 19*
	25	-	-	@273 °C, size: 20-30 nm in epoxy resin, *Ref. 19*
	5.6	6.00 KG	7.3	@RT, size: 5.76 μm, *Ref. 20*
	6.7	5.63 KG	6.9	@RT, size: 5.23 μm, *Ref. 20*
	7.3	5.50 KG	6.5	@RT, size: 4.62 μm, *Ref. 20*
	8.6	5.27 KG	6.1	@RT, size: 3.01 μm, *Ref. 20*
MnBi (chemical method)	8	2.37	-	@5K, become superparamagnetic at RT, MnBi@Bi with 4.2% MnBi fraction, *Ref. 24*
	15	49	-	@RT, *Ref. 25*
	16.3	-	-	@RT, size: 100-300 nm, *Ref. 26*
MnBi (sintering)	20	-	4.6	@127 °C, sinter temp @1000 °C, *Ref. 28*
	14	-	7.7	@RT, Ref, 28
	3.4	-	4.3	@RT, sinter temp @700&320°C, *Ref. 29*
	7.11	26	1.53	@RT. Spark plasma sintering, *Ref. 30*

การเจือ MnBi ด้วยธาตุที่สาม

เมื่อประมาณ 20 ปีที่แล้ว ได้มีความพยายามเป็นอย่างมากที่ในงานวิจัยและพัฒนาฟิล์มบาง LTP-MnBi สำหรับการเก็บข้อมูลในฮาร์ดดิสก์ การประยุกต์ใช้ LTP-MnBi ดังกล่าวมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องลดอุณหภูมิคูรี (Curie temperature) ให้ต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ Bi เนื่องจากการใช้งานจำเป็นต้องเปลี่ยนสภาพความเป็นแม่เหล็กผ่านอุณหภูมิคูรี หากอุณหภูมิคูรีต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ Bi จะไม่ทำให้ Bi ที่หลงเหลือในสารแม่เหล็กเกิดการหลอมเหลว ซึ่งเป็นการเลี่ยงปัญหาเกี่ยวกับโครงสร้างของวัสดุฟิล์มบาง ได้มีการค้นพบว่าการเติมธาตุโครเมียม (chromium, Cr) ใน LTP-MnBi ทำให้เกิดการลดลงของอุณหภูมิคูรีมาอยู่ที่ประมาณ 250 °C [34] การศึกษาผลของการเจือ Al และ Cu ใน LTP-MnBi ที่เตรียมโดยวิธีการ arc melting และตามด้วยการ ball milling พบว่า การเจือธาตุดังกล่าวทำให้เกิดความเครียดในโครงสร้างผลึก และเกิดการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนของ LTP-MnBi พร้อมกันนั้นทำให้เกิดอันตรกิริยาทางแม่เหล็กระหว่างอะตอม Mn ที่อยู่ ณ ตำแหน่งของโครงสร้างผลึก กับ Mn ที่แทรกอยู่ในโครงสร้างผลึก (interstitial Mn) นำไปสู่การลดลงของการ magnetization แต่สิ่งที่น่าสนใจคือรายงานผลการศึกษาการเติมธาตุหายากเข้าไปใน MnBi ทำให้เกิดความเสถียรทางความร้อนดีขึ้น [32] นอกจากนี้ ได้มีรายงานการทดลองสังเคราะห์ LTP-MnBi โดยเทคนิค melt-spinning และมีการเจือด้วยธาตุ B, C, Fe, Hf, Sm และ Tb พบว่าการเจือด้วยธาตุดังกล่าวส่วนใหญ่ทำให้ค่า coercivity ลดลง ยกเว้นการเจือโดย Hf ที่ทำให้ค่า coercivity สูงขึ้น [35]

