

## บทความปริทัศน์

## รังสีวิทยากับวิศวกรรมชีวการแพทย์

เอนก สุวรรณบัณฑิต วท.บ., ศศ.ม., ประ.ด.  
 ปฏิยุทธ ศรีวิลาศ วท.บ. (รังสีเทคนิค)  
 ผศ.นพ.ตรงธรรม ทองดี พ.บ., ป.ชั้นสูง(รังสีวิทยา), ว.ว.(รังสีวิทยาวิวินิจฉัย)  
 รศ.นพ.พิพัฒน์ เชี่ยววิทย์ พ.บ., ป.ชั้นสูง(รังสีวิทยา), ว.ว.(รังสีวิทยาทั่วไป)

## บทนำ

รังสีวิทยาเป็นสาขาทางวิชาการที่ก้าวหน้าอย่างรวดเร็วด้วยปัจจัยสำคัญ อันได้แก่ ความก้าวหน้าทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการแพทย์ ทั้งในด้านเครื่องมือทางรังสี แผนการตรวจและสร้างภาพดิจิทัลและงานประมวลผลภาพดิจิทัล ในด้านการบริการทางการแพทย์ รวมไปถึงการวิจัยทางเทคโนโลยีการแพทย์ที่เกี่ยวข้องด้วยเครื่องมือทางรังสี เช่น เครื่องสนามแม่เหล็กไฟฟ้า เครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ รวมไปถึงสาขาภาพรังสีระดับโมเลกุล (molecular imaging) ซึ่งเป็นงานการพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์การสร้างภาพ (imaging science) ซึ่งคาบเกี่ยวอย่างยิ่งกับงานวิศวกรรมชีวการแพทย์ (biomedical engineering) โดยเฉพาะสาขาการสร้างภาพชีวการแพทย์ประยุกต์และสารสนเทศรังสี (integrative biomedical imaging and informatics) ขอบข่ายงานในงานวิศวกรรมชีวการแพทย์จึงเป็นพื้นที่เปิดสำหรับวงการวิชาการรังสีวิทยาที่จะทำให้การเรียนการสอน การวิจัยและการบริการทางรังสีวิทยาก้าวเดิน

ภาควิหารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล  
มหาวิทยาลัยมหิดล

อยู่บนเส้นทางของการสร้างสรรค์ระหว่างการวินิจฉัยที่มีประสิทธิภาพกับการรักษาผู้ป่วยทางคลินิกเพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตแก่ผู้ป่วยสู่ระดับสากล

## วิศวกรรมชีวการแพทย์

วิศวกรรมชีวการแพทย์ (biomedical engineering) หรือ วิศวกรรมการแพทย์ (medical engineering เป็นที่รู้จักกันมานานแล้วในชื่อ ฟิสิกส์การแพทย์ (medical physics) หรือ ชีวฟิสิกส์ (biophysics) คำว่า วิศวกรรมชีวการแพทย์มีคำศัพท์หลัก 3 คำ คือ bio, medicine และ engineering ซึ่งหมายความว่าสาขาวิชานี้เป็นสหวิทยาการ (interdisciplinary) ที่ประสานองค์ความรู้ด้านชีววิทยา แพทย์ศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ เข้าด้วยกัน โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการแพทย์เป็นหลัก กล่าวคือ เพื่อตอบสนองความต้องการทางการแพทย์ 3 ประการ อันได้แก่ 1) การตรวจวินิจฉัย 2) การบำบัดรักษา และ 3) การป้องกันโรค

วิศวกรรมชีวการแพทย์เป็นสาขาวิชาเป็นสาขาที่เปิดกว้างสำหรับความคิดสร้างสรรค์ใหม่ๆ ที่จะประยุกต์ไปใช้งานจริงให้เกิดประโยชน์และมีคุณค่า เช่น

การออกแบบ สร้างหรือพัฒนาซอฟต์แวร์ อุปกรณ์ หรือ เครื่องมือทางการแพทย์ที่ได้มาตรฐาน สามารถใช้งานได้จริง การศึกษาค้นคว้าเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่มีความซับซ้อน และต้องการขั้นตอนการผลิตที่มีมาตรฐาน และประสิทธิภาพสูง รวมถึงการศึกษาและวิจัยอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้เทคโนโลยีขั้นสูงทางการแพทย์

### การสร้างภาพวินิจฉัยระดับโมเลกุล

งานวิศวกรรมชีวการแพทย์ที่เกี่ยวข้องด้วยงานรังสีวิทยาได้ก้าวหน้าอย่างมากมาตั้งแต่ปี พ.ศ. 2543 โดยเฉพาะในด้านการสร้างภาพวินิจฉัยระดับโมเลกุล (molecular image processing) ซึ่งเป็นการประมวลผลภาพจากเครื่อง CT Scan, MRI เพื่อการวิเคราะห์ผลในระดับการทำงานของอวัยวะนั้นๆ (functional imaging) เช่น perfusion CT for ischemic stroke หรือ perfusion MRI ซึ่งนำไปสู่งานวิจัยต่างๆ จำนวนมาก ตัวอย่างเช่น Diagnostic performance of perfusion MRI in differentiating low-grade and high-grade gliomas: advanced MRI in glioma, a Siriraj project. (Direksunthorn T, 2013) ในขณะเดียวกันสาขาการสร้างภาพชีวการแพทย์ก็ได้นำไปสู่งานวิจัยใหม่ๆ เช่น งานวิจัยเรื่อง ตรวจสอบความสมเหตุสมผลระหว่างสถาบันสำหรับการวิเคราะห์ค่า T2\* ของหัวใจโดยวิธีจุดภาพในผู้ป่วยธาลัสซีเมียในไทยที่ต้องได้รับการถ่ายเลือด โดยภาควิชารังสีวิทยาและภาควิชาอายุรศาสตร์ (ไพรัช สายวิรุณพร, 2555) รวมไปถึงงานวิจัยจำนวนมากของภาควิชารังสีวิทยาในการพัฒนาโปรโตคอลในการตรวจต่างๆ เพื่อพัฒนาความแม่นยำ ความเที่ยงตรง ความไวในการวินิจฉัยโรค ซึ่งก็เป็นส่วนหนึ่งของงานด้านการประมวลผลภาพรังสี

### งานต้นแบบ 3 มิติ

งานวิศวกรรมชีวการแพทย์ยังมีสาขาที่เกี่ยวข้องกับการผ่าตัดศัลยกรรมหรือผ่าตัดอวัยวะ เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการวางแผน โดยแต่เดิมแพทย์จะศึกษา

อวัยวะที่จะผ่าตัดจากภาพทางรังสี ในลักษณะภาพตัดขวาง ภาพประมวลผลอวัยวะในระนาบอื่น และภาพอวัยวะ 3 มิติ อย่างไรก็ตาม การลงมือปฏิบัติต้องอาศัยความเชี่ยวชาญเป็นพิเศษโดยเฉพาะในผู้ป่วยที่พยาธิสภาพมีความซับซ้อน ดังนั้นจึงทำให้งานวิศวกรรมชีวการแพทย์ได้นำเสนอบทบาทของเทคโนโลยีในการประยุกต์ใช้คอมพิวเตอร์และโปรแกรมสร้างภาพพิเศษให้สามารถสร้างต้นแบบ (prototyping) หรือแบบจำลองอวัยวะ (3D modeling) เพื่อประโยชน์ต่อแพทย์ผู้รักษาที่จะได้ศึกษาสัมผัสอวัยวะนั้นในลักษณะใกล้จริง (tangible anatomy) และลงมือปฏิบัติงานได้อย่างแม่นยำ ขณะเดียวกันแบบจำลองดังกล่าวยังเป็นสื่อที่แพทย์สามารถใช้เพื่ออธิบายให้ผู้ป่วยหรือญาติได้เข้าใจกระบวนการของการรักษาดียิ่งขึ้นอีกด้วย

โดยแต่เดิมการสร้างชิ้นงานต้นแบบจะใช้เทคนิคการเอาเนื้อวัสดุส่วนที่ไม่ต้องการออกจากก้อนวัสดุ (subtractive technology) เทคนิคใหม่นี้จึงช่วยลดต้นทุนและระยะเวลาในกระบวนการผลิตด้วย จากนั้นจะเก็บภาพในรูปแบบของไฟล์ STL เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็ว ระยะเวลาในการสร้างต้นแบบขึ้นอยู่กับความละเอียดของชิ้นงาน ความสูงของชิ้นงาน และเทคนิคที่ใช้ ซึ่งมีหลายเทคนิค ได้แก่ stereolithography (SLA), fused deposition modeling (FDM) และ 3D Printing

การสร้างต้นแบบหรือแบบจำลองอวัยวะนั้นมีพื้นฐานอยู่บนเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (rapid prototyping technology) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ในแวดวงอุตสาหกรรมเป็นหลัก ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (เอ็มเทค) (www.mtec.or.th) ได้รับการถ่ายทอดเทคโนโลยีนี้จากประเทศเบลเยียม และเห็นว่าเป็นเทคโนโลยีที่มีประโยชน์ต่อวงการแพทย์ของประเทศไทยในด้านการพัฒนาเครื่องมือเครื่องใช้ทางการแพทย์ รวมทั้งการรักษาผู้ป่วย ปัจจุบัน เอ็มเทคจึงได้จัดตั้งห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ช่วยงานทางการแพทย์ขึ้น ถือ

เป็นห้องปฏิบัติการทางการแพทย์แห่งแรกของประเทศที่นำคอมพิวเตอร์มาใช้งานในการสร้างแบบจำลองด้วยเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็วทางการแพทย์ ตลอดจนใช้งานในด้านกรอกแบบและวิเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือทางการแพทย์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผ่าตัดได้ถูกต้องแม่นยำมากขึ้น ลดเวลาและความเสี่ยงในการทำศัลยกรรมที่ซับซ้อน ขณะเดียวกันยังนำคอมพิวเตอร์มาใช้ในการกรอกแบบและวิเคราะห์เพื่อผลิตอุปกรณ์การแพทย์

ราคาและต้นทุนในการผลิตชิ้นงานต้นแบบด้วย rapid prototype นั้นมีราคาแพง เนื่องจากราคาของวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิต ระยะเวลาในการสร้างชิ้นงานต้นแบบขึ้นมาใช้เวลา 12 - 72 ชม. ชิ้นงานที่สร้างขึ้นมาจะแข็งแรงเนื่องจากชนิดของพลาสติกที่ใช้ ทำให้ชิ้นงานมีลักษณะเป็น solid model ข้อจำกัดบางอย่างของการผลิตชิ้นงานด้วยวิธีนี้คือ ชิ้นงานไม่สามารถทำให้มีขนาดที่ใหญ่มากได้ จนบางครั้งต้องแบ่งชิ้นงานจริงออกเป็นส่วนๆ เพื่อให้สามารถนำไปผลิตชิ้นงานต้นแบบออกมา แล้วจึงนำไปประกอบเข้าด้วยกันภายหลัง ความแข็งแรงของชิ้นงานก็จะลดลงไปช่วงที่เป็นรอยต่อนอกจากนี้ควรหลีกเลี่ยงการกรอกแบบให้มีความบางมากเกินไป เพราะจะไม่สามารถผลิตออกมาได้จากข้อจำกัดของวัสดุที่นำมาใช้

การใช้งานต้นแบบทางการแพทย์ มีในงานด้านศัลยกรรมตกแต่ง ศัลยกรรมใบหน้า ศัลยกรรมช่องปาก ศัลยกรรมประสาท ออร์โธปิดิกส์ หรือด้านทันตกรรม ซึ่งต้นแบบทางการแพทย์ที่ได้สามารถช่วยให้แพทย์สัมผัสและศึกษาอวัยวะที่จะรักษาได้อย่างละเอียด ช่วยในการวิเคราะห์โรค และวางแผนการรักษาได้อย่างถูกต้องแม่นยำมากขึ้น รวมถึงการทดลองผ่าตัดก่อนผ่าตัดจริงเพื่อฝึกฝนให้เกิดความคล่องแคล่ว โดยเฉพาะในรายที่การผ่าตัด

สำหรับใช้งานในประเทศให้มีลักษณะเหมาะสมกับคนไทย ด้วยความก้าวหน้านี้ภาควิชาศัลยศาสตร์

ออร์โธปิดิกส์และภาควิชารังสีวิทยาได้วิจัยร่วมกันในรายงานเรื่อง Rapid prototyping model for surgical planning of corrective osteotomy for cubitus varus: report of two cases (Banchong Mahaisavariya, 2006)

## งานวิศวกรรมออร์โธปิดิกส์และอวัยวะเทียม

งานศัลยศาสตร์ออร์โธปิดิกส์ ได้นำสาขาวิศวกรรมชีวการแพทย์มาใช้พัฒนาจนเกิดสาขาวิศวกรรมออร์โธปิดิกส์และอวัยวะเทียม (orthopedics engineering and prosthesis) ทั้งนี้ขอบข่ายงานได้เกี่ยวข้องกับต้นแบบจำลองอวัยวะ 3 มิติ เครื่องมือช่วยในการผ่าตัดเฉพาะบุคคล และวัสดุฝังใน (implant) เฉพาะบุคคลของอวัยวะต่างๆ ของผู้ป่วย เพื่อนำมาใช้ในการวินิจฉัยวางแผนการผ่าตัด และทดแทนอวัยวะที่เสียหาย/สูญเสีย การกรอกแบบใช้ข้อมูลภาพรังสีของผู้ป่วยจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์เป็นพื้นฐาน กรณีที่ผู้ป่วยต้องใช้อุปกรณ์ฝังใน เช่น สกรู แผ่นตามกระดูก แพทย์สามารถใช้ต้นแบบทางการแพทย์เพื่อออกแบบวัสดุฝังในได้ล่วงหน้าและอย่างถูกต้อง โดยสามารถทดลองจัดวางวัสดุฝังในบนต้นแบบทางการแพทย์ก่อนผ่าตัดจริง ซึ่งหากไม่เหมาะสมก็สามารถปรับแก้ไขได้ จึงช่วยร่นระยะเวลาการผ่าตัดจริงลงได้ เช่น การกรอกแบบวางแผนผ่าตัดกระดูกสันหลัง (patient specific spinal surgical guide)

เทคโนโลยีการสร้างชิ้นงานต้นแบบ 3 มิติยังใช้สร้างวัสดุฝังใน โดยใช้หลักการขึ้นรูปที่ละชั้นตามภาคตัดขวางของชิ้นงานจนได้ชิ้นงานที่สมบูรณ์ในเวลาอันสั้นเพื่อการจำลองทางการแพทย์และขึ้นรูปวัสดุฝังในเฉพาะบุคคล (customized implants) ตัวอย่างเช่น การพัฒนากะโหลกศีรษะเทียม (pre-operative planning of cranio-maxillofacial deformity) โดยใช้วัสดุใสอยู่เดิมในห้องผ่าตัดมาหล่อขึ้นรูปวัสดุฝังใน ซึ่งแต่เดิมแพทย์จะเป็นผู้ปั้นแต่งจากวัสดุด้วยมือภายหลังจากการเปิดแผลผ่าตัดในห้องผ่าตัดแล้วเท่านั้น ในส่วนของนวัตกรรมวัสดุเทียมก็เป็นการใช้ข้อมูลภาพ 3 มิติ จาก CT Scan

นำไปออกแบบและพิมพ์ต้นแบบซี่ ฟันสามมิติ เช่น กระดูกเทียม แล้วนำไปหล่อชิ้นงานกระดูกไทเทเนียมจริงเพื่อส่งกลับศัลยแพทย์ภายใน 24 ชม. (www.cicc.chula.ac.th)

## รังสีวิทยาศิริราชกับงานวิศวกรรมชีวการแพทย์

ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาล โดยสาขาวิชารังสีวินิจฉัย ได้เล็งเห็นความสำคัญของงานต้นแบบ 3 มิติ และแนวโน้มความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีซอฟต์แวร์ จึงได้จัดสรรเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็ว (rapid prototyping machine; Fortus 400mc, AppliCAD) และซอฟต์แวร์เฉพาะ (Mimics v.15.01, Materialise) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2556 เพื่อการเสริมสร้างศักยภาพของการเป็นศูนย์กลางเทคโนโลยีทางการแพทย์และการวิจัยทางการแพทย์ที่เป็นเลิศ โดยอยู่ในความรับผิดชอบของหน่วยสารสนเทศรังสี (radiology information supervision) ทั้งนี้ในระยะแรกได้เชิญผู้เชี่ยวชาญด้านซอฟต์แวร์มาสอนแสดงแก่นักรังสีการแพทย์เพื่อให้มีความเข้าใจและสามารถใช้งานเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็วได้

ภาควิชารังสีวิทยาเล็งเห็นความจำเป็นที่จะต้องพัฒนาพื้นที่ทางเทคโนโลยีนี้ให้ก้าวหน้าในระดับต้นๆ ของประเทศในเอเชีย จึงตั้งเป็นโครงการ biomedical engineering และเพื่อให้การดำเนินการเป็นไปอย่างต่อเนื่องจึงจำเป็นต้องเผยแพร่แนวทางการพัฒนางานโดยแบ่งเป็น 3 ระยะดังนี้

1. ระยะที่ 1 งานด้าน Tangible Anatomy Model (3D medical printing) และ Cranio-Maxillofacial segmentation and 3D model creation
2. ระยะที่ 2 งานด้าน Orthopedics engineering & prosthesis
3. ระยะที่ 3 งานด้าน Cardiovascular engineering การดำเนินงานในระยะที่ 1 ผ่านการนำร่องการ