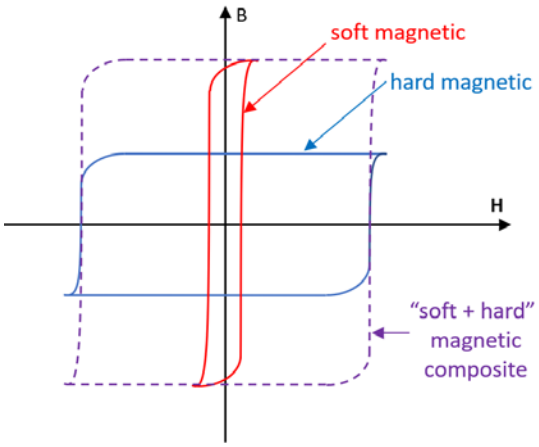
ในการศึกษาสมบัติทางแม่เหล็กของ $MnBi_{1-x}R_x$ (R = Nd, Dy) เตรียมโดยเทคนิค mechanically alloying ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว ตามด้วยการอบร้อน พบว่าค่า H_c ของทั้งสารแม่เหล็กวัสดุผสมทั้งสองเพิ่มขึ้นจาก 0.7 kOe เป็น 6.6k Oe สำหรับการเติม Nd และ 7.9 kOe สำหรับการเติม Dy ซึ่งอาจเกิดจากการที่ทำให้อนุภาคเล็กแม่เหล็กมีขนาดเล็กลง และจากการเพิ่มขึ้นของ crystal field anisotropy [36]

ในการทดลองผลิตแม่เหล็กถาวรโดยการผสมสารแม่เหล็ก MnBi และ NdFeB แล้วขึ้นรูปด้วยกาว โดยที่สารแม่เหล็ก MnBi สังเคราะห์โดยเทคนิค spark plasma sintering พบว่าแม่เหล็กถาวรที่เกิดจากการผสมของสารทั้งหมดนั้นมีค่า H_c เพิ่มขึ้นตามปริมาณของสาร MnBi แต่ค่า M_s และค่าผลผลิตพลังงานกลับลดลง แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าสำหรับการใช้งานที่อุณหภูมิที่สูง เช่นที่ อุณหภูมิ 150 °C ค่า $(BH)_{max}$ ของแม่เหล็กวัสดุผสมมีค่า 5.71 MGOe ซึ่งสูงกว่าแม่เหล็กที่ทำจาก NdFeB (3.67 MGOe) แสดงให้เห็นถึงความเสถียรภาพทางความร้อนที่ดีขึ้นของแม่เหล็กวัสดุผสม [37]

การผลิตแม่เหล็กถาวรวัสดุผสม MnBi

การนำ LTP-MnBi ไปใช้ผลิตแม่เหล็กถาวรอาจยังไม่น่าสนใจมากนัก เพราะ LTP-MnBi ยังมีค่า M_s และค่า $(BH)_{max}$ ค่อนข้างต่ำแม้มีค่า coercivity ที่สูง นอกจากนั้นยังมีปัญหาที่จะต้องแก้ไขปรับปรุงในเรื่องความต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ [35] ดังนั้นการพัฒนาแม่เหล็กถาวรประสิทธิภาพสูงสำหรับการใช้งานในอนาคตที่อาจจะมีการใช้ LTP-MnBi เป็นส่วนประกอบนั้น ได้นำเอาแนวคิดของแม่เหล็กถาวรวัสดุผสมระดับนาโนเป็นแนวทางการดำเนินงาน โดยเป็นการเตรียมวัสดุผสมระหว่างวัสดุแม่เหล็กสองชนิดอย่างเหมาะสม วัสดุดังกล่าวคือ วัสดุแม่เหล็กชนิดแรกนั้นเป็นวัสดุแม่เหล็กที่สามารถทำให้เกิดสภาวะแม่เหล็กหรือหมดสภาวะแม่เหล็กได้ง่าย วัสดุแม่เหล็กนี้เรียกว่า soft magnetic materials ซึ่งเป็นวัสดุแม่เหล็กมีค่า hysteresis loop ที่เรียวและแคบ นั่นคือมีค่า coercivity ค่อนข้างต่ำ ส่วนวัสดุชนิดที่สองเป็นวัสดุแม่เหล็กที่สามารถทำให้เป็นแม่เหล็กหรือหมดสภาพแม่เหล็กได้ยาก ซึ่งจะมีค่า retentivity (หรือ remanence (B_r)) และค่า coercivity ค่อนข้างสูง วัสดุแม่เหล็กชนิดที่สองนี้เรียกว่า hard magnetic materials [3,7,14] ได้มีรายงานว่า การรวมตัวกันของวัสดุผสมระหว่าง hard magnetic และ soft magnetic phases ทำให้ได้วัสดุผสมแม่เหล็กที่มีค่า H_c และ ค่าผลผลิตพลังงานเพิ่มขึ้น นอกจากนั้น

ได้มีการเสนอแบบจำลองอ้างว่าสามารถทำให้ได้ค่า $(BH)_{max}$ ที่สูงขึ้นจากแม่เหล็กวัสดุผสมนาโนที่มี exchange coupling ระหว่าง hard magnetic และ soft magnetic phases โดยเป็นที่เข้าใจว่าวัสดุ hard magnetic phase ส่งผลทำให้ได้ค่า H_c ที่สูงขึ้น และวัสดุ soft magnetic phase ทำให้ได้ค่า M_s ที่สูงขึ้น [33] ในบรรดา soft magnetic materials ต่าง ๆ Co ได้รับการเลือกว่าเป็นวัสดุหนึ่งที่เหมาะสำหรับการปรับปรุงคุณภาพของแม่เหล็ก MnBi จากงานวิจัยเกี่ยวกับแม่เหล็กถาวรวัสดุผสม ได้มีรายงานว่า MnBi-Co เป็นแม่เหล็กถาวรที่มีค่า $(BH)_{max}$ เพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับแม่เหล็ก LTP-MnBi [37] แต่อย่างไรก็ตาม เส้นทางสู่ความสำเร็จในการสังเคราะห์วัสดุผสมนาโน ยังคงต้องการงานวิจัยเพื่อพัฒนาวิธีการที่จะทำให้เกิดอันตรกิริยาทางแม่เหล็กระหว่าง hard magnetic และ soft magnetic phases เพื่อที่จะได้ค่า $(BH)_{max}$ ที่สูงตามการคาดการณ์ทางทฤษฎี



รูปที่ 5 *Hysteresis loop ในอุดมคติของแม่เหล็กถาวรวัสดุผสมนาโน (เส้นประ) ที่เกิดจากการผสมระหว่างวัสดุแม่เหล็กแบบ hard magnetic ที่มี hysteresis loop แสดงด้วยเส้นสีน้ำเงิน และวัสดุแม่เหล็กแบบ soft magnetic ที่มี hysteresis loop แสดงด้วยเส้นสีแดง*

สรุปและมุมมองในอนาคต

จากการคำนวณทางทฤษฎีพบว่า LTP-MnBi ที่บริสุทธิ์มีค่า $(BH)_{max}$ ประมาณ 17.7 MGOe ที่อุณหภูมิห้อง ค่าดังกล่าวมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับค่า $(BH)_{max}$ ของวัสดุแม่เหล็ก Nd-Fe-B ที่มีจำหน่ายในตลาด สารประกอบ $Nd_2Fe_{14}B$ มีค่า $(BH)_{max}$ สูงเกือบ 60 MGOe [1] ดังนั้นจึงเป็นไปไม่ได้เลยว่าแม่เหล็กถาวรที่ผลิตจาก LTP-MnBi เพียงสารเดียวจะมาแทนที่แม่เหล็กถาวร Nd-Fe-B แม่เหล็กถาวรที่ผลิตจากสาร LTP-MnBi เพียงอย่างเดียวคงจะเข้ามาอยู่ระหว่างช่องว่างระหว่างแม่เหล็กที่ Nd-Fe-B และแม่เหล็กที่มีประสิทธิภาพต่ำสำหรับการใช้งานทั่วไป แต่อย่างไรก็ตาม การที่ LTP-MnBi มีคุณสมบัติพิเศษที่ coercivity มีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ LTP-MnBi จึงเหมาะสำหรับใช้ที่อุณหภูมิสูง การที่จะนำ LTP-MnBi มาใช้ในแม่เหล็กถาวรที่มีประสิทธิภาพสูงเทียบเท่าหรือดีกว่าแม่เหล็ก Nd-Fe-B คงต้องรอการ breakthrough ในงานวิจัยและพัฒนาวัสดุแม่เหล็กผสมนาโนระหว่างสาร LTP-MnBi กับสารแม่เหล็กในกลุ่ม soft magnetic materials จึงเป็นที่ประจักษ์ว่าการที่จะมีแม่เหล็กถาวรที่ปราศจากธาตุหายากประสิทธิภาพสูงสำหรับการนำไปใช้ในอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ นั้นยังคงต้องอาศัยความทุ่มเทในการวิจัยและพัฒนาอีกช่วงระยะเวลาหนึ่ง จากการคาดการณ์ อาจต้องใช้เวลาไม่ต่ำกว่า 10 ปี

เอกสารอ้างอิง

[1] J. Mohapatra and J. P. Liu, “Rare-earth-free permanent magnets: The past and future”, *in* Handbook of Magnetic Materials 27, E. Bruck (Ed.), Elsevier, 1 (2018).