พัฒนางานในด้านหุ่นต้นแบบอวัยวะ 3 มิติ (tangible anatomy model/ 3D medical printing/ 3D model creation) และ cranio-maxillofacial segmentation โดยถือได้ว่าเป็นผู้ริเริ่มงานด้านการผลิตหุ่นจำลองต้นแบบ 3 มิติ ด้วยวัสดุแข็งเป็นลำดับแรกๆ ของประเทศในเอเชีย เมื่อการดำเนินโครงการให้ดำเนินการนำร่องระยะที่ 1 เมื่อได้รับการยอมรับในเชิงผลลัพธ์แล้วจึงขยายงานในระยะต่อไป พร้อมทั้งขยายศักยภาพการพัฒนาที่เกี่ยวข้องตามความจำเป็น และดำเนินการเชื่อมโยงไปสู่ภารกิจด้านงานวิจัยต่อไป อย่างไรก็ตาม ระหว่างนั้นงานด้านชีวิตันตกรรมได้ก้าวหน้าอย่างมากในประเทศเกาหลีใต้ และงานด้านสิ่งเทียมกระดูกได้ก้าวหน้าในประเทศจีนแล้วเช่นกัน ภาควิชารังสีวิทยาจึงได้เพิ่มพูนความรู้ความชำนาญและการสร้างเครือข่ายระดับนานาชาติแก่บุคลากร โดยให้นายปฏิยุทธ์ ศรีวิลาศ นักรังสีการแพทย์ระดับชำนาญการพิเศษ และนายสมจิตร์ จอมแก้ว ผู้ปฏิบัติงานรังสีเทคนิคระดับชำนาญงานพิเศษ ไปอบรมเพิ่มเติมในหัวข้อ Optimising Orthopaedics: Advancing Projects through Mimics Innovation Suite 17.0 ระหว่างวันที่ 27-28 สิงหาคม พ.ศ.2557 ณ Materialise Sdn Bhd, Damansara Perdana, Petaling Jaya, Selangor, Malaysia เพื่อให้ช่วยขยายงานในระยะที่ 2 ได้แก่ ด้าน orthopaedics engineering & prosthesis ซึ่งมีขอบข่ายงาน image assisted operation อันจะเป็นประโยชน์ต่อวงการแพทย์ของไทย และในปี พ.ศ.2558 ได้ขยายพื้นที่งานวิจัยในด้านทันตกรรม (dental 3D scanning and Measuring) โดยมีความร่วมมือกับคณะทันตแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

## งาน Cranio-Maxillofacial segmentation

งานภาพ 3 มิติในส่วนของภาพกะโหลกและใบหน้า นั้น (Cranio-Maxillofacial Segmentation) เริ่มต้นจากนำข้อมูลภาพรังสีการสแกนจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์มาสร้างภาพ 3 มิติโดยใช้ไฟล์ DICOM ของอวัยวะ

ส่วนต่าง ๆ ของผู้ป่วย เพื่อสร้างภาพต้นแบบ 3 มิติขึ้นในคอมพิวเตอร์ โดยอวัยวะที่มีโครงสร้างเป็นกระดูก จะได้ข้อมูลจากเครื่องถ่ายภาพทางคอมพิวเตอร์ (computer tomography, CT) ในระดับความละเอียดสูงคือ ความหนาสไลด์ 0.625 มม. แต่หากเป็นเนื้อเยื่ออ่อนก็ควรส่งสแกนด้วยเครื่องสร้างภาพด้วยสนามแม่เหล็ก (MRI) เพื่อเป็นต้นแบบในการสร้าง surface model ด้วยโปรแกรม CAD (Mimics software) เมื่อสร้างภาพต้นแบบ 3 มิติขึ้นแล้ว จะเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ในคอมพิวเตอร์ เพื่อแยกส่วนของอวัยวะ (segmentation) ที่สนใจออกจากภาพโดยรวม ขณะเดียวกันก็แก้ไขภาพของอวัยวะในบางบริเวณเพื่อความถูกต้องของรูปทรง ขั้นตอนเชิงเทคนิค ได้แก่

1. เลือกโปรแกรมการสร้าง Segmentation (Mimics V15.01) แล้วนำเข้าไฟล์ DICOM ที่ต้องการ
2. ระบบจะแสดงภาพเบื้องต้นของกะโหลกศีรษะใน 3 ระนาบ เพื่อให้กำหนดตำแหน่ง ให้ถูกต้อง
3. การเลือกระดับค่าเพื่อการสร้างภาพ 3 มิติ เบื้อง

ต้น จะต้องพิจารณาไฟล์นำเข้าซึ่งเป็นภาพรังสีจากเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์ การสร้าง segmentation จึงใช้ค่า Hounsfield Unit (HU) โดยสร้าง profile line เพื่อวัด HU ของ maxillofacial bone ด้วยการลากเส้นผ่านส่วนที่เป็นกระดูกและเนื้อเยื่อ จะได้กราฟดังรูปที่ 3

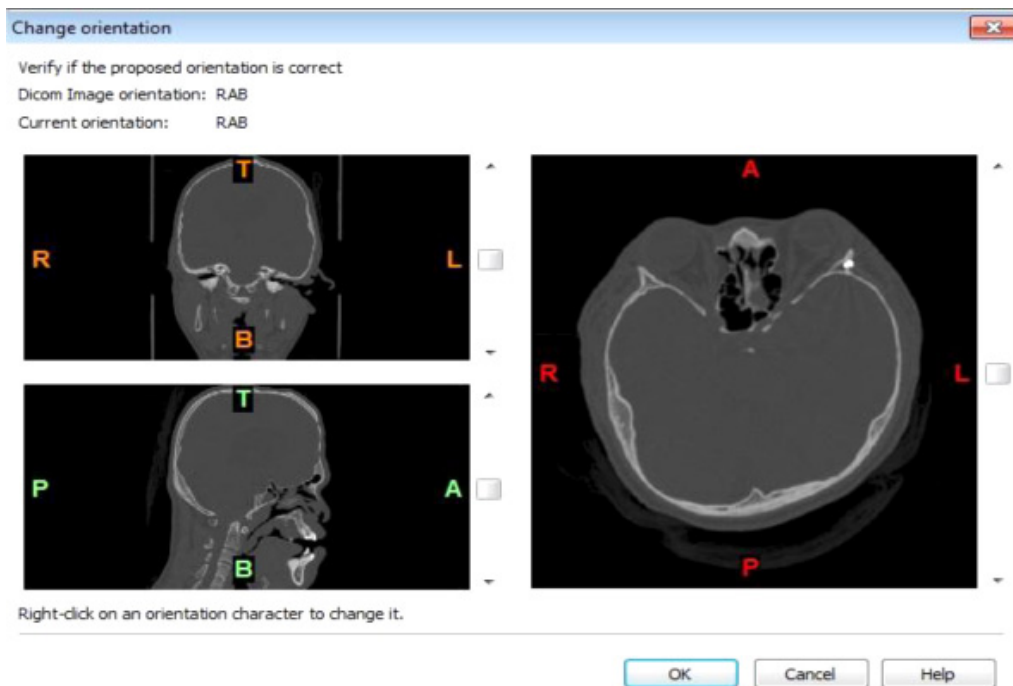
4. สร้างภาพ 3 มิติเบื้องต้น โดยกำหนดค่า Threshold ที่ได้จาก Profile line ที่จะเลือกสร้างภาพเฉพาะในช่วงค่าใด ซึ่งจะแสดงภาพสีในส่วนที่จะนำมาสร้างภาพเป็นการเปรียบเทียบ

5. ลบ Artifact ที่เกิดจาก Beam Hardening Artifact โดยตั้งค่า Brush Threshold 300 HU

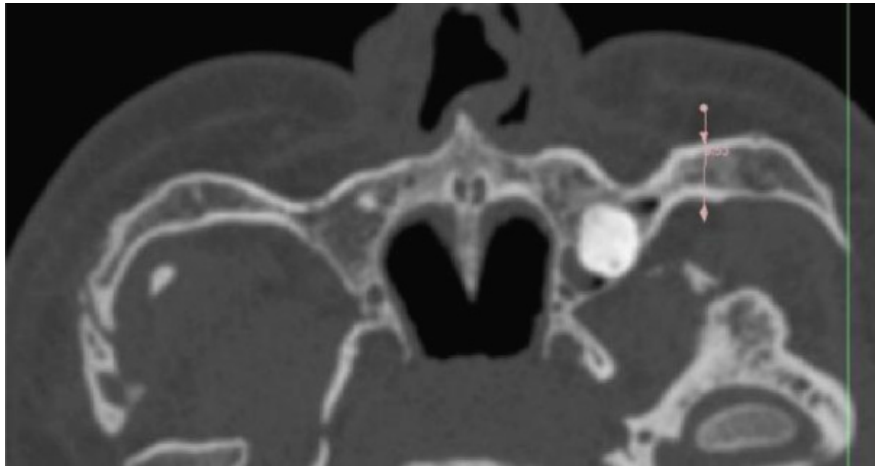
6. ลบกระดูกในส่วนคอ (cervical spine) ออกทั้งหมด และสั่งให้สร้างภาพ 3D เพื่อตรวจสอบรายละเอียด หากไม่พอใจภาพให้ทำขั้นตอนที่ 5-7 ซ้ำ จนกว่าจะได้ภาพ 3D ที่มีคุณภาพ

### การสร้างชิ้นงานต้นแบบ 3 มิติ

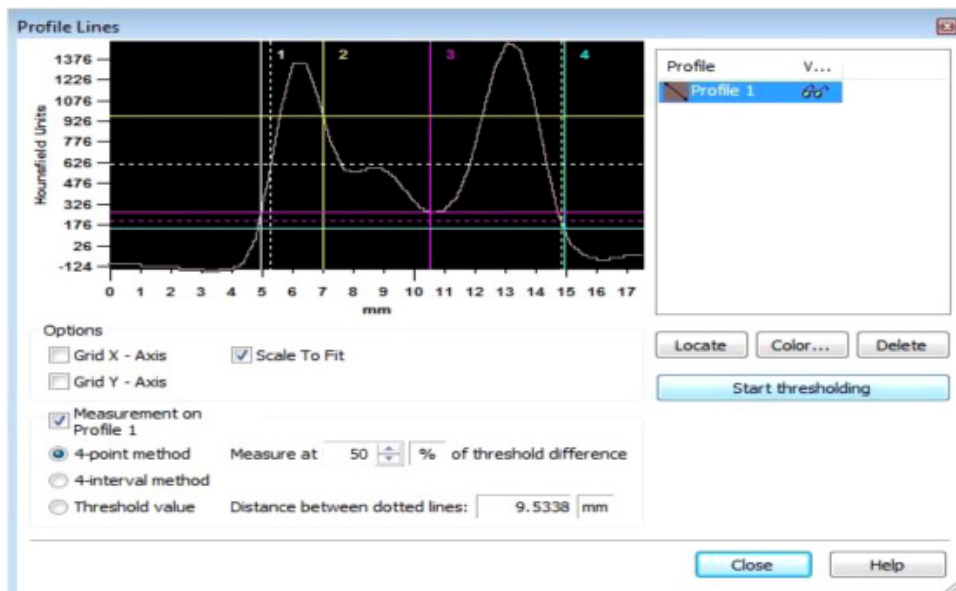
การสร้างแบบจำลองอวัยวะ 3 มิติ (3D model cre-



รูปที่ 1 แสดงหน้าจอเริ่มต้นสำหรับการกำหนดตำแหน่งอวัยวะ



รูปที่ 2 แสดงการลากเส้นเพื่อสร้าง profile line

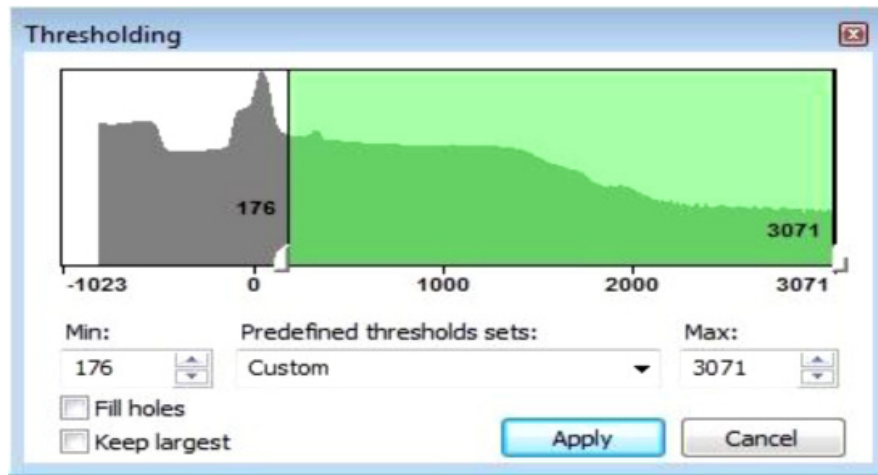


รูปที่ 3 แสดงหน้าจอสำหรับกำหนดช่วงค่าของ profile line ที่ได้

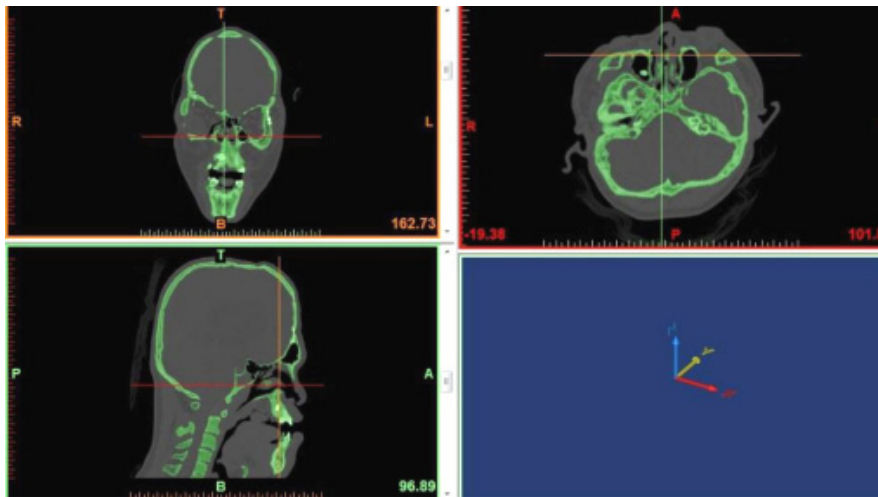
ation) เป็นกระบวนการชั้นปลายของการสร้างชิ้นงาน ใช้กระบวนการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (rapid prototyping) เมื่อสร้างภาพต้นแบบ 3 มิติขึ้นแล้ว ข้อมูล model ที่ได้จะถูกนำไปกำหนดการสร้างต้นแบบขึ้นทีละชั้นด้วยเทคนิคการเพิ่มเข้า (additive technology) ซึ่งเหมาะต่อการผลิตชิ้นงานต้นแบบที่มีรูปทรงซับซ้อน มีรายละเอียดมาก โดยคำนวณข้อมูลเพื่อแปลงเป็น file แบบ STL ซึ่งเป็น format ของ file ที่เป็นมาตรฐานสำหรับการนำข้อมูลไปทำชิ้นงาน rapid prototype และ CAD soft-

ware ส่วนมากที่ใช้อยู่ในปัจจุบันก็มีฟังก์ชันในการแปลง CAD data ไปเป็น file แบบ STL อยู่แล้ว

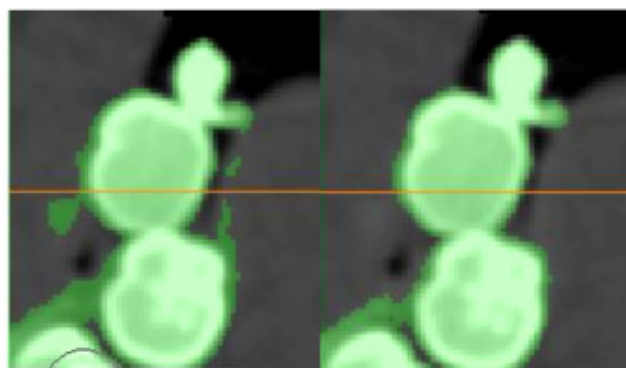
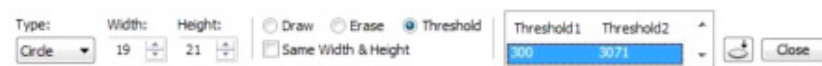
ภายใน File แบบ STL จะประกอบไปด้วยข้อมูลที่เป็น layer บางๆ มากมายซ้อนกันอยู่ โดยที่ข้อมูลที่เป็น layer บางๆ นี้แต่ละชั้นจะเรียกว่า SLA และ SLA นี้จะหนาประมาณ 0.25 มม. ซึ่งจะถูกส่งไปยังเครื่องผลิตชิ้นงานต้นแบบ แล้วส่งต่อไปยังส่วนที่ควบคุมการทำงานของ laser ที่ทำหน้าที่ในการสร้างชิ้นงานขึ้นมา โดยจะผลิตชิ้นงานแต่ละชั้นออกมาเหมือนกับ SLI



รูปที่ 4 แสดงการกำหนดค่า Threshold



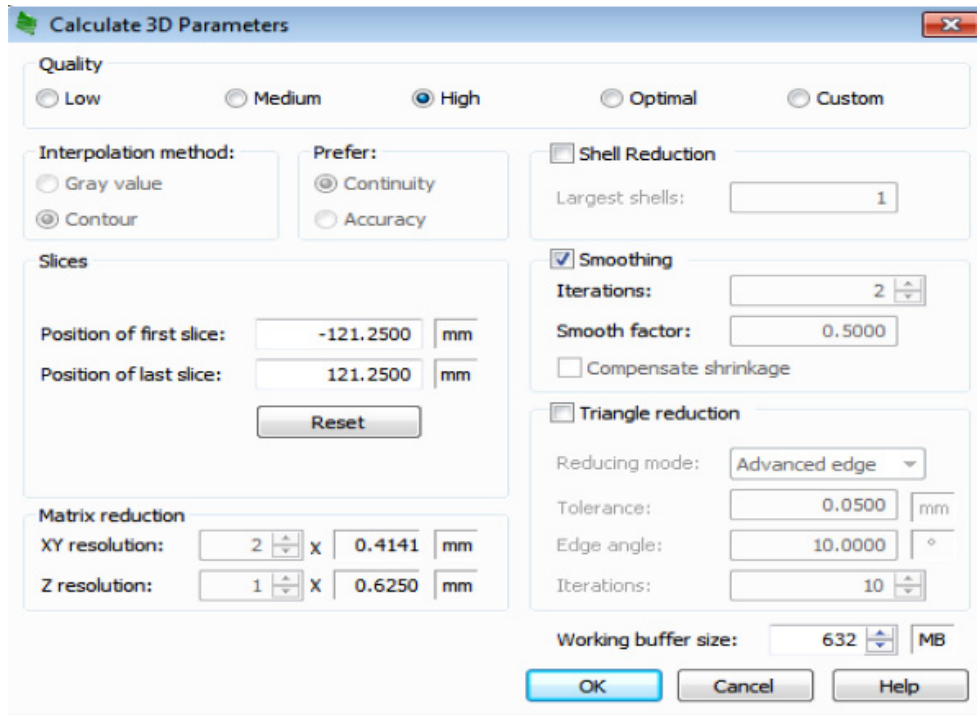
รูปที่ 5 แสดงช่วงค่าที่เป็นแถบสีสำหรับการนำไปสร้างอวัยวะ