[2] M. J. Kramer, R. W. McCallum, I. A. Anderson and S. Constantinides, “Prospects for non-rare earth permanent magnets for traction motors and generators”, JOM, 64, 752 (2012).

[3] B. Li, Y. Ma, B. Shao, C. Li, D. Chen, J. C. Sun, Q. Zheng, X. Yin and X. Guo, “Preparation and magnetic properties of anisotropic MnBi powders”, Physica B: Condensed Matter, 530, 322 (2018).

[4] Critical materials strategy. U.S. Department of Energy, 2011.

[5] K. Patel, J. Zhang and S. Ren, “Rare-earth-free high energy product manganese-based magnetic materials”, Nanoscale, 10, 11701 (2018).

[6] P. Rani, A. Taya and M. K. Kashyap, “Enhancement of magnetocrystalline anisotropy of MnBi with Co interstitial impurities”, AIP Conference Proceedings, 1942, 130033 (2018).

[7] J. B. Yang, W. Y. Yang, Z. Y. Shao, D. Liang, H. Zhao, Y. H. Xia and Y. B. Yang, “Mn-based permanent magnets”, Chinese Physics B, 27, 117503 (2018).

[8] R. Madugundo, N. V. R. Rao, A. M. Schönhöbel, D. Salazar and A. A. El-Gendy, “Recent developments in nanostructured permanent magnet materials and their processing methods”, *in* Magnetic Nanostructured Materials, A. A. El-Gendy, J. M. Barandiarán, and R. L. Hadimani (Ed.), Elsevier, 157 (2018).

[9] H. Moon, S. Kim, H. Jung, H. S. Lee and W. Lee, "Layer-number dependence of the magnetic properties of MnBi films", Applied Surface Science, 542, 618 (2017).

[10] N. X. Truong and N. V. Vuong, "Preparation and magnetic properties of MnBi alloy and its hybridization with NdFeB", Journal of Magnetics, 20 336 (2015).

[11] W. Zhang, P. Kharel, S. Valloppilly, L. Yue and D. J. Sellmyer, "High-energy-product MnBi films with controllable anisotropy", Physica Status Solidi B, 252, 1934 (2015).

[12] H. Okamoto, ASM Alloy Phase Diagrams Database, ASM International (2016).

[13] Y. L. Huang, Z. Q. Shi, Y.H. Hou and J. Cao, "Microstructure, improved magnetic properties, and recoil loops characteristics for MnBi alloys", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 485, 157 (2019).

[14] N. Poudyal, X. Liu, W. Wang, V. V. Nguyen, Y. Ma, K. Gandha, K. Elkins, J. P. Liu, K. Sun, M. J. Kramer and J. Cui, "Processing of MnBi bulk magnets with enhanced energy product", AIP Advances, 6, 056004 (2016).

[15] J. Cui, J. P. Choi, G. Li, E. Polikarpov, J. Darsell, N. Overman, M. Olszta, D. Schreiber, M. Bowden, T. Droubay, M. J. Kramer, N. A. Zarkevich, L. L. Wang, D. D. Johnson, M. Marinescu, I. Takeuchi, Q. Z. Huang, H. Wu, H. Reeve, N. V. Vuong and J. P. Liu, "Thermal stability of MnBi magnetic materials", Journal of Physics: Condensed Matter, 26, 064212 (2014).

[16] W. Xie, E. Polikarpov, J. P. Choi, M. E. Bowden, K. Sun and J. Cui, "Effect of ball milling and heat treatment process on MnBi powders magnetic properties", Journal of Alloys and Compounds, 680, 1 (2016).

[17] N. Li, C. Cui, S. Liu, S. Liu, S. Cui and Q. Wang, "Microstructure and mechanical properties of Ti_6Al_4V alloy modified and reinforced by in situ Ti_5Si_3/Ti composite ribbon inoculants", Metals, 7, 267 (2017).

[18] X. Guo, X. Chen, Z. Altounian and J. O. Ström-Olsen, "Magnetic properties of MnBi prepared by rapid solidification", Physical Review B: Condensed Matter, 46, 14578 (1992).

[19] J. B. Yang, Y. B. Yang, X. G. Chen, X. B. Ma, J. Z. Han, Y. C. Yang, S. Guo, A. R. Yan, Q. Z. Huang, M. M. Wu and D. F. Chen, "Anisotropic nanocrystalline MnBi with high coercivity at high temperature", Applied Physics Letters, 99, 082505 (2011).