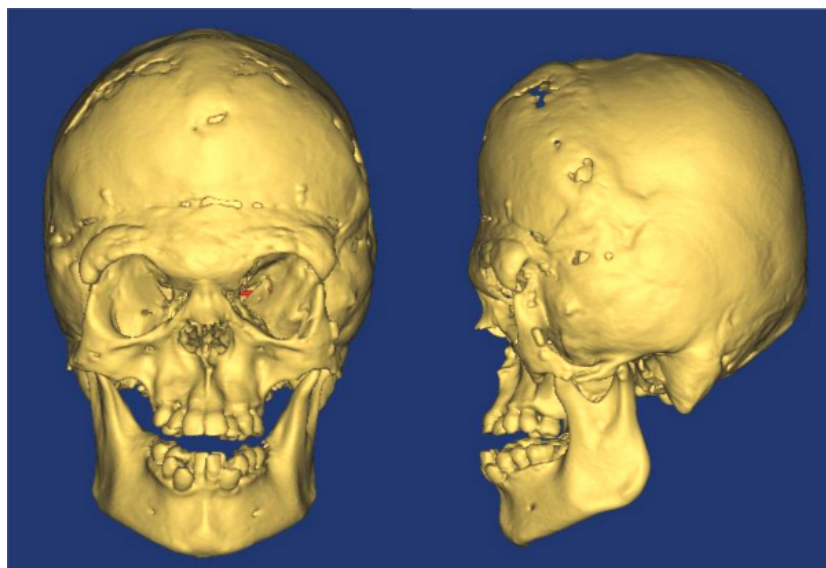
ก่อนลบ Artifact

หลังลบ Artifact

รูปที่ 6 แสดงแถบสีและการปรับแต่งค่าเพื่อนำเฉพาะส่วนที่ต้องการไปสร้างภาพ



รูปที่ 7 แสดงหน้าจอการกำหนดพารามิเตอร์เพื่อสร้างภาพ 3 มิติ



รูปที่ 8 แสดงอวัยวะในลักษณะ 3 มิติในระนาบต่างๆ

ในการสร้างหุ่นจำลองอวัยวะสามมิติผ่านเครื่อง FDM (Fused Deposition Modeling, Fortus 400 mc, AppliCAD) จะต้องนำไฟล์ภาพสามมิติที่อยู่ในรูปแบบไฟล์นามสกุล STL มาสร้างแบบจำลองโครงสร้างของ

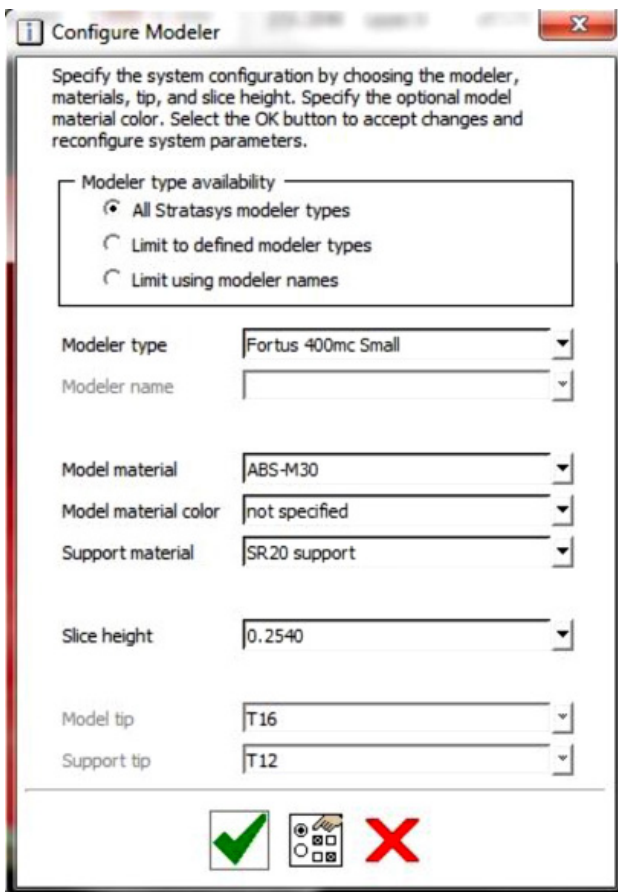
หุ่นจำลองอวัยวะสามมิติ ผ่านโปรแกรม Insight โดยโปรแกรมจะจำลองการสร้างโครงสร้างเป็นระดับชั้น (Slice) มีลำดับการสร้างจากล่างขึ้นบน สามารถสร้างโครงสร้างชิ้นงานที่มีความหนาของ Slice ได้ 4 ขนาด ได้แก่



0.1270 มม., 0.1778 มม., 0.2540 มม. และ 0.3302 มม. จากนั้นจึงบันทึกไฟล์แบบจำลองโครงสร้างสามมิติในรูปแบบไฟล์นามสกุล CMB (Chromeleon Backup Archive)

1. กำหนดเลือกชนิดของเครื่องสร้างต้นแบบรวดเร็ว เลือกชนิดของวัสดุที่จะใช้สร้าง และวัสดุสำหรับค้ำยันชิ้นงานต้นแบบ รวมถึงขนาดความสูงของชั้น slice

2. การตั้งค่าชนิดของวัสดุและความหนาของแต่ละ Slice ดังนี้ วัสดุที่ใช้สร้างมี 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุส่วนที่ใช้สร้างต้นแบบ (modeler type) ได้แก่พลาสติกชนิด Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ซึ่งเป็นเทอร์โมพลาสติก (thermoplastic) ชนิดหนึ่งและวัสดุส่วนที่ใช้เป็นตัวค้ำยันชิ้นงานต้นแบบ (support material) ชนิด SR-20 เป็น Acrylic copolymer วัสดุที่ใช้ทั้ง 2 ชนิดมีค่า Hazardous



รูปที่ 9 แสดงหน้าจอสำหรับกำหนดชนิดของวัสดุสร้างชิ้นงาน

Materials Identification System (HMIS: American Coatings Association) ในด้าน Health Hazard = 1 (Irritation or minor reversible injury possible), Flammability = 0, Physical Hazard = 0 นั่นคือมีความปลอดภัยมากในการสร้างชิ้นงานในพื้นที่ปกติที่มีผู้คนผ่านไปมาได้

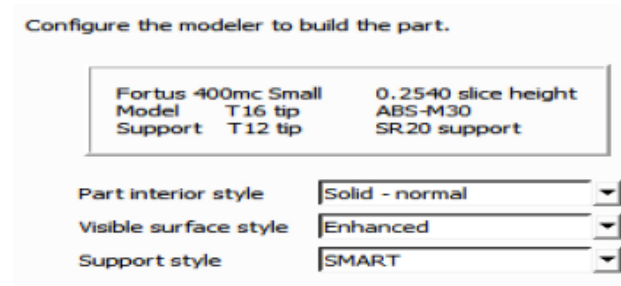
3. เลือกชนิดพื้นผิวของชิ้นงานต้นแบบ 3 มิติ (Visible surface style) แนะนำให้เลือกเป็น Enhance เพื่อเพิ่มความแข็งแรง พื้นที่ด้านใน (Part interior style) เลือก Solid-normal และ Support เลือก SMART เพื่อประหยัดวัสดุและลดเวลาในการสร้างชิ้นงาน

4. ส่งข้อมูลพารามิเตอร์ในการสร้างชิ้นงาน 3 มิติ และโปรแกรมจะจัดเก็บในรูปแบบไฟล์นามสกุล CMB โดยอัตโนมัติ

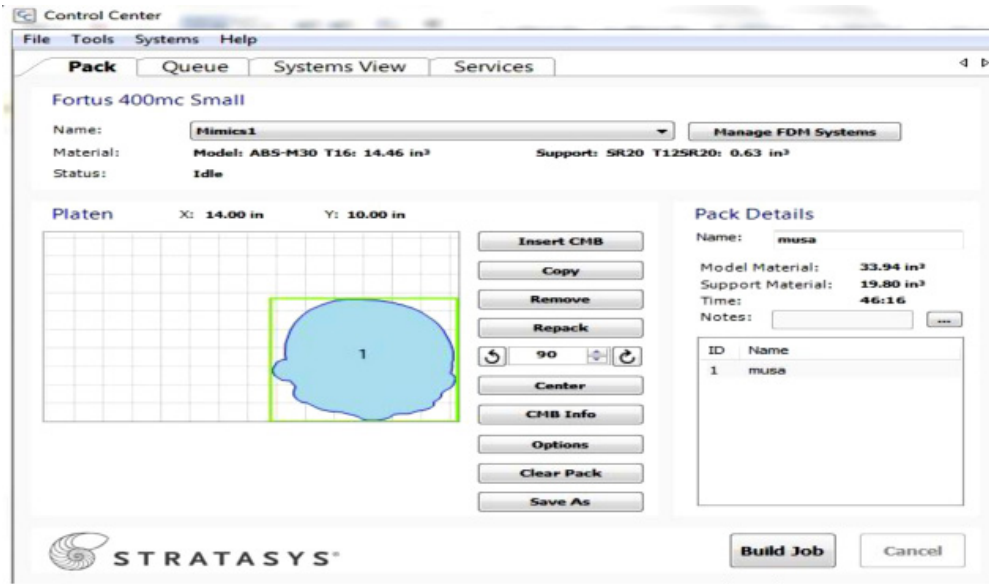
5. สร้างชิ้นงานด้วยโปรแกรม Control Center 8.1 สำหรับเครื่อง FDM Fortus 400 mc (AppliCAD) เปิดไฟล์นามสกุล CMB ที่ต้องการสร้าง โปรแกรมจะสร้างภาพจำลองของชิ้นงานต้นแบบ เพื่อกำหนดตำแหน่งจัดวางเพื่อการสร้างชิ้นงานจริง

6. โปรแกรมจะคำนวณข้อมูลสำคัญในการสร้างชิ้นงานต้นแบบ 3 มิติ เช่น ชนิดของเข็มฉีดยาพลาสติกที่ใช้ จำนวนวัสดุที่ใช้ทั้งในส่วน of model material และ support material ระยะเวลาในการสร้างชิ้นงาน รวมถึงสามารถแสดงลำดับการส่งงานกรณีส่งหลายชิ้นงานหรือต้องการสั่งงานที่เคยสั่งไว้แล้ว

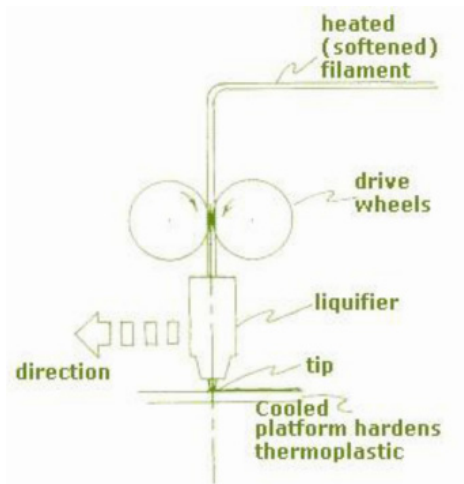
7. ในการสั่งสร้างชิ้นงานสามารถสร้างชิ้นงานได้



รูปที่ 10 แสดงหน้าจอสำหรับการกำหนดเทคนิคในการขึ้นชิ้นงาน



รูปที่ 11 แสดงหน้าจอสำหรับการกำหนดตำแหน่งอวัยวะในพื้นที่ขึ้นชิ้นงานจริง



รูปที่ 12 แสดงหลักการสร้างภาพของระบบ FDM และชิ้นงานที่ผลิตได้จริง

หลายชิ้นงาน ในพื้นที่ 14x14 ตารางนิ้ว โดยการนำเข้าไฟล์ CMB อื่นๆ โดยโปรแกรมจะตรวจสอบตำแหน่งให้ไม่ซ้อนทับกัน และจะแสดงข้อมูลจำนวนวัสดุที่ใช้และเวลาในการสร้างชิ้นงานเป็นตัวเลขรวม

8. สร้างด้วยการสั่ง build job ข้อมูลต่างๆ จะถูกส่งไปยังเครื่อง FDM Fortus 400mc ทั้งนี้ หากเครื่องพร้อมสร้างจะสร้างชิ้นงานทันที หากไม่พร้อมสร้าง คำ

สั่งสร้างจะถูกกำหนดไว้เป็นคิวที่ 1 รอการสร้างต่อไป

### เครื่องสร้างชิ้นงานต้นแบบรวดเร็ว

เครื่องสร้างชิ้นงานต้นแบบ (rapid prototyping) ที่ได้รับความนิยมจะเป็นเครื่องสร้างชิ้นงานชนิด Fused Deposition Modeling (FDM) เทคโนโลยีนี้มีหลักการทำงานคือฉีดพลาสติกที่ถูกหลอมละลายผ่าน nozzle ที่สามารถ



รูปที่ 13 แสดงหน้าจอของเครื่อง FDM เพื่อการสร้างชิ้นงาน



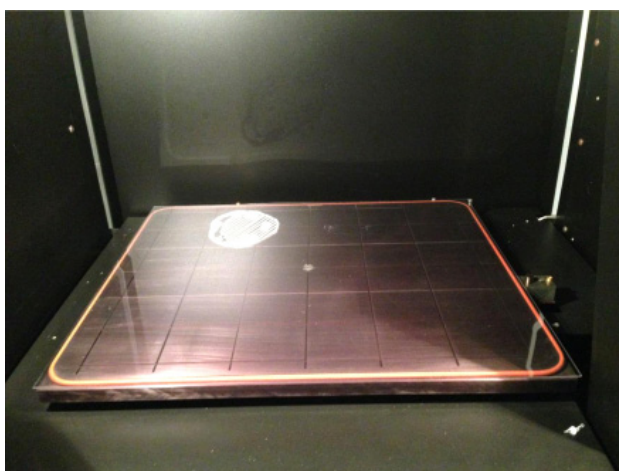
รูปที่ 16 แสดงหน้าจอของเครื่อง FDM เพื่อกำหนดตำแหน่งที่ทดสอบการสร้างชิ้นงาน



รูปที่ 14 แสดงหน้าจอของเครื่อง FDM เพื่อการตรวจสอบปริมาณวัสดุสำหรับสร้างชิ้นงาน



รูปที่ 17 แสดงชิ้นงานที่สร้างเสร็จแล้วประกอบด้วยชิ้นงานและวัสดุค้ำยัน



รูปที่ 15 แสดงพื้นที่ภายในของเครื่อง FDM ที่จะทำการสร้างชิ้นงาน



รูปที่ 18 แสดงชิ้นงานที่ล้างวัสดุค้ำยันออกแล้ว

เปิดปิดการฉีดได้ และเคลื่อนที่ตามแกนต่างๆ เพื่อสร้างโมเดลโดยการคำนวณเชิงเลขคณิตของคอมพิวเตอร์ (Computer-aided-manufacturing CAM) และสร้างชิ้นงานขึ้นมาทีละชั้น การพิมพ์แบบ FDM ใช้ได้กับวัสดุหลายประเภท ส่วนมากจะจำกัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง

กลางของ filament (เส้นพลาสติก) ไว้ที่ 1.75 มม. และ 3 มม. วัสดุที่ใช้คือ thermoplastics หลายประเภท เช่น ABS, PC, PPSF ชิ้นงานที่ได้จากวิธีการนี้将有ความแข็งแรงสูงทนต่อความชื้นและความร้อนได้ดี

วัสดุสำคัญของการทำต้นแบบ 3 มิติ คือ Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) เป็นพลาสติกที่ใช้กันมากในปัจจุบัน ตัว ABS เป็นเทอร์โมพลาสติกที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาของสไตรีน อะคริโลไนไตรล์ และโพลิบิวทาไดอีน ซึ่งผู้ผลิตแต่ละรายจะใช้สัดส่วนของโมโนเมอร์ทั้งสามต่างกันไป ABS นั้นให้ผิวหน้าของการพิมพ์ที่คุณภาพสูงกว่า และมีความยืดหยุ่นเหนียวกว่า แต่ในการพิมพ์ก็ต้องใช้ความร้อนสูงกว่า (มากกว่า 230 องศาเซลเซียส) จำเป็นต้องมีแท่นความร้อนเพื่อให้พลาสติกเกาะตัว

1. เมื่อต้องการจะสร้างชิ้นงานต้นแบบ จะต้องตรวจสอบหัวฉีดพลาสติกและพลาสติกที่ไหลได้ไว้เพื่อการผลิตจะต้องเหมือนกับชนิดที่ใช้กำหนดในการสร้างโครงสร้างชิ้นงานต้นแบบ

2. ตรวจสอบปริมาณพลาสติกให้เพียงพอต่อการสร้างชิ้นงาน หากสิ่งชิ้นงานหลายชิ้น เครื่องจะสร้างชิ้นงานจนหมดวัสดุที่มี ผู้สร้างชิ้นงานจะต้องไหลวัสดุเพิ่มในภายหลัง การสร้างชิ้นงานจึงจะดำเนินต่อไปได้

3. ภายในเครื่องจะต้องจัดวางแผ่นอะคริลิกชนิดใสบนแท่นรอง โดยแผ่นอะคริลิกจะถูกยึดเข้าด้วยกันแทนด้วยระบบสูญญากาศเพื่อป้องกันการเลื่อนขยับระหว่างสร้างชิ้นงาน

4. ตรวจสอบพื้นที่ที่เข็มฉีดพลาสติกจะเคลื่อนผ่าน (bounding box) เพื่อสร้างชิ้นงานต้นแบบ จะต้องตรวจสอบจัดตำแหน่งให้เหมาะสม

5. สร้างชิ้นงานต้นแบบ ได้แก่ หนุนจำลองอวัยวะสามมิติ ซึ่งใช้เวลาระหว่าง 12-48 ชม. ตามขนาด และหากสิ่งชิ้นงานมากกว่า 1 ชิ้น เวลาในการสร้างจะมากขึ้น

6. เมื่อเสร็จสิ้นการสร้างชิ้นงาน (finishing step)

จะต้องนำชิ้นงานต้นแบบไปล้างในน้ำผสมโซดาไฟที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียสเพื่อละลาย Support material ที่ค้ำยันชิ้นงานไว้ ออกด้วยเครื่องล้างอัลตราโซนิค (Ultrasonic Cleaner) ใช้เวลาละลายพลาสติกค้ำยันประมาณ 8-14 ชม.