[20] S. Kim, H. Moon, H. Jung, S. M. Kim, H. S. Lee, H. Choi-Yim and W. Lee, "Magnetic properties of large-scaled MnBi bulk magnets", Journal of Alloys and Compounds, 708, 1245 (2017).

[21] J. Cui, J. P. Choi, E. Polikarpov, M. E. Bowden, W. Xie, G. Li, Z. Nie, N. Zarkevich, M. J. Kramer and D. Johnson, "Effect of composition and heat treatment on MnBi magnetic materials", Acta Materialia, 79, 374 (2014).

[22] N. Poudyal and J. P. Liu, "Advances in nanostructured permanent magnets research", Journal of Physics D: Applied Physics, 46, 043001 (2013).

[23] S. Liu, J. Wang and F. Dong, "A new bottom-up synthesis of MnBi particles with high magnetic performance", Chemical Physics Letters 691 325 (2018).

[24] J. Sun, C. Li, Q. Huang, G. Liu, G. Han, S. Yu and S. Kang, "A facile way to synthesize rare-earth-free Mn–Bi@Bi magnetic nanoparticles", RSC Advances, 6, 100035 (2016).

[25] A. Kirkeminde, J. Shen, M. Gong, J. Cui and S. Ren, "Metal-redox synthesis of MnBi hard magnetic nanoparticles", Chemistry of Materials, 27, 4677 (2015).

[26] N. V. Rama Rao, A. M. Gabay, X. Hu and G. C. Hadjipanayis, "Fabrication of anisotropic MnBi nanoparticles by mechanochemical process", Journal of Alloys and Compounds, 586, 349 (2014).

[27] S.-J. Kang, Sintering: Densification, Grain Growth, and Microstructure, Butterworth-Heinemann (2005).

[28] J. B. Yang, W. B. Yelon, W. J. James, Q. Cai, S. Roy and N. Ali, "Structure and magnetic properties of the MnBi low temperature phase", Journal of Applied Physics, 91, 7866 (2002).

[29] E. Adams, W. M. Hubbard and A. M. Syeles, "A new permanent magnet from powdered manganese bismuthide", Journal of Applied Physics, 23, 1207 (1952).

[30] J. Cao, Y. L. Huang, Y. H. Hou, G. Q. Zhang, Z. Q. Shi, Z. C. Zhong and Z. W. Liu, "Effects of intergranular phase on the coercivity for MnBi magnets prepared by spark plasma sintering", AIP Advances, 8, 055132 (2018).

[31] J. B. Yang, W. B. Yelon, W. J. James, Q. Cai, M. Kornecki, S. Roy, N. Ali and P. Heritier, "Crystal structure, magnetic properties and electronic structure of the MnBi intermetallic compound", Journal of Physics: Condensed Matter, 14, 6509 (2002).

[32] V. V. Ramakrishna, S. Kavita, R. Gautam, T. Ramesh and R. Gopalan, "Investigation of structural and magnetic properties of Al and Cu doped MnBi alloy", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 458, 23 (2018).

[33] T. Charoensuk and C. Sirisathitkul, "Effects of heat treatment and composition on ball milled MnBi and MnBi-Co magnets", Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures, 13, 609 (2018).

[34] P. R. Bandaru, T. D. Sands and Y. Kubota, "Decoupling the structural and magnetic phase transformations in magneto-optic MnBi thin films by the partial substitution of Cr for Mn", Applied Physics Letters, 72, 2337 (1998).

[35] P. Kharel, V. R. Shah, R. Skomski, J. E. Shield and D. J. Sellmyer, "Magnetism of MnBi-based nanomaterials", IEEE Transactions on Magnetics, 49, 3318 (2013).

[36] S. Saha, M. Q. Huang, C. J. Thong, B. J. Zande, V. K. Chandhok, S. Simizu, R. T. Obermyer and S. G. Sankar, "Magnetic properties of $MnBi_{1-x}R_x$ (R=rare earth) systems", Journal of Applied Physics, 87, 6040 (2000).

[37] S. Cao, M. Yue, Y. X. Yang, D. T. Zhang, W. Q. Liu, J. X. Zhang, Z. H. Guo and W. Li, "Magnetic properties and thermal stability of MnBi/NdFeB hybrid bonded magnets", Journal of Applied Physics, 109, 07A740 (2011).

[38] T. X. Nguyen, O. K. T Vuong, H. T. Nguyen and V. V. Nguyen, "Preparation and magnetic properties of MnBi/Co nanocomposite magnets", Journal of Electronic Materials, 46, 3359 (2017).