7. นำชิ้นงานต้นแบบไปล้างน้ำสะอาด อาจขัดน้ำยาล้างจานเพื่อขจัดคราบโซดาไฟ จากนั้นผึ่งให้แห้งจะได้ชิ้นงานที่แข็งแรง

### การทำ Orthopedics engineering

ในทางวิศวกรรมออร์โธปิดิกส์นั้น ให้ความสำคัญกับการสร้างชิ้นงานต้นแบบจำลองอวัยวะ 3 มิติ และการจำลองการผ่าตัด การออกแบบทดลองจัดวางวัสดุฝังในบนต้นแบบทางการแพทย์ก่อนการผ่าตัดจริง ซึ่งเนื้องานหลัก ได้แก่

การออกแบบตัวนำทางในหัตถการ pedicle screw ซึ่งจะช่วยเพิ่มความแม่นยำและช่วยลดปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยและบุคลากรรักษาได้รับ ซึ่งนำไฟล์ข้อมูลที่ได้จาก CT มาทำ 3D Imaging ด้วยโปรแกรม Mimic และวางแผนที่จะใส่ Pedicle screw

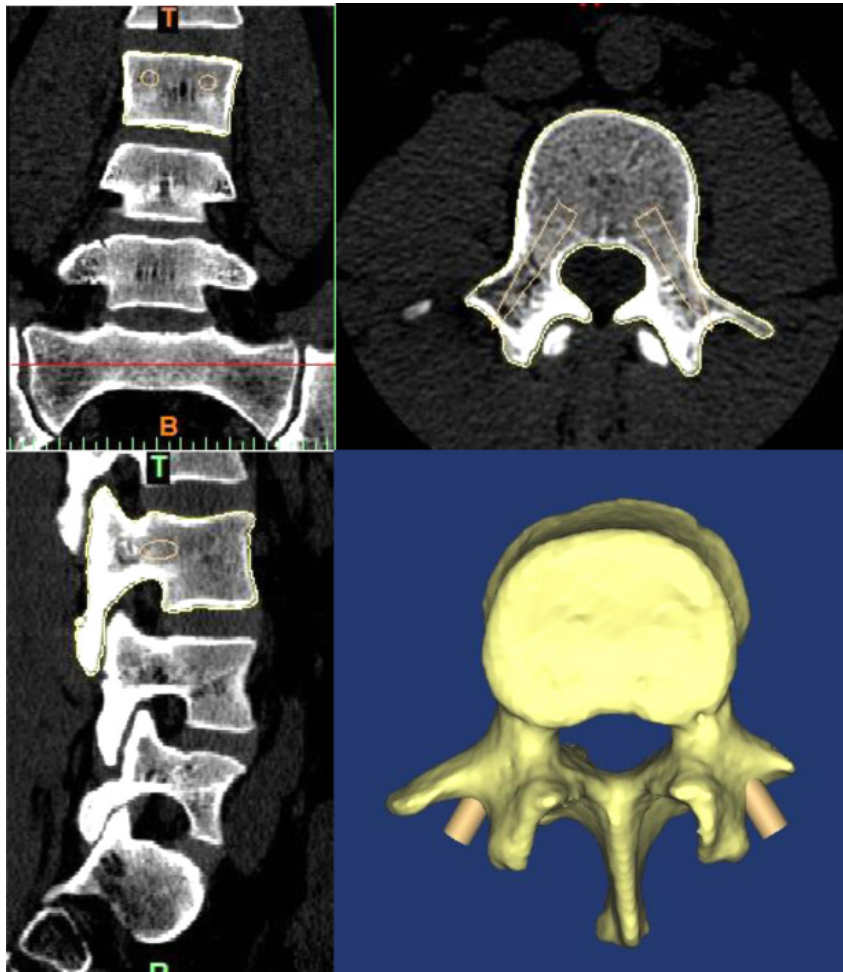
จากนั้นทำ guide base plate ด้วยโปรแกรม 3 matic จะทาบลงบนภาพสามมิติของกระดูกสันหลัง

ออกแบบ drilling pin และกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ drilling pin (รูปที่ 20) และสร้าง drilling pin hole (รูปที่ 21)

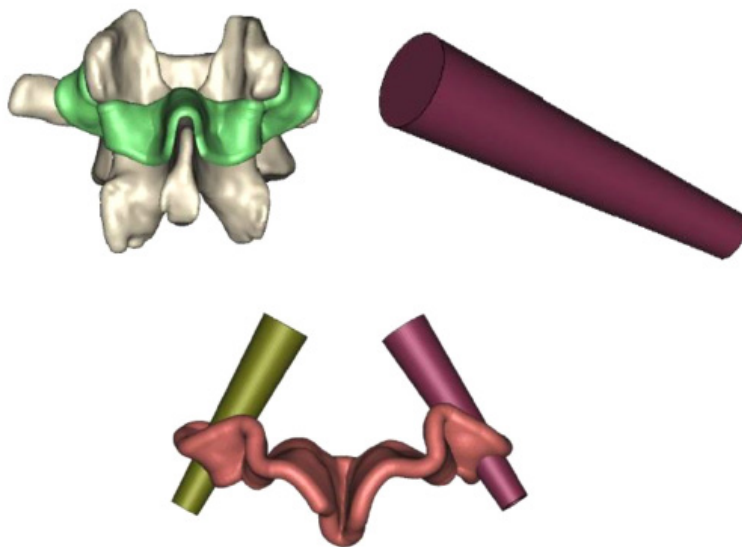
นำ guide base plate ที่สร้างเสร็จแล้วทำ Subtraction กับ spine จะได้ pedicle screw guide template ซึ่งนำไปเป็นอุปกรณ์ร่วมสำหรับหัตถการ pedicle screw guide โดยการขึ้นรูปชิ้นงานสามมิติแล้วนำไปผ่านกระบวนการปลดเชื่อดังภาพข้างล่าง

### การทำ Dental 3D scanning and Measuring

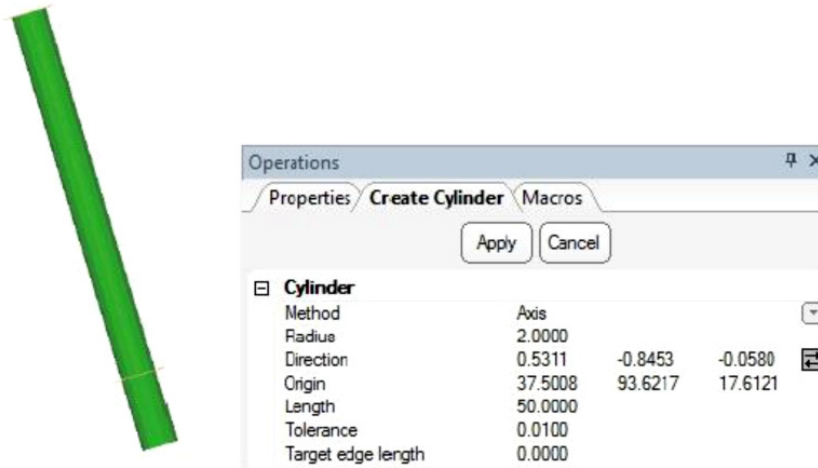
การสร้างภาพ 3 มิติด้วยเครื่องเอกซเรย์คอมพิวเตอร์



รูปที่ 19 แสดงหน้าจอกของโปรแกรม Mimic เพื่อกำหนดตำแหน่งใส่ Pedicle screw



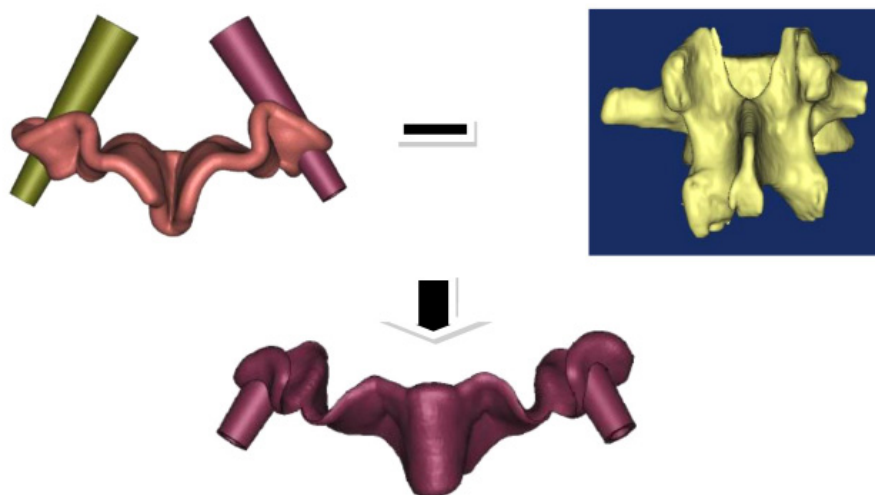
รูปที่ 20 แสดงการทำ guide base plate



รูปที่ 21 แสดงการกำหนดขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของ drilling pin



รูปที่ 22 แสดงการสร้าง drilling pin hole



รูปที่ 23 แสดงการทำ Subtraction ระหว่าง guide base plate กับ spine



รูปที่ 24 แสดงการใช้แบบจำลอง 3 มิติเพื่อวางตำแหน่งรากฟันเทียม

ที่มา: Institute of Dental Implants & Periodontics(2016). <http://implantdentist.co.nz/>

สำหรับฟันจะช่วยให้ได้ข้อมูลสำหรับการสร้างภาพและการวัดขนาดต่างๆ เพื่อการวางแผนก่อนการรักษา โดยสามารถสร้างเป็นแบบจำลอง 3 มิติเพื่อการวางตำแหน่งรากฟันเทียม การเชื่อมต่อระหว่างกระดูกกับรากฟันเทียมที่แม่นยำและเที่ยงตรงโดยใช้หลักการเดียวกันกับการทำ pedicle screw guide

### ข้อพิจารณาเลือกการสร้างชิ้นงานต้นแบบ

แม้เทคโนโลยีการสร้างชิ้นงานต้นแบบจะมีความก้าวหน้า แต่ก็ยังมีความยุ่งยากและซับซ้อนในการสร้างชิ้นงาน ดังนั้น ในการเลือกสร้างชิ้นงานต้นแบบ จะต้องพิจารณาขอบเขตข้อคำนึงถึง ได้แก่

1. ราคาและค่าใช้จ่าย (Cost) : ค่าเครื่องจักร ค่าติดตั้ง ค่าซ่อมบำรุง ค่าอะไหล่ ค่าวัสดุ

2. การใช้งานและการดูแลรักษา (Operation and Maintenance) เทคโนโลยีนี้จำเป็นที่จะต้องใช้เจ้าหน้าที่ที่มีความชำนาญและผ่านการอบรมการใช้งานมาอย่างดีจึงจะสามารถใช้งานเครื่องจักรได้และดูแลเครื่องจักรได้ดีด้วย

3. เวลาที่ใช้ในการสร้างชิ้นงาน (Time) : เวลาทั้งหมดโดยเริ่มตั้งแต่ ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล เตรียมวัสดุ เตรียมเครื่องจักร ขั้นตอนในการขึ้นรูป และขั้นตอนหลังจากขึ้นรูป หรือ Post processing ของเทคโนโลยีนี้ ใช้

เวลาระหว่าง 4-72 ชั่วโมง ขึ้นกับขนาดและปริมาตรของพลาสติกที่กำหนดสำหรับชิ้นงาน

4. ลักษณะในการนำชิ้นงานต้นแบบไปใช้งาน (Application) : ขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการใช้งานต่างๆ ดังนี้

4.1 Design View (Concept Design) สำหรับชิ้นงานที่ต้องการนำมาตรวจสอบความถูกต้องของรูปร่างหรือลักษณะภายนอกทั้งหมด ก็สามารถเลือกเทคโนโลยีที่สามารถผลิตได้เร็ว และไม่ต้องเที่ยงตรงมากนัก

4.2 Form/fit and Assembly สำหรับชิ้นงานที่ต้องการนำมาประกอบ ต้องผลิตด้วยเทคโนโลยีที่สามารถผลิตชิ้นงานที่มีความเที่ยงตรงสูงและความแข็งแรงของชิ้นงานที่เพียงพอ

4.3 Presentation Models ชิ้นงานจำเป็นจะต้องมีความแข็งแรง เนื่องจากจะต้องนำไปจัดแสดงจึงต้องการความคงทนสูง

### สรุป

รังสีวิทยาเป็นสาขาทางวิชาการที่ก้าวหน้าทั้งด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการแพทย์ เครื่องมือทางรังสี โปรแกรมการตรวจและสร้างภาพดิจิทัล และงานประมวลผลภาพดิจิทัลและมีขอบข่ายงานที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมชีวการแพทย์ในหลายสาขา ได้แก่ การสร้างภาพวินิจฉัยระดับโมเลกุล การสร้างงานต้นแบบ 3

มิติ งานวิศวกรรมออร์โธปิดิกส์และอวัยวะเทียม ภาค วิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์ศิริราชพยาบาลได้นำร่องในงานด้าน การสร้างงานต้นแบบ 3 มิติ และ cranio-maxillo-facial segmentation งานด้าน orthopedics engineering and prosthesis และงานด้านทันตกรรม (dental 3D scanning and Measuring)

การสร้างชิ้นงานต้นแบบมีขั้นตอนที่ต้องการผู้เชี่ยวชาญในการสร้างชิ้นงาน เพื่อให้กระบวนการในการสร้าง segmentation และ 3D creation มีชิ้นงานที่มีคุณภาพ การดูแลและรักษาเครื่องสร้างชิ้นงานต้นแบบ รวดเร็วให้มีประสิทธิภาพ การเลือกใช้วัสดุและการกำหนดพารามิเตอร์ในการสร้างเพื่อให้เกิดความประหยัดและคุ้มค่า รวมไปถึงการให้ข้อเสนอแนะแก่แพทย์ฝ่ายต่างๆ ถึงข้อดีข้อควรพิจารณาในการสร้างชิ้นงานต้นแบบ รวมไปถึงความร่วมมือในเชิงสหวิทยาการ เพื่อการขยายงานเชิงวิจัยต่อไปเพื่อการพัฒนาเทคโนโลยีวิศวกรรมชีวการแพทย์เพื่อการพัฒนาคุณภาพชีวิตแก่ประชาชนชาวไทย

#### บรรณานุกรม

1. แล็บคอมพิวเตอร์ 'สร้างต้นแบบอวัยวะ' แห่งแรกของประเทศ .สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2559 จาก <https://www.mtec.or.th/index.php/2013-05-29-09-06-21/2013-05-29-09-39-49/97>
2. จุฬา เปิดต้นนวัตกรรมวิศวกรรมทางการแพทย์ ผลงานวิจัยแบบสหสาขาวิชา สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2559 จาก <http://www.cicc.chula.ac.th/th/news-event/501-news-20150729-6-thai.html>
3. ไพรัช สายวิรุณพร, วิปร วิประกษิต, อติศักดิ์ มณีไสย, นกตล ศิริธนารัตนกุล, Wood, J.C., รุ่งโรจน์ กฤตยพงษ์. (2555). ตรวจจพบความสมเหตุสมผลระหว่างสถาบันสำหรับการวิเคราะห์ค่า T2\* ของหัวใจโดยวิธีแบบจุดภาพในผู้ป่วยกล้ามเนื้อหัวใจตายเฉียบพลัน. 95(suppl2): S165-172.
4. Azimi, P., Zhao, D., Pouzet, C., Crain, N.E., Stephens, B. (2016). Emissions of ultrafine particles and volatile organic compounds from commercially available desktop three-dimensional printers with multiple filaments. *Environmental science & technology*, 50: 1260-8.
5. Brennan, J. (2010). Production of anatomical models from CT scan data. Master Dissertation. De Montfort university, Leicester, United Kingdom.
6. Direksunthorn, T., Chawalparit, O., Sangruchi, T., Witthiweij, T., Tritrakarn, S. O., Piyapittayanan, S. (2013). Diagnostic performance of perfusion MRI in differentiating low-grade and high-grade gliomas: advanced MRI in glioma, A Siriraj project. *J Med Assoc Thai*. 96(9): 1183-90.
7. Hnatkova, E., Kratyk, P., Dvorak, Z. (2014). Production of anatomical models via rapid prototyping. *International journal of circuits, systems and signal processing*, 8: 479-86.
8. Mahaisavariya B., Sitthiseripatip K., Oris P., Tongdee T. (2006). Rapid prototyping model for surgical planning of corrective osteotomy for cubitus varus: report of two cases. *Injury Extra*, 37: 176-180.
9. Materialise. (2012). Mimics innovation suite-engineering on anatomy. Training guide.
10. Software & services for biomedical engineering. สืบค้นเมื่อ 13 มกราคม 2559 จาก <http://biomedical.materialise.com>.
11. Noel, G. (2015). Rapid prototyping: an educational extension of anatomy coloring textbooks. *J Hum Anat Physiol*, 1: 1-4.
12. Pawar, A.G., Bansode, K.B. (2015). Production of anatomical models by rapid prototyping technology. *International journal of engineering sciences & research technology*, 4: 600-11.
13. Sekou Singare, S., Qin Lian, Q., Wang, W.P., Wang, J., Liu, Y., Dichen, L., Lu, B. (2009). Rapid prototyping assisted surgery planning and custom implant design. *Rapid Prototyping Journal*, 15: 19 - 23.
14. Sherekar, R.M., Pawar, A.N., Bhalerao, S.V. (2014). Rapid prototyping as a tool for designing and manufacturing of customized anatomical implants. *Research and reviews: journal of engineering and technology*, 3: 21-30.
15. Torres, K., Staskiewicz, G., Sniezynski, M., Drop, A., Maciejewski, R. (2011). Application of rapid prototyping techniques for modeling of anatomical structures in medical training and education. *Folia Morphol*, 70: 1-4.